

„Fibre Channel“- Speichernetzwerke

Effizientes Speichermanagement für große Anwendungen

Die Durchsetzung des Server/Client-Konzeptes hat zur Folge, dass Speichersysteme bevorzugt werden, auf die von jedem Rechnersystem aus zugegriffen werden kann. Der bisher bei großen Speichersystemen eingesetzte „Fibre Channel“-Standard bietet einen effizienten Datentransport bei Datenübertragungsraten bis 4 Gbit/s.

Von Dr. Jens Würtenberg

Kein anderes Gebiet der Computertechnologie hat sich im letzten Jahrzehnt so sprunghaft verändert wie das der Massenspeicher. Zwei Faktoren trugen zu einer drastischen Veränderung der Art und Weise bei, wie heute ein Computer auf die Daten zugreift. Der erste hat mit der Entwicklung der Festplatte im Kielwasser des PC zu einem Massenprodukt zu tun, das hinsichtlich der Kosten pro Bit, der Speicherdichte und der Verlässlichkeit nicht zu schlagen ist. Diese Entwicklung führte Anfang der 90er Jahre zum RAID-Konzept (Random Array of Inexpensive Disks), bei dem mehrere billige Festplatten miteinander betrieben wurden. Bei den so genannten JBODs (Just a Bunch of Disks) werden die Festplatten hintereinandergeschaltet, und die Kapazitäten der ein-

zelnen Platten addieren sich einfach; auf einen inhärenten Sicherungsmechanismus wird verzichtet.

Der zweite Faktor besteht in der Wandlung der Aufgabenstellung des Computers: Nicht mehr der zentrale Hochleistungsrechner, der wohldefinierte Aufgaben sequenziell abarbeitet, steht im Zentrum der Entwicklung, sondern es sind große „Serverfarmen“, auf deren Einzelrechnern simultan eine Vielzahl von Prozessen parallel läuft und die auf einen gemeinsamen, häufig auch räumlich verteilten Datenbestand zugreifen.

► Verschiebungen im Speichermarkt

Das Marktvolumen für Festplattenspeicher in 2001 hat das amerikanische Marktforschungsunternehmen IDC [1] mit 25 Mrd. Dollar ermittelt. Drei Marktsegmente haben die Marktforscher dabei unterschieden: „Direkt Attached Storage“ (DAS), „Network Attached Storage“ (NAS) und „Storage Area Networks“ (SAN). Während das gesamte Marktvolumen bis 2005 auf über 29 Mrd. Dollar wachsen soll, gibt es innerhalb der drei Segmente erhebliche Verschiebungen (Bild 1): So fällt der DAS-Anteil kontinuierlich von zwei Dritteln (67,7 %) im Jahr 2001 innerhalb von vier Jahren auf etwa ein Drittel (33,9 %). Bei einem durchschnittlich um 3,6 % wachsenden Markt findet also ein erheblicher Verdrängungswettbewerb statt. 2005 beträgt der

Wertanteil der in SANs eingesetzten Festplatten mehr als 46 %. Bei der Ermittlung des Marktvolumens sind die Infrastruktur- und Kommunikationseinrichtungen des SAN nicht miterhoben. Der Wertanteil der in Network Attached Storage verwendeten Festplatten steigt von knapp 7 % im Jahr 2001 auf fast 20 %.

Der Rückgang von „Direct Attached Storage“ hat damit zu tun, dass auf die Dateien eines DAS-Festplattenspeichers von anderen Rechnern nicht zugegriffen werden kann. Der Vorteil der systemnahen Lösung – die Übertragungsprotokolle sind in der Regel SCSI (Small Computer Systems Interface) oder ATA (Advanced Technology Architecture) – besteht darin, dass die Speicherroutinen mit minimalem Verwaltungsaufwand ablaufen und dadurch äußerst effizient sind.

Beim „Network Attached Storage“ wird in der Regel ein spezieller Server in ein Ethernet-Netzwerk eingebunden, der dann in einem Schaltschrank eine bestimmte Festplattenkapazität bereitstellt. Der Server läuft z.B. mit Microsoft SAK oder Linux und bietet den Zugriff auf die Dateien über ein Network File System (NFS), das Common Internet File System (CIFS) oder das Hypertext Transfer Protocol (HTTP). Die Grundeinheiten des Datenaustauschs sind Dateien (Files), das Übertragungsprotokoll ist nach einem Schichtenmodell modelliert. In der Regel werden für die Schichten 3 (Netzwerk) und 4 (Transport) IP und TCP eingesetzt. Die Vorteile liegen vor allem in der weiten Verbreitung der „Internet-Protokolle“ sowie den niedrigen Kosten für die Ethernet-Schnittstelle und Vermittlungseinrichtungen wie Switches und Router. Ein wesentlicher Nachteil dieses Konzepts besteht im ungünstigen Verhältnis der Nutzdaten zu den Transportdaten.

► Ein Netzwerk für den Speicher

Beim dritten Ansatz geht es darum, den Speicherbereich vom Ethernet zu trennen und mit einem eigenen Netzwerk auszustatten. Dieses, als Storage Area Network (SAN) bezeichnete Konzept nutzt einen eigens standardisierten Kanal für die Kommunikation, den „Fibre Channel“. Der Vorteil des „Fi-

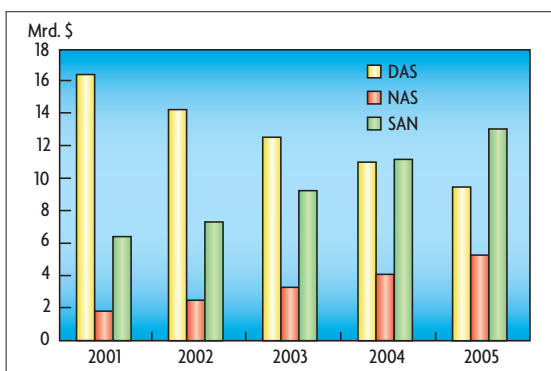


Bild 1. Verdrängungswettbewerb auf dem Markt für Massenspeicher: „Direct Attached Storage“ (DAS) nimmt kontinuierlich ab, die „Storage Area Networks“ (SAN) erreichen in diesem Jahr (2004) den gleichen Umsatz wie DAS, und „Network Attached Storage“ (NAS) wächst künftig jedes Jahr um 30 %. (Quelle: IDC)

bre Channel“ liegt in seinem geringen „Overhead“. Es stehen verschiedene Übertragungsklassen zur Verfügung: von 133 Mbit/s über Kupferleitung bis zu 4 Gbit/s über Lichtwellenleiter. Das hier am häufigsten genutzte Protokoll ist das „Fibre Channel“-Protokoll, bei dem das blockorientierte SCSI-Protokoll effizient in die „Fibre Channel“-Rahmenstruktur abgebildet wird. Die „Fibre Channel“-Produkte verschiedener Hersteller lassen sich aber nicht unbedingt miteinander kombinieren. SANs bieten allerdings die Voraussetzungen für den Aufbau von Speichersystemen, bei denen die gemeinsame Nutzung von Dateien ebenso möglich ist wie der Aufbau eines „Speicher-Pools“. Sie erfüllen zudem die heutigen Anforderungen an Zuverlässigkeit der Speichergeräte und kontinuierliche Verfügbarkeit der Daten.

► „Fibre Channel“-Grundlagen

Beim „Fibre Channel“ (FC) handelt es sich um eine serielle Datenübertragung, die unter dem FC-eigenen Protokoll, aber auch über höhere Protokolle wie FDDI (Fibre Distributed Data Interface), SCSI, HIPPI (High Performance Parallel Interface) oder IPI (Intelligent Peripheral Interface) ablaufen kann. Die Verbindung der Bausteine des „Fibre Channels“ wird über eine „Fabric“ organisiert, ein intelligentes Netzwerk, mit dem die Geräte jeweils Punkt-zu-Punkt verbunden sind (Bild 2). Der „Fibre Channel“-Port eines Gerätes muss lediglich diese Punkt-zu-Punkt-Verbindung zu der „Fabric“ steuern. Einer oder mehrere Switches stellen die so genannte „Switching Fabric“ dar. Die Dienste der Switching Fabric können von der Netzwerk-Schnittstellenkarte (NIC – Network Interface Card) eines Gerätes nur dann genutzt werden, wenn das Betriebssystem des Gerätes darauf zugreifen kann. Die NIC wird zu einem Teil des Netzwerkes, indem sie sich in die Switching Fabrik „einbuucht“.

Eine weitere wesentliche Eigenschaft eines SAN besteht darin, dass es alle Geräte identifizieren kann, die an der „Fabric“ angeschlossen sind. Dieser Mechanismus – Simple Name Service (SNS) genannt – ermittelt die Adresse, den Typ und den symboli-

schen Namen von jedem Gerät in der Switching Fabric. Für Fehlersuche und Fehlerbeseitigung definiert das „Fibre Channel“-Protokoll eine RSCN-Prozedur (Registered State Change Notification), die besonders hilfreich ist, wenn die Netzwerk-Einheiten – RAID5, JBODs, Bandlaufwerke und Host-Rechner – direkt an der Switching Fabric angeschlossen sind. Schließlich besteht die Möglichkeit, bis zu 126 Geräte über den Fibre Channel Arbitrated Loop (FC-AL) anzuschließen. Das ist eine Art „Shared Media“-Netzwerk, das entweder unmittelbar an einen „Fibre Channel Switch“ oder an einen „Hub“, also einen Netzwerk-Knoten ohne die Vermittlungsfunktion des Switches, angeschlossen werden kann.

► Effizient über Kanäle

Die Entwicklung des „Fibre Channel“ begann 1988, die Standardisierung übernahm das American National Standards Institute (ANSI, [2]), das 1994 den ersten offiziellen Standard veröffentlichte. Heute betreut das „Technical Committee“ (TC) des ANSI mit der Bezeichnung „T11“ [3] die weitere Entwicklung des „Fibre Channel“-Standards. Ein Meilenstein im Einsatz des „Fibre Channel“ der zweiten Generation war 1997 die Vorstellung des Festplatten-Arrays „StorEdge A5000“ von Sun Microsystems [4].

Die Produktwelt der Storage Area Networks lässt sich einteilen in die Speicher-Hardware, die SAN-Management-Software und die SAN-Dienstleistungen. Die Hardware wird unterschieden in die Speicher-Arrays und die Bausteine für den „Fibre Channel“. Für den Einsatz von SANs in großen und verteilten Systemen reicht das bloße „Switching“ der FC-Frames in der „Fabric“ nicht mehr aus. Hier liegt das Einsatzgebiet der „Storage Management“-Software, mit deren Hilfe sich heterogene verteilte Speichernetzwerke so steuern lassen, dass die von den bisherigen, proprietären Massenspeichern gewohnten Dienste zur Verfügung gestellt werden können.

„Fibre Channel“-Schichten

Der „Fibre Channel“ ist nach dem Schichtenmodell strukturiert, insgesamt definieren fünf Schichten – FC-0

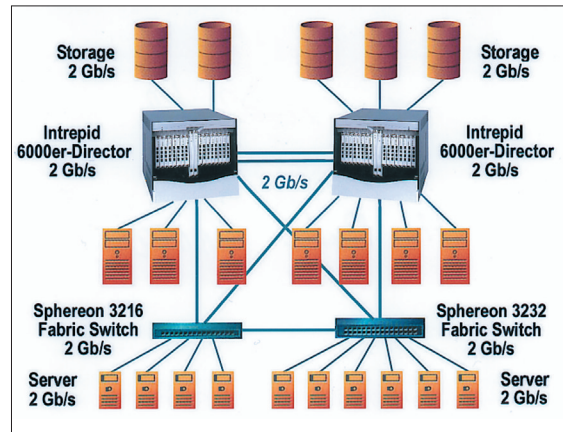


Bild 2. Der 2-Gbit/s-„Fibre Channel“ bildet nicht nur die Kommunikationsstruktur der „Fabric“ aus den „Switches“ und den „Directors“, sondern hierüber werden auch die Server und Speichereinheiten jeweils mit einer Punkt-zu-Punkt-Verbindung angeschlossen. (Quelle: McData)

bis FC-4 – die Datenübertragung von und zu den Speichereinheiten (Bild 3). In der untersten Schicht (FC-0) sind die physikalischen Verbindungen des Verfahrens definiert, die Auswahl reicht von der Verbindung über verdrehte Kupferleitungen bis zu den kürzlich definierten 2-Gbit/s- und 4-Gbit/s-Übertragungen über Lichtwellenleiter. Für die optischen Verbindungen ist zusätzlich ein Sicherheitsmechanismus implementiert, der bei einer offenen Verbindung die optische Leistung des Sendelasers wesentlich reduziert. Mit der Schicht 1 des „Fibre Channel“-Verfahrens (FC-1) sind die Codierung (8B/10B) und die Regeln für die Decodierung, die Sonderzeichen und die Fehlerbehandlung festgelegt. Das Signalisierungs-Protokoll (FC-2) definiert den Transport-Mechanismus. Dazu gehören die Struktur der „Frames“, die verschiedenen Mechanismen für die Steuerung der drei „Service Classes“ und die Mittel für die Abwicklung einer Datentransfer-Sequenz. Folgende Bausteine werden für diese Schicht ex-

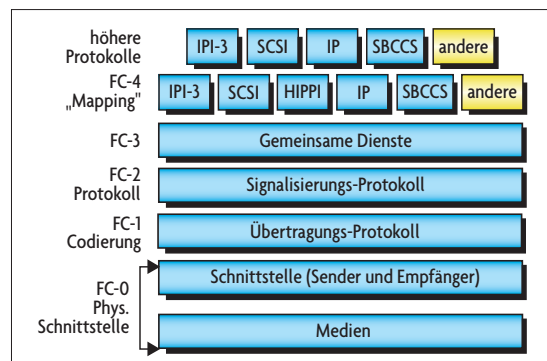


Bild 3. Der Vorteil des „Fibre Channel“ liegt in dem effizienten Transport einer Vielzahl von eingeführten Kommunikations- und Verbindungsprotokollen. Diese Flexibilität wird durch eine gesonderte „Mapping“-Schicht (FC-4) erreicht. (Quelle: ANSI)

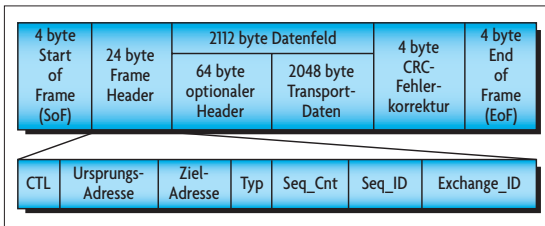


Bild 4. Die Punkt-zu-Punkt-Verbindung des „Fibre Channel“ ermöglicht eine einfache „Frame“-Struktur und damit eine effiziente Nutzung des optischen Kanals. Für die Übertragung eines Datenfeldes von 2112 byte Länge werden lediglich 36 byte für SteuerCodes und Fehlerkorrektur benötigt.

(Quelle: CERN)

plizit definiert: Ordered Set (Geordnete Menge), Frame (Rahmen), Sequenz, Exchange (Austausch) und Protokoll. Ein Ordered Set ist ein Datenwort von 4 byte Länge, das Daten oder Sonderzeichen enthält. Mit dem Ordered Set kann eine Synchronisation auf Bits oder Worte vorgenommen werden. Der Standard definiert drei Hauptgruppen:

- Die „Frame Delimiter“ (Rahmengrenzen) Start of Frame (SOF) und End of Frame (EOF). Mehrfache SOF- und EOF-Sequenzen dienen u.a. der Steuerung der „Fabric“ (Vermittlungseinheit).
- Die „Primitive Signals“ Idle (Leerlauf) und Receiver Ready (Empfänger bereit).
- Die „Primitive Sequences“ Offline (OLS), Not Operational (NOS), Link Request (LR) und Link Reset Response (LRR).

Datenübertragung im Rahmen

Der wesentliche Baustein des FC-2 ist der Frame (Rahmen), der durch die Ordered Sets SoF und EoF abgegrenzt

wird (Bild 4). Auf einen „Frame Header“ von 24 byte Länge folgen die Nutzdaten in einem Feld von maximal 2112 byte Länge sowie eine 4 byte lange Prüfsumme für den Cyclical Redundancy Check (CRC). Eine „Sequence“ wird durch eine Menge von einem oder mehreren aufeinander bezogenen Frames gebildet, die in einer Richtung von einem Port zum anderen übertragen werden. Jeder dieser „Frames“ wird im „Sequence Count“ des „Headers“ fortlaufend numeriert. Ein „Exchange“ setzt sich zusammen aus einer oder mehreren „Sequences“, die mit einem einzigen Befehl gesteuert werden. Der „Exchange“ kann auch bidirektional zwischen zwei Ports ablaufen. Auch hierfür ist im „Header“ ein Feld für die Identifizierung vorgesehen.

Im Rahmen des FC-2 sind mehrere Protokolle definiert, die den im „Fibre Channel“ implementierten Diensten entsprechen. Dazu gehören u.a. die Protokolle für die Steuerung der „Primitive Sequences“, des „Fabric Logins“ und des „Data Transfers“. Letzteres beschreibt, wie unter Benutzung des „Flow Control Managements“ die Daten aus den höheren Protokollschichten „transferiert“ werden. Für den „Flow Control“ sind die „Frames“ nach drei Service-Klassen eingeteilt: Class 1 (Endpunkt-zu-Endpunkt), Class 3 (Puffer-zu-Puffer) und Class 2 (Mischbetrieb von Class 1 und 3). Der Nutzer wählt die Übertragungsklasse nach den Anforderungen seiner Anwendung; definiert werden auch Parameter wie die Länge des Datenpaketes und die Dauer der Übertragung. Für die Steuerung der Übertragung (Flow Control) über den Kanal im Endpunkt-zu-Endpunkt-Modus quittiert der Empfänger-Port die Anzahl der richtig empfangenen Datenbytes mit „Acknowledge Frames“. Reicht die Größe des Puffers beim Empfänger nicht aus, wird ein „Busy Frame“ zum Absender-Port geschickt, wird ein fehlerbehafteter „Frame“ empfangen, sendet der Empfänger-Port einen „Reject Frame“.

In der Schicht FC-3 sind die „Common Services“ definiert; hierunter fallen zusätzliche Dienstfunktionen wie die Vervielfachung der Übertragungsbandbreite durch die Kopplung mehrerer Ports („Striping“) und die Fähigkeit zum „Multicast“, der Verteilung eines

Datenstroms von einem Sender-Port auf unterschiedliche Empfänger-Ports. In der höchsten Schicht (FC-4) schließlich sind die Anwendungsschnittstellen beschrieben; diese dienen der Abbildung der Verfahren SCSI, IPI und HIPPI sowie der Netzwerk-Protokolle Ethernet, IP und ATM auf das „Fibre Channel“-Protokoll.

■ Bausteine eines Fibre Channel“-Netzwerks

Zu den Grundbausteinen eines „Fibre Channel“-Netzwerks gehören die „Host Bus Adapter“ (HBA), die „Fibre Channel Fabric“, der „Director“ oder „Director Switch“ sowie das Speichersystem; im SAN-Bereich sind hier RAID's üblich, aber auch JBOD's können zum Einsatz kommen. Für die Datensicherung (Backup) werden Kassetten-Speicher-Systeme verwendet.

Host Bus Adapter

Ein typischer Host Bus Adapter (HBA) nach dem 2-Gbit/s-„Fibre Channel“ wie der A7298A von Hewlett-Packard ist als PCI-X-Steckkarte ausgeführt und bietet den Anschluss an eine HP-SAN-Fabric unter dem Betriebssystem Windows Advanced Server Limited Edition v1.2 bzw. Linux Red Hat Advanced Server 7.3. Der Anbieter hat dabei seine eigenen, mit dem Itanium-2-Prozessor ausgerüsteten Server rx2600 bzw. rx5670 im Blickfeld, die sich auf diese Weise an Speicher-Arrays anknüpfen lassen, die über „StorageWorks“ gesteuert werden. Der „Fibre Channel“-Anschluss ist dabei abwärtskompatibel mit bestehenden 1-Gbit/s-„Fibre Channel“-Adaptoren. Der A7298A bietet zwei Vollduplex-„Fibre Channels“ mit je 2 Gbit/s; er erreicht also einen Durchsatz von 400 Mbyte/s.

Die „Fabric“ als zentrales Element

Die zentrale Einrichtung des Storage Area Networks ist die so genannte „Fabric“, über die sämtliche Verbindungen von den einzelnen Servern der Serverfarm zu den Speicher-Subsystemen laufen. Ein weiteres Merkmal ist, dass die Kommunikation zur „Fabric“ stets als Punkt-zu-Punkt-Verbindung geschaltet wird und daher der Aufwand für die Realisierung des „Geräte-Ports“ gering gehalten werden kann.

■ High Speed Fibre Channel

Zu der durch die Firma QLogic [9] ins Leben gerufenen Initiative zur Entwicklung eines „Fibre Channel“-Protokolls für Datenübertragungsraten von 4 Gbit/s und 10 Gbit/s haben sich mittlerweile die Unternehmen Agilent [10], Falcon Star Software [11], Fujitsu [12], JNI [13] und Seagate [14] hinzugesellt. Einer Anregung der FCIA (Fibre Channel Industry Association, [6]) folgend, sollen auch die „Fibre Channel“-Switches intern die höheren Datenübertragungsraten verarbeiten können. PMC-Sierra [7] bietet mit dem PM8377 und dem PM8396 bereits zwei „intelligente Bypass Controller“ und mit dem PM8386 einen vierkanaligen Transceiver für die 4-Gbit/s-„Fibre Channel“-Variante an.

Director Switches

Ein typischer „Director Switch“ ist z.B. der „MDS 9506 Multilayer Director“ von Cisco [5], der sich zunächst dadurch auszeichnet, dass er eine Reihe von Speichernetzwerk-Standards unterstützt; hierzu zählen „Fibre Channel“, iSCSI und FCIP (Fibre Channel over IP). Es lassen sich darüber hinaus so genannte Virtual SANs (VSANs) aufbauen, und der „Director“ bietet integrierte Diagnose-Routinen und zusätzliche Sicherheitsmechanismen. Der Durchsatz des Switches beträgt 1,44 Terabit/s, es können bis zu 128 Ports betrieben werden. Die zugehörigen Module enthalten 16 oder 32 Ports für den 1- oder 2-Gbit/s-„Fibre Channel“, sie sind mit anderen FC-Einheiten des Herstellers austauschbar.

Zu den integrierten Management-Funktionen gehören ein „Embedded Fabric Manager“, ein „HP OpenView Storage Area Manager“ und die „Resource Manager Essentials“ (RME) von CiscoWorks. Der „Director“ unterstützt auch die Einrichtung eines „Virtual Storage Area Networks“ (VSAN). Dabei können mehrere SANs eine physikalisch nur einmal vorhandene „Fabric“ nutzen. Weiterhin werden verschiedene Sicherheitsstandards unterstützt, hierzu gehören die Authentifizierung über einen RADIUS-Server (Remote Authentication Dial-In User Service) und die Implementierung des Simple Network Management Protocol in der Version 3. Ebenfalls implementiert ist eine rollenbasierte Zugangskontrolle, also eine Zuweisung der Benutzerrechte nach dem Prinzip des „Least Privilege“, weiterhin stehen das „Secure Shell Protocol“ (SSH) und das „Secure File Transfer Protocol“ (SFTP) zur Verfügung, darüber hinaus ist das „Fibre Channel Security Protocol“ (FC-SP) implementiert, und die Hardware unterstützt ein so genanntes „Zoning“.

Innerhalb des SAN-Kontextes sind in einer „Zone“ mehrere „Fibre Channel“-Ports als Mitglieder definiert, diese dürfen über die „Fabric“ miteinander kommunizieren. Ein Port, der nicht Mitglied einer „Zone“ ist, darf über die „Fabric“ nicht kommunizieren. „Zoning“ bedeutet, dass ein Storage Area Network in verschiedene Zonen aufgeteilt wird; außerhalb einer Zone liegende

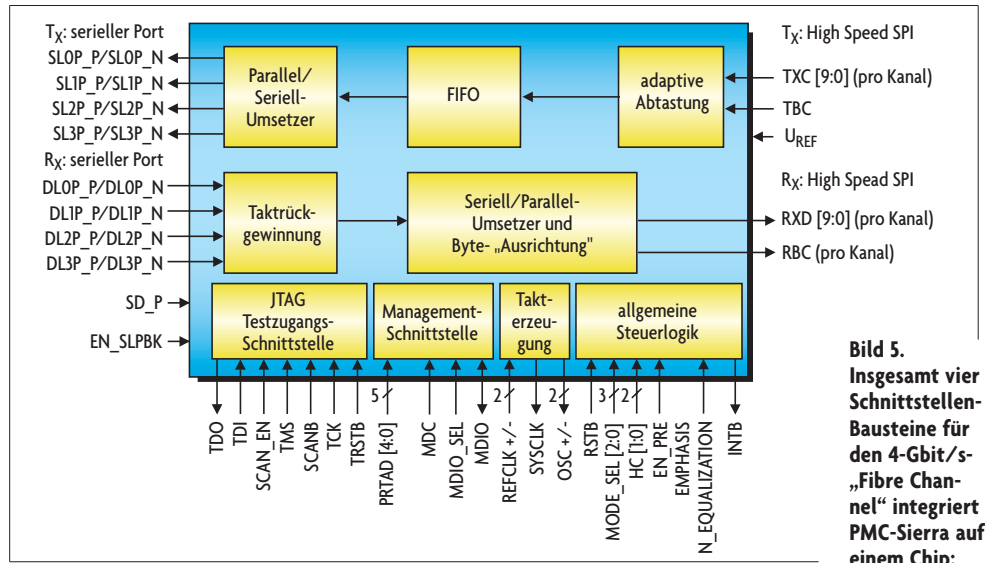


Bild 5. Insgesamt vier Schnittstellen-Bausteine für den 4-Gbit/s-„Fibre Channel“ integriert PMC-Sierra auf einem Chip; die Daten von den vorgeschalteten optischen Transceivern werden auf die „High Speed SPI“-Schnittstelle umgesetzt. Die Empfängerschaltung schließt eine Taktrückgewinnung mit ein. (Quelle: PMC-Sierra)

SAN-Knoten sind dann für die Netzwerk-Knoten innerhalb der Zone nicht sichtbar. Weiterhin kann der Zugriff über eine „Access Control List“ (ACL) gesteuert werden. Bei der ACL handelt es sich um eine feste Liste, in der die Rechte der Nutzer für den Zugriff auf Ressourcen des Speichersystems festgeschrieben sind.

► **Ein „Fibre Channel“-Transceiver für 4 Gbit/s**

Beim Sprung auf die 4-Gbit/s-Übertragungsklasse beim „Fibre Channel“ wollten die Hersteller die Lücke zwischen den 2 Gbit/s des FC-2-Standards und einer künftigen 10-Gbit/s-Übertragung nicht zu groß werden lassen. Die FCIA [6] gab im Sommer 2003 grünes Licht für diese Entwicklung. PMC-Sierra [7] zeigte auf der ECOC (European Conference on Optical Communications) zwei „Fibre Channel“-ICs (Bild 5), Infineon [8] kündigte die Auslieferung eines optischen Transceivers an. Der 4-Gbit/s-Standard ist noch rückwärtskompatibel zu den 1-Gbit/s- und 2-Gbit/s-Varianten; beim künftigen 10-Gbit/s-Standard wird das nicht mehr der Fall sein.

Der optische „Fibre Channel Transceiver“ der 4-Gbit/s-Übertragungsklasse von Infineon kann mit einer 850-nm- oder einer 1310-nm-Laserdiode ausgestattet werden; beide Laserdioden sind vom VCSEL-Typ (Vertical Cavity Surface Emitting Laser). Beide Module sind „multirate“-fähig, d.h., sie bieten eine automatische Anpassung an

die FC-Übertragungsklasse der Gegenstelle. Die Module sind mit einer digitalen „Monitoring“-Schnittstelle ausgestattet, die eine Weiterentwicklung der SFF-8472-Spezifikation (Small Form Factor) darstellt. Darüber kann auf Parameter wie den Bias-Strom des Lasers, die übertragene und empfangene optische Leistung, die Temperatur und die Höhe der Versorgungsspannung in Echtzeit zugegriffen werden. jw

Literatur

- [1] 2003 European Disk Storage Forecast and Analysis, 1999 – 2007. IDC (www.idc.com).
- [2] ANSI – American National Standards Institute (www.ansi.org).
- [3] ANSI Technical Committee T11 (www.t11.org).
- [4] Sun Microsystems (www.sun.com).
- [5] Cisco Systems (www.cisco.com).
- [6] FCIA – Fibre Channel Industry Association (www.fcia.org).
- [7] PMC-Sierra (www.pmc-sierra.com).
- [8] Infineon Technologies AG (www.infineon.com).
- [9] QLogic Corporation (www.qlogic.com).
- [10] Agilent Technologies (www.agilent.com).
- [11] FalconStor Software (www.falconstor.com).
- [12] Fujitsu (www.fujitsu.com).
- [13] JMI Corporation (www.jmi.com).
- [14] Seagate Technology (www.seagate.com).

Dr. Jens Würtenberg
 ist verantwortlicher Redakteur der **Elektronik** für die Bereiche **Kommunikation und Datenetze, Automatisieren sowie Multimedia.**
 ► E-Mail: jwuertenberg@elektronik.de