Karlsruher Institut für Technologie

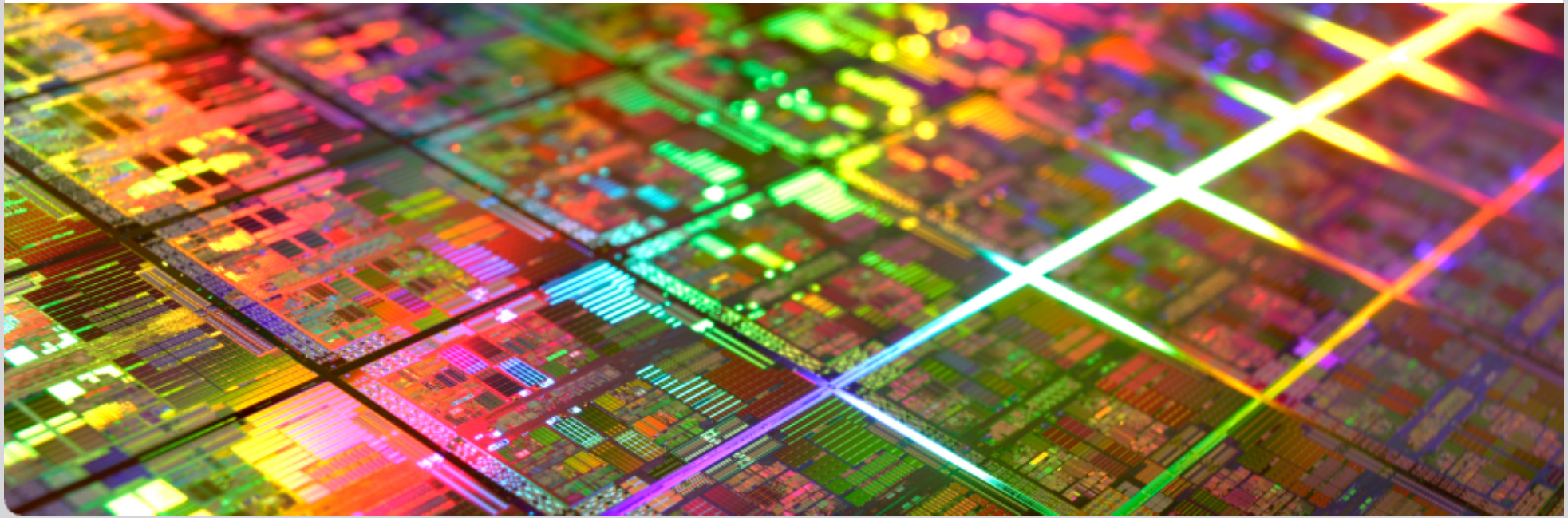
Zentralübung Rechnerstrukturen im SS 2011

Parallelismus und Parallele Programmierung

Oliver Mattes, Wolfgang Karl

Lehrstuhl für Rechnerarchitektur und Parallelverarbeitung

21. Juni 2011



Überblick

Karlsruher Institut für Technologie

Parallelismus:

- Parallelrechner und Quantitative Maßzahlen
- Aufgabe 1

Parallele Programmierung:

- Parallelisierungsprozess
- Programmiermodelle
- Aufgabe 2

Klausuraufgaben:

- Klausuraufgabe 2010/11-WS
- Klausuraufgabe 2010-SS

Parallelismus: Parallelrechner

Karlsruher Institut für Technologie

Flynnsche Klassifikation

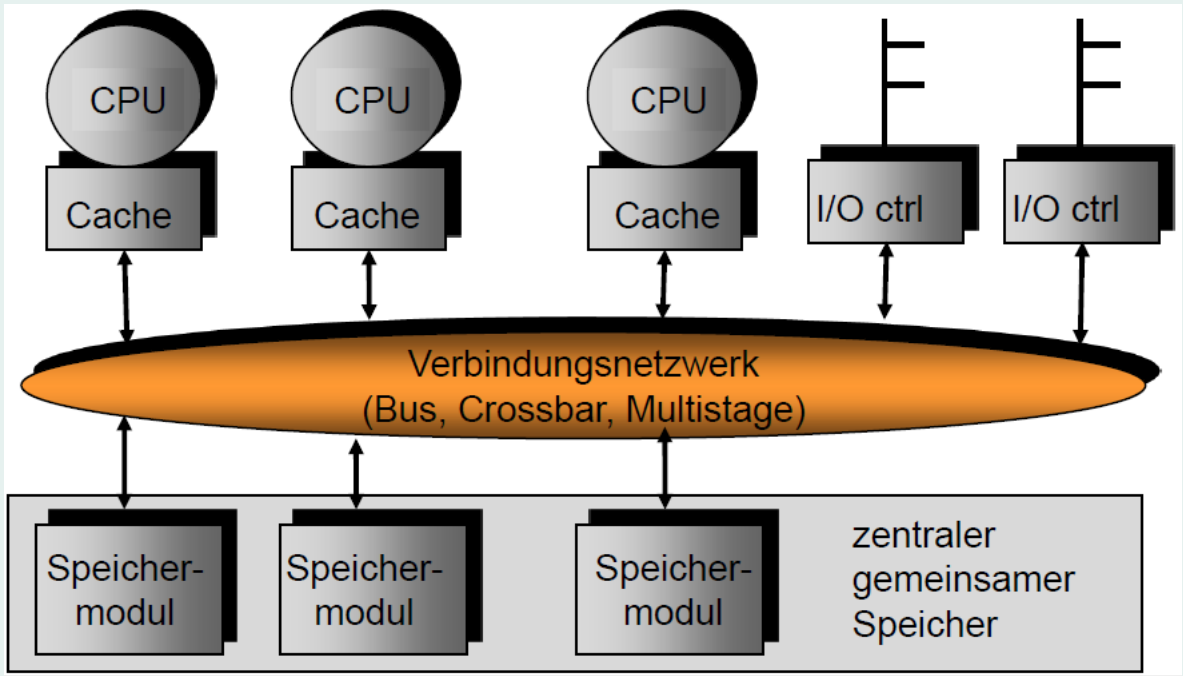
Vier Klassen von Rechnerarchitekturen:

- SISD Single Instruction, Single Data
  - Uniprozessor
- SIMD Single Instruction, Multiple Data
  - Vektorrechner, Feldrechner
- MISD Multiple Instructions, Single Data
  - ?
- MIMD **Multiple Instructions, Multiple Data**
  - Multiprozessor

Parallelismus: Parallele Architekturen

Multiprozessoren mit gemeinsamem Speicher

- **Globaler Speicher $\Leftrightarrow$ Gemeinsamer Adressraum**
- Beispiel: Symmetrischer Multiprozessor (SMP)

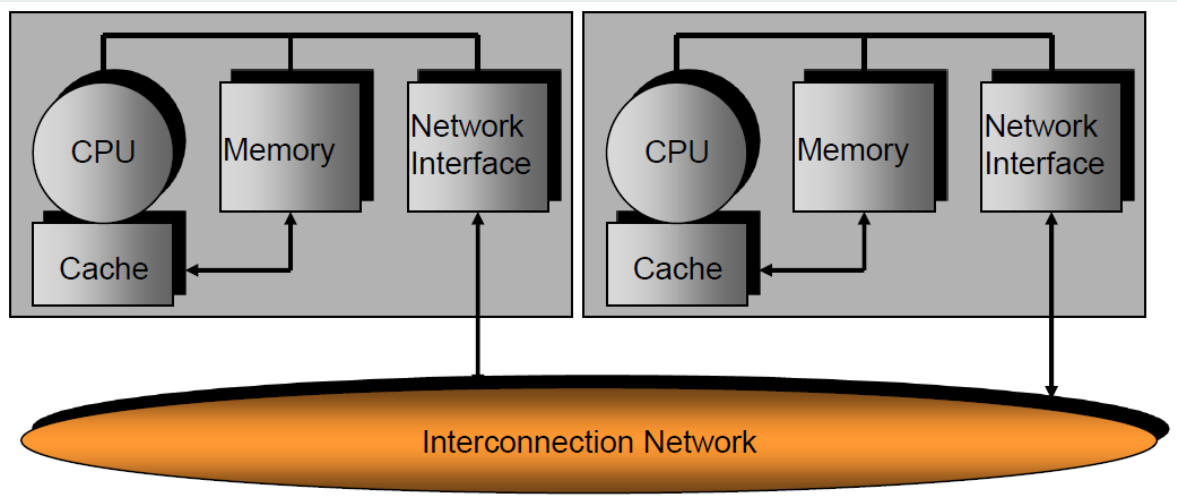


- UMA: Uniform Memory Access

Parallelismus: Parallele Architekturen

Multiprozessoren mit verteiltem Speicher

- **Verteilter Speicher $\Leftrightarrow$ Verteilter Adressraum**
- Beispiel: Cluster
- Nachrichtengekoppelter (Shared-nothing-) Multiprozessor

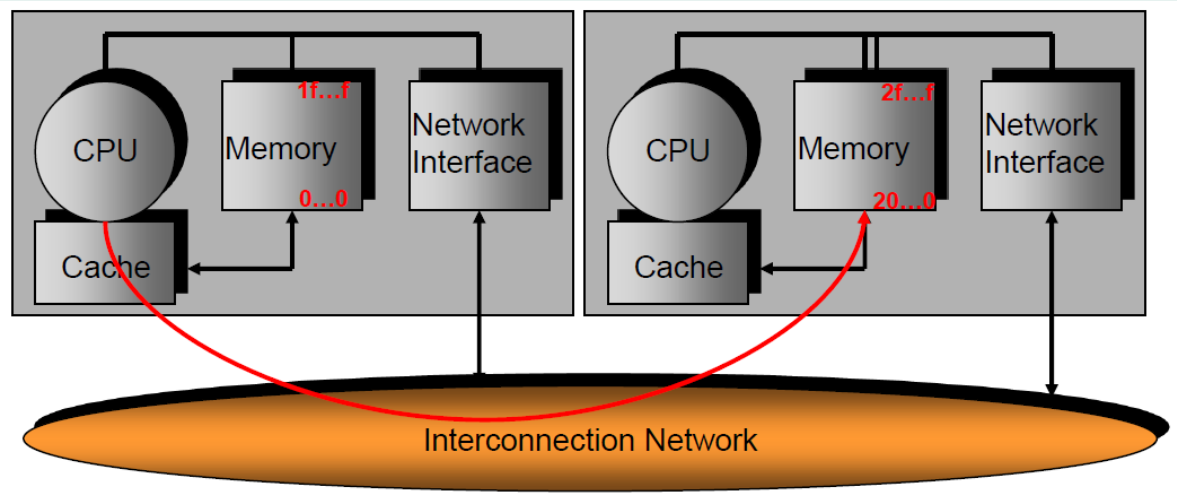


- NORMA: No Remote Memory Access

Parallelismus: Parallele Architekturen

Multiprozessoren mit verteiltem gemeinsamen Speicher

- **Verteilter Speicher $\Leftrightarrow$ Gemeinsamer Adressraum**
- Beispiel: Distributed-shared-memory Multiprozessor (DSM)



- NUMA: Non-Uniform Memory Access
- CC-NUMA: Cache-Coherent Non-Uniform Memory Access

Parallelismus: Parallele Architekturen

Karlsruher Institut für Technologie

Konfigurationen von Multiprozessoren

	Globaler Speicher	Physikalisch verteilter Speicher
gemeinsamer Adreßraum	SMP Symmetrischer Multiprozessor UMA: Uniform Memory Access	DSM Distributed-shared-memory Multiprozessor NUMA: Non-Uniform Memory Access
verteilte Adreßräume	leer	Nachrichtengekoppelter (Shared-nothing) Multiprozessor / Cluster NORMA: No Remote Memory Access

Parallelismus: Parallele Architekturen

Karlsruher Institut für Technologie

Programmiermodelle

- Shared-Memory-Programmiermodell
- Nachrichten-orientiertes Programmiermodell
- Datenparalleles Programmiermodell

$\Rightarrow$ Einführung erfolgt später in der Übung!

Parallelismus: Quantitative Maßzahlen

Karlsruher Institut für Technologie

Definitionen:

- $P(1)$ Anzahl der Einheitsoperationen auf einem Einprozessorsystem
- $P(n)$ Anzahl der Einheitsoperationen auf einem Multiprozessorsystem mit n Prozessoren
- $T(1)$ Ausführungszeit auf einem Einprozessorsystem in Schritten
- $T(n)$ Ausführungszeit auf einem Multiprozessorsystem mit n Prozessoren in Schritten

Vereinfachende Voraussetzungen:

- $T(1) = P(1)$
- $T(n) \leq P(n)$

Parallelismus: Quantitative Maßzahlen

Verbesserung der Verarbeitungsgeschwindigkeit

Beschleunigung (Speed-Up)

$$S(n) = \frac{T(1)}{T(n)}$$

üblicherweise gilt:

$$1 \leq S(n) \leq n$$

Effizienz

$$E(n) = \frac{S(n)}{n} = \frac{T(1)}{n * T(n)}$$

daraus folgt:

$$\frac{1}{n} \leq E(n) \leq 1$$

Algorithmenunabhängige $\Leftrightarrow$ Algorithmenabhängige Definition

Parallelismus: Quantitative Maßzahlen

Karlsruher Institut für Technologie

Algorithmenunabhängige Definition

- **Absolute Beschleunigung** und **absolute Effizienz** erhält man, indem der beste sequentielle Algorithmus mit dem besten parallelen Algorithmus verglichen wird.

Algorithmenabhängige Definition

- **Relative Beschleunigung** und **relative Effizienz** erhält man, wenn ein paralleler Algorithmus auf einem Einprozessorsystem ausgeführt wird.
- Zusatzaufwand für Parallelisierung durch Kommunikation und Synchronisation „verfälscht“ Ergebnis bei der sequentiellen Ausführung

Parallelismus: Quantitative Maßzahlen

Mehraufwand für die Parallelisierung

$$R(n) = \frac{P(n)}{P(1)}$$

$$1 \leq R(n)$$

Mehraufwand für die Organisation, Synchronisation und Kommunikation der Prozessoren in Multiprozessorsystemen.

Parallelindex

$$I(n) = \frac{P(n)}{T(n)}$$

$$1 \leq S(n) \leq I(n) \leq n$$

Mittlerer Grad der Parallelität. Anzahl der parallelen Operationen pro Zeiteinheit.

Parallelismus: Quantitative Maßzahlen

Karlsruher Institut für Technologie

Auslastung (Utilization)

$$U(n) = \frac{I(n)}{n} = R(n) * E(n) = \frac{P(n)}{n * T(n)}$$

Gibt an wieviel Operationen jeder Prozessor im Durchschnitt pro Zeiteinheit ausführt. Entspricht dem normiertem Parallelindex.

Folgerungen

- Der Parallelindex gibt eine obere Schranke für die Leistungssteigerung:

$$1 \leq S(n) \leq I(n) \leq n$$

- Die Auslastung ist eine obere Schranke für die Effizienz:

$$\frac{1}{n} \leq E(n) \leq U(n) \leq 1$$

Parallelismus: Quantitative Maßzahlen

Karlsruher Institut für Technologie

Superlinearer Speed-Up

$$S(n) > n \qquad T(n) < \frac{T(1)}{n}$$

Beispiele:

- **Paralleles Backtracking (depth-first search)**
  $\Rightarrow$ Verwendung verschiedener Algorithmen
- **Cache- und Hauptspeicherausnutzung**
  Nach der Aufteilung eines Problems auf verschiedene Teilsysteme, können eventuell jeweils die Teilprogramme und -daten komplett im Hauptspeicher bzw. Cache der einzelnen Knoten gehalten werden.
  $\Rightarrow$ kein Seitenwechsel mehr nötig

Parallelismus: Quantitative Maßzahlen

Karlsruher Institut für Technologie

Skalierbarkeit eines Parallelrechners

- Von Skalierbarkeit spricht man, wenn das Hinzufügen von weiteren Verarbeitungselementen zu einer kürzeren Gesamtausführungszeit führt, ohne dass das Programm geändert werden muß.
- lineare Steigerung der Beschleunigung, Effizient nahe 1
- Wichtig für die Skalierbarkeit ist eine angemessene Problemgröße, da sonst ab einer bestimmten Prozessorenzahl eine Sättigung auftritt

- **Achtung:** Nicht verwechseln mit der Skalierbarkeit eines Verbindungsnetzes!

Parallelismus: Quantitative Maßzahlen

Amdahls Gesetz (Amdahl's Law)

$$T(n) = \underbrace{\frac{1}{n} * T(1) * (1 - a)}_{1} + \underbrace{T(1) * a}_{2}$$

- ***a*** mit $0 \leq a \leq 1$ ist der Anteil eines Programms, der nur sequentiell ausgeführt werden kann.

1. Ausführungszeit des parallel ausführbaren Programmteils $(1 - a)$ dividiert durch die Anzahl n der parallel arbeitenden Prozessoren.
2. Ausführungszeit des nur sequentiell ausführbaren Programmteils a.

Parallelismus: Quantitative Maßzahlen

Amdahls Gesetz (Amdahl's Law)

$$T(n) = \frac{T(1)}{n} * (1 - a) \quad + \quad T(1) * a$$

Durch Einsetzen in die Formel für die Beschleunigung erhält man:

$$\begin{aligned} S(n) &= \frac{T(1)}{T(n)} = \frac{T(1)}{\frac{T(1)}{n} * (1 - a) + T(1) * a} \\ &= \frac{1}{(1 - a) * \frac{1}{n} + a} \\ S(n) &\leq \frac{1}{a} \end{aligned}$$

$\Rightarrow$ Die erreichbare Beschleunigung wird durch den sequentiellen Programmteil begrenzt.

Parallelismus: Quantitative Maßzahlen

Karlsruher Institut für Technologie

Ausführungszeit

$$T = T_{comp} + T_{comm} + T_{idle}$$

T_{comp} Berechnungszeit (Computation Time)

T_{comm} Kommunikationszeit (Communication Time)

T_{idle} Untätigkeitszeit (Idle Time)

Übertragungszeit einer Nachricht

$$T_{msg} = t_s + T_w * L$$

t_s Startzeit (Message Startup Time)

t_w Transferzeit pro übertragenem Datenwort

L Anzahl der Datenworte

Parallelismus: Quantitative Maßzahlen

Karlsruher Institut für Technologie

Achtung!

Alle auch hier nicht wiederholten Inhalte der Vorlesung sind für die Klausur relevant!

Aufgabe 1.1 – Leistungsbewertung

Karlsruher Institut für Technologie

Gegeben sei ein Multiprozessorsystem mit 16 Prozessoren. Die Leistungssteigerung gegenüber einem Einprozessorsystem sei $S(16) = 8$. Die Ausführungszeit auf dem Einprozessorsystem sei $T(1) = 800$ und die Anzahl der auszuführenden Einheitsoperationen auf dem Multiprozessorsystem sei $P(16) = 1200$.

a) Berechnen Sie die Effizienz $E(16)$, die parallele Ausführungszeit $T(16)$ und den Parallelindex $I(16)$.

b) Interpretieren Sie den berechneten Parallelindex.

c) Ermitteln Sie anhand von Amdahls Gesetz den Bruchteil des Programms, der nur sequentiell ausführbar ist.

Aufgabe 1.1 – Leistungsbewertung

a) **Berechnen Sie die Effizienz $E(16)$, die parallele Ausführungszeit $T(16)$ und den Parallelindex $I(16)$**

$$E(n) = \frac{S(n)}{n} \quad \Rightarrow \quad E(16) = \frac{S(16)}{16} = \frac{8}{16} = 0,5$$

$$S(n) = \frac{T(1)}{T(n)} \quad \Rightarrow \quad T(16) = \frac{T(1)}{S(16)} = \frac{800}{8} = 100$$

$$I(16) = \frac{P(n)}{T(n)} \quad \Rightarrow \quad I(16) = \frac{P(16)}{T(16)} = \frac{1200}{100} = 12$$

Aufgabe 1.1 – Leistungsbewertung

Karlsruher Institut für Technologie

b) Interpretieren Sie den berechneten Parallelindex

- Der Parallelindex gibt den mittleren Grad der Parallelität an, d.h. die Anzahl der parallelen Operationen pro Zeiteinheit.
- Der berechnete Wert ist kleiner als die Anzahl der Prozessoren. Das bedeutet, dass zeitweise einige Prozessoren keinen Befehl ausführen.
- Besser verdeutlicht wird dies durch Berechnung der Auslastung U, die angibt wieviel Operationen jeder Prozessor im Durchschnitt pro Zeiteinheit ausführt.

$$U(n) = \frac{I(n)}{n} \quad \Rightarrow \quad U(16) = \frac{12}{16} = \frac{3}{4} = 75\,\%$$

Aufgabe 1.1 – Leistungsbewertung

Karlsruher Institut für Technologie

c) **Ermitteln Sie anhand von Amdahls Gesetz den Bruchteil des Programms, der nur sequentiell ausführbar ist.**

Ahmdahls Gesetz:

$$T(n) = T(1) * \left(\frac{(1-a)}{n} + a \right) = T(1) * \frac{1 - a + na}{n}$$

$$\Rightarrow \quad 100 = 800 * \frac{1 - a + 16a}{16} = 800 * \frac{1 + 15a}{16}$$

$$= 50 * (1 + 15a)$$

$$\Rightarrow \quad 15a = 1 \quad \Rightarrow \quad a = \frac{1}{15} \approx 6,7\,\%$$

$\approx 6,7\,\%$ des Programmcodes sind nur sequentiell ausführbar.

Aufgabe 1.2 – Leistungsbewertung

Karlsruher Institut für Technologie

Die Ausführungszeit einer sequentiellen Anwendung betrage T_{seq}. Von dieser Anwendung lassen sich 20 % nicht parallelisieren. Die verbleibenden 80 % werden zwischen den Prozessoren gleichmäßig verteilt. Das bedeutet, dass jeder Prozessor ungefähr den gleichen Anteil der zu parallelisierenden Aufgabe bearbeitet und jeder gleichviel Zeit benötigt.

Beispielsweise betrage die Ausführungszeit der parallelen Anteile der Anwendung 20 % der sequentiellen Ausführungszeit, wenn vier Prozessoren sie ausführen.

a) Setzen Sie voraus, dass die Parallelisierung keinen Aufwand verursacht. Berechnen Sie die Beschleunigung und die Effizienz bei einer unterschiedlichen Anzahl von Prozessoren. Fügen Sie die Ergebnisse in die vorgegebenen Tabelle ein.

Aufgabe 1.2 – Leistungsbewertung

Karlsruher Institut für Technologie

a) **Setzen Sie voraus, dass die Parallelisierung keinen Aufwand verursacht. Berechnen Sie die Beschleunigung und die Effizienz bei einer unterschiedlichen Anzahl von Prozessoren. Fügen Sie die Ergebnisse in die vorgegebenen Tabelle ein.**

Par. Ausführungszeit: $T(n) = \frac{80\,\%}{n} * T_{seq} + 20\,\% * T_{seq}$

Beschleunigung: $S(n) = \frac{T_{seq}}{T(n)}$

Effizienz: $E(n) = \frac{S(n)}{n}$

Prozessoren	n=2	n=4	n=8	n=16	n=32
Beschleunigung	5/3=1,67	5/2=2,50	10/3=3,33	4	40/9=4,44
Effizienz	5/6=0,83	5/8=0,625	10/24=0,42	1/4=0,25	5/36=0,14

Achtung: In der Klausur bei Berechnungen wenn möglich Brüche statt gerundete Zahlen als Ergebnisse angeben!

Aufgabe 1.2 – Leistungsbewertung

Prozessoren	n=2	n=4	n=8	n=16	n=32
Beschleunigung	5/3=1,67	5/2=2,50	10/3=3,33	4	40/9=4,44
Effizienz	5/6=0,83	5/8=0,625	10/24=0,42	1/4=0,25	5/36=0,14

b) **Evaluieren Sie zusätzlich die Skalierbarkeit der einzelnen Lösungen**

Die Skalierbarkeit ist sehr schlecht. Grund dafür ist, dass ein großer Anteil des Programms nicht parallelisierbar ist. Die Ausführungszeit dieses Anteils bestimmt mit steigender Anzahl von Prozessoren einen zunehmenden Anteil der gesamten Ausführungszeit.

Beschleunigung: $S(n) = \frac{T_{seq}}{\left(20\,\% + \frac{80\,\%}{n}\right) * T_{seq}} \xrightarrow{n \text{ sehr groß}} \frac{1}{20\,\%} = 5$

Die Effizienz strebt damit gegen 0.

Aufgabe 1.2 – Leistungsbewertung

c) **Zur Steigerung der Genauigkeit der Berechnung nehmen Sie nun an, dass durch jeden verwendeten Prozessor eine zusätzliche Berarbeitungszeit von 1 % der sequentiellen Ausführungszeit benötigt wird. Berechnen Sie Beschleunigung und Effizienz für 64 Prozessoren.**

Beschleunigung:

$$S(n) = \frac{T_{seq}}{\left(20\,\% + \frac{80\,\%}{n} + 1\,\% * n\right) * T_{seq}}$$

$$\Rightarrow \quad S(64) \approx \quad 1,17$$

Effizienz:

$$E(64) = \frac{S(64)}{64} = \frac{1,17}{64} = 0,018$$

Aufgabe 1.3 – Leistungsbewertung

Karlsruher Institut für Technologie

Ein Einprozessorsystem soll erweitert werden. Dabei existieren folgende, in der Anschaffung gleich teure Alternativen:

- Ausbau zu einem 2-fach SMP-System
  - Installation eines zweiten identischen Hauptprozessors
  - Zugriff auf einen gemeinsamen Hauptspeicher
  - Synchronisationsoverhead: Ausführung des Programms wird um 2 % der unparallelisierten Ausführungszeit erhöht.
- Einsetzen eines mathematischen Koprozessors
  - 10x schnellere Ausführung der Gleitkommaarithmetik
  - Keine parallele Verarbeitung, d.h. der gleichzeitige Einsatz von Haupt- und Koprozessor, möglich.

Das zu bearbeitende Problem ist zu 74 % parallelisierbar. Der Anteil der Gleitkommaarithmetik am Gesamtprogramm beträgt 40 %. Bestimmen Sie, welche der beiden Möglichkeiten unter dem Gesichtspunkt der Ausführungszeit zu bevorzugen ist.

Aufgabe 1.3 – Leistungsbewertung

Karlsruher Institut für Technologie

Die Ausführungszeiten lassen sich in beiden Fällen wiederum mit Hilfe von Ahmdahls Gesetz ausrechnen und damit auch die erreichte Beschleunigung vergleichen. T_{seq} ist hierbei die Zeit ohne Parallelisierung oder Koprozessorunterstützung.

- SMP-System:

$$T_{SMP} = 74\,\% * \frac{1}{2} * T_{seq} + 26\,\% * T_{seq} + 2\,\% * T_{seq} = 65\,\% * T_{seq}$$

$$S_{SMP} = \frac{T_{seq}}{T_{SMP}} = \frac{1}{65\,\%} \approx 1,5385$$

- System mit Koprozessor:

$$T_{CP} = 40\,\% * \frac{1}{10} * T_{seq} + 60\,\% * T_{seq} = 64\,\% * T_{seq}$$

$$S_{CP} = \frac{T_{seq}}{T_{CP}} = \frac{1}{64\,\%} \approx 1,5625$$

Aufgabe 1.3 – Leistungsbewertung

- SMP-System:

$$S_{SMP} \approx 1,5385$$

- System mit Koprozessor:

$$S_{CP} \approx 1,5625$$

$\Rightarrow$ Die Koprozessorlösung ist für diese Anwendung deshalb dem SMP-System vorzuziehen.

$\Rightarrow$ Ohne Beachtung der benötigten Synchronisationszeit würde die Berechnung ein fehlerhaftes Ergebnis liefern.

Parallele Programmierung – Einführung

Karlsruher Institut für Technologie

Parallelisierungsprozess

- **Ziel: Schnellere Lösung der parallelen Version gegenüber der sequentiellen Version**

- Festlegen der Aufgaben, die parallel ausgeführt werden können
- Aufteilen der Aufgaben und der Daten auf Verarbeitungsknoten
  - Berechnung
  - Datenzugriffs
  - Ein-/Ausgabe
- Verwalten des Datenzugriffs, der Kommunikation und Synchronisation

- Programmierer $\Leftrightarrow$ Automatische Parallelisierung

Parallele Programmierung – Einführung

Karlsruher Institut für Technologie

Parallelisierungsprozess – Definitionen

- **Tasks**
  - Kleinste Parallelisierungseinheit
  - Beispiel: Berechnung eines Gitterpunkts (oder einer Teilmenge von Punkten)
  - grobkörnig $\Leftrightarrow$ feinkörnig
- **Prozess** oder Thread
  - Paralleles Programm setzt sich aus mehreren kooperierenden Prozessen zusammen, von denen jeder eine Teilmenge der Tasks ausführt
  - Kommunikation und Synchronisation der Prozesse untereinander
  - Virtualisierung von einem Multiprozessor, Abstraktion

Parallele Programmierung – Einführung

Karlsruher Institut für Technologie

Parallelisierungsprozess – Definitionen

- **Prozessor**
  - Ausführung eines Prozesses
  - Physikalische Ressource

- **Unterscheidung zwischen Prozess und Prozessor!**

$\Rightarrow$ Anzahl der Prozesse muss nicht gleich der Anzahl der Prozessoren eines Multiprozessorsystems sein

Parallele Programmierung – Einführung

Karlsruher Institut für Technologie

Parallelisierungsprozess

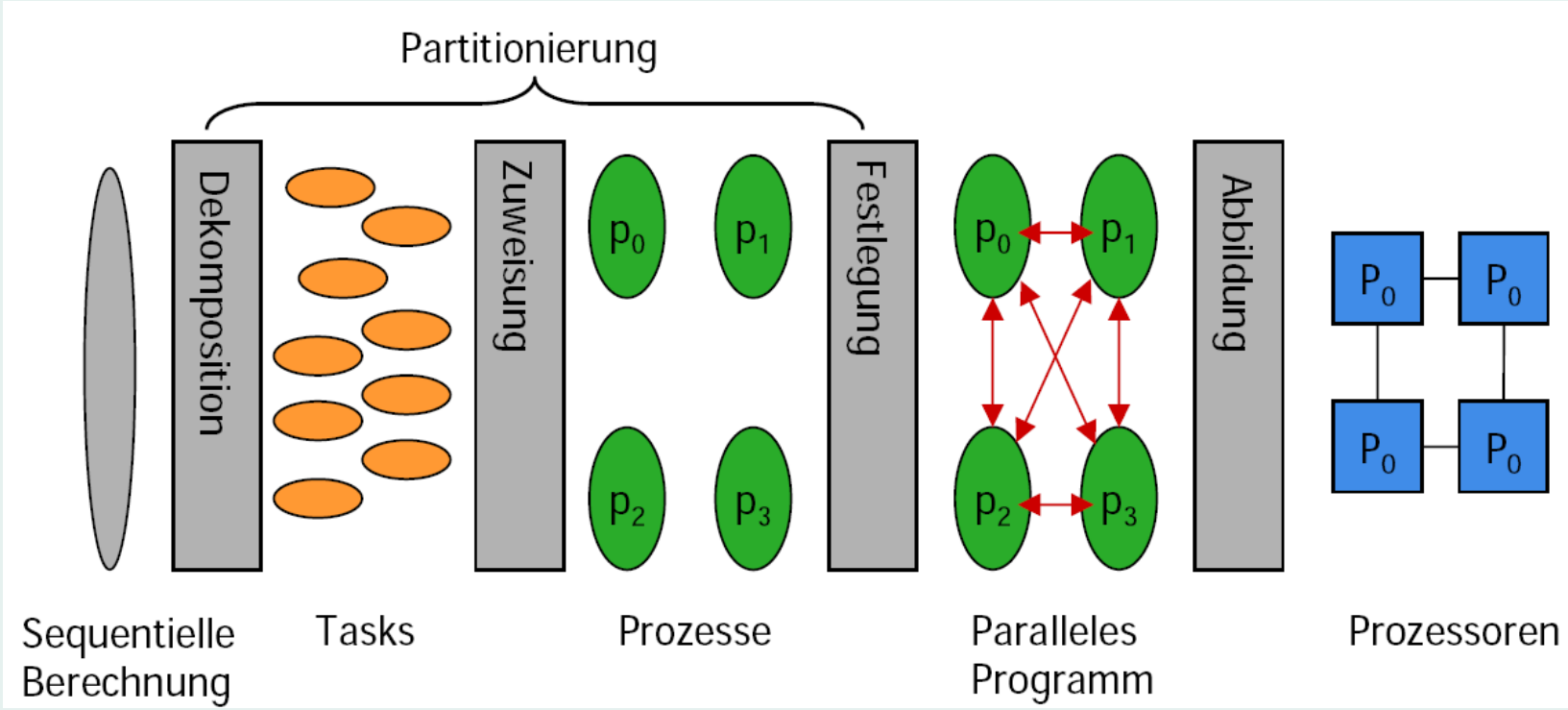
Schritte bei der Parallelisierung:

- Ausgangspunkt ist ein sequentielles Programm

1. **Dekomposition** (oder Aufteilung) der Berechnung in Tasks
   - Granularität, möglicherweise dynamische Anzahl an Tasks
2. **Zuweisung** der Tasks zu Prozessen
   - Lastverteilung, geringe Kommunikation
3. **Festlegung** des notwendigen Datenzugriffs, der Kommunikation und der Synchronisation zwischen den Prozessen
   - Auswahl des passenden Programmiermodells
4. **Abbildung** der Prozesse an die Prozessoren

Parallele Programmierung – Einführung

Parallelisierungsprozess



Parallele Programmierung – Einführung

Karlsruher Institut für Technologie

Parallelisierungsprozess

- Dekomposition, Zuweisung und Festlegung werden zusammen auch als **Partitionierung** bezeichnet
- Granularität beachten!

$\Rightarrow$ Verwaltungsaufwand (Overhead) gering halten

$\Rightarrow$ Vgl. Amdahls Gesetz

- Beispiel für Parallelisierungsprozess an Hand der OCEAN-Simulation in den Vorlesungsfolien anschauen!

Parall. Programm. – Programmiermodelle

Karlsruher Institut für Technologie

Programmiermodelle

- Definition einer abstrakten parallelen Maschine
- Spezifikationen
  - Parallele Abarbeitung von Teilen des Programms
  - Informationsaustausch
  - Synchronisationsoperationen zur Koordination
- Anwendungen werden auf der Grundlage eines parallelen Programmiermodells formuliert

Parall. Programm. – Programmiermodelle

Karlsruher Institut für Technologie

Multiprogramming

- Menge von unabhängigen sequentiellen Programmen
- Keine Kommunikation oder Koordination
- **Aber: Mögliche gegenseitige Beeinflussung beim gleichzeitigen Zugriff auf den Speicher!**

Verwendung:

- Auf allen Rechnern, die „gleichzeitig“ verschiedene Programme ausführen können (multitasking-fähiges Betriebssystem)

Parall. Programm. – Programmiermodelle

Karlsruher Institut für Technologie

Gemeinsamer Speicher (Shared Memory)

- Kommunikation und Koordination von Prozessen über gemeinsame Variablen
- Atomare Synchronisationsoperationen
- Semaphoren, Mutex, Monitore, Transactional Memory,...

Verwendung:

- Symmetrischer Multiprozessor (SMP)
- Distributed-shared-memory Multiprozessor (DSM)

Speicherzugriff:

- Uniform Memory Access (UMA)
- Non-Uniform Memory Access (NUMA), CC-NUMA

Parall. Programm. – Programmiermodelle

Karlsruher Institut für Technologie

Message Passing

- Nachrichtenorientiertes Programmiermodell
- Kein gemeinsamer Adressrauma
- Kommunikation der Prozesse mit Hilfe von Nachrichten
- Verwendung von korrespondierenden Send- und Receive-Operationen

Verwendung:

- Cluster
- Nachrichtengekoppelter (shared-nothing-) Multiprozessor

Speicherzugriff:

- No Remote Memory Access (NORMA)

Parall. Programm. – Programmiermodelle

Karlsruher Institut für Technologie

Shared Memory und Message Passing

- Mischung der Programmiermodelle
- **Cluster mit SMP-/DSM-Knoten** (Multicore-CPUs oder Multiprozessor-System mit gemeinsamem Speicher)
- Shared-Memory-Programmiermodell innerhalb eines Knotens
- Nachrichtenorientiertes Programmiermodell zwischen den Knoten

Karlsruher Institut für Technologie

Datenparallelismus

- Gleichzeitige Ausführung von Operationen auf getrennten Elementen einer Datenmenge (Feld, Vektor, Matrix)

Verwendung:

- Typischerweise in Vektorrechnern

$\Rightarrow$ Übung 7

Parallele Programmierung – π-Berechnung

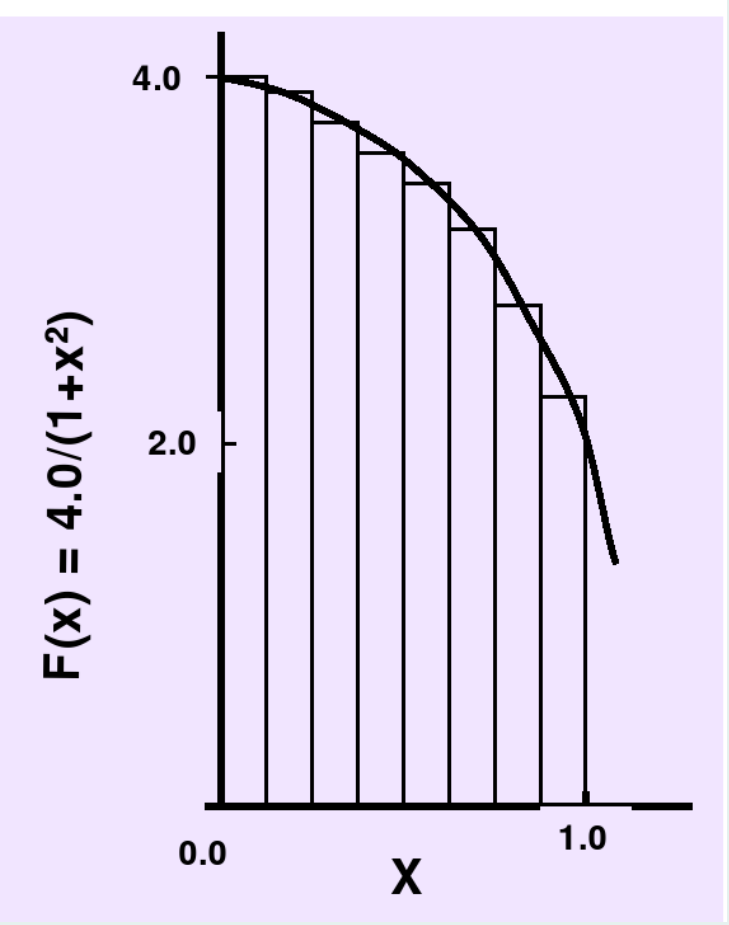
Numerische Integration

- Wir wissen:

$$\int_0^1 \frac{4.0}{(1+x^2)} \, \mathrm{d}x = \pi$$

- Näherung des Integrals durch

$$\sum_{i=0}^{N} F(x_i)\Delta x \approx \pi$$



Parallele Programmierung – π-Berechnung

Karlsruher Institut für Technologie

Sequentielles Programm

```
static long num_steps = 100000;
double step;
void main ()
{       int i;   double x, pi, sum = 0.0;

        step = 1.0/(double) num_steps;

        for (i=1;i<= num_steps; i++){
                x = (i-0.5)*step;
                sum = sum + 4.0/(1.0+x*x);
        }
        pi = step * sum;
}
```

Parallele Programmierung – Einführung

Karlsruher Institut für Technologie

Thread-Programmierung

- Parallele Programme für Shared-Memory-Systeme bestehen aus mehreren Threads
- Alle Threads eines Prozesses teilen sich Adressraum, Daten, Filehandler,. . .
- Threads werden meist vom Betriebsystem verwaltet
- Unterstützung vom Betriebsystem notwendig, z.B. für die Thread-Generierung, Synchronisation,. . .
- **Vorteil**: durch die Thread-Bibliothek erhält man eine detailierte Kontrolle über die Threads
- **Nachteil**: die Thread-Bibliothek erzwingt, dass man die Kontrolle über die Threads übernimmt

Parallele Programmierung – π-Berechnung

Karlsruher Institut für Technologie

Win32 API

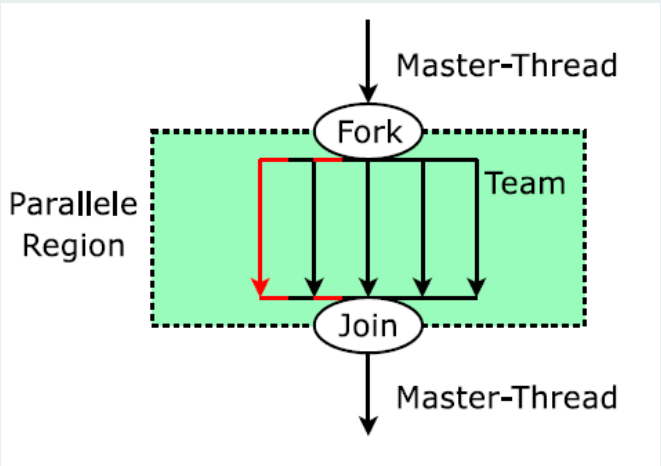
```
#include <windows.h>
#define NUM_THREADS 2
HANDLE thread_handles[NUM_THREADS];
CRITICAL_SECTION hUpdateMutex;
static long num_steps = 100000;
double step;
double global_sum = 0.0;

void Pi (void *arg)
{
   int i, start;
  double x, sum = 0.0;


  start = *(int *) arg;
  step = 1.0/(double) num_steps;

  for (i=start;i<= num_steps;
i=i+NUM_THREADS){
       x = (i-0.5)*step;
      sum = sum + 4.0/(1.0+x*x);
  }
  EnterCriticalSection(&hUpdateMutex);
  global_sum += sum;
  LeaveCriticalSection(&hUpdateMutex);
}
```

```
void main ()
{
  double pi; int i;
  DWORD threadID;
  int threadArg[NUM_THREADS];

  for(i=0; i<NUM_THREADS; i++)   threadArg[i] = i+1;

  InitializeCriticalSection(&hUpdateMutex);

  for (i=0; i<NUM_THREADS; i++){
          thread_handles[i] = CreateThread(0, 0,
            (LPTHREAD_START_ROUTINE) Pi,
                    &threadArg[i], 0, &threadID);
}

  WaitForMultipleObjects(NUM_THREADS,
                    thread_handles, TRUE,INFINITE);

  pi = global_sum * step;

  printf(" pi is %f \n",pi);
}
```

Parallele Programmierung – Einführung

OpenMP

- OpenMP ist eine offene Spezifikation von Übersetzerdirektiven, Bibliotheken und Umgebungsvariablen, spezifiziert für die Parallelisierung von Programmen auf gemeinsamen Speicher
- Verwendet das Join-Fork-Modell



- Mehrere (auch verschaltelte) parallele Regionen pro Programm sind zugelassen

Karlsruher Institut für Technologie

OpenMP – Beispiele

- Bibliothek und Funktionen:
  - `#include <omp.h>`
  - `omp_set_num_threads(NUM_THREADS)`
  - `omp_get_num_threads()`
  - `omp_get_max_threads()`
- Pragmas:
  - `#pragma omp parallel`
  - `#pragma omp parallel for`
  - `#pragma omp parallel for private(x) shared(delta_x) reduction(+:sum)`
  - `#pragma omp critical`
  - `#pragma omp atomic`

Parallele Programmierung – π-Berechnung

Karlsruher Institut für Technologie

OpenMP

```
#include <omp.h>
static long num_steps = 100000;        double step;
#define NUM_THREADS 2
void main ()
{       int i;   double x, pi, sum = 0.0;
        step = 1.0/(double) num_steps;
        omp_set_num_threads(NUM_THREADS);
#pragma omp parallel for reduction(+:sum) private(x)
        for (i=1;i<= num_steps; i++){
                x = (i-0.5)*step;
                sum = sum + 4.0/(1.0+x*x);
        }
        pi = step * sum;
}
```

Parallele Programmierung – Einführung

Karlsruher Institut für Technologie

Message Passing Interface (MPI)

- MPI ist ein Standard für die nachrichtenbasierte Kommunikation in einem Multiprozessorsystem
- Nachrichtenbasierter Ansatz gewährleistet eine gute Skalierbarkeit
- Bibliotheksfunktionen koordinieren die Ausführung von mehreren Prozessen, sowie Verteilung von Daten, per Default keine gemeinsamen Daten
- Single Programm Multiple Data (SPMD) Ansatz

Parallele Programmierung – Einführung

Karlsruher Institut für Technologie

Message Passing Interface (MPI)

- Bibliothek und Funktionen:
  - `#include <mpi.h>`
  - Initialisierung

    `MPI_Init(&argc, &argv)`
  - `MPI_COMM_WORLD`

    beinhaltet alle am Programm beteiligten Prozesse
  - Prozessnummer abfragen:

    `MPI_Comm_rank(MPI_Comm comm, int *rank)`

    `MPI_Comm_rank(MPI_COMM_WORLD, &rank)`
  - Anzahl an Prozesse:

    `MPI_Comm_size(MPI_Comm comm, int *size)`

    `MPI_Comm_size(MPI_COMM_WORLD, &size)`
  - `MPI_Finalize()`

Karlsruher Institut für Technologie

Message Passing Interface (MPI)

- Kommunikation und Synchronisation:
  - Senden:
    `MPI_Send`
  - Senden (nicht blockierend):
    `MPI_Isend`
  - Gepuffert:
    `MPI_Bsend, MPI_Ibsend`
  - ready/synchron:
    `MPI_Rsend, MPI_Ssend, MPI_Irsend, MPI_Issend`
  - Empfangen:
    `MPI_Recv, MPI_Irecv`
  - `MPI_Sendrecv`

Parallele Programmierung – Einführung

Karlsruher Institut für Technologie

Message Passing Interface (MPI)

- Kommunikation und Synchronisation:
  - Warten auf alle Prozesse in `comm`:
    `MPI_Barrier(comm)`
  - Verteilen von Daten:
    `MPI_Bcast, MPI_Scattter`
  - Sammeln von Daten:
    `MPI_Gather, MPI_Reduce`
  - Empfangstests einer Sende- oder Empfangsoperation:
    `MPI_Probe, MPI_Test, MPI_Wait`

Parallele Programmierung – π-Berechnung

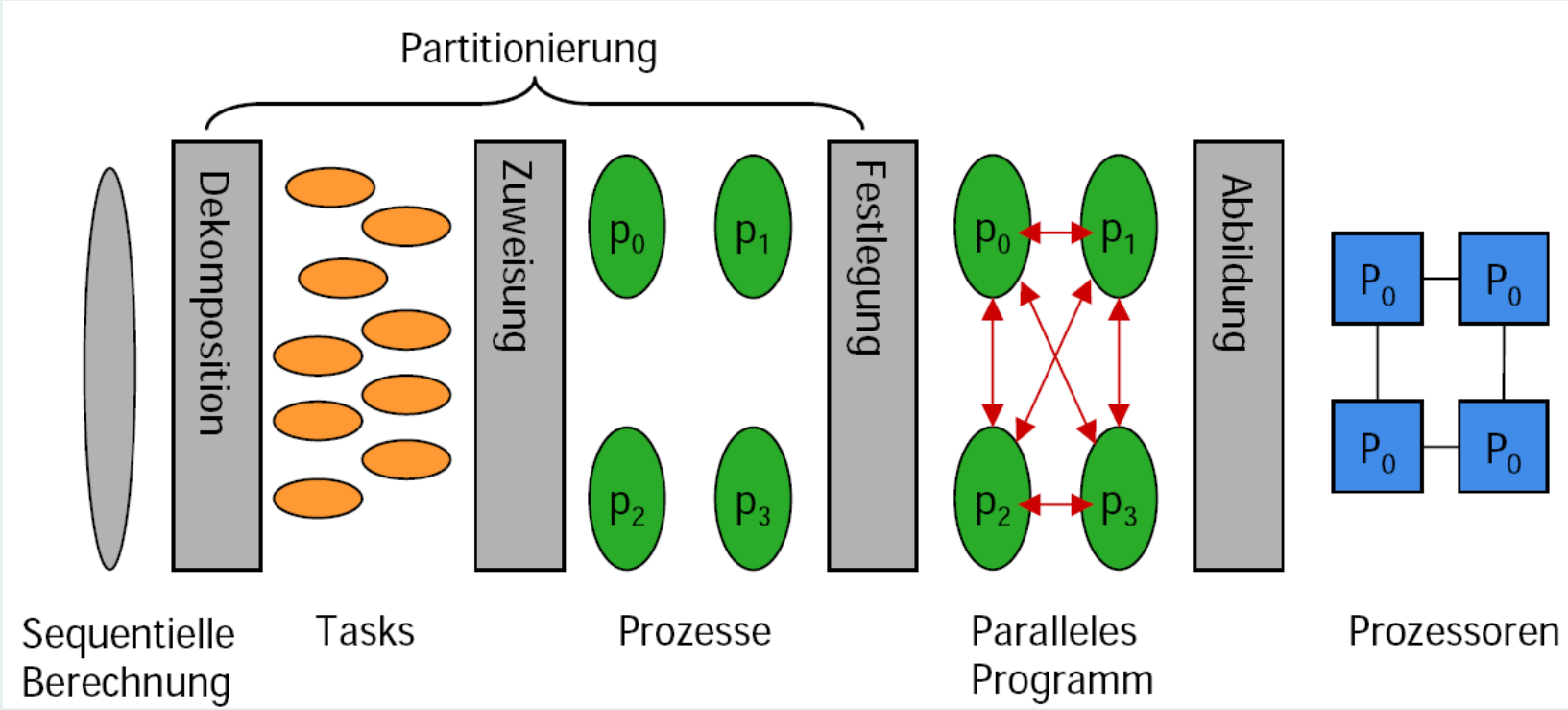
Karlsruher Institut für Technologie

Message Passing Interface (MPI)

```
#include <mpi.h>
void main (int argc, char *argv[])
{
        int i, my_id, numprocs;  double x, pi, step, sum = 0.0 ;
        step = 1.0/(double) num_steps ;
        MPI_Init(&argc, &argv) ;
        MPI_Comm_Rank(MPI_COMM_WORLD, &my_id) ;
        MPI_Comm_Size(MPI_COMM_WORLD, &numprocs) ;
        my_steps = num_steps/numprocs ;
        for (i=my_id*my_steps; i<(my_id+1)*my_steps ; i++)
        {
                x = (i+0.5)*step;
                sum += 4.0/(1.0+x*x);
        }
        sum *= step ;
        MPI_Reduce(&sum, &pi, 1, MPI_DOUBLE, MPI_SUM, 0,
                        MPI_COMM_WORLD) ;
}
```

Aufgabe 2.1 – Parallelisierungsprozess

Parallelisierungsprozess



Aufgabe 2.2 – Parallelisierung

Karlsruher Institut für Technologie

Eine Methode aus der Numerischen Mathematik arbeitet auf einem 2D-Torus mit $n * n$ Knoten.

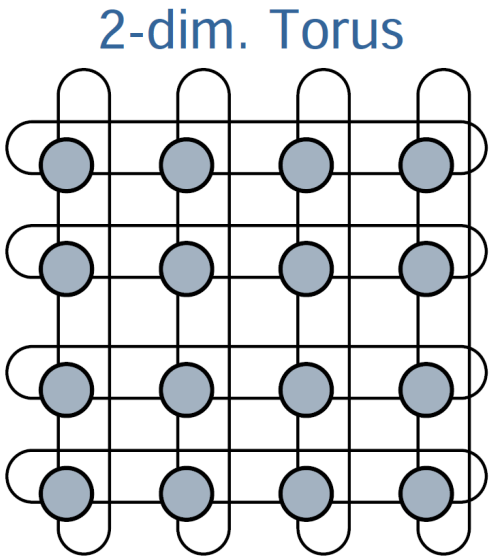
In jeder Iteration werden zwei Schritte durchgeführt:

1. Im ersten Schritt werden die Zustände der Knoten, basierend auf ihrem aktuellen Zustand und den Zuständen ihrer Nachbarknoten, aktualisiert. Dazu müssen zuerst diese Zustände aus dem Speicher gelesen werden.
2. Im zweiten Schritt werden die neuen Zustände zurück in den Speicher geschrieben.

Gegeben sei ein SMP-Knoten mit P Prozessoren.

a) **Berechnen Sie die Beschleunigung der Anwendung bei der Ausführung auf dem SMP-Knoten. Welches Problem tritt hierbei auf?**

Aufgabe 2.2 – Parallelisierung



SMP gemeinsamer Adressraum, globaler Speicher

$\Rightarrow$ meist **UMA** (Uniform Memory Access), d.h. gleiche Zugriffszeit von allen Knoten

DSM gemeinsamer Adressraum, physikalisch verteilter Speicher

$\Rightarrow$ meist **NUMA** (Non-Uniform Memory Access), d.h. unterschiedliche Zugriffszeiten

Aufgabe 2.2 – Parallelisierung

a) **Berechnen Sie die Beschleunigung der Anwendung bei der Ausführung auf dem SMP-Knoten. Welches Problem tritt hierbei auf?**

- Sequentielle Zeit $T(1)$:

$$\underbrace{5n^2}_{\text{Daten aus Speicher holen}} + \underbrace{n^2}_{\text{Berechnung}} + \underbrace{n^2}_{\text{Zurückschreiben}} = 7n^2$$

- Parallele Zeit $T(P)$:

$$\underbrace{5n^2}_{\text{Daten aus Speicher holen}} + \underbrace{\frac{n^2}{P}}_{\text{par. Berechnung}} + \underbrace{n^2}_{\text{Zurückschreiben}} = 6n^2 + \frac{n^2}{P}$$

- Beschleunigung $S(P)$:

$$S(P) = \frac{T(1)}{T(P)} = \frac{7n^2}{6n^2 + \frac{n^2}{P}} = \frac{7}{6 + \frac{1}{P}} < \frac{7}{6} \approx 1,17$$

Das Problem ist hierbei, dass der Speicher als limitierender Faktor wirkt und damit die Beschleunigung stark beschränkt ist.

Aufgabe 2.2 – Parallelisierung

Karlsruher Institut für Technologie

Um eine Leistungssteigerung zu erhalten, wird der SMP-Knoten durch eine NUMA-Architektur mit P Prozessoren und P Speichern ersetzt.

Beachten Sie dabei folgende vereinfachende Annahme:

- Erfolgt ein Speicherzugriff auf einen entfernten Speicher, so benötigt ein Speichergriff drei Zeiteinheiten.
- Wird nur ein Prozessor verwendet, so befinden sich alle zur Berechnung notwendigen Daten im lokal zum Prozessor gehörenden Speicher.

b) **Welche Beschleunigung läßt sich erzielen, wenn die Zustände der Nachbarknoten immer aus entfernten Speichern abgerufen werden müssen?**

Aufgabe 2.2 – Parallelisierung

Karlsruher Institut für Technologie

b) **Welche Beschleunigung läßt sich erzielen, wenn die Zustände der Nachbarknoten immer aus entfernten Speichern abgerufen werden müssen?**

- Sequentielle Zeit $T(1)$:

$$\underbrace{5n^2}_{\text{Daten aus Speicher holen}} + \underbrace{n^2}_{\text{Berechnung}} + \underbrace{n^2}_{\text{Zurückschreiben}} = 7n^2$$

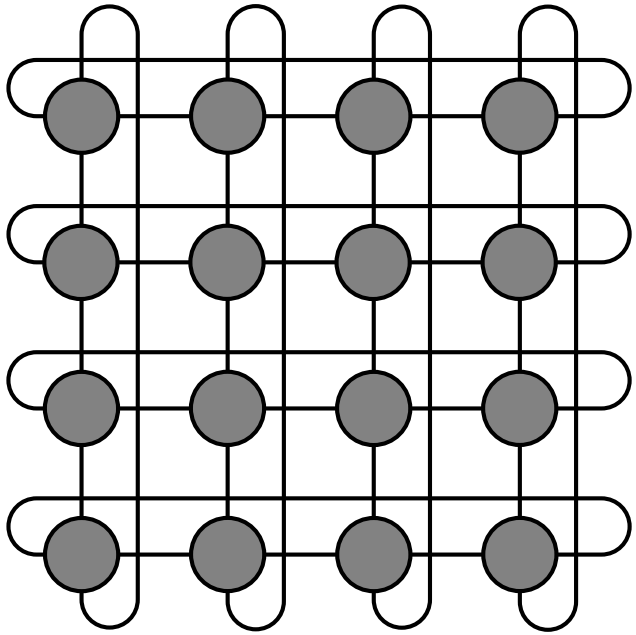
- Parallele Zeit $T(P)$:

$$\underbrace{\underbrace{\frac{4 * 3 * n^2}{P}}_{\substack{\text{4 Werte der Nachbarknoten aus entferntem Speicher}}} + \underbrace{\frac{n^2}{P}}_{\substack{\text{eigener Wert im lokalen Speicher}}}}_{\text{Daten aus Speicher holen}} + \underbrace{\frac{n^2}{P}}_{\substack{\text{parallele Berechnung}}} + \underbrace{\frac{n^2}{P}}_{\substack{\text{Zurückschreiben in lokalen Speicher}}} = \frac{15n^2}{P}$$

Aufgabe 2.2 – Parallelisierung

Karlsruher Institut für Technologie

b) **Welche Beschleunigung läßt sich erzielen, wenn die Zustände der Nachbarknoten immer aus entfernten Speichern abgerufen werden müssen?**

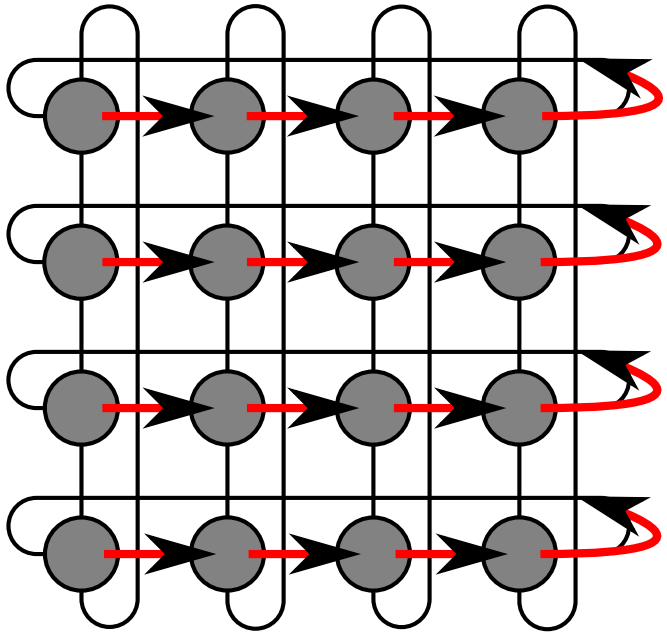


- Parallele Zeit $T(P)$ für $n^2 = P$:

Aufgabe 2.2 – Parallelisierung

Karlsruher Institut für Technologie

b) **Welche Beschleunigung läßt sich erzielen, wenn die Zustände der Nachbarknoten immer aus entfernten Speichern abgerufen werden müssen?**



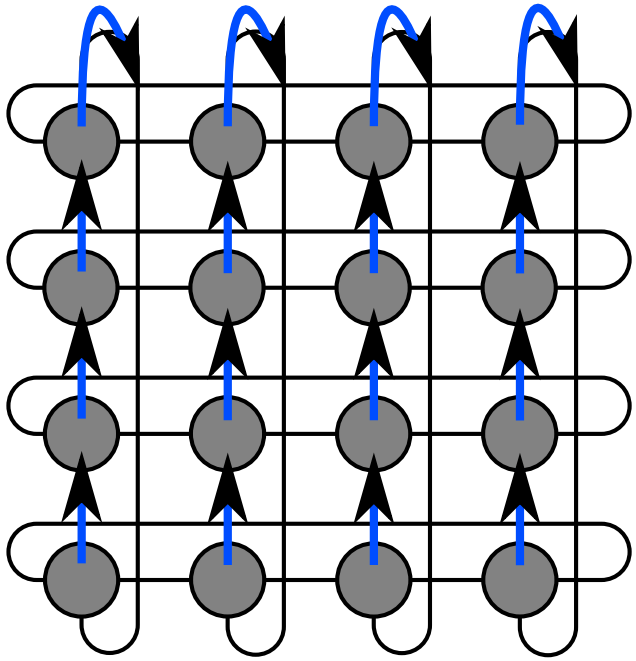
- Parallele Zeit $T(P)$ für $n^2 = P$:

3

Aufgabe 2.2 – Parallelisierung

Karlsruher Institut für Technologie

b) **Welche Beschleunigung läßt sich erzielen, wenn die Zustände der Nachbarknoten immer aus entfernten Speichern abgerufen werden müssen?**



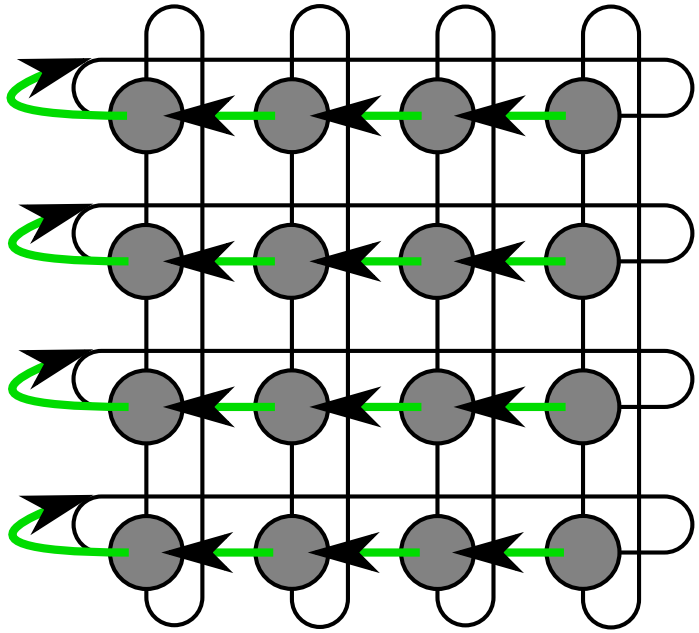
- Parallele Zeit $T(P)$ für $n^2 = P$:

$$3 + 3$$

Aufgabe 2.2 – Parallelisierung

Karlsruher Institut für Technologie

b) **Welche Beschleunigung läßt sich erzielen, wenn die Zuständе der Nachbarknoten immer aus entfernten Speichern abgerufen werden müssen?**



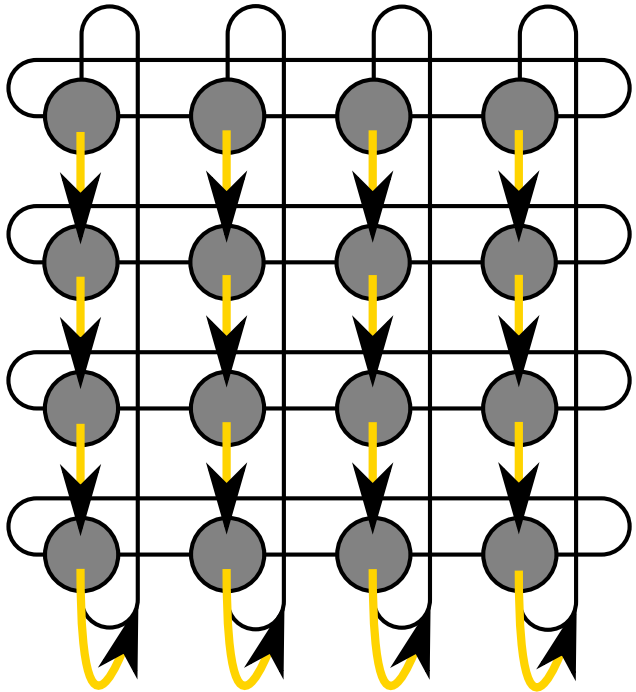
- Parallele Zeit $T(P)$ für $n^2 = P$:

$$3 + 3 + 3$$

Aufgabe 2.2 – Parallelisierung

Karlsruher Institut für Technologie

b) **Welche Beschleunigung läßt sich erzielen, wenn die Zustände der Nachbarknoten immer aus entfernten Speichern abgerufen werden müssen?**



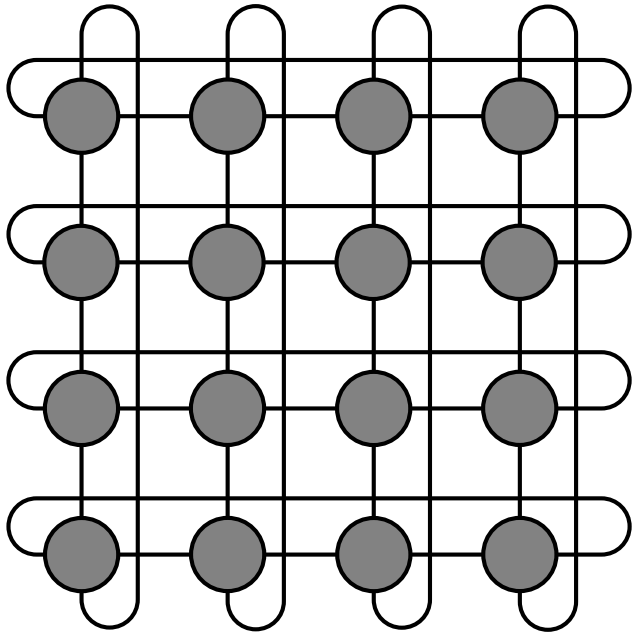
- Parallele Zeit $T(P)$ für $n^2 = P$:

$$3 + 3 + 3 + 3$$

Aufgabe 2.2 – Parallelisierung

Karlsruher Institut für Technologie

b) **Welche Beschleunigung läßt sich erzielen, wenn die Zustände der Nachbarknoten immer aus entfernten Speichern abgerufen werden müssen?**



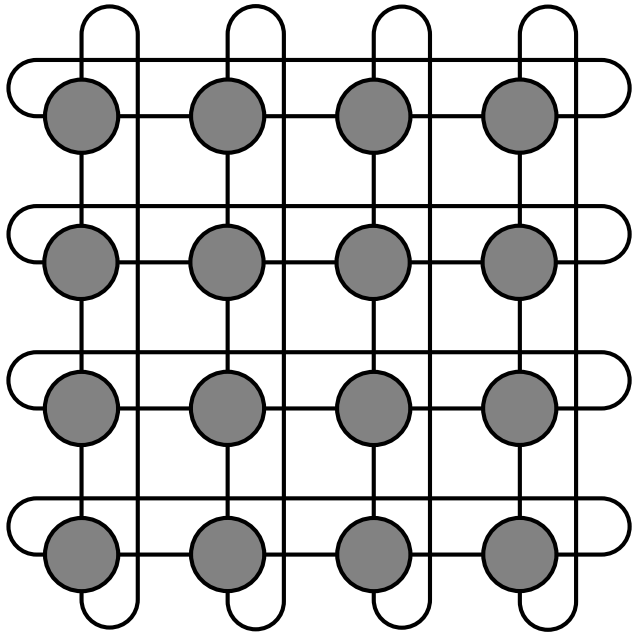
- Parallele Zeit $T(P)$ für $n^2 = P$:

$$3 + 3 + 3 + 3 = 4 * 3$$

Aufgabe 2.2 – Parallelisierung

Karlsruher Institut für Technologie

b) **Welche Beschleunigung läßt sich erzielen, wenn die Zustände der Nachbarknoten immer aus entfernten Speichern abgerufen werden müssen?**

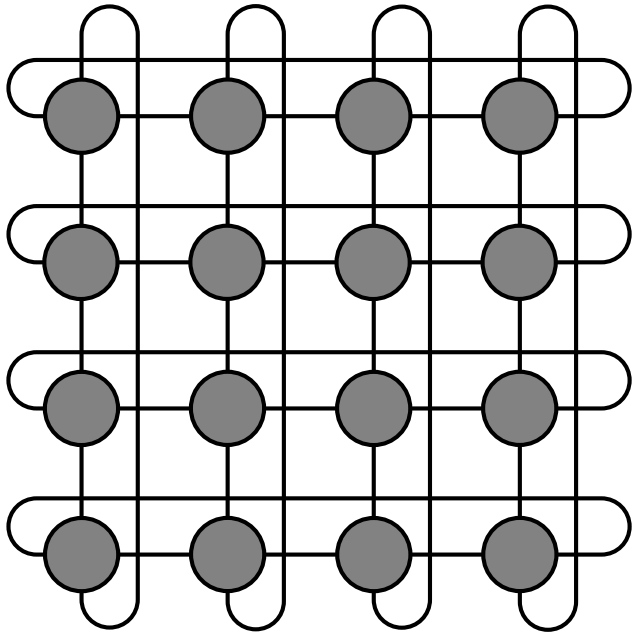


- Parallele Zeit $T(P)$ für $n^2 = P$:

$$T(P) = 4 * 3 + 1 + 1 + 1 = 15$$

Aufgabe 2.2 – Parallelisierung

b) **Welche Beschleunigung läßt sich erzielen, wenn die Zustände der Nachbarknoten immer aus entfernten Speichern abgerufen werden müssen?**

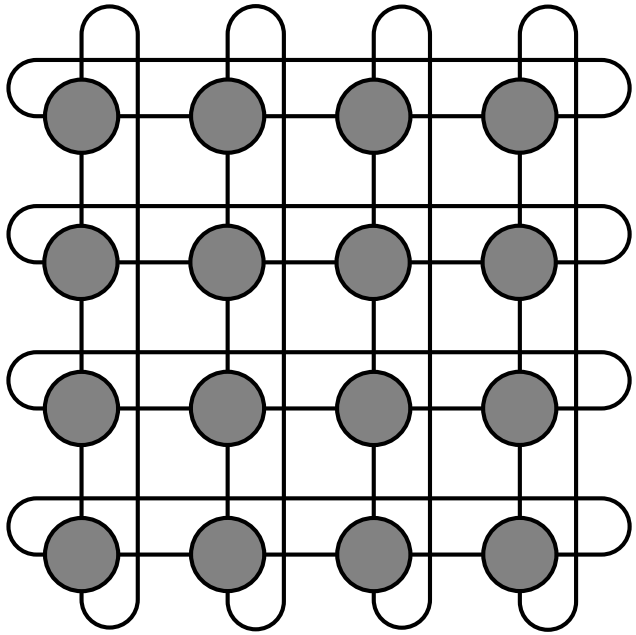


- Parallele Zeit $T(P)$ für $n^2 \neq P$, $n^2 \gg P$:

$$T(P) = (4 * 3 + 1 + 1 + 1) * \frac{n^2}{P}$$

Aufgabe 2.2 – Parallelisierung

b) **Welche Beschleunigung läßt sich erzielen, wenn die Zustände der Nachbarknoten immer aus entfernten Speichern abgerufen werden müssen?**



- Parallele Zeit $T(P)$ für $n^2 \neq P$, $n^2 \gg P$:

$$T(P) = \frac{4 * 3 * n^2}{P} + \frac{n^2}{P} + \frac{n^2}{P} + \frac{n^2}{P} = \frac{15n^2}{P}$$

Aufgabe 2.2 – Parallelisierung

Karlsruher Institut für Technologie

b) **Welche Beschleunigung läßt sich erzielen, wenn die Zustände der Nachbarknoten immer aus entfernten Speichern abgerufen werden müssen?**

- Sequentielle Zeit $T(1) = 7n^2$
- Parallele Zeit $T(P) = \frac{15n^2}{P}$
- Beschleunigung $S(P)$:

$$S(P) = \frac{T(1)}{T(P)} = \frac{7n^2}{\frac{15n^2}{P}} = \frac{7}{15}P$$

$$\text{für } P = 2: \quad S(2) = \frac{7}{15} * 2 = \frac{14}{15} \approx 0,93$$

$$\text{für } P = 3: \quad S(3) = \frac{7}{15} * 3 = \frac{21}{15} \approx 1,40$$

$$\text{für } P = 4: \quad S(4) = \frac{7}{15} * 4 = \frac{28}{15} \approx 1,87$$

$\Rightarrow$ Die Beschleunigung skaliert mit $\frac{7}{15}$ der Problemgröße (linear).

Klausuraufgaben Wintersemester 2010/11

Karlsruher Institut für Technologie

Aufgabe 1

a) **Zur Bestimmung der Gesamtausführungszeit eines parallel ablaufenden Programms wird oft das Amdahlsche Gesetz herangezogen. Geben Sie dessen Formel an und erklären Sie die Bedeutung der unterschiedlichen Teile der Formel.**

$$T(n) = \underbrace{\frac{T(1)}{n} * (1 - a)}_{1} + \underbrace{T(1) * a}_{2}$$

- Formel, sequentieller und paralleler Programmteil und Anteil a mit $(0 \leq a \leq 1)$ erklären

$\Rightarrow$ **siehe Folie 16!**

Aufgabe 1

b) **Eine Berechung, die auf einem Einprozessorsystem $T(1) = 300$ Sekunden Rechenzeit benötigt, liefert auf einem Mehrprozessorsystem mit 10 Prozessoren nach $T(10) = 20$ Sekunden ein Ergebnis. Wie nennt man dieses Verhalten und welcher Abschätzung der Beschleunigung widerspricht es?**

$$S(n) = \frac{T(1)}{T(n)} = \frac{300\,s}{20\,s} = 15 \quad \not\leq \quad n = 10$$

- Das Verhalten heißt superlineare Beschleunigung (superlinarer Speed-Up)
- Es widerspricht der Abschätzung $1 \leq S(n) \leq n$

$\Rightarrow$ **siehe Folie 14!**

Aufgabe 1

c) **Geben Sie eine Formel für die Beziehung zwischen Auslastung und Effizienz an.**

- Die Auslastung ist eine obere Schranke für die Effizienz:

$$\frac{1}{n} \leq E(n) \leq U(n) \leq 1$$

$\Rightarrow$ **siehe Folie 13!**

Klausuraufgaben Wintersemester 2010/11

Karlsruher Institut für Technologie

Aufgabe 1

g) **Für was stehen die Abkürzungen NORMA, NUMA sowie UMA?**

- NORMA: No Remote Memory Access
- NUMA: Non-Uniform Memory Access
- UMA: Uniform Memory Access

Klausuraufgaben Wintersemester 2010/11

Karlsruher Institut für Technologie

Aufgabe 1

h) **Zur Auswahl stehen**

- **ein „Multiprozessor mit gemeinsamem Speicher“**
- **ein „Multiprozessor mit verteiltem Speicher“**
- **ein „Multiprozessor mit verteiltem gemeinsamen Speicher“**

Ordnen Sie die Begriffe aus Aufgabe g) dem jeweils entsprechenden Multiprozessorsystem zu.

Multiprozessor mit gemeinsamem Speicher	UMA
Multiprozessor mit verteiltem Speicher	NORMA
Multiprozessor mit verteiltem gemeinsamen Speicher	NUMA

Klausuraufgaben Wintersemester 2010/11

Karlsruher Institut für Technologie

Aufgabe 1

i) **Geben Sie ein Programmiermodell für Multiprozessorsysteme mit verteiltem Speicher an und erklären Sie kurz die Kommunikationsarchitektur der Prozesse (Threads)**

- Die Programmierung erfolgt mit Hilfe des Nachrichtenorientierten Programmiermodells (Message Passing)
- Kommunikation der Prozesse (Threads) mit Hilfe von Nachrichten, kein gemeinsamer Adressbereich
- Verwendung von korrespondierenden Send- und Receive-Operationen

Klausuraufgaben Sommersemester 2010

Karlsruher Institut für Technologie

Aufgabe 4

d) **Die Ausführungszeit eines parallelen Programms auf einem dediziert zugeordneten Parallelrechner setzt sich aus drei Teilen zusammen. Geben Sie hierfür die Formel an und benennen Sie die Teile!**

$$T = T_{comp} + T_{comm} + T_{idle}$$

- Berechnungszeit (Computation Time),
  Kommunikationszeit (Communication Time),
  Untätigkeitszeit (Idle Time)

$\Rightarrow$ **siehe Folie 18!**

Klausuraufgaben Sommersemester 2010

Karlsruher Institut für Technologie

Aufgabe 4

e) **Ein Programm wird auf einer großen Anzahl Prozessoren ausgeführt. Es zeigt sich jedoch nicht die gewünschte Beschleunigung.**
Wodurch wird die erreichbare Beschleunigung beschränkt?

- Die erreichbare Beschleunigung wird durch den sequentiellen Programmteil begrenzt.

Klausuraufgaben Sommersemester 2010

Karlsruher Institut für Technologie

Aufgabe 4

e) ...

Leiten Sie zur Erklärung mit Hilfe von Amdahls Gesetz eine einfach Formel her.

- Herleitung und einfache Formel:

$$
\begin{aligned}
S(n) &= \frac{T(1)}{T(n)} \\
&= \frac{T(1)}{\frac{1}{n} * T(1) * (1-a) + T(1) * a} \\
&= \frac{1}{\frac{1}{n} * (1-a) \quad + \quad a} \\
S(n) &\leq \frac{1}{a}
\end{aligned}
$$

Hinweise

Vektorprozessoren und -computer und deren Programmierung

- Wird in einer späteren Vorlesung behandelt
- **Klausurrelevant!**
- Thema wird in der letzten Übung behandelt
- Bisher jedoch immer in einer Aufgabe zusammen mit den Themen der Übungen 5 und 6

Karlsruher Institut für Technologie

Fragen?

Ausblick

Nächste Übung:

- 30. Juni 2011

- **Verbindungsstrukturen**
- **Vergleich von Parallelrechnern**
- Klausuraufgaben

- Evaluation der RS-Übung

Karlsruher Institut für Technologie

Zentralübung Rechnerstrukturen im SS 2011

Parallelismus und Parallele Programmierung

Oliver Mattes, Wolfgang Karl

Lehrstuhl für Rechnerarchitektur und Parallelverarbeitung

21. Juni 2011