

# 40 GBASE-T

von Dr. Franz-Joachim Kauffels



Dr. Franz-Joachim Kauffels ist einer der erfahrensten und bekanntesten Referenten der gesamten Netzwerkszene (über 20 Fachbücher und unzählige Artikel) und bekannt für lebendige und mitreißende Seminare.

**Die Erfahrung lehrt, dass eine neue Geschwindigkeitsstufe vom Markt erst dann in breiterem Maße akzeptiert wird, wenn es auch eine Variante für Twisted Pair gibt. Bis vor Kurzem konnte niemand sagen, ob eine 40 Gigabit-Ethernet Variante auch auf Twisted Pair möglich ist. Das hat sich mittlerweile geändert, es wird definitiv 40 GBASE-T geben. Auch wenn ein entsprechender Standard noch ein paar Jahre dauert, können wir heute schon sagen, welche Art der Verkabelung für diesen Zweck mit Sicherheit geeignet ist. Das ist ein sehr wichtiges Ergebnis vor dem Hintergrund der Lebensdauer von Verkabelungssystemen. Natürlich blicken wir in diesem Artikel auch auf die Möglichkeiten für die Transceivertechnik.**

Die Standards für 10 GbE über Glasfaser gibt es schon seit 2003. Zunächst haben sich aber nur wenige Anwender dafür interessiert. Das änderte sich erst mit der Verfügbarkeit einer Version über Twisted Pair, eben 10 GBASE-T. Auch wenn viele Betreiber bei der Einführung von 10 GbE schließlich doch zur Faser neigen, scheint alleine die Existenz einer Twisted Pair Version eine erhebliche Beruhigung zu sein. Die CX-Varianten über Twinax-Kabel sind zwar technisch hervorragend und werden häufig verbaut, alleine weil Hersteller wie HP sie in den Switch Blades der Blade-Server einbauen, haben aber längst nicht die psychologische Wirkung.

Die brennende Frage ist jetzt natürlich, ob es auch 40 GBASE-T geben wird. Bis zum Spätherbst 2008 konnte niemand diese Frage beantworten. Dann gelang Wissenschaftlern der Penn State University jedoch der Durchbruch:

50 Gigabit pro Sekunde über 100m Twisted Pair Kabel der Kategorie 7A!!!

Damit wurden schon zwei für die Planung enorm wichtige Dinge erarbeitet:

- es gibt ein Twisted Pair Kabel, welches für 40 GBASE-T geeignet ist
- es gibt einen geeigneten Stecker

Dieses Ergebnis hat eine herausragende Rolle bei der Planung. Selbst wenn es momentan noch keinen Standard für 40 GBASE-T gibt und selbst wenn man in absehbarer Zeit noch kein 40 GbE einsetzen wird, kann man die Verkabelung bereits zukunftsfest planen. Das ist enorm wichtig vor dem Hintergrund der langen Lebensdauer von Verkabelungssystemen.

Aber auch für die Standardisierung ist dieses Ergebnis besonders wichtig. Beim Entwurf des Standards für die Transceiver und deren Eigenschaften kann man nämlich auf die bereits festliegenden Charakteristika des Kabels oder des durch das Kabel gebildeten physikalischen Übertragungskanals zurückgreifen. Die Standardisierung von 10 GBASE-T war deshalb so langwierig, weil es zunächst einen derartigen Zusammenhang nicht gegeben hat. So gab es innerhalb des Standardisierungsprozesses eine Vielzahl von Alternativen für unterschiedliche reale und gedachte Kabelspezifikationen. Das hat ja in der Folge dazu geführt, dass zunächst der Standard für 10 GBASE-T festgeschrieben wurde und erst anschließend der Standard für das dazu passende Kat. 6A-Kabel.

Es sei allerdings hier direkt angemerkt, dass es einen erheblichen Unterschied zwischen der Standardisierung von 10 GBASE-T und 40 GBASE-T gibt. Im Bereich 10 GbE hat man viel Zeit damit verloren, einen Standard für ungeschirmte UTP-Kabel (Kat 5) zu entwickeln. Bei 40 GbE ist von Anfang an klar, dass es eine Lösung nur für geschirmte STP-Kabel geben kann.

Auch das Kabel der Kat. 7A befindet sich z. Zt. in der Normung. Allerdings gibt es schon einige Hersteller, die ein solches Kabel anbieten. Wir beziehen uns im Fol-

genden auf das Produkt LANmark 7A von Nexans.

Das 7A-Kabel ist in seinen Eigenschaften bis 1000 bzw. 1200 MHz definiert, geht also weit über den bisher definierten Bereich hinaus. Das 6A-Kabel ist in der Norm nur bis 250 MHz definiert, normtreue Produkte sind bis zu 500 MHz spezifiziert.

Die Eckdaten des 7A-Kabels sind:

- NEXT (Nahnebensprehdämpfung): 60 dB bei 1000 MHz
- FEXT (Fernnebensprehdämpfung): 50 dB bei 1000 MHz
- RL (Return Loss): 8 dB bei 1000 MHz
- ANEXT (Fremdnebensprehdämpfung): 0 dB bei 1000 MHz (!!!)

ANEXT wird auch häufig als „Alien Crosstalk“ bezeichnet, das kommt von den „Alien“-Filmen und bezeichnet die Angst vor diesem Effekt. Das LANmark7A-Kabel ist völlig abgeschirmt (natürlich nur bei richtiger Installation), so dass die „Aliens“ hier keinen weiteren Schaden anrichten können.

Das sind Werte, die die von bisher bekannten Kabeln erheblich in den Schatten stellen. Zum Vergleich siehe Abbildung 1.

Der ANEXT-Wert ist sensationell. Eine Schwierigkeit bei 10 GBASE-T war es, das für ein Kabel relativ empfindliche Signal vor den von außen kommenden Störeinflüssen zu retten. In anfänglichen Versionen konnte das Signal auch schon mal völlig untergehen. Erreicht wird diese Qualität durch eine S/FTP-Konstruktion mit vier geschirmten Paaren und einem Gesamtschirm.

Nun brauchen wir noch den passenden Stecker. Da bietet sich der GG45-Stecker an. Der GG45-Stecker hat 12 Kontakte. Der „2in1“ Connector kombiniert RJ45 und GG 45. Dadurch entstehen zwei Modi:

- RJ45 Modus bis 500 MHz für 1 und 10 GBASE-T
- GG45-Modus bis 1000 MHz für 40 GBASE-T

Der GG45-Stecker passt zu Cat 7A-Kabeln. Er ist bereits jetzt völlig standardisiert ISO/IEC 60603-7-7. Der RJ45-Modus ist zwingend nach ISO 11801 für die Gewährung von Rückwärtskompatibilität. (siehe Abbildung 3)

Ein alternativer Stecker wäre der IEC 61076-3-104-Stecker, der von Siemon

→ Cat. 6A für 10 GBASE-T spezifiziert		
→ Cat. 7A in der Diskussion, aber es gibt schon Punkte, Beispiel Nexans LANmark-7A		
	<b>LANmark-7A</b>	<b>Category 6A</b>
• NEXT	60dB at 1000MHz	30dB at 500MHz
• FEXT	50dB at 1000MHz	25dB at 500MHz
• RL	8dB at 1000MHz	8dB at 500MHz
→ NEXT: Nahnebensprehdämpfung		
→ FEXT: Fernnebensprehdämpfung		
→ RL: Return Loss		

Abbildung 1: Cat. 6A und Cat. 7A

entwickelt wurde. Er hat ein neues Steckergesicht und ist deshalb nicht rückwärtskompatibel. Außerdem wurde das eingangs genannte Ergebnis mit einer Kombination des LANmark 7A-Kabels und GG45-Steckern erzielt. Wir beziehen und im Folgenden also ausschließlich darauf.

### Anwendungen für 40 GBASE-T

Was sind mögliche Anwendungen für 40 GBASE-T? Zunächst geht es um eine Marktverbreiterung für 40 Gigabit Ethernet schlechthin. Auch bei Gigabit Ethernet und 10 GbE war es ja schließlich so, dass der Markt erst dann richtig zugegriffen hat, als die Kupferversionen verfügbar waren. Komischerweise wurden dann auch massenhaft Glasfaserschnittstellen gekauft. Der Markt ist nicht wirklich logisch, aber hinsichtlich seiner grundsätzlichen Mechanismen ganz gut durchschaubar. Über die Anwendungsmöglichkeiten von 40 Gigabit Ethernet habe ich schon vielfach berichtet, aber natürlich gibt es hier im Standard trotz der vielen PHY-Varianten eine schmerzliche Lücke. Wenn man einmal genau hinsieht, gibt es zwar Schnittstellen für die Überwindung hunderter Kilometer, aber nur vergleichsweise wenig, was man im Datacenter wirklich brauchen kann. Und wenn wir über 40 Gigabit Ethernet sprechen, sprechen wir auch über 40 Gigabit Fiber Channel, weil dieser Standard zwar ein anderes Paketformat benutzt, sich ansonsten heute aber bei den physikalischen Schnittstellen an den 10 GbE-Definitionen orientiert, wenn auch teilweise mit kleinem Formfaktor. Es gibt keinen Grund, warum die FC-Arbeitsgruppen von dieser bislang sehr erfolgreichen Strategie abweichen sollten. Schließlich diskutieren wir ja auch noch über FCoE, dann ist es von der Technik her ohnehin identisch.

Wo ist denn nun im 40/100 Gigabit-Standard die Lösung, mit der man wirklich preiswert unter Nutzung bestehender Verkabelung Server untereinander zusammenschalten kann oder Server mit Speichern verbindet? Die vierkanalige Variante 40 GBASE-LX-4 für die Nutzung von 10 km Singlemodefaser ist für das RZ nicht wirklich befriedigend und die eigentlich immer „vergessene“ vierkanalige Twinaxversion 40 GBASE-CX-4 mit ihren 10 Metern Reichweite erst recht nicht. Die Multimodevariante 40 GBASE-SR hat nach Standard noch keine elektronische Dispersionskompensation. Hersteller wie AMCC können das aber schon heute realisieren. Also wird es früher oder später noch eine Variante 40 GBASE-LRM geben, in Analogie zu 10 GBASE-LRM. Das wäre die einzig geeignete RZ-Variante. Wenn man eine millionenschwere SAN-Investition tätigt, macht die Anschaffung einiger Meter neuer Glasfasern auch schon nichts mehr. Aber was ist mit den vielen ande-



Abbildung 2: Cat. 7A-Kabel

ren Fällen, wo man z. B. einen einzelnen File-Server, der 85 m weg steht, ordentlich einbinden möchte? Wo man SAP-Applikationsserver miteinander verbinden möchte? Wo man eines dieser wunderschönen neuen Tapedecks einbinden möchte? Was passiert, wenn man plötzlich merkt, dass die Virtualisierung dazu führt, dass die 10 GbE-Lösung nicht mehr ausreicht? Es ist ja nett von den Komponentenherstellern, schon jetzt preiswerte Transceiver und Serverboards in Aussicht zu stellen, wirklich hilfreich ist es aber nur für den Besitzer einer strukturierten Glasfaserverkabelung mit den „richtigen“ Fasern. Also, Anwendungsbereiche hin und her, ohne sinnfällige Kupfervariante ist der Standard für 40 Gigabit Ethernet ziemlich unvollständig und nützt z. T. hauptsächlich Metronetz-Providern. Weil ich ja immer etwas böse bin, möchte ich sogar hinzufügen, dass der Standard in seiner jetzigen Form der Schaffung einer glatten, hochperformanten Netzwerk-Infrastruktur eher schadet als nützt, weil wegen des Fehlens

einer brauchbaren Kupferversion (und diese ist auch durch eine Low Cost Fiberversion nicht zu ersetzen) im Markt momentan noch eine Zurückhaltung zu verspüren ist, die in letzter Konsequenz zu recht ungesundem und teuren Fummeln mit anderen Lösungen führt.

Blickt man etwas nach vorne, wird wie bei 10 Gigabit Ethernet auch, die überwiegende Mehrheit der installierten Basis von 40 Gigabit Ethernet in den Datacentern zu finden sein. Hier möchte man die installierte Basis an Rechnern einfach unter Nutzung der installierten Basis an strukturierter Verkabelung besser und performanter unterstützen. Dies umfasst nicht nur die Server-zu-Server oder Server-zu-Speicherkopplung, sondern auch den Übergang zu Switches und DWDM-Systemen für die Realisierung von Fernverbindungen. Seit mindestens zwei Jahren sprechen wir vom Wachstum der 10 Gigabit-Schnittstellen für Server. Hier ist es einfach die normative Kraft des Faktischen, die zu einer

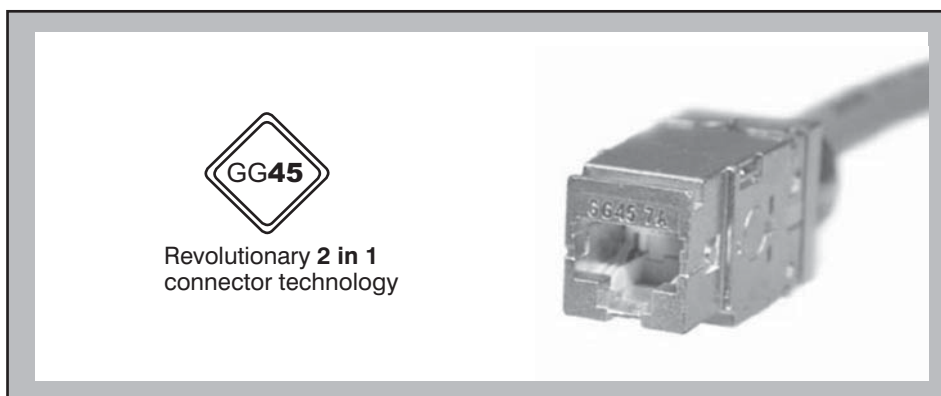


Abbildung 3: GG45-Stecker

Foto: GG45-Alliance

autosensenden 1000/10000 Chipsatz-Generation führt und alleine aus Erwägungen der Stückzahl werden sich die Chiphersteller darauf kaprizieren, unabhängig davon, ob ein Anwender diese Datenrate wirklich benötigt. Es geht einfach nur um den Preis und die Stückzahl. Angesichts dieser Entwicklung bleibt momentan nur übrig, im Etagen- und Steigbereich mit allerbrutalstem Oversubscribing zu arbeiten. Wie bei Shared Medium System selig hofft man inständig, dass alle Benutzer schlafen mögen und ja nicht auf die Idee kommen, die mögliche Leistung zum Endgerät zu nutzen. Widersinnigerweise verlegt man zwar Kat. 7 Kabel, damit das Gigabit auch ja heil bis zum nächsten Verteiler kommt, verbindet die Etagen untereinander aber auch nur mit einem Gigabit, weil es nichts anderes gibt, was man bezahlen könnte.

Ein weiterer Standard, der allen Unkenrufen zum Trotz dabei ist, sich langsam aber sicher immer weiter zu verbreiten, ist iSCSI, die Abbildung von Speicherblocktransfers auf IP-Päckchen und - Netze. Sieht man sich die Leistungsgrenzen heutiger Geräte an und entwickelt sie, wie das so üblich ist, gemäß Moore's Law weiter, werden wir binnen 4 - 5 Jahren eine Leistungsverzehnfachung haben. Plötzlich packen wir etwas aufs Netz, was dort vorher nicht war: den Fileserver-zu-Fileserver, Fileserver-zu-Application Server und Fileserver-zu- Backupmedium-Verkehr. Da gehen schon einmal einige Gigabit durch den Schornstein. Dann packen wir noch ein paar Wireless-VLANs drauf, hier darf man pro Zelle, also pro 11n-Access Point, demnächst auch mit 500 Mbit/s. rechnen und bei hochperformanten Zellen dürfen diese nicht zu groß werden, also ergeben sich summa summarum hunderte Zellen mit je ca. 4 - 8 Benutzern, und schon wieder haben wir eine Backboneleistung von 10 Gigabit verwurschtelt. Verzeihen Sie mir die flapsige Ausdrucksweise, aber vom vornehmen Ausdruck wird es auch nicht weniger.

Das sind die Dinge, die Sie kennen. Aber das ist noch nicht alles. Ich rechne in absehbarer Zeit vor allem im Zuge der Virtualisierung noch mit folgenden Tendenzen: Hardware-unterstütztes CPU Load Balancing wird sich nicht mehr auf Prozessoren beschränken, die zufällig in einem Gehäuse wohnen, sondern auch via Highspeednetz zumindest in benachbarte Rechner übergreifen. Hier benötigen wir Reaktionszeiten im Submikrosekundenbereich und jede Menge rohe Performance. Es wird so genannte TCP/IP Offloader geben, die nichts weiter tun, als alle Aufgaben, die im TCP/IP-Umfeld anfallen, zu übernehmen. Da wir alles mit TCP/IP machen, wird das viel Arbeit. Die Netzprozessoren können komplett TCP/IP auf einem Chip abarbeiten und damit ist es nicht mehr hinzunehmen, wenn z. B. ein Server allzulange über TCP/IP-Fragen überlegt. Wir bekommen einen Vorgeschmack darauf bei den iSCSI-Hardwarebeschleunigern. Insgesamt wird sich die Verarbeitungsgeschwindigkeit für Protokolle durch die Hardwareprozessoren und die Offloader dramatisch erhöhen, so dass sich ein Netz nicht mehr darauf verlassen kann, dass die kommunizierenden Rechner schon so langweilig an den Protokollen herumrechnen, dass sie nur relativ langsam und mit langen Pausen Daten ausspucken können. Schließlich gibt es noch so nette Neuigkeiten wie RDMA, das Remote Direct Memory Access Protokoll, was, wie der Name schon sagt, DMA auf einem fremden Rechner unterstützt.

Ziele für eine Standardisierung von 40 GBASE-T werden sein:

- Überwindung von 100 m Distanz auf Cat 7/7A oder besseren Twisted Pairs
- Bewahrung existierender Investitionen in Verkabelung in Datacentern und strukturierten Verkabelungsbereichen
- Unterstützung von 10 GBASE-T und 40 GBASE-T mit einer einzigen PHY mit Autonegotiation im Rahmen des so genannten „skalierbaren Ethernet“

- Unterstützung der 40 Gigabit XLAUI-Schnittstelle
- Multiple PHYs für höhere Geschwindigkeiten mit Trunking

Dazu gesellen sich die üblichen Ziele einer Ethernet-Standardisierung, wie

- Erhaltung des 802.3/Ethernet Frame Formats an der MAC-Schnittstelle
- Erhaltung der funktionalen Anforderungen von 802 mit Ausnahme der Hamming Distanz
- Erhaltung der minimalen und maximalen Frame Größen
- Alleinige Unterstützung des Vollduplex-Betriebes
- Unterstützung der sternförmigen Netzwerktopologie mit Punkt-zu-Punkt Verbindungen im Rahmen der strukturierten Verkabelung
- Spezifikation eines optionalen Media Independent Interfaces MII
- Unterstützung der P802.3ad Link Aggregation
- 40.000 Mbps an der MAC/PLS Dienst-schnittstelle

#### 40 Gigabit auf Twisted Pair und die Gesetze von Shannon

In Abbildung 4 sehen wir die angestrebte Konfiguration: von 40 Gigabit zu 40 Gigabit Transceiver über  $90 + 5 + 5 = 100$  m STP-Kabel, acht Adern in vier Paaren wie bei 10 GBASE-T, eigentlich „nur“ ein Upgrade von letzterem.

Um dies zu erreichen, muss man ein wenig nachdenken. Grundsätzlich gelten die Gesetze von Shannon, nach denen man höchstens zwei Informationsschritte pro Sekunde in ein Hertz zur Verfügung stehender Bandbreite packen kann. Kam

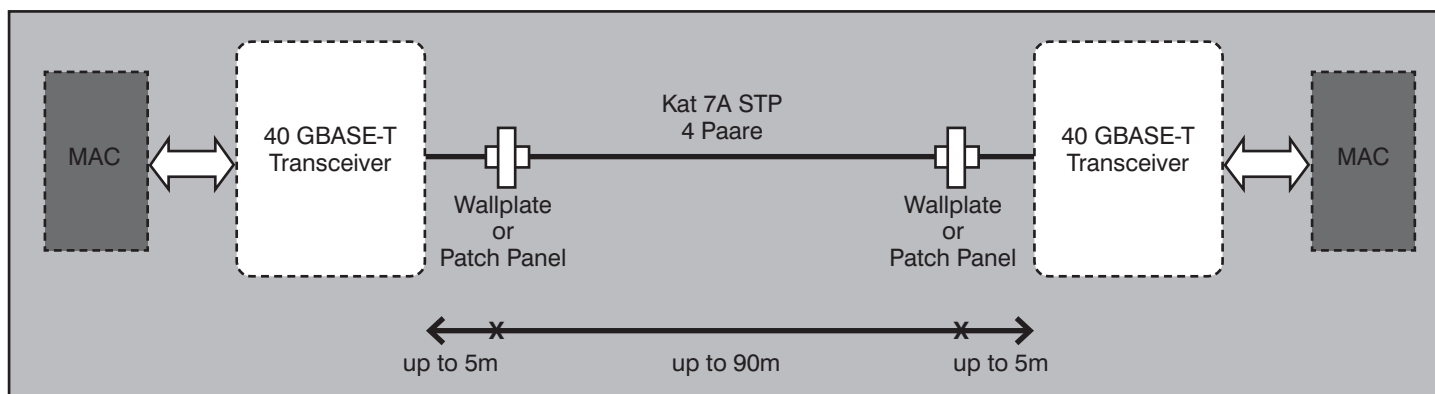


Abbildung 4: Konfiguration

man bei 10 Megabit Ethernet noch locker aus, hat man sich schon bei 100 Megabit Gedanken darüber gemacht und eine dreiwertige Codierung verwendet, die auf einem Kabel zu einer benötigten Bandbreite von 33 MHz geführt hat. Bei Gigabit Ethernet über Twisted Pair verwendet man eine fünfwertige Codierung, bei der mittels der Trellis Codierung acht Informationsbits plus ein Kontrollbit in vier fünfwertige Signale konvertiert werden. Bei linearer binärer Leitungscodierung würde man schon für Gigabit Ethernet 500 MHz Bandbreite benötigen, verteilt dies aber zunächst auf vier nachrichtentechnisch unabhängige Kanäle, so dass man auf jedem dieser Kanäle nur noch eine Bandbreite von 125 MHz und durch die mehrwertige Übertragung schließlich nur noch 67,5 MHz pro Richtung benötigt. Durch den Vollduplexbetrieb werden daraus am Ende wieder 125 MHz pro Drähtchenpaar. Dieses Konzept hat allerdings auch seine Grenzen. Wollten wir die gleiche Vorgehensweise wie bei Gigabit Ethernet vollziehen, kämen eben 320 Bits statt 8 in den Codierer. Vier Gruppen à 80 Bits bringen es auf ca. 4 Millionen unterschiedlicher Zustände pro Gruppe. Eine wesentlich höherwertige Logik hilft uns da auch nicht mehr weiter.

Die Limits von Shannon sind keineswegs von der Modulationstechnik abhängig. Es ist umgekehrt so, dass sie ein Maß für die Güte einer Modulationstechnik darstellen, weil eine Technik umso besser ist, desto näher sie dem theoretisch überhaupt möglichen Limit kommt.

Sehen wir uns 1000 BASE-T aber einmal genauer an, stellen wir fest, dass es eine Reihe von Annahmen gibt, die damals bei der Definition gemacht worden sind und die bis zum heutigen Tage völlig unwidersprochen im Raum stehen. Da geht es z.B. um die Dämpfung. Man nimmt an, welche Bandbreite für die Übertragung zur Verfügung steht. Und diese Annahme wird z.B. in einem Verkabelungsstandard festgelegt. Viele Token Ring Besitzer haben damals auch nur angenommen, dass das Kabel lediglich 16 Mbit/s. schafft, bis sie eines Besseren belehrt wurden. Weiterhin nimmt man an, dass es irreduzible Rauschquellen gibt, wie z.B. das Hintergrundrauschen, das Nebensprechen aus den anderen Kabelpaaren, fremdes Nebensprechen („Alien Noise“) und Rauschen vom Transceiver. Alle diese Annahmen sind ja nett und gut, aber im Grunde genommen beruhen sie auf Phantasie mit Schneegestöber. Damit kommt man meistens unbeobachtet „durch“, weil sich die Meisten gar nicht dafür interessieren, wie es wirklich ist, sondern vielmehr lediglich an einer Anweisung interessiert sind, wieweit sie das Kabel abrollen dürfen, damit es noch funktioniert. Diese Situation ist

nicht neu und existiert auch bei Funksystemen und Optischen Netzen. Der Markt schreit geradezu nach einem Kästchensystem, nicht mitdenken, sondern abhaken heißt die Devise.

Und wenn man 40 Gigabit/s. auf acht Drähtchen Twisted Pair übertragen möchte, muss man im Wesentlichen zunächst umdenken und die Fakten prüfen.

Abbildung 5 fasst die Störeinflüsse noch einmal zusammen: Nahnebensprechen NEXT von den benachbarten Kabelpaaren, Fernnebensprechen FEXT vom Transceiver und den benachbarten Kabelpaaren, allgemeine Dämpfung und „Alien Crosstalk“, also elektromagnetische Interferenz.

Ein kategorisiertes Kabel muss von hoher Qualität mit geringen durch das Material bedingten Abweichungen sein, um die Anforderungen nach TIA-568 zu erfüllen. Der Standard gibt Bandbreiten vor, in denen

bestimmte Eigenschaften erfüllt sein müssen. Dies ist aber nur eine Anforderung auf dem Papier, denn die modernen Kabel erreichen durchaus die gleichen Leistungen bei höheren Bandbreiten. Das hängt hauptsächlich von der Übertragungsgeometrie und den Materialeigenschaften ab. Geringfügige strukturelle Abweichungen und Unregelmäßigkeiten in den Steckern können diese Werte zwar verschlechtern, aber bei modernen Systemen nicht wirklich wesentlich. Wenn ein Anbieter Ihnen heute den sicheren Betrieb des Kabels bis sagen wir z.B. 600 MHz garantiert, ist das ein Wert, der unter den ungünstigsten Voraussetzungen erzielt wird. Damit das klappt, müssen alle Komponenten viel viel besser sein und erreichen unter normalen Bedingungen sicher 1,5 ... 2 GHz Bandbreite.

Das ist der Grund dafür, warum wir manchmal so schwimmende Grenzen bekommen, bei denen eigentlich laut Standard eine Verbindung nicht mehr funkti-

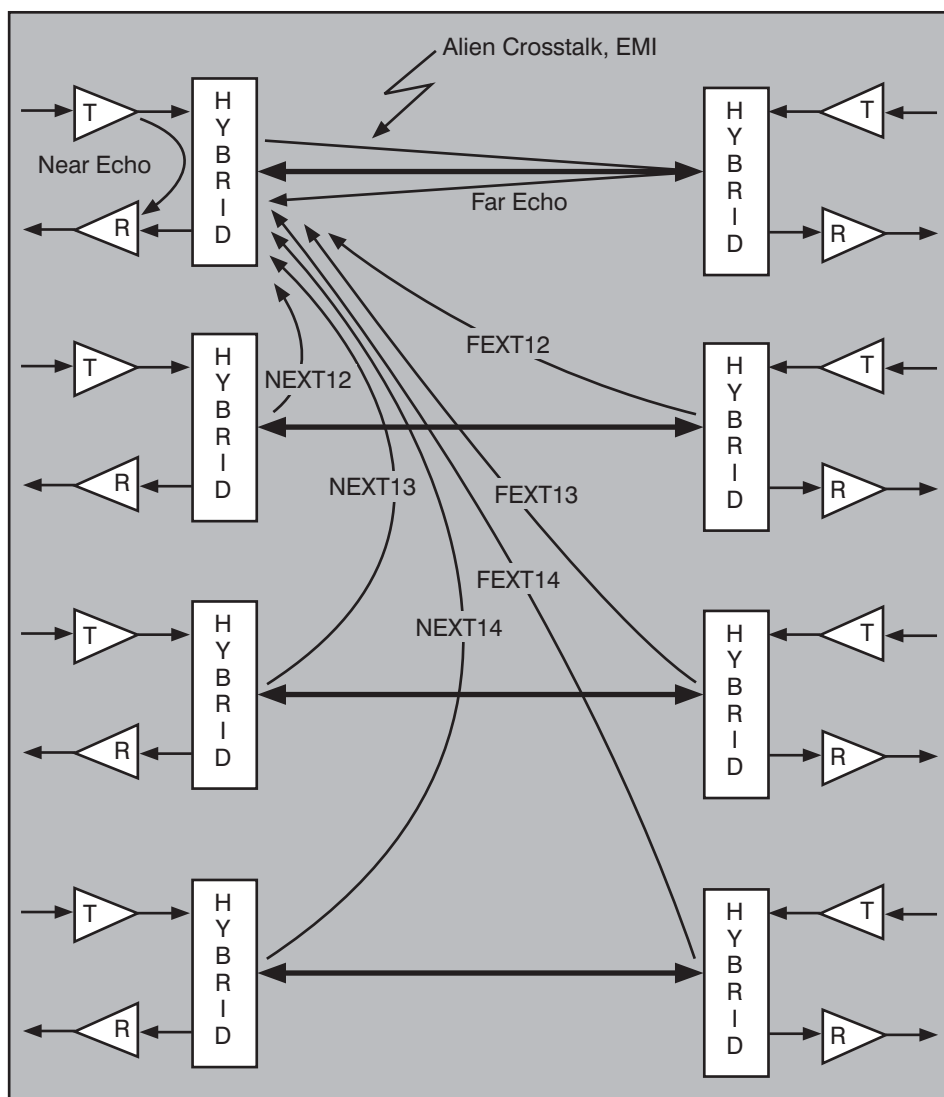


Abbildung 5: Störeinflüsse, gesamt

onieren kann, es in der Praxis mit einem System eines Herstellers aber doch tut.

So kann man z.B. ausrechnen, dass die Kat 7 nach ISO für den Betrieb von 40 GbE grade nicht mehr ausreicht. Es gibt aber durchaus Kat 7-Systeme von Herstellern, die die Übertragungsrate dennoch realisieren könnten. Wir zeigen in der nächsten Abbildung einmal eine solche Darstellung, wieder bezogen auf den Hersteller Nexans. (siehe Abbildung 6)

Die Entwicklung von 40 GBASE-T kann natürlich von den Ergebnissen der 10 GBASE-T-Standardisierung, die teilweise unter großer Mühe zustande kamen, massiv profitieren. Man weiß z.B., dass die Nahnebensprechdämpfung jenseits der 200 MHz schlimmstenfalls um ca. 8 dB wächst und nicht irgendwie ins Unermessliche steigt. Das wäre auch nicht anders zu erwarten gewesen, denn die Nahnebensprechung entsteht durch einen induktiven Effekt, der auf dem betroffenen Aderpaar durch Einstreuung eines elektromagnetischen Feldes, welches von einem anderen Aderpaar erzeugt wird, entsteht. Die Leistung des elektromagnetischen Feldes nimmt aber mit der Frequenz bei gleichbleibender Distanz ab. Das kompensiert die an und für sich mit höheren Frequenzen wachsende „Empfindlichkeit“ des anderen Aderpaars für diese Art von Störung deutlich. Diese vergleichsweise lächerlichen 8 dB ließen sich übrigens vollständig wegkompensieren, wenn man die Eingangsleistung, die man an das „störende“ Kabel gibt, um etwa 1-2 dB herabsetzt.

Die Fernnebensprechdämpfung ist nämlich z.B. bei 1000 MHz wesentlich geringer als bei 200 oder 500 MHz. Dies hängt wie bei der Nahnebensprechdämpfung schon erläutert mit dem Intensitätsverlust des „störenden“ Signals bei höheren Frequenzen zusammen. Eine Extrapolation der Standard-Werte erübrigt sich deshalb. Der FEXT-Wert von 50 dB des LANmark 7A-Kabels ist daher weniger ein Verdienst des Herstellers, sondern der Physik als solcher.

Diese Effekte heben sich in gewisser Weise gegenseitig auf. Die Dämpfung durch die Leistungssumme aller Nebensprechdämpfungen werden durch den Begriff „NEXT Power Sum“ zusammengefasst. Zwischen 200 und 400 MHz ergibt sich eine erstaunliche Stagnation und erst in Richtung 500 MHz haben wir einen, wenn auch nicht wirklich nennenswerten Anstieg zu verzeichnen. Dieses „Sammelmaß“ ist aber letztlich wirklich leistungsbestimmend, denn die genannten Effekte treten in der Realität niemals isoliert, sondern immer zusammen auf.

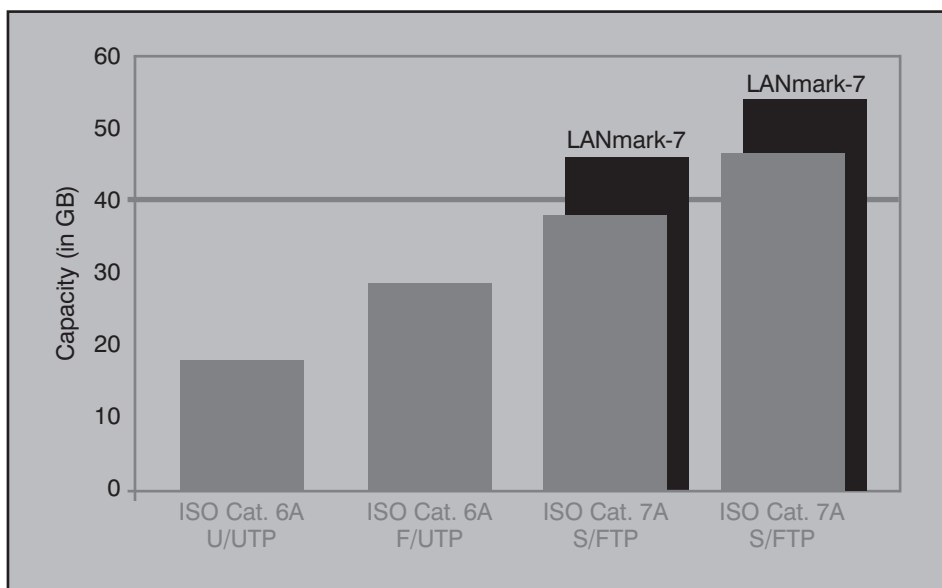


Abbildung 6: „Shannon-Kapazität“ für 4-paarige Kabel

Quelle: Nexans

Eine weitere wichtige Frage ist, ob nicht durch den Betrieb mit höheren Frequenzen durch das Kabel andere Funkdienste gestört werden. Ich sehe ja schon wieder die besorgten Gesichter, die fürchten, dass der Betrieb von 40 Gigabit Ethernet auf Twisted Pair die heiligen Funkzellen stören könnte. Dem ist definitiv nicht so, weil für 40 GBASE-T nur ein vollständig abgeschirmtes Kabel in Frage kommt. Eine Störung könnte übrigens nur dann entstehen, wenn eine Harmonische der Betriebsfrequenz auf dem Kabel ausgerechnet eine Frequenz in einem WLAN-Bereich hätte und darüberhinaus über die hinreichende Intensität verfügen würde. Damit die Leser diesen Artikel noch zu Ende lesen, will ich das jetzt nicht vorrechnen, aber wie schon gesagt, nimmt die Intensität stark mit der Frequenz ab und das Risiko einer „Bedrohung“ durch eine Harmonische von 500, 1000 oder 1200 MHz ist geringer oder höchstens genau so groß wie das Risiko einer Bedrohung durch eine Harmonische von 66, 125 oder 250 MHz. Aber, wie gesagt, wegen der Schirmung findet eine derartige Beeinflussung ja überhaupt nicht statt.

Umgekehrt kann man aber auch sehen, was passiert, wenn die Schirmung nicht vorgenommen wird, versagt oder defekt ist: das 10 oder 40 GbE-Nutzsignal würde in den allgemeinen Funkstörungen gnadenlos untergehen! Backgroundstörungen (Grundrauschen) sind nämlich praktisch frequenzunabhängig.

Es gibt aber noch weitere interessante Zusammenhänge. Wie schon weiter oben erwähnt, wurden in der Vergangenheit Verbesserungen hinsichtlich der Bandbreitenausnutzung vor allem dadurch erzielt, dass man statt eines binären Lei-

tungscodes ternäre oder quinäre Signale erzeugt und über das Kabel schickt. So kann man in einem Übertragungsschritt, der ja üblicherweise auch mit dem Maß Baud angegeben wird, mehr Bits pro Sekunde unterbringen. Nun hat alles seinen Preis. Die logischen Niveaus liegen bei mehrwertiger Übertragung enger zusammen und sind deshalb anfälliger gegen Störungen bzw. man muss am Empfänger mehr Aufwand betreiben, um sie ordentlich auseinanderzuhalten und richtig zu decodieren. Letztlich ist auch hier das Signal/Rauschverhältnis maßgebend. Nach einigem Rechnen kommt man zu dem Ergebnis, dass man für zwei logische Niveaus mehr 6 dB mehr Störspannungsabstand benötigt. Das ist ein relativ abstraktes Ergebnis und viele können damit nichts anfangen. In Abbildung 7 sehen wir aber einmal eine etwas andere Darstellung. Betrachtet wird eine Übertragungsstrecke mit Kat 5/5e Kabel, die mit den weiter oben angegebenen Parametern hinsichtlich besserer Dämpfung der bestimmbarer Parameter wie NEXT und FEXT ausgestattet wurde. Die Graphik zeigt an, wie viele Bits pro Sekunde unter den angegebenen Umständen bei einer vorgegebenen maximalen Übertragungsfrequenz untergebracht werden können. Mit Entsetzen sehen wir: es werden immer weniger, desto höher die Frequenz ist. Das raubt uns massiv die Hoffnung, mit einer weiteren wesentlichen Steigerung der logischen Stufen etwas ausrichten zu können.

An und für sich ist dieses Ergebnis nicht unerwartet, weil die Störungen mit der Frequenz insgesamt zunehmen und wir durch die verbesserte Kompensation lediglich das Signal/Rauschverhältnis soweit verbessert haben, dass die gewünsch-

te Distanz so eben grade noch überwunden werden kann. Bei den gemessenen Ergebnissen ist es sogar so, dass wir jenseits der 400 MHz sogar wieder linear binär leitungs codieren müssen.

Die neuen 6/6A/7/7A-Kabel schieben diese Grenze immer weiter nach oben. So können wir bei einem 7/7A-Kabel einen Frequenzbereich von 1000 MHz bzw. 1200 MHz mit verdichteter Leitungscodierung nutzen.

Fasst man diese Voruntersuchung zusammen, ergibt sich Folgendes:

- Die Übertragung von 40 Gigabit/s. auf STP Kat 7 oder 7A ist möglich
- Man benötigt eine Übertragungsbandbreite von 1000 - 1200 MHz
- Die Nahnebensprechdämpfung muss für 40 GBASE-T gegenüber Kat. 6A (für 10 GbE) um ca. 20-30 dB reduziert werden
- Die Fernnebensprechdämpfung muss für 40 GBASE-T gegenüber Kat 6A um 20 dB oder mehr reduziert werden
- Die Launch Power (Einspeiseleistung) sollte zwischen 10 und 12 dBm liegen
- Der Return Loss stellt keine erhöhten Anforderungen. Hier sind die schon mit 6A erreichten 8 dB ausreichend

Die Gesetze von Shannon setzen keine Grenzen, es wird lediglich etwas komplizierter.

### Zum Aufbau der Transceiverschaltkreise

Um den Anforderungen für die Randbedingungen der Übertragung von 40 Gigabit auf STP entsprechen zu können, benötigt man ein Schaltkreisdesign, welches moderne Signalverarbeitungsalgorithmen hinreichend breitbandig mit Schaltkreisen geringer Leistungsaufnahme realisiert. Dafür benötigt man ein hochparalleles, für diese Zwecke optimiertes Design. Obwohl das im Einzelnen hochinteressant ist, werde ich für die Zwecke dieser Darstellungen nur eine oberflächliche Sicht geben können. Es sind z. Zt. kleinere Firmen, wie z. B. Solar Flare, die sich um das Design entsprechender Schaltkreise bemühen. Dabei müssen sie von sehr ungünstigen Voraussetzungen ausgehen, damit ein Schaltkreis in Serie auch nachher immer funktioniert. Andererseits, wenn man auf die Entwicklung der xDSL-Schaltungen zurückblickt, hat man damit Erfahrung. Auch hier wurden letztlich verschiedene Dinge einfach ausprobiert, um die eigentlich immer angenommenen Gren-

zen der Übertragungskapazität von Telefonkabeln in der Last Mile zu überwinden. Wie man sieht, mit Erfolg.

Die mögliche Entscheidung ist es, Pulsamplitudenmodulation PAM zu verwenden. Diese Modulationsform hat sich auch bei xDSL bewährt und schafft einen hinreichenden Grad an Designfreiheit, ohne von vorneherein Randbedingungen z. B. hinsichtlich der in einen Schritt zu codierenden Informationsmenge fest zu zementieren. Außerdem möchte man 40 Gigabit durch die systematische Weiterentwicklung von 10 GBASE-T erreichen. Das hat mehrere Gründe. 10 GBASE-T ist bewährt und ausgesprochen kostengünstig. Die Anwender besitzen normalerweise bereits eine Struktur, auf der 10 GBASE-T läuft, wenn sie über 40 GBASE-T nachdenken. In alter Tradition wird es nicht das Ziel sein, Chips zu entwickeln, die nur 10 GBASE-T können, sondern autosensende 1/10/40 GBASE-T-Lösungen, weil diese es auf viel höhere Stückzahlen bringen und den Anwendern die sanfte Migration erlauben. Die Anforderungen von 40 GBASE-T an die Übertragungseigenschaften der Verkabelung und ihrer Umgebung sind relativ hoch. Im Zuge der Entwicklung passender Chips könnte man diese Anforderungen etwas entzerren oder herunternehmen.

Im Folgenden wird eine mögliche Lösung für die Übertragung beschrieben. Es geht hier zunächst einmal darum, zu zeigen, dass die Übertragung überhaupt möglich ist. In einer Standardisierungsphase werden noch andere Übertragungsvarianten auftreten und diskutiert werden. Firmen wie Intel werden sich auch von kleineren

Herstellern nicht die Butter vom Brot nehmen lassen. Bei 10 Gigabit über Fiber ist das ja so ausgefallen, dass Intel die kleine Firma mit der besten Technologie aufgekauft hat. Es wird auch dieses Mal eine Phase geben, in der sich kleinere Entwickler ein Rennen liefern, dessen Sieger gekauft werden möchte.

Betrachtet man die dargelegten Zusammenhänge, scheint eine Bandbreite von 1000 MHz auf dem Kabel relativ optimal zu sein. Jenseits der 1000 MHz schlagen bestimmte Effekte relativ bösartig zu und der Aufwand zur Kompensierung wäre hoch, wenn nicht gar unmöglich.

Ein konkreter Implementierungsvorschlag könnte eine Baudrate von 833 MHz vorsehen, also 833 Millionen Übertragungsschritte pro Sekunde. Dann benötigt man für die 40 Gigabit 48 Bits pro Baud, was sehr viel ist. Andererseits haben wir vier Kabelpaare, so dass sich dies auf 12 Bits pro Baud pro Kabelpaar reduziert.

Bei 10 GBASE-T wird eine PAM-16 Modulation benutzt. PAM-16 definiert sechzehn verschiedene Konstellationspunkte in der Kombination von Amplituden- und Phasenlage und kann somit pro Schritt vier Bits codieren. Das ist keine besonders anspruchsvolle Modulationstechnik, vergleichsweise verwendet man z. B. bei den IEEE 802.11a WLANs bis zu 64 Konstellationspunkte in der QAM-64. Ein Ziel bei der Standardisierung ist es aber auch, die Bitfehlerrate zu verbessern. Viele Ethernetstandards arbeiten noch auf den alten Vorgaben der Norm, die lediglich 10 EXP -8 verlangt. Dies ist aber nicht mehr zeitgemäß und der Standard für 10 Giga-

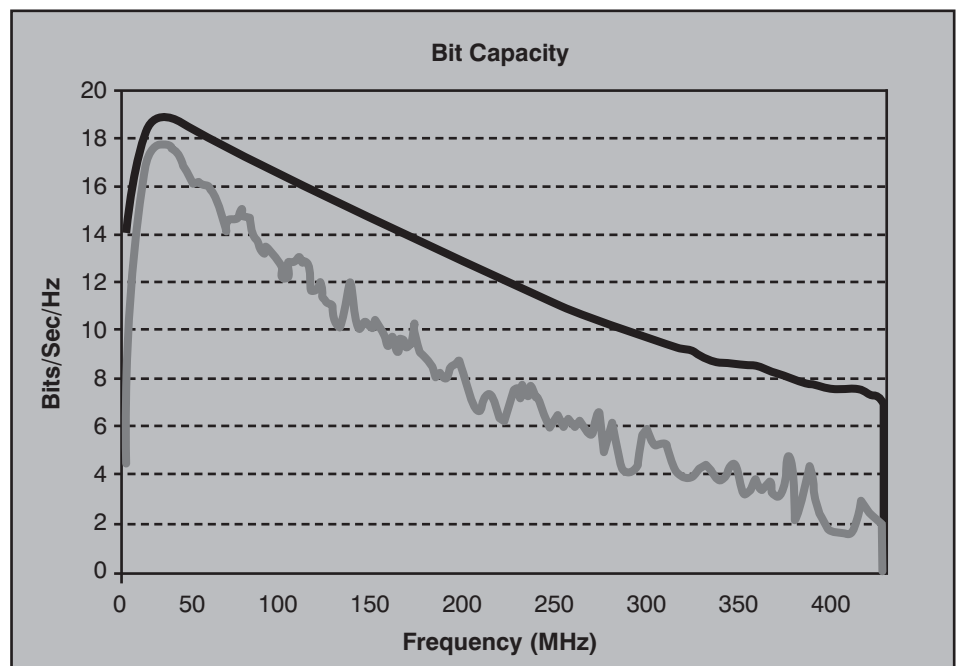


Abbildung 7: „Bitpackrate“ vs. Frequenz

bit Ethernet auf Fiber definiert PHY-Varianten, die es mindestens auf 10 EXP -12 bringen. Dem möchte man sich auch hier anpassen. Mit einer PAM-16 würde man die allgemeinen Anforderungen von IEEE 802.3 erfüllen. Für eine ordentliche Kombination von Kontrollsignalen und Trellis Codierung braucht man aber eine PAM-16 mit zehn tatsächlich benutzten Konstellationspunkten pro Schritt. Die Trellis Codierung ist mathematisch sehr kompliziert, aber man hat ja bei 1000 BASE-T gesehen, wie gut sie funktioniert und dass es relativ einfach zu sein scheint, entsprechende Schaltungen zu bauen. Für 10 GBASE-T wurde die bisher dreidimensionale Trellis Codierung auf vier Dimensionen erweitert und diese vier Dimensionen werden jeweils auf ein Kabelpaar übertragen. Es ist nicht so ohne Weiteres möglich, die Trellis Dimensionen einleuchtend zu erklären. Aber ich will es einmal versuchen. Bei einer zweidimensionalen Trellis Codierung entsteht eine Fläche, die man sich meinethalben wie ein Fliegengitter vorstellen kann. Jedes Kästchen des Fliegengitters kann wie bei einer hundsgeöhnlichen Matrix durch zwei Koordinaten adressiert werden. Je nach gewünschter Codierungsdichte nimmt man mehr oder weniger Fliegengitterkästchen, die dann natürlich auch jeweils ein Stück auseinanderliegen. Um jedes Fliegengitterkästchen herum entsteht dadurch ein Feld und wenn z. B. bei der Übertragung eine Koordinate verfälscht wurde, dann lässt sich das ursprünglich „gemeinte“ Signal wiedererkennen. Das ist eine systematische Anwendung der Hamming-Distanz aus der einfachen linearen Codierung. Nun wählt man geschickterweise die Felder nicht so, dass benachbarte Nachrichtenelemente auf benachbarte Codesymbole fallen, sondern man legt sie so weit auseinander wie möglich. Dadurch kann man eine viel größere Sicherheit gegenüber Fehlern erzielen. Bei einer dreidimensionalen Trellis Codierung wendet man die eben beschriebene Vorgehensweise auf einen Körper an, von mir aus einen Würfel, in dem man die Codesymbole ebenso geschickt unterbringt. Und für die vierdimensionale Trellis Codierung nimmt man eben einen vierdimensionalen Raum, den man mathematisch gut beschreiben kann. Die Idee, eine vierdimensionale Trellis Codierung zu verwenden und dann die vier Dimensionen auf die Kabelpaare abzubilden, ist fast schon als genial zu bezeichnen, weil dadurch ein Modulations-Prozessgewinn entsteht, der sich mittelbar so niederschlägt, dass wir relativ zu uncodierter PAM-16 6 dB gewinnen. 6 dB ist in diesem Zusammenhang sehr viel. Durch die vierdimensionale Trellis Codierung gewinnen wir also diese 6 dB und erhöhen gleichzeitig die Fehlerrate auf z.B. 10 EXP -12. Um diese Fehlerrate zu erzielen, benötigen wir auf der Übertragungsstrecke

für die Trellis-Codierung übrigens ein Signal/Rauschverhältnis von ca. 26 dB.

Wie kommen wir jetzt nur bei 40 GBASE-T weiter? Mit der bislang skizzierten Idee müssten mindestens 12 Bits auf ein Baud abgebildet werden. Mit einer normalen PAM- oder QAM schaffen wir aber höchstens 8 Bits auf ein Baud bei QAM-256.

Die QAM-256 ist aber sehr störanfällig und letztlich ungeeignet. Stattdessen muss ein weiterer Zwischenschritt bei der Codierung eingeführt werden. Die Information der 12 Bits pro Schritt muss auf eine höherwertige Codierung abgebildet werden, z.B. auf eine ternäre Codierung. 12 Bits ergeben 4096 verschiedene mögliche Zustände. 8 Ternärsymbole ergeben 6561 verschiedene mögliche Zustände, so dass wir auch noch Reserve hätten. Eine einfache Leitungscodierung für Ternärsymbole würde Phase und Amplitude kombinieren, also könnten wir hier direkt PAM-64 nehmen. PAM-64 auf der Leitung ist allerdings auch nicht wirklich optimal, da die einzelnen Signalniveaus doch sehr eng beieinander liegen.

Besser ist allerdings die Verwendung von OFDM, wie wir es aus den WLANs kennen. Das Signal ist außerordentlich stabil. Wir können die PAM-64 Konstellationspunkte direkt für die Modulation der Unterträger verwenden. Die anschließende Signalsynthesierung auf der Basis der iFFT führt bekanntlich zu einem sehr störungsunanfälligen Signal. OFDM ist keineswegs auf die Verwendung bei Funknetzen beschränkt. In DWDM-Systemen ist 40 Gb/sec. pro DWDM-Kanal die aktuelle Basisrate. Für den Übergang zu einer

Basisrate von 100 Mb (sec. pro DWDM-Kanal diskutiert man schon seit längerem die Verwendung von OFDM.

Ein 40 GBASE-T-Transceiver entsteht durch Fortsetzung der älteren Wege, die auch bei 10 GBASE-T erfolgreich waren:

- Verschiebung der analogen Signalverarbeitung
- Verbesserung der Codierung
  - traditionell
    - Gallager LDPC
    - Co-Set-Partitionierung
    - Tomlinson-Harashima
    - 16 oder 64 PAM
  - revolutionär
    - QAM statt PAM
    - OFDM
- Oversampling

Es gibt nämlich eine Reihe weiterer Möglichkeiten zur Verbesserung der Codierung auch ohne OFDM. Gallager's Low Density Parity Check LDPC Block Code z. B. erzielt erhebliche Senkung der BER als Funktion der SNR als konkatenierter Konvolutionscode (Turbo Code). 12 dB Co-Set-Partitionierung sorgt für verbesserte Toleranz gegenüber Rauschen. In Gigabit Ethernet wird 6 dB Co-Set-Partitionierung vorgenommen. 1000 BASE-T 4DPAM-5 überträgt 5 Niveaus und ist so unempfindlich wie 3 Niveaus. 12 dB CSP 4 DPAM-8 überträgt 8 Niveaus und ist so unempfindlich wie 2 Niveaus. Tomlinson-Harashima Vorcodierung schließlich sorgt für die Reduktion der Komplexität des Empfängers. Sie erlaubt spektrale Signalaufarbeitung im Transmitter zur Reduktion der Einflüsse der Einkopplung von Alien Crosstalk und eliminiert die Weiterpropa-

## Kongress

### Netzwerk-Redesign Forum 2009 09. - 12.03.09 in Königswinter

Die Schwerpunktthemen des ComConsult Netzwerk-Redesign Forums 2009 sind:

- Neue Redundanz-Verfahren
- Layer-2 kontra Layer-3
- Verkabelung 2009
- MPLS kontra Carrier-Ethernet kontra OSPF
- Wireless-Netzwerke
- Sicherheit
- Integration mobiler Mitarbeiter/Fixed-Mobile-Konvergenz
- WAN-Redesign

Moderation: Dr. Franz-Joachim Kauffels, Dr. Jürgen Suppan  
Preis: € 2.290,- zzgl. MwSt.



Buchen Sie über unsere Web-Seite [www.comconsult-akademie.de](http://www.comconsult-akademie.de)



gation von Fehlern im Decision Feedback Equalizer (DFE), auch bei großen DFE-Koeffizienten.

Ein weiterer Bereich zur Problemlösung ist generell das Oversampling. Es gibt drei Alternativen für Transmitter Front-End: Simple, Baseline, Oversampled. Bei „Simple“: gibt es keine digitale Filterung, 3200 Msymbole/sek., einfache R/C-Signallglättung, das Sendesignal hängt von ungenauen Analog-Komponenten ab und es gibt keine spektralen Nullstellen bei DC und  $1/2T$ , was eine schlechte Rückflusdämpfung bedeutet. „Baseline“: wie „Simple“, aber mit RLC Frontline-Filter mit konstanter Ausgangsimpedanz, zwar immer noch keine ordentlichen spektralen Nullstellen, aber wesentlich bessere Rückflusdämpfung. „Oversampled“: digitale Filterung und Interpolation, 6400 Msymbole/sek., einfache RC Signallglättung mit Basisfrequenz 1 GHz, wohldefinierte Nullstellen bei DC und  $1/2 T$ , sehr gute Rückflusdämpfung. Möglich ist hier auch das Training von PMA-Sequenzen in Analogie zu Training von OFDM-Symbolen bei schnellem Wireless.

All diese Dinge können kombiniert werden, um das 40 GbE100m-Distanzziel auch für Kat. 7/7A-Verkabelung zu erreichen. Die Aufgabe der Standardisierung besteht lediglich daraus, die hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit, des Stromverbrauchs und der Stabilität günstigste Lösung herauszuarbeiten.

Nach diesen Vorüberlegungen kann man die Anforderungen an die Übertragungsstrecke neu formulieren: für ein aggregiertes Signal/Rauschverhältnis von z. B. 25 - 26 dB über die Strecke müssen die einzelnen fünf SNR Hauptfaktoren um 32 dB liegen. Diese Hauptfaktoren sind:

- Ungleichheiten auf den Kanälen
- Intersymbol-Interferenz ISI
- Echo
- Nahnebensprechdämpfung NEXT
- Fernnebensprechdämpfung FEXT

Die ersten zwei Punkte bekommt man nur durch eine Kombination von Feedforward und Feedback-Equalizing in den Griff. Man schickt z. B. eine definierte Symbolfolge aus und betrachtet das Ergebnis. Physikalisch gesehen hat jedes der in einer Verkabelung existierenden Kabelpärchen eine andere Bandbreite und eine ggf. minimal abweichende Signalverzögerung. Die Bandbreite drückt auf die Intersymbol-Interferenz und die Signalverzögerung verzerrt das durch die Trellis-Codierung in den vier Dimensionen zusammenhängende 4 X PAM-64 oder OFDM Nutzsignal. Es muss also eine Einsynchronisierung erfolgen. Diese Problematik ist bekannt, seit es Ethernet gibt. Schon bei der Basisversion

10 BASE 5 mussten sich die Empfänger auf das ankommende Signal einsynchronisieren. Das ist der Grund für die Existenz der Präambel im Ethernet Paket. Da auch bei 10 GBASE-T immer noch klassische Ethernet-Pakete versendet werden, steht z. B. der Raum in den Präambeln für derartige Zwecke zur Verfügung. Selbst bei maximal langen Paketen von ca. 1500 Byte sind das 8 Byte Präambel und somit 0,5 % der Gesamtbandbreite. Das reicht in jedem Fall.

Wegen der limitierten Bandbreite muss man Vollduplex arbeiten. Die Echokompensation lässt sich also in einem Zug mit der Richtungstrennung durchführen. Allerdings muss ein größerer Aufwand getrieben werden, denn wegen möglicher Fehlanpassungen bei der Impedanz muss man schon auf eine Unterdrückung im Bereich von 40 - 50 dB abzielen.

Die Nahnebensprechdämpfung ist eine hochgradige Störung zwischen benachbarten Receivern. Auch wenn man sich mit der Trellis Codierung noch so große Mühe gibt, entsteht ein sehr großer Aufwand für die Entzerrung. Auch hier sollte man sicherheitshalber auf 40 dB Entzerrungsleistung abzielen.

Die Fernnebensprechdämpfung wird bei 1000 BASE-T mittels eines Ausgleichsparameters beschrieben (ELFEXT), der aber durch die Schaltungen selbst nicht weiter kompensiert wird. Das kann man sich ab 10 GBASE-T und besonders bei 40 GBASE-T nicht erlauben und muss wenigstens eine FEXT-Unterdrückung im Bereich von 20 dB erzielen.

Wie schon gesagt, um diese Anforderungen, die zu einem SNR von ca. 26 dB führen, erfüllen zu können, benötigt man ein komplexes Schaltungsdesign unter massiver Nutzung paralleler Strukturen. Man darf nicht vergessen, dass ein Teil der Arbeit ja auch in analoger Signalverarbeitung besteht, die sich im Gegensatz zur rein digitalen Verarbeitung nicht völlig beliebig zusammenintegrieren lässt.

Um die geforderte Leistung zu erreichen, muss man einen MIMO (Multiple Input Multiple Output) Schaltkreis bauen, der alle auftretenden Signalströme als Matrixfilter gleichartig behandelt. Dieser Matrixfilter hat eine Reihe von Vorzügen. So ist z.B. die Nebensprechunterdrückung ein immer gleichartig auftretender Vorgang. Ein Kabelpaar wird die anderen Kabelpaare im Wesentlichen gleichartig stören, weil die Störung ja mit dem gleichen Ausgangssignal entsteht. Die Nebensprechunterdrückung für NEXT 1, 2, NEXT 1, 3 und NEXT 1,4, also die drei Einflüsse, die von Kabelpaar 1 auf die Kabelpaare 2, 3, und 4 ausgeübt werden, sind sehr ähn-

lich, werden aber z. B. im Rahmen des 1000 BASE-T-Designs an drei verschiedenen Stellen lokal zu den jeweils gestörten Kabelpaaren ausgeführt. Diese Operation kann man z. B. geeignet zusammenfassen. Durch entsprechende Korrelationsfunktionen kann die Interferenz zwischen den Kanälen weiter gesenkt werden. Bei 1000 BASE-T tut man noch immer so, als sei jedes Signal in jedem Moment überraschend und völlig neuartig. Das stimmt natürlich überhaupt nicht, denn man kennt das Signal sehr gut, weil man es doch im Schaltkreis selbst erzeugt. Ein entsprechend ausgestatteter Schaltkreis könnte z.B. Signale erzeugen, die von vorne herein so beschaffen sind, dass sie in einer bestimmten Umgebung weniger Störungen erzeugen als ein unbearbeitetes Signal.

Diese Korrelationsfunktionen kann man aber nur dann ausführen, wenn man das gesamte Signal in einem Schaltkreis vorliegen hat und nicht wie bislang auf vier getrennte, miteinander nicht in Verbindung stehende Schaltkreise aufteilt.

Es sollte klar sein, dass es nicht reicht, diese Korrelationen nur auf der Senderseite vorzunehmen.

Der Transmitter muss eine Linearität von mehr als 50 dB aufweisen, der hybrid aufgebaute Empfänger ebenfalls. Insgesamt benötigt man eine Operationstaktzahl von ca. 833 MHz.

*Das bedeutet, dass man die Schaltung wie bisher in konventioneller CMOS-Technologie ausführen kann.*

Über die Schirmung muss man gesondert nachdenken. Wenn man ein System für UTP-Kabel entwickelt, kann man das nicht so ohne Weiteres auf geschirmte Umgebungen übertragen. Die Schirmung selbst führt zu einem weiteren Störeinfluss durch Reflexionen am Schirm. Man muss diese durch die Kompensation für das allgemeine Grundrauschen in den Filtern abdecken. Andererseits entspricht das reflektierte Signal ja dem Signal auf den Adernpaaren mit einem äußerst geringen Zeitversatz und sollte auch im Rahmen der Echo-Kompensation abgefiltert werden können.

Noch ein paar Worte zu den Kosten. Wie immer in der Geschichte der Ethernet-Standardisierung, möchte man die zehnfache Leistung zum ca. dreifachen Preis. Das hat sich am Markt bewährt und hat ja in der Vergangenheit auch immer funktioniert. Bei 40 und 100 GbE wird dieser Mechanismus jedoch außer Kraft gesetzt. Das Ziel ist die n-fache Leistung zum n-fachen Preis oder darunter. Heute kostet ein 10 GBASE-T-Board ca. 300 Euro.

Das bedeutet, man würde 1200 Euro als angemessenen Preis für ein 40 GBASE-T-Board empfinden. Die ersten 40 GBASE-T-Boards werden erfahrungsgemäß aber das acht- bis neunfache ihrer 10-Gigabit-Brüder kosten und dann im Preis fallen. Das bedeutet im Klartext, dass die ersten 10 GBASE-T Boards für ca. 1000 US\$ herauskommen werden und dann auf unter 500 US\$ fallen. Damit wären sie am Anfang nicht billiger als die entsprechenden Multimode-Boards, aber insgesamt muss man natürlich sehen, dass die Neuanlage einer Glasfaserverkabelung z.B. für die Anbindung von ein paar Servern insgesamt erheblich teurer werden kann als eine entsprechende Twisted Pair Verkabelung. Dies gilt natürlich besonders dann, wenn es schon eine strukturierte STP-Verkabelung gibt, die man nutzen könnte. Insgesamt ist zu erwarten, dass 40 GBASE-T am Server zu Beginn ca. 40% einer adäquaten Glasfaserlösung kosten wird, diese Kosten werden im Laufe der Zeit auf ca. 10% relativ gesehen sinken. Generell gilt dies natürlich nur für Verbindungen mit einer Länge von max. 100 m und im Vergleich zwischen Kupfer und Multimode.

Insgesamt werden die 40 GBASE-T-Lösungen vom allgemeinen Entwicklungsprozess bei den Integrierten Schaltungen profitieren, weil bekannte Standard-Prozesse benutzt werden können, mehrere Transceiver zusammen integriert werden können und ein beachtliches Marktpotenzial besteht.

Wie wir in den letzten zwei Jahren gesehen haben, ist die Entwicklung von 10 Gigabit Ethernet zwar zügig vorangegangen, es gab jedoch auch einige technologische Verwerfungen. Wie schon mehrfach berichtet, übertreffen bei 40 GBASE selbst die Vorserienprodukte im optischen Bereich die Vorgaben des Standards deutlich. Alleine die Androhung von 40 GBASE-T wird dazu führen, dass die Hersteller von optischen Komponenten noch mehr auf die Tube und auf die Preise drücken. Das war bei Gigabit Ethernet genauso. Auch wenn sich sämtlichen mir bekannten Fünfjahresplankoryphäen die Haare zu Berge stellen, empfehle ich, 40 Gigabit Ethernet relativ spontan zu implementieren, immer dann, wenn man es benötigt. Die Notwendigkeit für 40 Gigabit Ethernet ist in etwa so plötzlich und unerwartet wie Heiligabend. Aber Sie wissen genau: der Hartgesottene bekommt die günstigsten Preise. Wer schon im November Weihnachtsgeschenke einkauft, ist selbst schuld. Am 24. Morgens ist es meist billiger. Und die preiswertesten Geschenke bekommt man nach dem 26.12.. Obwohl es zunächst verwirrend aussieht, es gibt ja bezogen auf einen Anwendungsfall gar nicht so viele Alternativen für die 40 GbE-PHY. Wenn man die Kom-

ponenten aber übereilt kauft, greift man in jedem Fall in ein fallendes Messer. Weiter oben hatte ich Zielpreise angegeben. Der Markt wird sich erst einigermaßen stabilisieren, wenn wir bei diesen Preisen angekommen sind. Wer jetzt eine Serveranbindung mit 40 Gigabit benötigt, kann nicht auf 40 GBASE-T warten, sondern nimmt eben eine preiswerte Multimodelösung. Wer jetzt ein Citynetz aufbauen möchte, kann mit einer Kupferlösung ohnehin nichts anfangen. Aber wer die Infrastruktur für ein Rechenzentrum neu plant, braucht nicht davon auszugehen, dass alle Geräte mit Monomode untereinander verbunden werden.

#### Konsequenzen für die Unternehmensnetze

Wie üblich wird IEEE 802 dafür sorgen, dass die konventionellen Glasfaservarianten einen Vorsprung bekommen, damit sie verkauft werden. Das kann ganz einfach über den Project Authorisation Request gesteuert werden. Der Standardisierungsprozess als solcher kann dann schnell gehen. Erste 40 GBASE-T-Boards werden wir also 2011/2012 sehen. Dies liegt eindeutig innerhalb der Lebensspanne heute neu geplanter Verkabelungslösungen. Also müssen diese dementsprechend ausgelegt werden.

Mit absoluter Sicherheit reicht eine durchgängige Kat 7A-Verkabelung für 40 GbE aus. Man kann noch über den Stecker diskutieren, aber es ist kein Grund zu sehen, warum nicht sowohl der GG45 als auch der Siemon-Stecker hinreichend funktionieren sollten.

Interessant ist natürlich die Frage, was mit einer Kat 7-Verkabelung ist, die ja schon vielfach installiert ist. Hier kommt es darauf an, ob die Verkabelung die Spezifikation nur grade eben erreicht oder ob aufgrund der Konstruktion durch den Hersteller eine entsprechende Leistungsreserve besteht. Ich habe mit Absicht die gesamte Darstellung der Transceivertechnik auf eine Taktrate von 833 MHz abgestimmt, man könnte natürlich auch höhere Raten nehmen. Aber eine Rate in diesem Bereich passt optimal zum bestehenden VLSI-Prozess. Die Verwendung höherer Raten wird ggf. zu Problemen mit diesem Entwurfsprozess führen, aber das weiß man nicht genau, denn dieser Prozess macht manchmal Sprünge. Eine Taktrate von 833 MHz würde es aber ermöglichen, dass auch eine Kat.7-Verkabelung für 40 GBASE-T reichen würde.

Eine Kat 6A-Verkabelung reicht definitiv nicht.

Fassen wir generell zusammen:

- 40 GBASE kommt, früher oder später, auch zu Ihnen
- Je später, desto billiger
- 40 GBASE-LR4 und 40 GBASE-SR müssen nur noch von den bekannten Herstellern verbaut werden, die Komponenten sind da, das passiert spätestens 2009
- Die Situation bei Switches ist abhängig von deren Grundleistung, z. B. ein Cisco 6500 kann max. 2 40 GBASE-Adapter vertragen, also wird es bei diesem Hersteller ggf. ein Nexus werden. Andererseits kann die Reihe 15.000 schon 96 X 40 Gb
- 40 GBASE-LRM ist technisch sofort möglich (AMCC), aber nicht standardisiert, kann aber 2009/10 kommen
- 40 GBASE-T wird ab 2009 von der Standardisierung aufgenommen, es gibt schon passende Kabel und Stecker, das geht dann schnell

#### Impressum

Verantwortlich für diesen Artikel ist:

ComConsult Technology Information Ltd.  
121 Paton Rd.  
RD1  
Richmond - New Zealand  
GST Number 84-302-181

Registration number 1260709  
Telefon: 0064 3 5444632 Telefax: 0064 3 5444237

German Hotline of ComConsult Research:  
02408-955300

Herausgeber und verantwortlich im Sinne des Presserechts: Dr. Jürgen Suppan

Chefredakteur: Dr. Jürgen Suppan  
Nachdruck und Vervielfältigung:  
Auch auszugsweise nur mit Genehmigung der  
ComConsult Technology Information Ltd.

© ComConsult Technology Information Ltd.