
Rechnerstrukturen

Vorlesung im Sommersemester 2007

Prof. Dr. Wolfgang Karl

Universität Karlsruhe (TH)

Fakultät für Informatik

Institut für Technische Informatik



- **Kapitel 3: Multiprozessoren – Parallelismus auf Prozess/Thread-Ebene**

3.4: 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



- 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

- 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 $d(L/b + \delta)$

- 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.

- 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

- 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.

- 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.

- **Topologie**

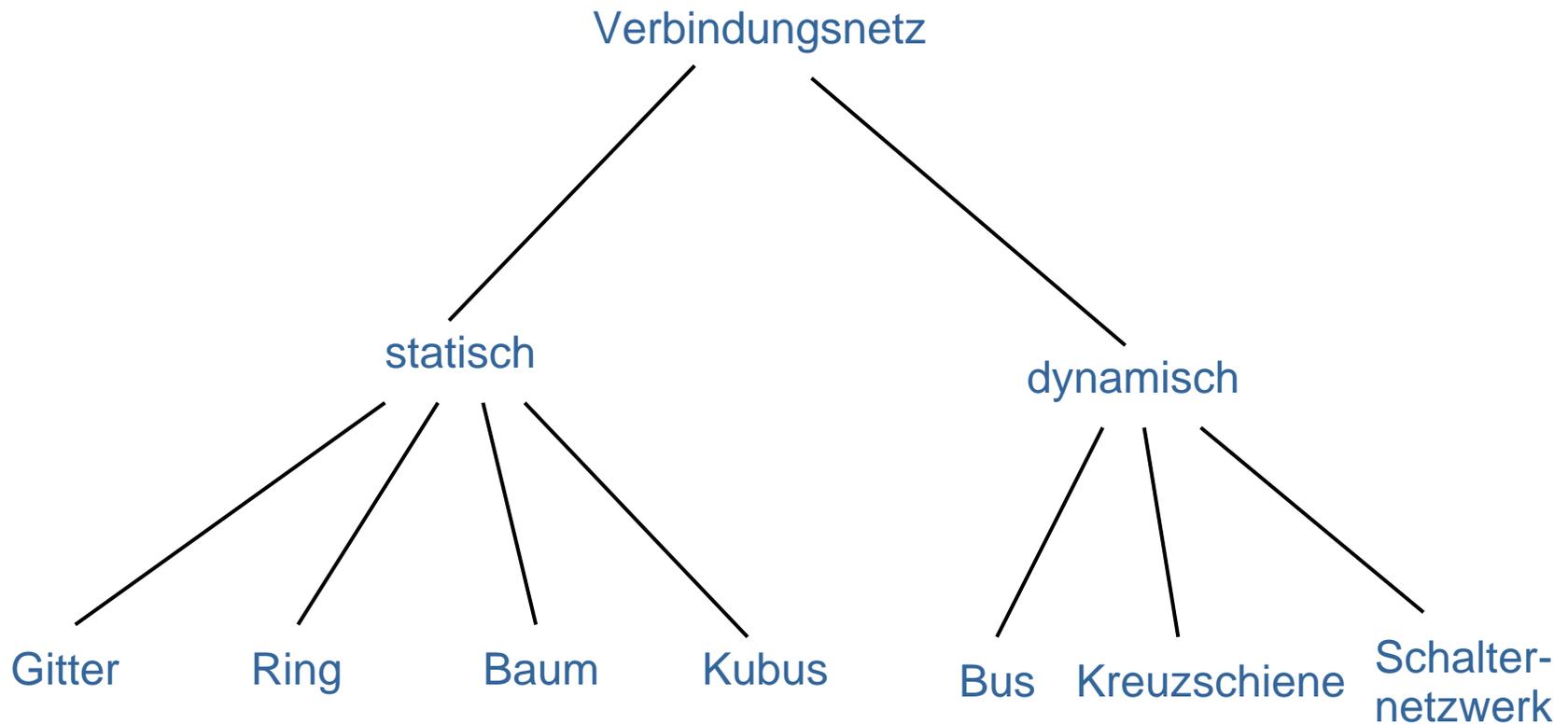
- **Statische Verbindungsnetzwerke**

- Die Prozessoren sind mit jedem anderen Prozessor direkt verbunden
- Fest installierte Verbindungen zwischen Paaren von Netzknoten
 - Die Knoten sind mit Punkt-zu-Punkt-Verbindungen verbunden, die sich während der Programmausführung nicht ändern

- **Dynamische Verbindungsnetze**

- Die Knoten sind über Schaltelemente miteinander verbunden, die konfiguriert werden können, um den Kommunikationsanforderungen des ausführenden Programms zu genügen
 - Direkte fest installierte Verbindungen zwischen den Knoten existieren nicht

- Topologie: Klassifizierung

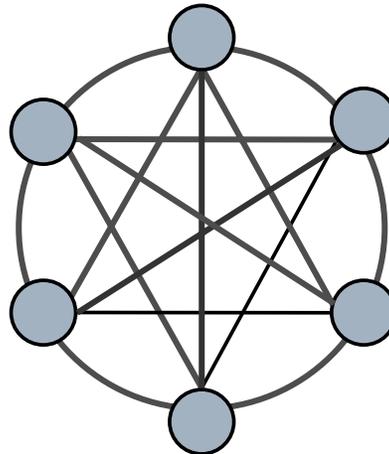


- **Statische Verbindungsnetze**
 - Nach Aufbau des Verbindungsnetzes bleiben die Verbindungen fest
 - Gute Leistung für Probleme mit vorhersagbaren Kommunikationsmustern zwischen benachbarten Knoten

- **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



- 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

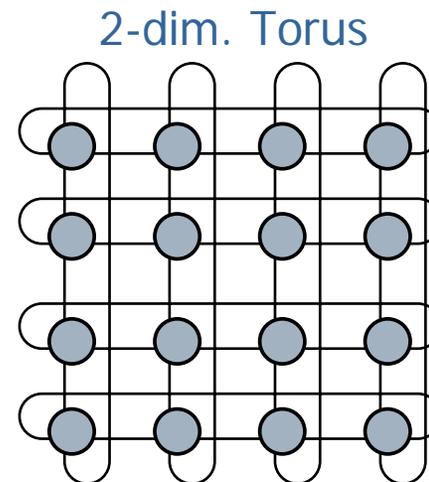
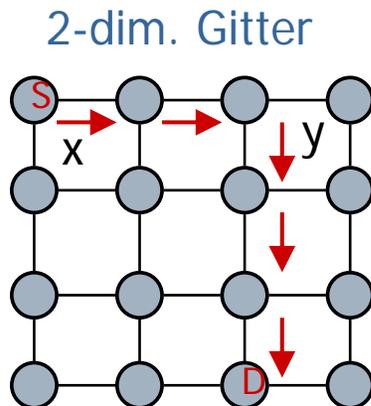


- Statische Verbindungsnetze

- Gitterstrukturen

- k-dimensionales Gitter mit N Knoten

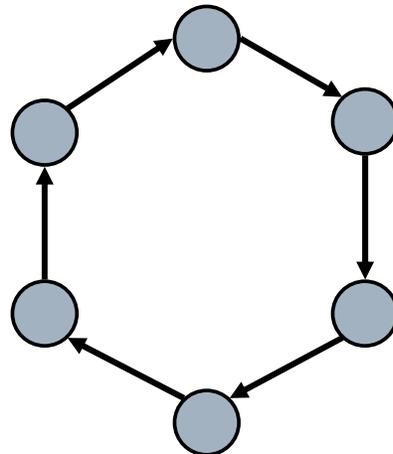
- Innere Knoten haben den Grad $2k$, wobei die $2k$ benachbarten Knoten miteinander verbunden sind
- In einem k-dimensionalen Netzwerk mit $\sqrt[k]{N}$ Knoten in jeder Dimension beträgt der Diameter $k(\sqrt[k]{N} - 1)$



- 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

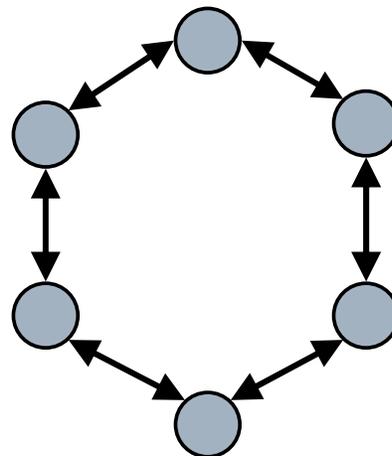


- Statische Verbindungsnetze

- Ring

- 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



- Statische Verbindungsnetze

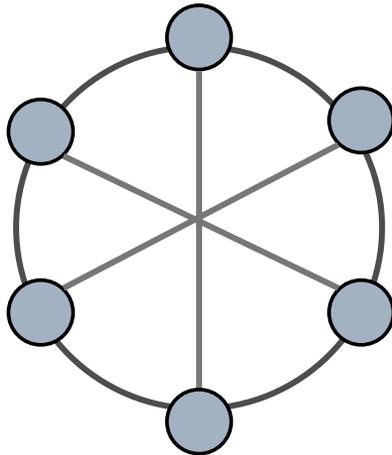
- Ring

- Chordialer Ring

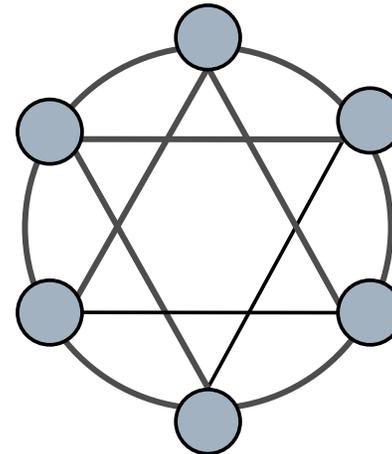
- Hinzufügen redundanter Verbindungen

- » erhöht Fehlertoleranzeigenschaft des Verbindungsnetzwerkes

- » Höherer Knotengrad und kleinerer Diameter gegenüber Ring



Chordaler Ring mit Knotengrad 3



Chordaler Ring mit Knotengrad 4

- **Statische Verbindungsnetze**

- **Baumstrukturen**

- **Binärer Baum mit m-Ebenen:**

- Auf Ebene m: $N=2^m-1$ Knoten

- Diameter: $2(m-1)$

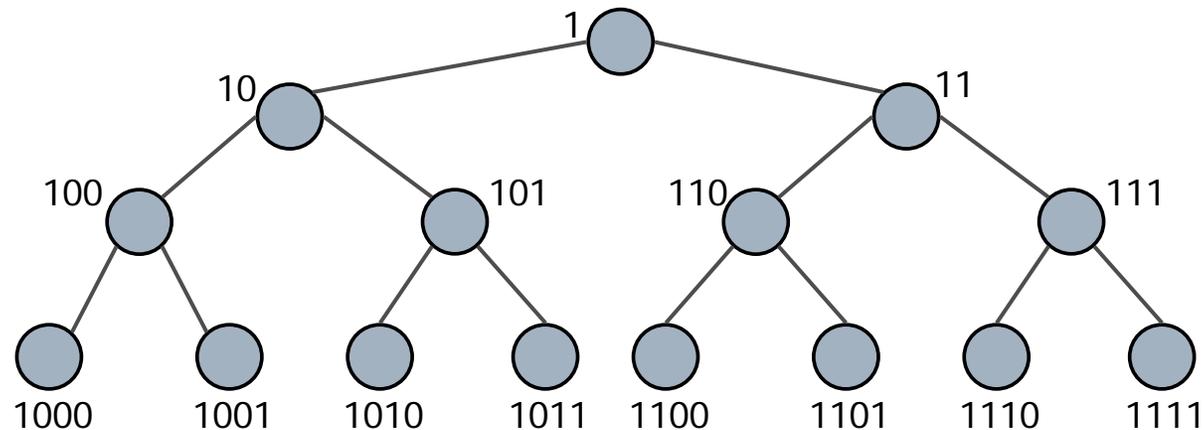
- Adressierung der Knoten:

- » Die Knotennummer auf Ebene m besteht aus m Bits

- » Der Wurzelknoten hat die Nummer 1

- » Die Nummer des linken Kindknoten erhält man durch Hinzufügen einer 0 an die niederwertige Stelle der Adresse des Elternknoten

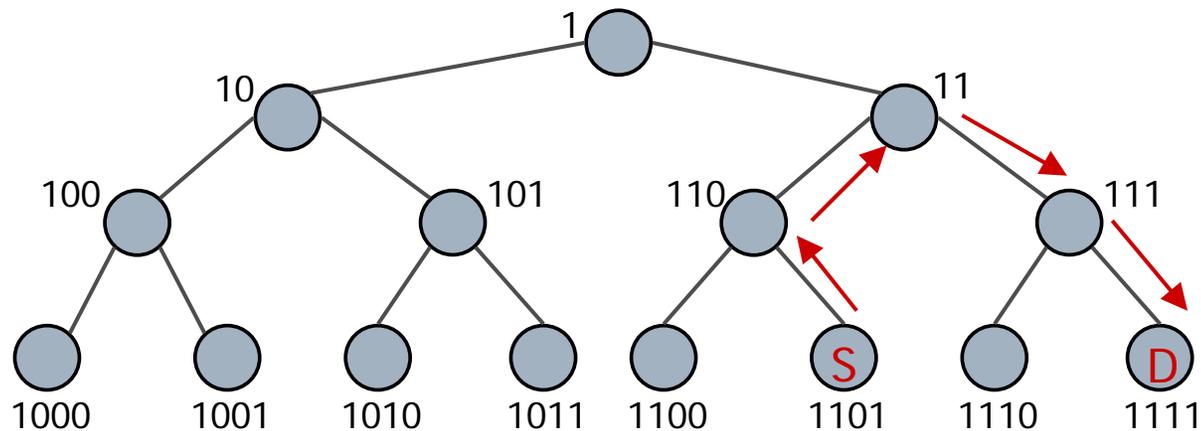
- » Die Nummer des rechten Kindknoten erhält man durch Hinzufügen einer 1 an die niederwertige Stelle der Adresse des Elternknoten



- Statische Verbindungsnetze

- Baumstrukturen

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



- Statische Verbindungsnetze

- Baumstrukturen

- Routing:

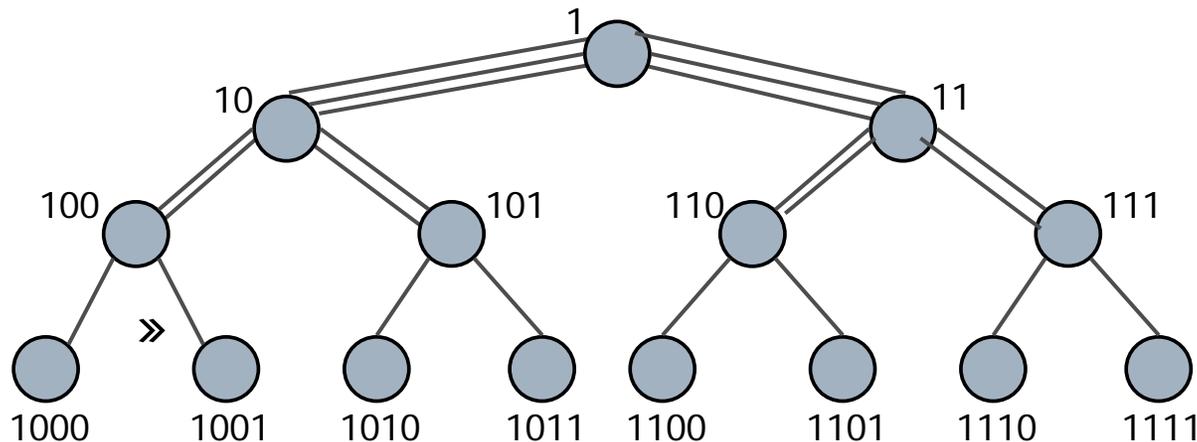
- » Die Binärdarstellung der Adresse eines Quellknotens S auf Ebene i sei $S_i S_{i-1} \dots S_1$ und die der Adresse des Zielknotens D auf Ebene j sei $D_j D_{j-1} \dots D_1$
- » Finde die gemeinsamen höchstwertigen Bits von S und D , so dass die Adresse des Elternknotens P gleich $D_j D_{j-1} \dots D_x = S_i S_{i-1} \dots S_{(i-j+x)}$ 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 $D_x=1$ }

- Statische Verbindungsnetze

- Baumstrukturen

- Fat Tree:

- Lösung des Blockierungsproblems in Richtung Wurzel
- Kommunikationskanäle werden größer, je näher man sich der Wurzel nähert



- **Statische Verbindungsnetze**
 - Baumstrukturen
 - **Dynamic Fat Tree:**
 - Interne Knoten sind Schalter
 - Beispiel: Quadrics QSnet
 - » Los Alamos Lab (LANL): ASCI Q



Images Courtesy of LANL, LLNL, PNNL, PSC, CEA
Quelle: <http://www.c3.lanl.gov/~fabrizio/quadrics.html>

- **Statische Verbindungsnetze**
 - Los Alamos Lab (LANL): ASCI Q
AlphaServer SC45, 1.25 GHz
 - 8125 Prozessoren Alpha 1250 MHz
 - Verbindungsnetzwerk: Quadrics
 - Linpack: 13880 GFLOPS (TOP500: 12, 06/2005)

- Statische Verbindungsnetze
 - Baumstrukturen
 - Fat Tree:
 - Beispiel: Quadrics QSnet
 - » Universität Karlsruhe (TH),
Landeshöchstleistungsrechner, HP XC 6000

»



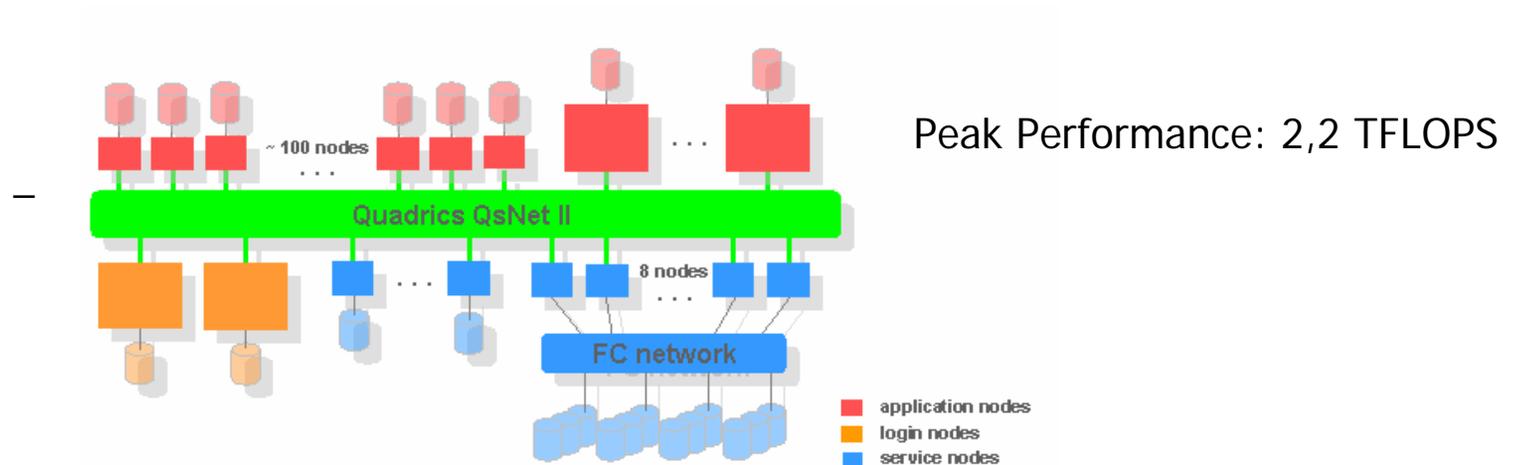
Verbindungsstrukturen

- **Statische Verbindungsnetze**

- Universität Karlsruhe (TH), Landeshöchstleistungsrechner,

- HP XC 6000: Konfiguration

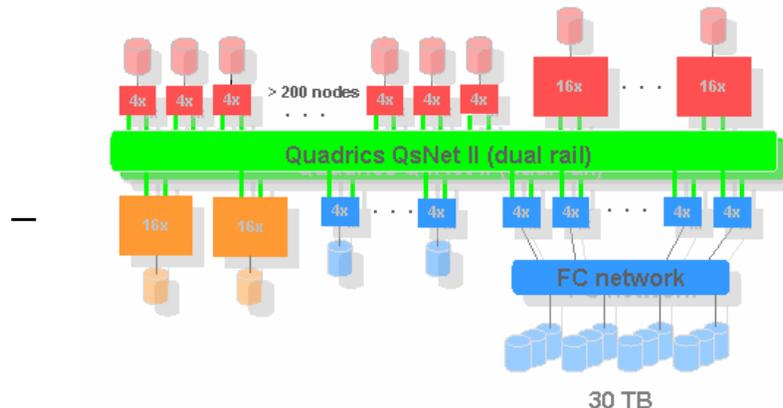
- 108 Knoten mit jeweils 2 Intel Itanium2 Prozessoren (1,5 GHz) ,12 GB Hauptspeicher pro Knoten und 146 GB lokalem Plattenplatz,
 - 12 Knoten mit jeweils 8 Intel Itanium2 Prozessoren (1,6 GHz), 64 GB Hauptspeicher pro Knoten und ca. 500 GB lokalem Plattenplatz,
 - 8 2-Wege Fileserver-Knoten basierend auf Xeon Prozessoren mit angeschlossenen Platten in der Größe von 10 TB und
 - Quadrics QsNet II Interconnect
 - <http://www.rz.uni-karlsruhe.de/ssc/hpxc.php>



- **Statische Verbindungsnetze**

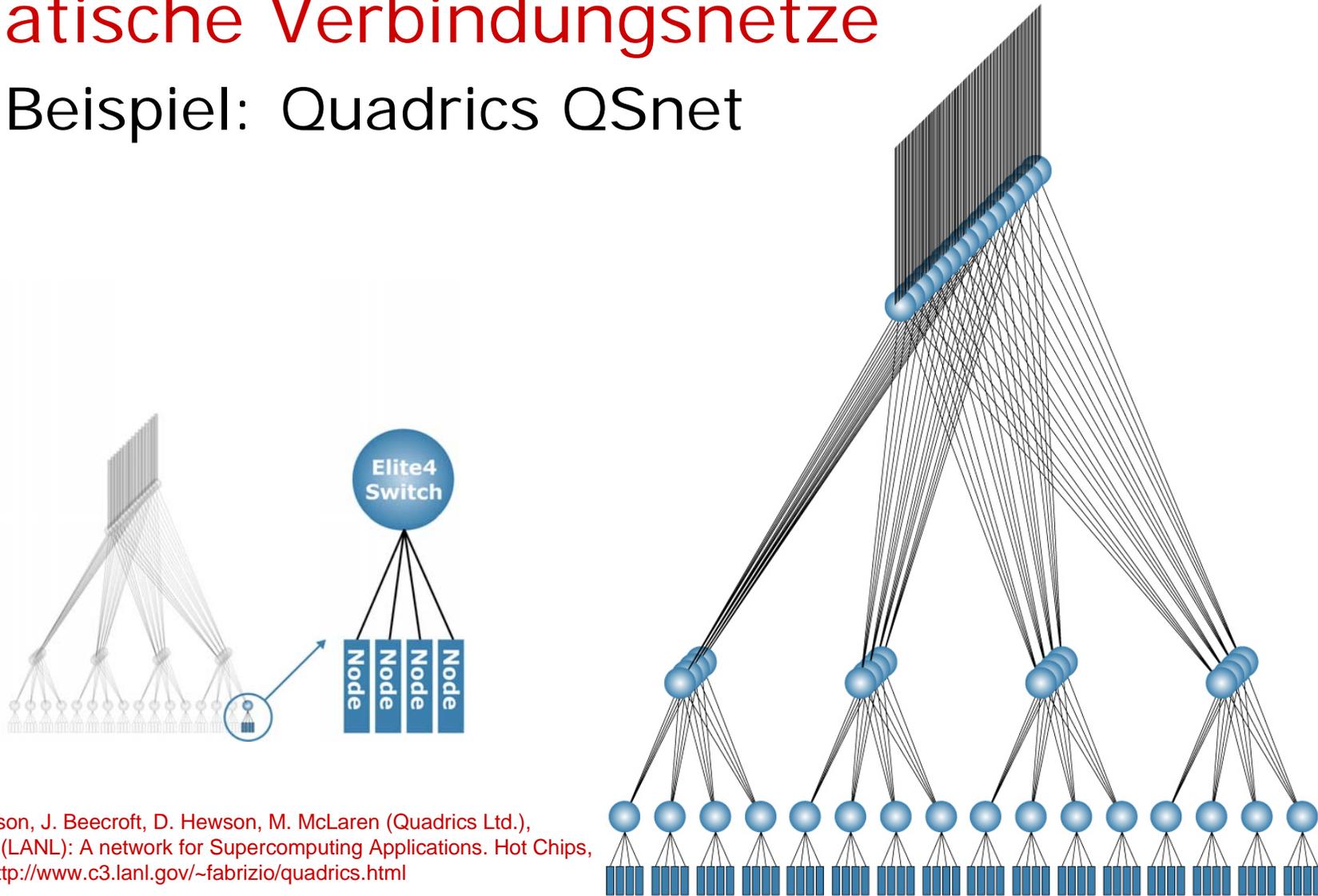
- Universität Karlsruhe (TH),
Landeshöchstleistungsrechner, HP XC 6000

- Im 1. Quartal 2006 wird das Produktionssystem um 218 4-Wege Knoten erweitert mit
 - 2 "dual core" Intel Itanium2 Prozessoren,
 - 24 GB Hauptspeicher pro Knoten,
 - 146 GB lokalem Plattenplatz,
 - dual rail Quadrics QsNet II Interconnect und
 - 30 TB globaler Plattenplatz.



Peak Performance: 11 TFLOPS

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



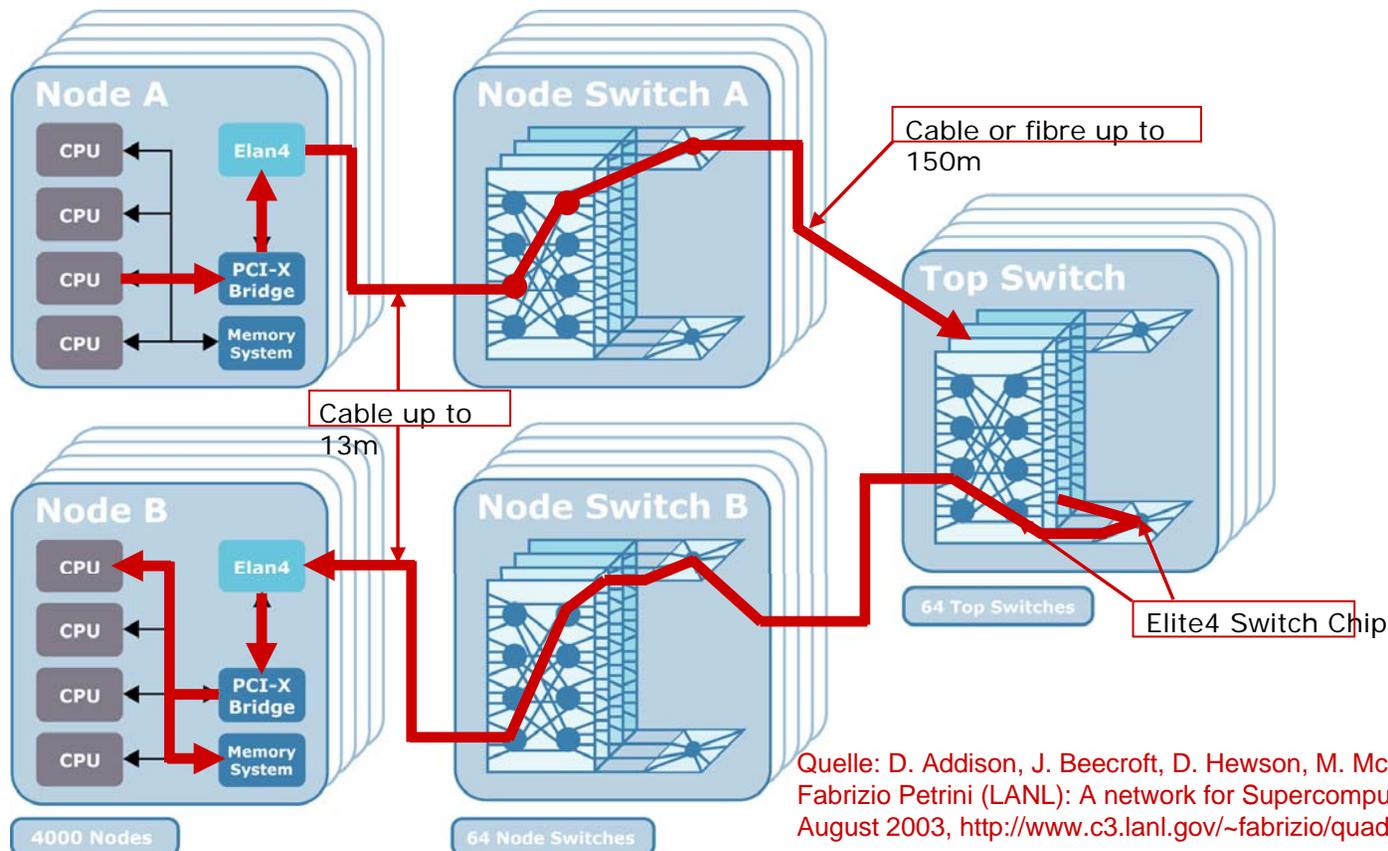
Quelle: D. Addison, J. Beecroft, D. Hewson, M. McLaren (Quadrics Ltd.),
Fabrizio Petrini (LANL): A network for Supercomputing Applications. Hot Chips,
August 2003, <http://www.c3.lanl.gov/~fabrizio/quadrics.html>

- **Statische Verbindungsnetze**
 - Beispiel: Quadrics QSnet
 - Elan 4 network interface card:
 - Elite 4 Switch Component:
 - QsNet II Switch:

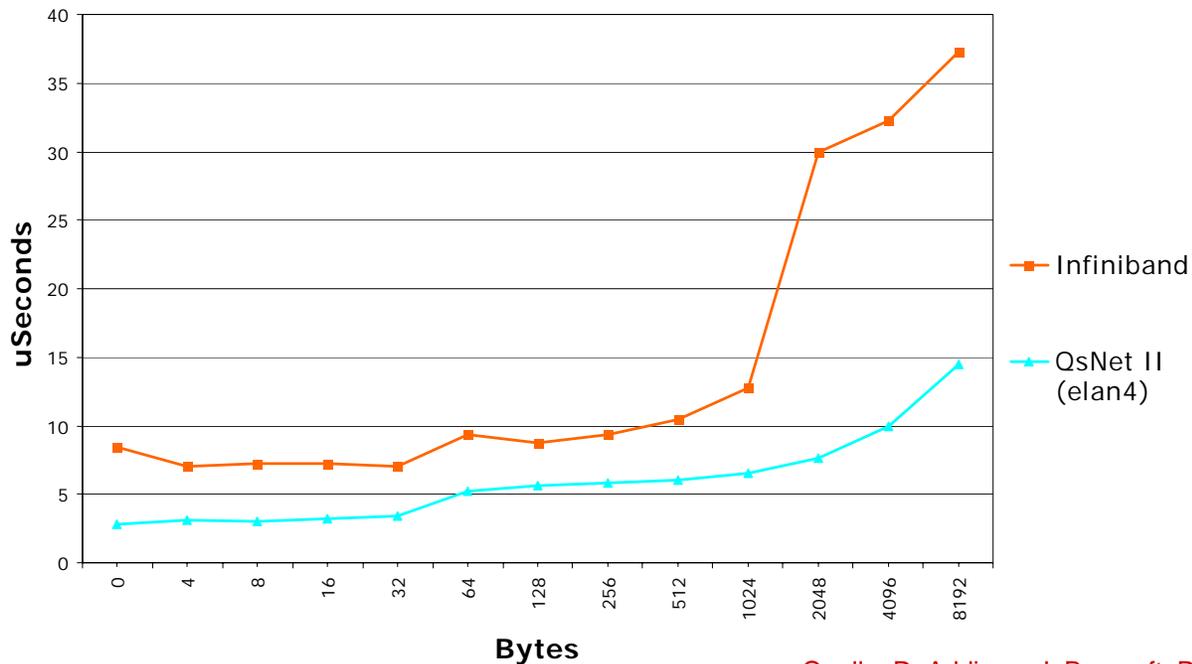


Quelle: D. Addison, J. Beecroft, D. Hewson, M. McLaren (Quadrics Ltd.),
Fabrizio Petrini (LANL): A network for Supercomputing Applications. Hot Chips,
August 2003, <http://www.c3.lanl.gov/~fabrizio/quadrics.html>

- Statische Verbindungsnetze
 - Beispiel: Quadrics QSnet

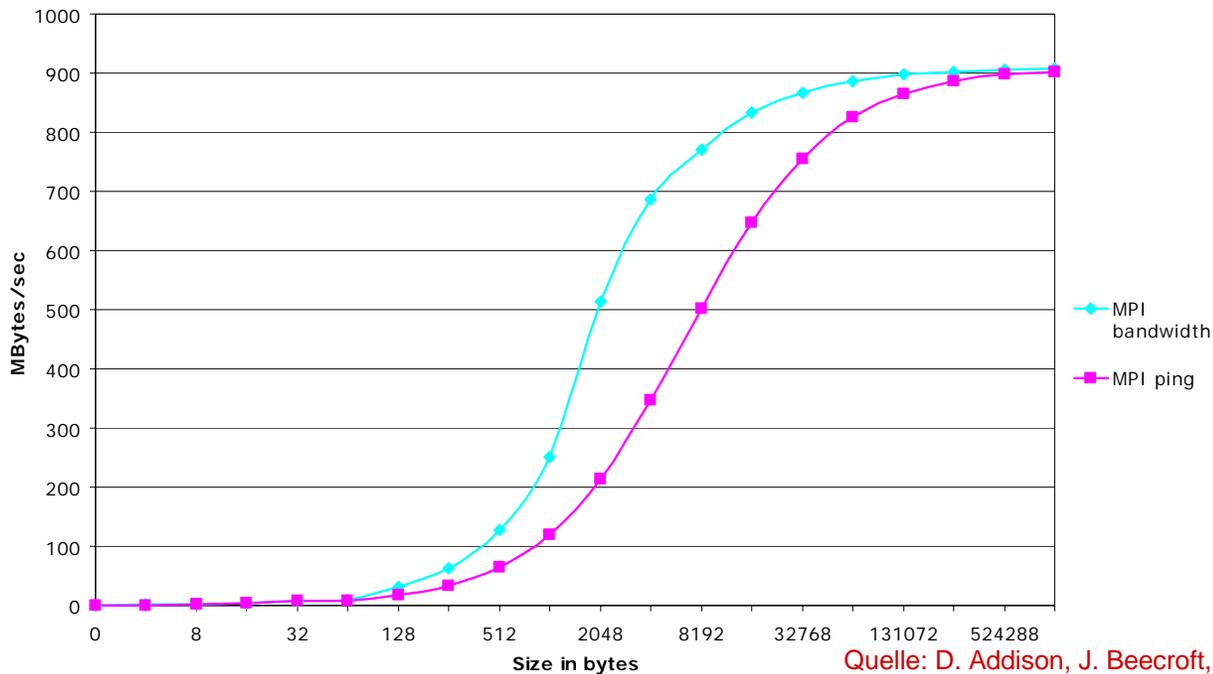


- **Statische Verbindungsnetze**
 - **Beispiel: Quadrics QSnet:**
 - MPI short message latency



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>

- Statische Verbindungsnetze
 - Beispiel: Quadrics QSnet:
 - MPI Bandwidth



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>

- **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 binäre Radius K 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 $n \left\lfloor \frac{k}{2} \right\rfloor$



- **Statische Verbindungsnetzwerke:**
 - **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.

- Statische Verbindungsnetzwerke:
 - 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.

- Statische Verbindungsnetzwerke:
 - Hyperkubus
 - e-Cube Routing Algorithmus:
 - „messages are routed in increasingly higher dimensions of channels until the destination is reached“
 - Dimension eines Kanals = Bitposition von (Knoten# XOR Knoten#)

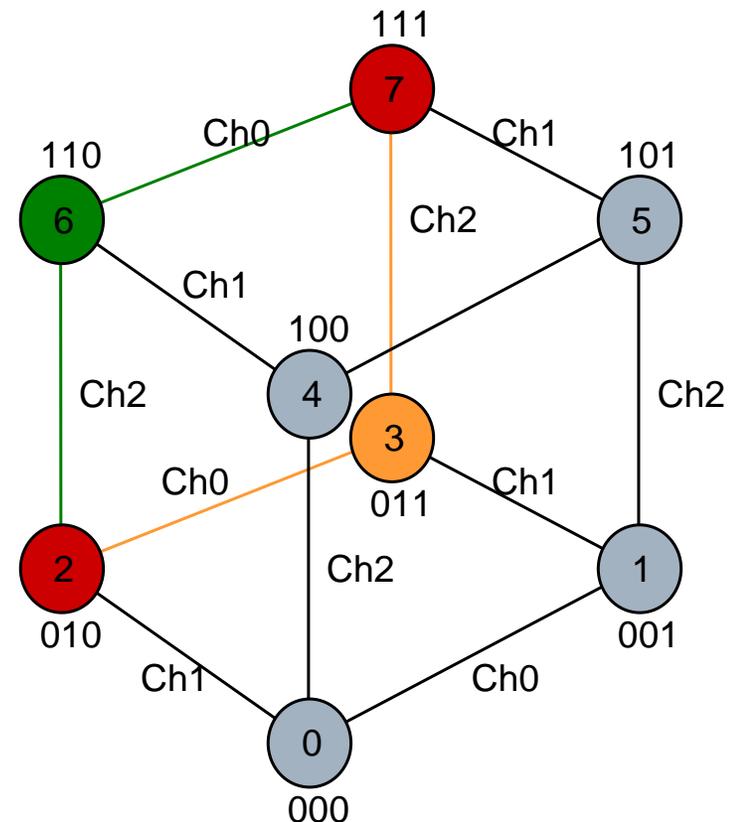


- **Statische Verbindungsnetzwerke:**

- Hyperkubus: e-cube Routing

- Beispiel:

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



- **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 = $w * f$

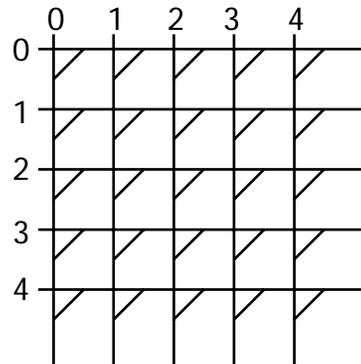
- » w : Anzahl der Datenleitungen (Busbreite)

- » f : Frequenz

- » Bestimmt maximale Anzahl der Prozessoren, d. h. die Bandbreite muss mit dem Produkt der Anzahl der Prozessoren und ihrer Geschwindigkeit abgestimmt werden

- **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

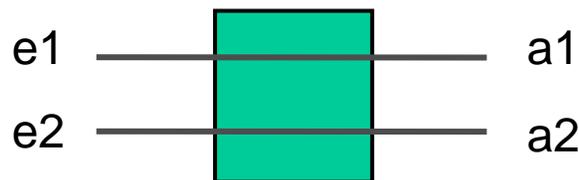
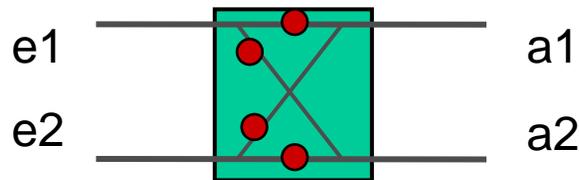
- **Dynamische Verbindungsnetzwerke:**
 - Kreuzschienenverteiler (Crossbar)
 - Vollständig vernetztes Verbindungswerk mit allen möglichen Permutationen der N Einheiten, die über das Netzwerk verbunden werden



- **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.

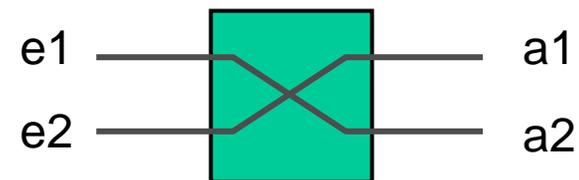
- **Dynamische Verbindungsnetzwerke:**
 - Schaltelemente (2x2 Kreuzschienenverteiler)
 - bestehen aus Zweierschaltern mit zwei Eingängen und zwei Ausgängen, die entweder durchschalten oder die Ein- und Ausgänge überkreuzen können

→ Schalernetzwerke



Durchschalten

● Kontakt, der geöffnet oder geschlossen werden kann



Vertauschen

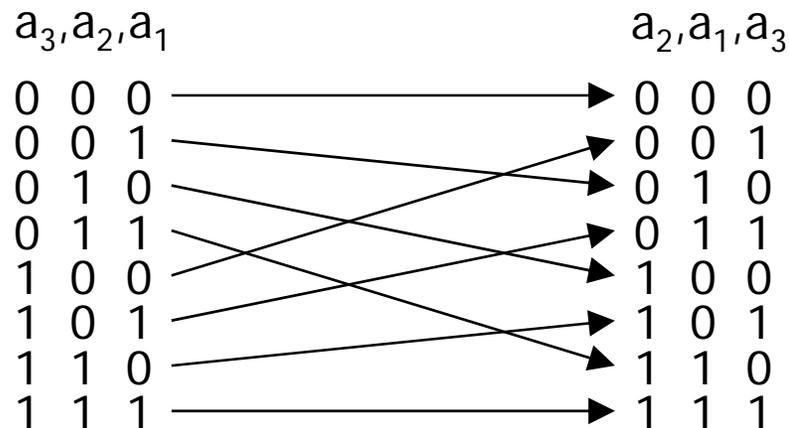
- **Dynamische Verbindungsnetzwerke:**
 - Mehrstufige Verbindungsnetzwerke (Schalternetzwerke, Permutationsnetzwerke)
 - Kompromiss zwischen der niedrigeren Leistungsfähigkeit von Bussen und hohem Hardware-Aufwand von Kreuzschienenverteilern
 - Oft 2 x 2 Kreuzschienenverteiler (Schalterelement) als Grundelement

- **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

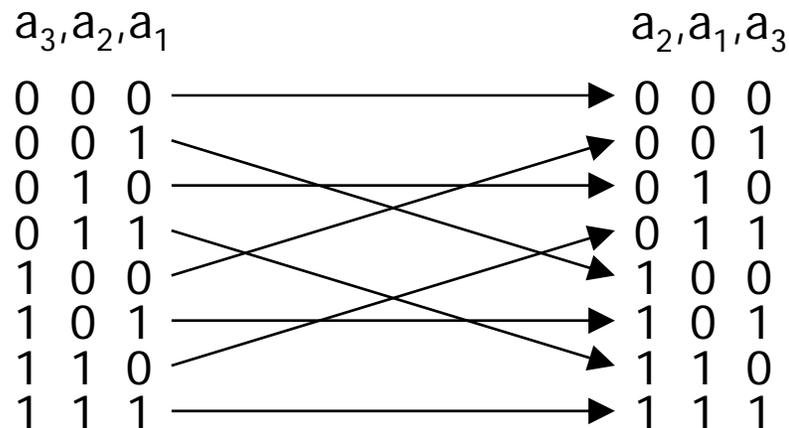
- **Dynamische Verbindungsnetzwerke:**
 - Permutationsnetze
 - reguläre Permutationsnetzwerke:
 - p Eingänge, p Ausgänge und k Stufen mit jeweils $p/2$ Zweierschaltern, wobei die Zahl p normalerweise eine Zweierpotenz ist.
 - Irreguläre Permutationsnetzwerke
 - weisen gegenüber der vollen regulären Struktur Lücken auf

- **Dynamische Verbindungsnetzwerke:**
 - **Permutationen**
 - eineindeutige (bijektive) Zuordnungen von Eingängen zu Ausgängen
 - Man stellt die Eingänge als binären Zahlenwert dar, d.h., man nummeriert die Eingänge beginnend mit 0 bis zum $(2n-1)$ -ten Eingang durch.
 - Auf diese Weise ordnet man also jedem Eingang eine Art Adresse zu.
 - Die Permutation lässt sich nun durch eine Bitmanipulation dieser Adresse darstellen, so dass am Ausgang neue Bitmuster entstehen.

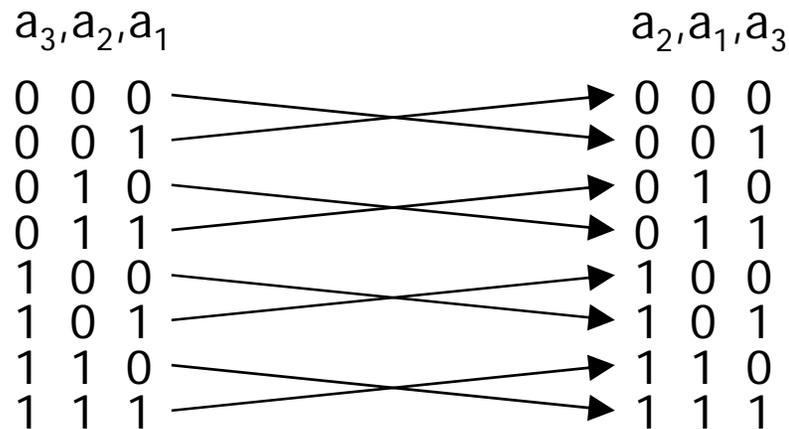
- **Dynamische Verbindungsnetzwerke:**
 - Permutationen
 - Mischpermutation M (Perfect Shuffle):
 - $M(a_n, a_{n-1}, \dots, a_2, a_1) = (a_{n-1}, \dots, a_2, a_1, a_n)$



- **Dynamische Verbindungsnetzwerke:**
 - Permutationen
 - Kreuzpermutation K (Butterfly):
 - $K(a_n, a_{n-1}, \dots, a_2, a_1) = (a_1, a_{n-1}, \dots, a_2, a_n)$



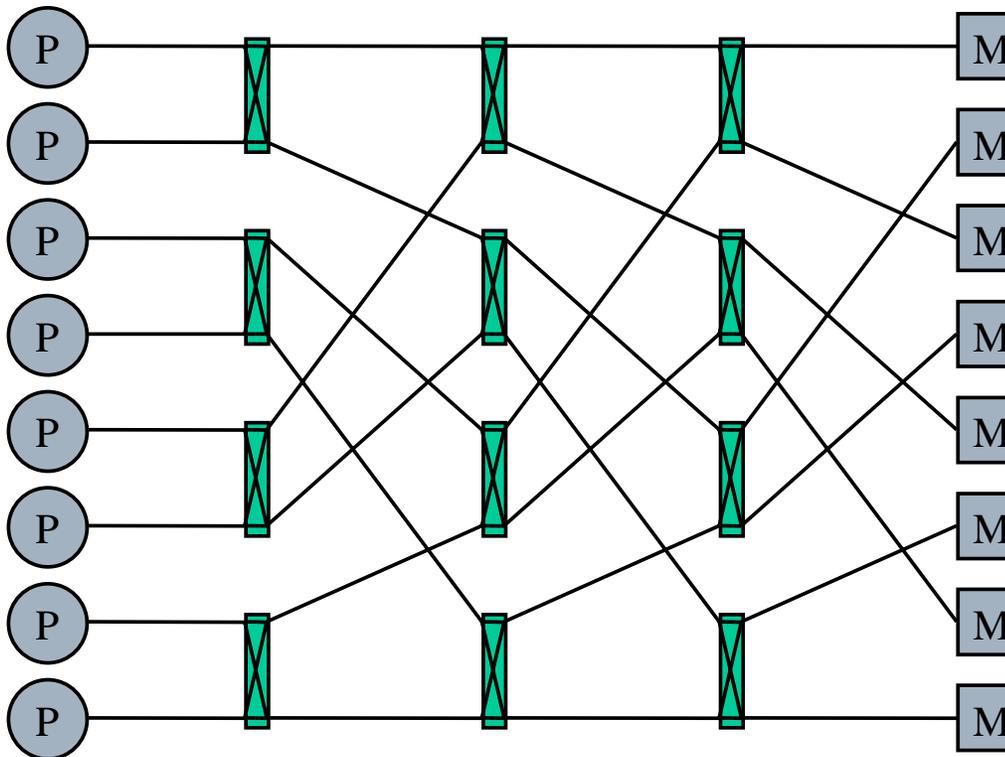
- **Dynamische Verbindungsnetzwerke:**
 - Permutationen
 - Tauschpermutation T (Butterfly):
 - Negation des niedrigwertigen Bits
 - $T(a_n, a_{n-1}, \dots, a_2, a_1) = (a_n, a_{n-1}, \dots, a_2, a_1)$



–

- **Dynamische Verbindungsnetzwerke:**
 - **Omega-Netzwerk**
 - Das Netzwerk für $p=2n$ Ein-/Ausgänge umfasst $n = \lg p$ Stufen von Zweierschaltern, die untereinander jeweils nach dem Grundmuster der Mischpermutation verknüpft sind.
 - Gesamtzahl der Zweierschalter in einem Omega-Netzwerk mit $p = 2n$ Ein-/Ausgängen beträgt $(p/2) * \lg p$
 - Nicht blockierungsfrei

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



Speichergekoppeltes Switching-Banyan- Netzwerk mit 16 Ein- und 16 Ausgängen

