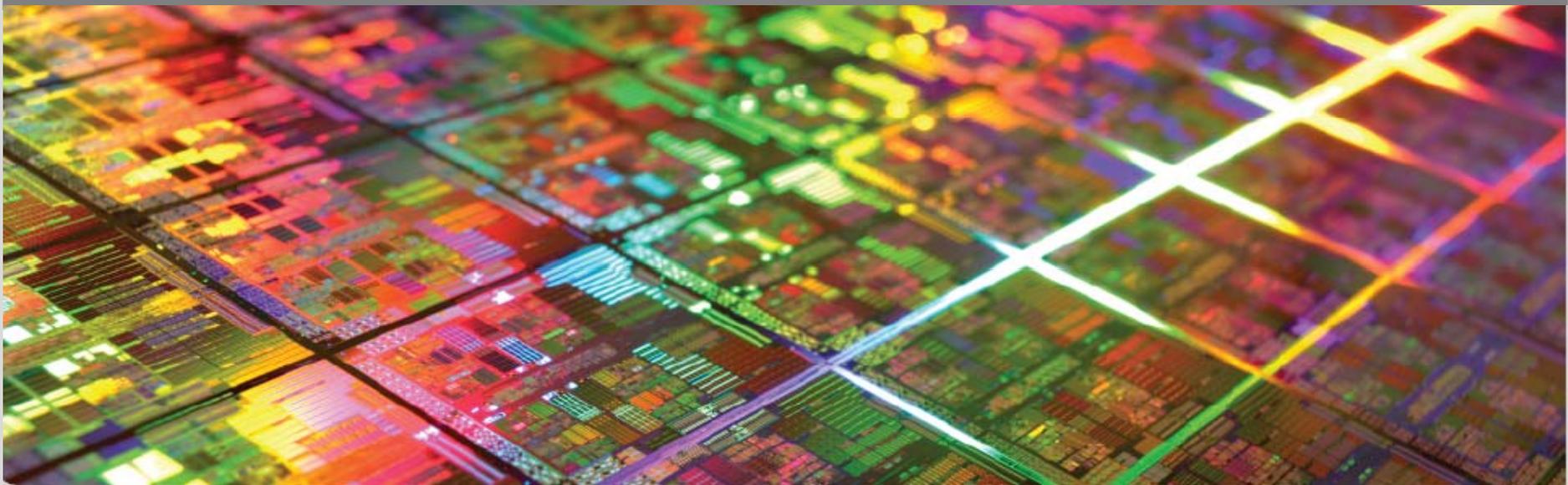


Rechnerstrukturen

Vorlesung im Sommersemester 2013

Prof. Dr. Wolfgang Karl

Fakultät für Informatik – Lehrstuhl für Rechnerarchitektur und Parallelverarbeitung



Vorlesung Rechnerstrukturen

Kapitel 3: Multiprozessoren – Parallelismus auf Prozess-/ Blockebene

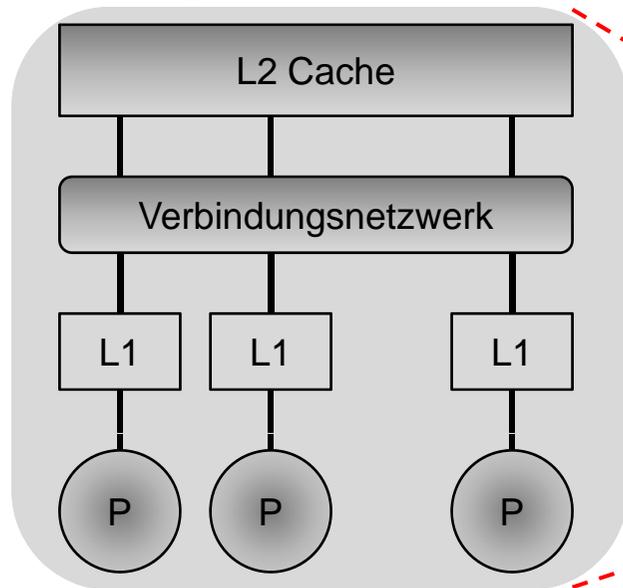
- 3.1 Motivation
- 3.2 Allgemeine Grundlagen
- 3.3 Parallele Programmierung
- 3.4 Quantitative Maßzahlen
- 3.5 Verbindungsnetzwerke

Verbindungsstrukturen

Verbindungsnetzwerke in einem Multiprozessorsystem

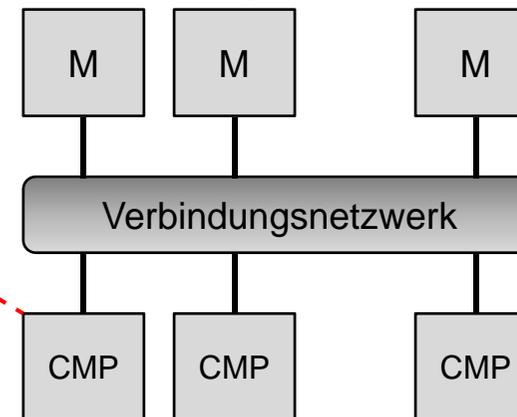
■ Beispiel

CMP mit gemeinsamem L2 Cache



Verbindungsnetzwerk auf dem Chip

Multiprozessor

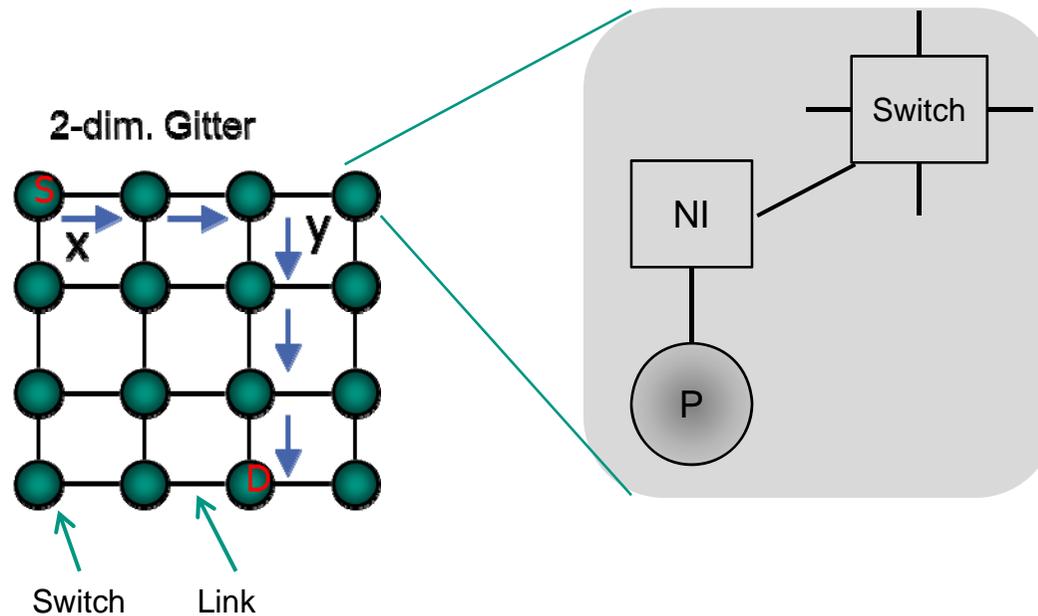


Verbindungsnetzwerk im System

Verbindungsstrukturen

Verbindungsnetzwerke in einem Multiprozessorsystem

- Beispiel



Verbindungsstrukturen

Verbindungsnetzwerke in Multiprozessoren

- Ermöglichen die Kommunikation und Kooperation zwischen den Verarbeitungselementen (Knoten)
 - Zuverlässiger Austausch von Informationen
- Einsatz eines Verbindungsnetzwerks
 - Chip-Multiprozessor (CMP)
 - Network on Chip (NoC)
 - Multiprozessor mit verteiltem Speicher (nachrichtenorientierter Multiprozessor)
 - Verbinden physikalisch jeden Knoten für das Versenden von Nachrichten
 - Direkte Send/Receive-Kommunikation zwischen den Knoten
 - Multiprozessor mit gemeinsamem Speicher
 - Ermöglicht den Zugriff aller Knoten auf den gemeinsamen Speicher
 - Kommunikation durch Lesen und Schreiben auf gemeinsame Daten

Verbindungsstrukturen

Charakterisierung von Verbindungsnetzwerken

■ Latenz

- **Übertragungszeit einer Nachricht T_{msg}**
 - die Zeit, die für das Verschicken einer Nachricht von einer bestimmten Länge zwischen zwei Prozessoren benötigt wird
- Die Übertragungszeit setzt sich zusammen aus:
 - der **Startzeit t_s** (Message Startup Time):
 - Die Zeit, die benötigt wird, um die Kommunikation zu initiieren
 - **Transferzeit t_w** pro übertragenem Datenwort:
 - hängt von der physikalischen Bandbreite des Kommunikationsmediums ab.
- Voraussetzung:
 - Verbindungsnetz ist konfliktfrei, da sonst die Übertragungszeit nicht fest berechnet werden kann

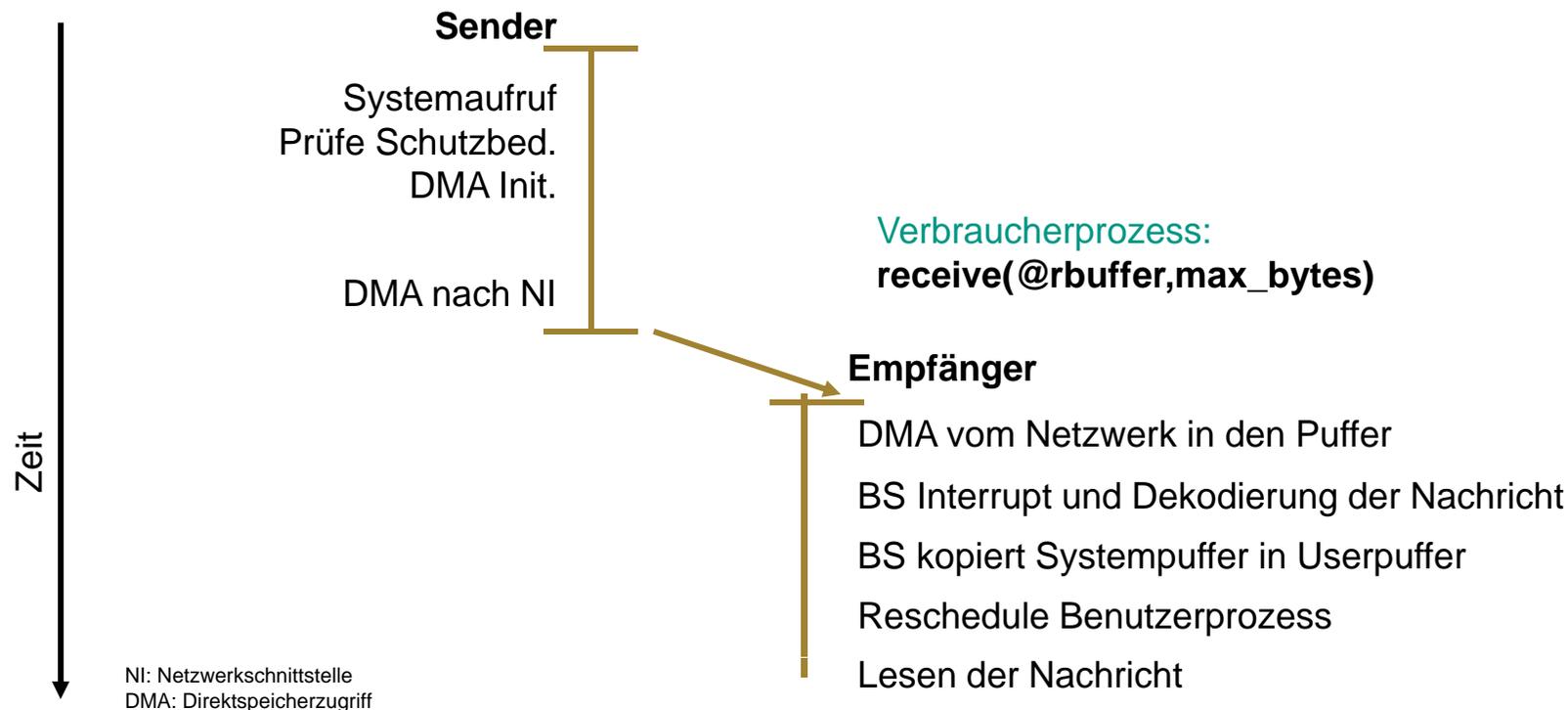
Verbindungsstrukturen

Charakterisierung von Verbindungsnetzwerken

- **Latenz** (Übertragungszeit einer Nachricht, latency)
 - **Software-Overhead**

Erzeugerprozess:

`send(proci, processi, @sbuffer, num_bytes)`



Verbindungsstrukturen

Charakterisierung von Verbindungsnetzwerken

- **Latenz** (Übertragungszeit einer Nachricht, latency)
 - **Kanalverzögerung** (channel delay)
 - Dauer für die Belegung eines Kommunikationskanals durch eine Nachricht
 - Kanal:
 - Physikalische Verbindung zwischen Schalterelementen oder Knoten mit einem Puffer zum Halten der Daten während ihrer Übertragung
 - Verbindung (link)
 - Menge von Leitungen

Verbindungsstrukturen

Charakterisierung von Verbindungsnetzwerken

- **Latenz** (Übertragungszeit einer Nachricht, latency)
 - **Schaltverzögerung, Routing-Verzögerung** (switching delay, routing delay)
 - Zeit, einen Weg zwischen zwei Knoten aufzubauen
 - Pfadberechnung oder Wegefindung (Routing)
 - die Art, wie der Weg einer Nachricht vom Sende- zum Zielknoten berechnet wird
 - Zu einer Verbindungsstruktur kann es mehrere Wegefindungsalgorithmen geben
 - einfache Implementierung in Verbindungselementen mit Hilfe eines schnellen Hardware-Algorithmus

Verbindungsstrukturen

Charakterisierung von Verbindungsnetzwerken

- **Latenz** (Übertragungszeit einer Nachricht, latency)
 - **Blockierungszeit** (contention time)
 - Wird verursacht, wenn zu einem Zeitpunkt mehr als eine Nachricht auf eine Netzwerkressource zugreifen
 - **Blockierung** (contention)
 - Ein Verbindungsnetzwerk heißt blockierungsfrei, falls jede gewünschte Verbindung zwischen Prozessoren oder zwischen Prozessoren und Speichern unabhängig von schon bestehenden Verbindungen hergestellt werden kann

Verbindungsstrukturen

Charakterisierung von Verbindungsnetzwerken

- **Durchsatz oder Übertragungsbandbreite** (bandwidth)
 - Maximale Übertragungsleistung des Verbindungsnetzwerkes oder einzelner Verbindungen, meist in Megabits pro Sekunde (MBit/s) oder Megabytes pro Sekunde (MB/s)

- **Bisektionsbandbreite** (bisection bandwidth)
 - Maximale Anzahl von Megabytes pro Sekunde, die das Netzwerk über die Bisektionslinie, die das Netzwerk in zwei gleiche Hälften teilt, transportieren kann

Verbindungsstrukturen

Charakterisierung von Verbindungsnetzwerken

- **Diameter oder Durchmesser r (diameter):**
 - maximale Distanz für die Kommunikation zweier Prozessoren, also die Anzahl der Verbindungen, die durchlaufen werden müssen. Man spricht auch von der maximalen Pfadlänge zwischen zwei Knoten.

- **Verbindungsgrad eines Knotens P (node degree, connectivity)**
 - ist definiert als die Anzahl der direkten Verbindungen, die von einem Knoten zu anderen Knoten bestehen.

- **Mittlere Distanz d_a (average distance) zwischen zwei Knoten**
 - Anzahl der Links auf dem kürzesten Pfad zwischen zwei Knoten
 - P/d_a ist die maximale Anzahl neuer Nachrichten, die von jedem Knoten in einem Zyklus in das Netzwerk eingebracht werden können

Verbindungsstrukturen

Charakterisierung von Verbindungsnetzwerken

■ **Komplexität oder Kosten:**

- Kosten für die Implementierung einer Hardware
- Aufwand für das Verbindungsnetz gemessen in der Anzahl und der Art der Schaltelemente und Verbindungsleitungen.

■ **Erweiterbarkeit:**

- Multiprozessoren können begrenzt, stufenlos oder nur durch Verdopplung der Anzahl der Prozessoren erweiterbar sein.

■ **Skalierbarkeit:**

- Fähigkeit, die wesentlichen Eigenschaften des Verbindungsnetzes auch bei beliebiger Erhöhung der Knotenzahl beizubehalten.

Verbindungsstrukturen

Charakterisierung von Verbindungsnetzwerken

■ Ausfalltoleranz oder Redundanz :

- Verbindungen zwischen Knoten sind selbst dann noch zu schalten, wenn einzelne Elemente des Netzes (Schaltelemente, Leitungen) ausfallen.
- Ein fehlertolerantes Netz muss also zwischen jedem Paar von Knoten mindestens einen zweiten, redundanten Weg bereitstellen.
Die Eigenschaft eines Systems, bei Ausfall einzelner Komponenten unter deren Umgehung funktionstüchtig zu bleiben, wenn auch mit verminderter Leistung, wird als Graceful degradation bezeichnet.

Verbindungsstrukturen

Charakterisierung von Verbindungsnetzwerken

■ Art des Datentransfers:

■ Durchschalte- oder Leitungsvermittlung (circuit switching):

- Eigenschaft eines Netzes eine direkte Verbindung zwischen zwei oder mehreren Knoten eines Netzes zu schalten.
Die physikalische Verbindung bleibt für die gesamte Dauer der Informationsübertragung bestehen.
- Blockierungsfreie Kommunikation
- Kurze Latenz
- Gut geeignet für lange Nachrichten, da die Zeit zum Aufsetzen einer Nachricht im Verhältnis zur Übertragungszeit kurz ist
- Übertragungszeit einer Nachricht der Länge L über eine Distanz d beträgt:
 $L/b + d\delta$, mit individueller Schaltverzögerung δ und der Bandbreite b eines Kanals

Verbindungsstrukturen

Charakterisierung von Verbindungsnetzwerken

■ Art des Datentransfers:

■ Paketvermittlung (packet switching):

- Datenpakete fester Länge oder Nachrichten variabler Länge werden entsprechend einem Wegefindungsalgorithmus (routing) vom Absender zum Empfänger geschickt
- Nachrichten mit Adresse und Daten werden durch das Netzwerk verschickt
- Adresse wird in jedem Knoten gelesen und die Nachricht wird zum nächsten Knoten weitergeleitet, bis die Nachricht das Ziel erreicht
- Günstig für kurze Nachrichten

Verbindungsstrukturen

Charakterisierung von Verbindungsnetzwerken

■ Art des Datentransfers:

■ Paketvermittlung (packet switching):

■ Übertragungsmodi: **Store-and-forward-Modus**

- Jeder Knoten enthält einen Puffer zum Aufnehmen der vollständigen Nachricht
- Nachricht wird von jedem Zwischenknoten in Empfang genommen, vollständig zwischengespeichert und dann weiter übertragen
- Nachfolgende Pakete werden nacheinander verschickt
- Gegenüber Circuit Switching: höhere Bandbreite, aber auch höhere Latenz
- Übertragungszeit einer Nachricht der Länge L über eine Distanz d von einer Quelle zum Ziel beträgt $d(L/b+\delta)$

Verbindungsstrukturen

Charakterisierung von Verbindungsnetzwerken

■ Art des Datentransfers:

■ Paketvermittlung (packet switching):

■ Übertragungsmodi: **Cut-through** oder **wormhole**

- Phit und Flusskontrolle
- Eine Nachricht selbst wird in eine Anzahl von Übertragungseinheiten (phits – physical transfer units – oder auch flits – flow control digits – genannt) zerlegt.
- Ein Phit ist dabei die Datenportion, die zu einem Zeitpunkt zwischen zwei Knoten übertragen werden kann.
- Bei der Nachrichtenübertragung zwischen nicht benachbarten Sender- und Empfängerknoten sind Puffer nötig.

Verbindungsstrukturen

Charakterisierung von Verbindungsnetzwerken

■ Art des Datentransfers:

■ Paketvermittlung (packet switching):

■ Übertragungsmodi: **Virtual-cut-through-Modus:**

- Nachricht wird aufgeteilt in Zellen (Flits) fester Größe
- Der Kopfteil der Nachricht enthält die Empfängeradresse und bestimmt den einzuschlagenden Weg. Flits mit Daten folgen dem Kopf auf dem Pfad von der Quelle zum Ziel
- Bei Ankunft des Kopfs einer Nachricht wird dieser dekodiert . Nachfolgende Flits werden automatisch an den nächsten Knoten auf dem ausgewählten Pfad weitergeleitet , ein Flit pro Zeiteinheit gemäß einer Pipeline-Verarbeitung
- Kopf-Information wird festgehalten bis letztes Flit angekommen ist.
- ankommende Daten werden nur im Konfliktfall im Knoten vollständig zwischengespeichert.
- In jedem Knoten werden Puffer bereit gehalten, die auch ein maximal großes Nachrichtenpaket zwischenspeichern können

Verbindungsstrukturen

Charakterisierung von Verbindungsnetzwerken

■ Art des Datentransfers:

■ Paketvermittlung (packet switching):

■ Übertragungsmodi: **Wormhole-routing-Modus:**

- solange keine Übertragungskanäle blockiert sind, mit den Virtual-cut-through-Modus identisch.
- Falls der Kopfteil der Nachricht auf einen Kanal trifft, der gerade belegt ist, wird er abgeblockt. Alle nachfolgenden Übertragungseinheiten der Nachricht verharren dann ebenfalls an ihrer augenblicklichen Position, bis die Blockierung aufgehoben ist. Durch das Verharren werden die Puffer nachfolgender Kanäle auch für weitere Nachrichten blockiert.

Verbindungsstrukturen

Charakterisierung von Verbindungsnetzwerken

■ Art des Datentransfers:

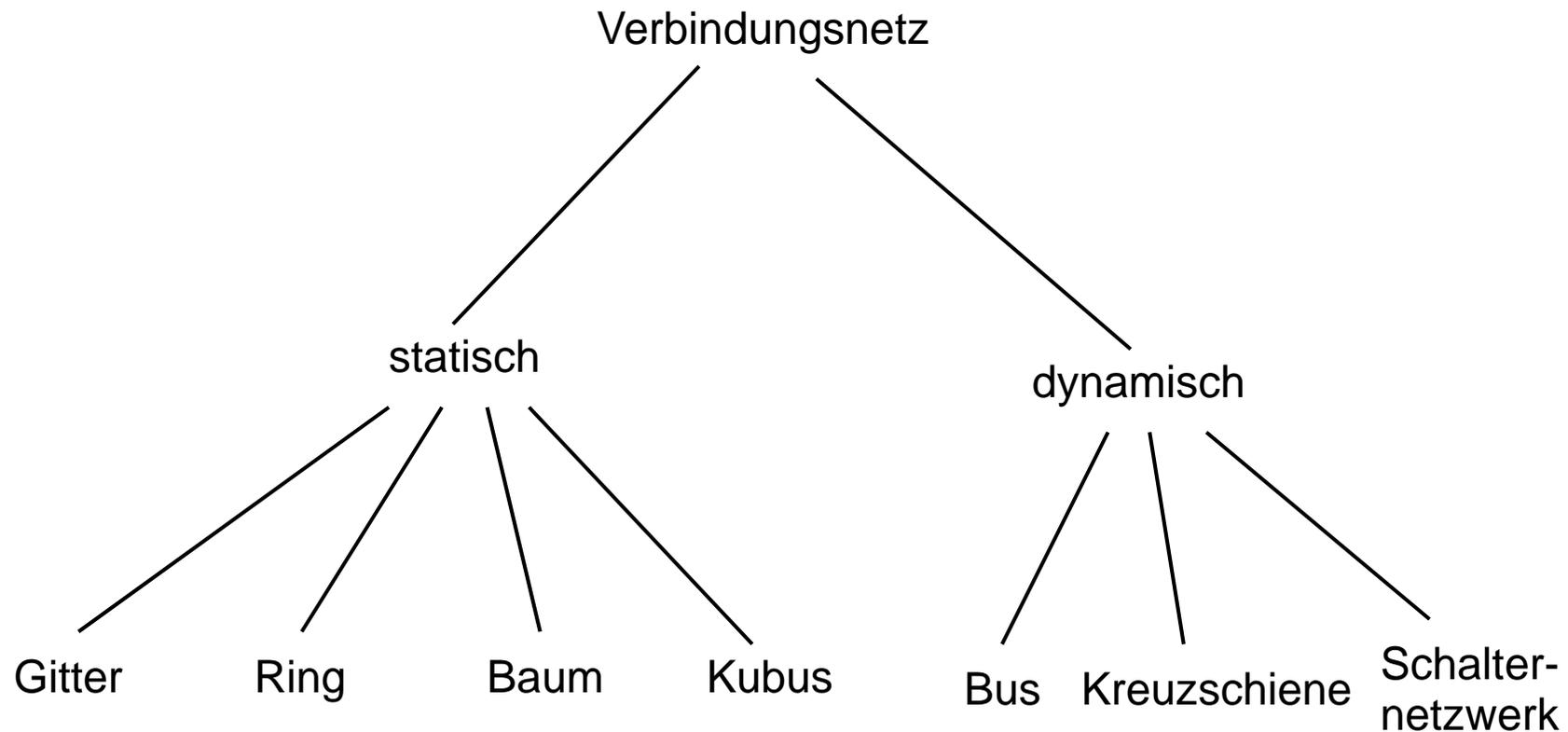
■ Paketvermittlung (packet switching):

■ Übertragungsmodi: **Buffered wormhole routing:**

- Kompromisslösung zwischen Virtual-cut-through- und Wormhole-routing-Modus eingesetzt,
- begrenzter Puffer zur Aufnahme kleinerer Pakete vorhanden
- größere Pakete werden im Blockierungsfall – ähnlich dem Wormhole-routing-Modus – in den Puffern mehrerer Knoten zwischengespeichert.

Verbindungsstrukturen

Topologie: Klassifizierung



Verbindungsstrukturen

Topologie:

■ Statische Verbindungsnetze

- Nach Aufbau des Verbindungsnetzes bleiben die Verbindungen fest
- Gute Leistung für Probleme mit vorhersagbaren Kommunikationsmustern zwischen benachbarten Knoten

Verbindungsstrukturen

Topologie:

■ Statische Verbindungsnetze

■ Vollständige Verbindung

- Jeder Knoten ist mit jedem anderen Knoten verbunden
- Höchste Leistungsfähigkeit
 - Arbeitet für alle Anwendungen mit allen Arten von Kommunikationsmustern effizient
- Aber: nicht praktikabel in Parallelrechnern
 - Netzwerkkosten steigen quadratisch mit der Anzahl der Prozessoren

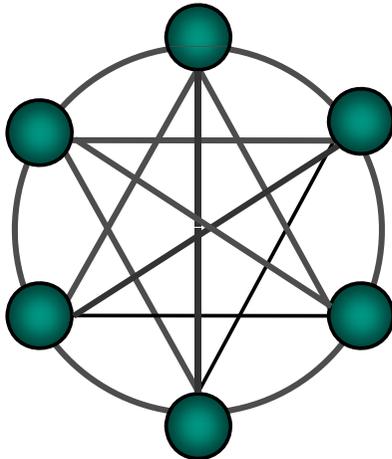
Verbindungsstrukturen

Topologie:

■ Statische Verbindungsnetze

■ Vollständige Verbindung

- Jeder Knoten ist mit jedem anderen Knoten verbunden
- Höchste Leistungsfähigkeit
 - Arbeitet für alle Anwendungen mit allen Arten von Kommunikationsmustern effizient
- Aber: nicht praktikabel in Parallelrechnern
 - Netzwerkkosten steigen quadratisch mit der Anzahl der Prozessoren



Verbindungsstrukturen

Topologie:

■ Statische Verbindungsnetze

■ Gitterstrukturen

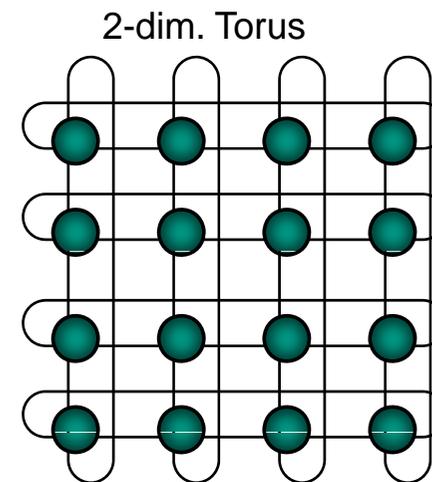
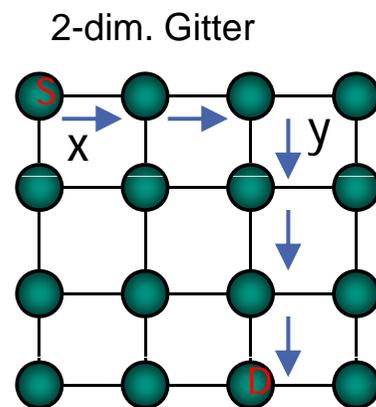
■ 1-dimensionales Gitter (**lineares Feld, Kette**)

- Verbindet N Knoten mit $(N-1)$ Verbindungen
- Endknoten haben den Grad 1, Zwischenknoten den Grad 2 und sind mit benachbarten Knoten verbunden
- Diameter r ist $N-1$
- Disjunkte Bereiche des linearen Netzwerkes können gleichzeitig genutzt werden, aber es sind mehrere Schritte notwendig, um eine Nachricht zwischen zwei nicht benachbarte Knoten zu verschicken



Verbindungsstrukturen

- Topologie:
- Statische Verbindungsnetze
- Gitterstrukturen
 - **k-dimensionales Gitter mit N Knoten**
 - Innere Knoten haben den Grad $2k$, wobei die $2k$ benachbarten Knoten miteinander verbunden sind
 - In einem k-dimensionalen Netzwerk mit $\sqrt[k]{N}$ Knoten in jeder Dimension beträgt der Diameter $k(\sqrt[k]{N} - 1)$



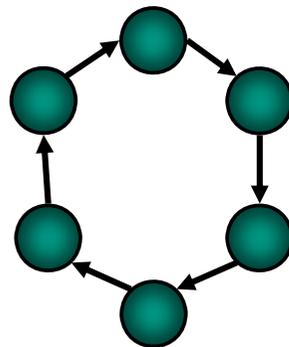
Verbindungsstrukturen

Topologie:

■ Statische Verbindungsnetze

■ Ring

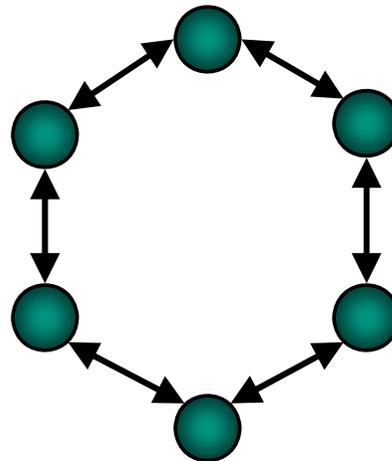
- Erhält man, wenn man die Endknoten eines linearen Feldes miteinander verbindet
- Unidirektionaler Ring mit N Knoten
 - Nachrichten werden in einer Richtung vom Quellknoten zum Zielknoten verschickt
 - Diameter r ist $N-1$
 - Bei Ausfall einer Verbindung bricht die Kommunikation zusammen



Verbindungsstrukturen

Topologie:

- **Statische Verbindungsnetze**
- **Bidirektionaler Ring mit N Knoten**
 - symmetrisches Netzwerk
 - Der längste Pfad, den eine Nachricht nehmen muss, ist nicht länger als $N/2$
 - Bei Ausfall einer Verbindung bricht die Kommunikation noch nicht zusammen, während zwei Ausfälle von Verbindungen das Netzwerk in zwei disjunkte Teilnetzwerke aufteilen



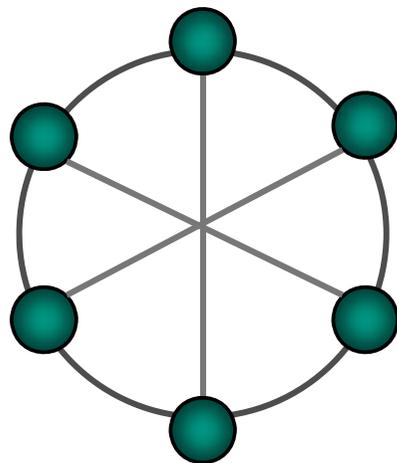
Verbindungsstrukturen

Topologie:

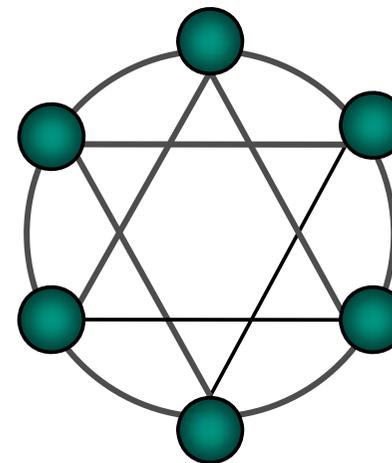
- **Statische Verbindungsnetze**

- **Chordaler Ring**

- Hinzufügen redundanter Verbindungen
 - erhöht Fehlertoleranzeigenschaft des Verbindungsnetzwerkes
 - Höherer Knotengrad und kleinerer Diameter gegenüber Ring



Chordaler Ring mit Knotengrad 3



Chordaler Ring mit Knotengrad 4

Verbindungsstrukturen

Topologie:

■ Statische Verbindungsnetze

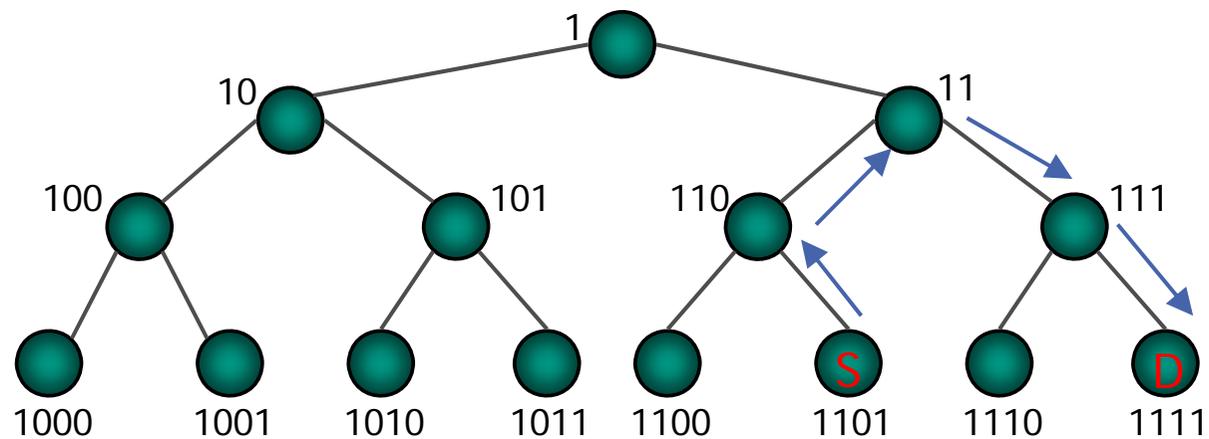
■ Baumstrukturen

- Binärer Baum mit m -Ebenen:
- Auf Ebene m : $N=2^m-1$ Knoten
- Diameter: $2(m-1)$
- Adressierung der Knoten:
 - Die Knotennummer auf Ebene m besteht aus m Bits
 - Der Wurzelknoten hat die Nummer 1
 - Die Nummer des linken Kindknotens erhält man durch Hinzufügen einer 0 an die niederwertige Stelle der Adresse des Elternknoten
 - Die Nummer des rechten Kindknotens erhält man durch Hinzufügen einer 1 an die niederwertige Stelle der Adresse des Elternknoten

Verbindungsstrukturen

Topologie:

- Statische Verbindungsnetze
- Baumstrukturen: Routing
 - Finde gemeinsamen Elternknoten P von S und D
 - Gehe von S nach P und von P nach D



Verbindungsstrukturen

Topologie:

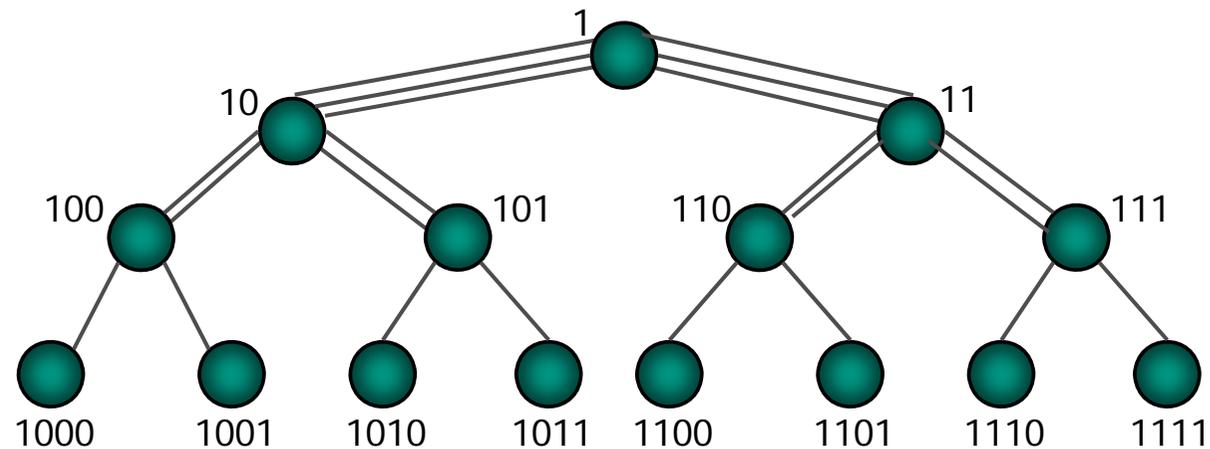
- Statische Verbindungsnetze
- Baumstrukturen: Routing

- Die Binärdarstellung der Adresse eines Quellknotens S auf Ebene i sei $S_i S_{i-1} \dots S_1$ und die der Adresse des Zielknotens D auf Ebene j sei $D_j D_{j-1} \dots D_1$
- Finde die gemeinsamen höchstwertigen Bits von S und D , so dass die Adresse des Elternknotens P gleich $D_j D_{j-1} \dots D_x = S_i S_{i-1} \dots S_{(i-j+x)}$ ist
- Steige von S ($i-j+x$) Ebenen auf nach P
- for $k=x-1$ step 1 until 0
 - {steige nach links ab, falls $D_x=0$
 - steige nach rechts ab, falls $D_x=1$ }

Verbindungsstrukturen

Topologie:

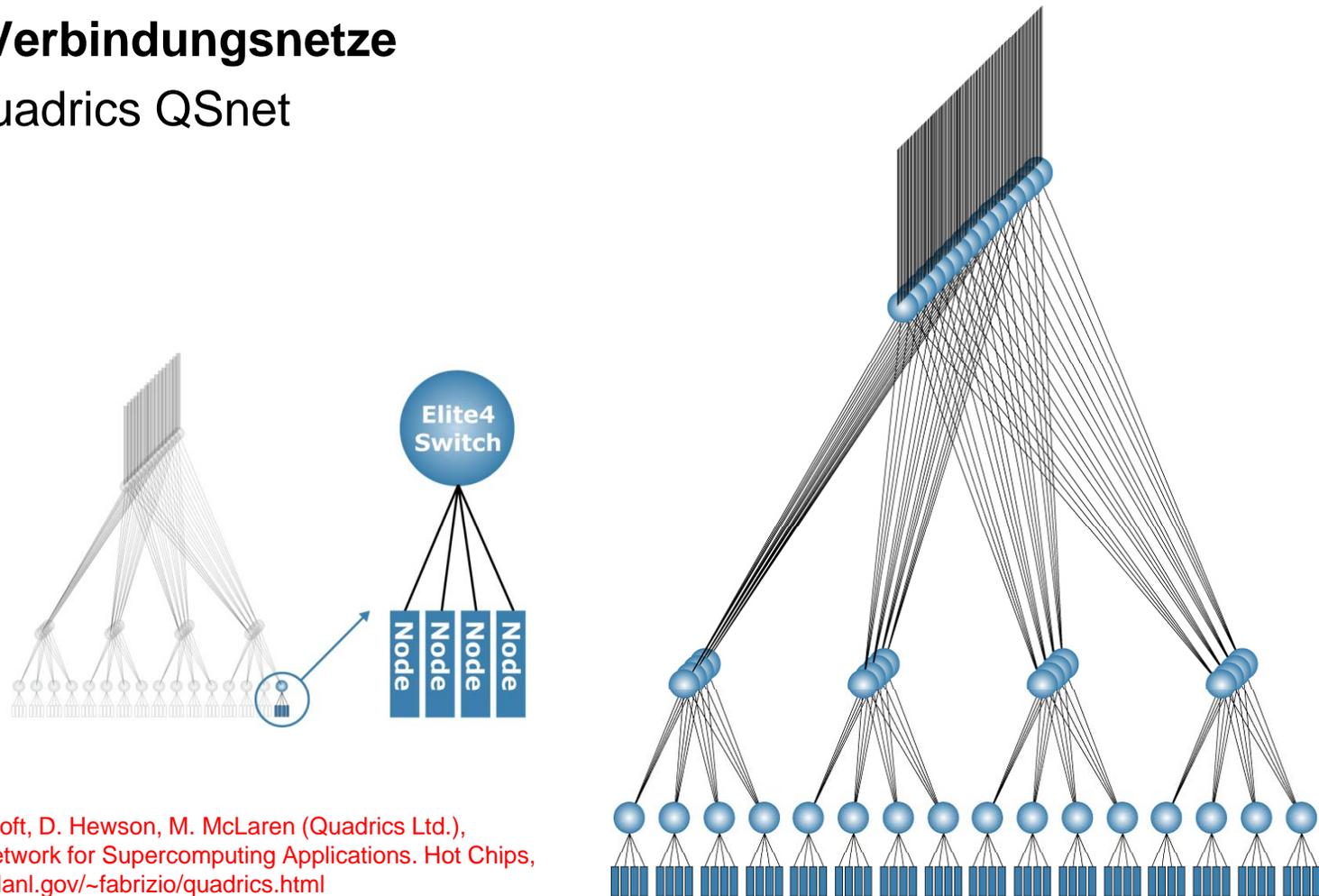
- Statische Verbindungsnetze
- Baumstrukturen
- Fat Tree:
 - Lösung des Blockierungsproblems in Richtung Wurzel
 - Kommunikationskanäle werden größer, je näher man sich der Wurzel nähert



Verbindungsstrukturen

Topologie:

- **Statische Verbindungsnetze**
- Beispiel: Quadrics QSnet



Quelle: D. Addison, J. Beecroft, D. Hewson, M. McLaren (Quadrics Ltd.),
 Fabrizio Petrini (LANL): A network for Supercomputing Applications. Hot Chips,
 August 2003, <http://www.c3.lanl.gov/~fabrizio/quadrics.html>

Verbindungsstrukturen

Topologie:

- **Statische Verbindungsnetze**
- Beispiel: Quadrics QSnet

Elan 4 network interface card:



Elite 4 Switch Component:



QsNet II Switch:

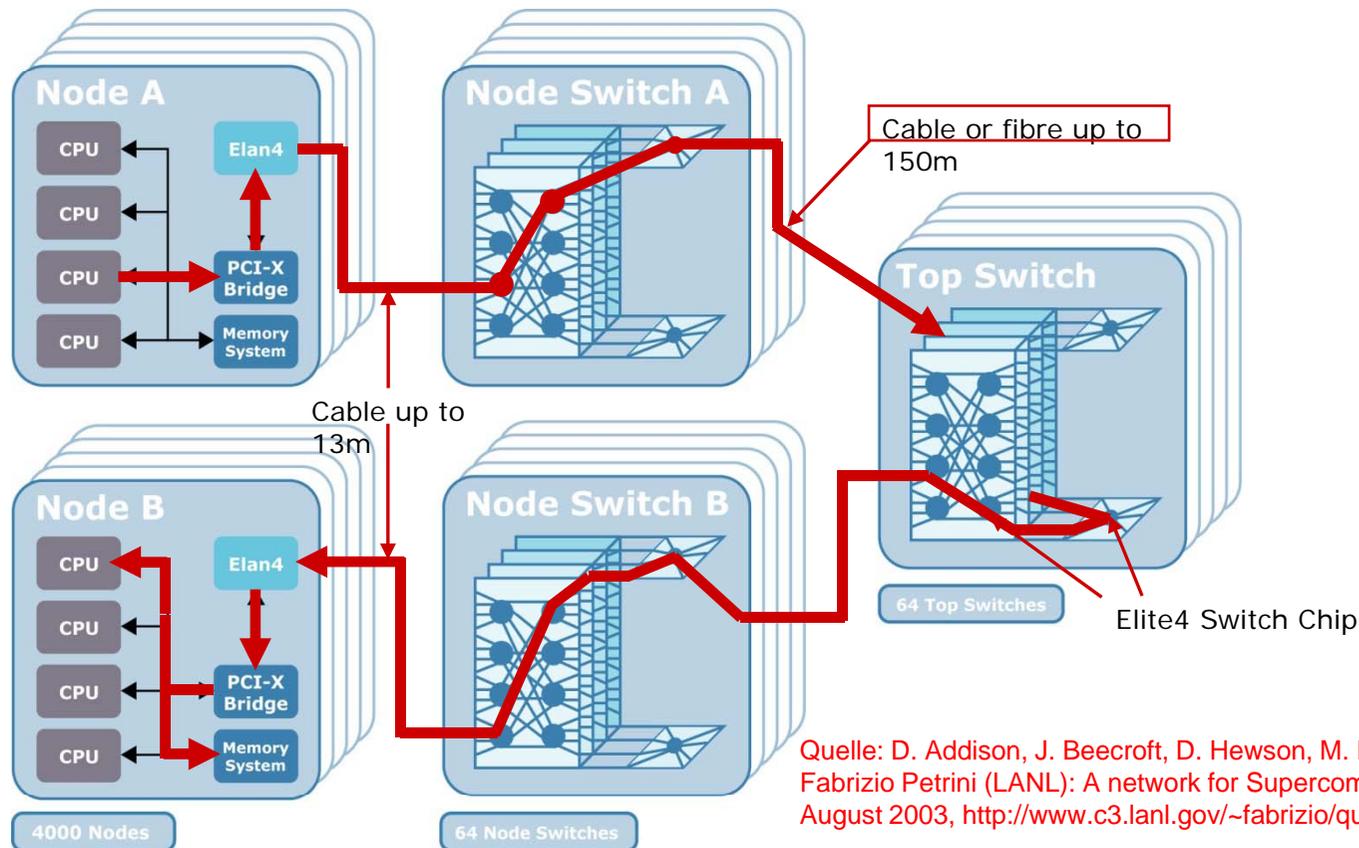


Quelle: D. Addison, J. Beecroft, D. Hewson, M. McLaren (Quadrics Ltd.),
Fabrizio Petrini (LANL): A network for Supercomputing Applications. Hot Chips,
August 2003, <http://www.c3.lanl.gov/~fabrizio/quadrics.html>

Verbindungsstrukturen

Topologie:

- Statische Verbindungsnetze
- Beispiel: Quadrics QSnet

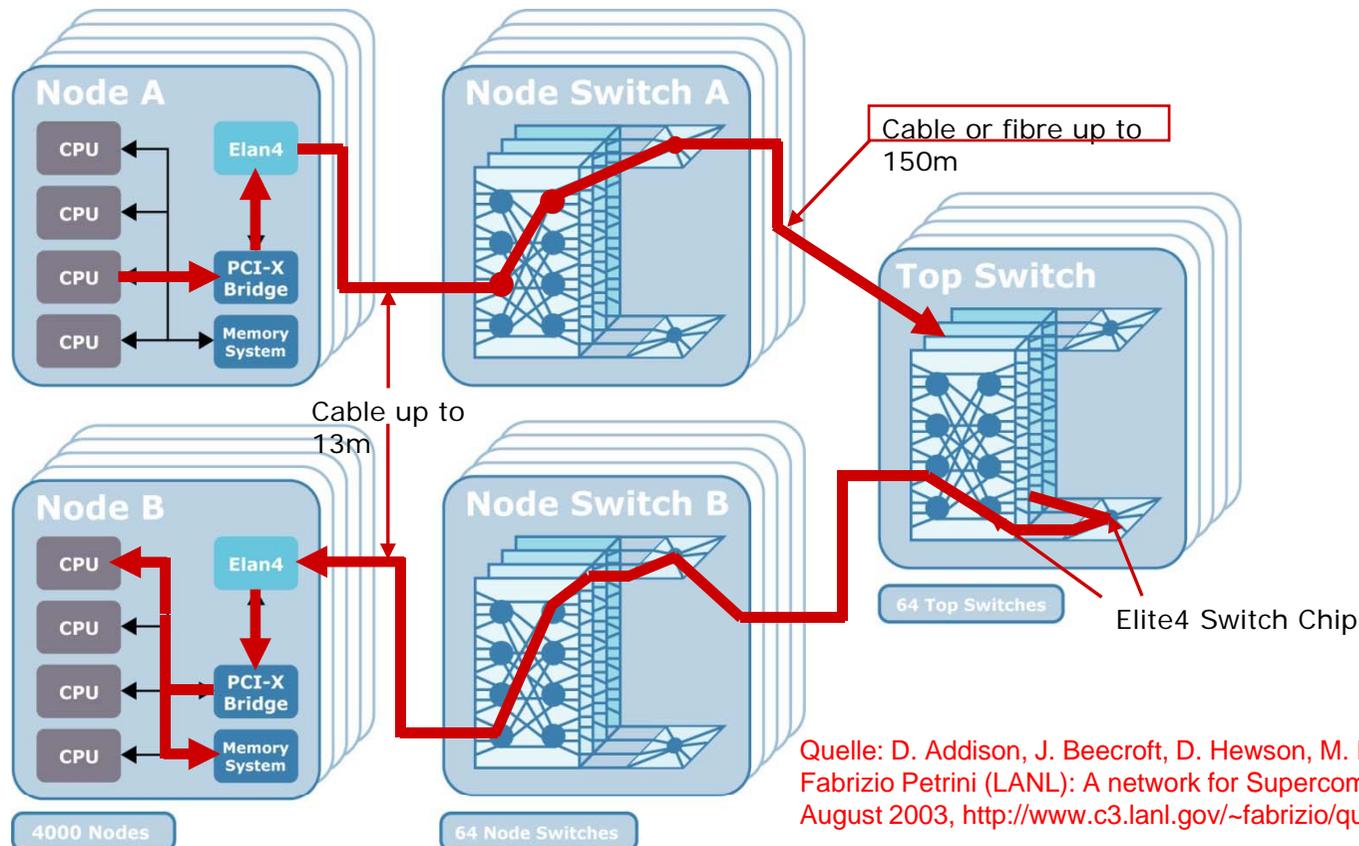


Quelle: D. Addison, J. Beecroft, D. Hewson, M. McLaren (Quadrics Ltd.), Fabrizio Petri (LANL): A network for Supercomputing Applications. Hot Chips, August 2003, <http://www.c3.lanl.gov/~fabrizio/quadrics.html>

Verbindungsstrukturen

Topologie:

- Statische Verbindungsnetze
- Beispiel: Quadrics QSnet



Quelle: D. Addison, J. Beecroft, D. Hewson, M. McLaren (Quadrics Ltd.), Fabrizio Petri (LANL): A network for Supercomputing Applications. Hot Chips, August 2003, <http://www.c3.lanl.gov/~fabrizio/quadrics.html>

Verbindungsstrukturen

Topologie:

■ Statische Verbindungsnetze

■ K-ärer n-Kubus (Cubes, Würfel)

- Allgemeine Form eines Kubus-Verbindungsnetzwerkes
- Ringe, Gitter, oder Hyperkubi sind topologisch isomorph zu einer Familie von K-ären n-Kubus Netzwerken
 - n ist die Dimension
 - Radius K ist die Anzahl der Knoten, die einen Zyklus in einer Dimension bilden
- Enthält $N=K^n$ Knoten
- Die Knoten werden über eine n-stellige k-äre Zahl der Form a_0, a_1, \dots, a_{n-1} adressiert
 - Jede Stelle $0 \leq a_i < K$ stellt die Position des Knotens in der entsprechenden i-ten Dimension dar, mit $0 \leq i \leq n-1$
 - Ein Nachbarknoten in der i-ten Dimension zu einem Knoten mit Adresse a_0, a_1, \dots, a_{n-1} kann erreicht werden mit $a_0, a_1, \dots, a_{(i\pm 1)} \bmod k \dots a_{n-1}$.
- Knotengrad ist $2n$ und der Diameter ist

$$n \left\lceil \frac{k}{2} \right\rceil$$

Verbindungsstrukturen

Topologie:

■ Statische Verbindungsnetze

■ Hyperkubus (Hypercubes)

- Verallgemeinerter Würfel:
 - die $N = 2^n$ Prozessoren sind Ecken eines n -dimensionalen Würfels, wobei die Verbindungen dann die Kanten des Würfels darstellen.
- Komplexität ist $(N \cdot \log_2 N) / 2$.
- Diameter beträgt $\log_2 N$.
- Lange Zeit häufigste Verbindungsstruktur bei den nachrichtengekoppelten Multiprozessoren, aber:
 - Skalierbarkeit:
 - Jede Erweiterung benötigt mindestens die Verdopplung der Prozessorenanzahl.
 - Aus räumlichen Anordnungsgründen begrenzt.

Verbindungsstrukturen

Topologie:

■ Statische Verbindungsnetze

■ Hyperkubus

■ e-Cube Routing

- Die Knotennummern werden als Binärzahlen geschrieben, dadurch unterscheiden sich benachbarte Knoten in genau einer Stelle, die zudem die Richtung der Verbindung angeben kann (Hamming Distanz)
- Eine einfache Wegewahl:
die Bits in Start- und Zieladresse werden mittels einer XOR-Verbindung verknüpft und das Resultat bestimmt die möglichen Wege.

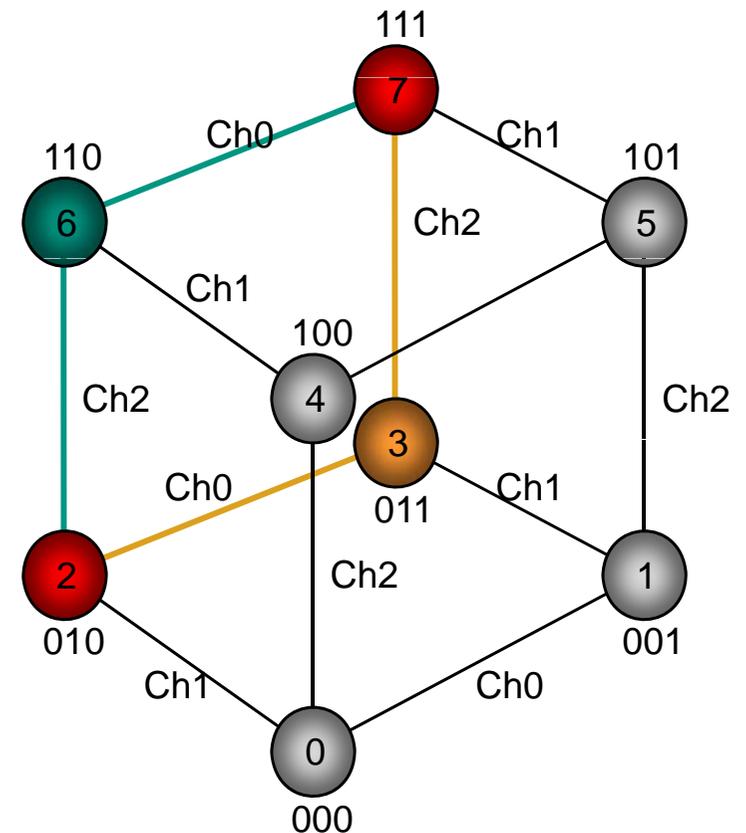
Verbindungsstrukturen

Topologie:

- Statische Verbindungsnetze
- Hyperkubus

■ Beispiel:

- $A = (010)$ und $B = (111)$
- $W = A \text{ XOR } B = 101$
- $(010) \rightarrow (011) \rightarrow (111)$,
- $(010) \rightarrow (110) \rightarrow (111)$



Verbindungsstrukturen

Topologie:

■ Dynamische Verbindungsnetzwerke:

- Geeignet für Anwendungen mit variablen und nicht regulären Kommunikationsmustern

■ Bus:

- Wird von den am Bus angeschlossenen Prozessoren gemeinsam benützt
- Ein Datentransport zu einem Zeitpunkt
- Nachricht von einer Quelle zu jedem Ziel in einem Schritt
- Busbandbreite = $w * f$
 - w : Anzahl der Datenleitungen (Busbreite)
 - F : Frequenz
 - Bestimmt maximale Anzahl der Prozessoren, d. h. die Bandbreite muss mit dem Produkt der Anzahl der Prozessoren und ihrer Geschwindigkeit abgestimmt werden

Verbindungsstrukturen

Topologie:

■ Dynamische Verbindungsnetzwerke:

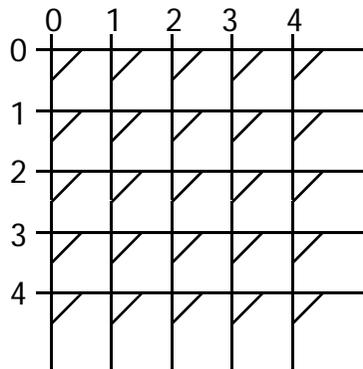
■ Bus:

- Reduzierung des Busverkehrs
 - Verwendung von Cache-Speichern mit Cache-Kohärenz-Protokollen
- Verwendung von sog. Split-Phase Busprotokollen
 - Das Protokoll gibt den Bus nach der Übertragung einer Speichereferenzanforderung wieder frei
 - Wenn der Speicher bereit ist, das Datum zu liefern, fordert dieser den Bus an und schickt die Daten als Antwort
 - Ermöglicht, dass andere Prozessoren in der Zwischenzeit den Bus anfordern können, vorausgesetzt, dass ein verschränkter Speicher vorliegt oder Pipelining möglich ist

Verbindungsstrukturen

Topologie:

- **Dynamische Verbindungsnetzwerke:**
- **Kreuzschienenverteiler (Crossbar)**
 - Vollständig vernetztes Verbindungswerk mit allen möglichen Permutationen der N Einheiten, die über das Netzwerk verbunden werden



Verbindungsstrukturen

Topologie:

■ Dynamische Verbindungsnetzwerke:

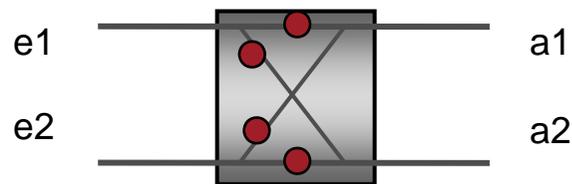
■ Kreuzschienenverteiler (Crossbar)

- Hardware-Einrichtung, die so geschaltet werden kann, dass in einer Menge von Prozessoren alle möglichen disjunkten Paare von Prozessoren gleichzeitig und blockierungsfrei miteinander kommunizieren können.
 - In Abhängigkeit vom Zustand der Schaltelemente im Kreuzschienenverteiler können dann je zwei beliebige Elemente aus den verschiedenen Mengen miteinander kommunizieren.
 - Alle $N!$ Permutationen sind möglich
 - An den Kreuzungspunkten sitzen Schaltelemente: hoher Hardware-Aufwand
 - Kosten: N^2 Schaltelemente (bei N Knoten pro Dimension)
 - Ein Schaltelement entspricht einem Paar von Quelle und Ziel, so dass die Darstellung einer Permutation als eine Liste solcher Paare direkt zu der korrekten Schaltung der Schalterelemente führt.

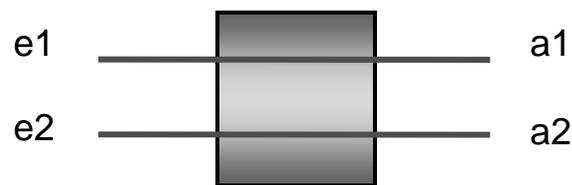
Verbindungsstrukturen

Topologie:

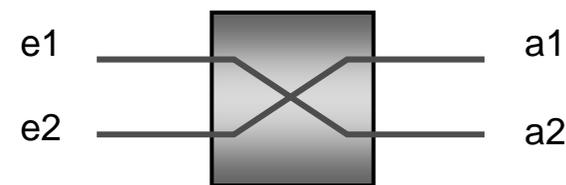
- **Dynamische Verbindungsnetzwerke:**
- **Schalterelemente (2x2 Kreuzschienenverteiler)**
 - bestehen aus Zweierschaltern mit zwei Eingängen und zwei Ausgängen, die entweder durchschalten oder die Ein- und Ausgänge überkreuzen können



● Kontakt, der geöffnet oder geschlossen werden kann



Durchschalten



Vertauschen

Verbindungsstrukturen

Topologie:

- **Dynamische Verbindungsnetzwerke:**
- **Mehrstufige Verbindungsnetzwerke (Schalernetzwerke, Permutationsnetzwerke)**
 - Kompromiss zwischen der niedrigeren Leistungsfähigkeit von Bussen und hohem Hardware-Aufwand von Kreuzschienenverteilern
 - Oft 2 x 2 Kreuzschienenverteiler (Schalterelement) als Grundelement

Verbindungsstrukturen

Topologie:

■ Dynamische Verbindungsnetzwerke:

■ Permutationsnetze

- p Eingänge des Netzes können gleichzeitig auf p Ausgänge geschaltet werden und somit wird eine Permutation der Eingänge erzeugt.

■ Einstufige Permutationsnetze

- enthalten eine einzelne Spalte von Zweierschaltern,

■ Mehrstufige Permutationsnetze

- enthalten mehrere solcher Spalten
- Spalten: Stufen des Permutationsnetzwerkes

Verbindungsstrukturen

Topologie:

■ Dynamische Verbindungsnetzwerke:

■ Permutationsnetze

■ reguläre Permutationsnetzwerke:

- p Eingänge, p Ausgänge und k Stufen mit jeweils $p/2$ Zweierschaltern, wobei die Zahl p normalerweise eine Zweierpotenz ist.

■ Irreguläre Permutationsnetzwerke

- weisen gegenüber der vollen regulären Struktur Lücken auf

Verbindungsstrukturen

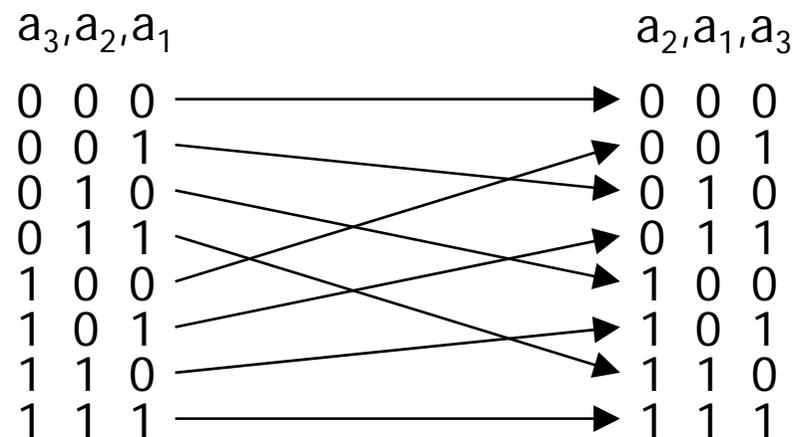
Topologie:

- Dynamische Verbindungsnetzwerke:

- Permutationen

- Mischpermutation M (Perfect Shuffle):

- $M(a_n, a_{n-1}, \dots, a_2, a_1) = (a_{n-1}, \dots, a_2, a_1, a_n)$



Verbindungsstrukturen

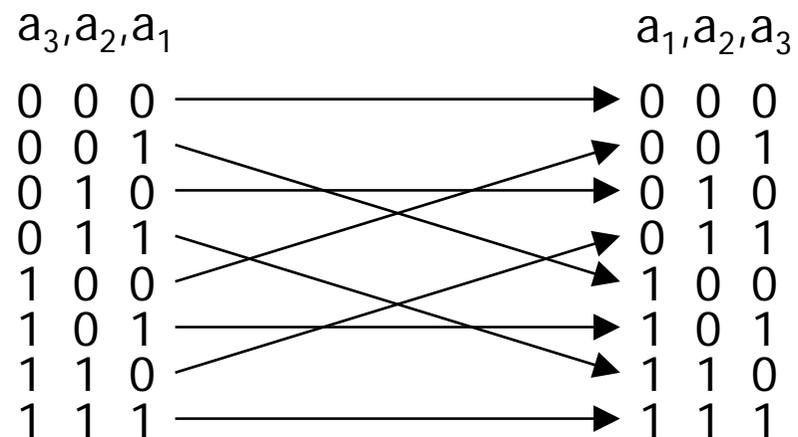
Topologie:

- Dynamische Verbindungsnetzwerke:

- Permutationen

- Kreuzpermutation K (Butterfly):

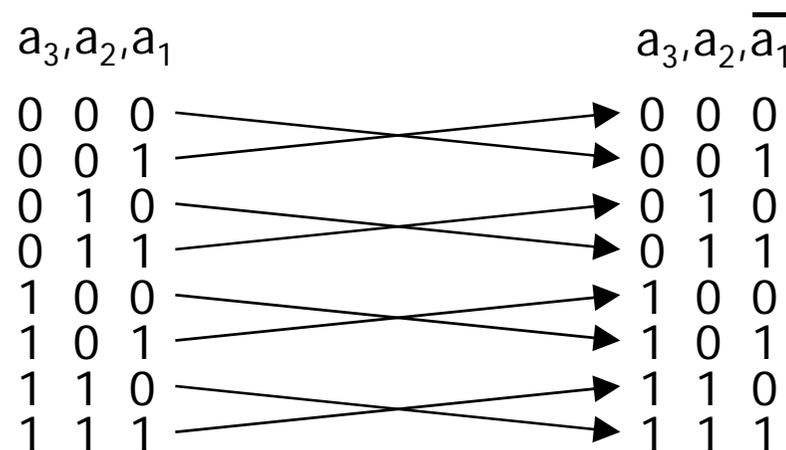
- $K(a_n, a_{n-1}, \dots, a_2, a_1) = (a_1, a_{n-1}, \dots, a_2, a_n)$



Verbindungsstrukturen

Topologie:

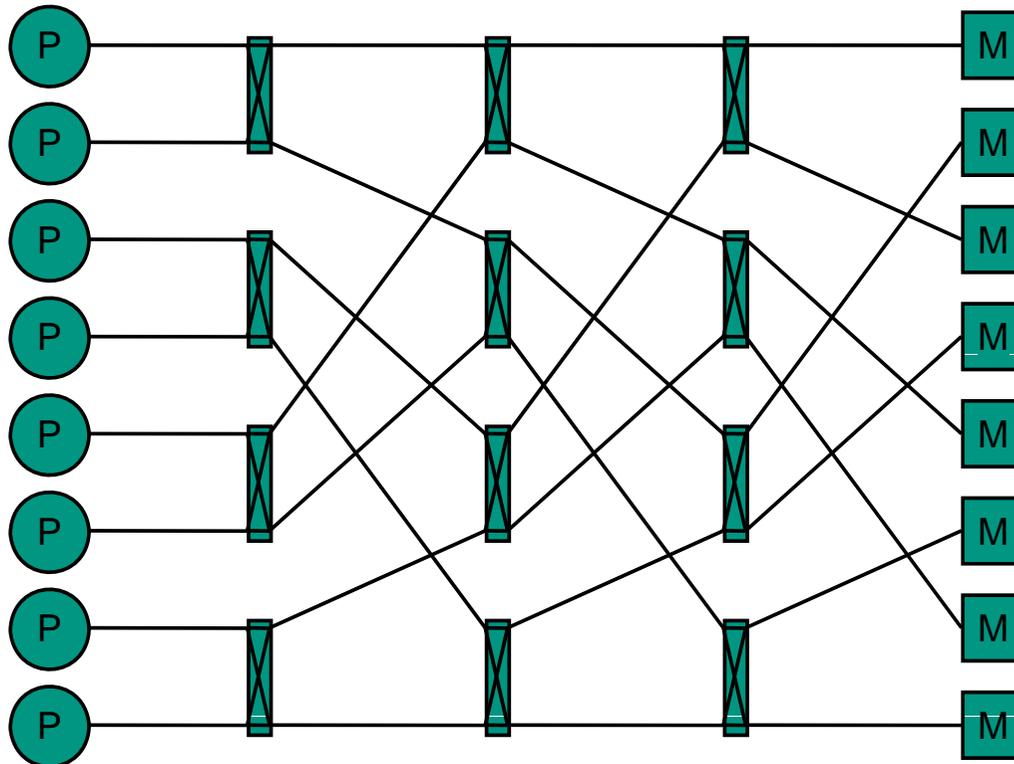
- Dynamische Verbindungsnetzwerke:
- Permutationen
 - Tauschpermutation T (Butterfly):
 - Negation des niedrigwertigen Bits
 - $T(a_n, a_{n-1}, \dots, a_2, a_1) = (a_n, a_{n-1}, \dots, a_2, \overline{a_1})$



Verbindungsstrukturen

Topologie:

- Dynamische Verbindungsnetzwerke:
- Speichergekoppeltes Omega-Netzwerk mit 8 Eingängen und 8 Ausgängen



Verbindungsstrukturen

Topologie:

- Dynamische Verbindungsnetzwerke:
- Speichergekoppeltes Omega-Netzwerk mit 8 Eingängen und 8 Ausgängen

