

2 Verbindungsnetze

2.1 Busse

2.2 Statische Netze

2.3 Dynamische Netze

2.3.1 Kreuzschienenverteiler

2.3.2 Permutationen

2.3.3 Omega-Netze

2.3.4 Baseline-Netze

2.3.5 Verallgemeinerte Würfelnetze

2.3.6 Banyan-Netze

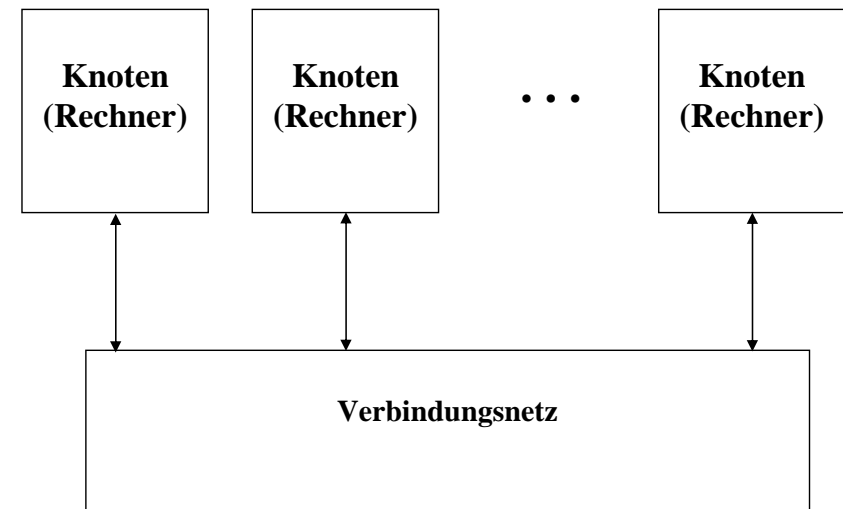
2.3.7 BBN-Butterfly

2.3.8 Clos-Netze

2.3.9 Beneš-Netze

2.4 ATM-Netze

Bild eines Parallelrechners:

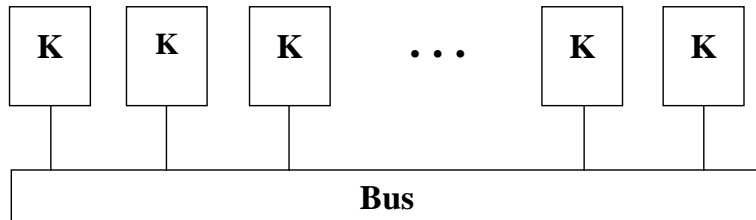


Bemerkungen:

- (i) **Hinter den Knoten können sich konventionelle Prozessoren oder Ein/Ausgabe-Prozessoren verbergen.**
- (ii) **Als Verbindungsnetz dienen systemspezifische Einzelanfertigungen oder auch kommerzielle lokale Netze wie Ethernet, FDDI, Myrinet oder ATM-Netz.**
- (iii) **Als man im Berkeley NOW-Projekt das Ethernet durch ein ATM-Netz ersetzte, erhielt man eine Leistungssteigerung des NOW-Systems um den Faktor 100.**

Bus:

Das einfachste Verbindungsnetz ist der Bus.



Bemerkung: Ein Bus stellt sicherlich einen Engpaß dar.

Man kennt vier einfache Maßnahmen, um die Leistungsfähigkeit eines Busses zu erhöhen.

1. **Erhöhung der Busbreite:** Statt 32-Bit-Wörter transportiert man 256-Bit-Blöcke über den Bus.
2. **Einführung des Fließbandprinzips:** Eine Busoperation zerlegt man in mehrere Elementaroperationen, wie Adresse anlegen, Adresse als gültig erklären, Datum lesen, u. s. w. Da die Elementaroperationen verschiedene Busteile beanspruchen, läßt sich Pipelining relativ einfach realisieren.
3. **Einführung eines Transaktionskonzepts:** Eine Transaktion darf unterbrochen und zu späterer Zeit fortgesetzt werden.
4. **Einführung eines hierarchischen Bussystems.**

Beispiele einfacher Topologien statischer Netze:

Kette,

Baum,

Stern,

Ring,

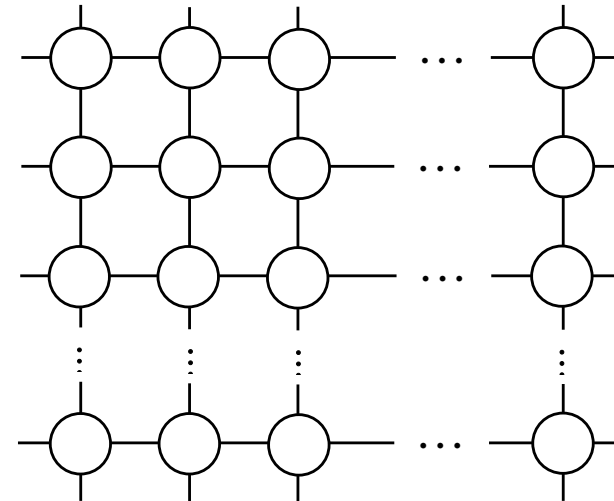
Sehnenring,

n-dimensionales Gitter,

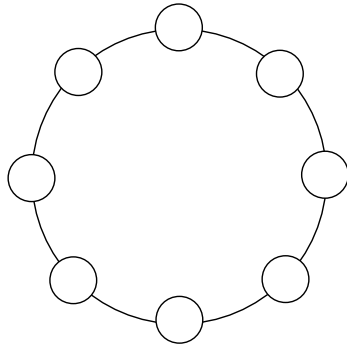
n-dimensionaler Torus,

n-dimensionaler Würfel.

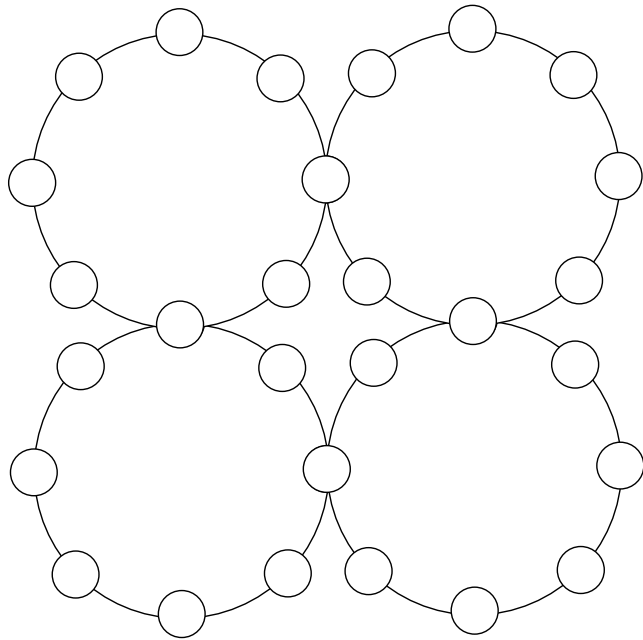
Das zweidimensionale Gitter:



Ein Ring:



Ein System von Ringen:



Bemerkung: Einfache Geometrien lassen sich rekursiv konstruieren.

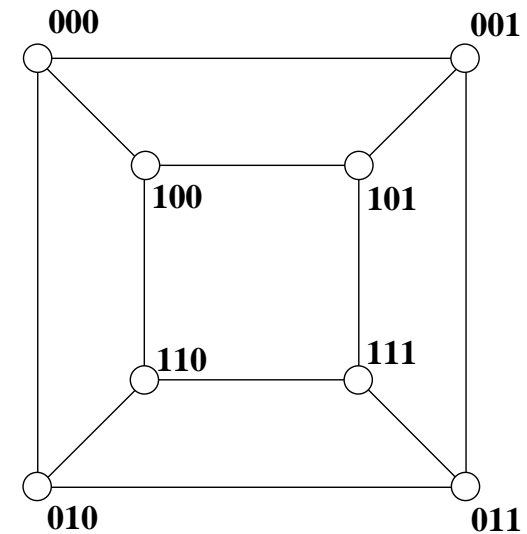
Der d-dimensionale Würfel:

Knotenzahl: 2^d

Kantenzahl: $d \cdot 2^{d-1}$

Die Knoten seien von 0 an durchnummeriert; zwei Knoten sind genau dann durch eine Kante verbunden, falls sich ihre Dualdarstellung nur in einer Stelle unterscheidet.

Beispiel: 3-dimensionaler Würfel



Zur Konstruktion mehrdimensionaler Würfel:

0D - Würfel



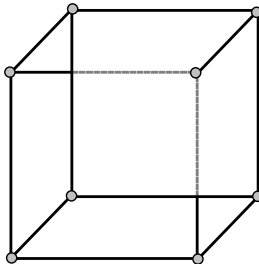
1D - Würfel



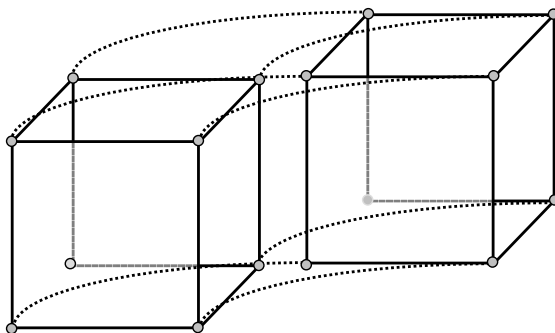
2D - Würfel



3D - Würfel



4D - Würfel



⋮

Zur Geometrie des d-dimensionalen Würfels:

Knotenzahl = 2^d

Kantenzahl = $d \cdot 2^{d-1}$

Zahl direkter Nachbarn = d

weiteste Distanz = d

"mittlere" Distanz = $d/2$

Beispiel: Wegenetz aus Sicht des Knotens 0 in einem 4-dimensionalen Würfel.

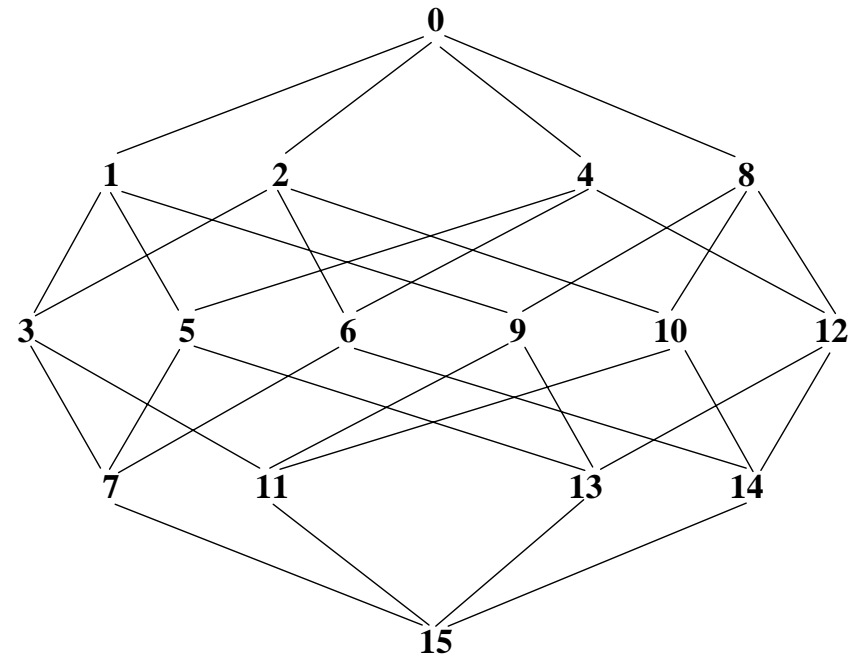


Bild eines Verbindungsnetzes:

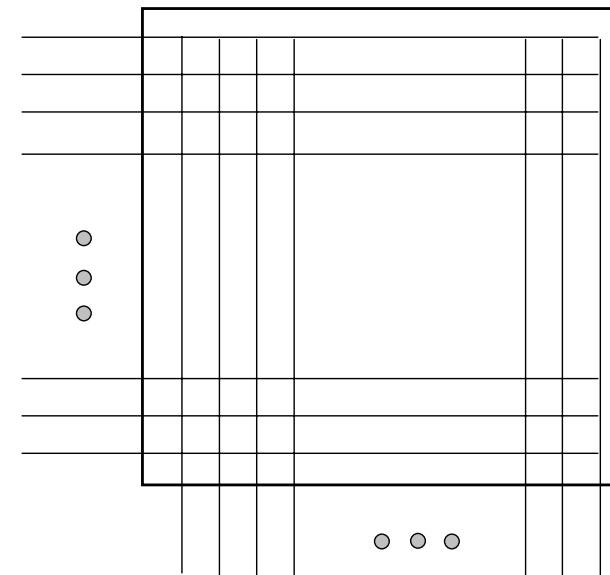


Bemerkungen:

- (i) Jeder Ausgang sollte von jedem Eingang erreichbar sein.
- (ii) Die Anzahl gleichzeitig nutzbarer Verbindungen sollte möglichst hoch sein.
- (iii) Ist $n = m$, dann sollten n Verbindungen gleichzeitig realisierbar sein. Möglichst jede Permutation von n Eingängen auf n Ausgänge sollte blockierungsfrei darstellbar sein.

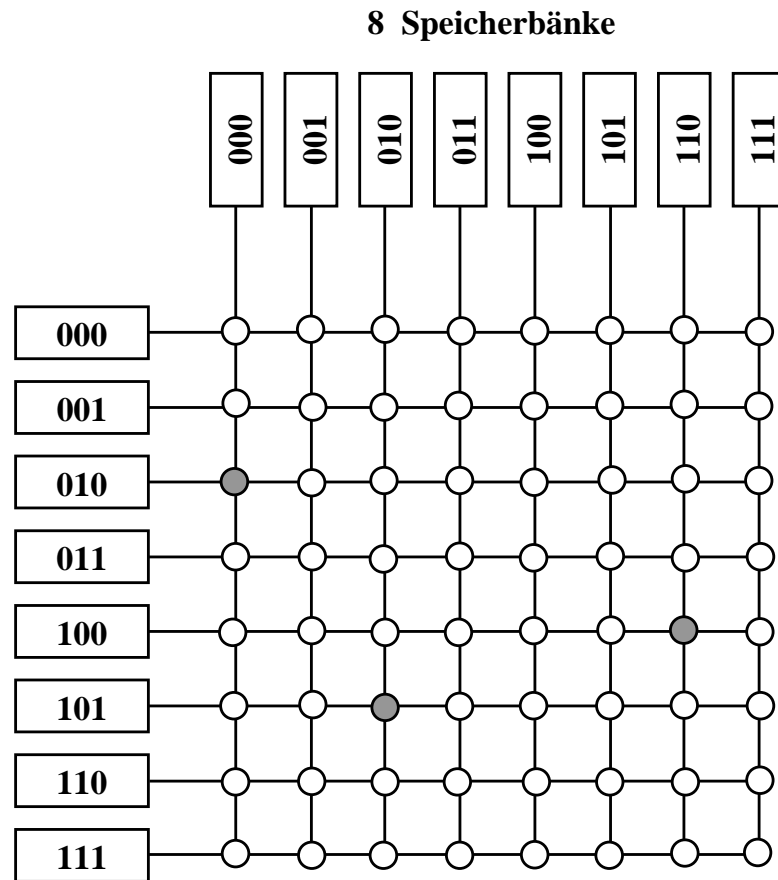
Kreuzschienenverteiler:

Das ideale einstufige Netz ist ein Kreuzschienenverteiler mit hinreichender Pufferkapazität.



Kennzeichen des Kreuzschienenverteilers:
Hoher Aufwand, bei einem 4096×4096 – Verteiler hat man 16.777.216 Kreuzungspunkte.

Beispiel: Kreuzschieneverteiler zur Anbindung des Speichers in einem Mehrrechnersystem



8 Prozessoren

Bemerkung: Der Kreuzschieneverteiler ist ein nichtblockierendes Transportnetz.

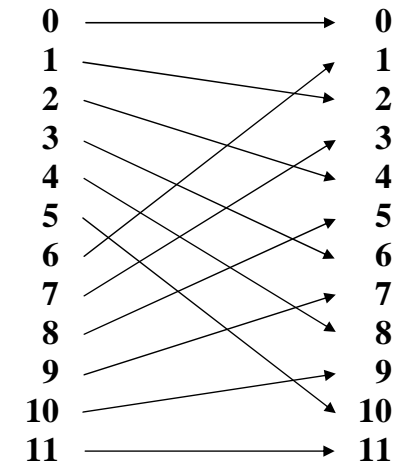
Permutation des perfekten Mischens (Perfect Shuffle):

Sei m eine gerade positive Zahl.

Die Zuordnung eines Eingangs E auf einen Ausgang A wird beschrieben durch:

$$A = s(E) = \begin{cases} 2 \cdot E & \text{für } 0 \leq E < m/2 \\ (2 \cdot E + 1) \bmod m & \text{für } m/2 \leq E < m \end{cases}$$

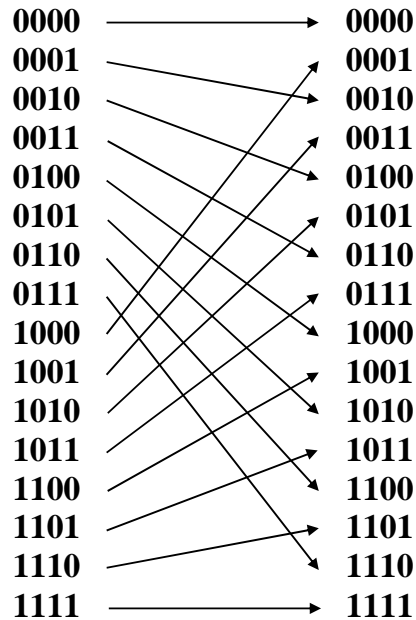
Beispiel:



Bemerkung: Für ungerades m lässt sich die Formel adaptieren.

Ist m eine Zweierpotenz $m = 2^n$, dann läßt sich das perfekte Mischen durch Bitumstellungen in der Zahlcodierung beschreiben.

$$E = i_n i_{n-1} \dots i_2 i_1 \longrightarrow A = i_{n-1} i_{n-2} \dots i_1 i_n$$

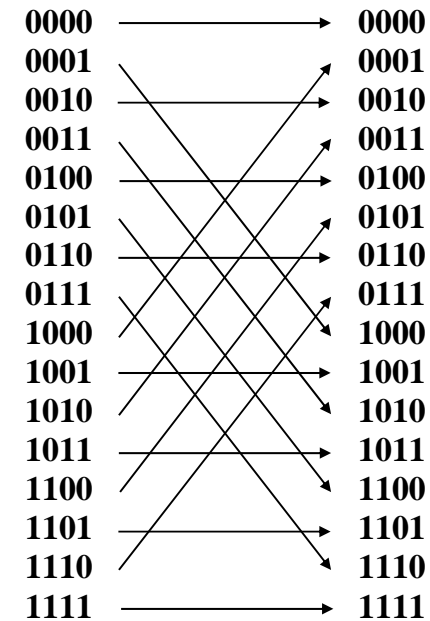


Bemerkung: Anhand der Definition des perfekten Mischens erkennt man, daß die n -malige Ausführung auf die Identität führt:
 $s(E)^n = \text{Identität}$.

Neben dem perfekten Mischen sind auch für $m = 2^n$ die Butterfly-Permutation und die zum perfekten Mischen inverse Abbildung häufig genutzte Verdrahtungsschemata.

Butterfly-Permutation:

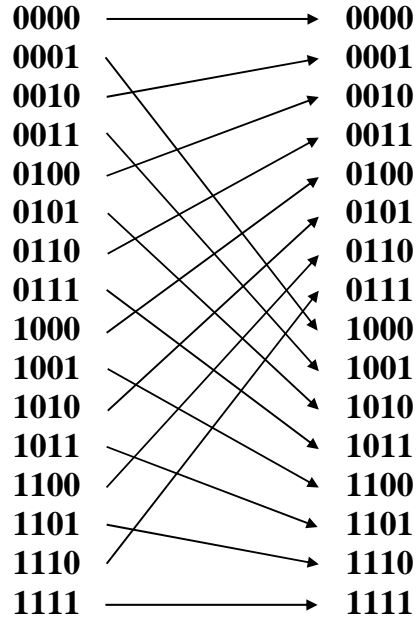
$$E = i_n i_{n-1} \dots i_2 i_1 \longrightarrow A = i_1 i_{n-1} \dots i_2 i_n$$



Bemerkung: Es ist üblich, Subbutterfly-Permutationen zu definieren, indem man nur eine Untermenge der Zahlbit berücksichtigt.

Inverses perfektes Mischen:

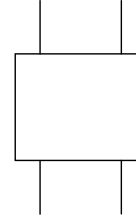
$$E = i_n i_{n-1} \dots i_2 i_1 \longrightarrow A = i_1 i_n \dots i_3 i_2$$



Formelmäßige Beschreibung für m gerade:

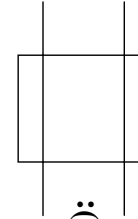
$$A = s(E) = \begin{cases} E / 2 & \text{für } E \text{ gerade} \\ (E-1)/2 + m/2 & \text{für } E \text{ ungerade} \end{cases}$$

Konstruktion allgemeiner Netze aus Koppellementen:

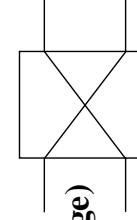


Aufbau aus 2x2-Koppelementen:

Für ein Koppellement existieren zwei Grundschaltungen:

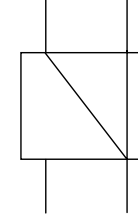
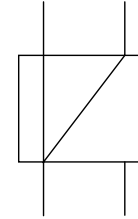


Durchleitung (straight):



Vertauschung (exchange)

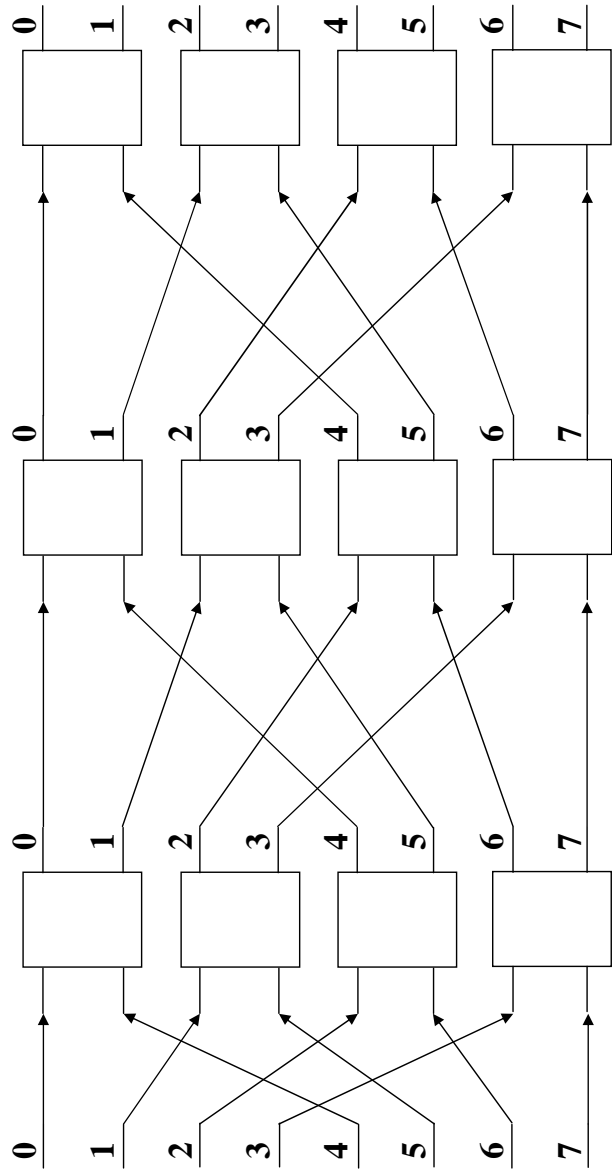
Daneben existieren zwei weitere Verteilungsschaltungen:



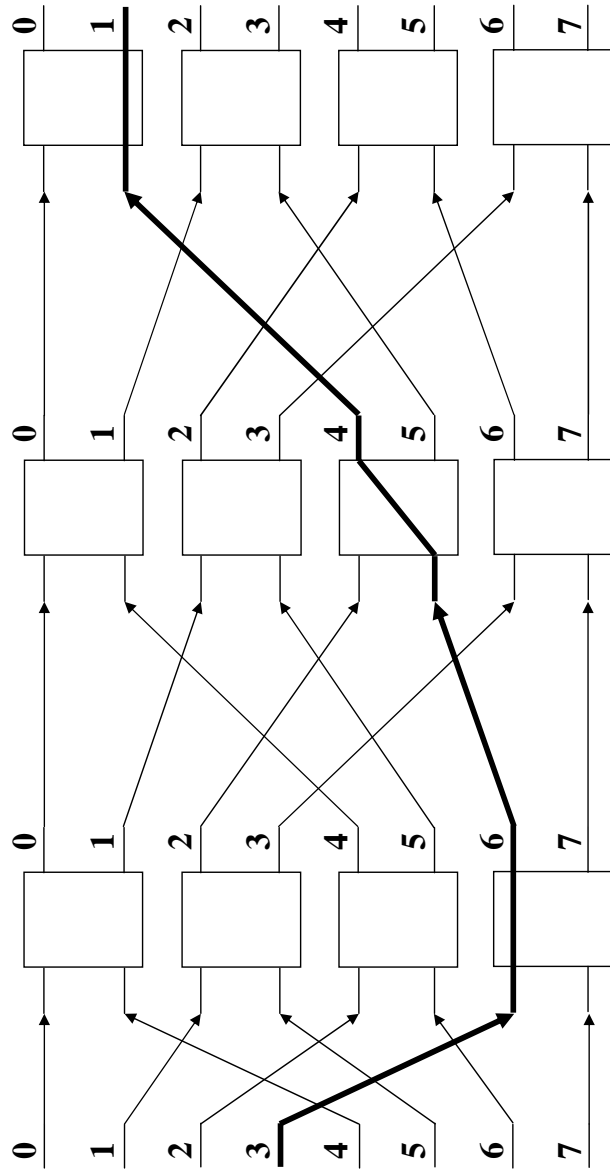
Ein Netz mit 2^n Eingängen und 2^n Ausgängen besteht aus n Stufen für $n > 0$.

Beispiel eines dreistufigen Omega-Netzes (Duncan Lawrie 1975):

Omega-Netze nutzen die Transformation des perfekten Mischens.

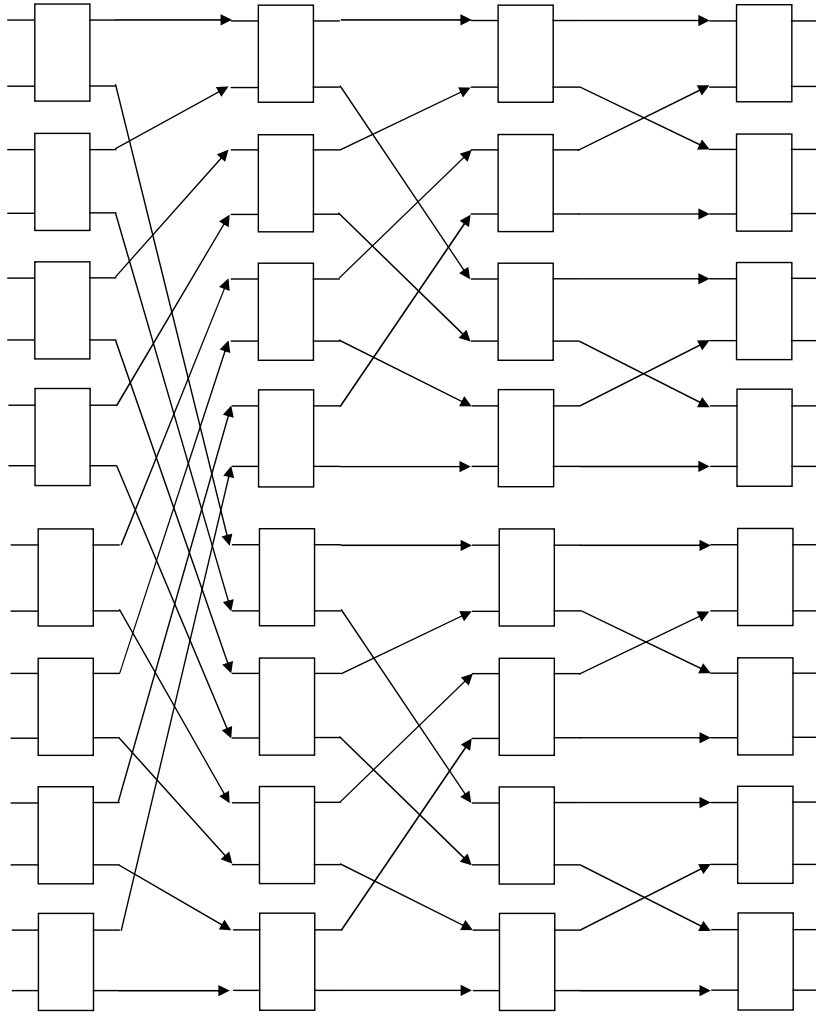


Beispiel zum Routing in Omega-Netzen:



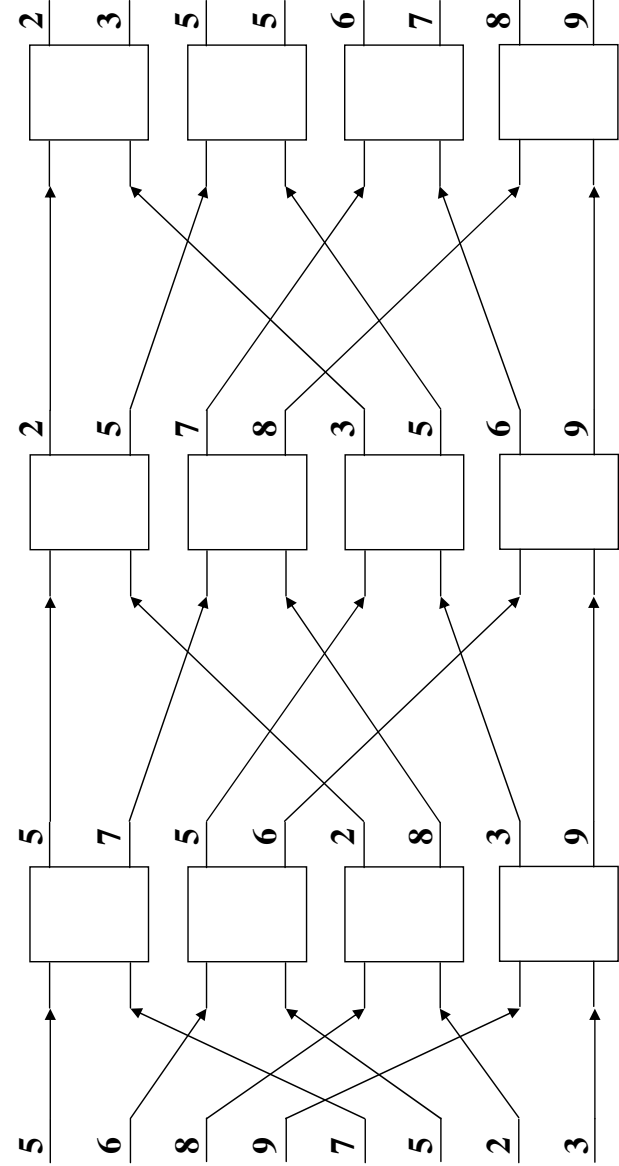
Das Routing in Omega-Netzen ist besonders einfach. Hier ein Beispiel für einen Weg zum Ziel 001.

Ein Baseline-Netz (Wu und Feng 1980):

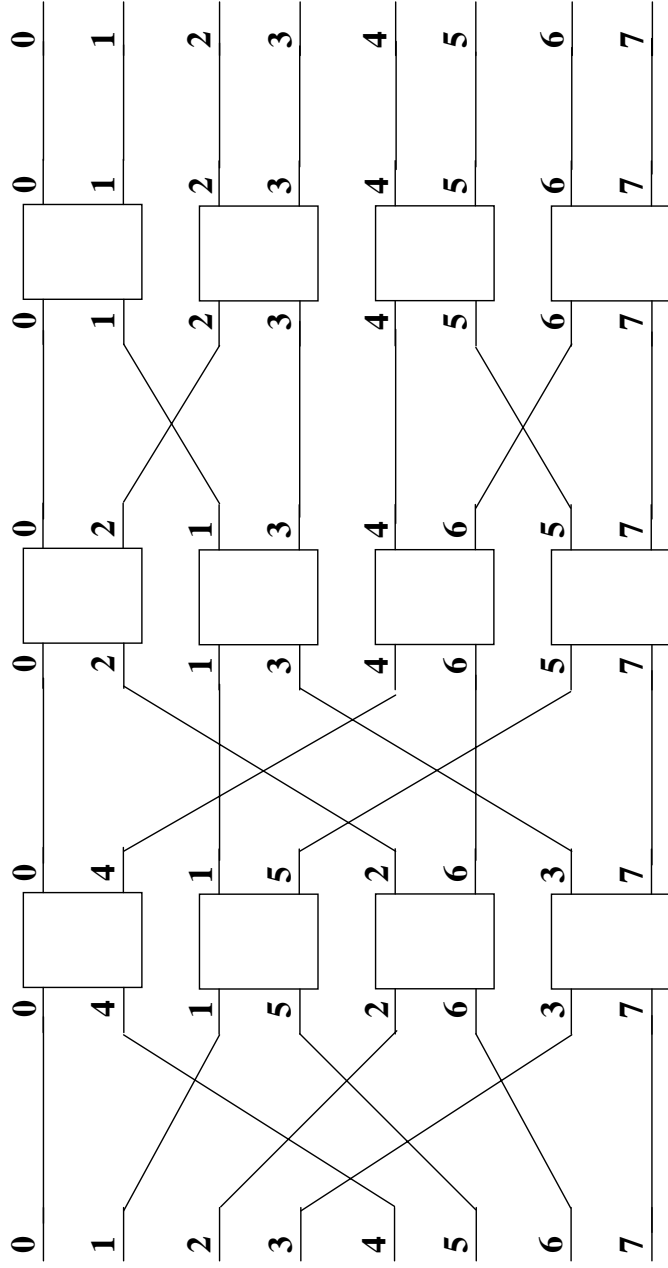


Man sieht den rekursiven Aufbau des Baseline-Netzes. Als Verdrahtungsschema wird die zum perfekten Mischen inverse Transformation benutzt.

Ein Beispiel zum perfekten Mischen einer bitonen Folge:

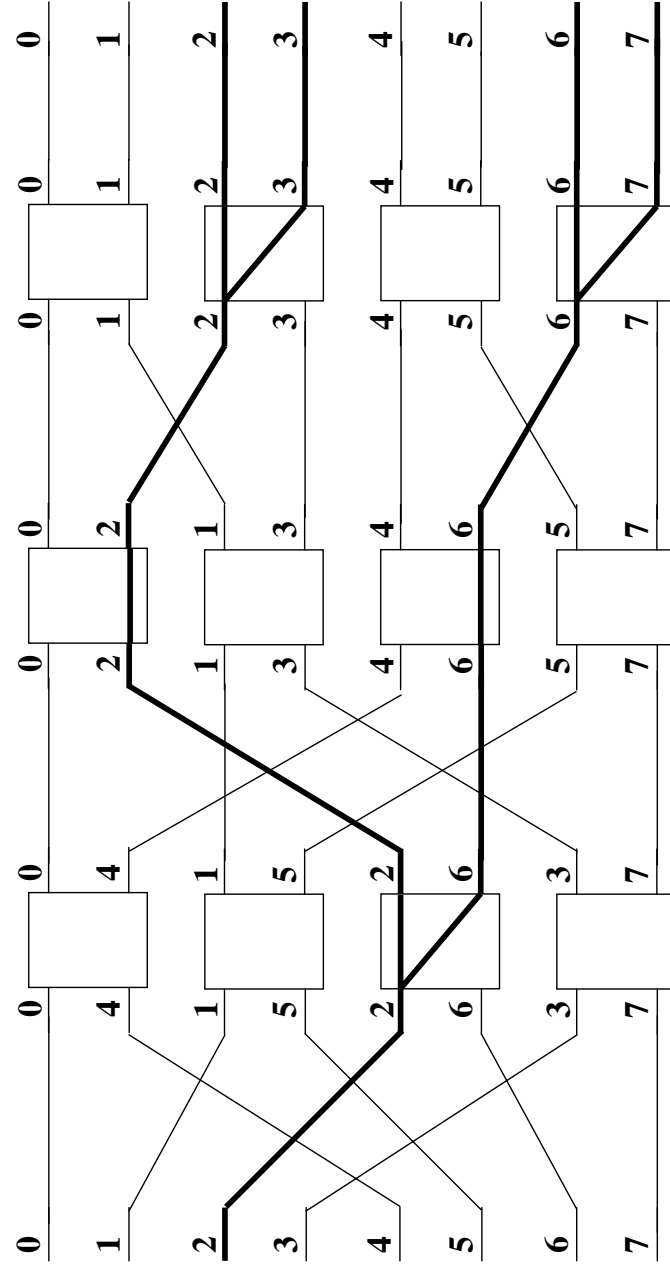


Beispiel eines verallgemeinerten Würfelnetzes:

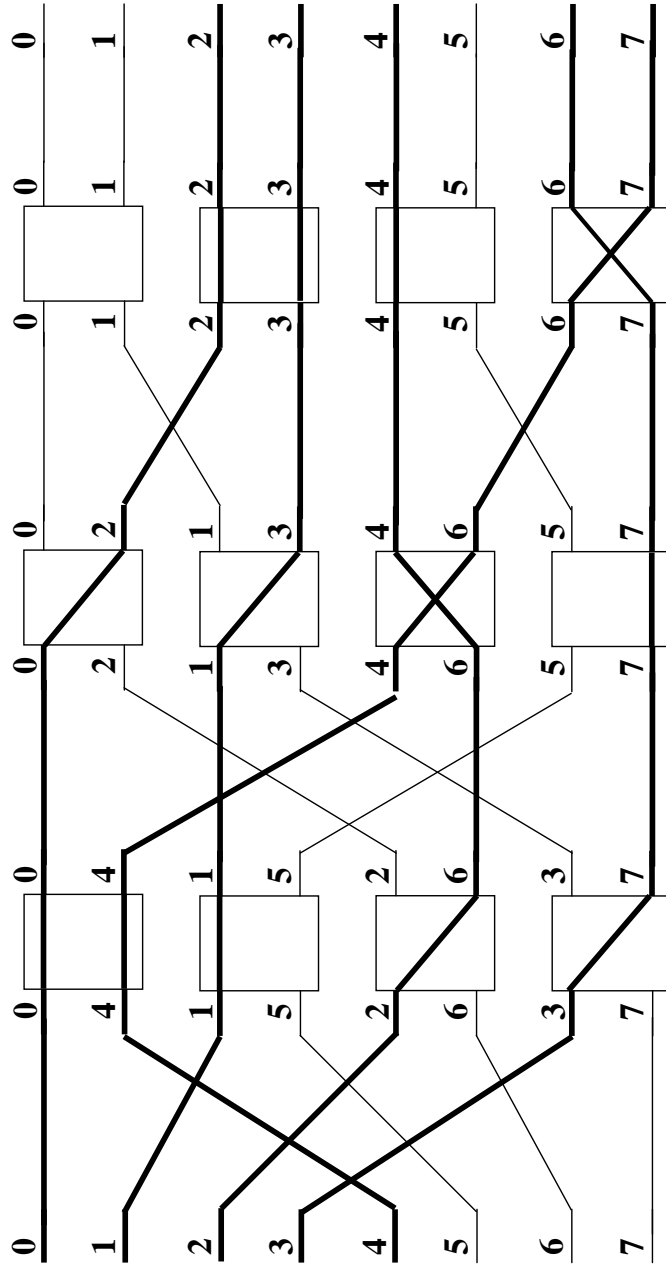


Die Numerierung der Leitungen für Paare unterscheidet sich in der i -ten Stufe nur im i -ten Bit, in der 2-ten Stufe findet man daher die Paare 0, 4 und 1, 5 u. s. w..

Beispiel eines verallgemeinerten Würfelnetzes: Multicasting



Beispiel eines verallgemeinerten Würfelnetzes: Blockierungsfreies Routing bei Sortierung



Zahl der durch ein n-stufiges Würfelnetz realisierbaren Permutationen: $2^{N \cdot n}$ mit $N = 2^{n-1}$. Dies sind bedeutend weniger als Fakultät (2^n).

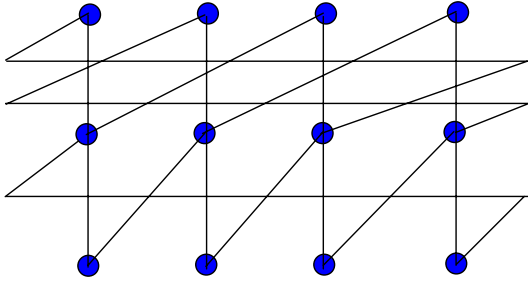
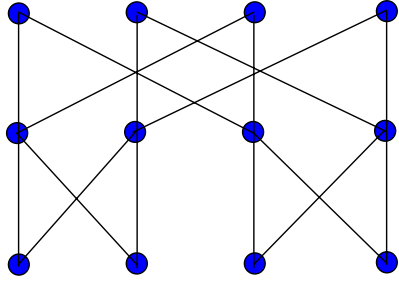
Routing: Eine Wegbeschreibung von der Quelle Q zur Senke S erhält man durch das exklusive Oder $Q \text{ xor } S$. Ein 0-Bit schaltet das Koppellement straight und ein 1-Bit exchange. Die xor-Funktion gestattet, aus Senke und Wegbeschreibung die Quelle zu rekonstruieren. Bei Nutzung der Zieladresse als Wegbeschreibung gilt eine andere Interpretation der Bitfolge, bei 0-Bit benutzt man den oberen Ausgang und bei 1-Bit den unteren.

Bei sortierten Eingängen läßt sich immer ein blockierungsfreies Routing finden.

Banyan:

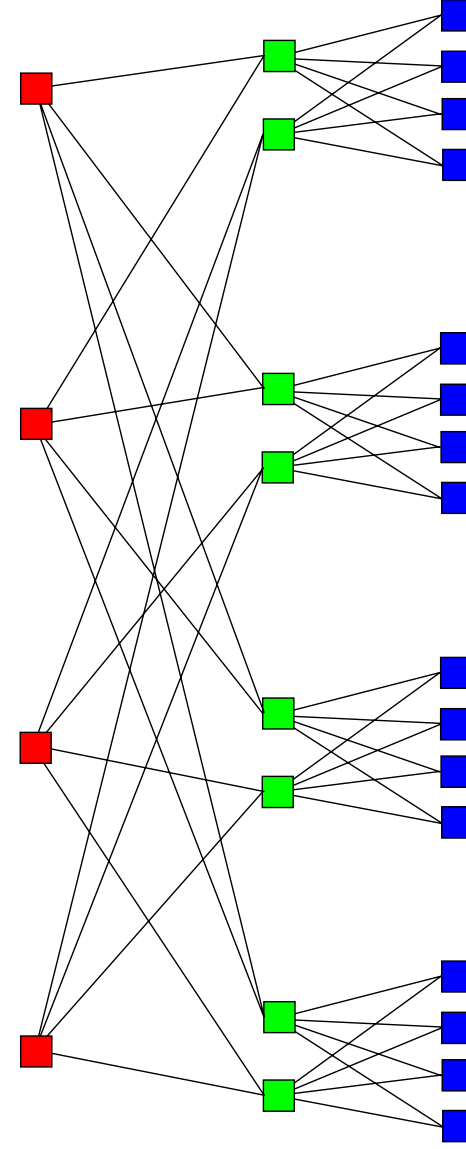
Ein Banyan ist ein endlicher, azyklischer Graph, in dem es genau einen Pfad von jedem Eingang zu jedem Ausgang gibt.

Beispiele:



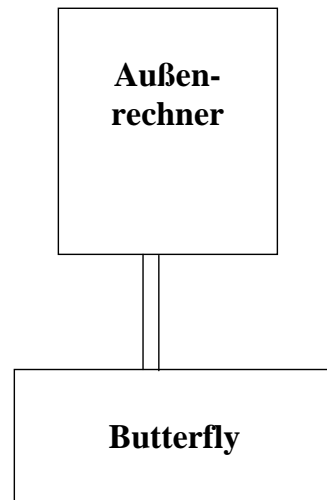
Bemerkung: "Fat trees" sind Spezialfälle von Banyan-Netzen.

Beispiel eines Mehrfachbaumes:



Bemerkung: Der Rechner CM-5 von Thinking Machines hat ein Verbindungsnetz auf Basis eines "fat tree".

Struktur des "Butterfly Parallel Processor":

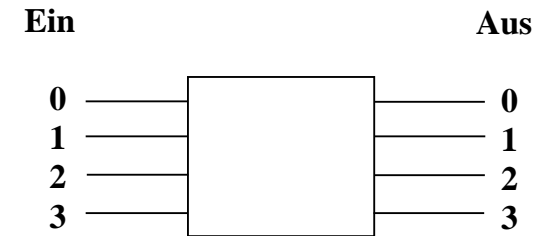


Der Butterfly ist ein MIMD-Rechner. Die Programmierung erfolgt auf dem Außenrechner, die Programmausführung auf dem "Butterfly". Seinen Namen verdankt der Rechner dem Datentransportnetz, einem "Butterfly"-Netz.

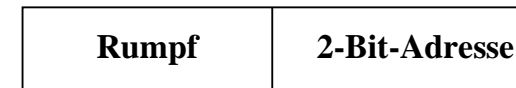


Bis zu 256 Knotenrechner können an einen Switch angeschlossen werden.

Baustein des Transportnetzes ist ein 4 x 4 – Verteiler.



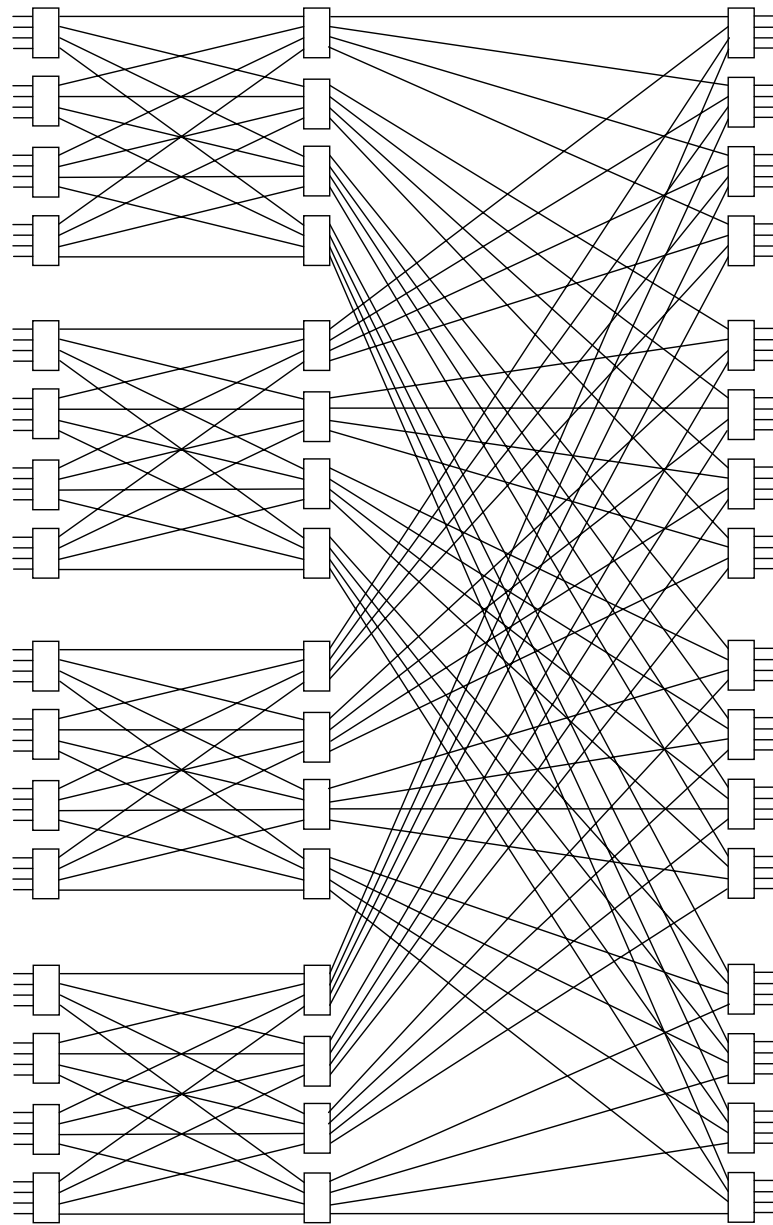
Aufbau eines Datenpaketes:



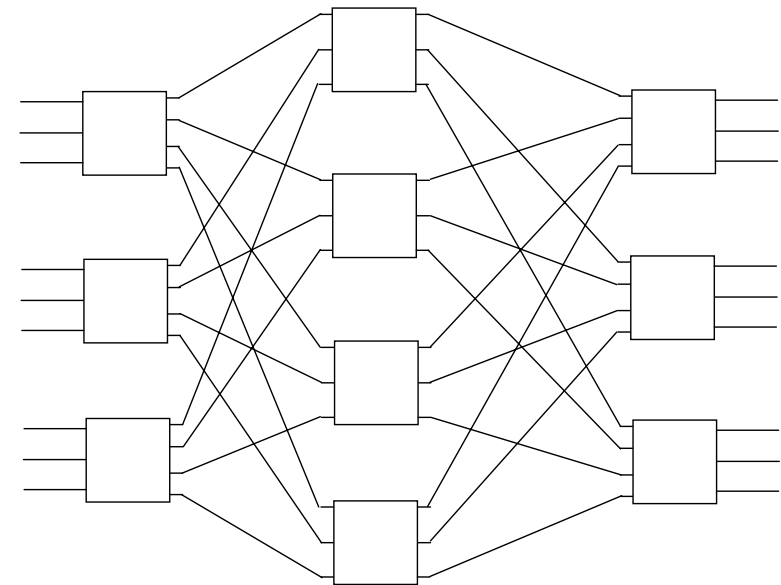
Bei der Weiterleitung eines Datenpaketes über einen 4 x 4 – Verteiler wird die 2-Bit-Adresse entfernt, der Rumpf wird über den adressierten Ausgangsport ausgegeben. Falls mehrere Pakete "gleichzeitig" für den gleichen Ausgangsport eintreffen, wird eines sofort weitergeleitet, die übrigen werden nach einer kurzen Pause "noch einmal übersandt."

Die 4 x 4 – Verteiler sind einfach zu größeren Verbindungsnetzen zusammenzufügen, z. B. zu 128 x 128 – Netzen.

Transportnetz eines BBN Butterfly mit 64 Prozessoren:



Clos-Netz:



Das Clos-Netz ist ein dreistufiges Netz, das aus Kreuzschienenverteilern aufgebaut ist. Es wird beschrieben durch drei Parameter p , q und r . Die Zahl der Eingänge und Ausgänge ist $p \cdot q$, man hat q Eingangsverteiler der Größe $p \times r$ und q Ausgangsverteiler der Größe $r \times p$, die r Mittelverteiler sind quadratisch von der Größe $q \times q$. Jeder Mittelverteiler wird mit jedem Eingangs- und Ausgangsverteiler verbunden.

Bemerkung: Das Clos-Netz dient der Materialersparnis, so hat ein 4096×4096 -Kreuzschienenverteiler 16.777.216 Kreuzungspunkte, während ein gleichwertiges Clos-Netz mit $p = q = r = 64$ nur 786.432 Kreuzungspunkte besitzt.

Ein Clos-Netz soll einen Kreuzschienenverteiler ersetzen. Daher verlangt man von ihm, daß er jede Permutation von Eingängen auf Ausgänge realisieren kann, man nennt diese Eigenschaft Blockadefreiheit.

Man unterscheidet drei Arten von Clos-Netzen:

Absolut blockierungsfreie Clos-Netze:

Ist $r \geq 2 \cdot p - 1$, dann läßt sich immer mindestens ein Weg zwischen Quelle und Ziel finden, ohne daß ein bestehender Weg umgelegt werden muß.

Bedingt blockierungsfreie Clos-Netze:

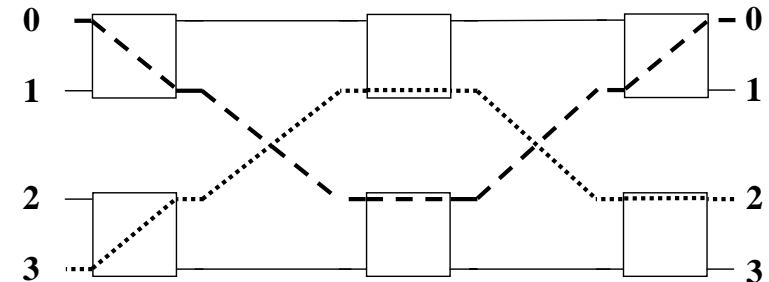
Ist $\lfloor 3 \cdot p / 2 \rfloor \leq r < 2 \cdot p - 1$, dann läßt sich durch Einhalten einer speziellen Routing-Strategie die Blockadefreiheit aufrechterhalten. Bevor ein unbelegter Mittelverteiler benutzt wird, müssen alle teilweise genutzten Mittelverteiler verwendet werden.

Durch Umordnung bestehender Verbindungen blockierungsfreie Clos-Netze:

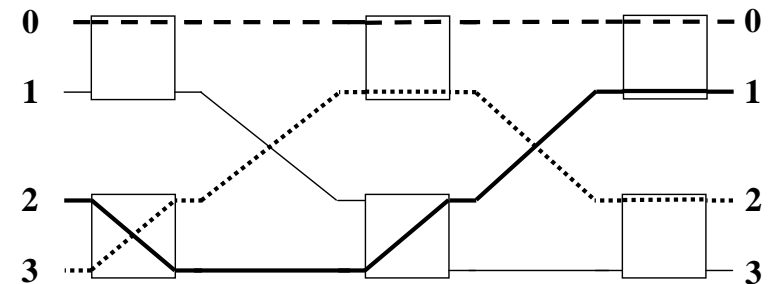
Ist $p \leq r < \lfloor 3 \cdot p / 2 \rfloor$, dann kann das Clos-Netz durch Umlegen bestehender Wege blockierungsfrei werden. Die Zahl umzulegender Wege läßt sich begrenzen durch $r - 1$.

Beispiel zum Umlegen von Verbindungen:

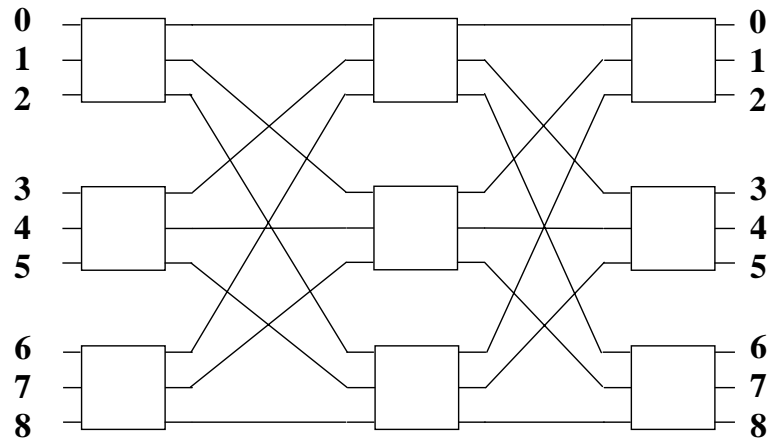
Gegeben sein die beiden Verbindungen:
von 0 nach 0, von 3 nach 2:



Es soll nun ein weiterer Weg von 2 nach 1 hinzukommen. Im unteren Mittelverteiler findet eine Blockade statt. Man kann aber den Weg von 0 nach 0 verlegen.



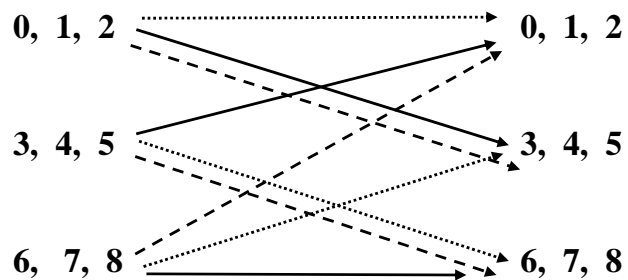
Routing im Clos-Netz:



Wegermittlung durch Kantenfärben:

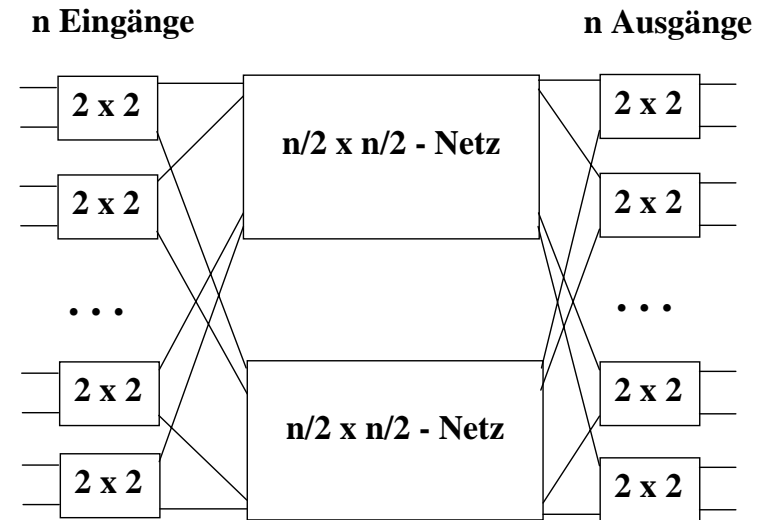
Permutation:

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 \\ 4 & 5 & 1 & 7 & 8 & 2 & 0 & 3 & 6 \end{bmatrix}$$



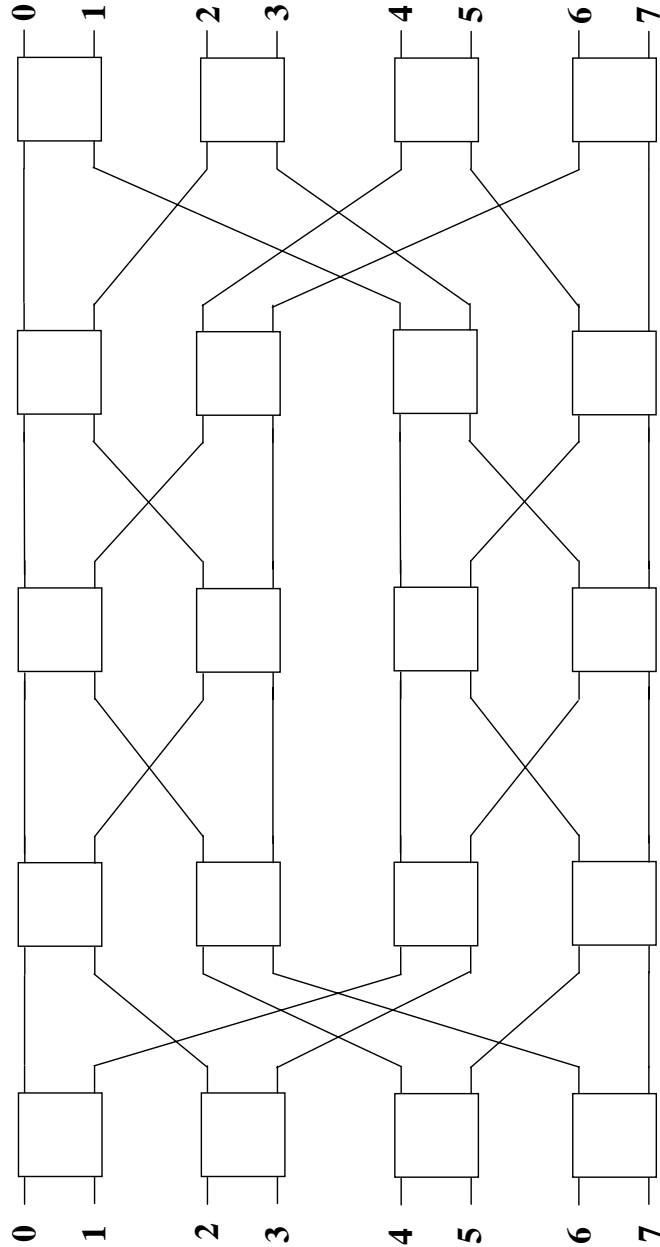
Zur Konstruktion von Beneš-Netzen:

Die Eingangs- und Ausgangsverteiler eines Beneš-Netzes sind 2x2-Kreuzschalter. Das Konstruktionsverfahren ist rekursiv. Der erste Schritt wird im Bild dargestellt, sei die Zahl n der Eingänge eine Zweierpotenz.



Gegenüber einem Clos-Netz führt das Beneš-Netz zu einer weiteren Hardware-Ersparnis. Für den 4096x4096-Kreuzschienenverteiler reduziert sich die Zahl der Kreuzungspunkte für das funktional gleichwertige Beneš-Netz auf 180.224. Ein einfaches Routing-Verfahren für Beneš-Netze ist das Sprungverfahren zwischen Eingangs- und Ausgangsstufe.

Beispiel eines Beneš-Netzes:



ATM = Asynchronous Transfer Mode

Der Haupteinsatz ist die Realisierung von B-ISDN.
(B-ISDN = Broadband Integrated Services Digital Network)

Ein Transportnetz zur Übertragung von

**Sprache,
Musik,
Bildern,
Bilderfolgen,
Fernsehen,
HDTV,
Dateien,
Telecontroldaten,
u. S. w.**

Unterstützung von

**Punkt-zu-Punkt-Verbindung,
Punkt-zu-Multipunkt-Verbindung,
Multipunkt-zu-Punkt-Verbindung,
Multipunkt-zu-Multipunkt-Verbindung.**

Unterstützung von

**terminkritischen Daten,
isochronen Datenfolgen,
plesiochronen Datenfolgen,
verlässlicher Datenübertragung.**

Kontinuum der Vermittlungsverfahren:



**Leitungs-
vermittlung**

**Asynchroner
Transfermodus**

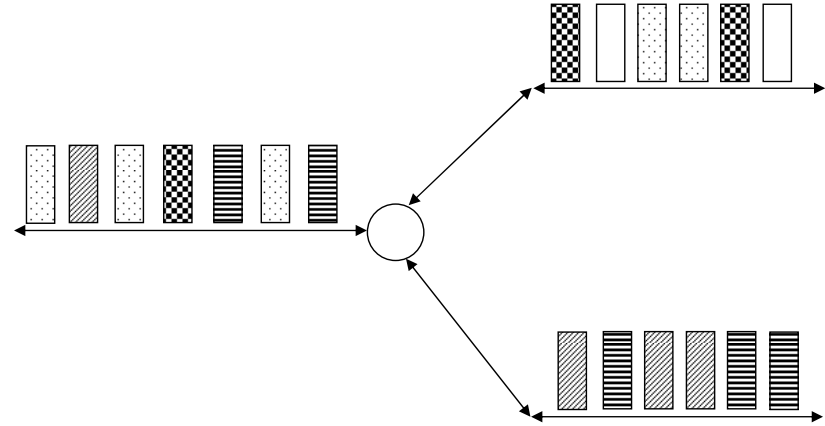
**Paket-
vermittlung**

**Garantie des Service
Ressourcenverschwendung**

**Keine Garantie des Service
Gute Ressourcennutzung
Exzessive Fehlerbehandlung**

Kennzeichen eines ATM-Netzes:

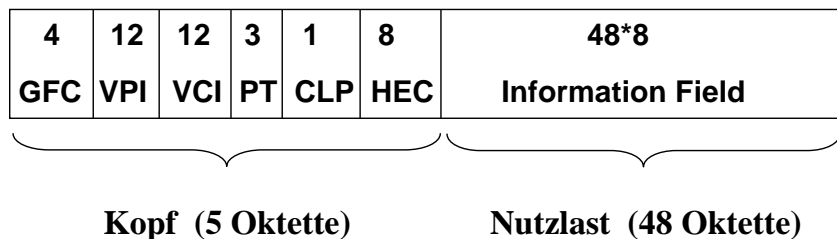
- (i) **Dienste sind verbindungsorientiert, Daten werden über virtuelle Kanäle transportiert.**
- (ii) **Daten werden in kleinen, 53 Oktett großen Zellen transportiert.**
- (iii) **Zellen verschiedener virtueller Kanäle werden einem Multiplexverfahren unterworfen.**
- (iv) **Für die einzelnen Zellenströme lassen sich verschiedene Qualitätsklassen bezüglich Datenrate, Fehlerrate und Verzögerungen festlegen.**



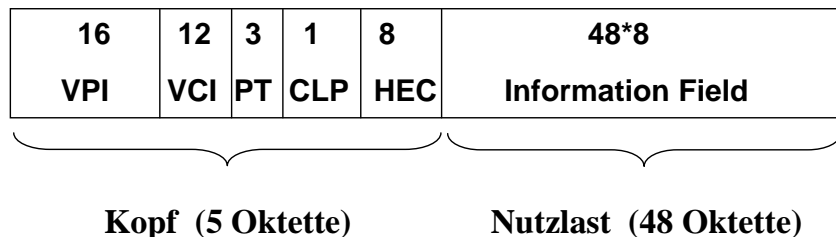
Überlagerung mehrerer Zellenströme

Zellenformate:

Aufbau einer Zelle an der Benutzer-Netz-Schnittstelle:



Aufbau einer Zelle an einer Netz-Netz-Schnittstelle:



Die Größen der Teilfelder sind in Bit angegeben.

Bezeichnungen:

- GFC** = Generic Flow Control
- VPI** = Virtual Path Identifier
- VCI** = Virtual Channel Identifier
- PT** = Payload Type
- CLP** = Cell Loss Priority
- HEC** = Header Error Control

Codierung der Nutzlastanzeige:

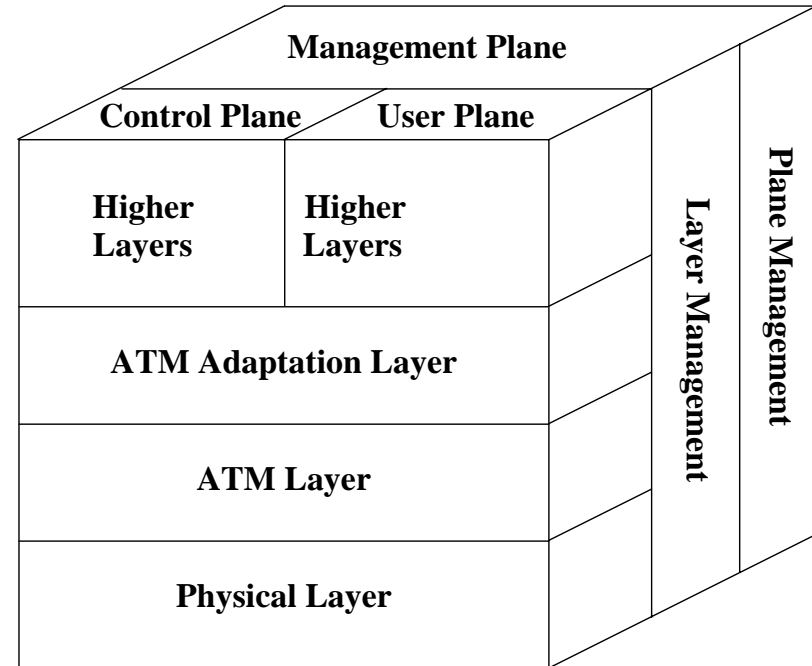
- 000** Nutzerzelle Typ 0, keine Behinderung erfahren
- 001** Nutzerzelle Typ 1, keine Behinderung erfahren
- 010** Nutzerzelle Typ 0, Behinderung erfahren
- 011** Nutzerzelle Typ 1, Behinderung erfahren
- 100** Verwaltungszelle
- 101** Verwaltungszelle für Ende-zu-Ende-Aufgaben
- 110** Zelle zur Ressourcenverwaltung
- 111** Reserviert

ATM-Dienste:

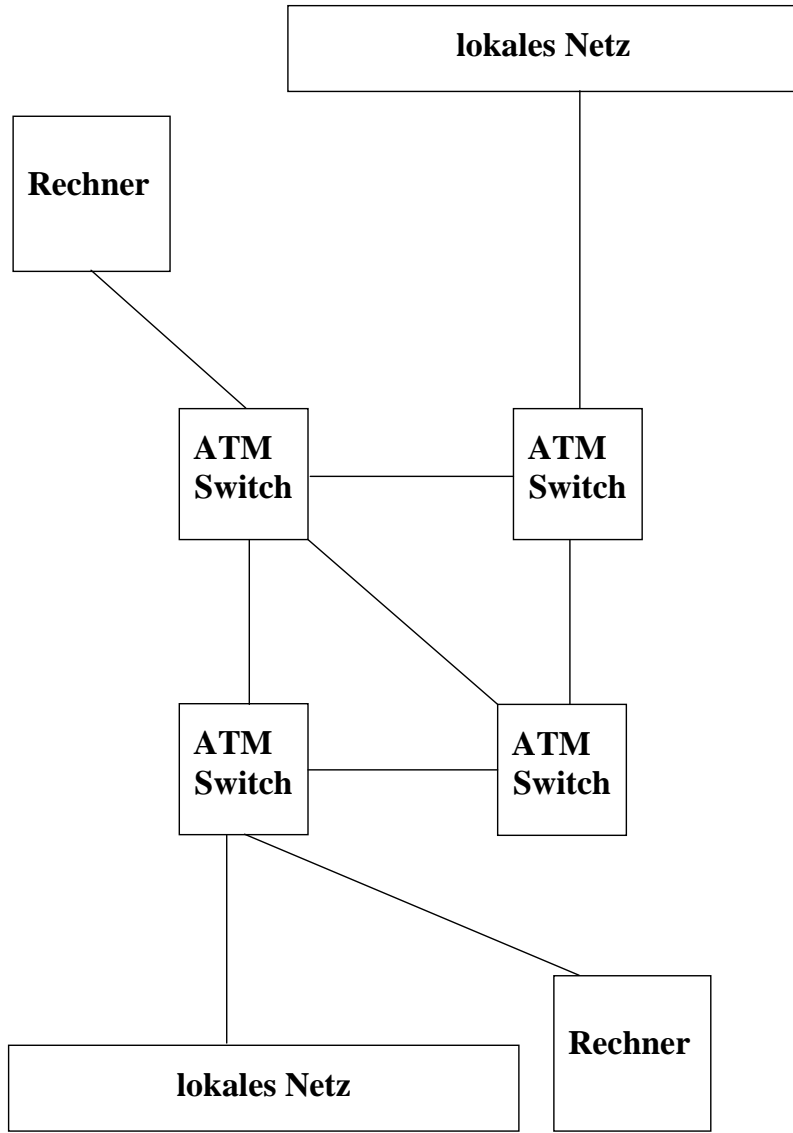
- CBR** = Constant Bit Rate
- VBR-RT** = Variable Bit Rate: Real Time
- VBR-NRT** = Variable Bit Rate: Non-Real Time
- ABR** = Available Bit Rate
- UBR** = Unspecified Bit Rate

Charakteristika	CBR	VBR-rt	VBR-nrt	ABR	UBR
Bandbreite garantiert	Ja	Ja	Ja	?	Nein
Geeignet für Echtzeit	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein
Geeignet für Stoßbetrieb	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja
Sender Drosselung	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein

ATM Protokoll Architektur:

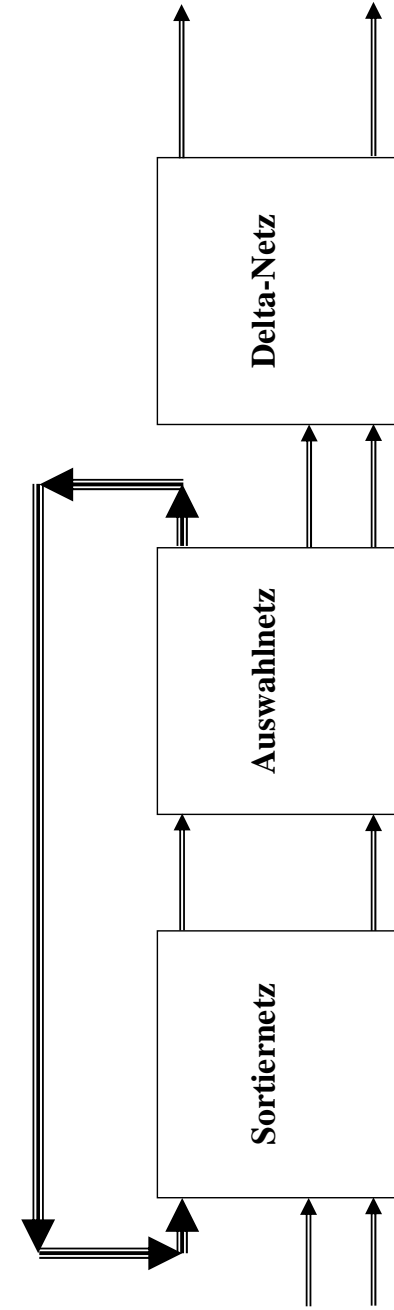


Ein ATM-Netz zur Verbindung von Rechnern und lokalen Netze:

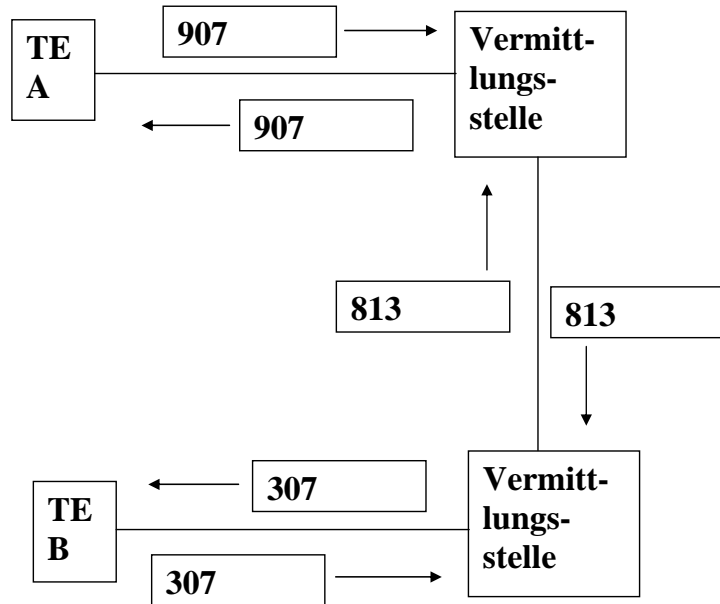


Aufbau eines ATM-Koppelfeldes aus Sortiernetz, Auswahlnetz und Delta-Netz:

Rückführung bei Konflikten unter Beachtung der Reihenfolge



Beispiel: Virtueller Kanal im ATM-Netz:



Der virtuelle Kanal zwischen den Endeinrichtungen TE A und TE B trägt auf jeder Teilstrecke einen anderen Identifikator, hier 907, 813, 307. Die Umbenennung wird in Tabellen durchgeführt. Für beide Richtungen wird der gleiche Identifikator verwendet.

Auswahl von Nachrichten zur Verbindungsverwaltung:

ALERTING
CALL PROCEEDING
SETUP
CONNECT
SETUP ACKNOWLEDGE
CONNECT ACKNOWLEDGE
RESTART
RELEASE
RESTART ACKNOWLEDGE
RELEASE COMPLETE
NOTIFY
STATUS ENQUIRY
INFORMATION
STATUS
MODIFY REQUEST
MODIFY ACKNOWLEDGE
MODIFY REJECT
CONNECTION AVAILABLE

ADD PARTY
ADD PARTY ACKNOWLEDGE
PARTY ALERTING
ADD /PARTY REJECT
DROP PARTY
DROP PARTY ACKNOWLEDGE

Beispiel eines Verbindungsaufbaus und -abbaus:

