Karlsruher Institut für Technologie

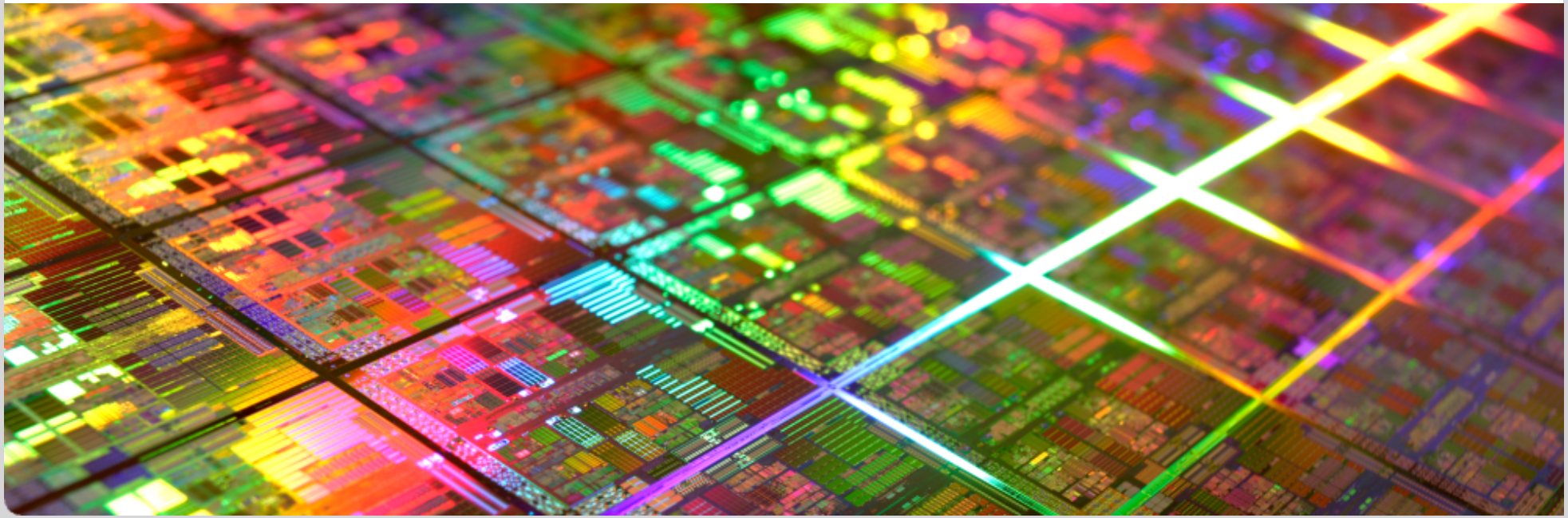
Zentralübung Rechnerstrukturen im SS 2016

Low-Power-Entwurf und Leistungsbewertung

Thomas Becker, Prof. Dr. Wolfgang Karl

Lehrstuhl für Rechnerarchitektur und Parallelverarbeitung

12. Mai 2016



Überblick

Low-Power-Entwurf

- Leistungsverbrauch/Leistungsaufnahme

Leistungsbewertung

- **Quantifizierung der Leistungsfähigkeit?**
  - Was ist Leistungsfähigkeit?
  - Was bedeutet “schneller”?
  - Wie sind Systeme zu vergleichen?
- **Entscheidung bei Entwurf, Auswahl und Veränderung von Rechenanlagen**
  - Objektive Quantifizierung
  - Erfassen von Teilaspekten
  - Erfassen des gesamten Systems

Motivation Low-Power Entwurf

- Mobile Geräte haben begrenzte Energiemenge in Form von Batterien und Akkumulatoren
  - $\Rightarrow$ Betriebszeit verlängern
  - $\Rightarrow$ Überhitzung vermeiden
- Stichwort „Green IT“
- Steigerung Rechenleistung: Faktor 10000
- Steigerung Rechenleistung/Watt: Faktor 300

Low-Power-Entwurf

- $P = \frac{E}{t}$
  - bei elektrischen Geräten: Leistungsaufnahme bezeichnet aufgenommene/verbrauchte Energie pro Zeit

$$P_{total} = P_{switching} + P_{shortcircuit} + P_{static} + P_{leakage}$$

$P_{switching}$: Leistungsaufnahme durch Umladen der kapazitiven Last

Schaltleistung: $P_{switching} = C_{eff} * U^2 * f$

$P_{shortcircuit}$: Leistungsaufnahme aufgrund von Kurzschluss im CMOS-Gatter bei Zustandsänderung

P_{static}: Statische Leistungsaufnahme der Schaltung

$P_{leakage}$: Leckströme

Low-Power-Entwurf

Leckströme

- Einfluss des Leckstroms steigt durch zunehmende Integrationsdichte
- Temperaturerhöhung steigert Einfluss der Leckstroms
- Variation der Versorgungsspannung und Taktfrequenz

$$P \sim f * U^2$$

- Je geringer die Versorgungsspannung, desto geringer die maximal mögliche Taktfrequenz

$$f \sim U$$

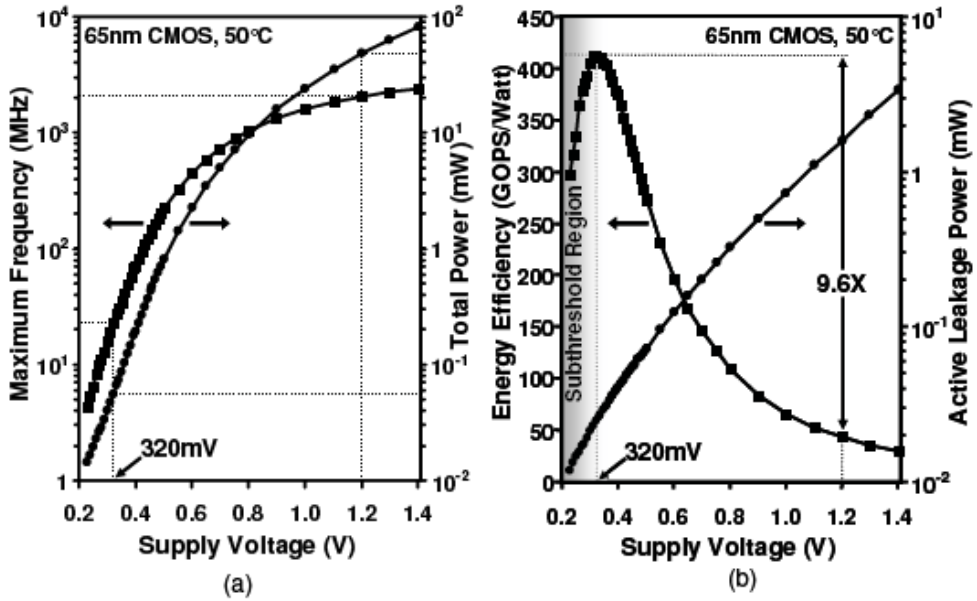
$\Rightarrow$ **Kubus-Regel** für simultane Änderung der Versorgungsspannung und Taktfrequenz:

$$P \sim U^3 \qquad P \sim f^3$$

Elektrische Leistung und Energie

a) Zusammenhang Versorgungsspannung, Taktfrequenz und Leistung

b) Zusammenhang Versorgungsspannung, Energieeffizienz und Leckströme



Source: ExaScale Computing Study: Technology Challenges in Achieving Exascale Systems

Energieverbrauch

- Unter idealen Voraussetzungen ist für konstante Zeit t_k der **Energieverbrauch E** proportional zur Taktfrequenz **f**: **E** $\sim$ **f**
- Unter idealen Bedingungen ist die für eine zu erfüllende Aufgabe benötigte Zeit t_a umgekehrt proportional zur Taktfrequenz
  - $\Rightarrow$ Dadurch Energieverbrauch zur Erfüllung einer Aufgabe unabhängig von der Taktfrequenz!
- Unter Berücksichtigung der **statischen** Leistungsaufnahme wächst Energieverbrauch bezogen auf eine zu erfüllende Aufgabe mit abnehmender Taktfrequenz!
  - Je länger Ausführung der Aufgabe durch Verringerung der Taktfrequenz, desto länger liegt statischer Teil der Leistungsaufnahme an!

Energiespartechniken

- **Ziel**: Senkung der Leistungsaufnahme ohne Einbußen in der Verarbeitungsgeschwindigkeit und damit auch Senkung des Energiebedarfs für die Bearbeitung einer Aufgabe
- Durch Optimieren der Systemarchitektur
  - Unnötigen Energieverbrauch erkennen und durch sinnvolles Zusammenwirken der Systemkomponenten vermeiden
- Für Desktop- und Serversysteme:
  - Einsatz von Multicore-CPUs
    - $\Rightarrow$ Parallelverarbeitung anstelle Frequenzerhöhung
  - Einsatz energiesparender spezialisierter Prozessorkerne
- Energiespartechniken auf den verschiedenen Ebenen des Entwurfs möglich

Low-Power-Entwurf – Aufgabe 1

Karlsruher Institut für Technologie

Die Kernspannung von Prozessoren ist seit den 80er Jahren von 5 V auf 0,8 V gesenkt worden. Im gleichen Zeitraum stieg die Frequenz von 1 MHz auf 3 GHz.
Was bedeutet dies für die aufgenommene elektrische Leistung?

- Spannungsabsenkung:
  $U: \quad 0,8\ V \leftrightarrow 5\ V$
  $U^2: \quad 0,64/25 = 0,0256$
- Frequenzerhöhung:
  $f: \quad 3000\ MHz/1\ MHz = 3000$
- Aus $P \sim U^2 * f$ resultiert eine Zunahme der elektrischen Leistung um den Faktor
  $0,0256 * 3000 = 76,8$

Low-Power-Entwurf – Aufgabe 1

Karlsruher Institut für Technologie

Die Kernspannung von Prozessoren ist seit den 80er Jahren von 5 V auf 0,8 V gesenkt worden. Im gleichen Zeitraum stieg die Frequenz von 1 MHz auf 3 GHz.
Was bedeutet dies für die aufgenommene elektrische Leistung?
Ein neuerer Prozessor hat bei einer Frequenz von 3,5 GHz noch 0,6 V Kernspannung. Wie ändert sich dadurch die aufgenommene elektrische Leistung?

- Spannungsabsenkung:
  $U: \quad 0,6\ V \leftrightarrow 0,8\ V$
  $U^2: \quad 0.36/0,64 = 0,5625$
- Frequenzerhöhung:
  $f: \quad 3,5\ GHz/3\ GHz \approx 1,167$
- $P \sim U^2 * f = 0,5625 * 1,167 \approx 0,66$
  bedeutet eine Abnahme der notwendigen elektrischen Leistung.

Low-Power-Entwurf – Aufgabe 2

Karlsruher Institut für Technologie

Zum Übertakten von Prozessoren wird die Kernspannung erhöht.
Warum ist dies so?
Wie fließt die Erhöhung der Kernspannung in die Leistungsaufnahme ein und was bedeutet dies?

- Steilere Taktflanken nötig um schneller gültiges Signallevel zu erreichen
- Durch höhere Spannung schnelleres Laden von C_{eff} und damit steilere Tanktflanken
- $P_{switching} = C_{eff} * U^2 * f$

- Nachteil: Spannung fließt quadratisch in Formel ein

Low-Power-Entwurf – Aufgabe 3

Welcher Bestandteil der Leistungsaufnahme war früher vernachlässigbar, spielt heute jedoch eine überaus zentrale Rolle?

- Aufgrund der immer weiter ansteigenden Integrationsdichte spielen mittlerweile die **Leckströme** eine erhebliche Rolle bei der Leistungsaufnahme.
- Wegen der Leckströme führt eine Verkleinerung der Strukturen nicht automatisch zu einer Reduzierung der Stromaufnahme, was eine höhere Taktung ermöglicht.
- Leckströme steigen mit höherer Temperatur.

Low-Power-Entwurf

Schaltwahrscheinlichkeiten sind im Low-Power-Bereich von Bedeutung.

Signalwahrscheinlichkeit - Beispiel: UND-Gatter

Gegeben sei ein UND-Gatter mit zwei Eingängen. Die Eingangswerte 0, 1 seien gleichverteilt.

- UND: 1, wenn beide Eingänge 1, sonst 0
- 4 Möglichkeiten (00, 01, 10, 11), nur 11 ergibt 1 am Ausgang
- **Signalwahrscheinlichkeit**:
  $\mathbb{P}_{Ausgang}(1) = \frac{1}{4}, \qquad \mathbb{P}_{Ausgang}(0) = \frac{3}{4}$
- Berechnung auch über boolesche Funktion möglich:
  $$\mathbb{P}_{Ausgang}(1) = \mathbb{P}(a = 1 \wedge b = 1) = \mathbb{P}(a = 1) * \mathbb{P}(b = 1)$$
  $$= \frac{1}{2} * \frac{1}{2} = \frac{1}{4}$$

Low-Power-Entwurf

Schaltwahrscheinlichkeit - Allgemeine Formel

Wahrscheinlichkeit, dass Gatter schaltet:

$$
\begin{aligned}
\mathbb{P}_{Schalt} &= \mathbb{P}(0 \rightarrow 1 \vee 1 \rightarrow 0) \\
&= \mathbb{P}(0 \rightarrow 1) + \mathbb{P}(1 \rightarrow 0) \\
&= \mathbb{P}(0) * \mathbb{P}_{neu}(1) + \mathbb{P}(1) * \mathbb{P}_{neu}(0) \\
&= \mathbb{P}(0) * \mathbb{P}(1) + \mathbb{P}(0) * \mathbb{P}(1) \\
&= 2 * \mathbb{P}(1) * \mathbb{P}(0) \\
&= 2 * \mathbb{P}(1) * (1 - \mathbb{P}(1))
\end{aligned}
$$

Daher zunächst Berechnung von $\mathbb{P}(1)$ je Gatter

Low-Power-Entwurf – Aufgabe 4

Karlsruher Institut für Technologie

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

Allgemeine Formel

$$\mathbb{P}_{Schalt} = 2 * \mathbb{P}(1) * (1 - \mathbb{P}(1))$$

Low-Power-Entwurf – Aufgabe 4

Allgemeine Formel der Schaltwahrscheinlichkeit

$$\mathbb{P}_{Schalt} = 2 * \mathbb{P}(1) * (1 - \mathbb{P}(1))$$

- Signalwahrscheinlichkeit ODER-Gatter:

$$\begin{aligned}\mathbb{P}_{Ausgang}(1) &= 1 - \mathbb{P}_{Ausgang}(0) \\ &= 1 - \mathbb{P}(a = 0 \wedge b = 0) \\ &= 1 - (1 - \tfrac{1}{4}) * (1 - \tfrac{3}{4}) = 1 - \tfrac{3}{4} * \tfrac{1}{4} = \tfrac{13}{16}\end{aligned}$$

- Alternative (direkte) Berechnung:

$$\begin{aligned}\mathbb{P}_{Ausgang}(1) &= \mathbb{P}(a = 1 \wedge b = 0) + \mathbb{P}(a = 0 \wedge b = 1) \\ &\quad + \mathbb{P}(a = 1 \wedge b = 1) \\ &= \tfrac{1}{4} * \tfrac{1}{4} + \tfrac{3}{4} * \tfrac{3}{4} + \tfrac{1}{4} * \tfrac{3}{4} \\ &= \tfrac{1}{16} + \tfrac{9}{16} + \tfrac{3}{16} = \tfrac{13}{16}\end{aligned}$$

Low-Power-Entwurf – Aufgabe 4

Karlsruher Institut für Technologie

Allgemeine Formel der Schaltwahrscheinlichkeit

$$\mathbb{P}_{Schalt} = 2 * \mathbb{P}(1) * (1 - \mathbb{P}(1))$$

- Signalwahrscheinlichkeit ODER-Gatter:
  $\mathbb{P}_{Ausgang}(1) = \frac{13}{16}$

- Schaltwahrscheinlichkeit ODER-Gatter:
  $\mathbb{P}_{Schalt} = 2 * \mathbb{P}(1) * (1 - \mathbb{P}(1))$
  $\mathbb{P}_{Schalt} = 2 * \frac{13}{16} * (1 - \frac{13}{16})$
  $= \frac{2*13*3}{16*16} = \frac{39}{128}$

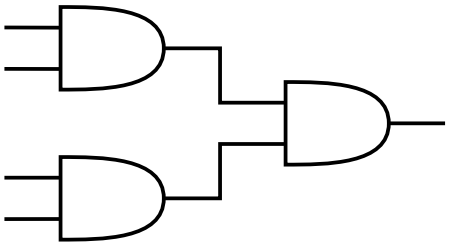
Low-Power-Entwurf – Aufgabe 5

Karlsruher Institut für Technologie

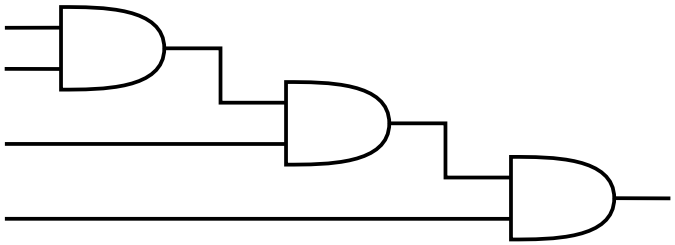
Auswirkung von Schaltwahrscheinlichkeiten:

- Inwiefern unterscheiden sich die zwei Implementierungen hinsichtlich ihres Schaltverhaltens und dem damit verbundenen Leistungsverbrauch?
- $\mathbb{P}_{Eingangssignal=1} = \mathbb{P}_{Eingangssignal=0} = 0,5$

Variante 1:



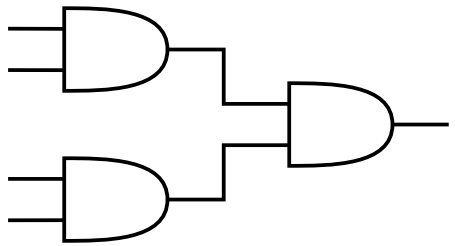
Variante 2:



Low-Power-Entwurf – Aufgabe 5

Variante 1:

- Beide linken UND-Gatter:
  Signalwahrscheinlichkeit:
  $\mathbb{P}_{links}(1) = \frac{1}{2} * \frac{1}{2} = \frac{1}{4}$
  Schaltwahrscheinlichkeit:
  $\mathbb{P}_{Schalt-links} = 2 * \frac{1}{4} * \frac{3}{4} = \frac{3}{8}$

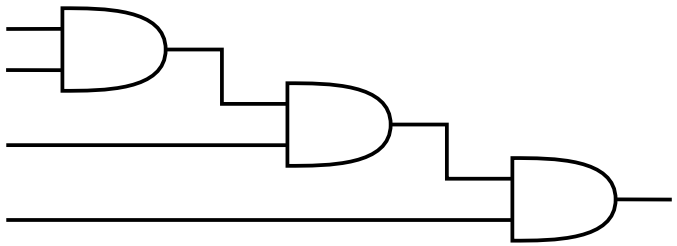


- Rechtes UND-Gatter:
  Signalwahrscheinlichkeiten für Eingänge des rechten Gatters = Ausgangssignalwahrscheinlichkeiten der linken Gatter
  $\mathbb{P}_{rechts}(1) = \frac{1}{4} * \frac{1}{4} = \frac{1}{16}$
  $\mathbb{P}_{Schalt-rechts} = 2 * \frac{1}{16} * \frac{15}{16} = \frac{15}{128}$

- $Summe_{Schaltwahrscheinlichkeiten} = \frac{3}{8} + \frac{3}{8} + \frac{15}{128} = \frac{111}{128}$

Low-Power-Entwurf – Aufgabe 5

Variante 2:

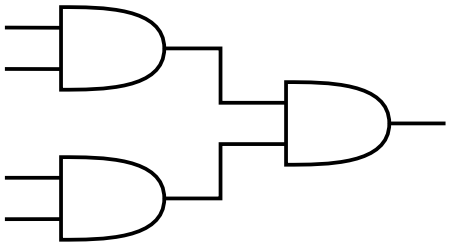


- Signalwahrscheinlichkeit:
  $\mathbb{P}_{links}(1) = \frac{1}{2} * \frac{1}{2} = \frac{1}{4}$
  Schaltwahrscheinlichkeit:
  $\mathbb{P}_{Schalt-links} = 2 * \frac{1}{4} * \frac{3}{4} = \frac{3}{8}$
- $\mathbb{P}_{mitte}(1) = \frac{1}{2} * \frac{1}{4} = \frac{1}{8}$
  $\mathbb{P}_{Schalt-mitte} = 2 * \frac{1}{8} * \frac{7}{8} = \frac{7}{32}$
- $\mathbb{P}_{rechts}(1) = \frac{1}{2} * \frac{1}{8} = \frac{1}{16}$
  $\mathbb{P}_{Schalt-rechts} = 2 * \frac{1}{16} * \frac{15}{16} = \frac{15}{128}$
- $Summe_{Schaltwahrscheinlichkeiten} = \frac{3}{8} + \frac{7}{32} + \frac{15}{128} = \frac{91}{128}$

Low-Power-Entwurf – Aufgabe 5

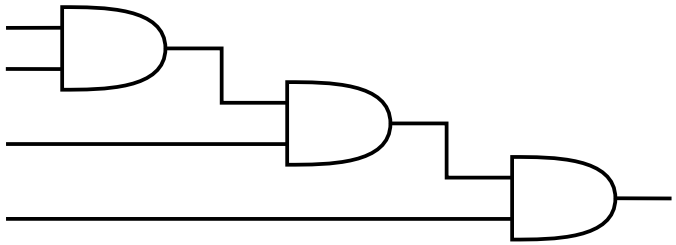
Auswirkung von Schaltwahrscheinlichkeiten:

Variante 1:



- $Summe_{Schaltw'keiten} = \frac{111}{128}$
- Höherer Leistungsverbrauch
- Geringere Durchlaufzeit

Variante 2:



- $Summe_{Schaltw'keiten} = \frac{91}{128}$
- Geringerer Leistungsverbrauch
- Höhere Durchlaufzeit

Leistungsbewertung

Was ist Leistung?

- **Anwendersicht**: Reduzierung von
  - Antwortzeit (response time)
    - Latenzzeit
    - CPU Time (User, System)
  - Ausführungszeit (execution time)

- **Betriebssicht**: Erhöhung von
  - Anzahl durchgeführter Jobs
  - Durchsatz
  - Energieeffizienz (Betriebskosten)

$\Rightarrow$ **Auswertung benötigt Bewertungsverfahren**

Leistungsbewertung

Karlsruher Institut für Technologie

Auswertung von HW-Maßen

- Einfacher Vergleich
- Bewertung sehr spezieller Aspekte (Takt)
- Abhängig von ISA und ausgeführter Befehlssequenz
- Angabe einer hypothetischen Maximalleistung (MIPS)
- Meist nicht/selten aussagekräftig
- Alltagsbeispiel: GHz-Manie $\rightarrow$ QuantiSpeed

Leistungsbewertung

- **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
- **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 abhängig
  - Nur unter gleichen Bedingungen (Sourcecode, Compiler, OS) direkt vergleichbar.

Leistungsbewertung

- **CPI** (Zyklen pro Instruktion)
  $CPI = \frac{c}{i}$

- **MIPS** (Million Instructions per Second)
  $MIPS = \frac{i}{t*10^6} = \frac{f}{CPI*10^6}$

- **Taktrate** (Frequenz)
  $f = \frac{c}{t} = \frac{i*CPI}{t}$ [Hz]

- **CPU-Zeit**
  $t_{cpu} = c * t_{Zyklus}$

- **Beachten Sie auch mögliche Umformungen!**

Leistungsbewertung

- **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
  - Programme werden jedoch nicht ausgeführt
  - Berechnung der Ausführungszeit anhand der Ausführungszeiten der Befehle
- Beide Methoden relativ aufwendig und heute kaum noch in Verwendung

Leistungsbewertung

- **Benchmarks**
  - Programmsammlungen im Quellcode
  - Übersetzung & Messung der Ausführungszeiten
  - Probleme: Einfluss von OS und Compiler, Zugriff auf Maschine
  - Synthetische Benchmarks (Whetstone, Dhrystone), Quasi-Simulation von Anwenderprogrammen
  - Kernels (LINPACK, BLAS)
  - Standardisierte Benchmarks (SPEC, TPC, EEMBC...)
- **Ziele**
  - Stellt fairen Vergleich sicher
  - Ermöglicht Angabe einer Maximalleistung

Leistungsbewertung

- **SPEC-Benchmark**
  - Spezialisierte Benchmarks für verschiedene Systeme/Anwendungsbereiche
  - Regelmäßige Aktualisierungen
  - Integer vs. Fließkomma: SPECint / SPECfp
  - Geschwindigkeit vs. Durchsatz (rate)
  - Optimierung: Konservativ (base) vs. aggressiv
  - $SPECratio_x = \frac{t_{ref_x}}{t_{exec}}$
  - Endwerte: geometrisches Mittel über alle Benchmarks

Leistungsbewertung

Karlsruher Institut für Technologie

- **Monitore**
  - Gezielte Abfrage und Akkumulation von HW-Ereignissen
  - Hardware-Monitore
    - Unabhängige physikalische Geräte
  - Software-Monitore
    - Einbau ins BS

    $\Rightarrow$ Beeinflussung der Anwendungsausführung
  - Werkzeug zur Optimierung, weniger zur Klassifizierung
  - Beispiel: Performance Counter
    - Zählen interne Ereignisse (CPU, Cache, . . .)
    - APIs zum Auslesen (intel Performance Counter Monitor, PAPI)

Leistungsbewertung

- **Modelltheoretische Verfahren**
  - Unabhängig von der Existenz eines Rechners
  - Analytische Methoden
  - Simulationen
- **Modellbildung**
  - Trifft Annahmen über Struktur und Betrieb
  - Darstellung der für Analyse relevanten Merkmale
  - Abstrahierung komplexer Systeme
  - Ziele:
    - Aufdecken von Beziehungen zw. Systemparametern
    - Ermittlung von Leistungsgrößen

Leistungsbewertung

- **Analytische Methoden**
  - versuchen Beziehungen mathematisch herzuleiten
  - oft minimaler Aufwand, aber weniger aussagekräftig
  - Deterministisch (feste Werte)
  - Stochastisch (verwendet bestimmte Verteilung)
  - Operationell (gemessen in festem Zeitintervall)
  - Petrinetze, Warteschlangenmodelle, ...

Leistungsbewertung

- **Simulationen**
  - Zentrales Werkzeug für den Rechnerarchitekt
    - Evaluation neuer Ideen
    - Exploration des Entwurfsraums
    - $\Rightarrow$ Möglich ohne Umsetzung in HW
  - Ermöglicht Quantifizierung einer Metrik durch Ausführung einer Arbeitslast
  - Deterministische, stochastische oder aufzeichnungsgesteuerte Simulation

Leistungsbewertung

Karlsruher Institut für Technologie

- **Unterschied zwischen Simulation und Benchmark**
  - Simulator modelliert wesentlichen Eigenschaften oder Verhalten einer Zielmaschine
    - Verschiedene Ebenen bezüglich der Details und Genauigkeit
  - Bechnmarks bewerten eine oder mehrere Komponenten eines Zielmaschine
    - Vergleich verschiedener Architekturen oder Architekturmerkmale

Leistungsbewertung – Aufgabe 1

Karlsruher Institut für Technologie

Welche wichtigen Architekturparameter beeinflussen jeweils die Zykluszeit, die Anzahl der Instruktionen und den CPI-Wert?

- Die **Zykluszeit** hängt von der Organisation und der Technologie ab.
- Die **Anzahl der Instruktionen** ist bedingt durch die Befehlssatzarchitektur und die Güte des Compilers.
- Die **Zyklen pro Instruktion** werden durch die Organisation und die Befehlssatzarchitektur beeinflusst.

Leistungsbewertung – Aufgabe 2

Prozessor A arbeitet ein Problem in 2 ms ab. Er hat ein CPI von 7/5 und benötigt 3.500.000 Instruktionen für die Abarbeitung der Problemstellung. Prozessor B arbeitet dieses Problem ebenfalls in 2 ms ab. Er hat ein CPI von 3/2 und benötigt 1.500.000 Instruktionen.

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

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

$$f_A = \frac{3{,}5 * 10^6 * \frac{7}{5}}{2 * 10^{-3}\, s} = 2450\, MHz, MIPS_A = \frac{2{,}45 * 10^9}{\frac{7}{5} * 10^6\, s} = 1750\, MIPS$$

$$f_B = \frac{1{,}5 * 10^6 * \frac{3}{2}}{2 * 10^{-3}\, s} = 1125\, MHz, MIPS_B = \frac{1{,}125 * 10^9}{\frac{3}{2} * 10^6\, s} = 750\, MIPS$$

Leistungsbewertung – Aufgabe 2

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

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

$t = 2\,ms$

- **Welcher Prozessor ist für dieses Problem zu wählen und warum?**
- Prozessor B, weil
  - ohne Berechnung: Gleich schnell in der Abarbeitung bei wesentlich weniger Instruktionen (1,5 vs. 3,5 Mio Instruktionen)
  - halbe Taktfrequenz ($P \sim U^2 * f$, Fertigung)

Leistungsbewertung – Aufgabe 3

Karlsruher Institut für Technologie

Benchmarks sind eine verlässliche Methode zur Leistungsbewertung. Auf einem 4 GHz-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.

Leistungsbewertung – Aufgabe 3

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

- **Anzahl Instruktionen**

  $\mathbf{i} = \sum \mathbf{i_{typ}} = (300 + 75 + 150 + 25) * 10^3 = 550.000$

- **Taktzyklen**

  $\mathbf{c} = \sum \mathbf{i_{typ}} * \mathbf{c_{typ}}$

  $= (300 * 1 + 75 * 2 + 150 * 3 + 25 * 4) * 10^3 = 1.000.000$

- **Zykluszeit bei 4 GHz Taktfrequenz**

  $\mathbf{t} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{f}} = \frac{1}{4GHz} = 0,25 * 10^{-9} s = 0,25\, ns$

Leistungsbewertung – Aufgabe 3

- **Angaben und bisherige Berechnungen:**
  $f = 4\,GHz \rightarrow t_c = 0,25\,ns$
  $i = 550.000, c = 1.000.000 = 1 * 10^6$

- **Ausführungszeit**
  $\mathbf{t_{exec}} = \mathbf{c} * \mathbf{t_{cyc}}$
  $= 1 * 10^6 * 0,25 * 10^{-9} s = 250 * 10^{-6} s = 250\,\mu s$
- **CPI**
  $\mathbf{CPI} = \frac{\mathbf{c}}{\mathbf{i}} = \frac{1*10^6}{550*10^3} = \frac{100}{55} = \frac{20}{11} \approx 1,82$
- **MIPS**
  $\mathbf{MIPS} = \frac{\mathbf{i}}{\mathbf{t}*\mathbf{10^6}} = \frac{550.000}{250} = 2200$
- **MFLOPS**
  - Wie MIPS, wobei Anzahl der Befehle und Ausführungszeit nur für Fließkommaberechnung
  - $MFLOPS = \frac{75.000}{(75.000*2)*(0,25*10^{-9})*10^6} = \frac{1}{0,5*10^{-3}} = 2000$

Leistungsbewertung – Aufgabe 4

(vergl. Hennessy and Patterson, Computer Architecture A Quantitative Approach, 4. Auflage, S. 43-44.)
Sie haben für Ihre neue Rechnerarchitektur die folgenden Werte experimentell bestimmt:

Befehlstyp	**CPI**	**Anteil**
Fließkomma-Arithmetik	$4,0$	$25\,\%$
Restliche Befehle	$1,33$	$75\,\%$

Die Häufigkeit der Instruktion FPSQR beträgt $2\,\%$ der gesamten Anzahl an Instruktionen und der $CPI_{FPSQR} = 20$. Es gibt zwei Entwurfsmöglichkeiten:

(a) senken des CPI_{FPSQR} auf 2

(b) senken des CPI-Wert der Gleitkommaoperationen auf $2,5$.

Berechnen Sie den jeweiligen Gesamtgewinn der Alternativen und begründen Sie die Entscheidung.

Leistungsbewertung – Aufgabe 4

Es ändern sich nur die Zyklen pro Instruktion, Taktrate und Anzahl der Instruktionen (i) bleiben gleich.
Der unoptimierte CPI-Wert errechnet sich nach:

$$CPI_{\textbf{base}} = \sum_{i=1}^{n} CPI_i * Anteil_i = (1,33 * 75\%) + (4 * 25\%) \approx 2,0$$

Die Zyklen pro Instruktion mit neuem FPSQR-Befehl: $CPI_{(a)}$ kann durch Abziehen der gesparten Zyklen erfolgen:

$$\begin{aligned} CPI_{\textbf{(a)}} &= CPI_{base} - 0,02 * (CPI_{old\ FPSQR} - CPI_{new\ FPSQR}) \\ &= 2,0 - 0,02 * \textbf{(20 - 2)} = \textbf{1,64} \end{aligned}$$

Alternative (b) errechnet sich analog zum CPI_{base}:

$$CPI_{\textbf{(b)}} = (1,33 * 75\%) + (\textbf{2,5} * 25\%) = \textbf{1,625}$$

Aufgrund des **geringeren** CPI-Werts bietet sich die **Alternative (b)** mit den verbesserten Zyklen pro Gleitkommaoperation an.

Leistungsbewertung – Aufgabe 4

Berechnung des Gewinns (Speedup) durch die Verwendung der Alternative (b) gegenüber dem vorherigen System (base):

$$\begin{aligned} Speedup_{(b)} &= \frac{CPU\ time_{base}}{CPU\ time_{(b)}} \\ &= \frac{i * Taktrate * CPI_{base}}{i * Taktrate * CPI_{(b)}} \\ &= \frac{CPI_{base}}{CPI_{(b)}} \end{aligned}$$

Eingesetzt ergibt sich:

$$Speedup_{(b)} = \frac{2,00}{1,62} \approx 1,23$$

$\rightarrow$ Alternative (b) ist $1,23$-mal schneller als bisheriges System.

Leistungsbewertung – Aufgabe 5a)

Karlsruher Institut für Technologie

Die Ergebnistabelle der SPEC-Seite für die Xeon X5677-Architektur gliedert sich in die Spalten **Base** und **Peak**. Erklären Sie den Laufzeitunterschied für 400.perlbench. Vergleichen Sie dies mit den Ergebnissen für 483.xalancbmk.

- **Peak** erlaubt aggressive Optimierungen im Gegensatz zu Base. $\rightarrow$ Laufzeitunterschied durch Optimierung
- Kaum Laufzeitunterschiede für 483.xalancbmk:
  - Entweder waren die durchgeführten Optimierungen nicht wirkungsvoll,
  - oder weitere Optimierungen wurden nicht angestrebt.

  $\Rightarrow$ Sektion **Peak Optimization Flags** zeigt, dass Compileroptimierungen nicht verwendet wurden.

Leistungsbewertung – Aufgabe 5b)

Karlsruher Institut für Technologie

Berechnen Sie unter Zuhilfenahme des Formelwerks aus der Vorlesung die **Referenzzeit** für den 462.libquantum Benchmark.

Es gilt $SPEC_{ratio} = \frac{Referenzzeit_x}{Laufzeit_x \text{ auf Testsystem}}$ für einen Benchmark x.

Die Tabelle auf der angegeben Webseite enthält die **Laufzeiten der Benchmarks** auf dem Testsystem und die $SPEC_{ratio}$.

Leistungsbewertung – Aufgabe 5b)

Karlsruher Institut für Technologie

Results Table				
	Base		Peak	
Benchmark	Seconds	Ratio	Seconds	Ratio
400.perlbench	344	28.4	291	33.6
401.bzip2	443	21.8	442	21.8
403.gcc	303	26.6	269	29.9
429.mcf	198	46.0	174	52.3
445.gobmk	389	26.9	358	29.3
456.hmmer	177	52.8	172	54.4
458.sjeng	426	28.4	408	29.7
462.libquantum	33.8	613	33.8	613
464.h264ref	529	41.8	486	45.5
471.omnetpp	271	23.1	214	29.2
473.astar	310	22.6	297	23.6
483.xalancbmk	168	41.1	168	41.1

Quelle: `http://www.spec.org/cpu2006/results/res2010q2/cpu2006-20100329-10254.html`

Leistungsbewertung – Aufgabe 5b)

Es gilt $SPEC_{ratio} = \frac{Referenzzeit_x}{Laufzeit_x \text{ auf Testsystem}}$

Somit ergibt sich nach dem Umstellen und Einsetzen:

$$Referenzzeit_{462.libquantum} = 613 * 33,8\,s = 20719,4\,s$$

Leistungsbewertung – Aufgabe 5c)

Welches der unter
`http://www.spec.org/cpu2006/results/cpu2006.html`
aufgeführten Systeme entspricht am ehesten dem Referenzsystem?

Die Suche ergibt **Ultra Enterprise 2** von Sun Microsystems.
Begründung:

- Die unter b) errechnete Referenzlaufzeit für den ausgewählten Benchmark stimmt annähernd überein:

Benchmark	$Referenzzeit_{errechnet}$	$Laufzeit_{Ultra\ Enterprise\ 2}$
462.libquantum	$20719,4$	20704

- Es wird der $SPEC_{int\_base}2006 = 1.00$ angegeben.

Leistungsbewertung – Aufgabe 6

Karlsruher Institut für Technologie

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

Leistungsbewertung – Aufgabe 6a)

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

Berechnen Sie für die drei Festplatten die Bedienzeit X_i, wenn der Schreib-/Leseauftrag im Schnitt 100 kB groß ist.

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

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

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

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

Leistungsbewertung – Aufgabe 6b)

Karlsruher Institut für Technologie

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

- **Maximaler Durchsatz:** $D_{imax} = \frac{1}{X_i}$

$$D_{1max} = \frac{1}{28{,}67\,ms} = 34,88/s$$
$$D_{2max} = \frac{1}{23{,}33\,ms} = 42,86/s$$
$$D_{3max} = \frac{1}{20{,}5\,ms} = 48,78/s$$

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 nur die Platten 2 und 3 einsetzbar.

Leistungsbewertung – Aufgabe 6c)

Wie groß ist die Auslastung der einsetzbaren Festplatten?

- **Auslastung:** $U_i = D/D_{imax} = D * X_i$, hier $D = A$

  $U_2 = D * X_2 = 40/s * 23,33\,ms = 0,93$
  d.h. 93% Auslastung

  $U_3 = D * X_3 = 40/s * 20,5\,ms = 0,82$
  d.h. 82% Auslastung

Leistungsbewertung – Aufgabe 6d)

Karlsruher Institut für Technologie

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

Leistungsbewertung – Aufgabe 6d)

- **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

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

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

Leistungsbewertung – Aufgabe 6d)

- Reaktionszeit des Gesamtsystems aus Warteschlange und Festplatte: $\mathit{Reaktionszeit}_i = \mathit{Wartezeit}_i + \mathit{Bedienzeit}_i$
- bereits berechnet: $W_2 = 75\,ms$, $W_3 = 50\,ms$ und $X_2 = 23,33\,ms$, $X_3 = 20,5\,ms$
- einsetzen ergibt:
  $\mathit{Reaktionszeit}_2 = 75\,ms + 23,33\,ms = 98,33\,ms$
  $\mathit{Reaktionszeit}_3 = 50\,ms + 20,5\,ms = 70,5\,ms$

  Damit ist das System mit Platte 3 vorzuziehen, da es schneller reagiert.

Karlsruher Institut für Technologie

Klausuraufgaben

Klausur SS 15 – 2

Ein im Jahre 1998 entworfener Prozessor wurde mit einer Kernspannung von 2,0 V bei einer Frequenz von 800 MHz betrieben. 14 Jahre später liegt die Kernspannung eines Prozessors des gleichen Herstellers bei 1,0 V und die zugehörige Frequenz bei 4,0 GHz. Die Kapatzität C_{eff} blieb über diesen Zeitraum konstant.

a) Zeigen Sie auf, wie sich die aufgenommene elektrische Schaltleistung $P_{switching}$ innerhalb dieses Entwicklungssprunges verändert hat.

$P_{switching} = C_{eff} \cdot U^2 \cdot f$:

$$\Delta_{\%} P_{switching} = \frac{C_{eff_{2012}}}{C_{eff_{1988}}} \cdot \frac{U^2_{2012}}{U^2_{1988}} \cdot \frac{f_{2012}}{f_{1988}} = \frac{1}{4} \cdot \frac{4}{0{,}8} = 1,25$$

Es folgt also eine Zunahme der aufgenommenen elektrischen Leistung um 25%.

Klausur SS 2015 – 2b)

Welchen Zusammenhang gibt es zwischen Versorgungsspannung und maximal möglicher Frequenz? Wie lässt sich dieser Zusammenhang erklären?

Zusammenhang Versorgungsspannung – Frequenz:

1. Je höher die Spannung, desto höher die maximal mögliche Frequenz.
2. Höhere Spannung bedeutet schnelleres Laden von C_{eff}.
3. Schnelleres Laden von C_{eff} führt zu steileren Taktflanken.
4. Steilere Taktflanken ermöglichen ein schnelleres Erreichen gültiger Signallevel.

Klausur SS 2015 – 2f)

Nennen und erläutern Sie zwei weitere Maße neben $SPEC_{ratio}$ und MFLOPS, die zur Leistungsbewertung einer gegebenen Rechnerarchitektur herangezogen werden können.

- $T_{exe} =$ CPU-Zeit einer Programmausführung
- $CPI =$ Mittlere Anzahl der Taktzyklen pro Befehl
- $IPC =$ Mittlere Anzahl an Befehlen pro Taktzyklus
- $MIPS =$ Anzahl der Instruktionen pro Sekunde in Millionen

Klausur WS 14/15 – 2

Gegeben sei die schaltungstechnische Funktion $f = (\neg A \wedge B) \vee C$ mit den Eingangswahrscheinlichkeiten $\mathbb{P}_A(1) = \frac{1}{3}$, $\mathbb{P}_B(1) = \frac{1}{2}$ und $\mathbb{P}_C(1) = \frac{1}{4}$.

a) Berechnen Sie die Signalwahrscheinlichkeit der Funktion f.

Funktion f:

$\mathbb{P}_{\neg A}(1) = \frac{2}{3}$, $\mathbb{P}_{\neg A \wedge B}(1) = \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{2} = \frac{1}{3}$

$\mathbb{P}_{(\neg A \wedge B) \vee C}(1) = 1 - \mathbb{P}_{(\neg A \wedge B) \vee C}(0) = 1 - (\frac{2}{3} \cdot \frac{3}{4}) = \frac{1}{2}$

Klausur WS 14/15 – 2b)

Funktion $f = (\neg A \wedge B) \vee C$
Eingangswahrscheinlichkeiten $\mathbb{P}_A(1) = \frac{1}{3}$, $\mathbb{P}_B(1) = \frac{1}{2}$ und $\mathbb{P}_C(1) = \frac{1}{4}$

Berechnen Sie für die Funktion *f* die Schaltwahrscheinlichkeit des UND- und des ODER-Gatters mit der aus der Übung bekannten Formel.

Funktion *f*:

$$\mathbb{P}_{\neg A \wedge B} = 2 \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{2}{3} = \frac{4}{9}$$

$$\mathbb{P}_{(\neg A \wedge B) \vee C} = 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} = \frac{1}{2}$$

Klausur WS 14/15 – 2f)

Karlsruher Institut für Technologie

Berechnen Sie die $Spec_{ratio}$ für die Benchmarks A und B mit den in der Tabelle gegebenen Werten.

System	Benchmark	Ausführungszeit
Testsystem	Benchmark A	3 s
Testsystem	Benchmark B	6 s
Referenzsystem	Benchmark A	9 s
Referenzsystem	Benchmark B	4 s

Berechnung:

$$Spec_{ratio_A} = \frac{9\,s}{3\,s} = 3$$

$$Spec_{ratio_B} = \frac{4\,s}{6\,s} = \frac{2}{3}$$

Ausblick - jetzt korrekt

Karlsruher Institut für Technologie

Übung #3 – voraussichtlich Di 31.05.2016

- Fehlertoleranz
- Sprungvorhersage

Karlsruher Institut für Technologie

Fragen?

Karlsruher Institut für Technologie

Zentralübung Rechnerstrukturen im SS 2016

Low-Power-Entwurf und Leistungsbewertung

Thomas Becker, Prof. Dr. Wolfgang Karl

Lehrstuhl für Rechnerarchitektur und Parallelverarbeitung

12. Mai 2016