Philipps Universität Marburg

Parallele Programmierung

Prof. Dr. Rita Loogen
Fachbereich Mathematik und Informatik
WS 2008/09

Vom Problem zum Programm

Problem

Algorithmus

Programm

Rechner

Sequentialität

- Sequenz:
  - natürliches Konzept zur Beschreibung von Abläufen jeglicher Art
  - Basis unseres Zeitbegriffs

  => seq. Algorithmen, Ursprung in Mathematik,

  Berechnungen als Sequenz von Operationen

- sequentielle Rechner nach von-Neumann-Prinzip

  => seq. Programmierung:

  Beschreibung von Berechnungsabläufen

Parallelität

- **"Die Welt ist hochgradig parallel."**

- Natur:
  simultane Weiterentwicklung, Pflanzenwachstum, Wetter
- dezentrale Organisationen
- ...
- Viele Probleme sind ihrem Ursprung nach parallel,
  Sequentialisierung stellt eine künstliche Einschränkung dar.

- **These:** **Parallelverarbeitung** ist die natürliche
  Form der Informationsverarbeitung.

Erwartungen an die Parallelverarbeitung

- besser verständliche Programme
- höherer Informationsgehalt über die Problemstruktur
- mehr Rechenleistung >> “grand challenges”
- besseres Preis/Leistungsverhältnis:

  Die Parallelverarbeitung auf vielen kleinen, billigen Rechnern ist kostengünstiger als der Einsatz eines größeren, viel teureren Supercomputers.
- bessere Verfügbarkeit durch Komponentenredundanz
- ...

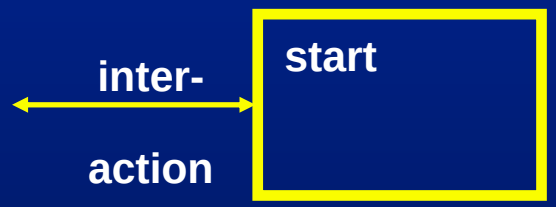
Parallelität vs. Nebenläufigkeit

- Kooperation von abhängigen, kommunizierenden Prozessen zur Lösung eines Problems
- transformationelle Systeme, parallele Algorithmen

⇒ Leistungssteigerung durch Zeitersparnis

⇒ Ziele: Beschleunigung, Skalierbarkeit (größere Probleme)

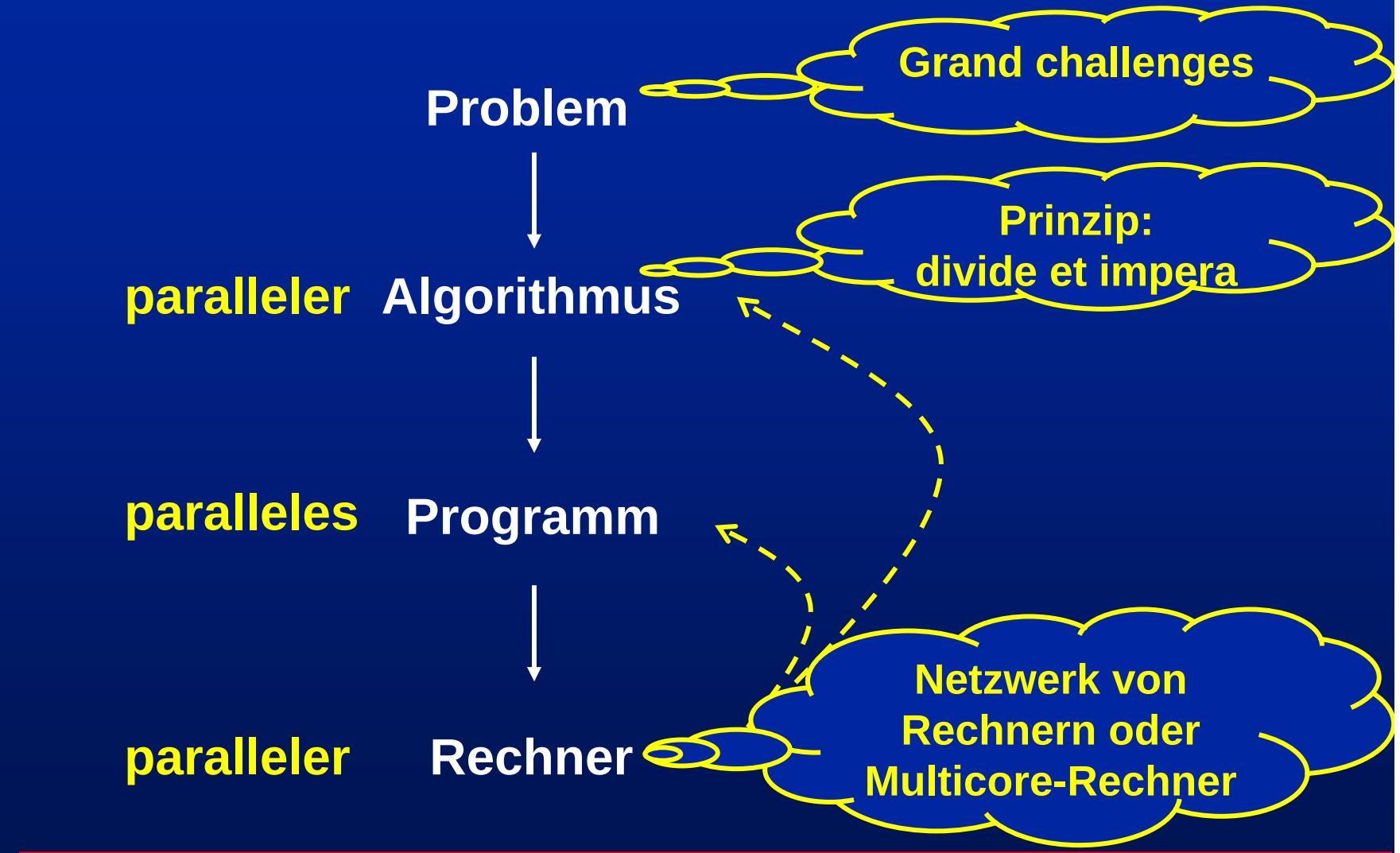
- Kooperation von unabhängigen Prozessen, die verschiedene Aufgaben haben
- reaktive bzw. verteilte Systeme, z.B. GUIs, Betriebssysteme



⇒ Verwaltung komplexer Systeme durch Abstraktion und Strukturierung

⇒ Ziele: Sicherheit, Fehlertoleranz

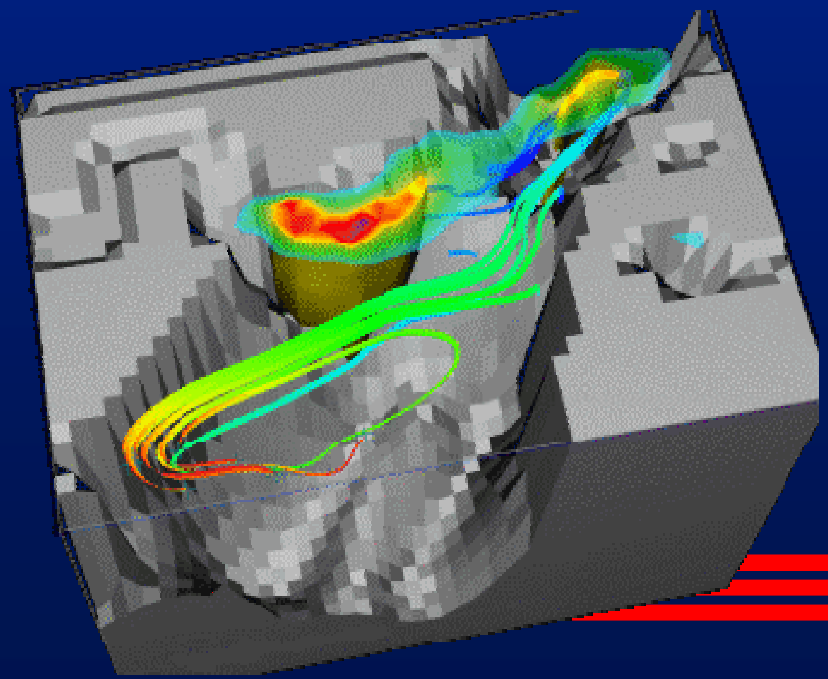
Vom Problem zum Programm



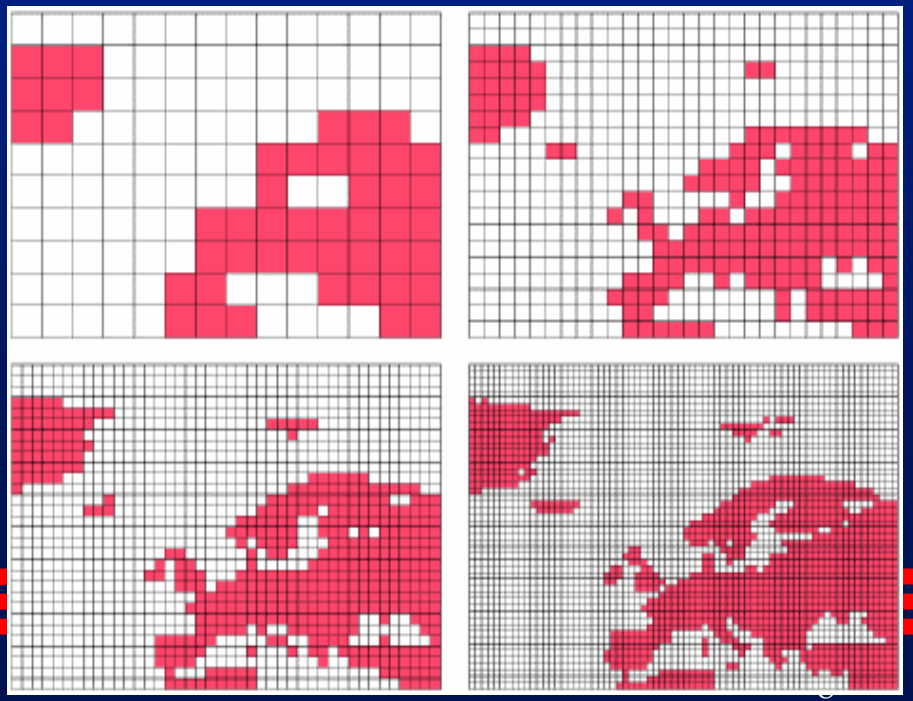
Grand Challenges

"... fundamentale Probleme in Wissenschaft und Technik, deren Lösung die Anwendung von Höchstleistungsrechnern erfordert."

Strömungsmodelle:
Golfstrom

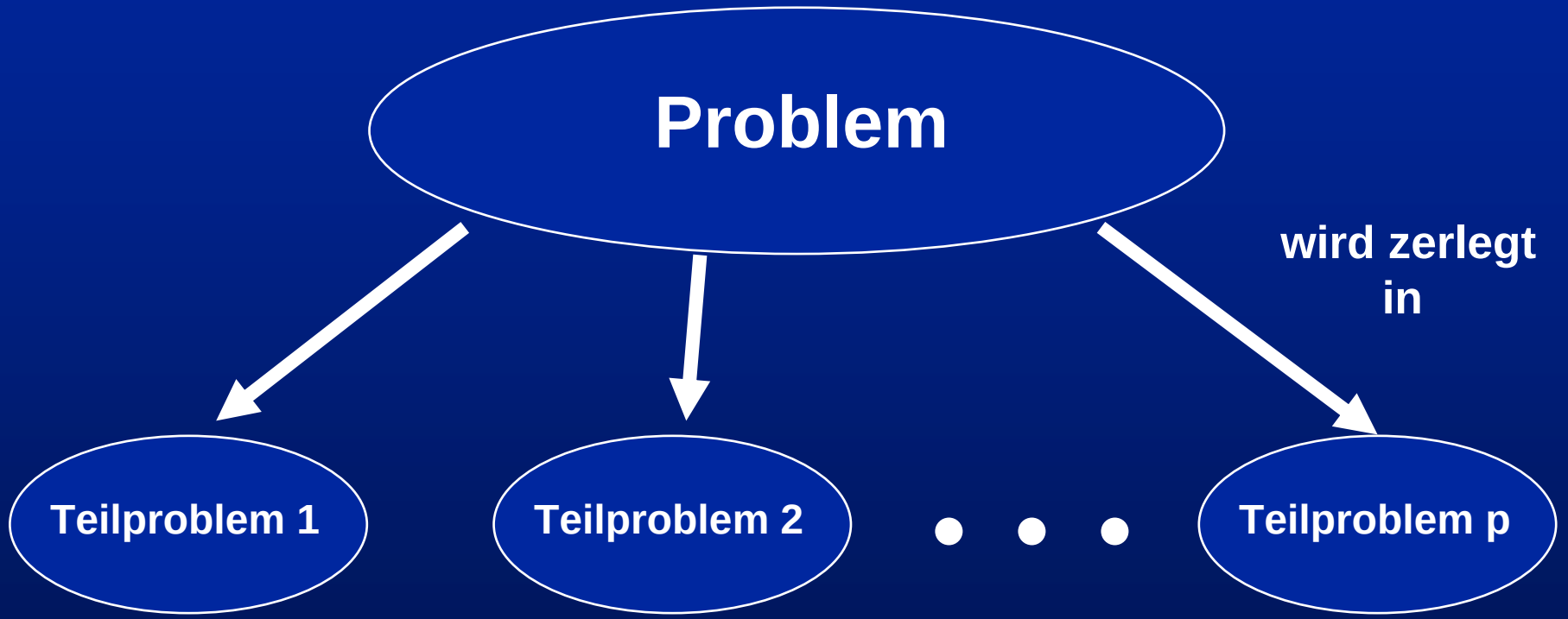


Wettervorhersage:
Europa



Grundprinzip paralleler Algorithmen

divide et impera



Zerlege Problem in Teile, die unabhängig sind und somit parallel gelöst werden können

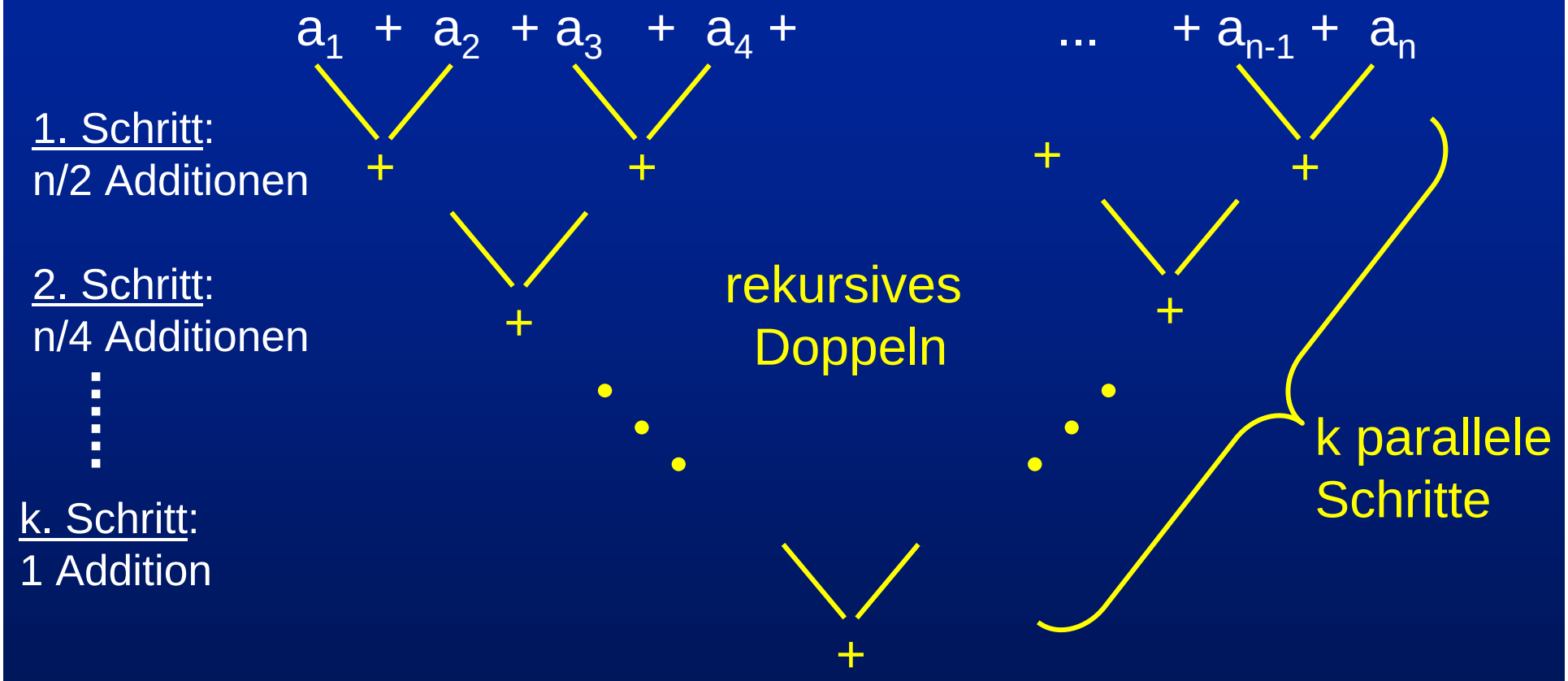
Vektoraddition

$$\begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ . \\ . \\ . \\ a_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ . \\ . \\ . \\ b_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 + b_1 \\ a_2 + b_2 \\ . \\ . \\ . \\ a_n + b_n \end{pmatrix}$$

n unabhängige Teilaufgaben

=> Datenparallelität, feine Granularität

Summation von n Zahlen (mit $n=2^k$)



=> Kontrollparallelität, feine Granularität

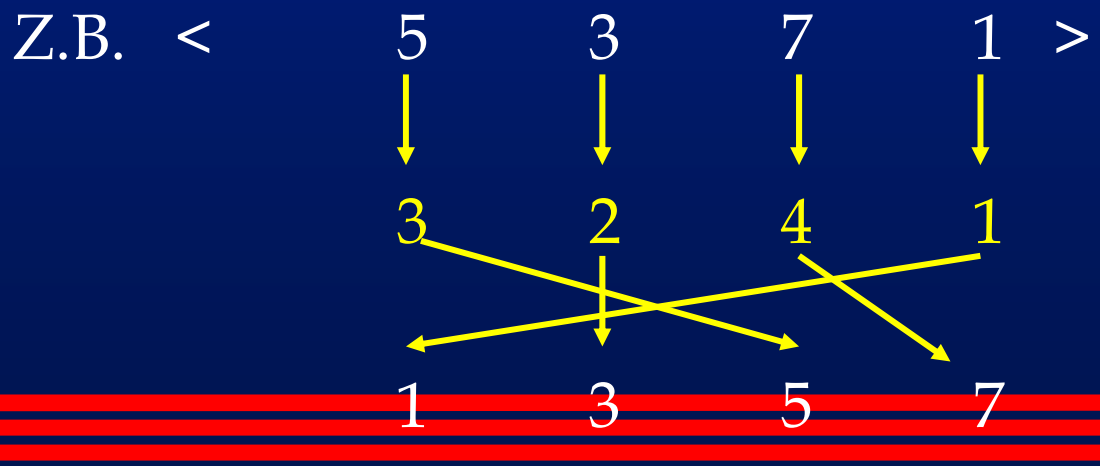
Sortieren von n Zahlen: RankSort

Sei â = < a_j | 1 <= i <= n>, n>=1 eine Folge von paarweise verschiedenen Zahlen.

Definiere $rank_{â}(a_i) := |\{ a_j \mid a_j <= a_i\}|$ als Rang des i-ten Elementes von â.

Berechne zu jedem Element parallel den Rang, der die Position in der Ergebnisliste angibt.

Daten- oder Kontrollparallelität ?



Ein inhärent sequentielles Problem

Berechnung großer Potenzen $y = x^{2^k}$ mit $k >> 1$

Algorithmus: sukzessives Quadrieren:

(1) $x * x = x^2$

(2) $x^2 * x^2 = x^4$

(3) $x^4 * x^4 = x^8$

... ...

(k) $x^{2^{k-1}} * x^{2^{k-1}} = x^{2^k}$

=> k sequentielle Schritte

Begriffe

- Daten- vs. Kontrollparallelität
  - Datenparallelität basiert auf einer Zerlegung der Datenbasis.
  - Kontrollparallelität zerlegt die durchzuführenden Berechnungen.

- feinkörnige vs. grobkörnige Parallelität
  - Bei feinkörniger Parallelität (fine grain parallelism) bestehen die parallelen Aufgaben meist nur aus einer Instruktion/Operation.

  - Bei grobkörniger Parallelität (coarse grain parallelism) sind die parallelen Aufgaben komplexer.

Die Grenzen zwischen diesen Konzepten sind fließend.

Bewertung paralleler Algorithmen

Parameter:

- Problemgröße n (Größe und Anzahl der Eingaben)
- Anzahl der Prozessoren p

Zeitkomplexität / Laufzeit $T_p(n)$, auch $T_p(n, A)$ oder T_p:

= Anzahl der Schritte eines Verfahrens A bei Eingaben der Größe n auf p Prozessoren

(=> Laufzeit auf p Prozessoren)

Sequentielle Zeit: $T_1(n)$

=> Algorithmus auf einem Prozessor oder

=> optimales (?) sequentielles Verfahren

In realen Messungen besteht $T_p(n)$ aus

Berechnungszeit + Kommunikationszeit + Leerlaufzeit

Beschleunigung (Speedup)

$$S_p(n) = T_1(n) / T_p(n)$$

Zentrale Größe, da Maß für Zeitgewinn durch Parallelisierung

absoluter Speedup: T_1 = Zeit des (opt.) seq. Algorithmus

relativer Speedup: T_1 = Zeit des par. Algorith. auf 1 Prozessor

Normalerweise gilt: $1 <= S_p(n) <= p$

- Slowdown ($S_p(n) < 1$)

  möglich wenn Mehraufwand der Parallelisierung Gewinn übersteigt

- superlinearer Speedup ($S_p(n) > p$)

  Cache-Effekte, Suchverfahren (branch and bound)

Effizienz

$$E_p(n) = S_p(n) / p$$

- Quotient aus erreichtem und theor. max. Speedup
- Maß für die Prozessorauslastung

  (bei identischer Anzahl von Schritten im seq. und par. Fall)

$$E_p(n) = T_1(n) / (T_p(n) * p)$$

Weitere Kriterien

Kommunikationskomplexität: $C_p(n)$

- Maß für Datentransferaufwand bei parallelem Algorithmus
- hängt nicht nur vom Algorithmus, sondern insbesondere auch von der Rechnerarchitektur ab.

  (=> starke Wechselwirkung zwischen Algorithmus und Rechnerarchitektur)

Skalierbarkeit

- Wie verhält sich der Algorithmus bei einer Erhöhung der Problemgröße oder Prozessoranzahl?
- Wie stark ist die Abhängigkeit des Algorithmus von der Rechnerkonfiguration?

Amdahls Gesetz

Sei A ein Algorithmus mit n Operationen, von denen ein Anteil f mit $0 < f < 1$ sequentiell ausgeführt werden muss. Sei $p > 1$.

Dann gilt:

$$S_p(n) <= \frac{1}{f+(1-f)/p} <= \frac{1}{f}$$

Konsequenz: Der Anteil nicht-parallelisierbarer Berechnungen eines Algorithmus muss sehr klein sein.

Amdahl-Effekt: Bei fester Prozessoranzahl steigt die Beschleunigung mit wachsender Problemgröße.

Gesetz von Gustafson und Barsis

Verbesserung der Genauigkeit/Problemgröße eines parallelen Verfahrens durch Steigerung der Prozessorzahl bei gleich bleibender Ausführungszeit

Gegeben sei ein paralleles Programm mit der parallelen Laufzeit $T_p(n)$ auf p Prozessoren.

Sei s der Anteil der parallelen Ausführungszeit, der der Ausführung sequentiellen Codes gewidmet ist. Dann gilt:

$$S_p(n) <= p + (1-p)*s$$

Rechnerklassifikation

Flynn 1966: grobe Einteilung nach Anzahl von Kontroll- bzw. Datenflüssen in einem Rechnersystem

Kontrollfluß \ Datenfluß	single data stream (SD)	multiple data stream (MD)
single instruction stream (SI)	**SISD:** serielle Monoprozessoren	**SIMD:** Vektor- bzw. Arrayrechner
multiple instruction stream (MI)	**MISD:** faktisch leer	**MIMD:** Mehrprozessorsysteme & verteilte Systeme

M. J. Flynn: Very high speed computing systems; Proc. IEEE 54 (1966), 1901-1909

Parallele Rechner

Multiprozessorsysteme (MIMD)

speichergekoppelt

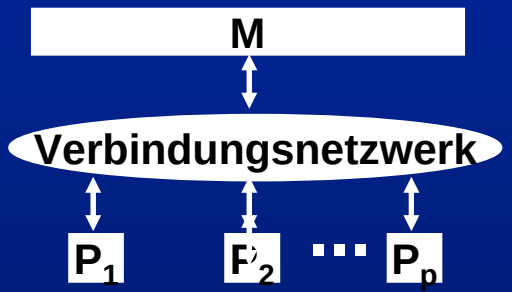
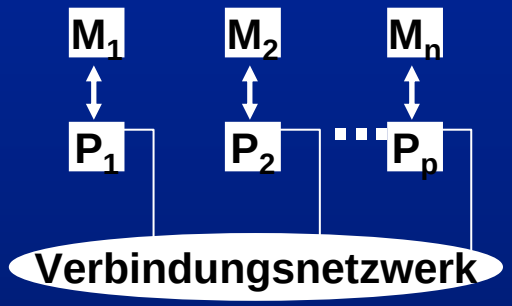
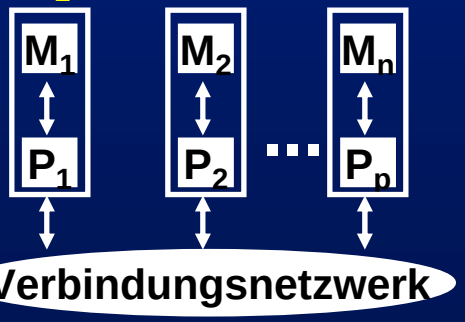
- gemeinsamer Adressbereich für alle Prozessoren
- Kommunikation und Synchronisation über gemeinsame Variablen

nachrichtengekoppelt

- prozessorlokale Adressbereiche; kein gemeinsamer Speicher
- Kommunikation und Synchronisation über Nachrichtenaustausch

➔ Abstraktion zu parallelen Programmiermodellen

Abbildung von Adressräumen auf Speicher

Speicher / Adressraum	global	physikalisch verteilt
gemeinsam	**SMP – symmetrischer Multiproz.**  **UMA: uniform memory access**	**DSM – Distributed-Shared-Mem.**  **NUMA: non-uniform mem. access**
verteilt		**Multicomputer – Distributed Mem.** 

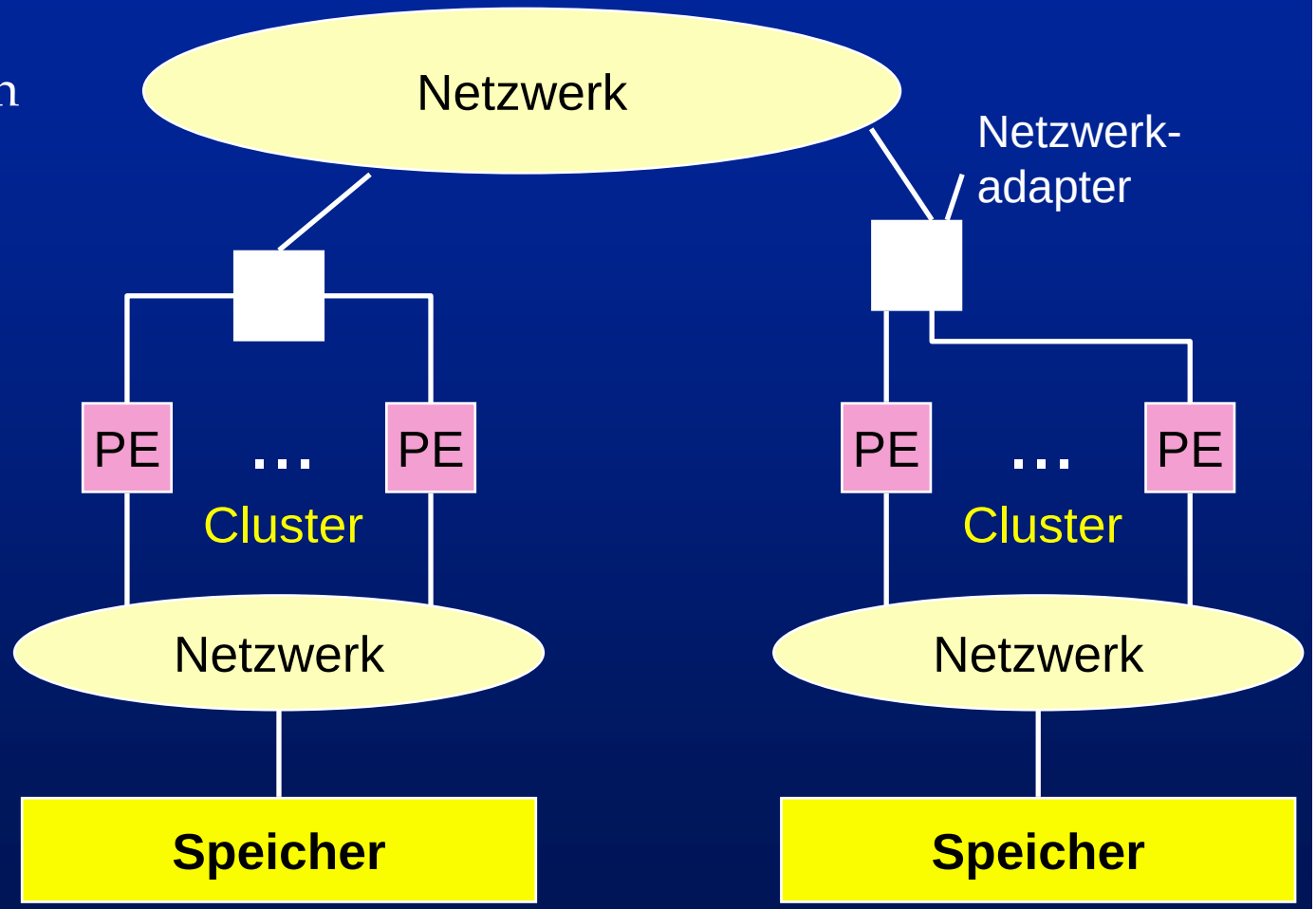
N/UCA: non-/uniform comm. arch.

Gegenüberstellung und Zusammenfassung

	SMP	DSM	DM
Adressraum	gemeinsam	gemeinsam	verteilt
Speicher	global	verteilt	verteilt
Komm./Synch.	gem. Vars	gem. Vars. (impl. Nachr.)	Nachr.
Skalierbarkeit	begrenzt	leicht	leicht
Lastverteilung	leicht	„leicht“	schwierig
Probleme	mangelnde Skalierbarkeit Speicherkonflikte	Cache-Kohärenz	globale Synchr. globale Inf.

Mischformen, z.B. Clusterarchitekturen

verteilte Systeme von Prozessorgruppen mit gemeinsamem Speicher



Paradigmen der Parallelverarbeitung

- **SIMD → synchrone Parallelität / Datenparallelität**
  homogene Parallelität

  "identische Prozesse, die auf verschiedenen Daten operieren", automatische Synchronisation

- **MIMD → asynchrone Parallelität, Prozessmodell**

"verschiedene Prozesse, die unabhängig unterschied-liche Daten verarbeiten", explizite Synchronisation nötig

Parallele Programmiermodelle

- gemeinsamer Adressraum (shared memory)
  - Kommunikation über gemeinsame Variablen
  - Synchronisation über Schlossvariablen, Semaphore, Barrieren
  - Bsp: Linda, Java, SR, PRAM
- Nachrichtenkopplung: Datenaustausch über Nachrichten
  - Prozess-Kanal-Modell (Foster) Bsp: Occam, Eden
  - Prozess-Nachrichten-Modell Bsp: MPI
- Datenparallelität
  - Bereitstellung datenparalleler Grundoperationen
  - hoher Abstraktionsgrad
  - Bsp: HFP, Fortran90, NESL, Data-Parallel Haskell

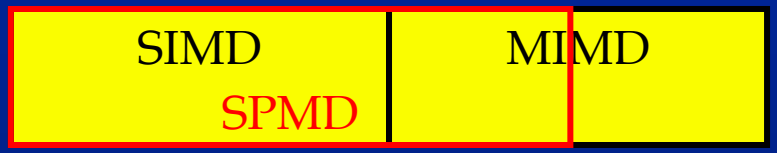
Prozess-Kanal- vs Prozess-Nachrichten-Modell

- Prozesse kapseln seq. Programme und Daten
- Prozessschnittstelle:
  - Eingangspforten (inports)
  - Ausgangspforten (outports)
- Grundaktionen eines Prozesses:
  - Senden und Empfangen von Nachrichten über die Pforten
  - lokale Berechnungen
  - neuen Prozess erzeugen -> dynamisches System
- Kanäle koppeln Aus- mit Eingangspforten
- Nachrichtenreihenfolge bleibt erhalten
- Prozesse werden auf Prozessoren abgebildet

- Prozesse werden über eine Prozessnummer identifiziert
- Sende-/ Empfangsanweisungen und Nachrichten enthalten Prozessnummern zur Angabe von Quelle und Ziel

Das SPMD – Programmiermodell (Single Program Multiple Data)

Mischform SIMD – MIMD:



Dasselbe Programm wird zum Beginn der Berechnung auf eine feste Anzahl von Prozessoren geladen, arbeitet aber auf unterschiedlichen Datenbereichen, indem gemäß Prozessidentifikation verzweigt wird.

- statisches Prozesssystem
- Prozess-Nachrichten-Modell
- Modellierung von Datenparallelität

Prozesse vs Prozessoren

- Ein Prozess ist eine Instanz eines parallel ausführbaren Programmteils. Er beschreibt eine Teilaufgabe (task) des zu lösenden Problems.
- Ein Prozessor ist eine aktive Systemkomponente, die einen oder mehrere Prozesse ausführt.
- Die Abbildung Prozesse -> Prozessoren ist i.a. nicht injektiv. Sie bestimmt die Lastverteilung im parallelen System.

Der Prozessbegriff

Verschiedene Definitionen für den Begriff Prozess:

- sequentielle Folge von Aktivitäten, durch die eine in sich geschlossene Aufgabe bearbeitet wird

oder

- funktionale Einheit aus
  - zeitlich invariantem Programm
  - Satz von Daten
  - zeitlich variantem Zustand

  => in Bearbeitung befindliches Programm

Jeder Prozess besitzt eine Umgebung und einen Kontext.

Umgebung und Kontext eines Prozesses

- Umgebung = geschützte Adressbereiche eines Prozesses
  - Code- und Datenbereiche im Speicher
  - geöffnete Dateien
  - Ressourcenverweise
- Kontext = Registerwerte des mit der Prozessausführung beschäftigten Prozessors
  - Befehlszähler
  - Zeiger auf Laufzeitkeller
  - Aktivierungsblock

Prozesswechsel => Umgebungs- und Kontextwechsel

=> sehr aufwändig, daher Unterscheidung zwischen Prozessen und Threads

Prozesse vs Threads

- Mehrere Threads (Kontrollfäden) teilen sich eine gemeinsame Umgebung.
  Threadwechsel => nur Kontextwechsel

- Man nennt Threads daher auch leichtgewichtige Prozesse.
- Da Threads sich den Adressraum teilen, müssen ihre Speicherzugriffe synchronisiert werden.

- Moderne Betriebssysteme sind „multi-threaded“, unterstützen also das Threadkonzept.
- Seit 1996 gibt es eine standardisierte Threadschnittstelle des POSIX_Komitees.

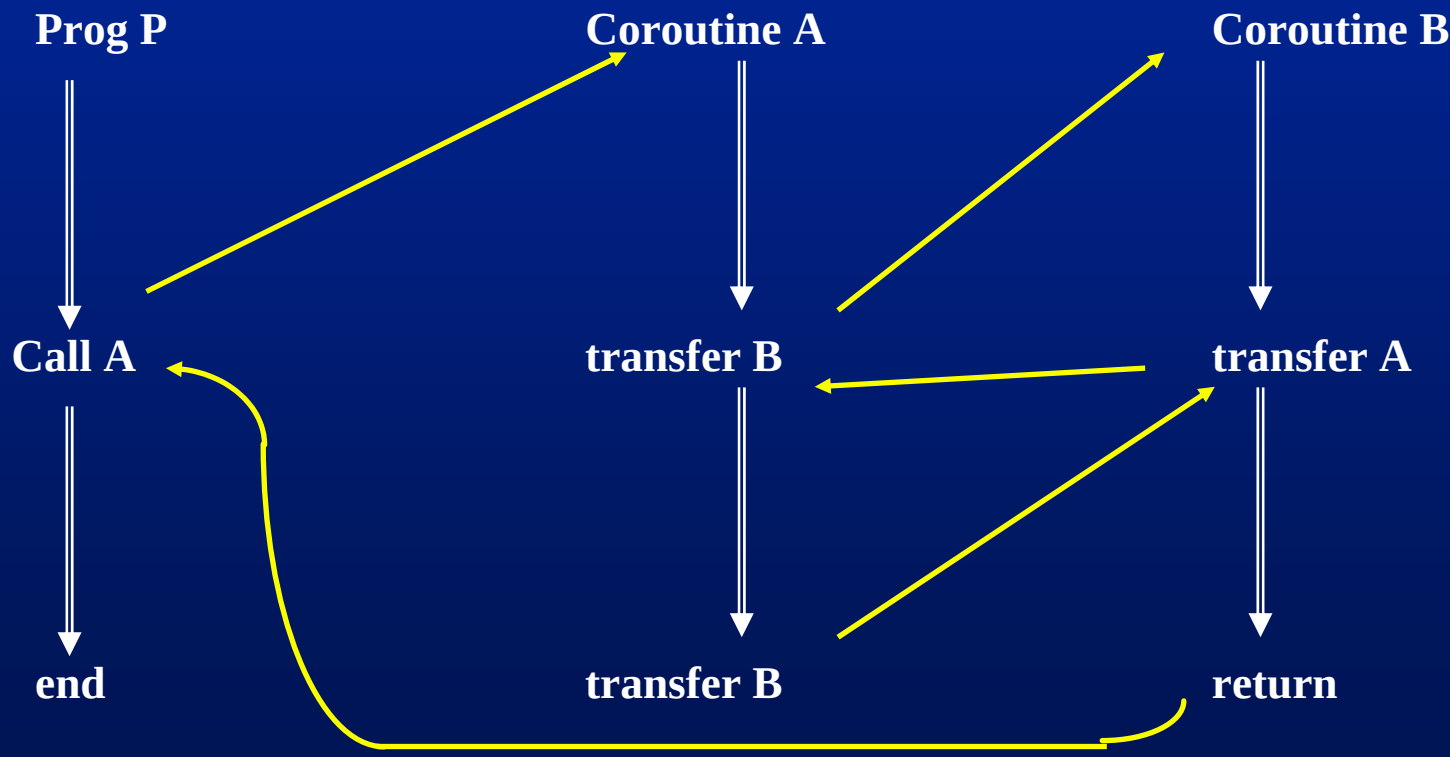
Historische Entwicklung: 60er Jahre

- Entwicklung erster Prozessmodelle und Konzepte zur Prozessinteraktion im Kontext von Mehrbenutzerbetriebssystemen (Multitasking)

- "Nebenläufigkeit" (Concurrency):
  unabhängige Ausführung verschiedener Jobs / Prozesse im Zeitscheibenverfahren auf einem Prozessor

Conway 1963: Coroutinen

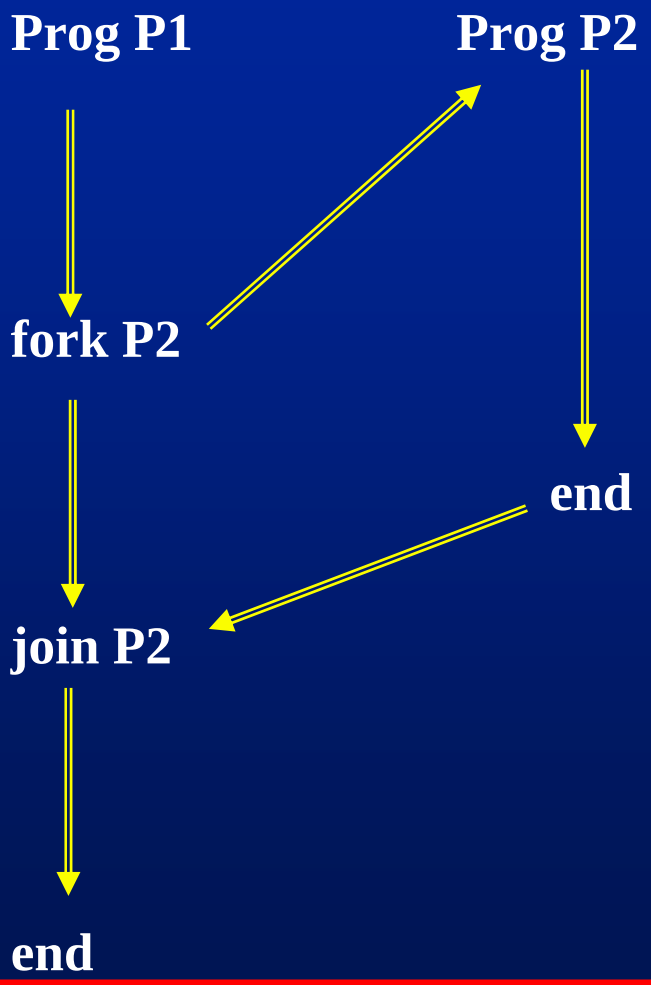
- keine echte Parallelverarbeitung, sondern Multiprogrammierung, d. h. mehrere Programme auf einem Prozessor
- kontrollierte Belegung und Freigabe des „Betriebsmittels“ Prozessor



Dennis/van Horn 1966: fork/join

- fork startet einen parallelen Prozeß
- join zwingt das Programm, das den Prozess gestartet hat, zu warten, bis der parallele Prozess beendet ist
  => Synchronisation

UNIX verwendet Varianten von fork / join(wait).



Dijkstra 1968: cobegin / coend

- Anweisungsblöcke, die mit cobegin/coend (oder parbegin/parend) geklammert sind, werden parallel ausgeführt:

  cobegin S1 | S2 | ... | Sm coend

- nicht so allgemein wie fork/join wegen fehlender Kommunikations- und Synchronisationskonzepte
- Mit entsprechenden Erweiterungen findet man ein ähnliches Konstrukt auch in der parallelen Programmiersprache MPD.

Erste Parallelrechner

Ende der 60er Jahre: Start erster Projekte an Universitäten und Forschungslaboratorien zur Entwicklung von Parallelrechnern, erste Prototypen gab es erst im Laufe der 70er Jahre

z. B.:	**ILLIAC IV**	**University of Illinois, Burroughs, NASA** **8 x 8 Processor -Array**	**~ 1966-1975**
	SOLOMON	**Westinghouse** **32 x 32 1 bit Prozessoren**	**~ 1962**
	ICL-DAP	**ICL Distributed Array Processor** **4096 1 bit Prozessoren,** **Anwendung Bildverarbeitung**	**~ 1979**

Amdahl 1967

Validity of the Single Processor Approach to Achieving Large Scale Computing Capabilities, AFIPS Conf. Proc. 30: 483 – 485.

- Diese Arbeit enthält Argumente für die sequentielle und gegen die parallele Verarbeitung.
- Sie löste viele Diskussionen über Sinn und Wert der Parallelverarbeitung aus

$$\textit{Amdahls Gesetz:}\quad S_p = \frac{1}{f + \frac{(1-f)}{p}}$$

Historische Entwicklung: 70er Jahre

Entwicklung von Programmiersprachen mit Konzepten zur Erzeugung und Interaktion von Prozessen

(Semaphore, Monitore, Nachrichten, ...)

- *Brinch Hansen 1975:* Concurrent Pascal (= Pascal + Prozeß-Konzept)
- *Wirth 1977:* Modula
- *Hoare 1978:* Communicating Sequential Processes CSP
  Vorläufer der Transputer-Sprache Occam (1984)
- *1973/74:* Untersuchungen zur parallelen Auswertung arithmetischer Ausdrücke
- *Fortune & Wyllie 1978:* Entwicklung der PRAM als Grundlage vieler theoretischer Komplexitäts-untersuchungen paralleler Algorithmen
- *VS DoD 1981:* Ada

Parallelrechner Ende der 70er Jahre

- Hochleistungsrechner, die auf Vektor- und Pipelineverarbeitung aufbauen, kommen auf den Markt:
  - CRAY-1 (Control Data) ~ 1976
  - CDC-Star, Cyber 205 ~ 1975/81
- außerdem verschiedene Parallelrechnersysteme:
  - BSP (Burrougs Scientific Processor) 1980
  - MPP (Goodyear Aerospace) 1979
    - massive parallel processors
    - Spezialsystem für Signal & Bildverarbeitung mit 128^2 (= 16384) Prozessoren

Historische Entwicklung: 80er Jahre

- Jahrzehnt des Super-Computing und damit auch der Parallelverarbeitung.
- maßgebliche Gründe dafür:
  - Verbreitung der VLSI-Technologie =>

    1985: erster 32 Bit Mikroprozessor
  - Programmiertechniken wie Semaphore, Monitore, Signale ... setzen sich als Standard durch => Real Time Programming
  - Vektor-Supercomputer bringen erhebliche Leistungssteigerungen, aber auch Forderungen nach weiterer Leistung
  - erste Erfahrungen mit realen Parallelrechnern

Einige Parallelrechner der 80er Jahre

- SIMD:
  - DAP - Weiterentwicklung des ICL-DAP durch AMT (Active Memory Technology)
  - MP1 - MasPar Computer Corporation, bis zu 16384 PE's
  - CM - Connection Machine, Thinking Machine Corp., Ph. D. Daniel Hillis 1985, bis zu 65536 PE's 1-bit
- SM-MIMD (Shared Memory):
  - Allient- FX2800 bis zu 14 PE's (7*2 Module), nicht busorientiert
  - Sequent Symmetry, bis zu 30 PE's, busorientiert
- DM-MIMD (Distributed Memory):
  - Intel iPSC/860, Hypercube-Organisation, bis 128 PE's = 2^7
  - Inmos Transputer basierte Systeme, bis 256 PE's

Historische Entwicklung: 90er Jahre

beginnende Konvergenz von Konzepten auf Hardware und Software-Ebene:

- Einsatz von Standard-Mikroprozessoren und Hochgeschwindigkeitsnetzwerken
- verteilt realisierte gemeinsame Speicher:
  NUMA (Non-Uniform Memory Access) shared memory, distributed shared memory
- Trend zur Unterstützung mehrerer Programmiermodelle
- “Standards” auf Software Ebene:
  - MPI - Message Passing Interface
  - HPF- High Performance Fortran Forum, Datenparallelität
  - OpenMP- Shared-Memory Compiler-Direktiven

Einige Parallelrechner der 90er Jahre

- UMA (Uniform Memory Access)-Shared Memory:
  - Silicon Graphics Inc. (SGI) Challenge 1993, busorientiert, bis zu 16 Prozessoren
  - SUN Ultrasparc, 256 Bit breiter Bus (2.5 GB/s), bis zu 30 Prozessoren
- NUMA-Shared Memory:
  - KSR-1 (Kendall Square Research), 1993
  - Cray T3E(DEC Alpha Processor), dreidimensionales Gitter mit bis zu 1000 Prozessoren, globaler Adreßraum, keine Hardware zur Erhaltung der Cache-Konsistenz
- Distributed Memory:
  - IBM SP-2, 1993, RS 6000 Workstations mit Omega-Netzwerk
  - Intel Paragon, 1992, i860 Prozessoren, dreidimensionales Gitter
  - Beowulf, 1994, 16 Intel DX-Prozessoren mit Ethernet-Links,

nur COTS (commodity off-the-shelf) Komponenten

Entwicklung der Parallelrechner-Firmen

Firma/Land	Jahr	Status in 2001
Sequent/U.S.	1984	von IBM übernommen
Meiko /U.K.	1985	bankrott
nCube/U.S.	1985	Umorientierung
Parsytec/D.	1985	Umorientierung
Alliant/U.S.	1985	bankrott
Floating Point S./U.S.	1986	von Sun übernommen
Silicon Graphics/U.S.	1988	aktiv
KSR/U.S.	1992	bankrott
IBM/U.S.	1993	aktiv
Sun Micros./U.S.	1993	aktiv
Cray Research/U.S.	1993	aktiv

Aktueller Stand

- Die meisten Probleme sind inhärent parallel. Aber parallele Programmierung ist viel schwieriger als sequentielle.
- www.top500.org: Liste der schnellsten Rechner der Welt
- Mehrkernrechner als Knoten (seit Anfang 2000er Jahre)
  => Clusterarchitekturen mit Mehrkernrechnern
- Parallele Programmierung mit C, C++, Fortran plus
  - MPI
  - OpenMP
- Abstraktere Ansätze
  - Datenparallelität (HPF, Data Parallel Haskell)
  - Skelettbibliotheken (Algorithmische Skelette)
  - Parallele deklarative Sprachen