

White Paper



Design eines optischen Netzwerks – Planung des Verlust-Budgets mittels Statistik



Convincing cabling solutions

Design eines optischen Netzwerks – Planung des Verlust-Budgets mittels Statistik

Inhalt

1.	Das Power Budget	4
2.	Planung der Kanalverluste	8
2.1.	Maximale Dämpfungswerte	9
2.2.	Statistische Dämpfungswerte	9
2.3.	Monte Carlo Simulation	10
2.4.	Vergleich der Methoden	11
3.	Literatur	12

© Copyright 2011 Reichle & De-Massari AG (R&M). Alle Rechte vorbehalten.

Weitergabe und Vervielfältigung dieser Publikation oder von Teilen daraus sind, zu welchem Zweck und in welcher Form auch immer, ohne die ausdrückliche schriftliche Genehmigung durch Reichle & De-Massari AG nicht gestattet. In dieser Publikation enthaltene Informationen können ohne vorherige Ankündigung geändert werden. Die Erstellung dieses Dokuments erfolgte mit grösstmöglicher Sorgfalt, es enthält den zum Zeitpunkt der Erstellung aktuellen technischen Stand.

Gestalten eines Glasfasernetzwerks mit Statistiken

Wenn optische Netzwerke entworfen und geplant werden, ist eine der Hauptprobleme das Berechnen der Signalverluste. Ob es sich bei dem Netzwerk nun um eine Vielzahl einzelner Links, wie z.B. in Data Centern, oder um Passive Optical Networks im Access Bereich handelt, der Designer muss stets die Signalverluste „budgetieren“. Das Lichtsignal wird dabei sowohl durch die intrinsische Dämpfung der Glasfaser, als auch durch Stecker oder Splitter abgeschwächt. Die Gestaltung und Optimierung moderner faseroptischer Übertragungssysteme beruht in hohem Masse auf computergestützten Modellierungsverfahren. Die Modelle werden kontinuierlich verbessert und durch Vergleich mit Versuchsmessungen validiert. Insbesondere können die Verbinderverluste eines optischen Kanals unter Verwendung von statistischen Modellen und Monte-Carlo-Verfahren simuliert werden.

Dieses White Paper führt in die praktische Anwendung der Netzwerkplanung ein. Es zeigt die Zusammensetzung der einzelnen Verlustbudgets und gibt konkrete Beispiele zur Berechnung der vertretbaren Einfügedämpfungen durch optische Steckverbinder wie LC- oder MPO-Stecker.

Anwendung:	Data Center Netzwerke, 10 und 40/100 Gigabit Ethernet
Technologie:	Optische Netzwerke
Format:	White Paper
Themen:	Optical Link Design, Berechnungs- und Simulationsmethoden für die Ermittlung von Dämpfungsbudgets, Monte Carlo Simulation
Ziel:	Orientierung für die Netzwerkplanung, Informationen zu Planungsmethoden
Zielgruppe:	Data Center, RZ-Planer, Installateure, Netzwerk-Verantwortliche
Autoren:	Dr. Thomas Wellinger
Erschienen:	August 2011

1. Das Power Budget

Als Power Budget (P_i) eines Glasfaser-Kanals bezeichnet man die Zuteilung der verfügbaren Leistung welche in eine gegebene Faser eingekoppelt wird, inmitten verschiedener optischer Verlustmechanismen, um am Empfänger weiterhin eine ausreichende Signalstärke gewährleisten zu können. Anders gesagt ist sie die Differenz zwischen eingekoppelter Leistung und der mindestens benötigten Empfangsleistung (P_0). Es kann jedoch notwendig sein, eine Sicherheitsmarge (M) einzuberechnen, so dass kleine Abweichungen in den Systemparametern nicht zu einer inakzeptablen Verschlechterung der Linkperformance führen. Power Budgets werden jeweils während der Entwicklungsphase eines Standards (z.B. IEEE oder ITU) festgelegt.

Das Power Budget eines Systems ist durch folgende Gleichung gegeben:

$$P_i = P_0 + IL_c + \alpha_f l + M + P_p(l) \quad (1)$$

Hierbei bezeichnet IL_c die Einfügedämpfung durch Steckerverbindungen, α_f den Dämpfungskoeffizienten der Glasfaser, l steht für deren Länge, und P_p für sogenannte Power Penalties.

Der Entwurf eines Netzwerks auf der physikalischen Ebene beinhaltet, dass man die Effekte mehrerer Signalverschlechterungen einberechnet. Diese Verschlechterungen beinhalten:

1. Symbolübersprechen (Inter-Symbol Interference, ISI)
2. Modenrauschen - für den multimode Fall
3. Relatives Intensitätsrauschen (RIN)
4. Mode Partition Noise (MPN)
5. Reflektionsrauschen
6. Polarisationsrauschen - für den singlemode Fall

Jede dieser Verschlechterungen resultiert in einem Power Penalty des Systems. In der Gegenwart solch einer Verschlechterung wird eine höhere Signalleistung am Empfänger benötigt, um weiterhin eine angestrebte Bitfehlerrate zu gewährleisten. Definiert sind Power Penalties also als die Erhöhung der Leistung (in dB), welche benötigt wird, um in Gegenwart einer Signalverschlechterung dieselbe Bitfehlerrate zu garantieren. Typischerweise sind die meisten dieser Signalverschlechterungen in einem multimode Link verhältnismässig klein. Lediglich ISI und Modenrauschen führen zu einem grösseren Power Penalty.

Symbolübersprechen: Wenn ein optischer Puls sich in einer Glasfaser fortpflanzt wird sich seine Form durch Beschränkungen in der Bandbreite der Glasfaser im zeitlichen Regime verbreitern und mit benachbarten Bits überlappen. Dies ist, was man als Symbolübersprechen oder ISI bezeichnet. Wenn also nun eine Bitabfolge von (101) durch den Kanal gesendet wird besteht die Gefahr, dass die stärkeren Lichtpulse der beiden 1-Bits mit dem schwächeren des 0-Bits „verschmieren“ und es der Empfängerseite somit nicht mehr ermöglichen diese 0 von einer 1 zu unterscheiden. Der Effekt ist in Abbildung 1 dargestellt.

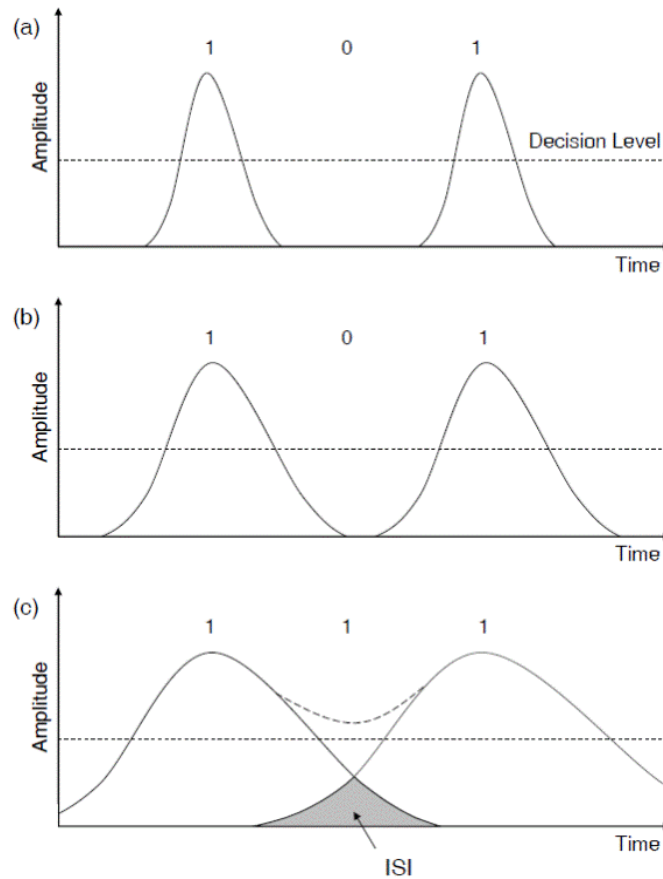


Abb. 1: Darstellung zeigt die Pulsverbreiterung eines digitalen (101) Bitstreams bei Fortpflanzung durch die Glasfaser: (a) bei Einkopplung in Faser, (b) nach Länge l_1 , (c) nach Länge $l_2 > l_1$. Der letzte Fall führt durch signifikante Symbolübersprechung (ISI) zu einem Bitfehler.

Modenrauschen: Die Vielzahl an Moden die durch eine multimode Faser wellengeleitet werden interferieren permanent miteinander. Dies führt je nach Phasenunterschied zu konstruktiver oder destruktiver Interferenz, welche in einem Specklemuster am Faserende resultieren. Allerdings verliert man bei diesem Prozess keine Leistung, da die transportierte Energie lediglich in eine andere Mode gekoppelt wird. Wenn jedoch zwei Fasern durch Stecker miteinander verbunden werden und ein lateraler oder axialer Versatz besteht, werden nur jene Speckle übertragen, die in den Kern der zweiten Faser gekoppelt werden. Wenn also zufällige und abrupte Veränderungen der optischen Leistungsverteilung von Mode zu Mode mit einem schlechten Stecker einhergehen, erfährt man Fluktuationen in der übertragenen optischen Leistung.

Gemeinsam mit den optischen Verlusten der Glasfaser und der Einfügedämpfung der Steckerverbindungen sind die gerade beschriebenen Effekte die limitierenden Faktoren für die Länge des optischen Kanals. Folglich wird diese sehr stark von der Faser- und der Steckerqualität beeinflusst.

Abbildung 2 zeigt die Verlustzuteilung für einen optischen 10G Ethernet Kanal als Funktion der Kanallänge [1]. Wie zu erkennen ist, steigen die Dämpfungsverluste in der Glasfaser linear mit deren Länge an (hier mit etwa 3.5 dB/km). Das Power Penalty hingegen zeigt ein anderes Verhalten und wächst mit zu-

nehmender Kanallänge nichtlinear an. Die für Steckverbindungen verfügbaren Verluste IL_c gehorchen folgender Formel:

$$IL_c = P_i - P_0 - \alpha_f l - P_p(l) \quad (2)$$

und nehmen mit grösserer Kanallänge zunehmend stark ab.

Gemäss IEEE 802.3ae ist für OM3-Fasern bei 10 GbE (10GBASE-SR) eine maximale Länge von 300 m definiert [2]. Um diese Länge zu erreichen, ist eine Dämpfung für den optischen Kanal von höchstens 2.6 dB zulässig. Hierbei fallen 1.5 dB für die Steckverbindungen und 1.1 dB auf die Dämpfung in der Faser an. Die restlichen 4.7 dB des Power Budgets sind für Penalties eingeplant, um oben genannte Effekte zu kompensieren. Gleichzeitig wird auf eine Sicherheitsmarge verzichtet (vgl. Gleichung (2)). Abbildung 2 zeigt die Verhältnisse für das Gesamtbudget. Hat man z.B. 2 dB für Steckerverluste eingeplant, so kann man hiermit einen optischen Kanal von 280 m Länge realisieren.

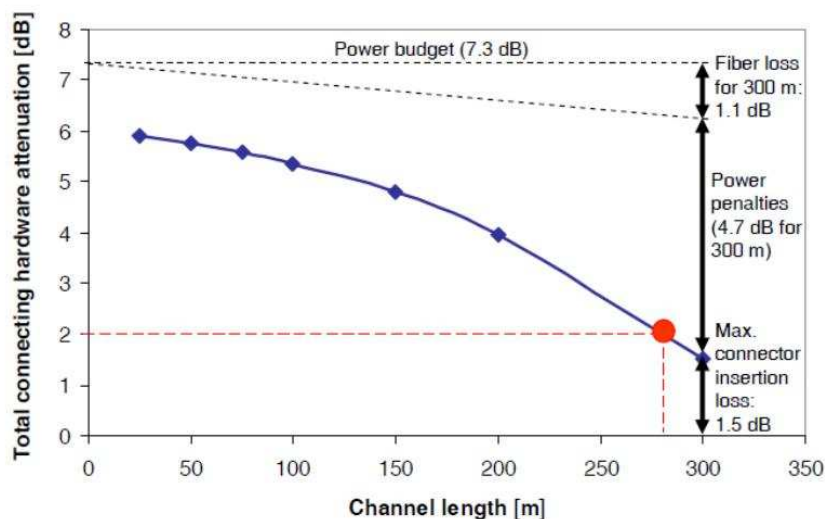


Abb. 2: Gesamt-Dämpfungsbudget für 10 GbE. Für Steckerverluste von insgesamt 2 dB dürfte der Kanal in diesem Fall eine Länge von 280 m haben.

Bei 40 GbE und 100 GbE definiert IEEE 802.3ba für Fasern vom Typ OM3 lediglich 100 m, für OM4 150 m [3]. Grund hierfür ist die grössere Zuteilung von Power Penalties für ISI und Modenrauschen. Daraus ergibt sich, dass das Verlustbudget für Stecker signifikant kleiner wird. Durch diese grösseren Penalties reduziert sich die Maximallänge von 40/100 GbE auf 100 m für OM3 und 150 m für OM4, mit jeweiligen maximalen Steckerverlusten von 1.5 dB und 1 dB. Das Dämpfungsbudget im Vergleich zu 10 GbE zeigt Abbildung 3. Steckerverluste von 2 dB erlauben hier also nur noch eine Kanallänge von lediglich 75 m.

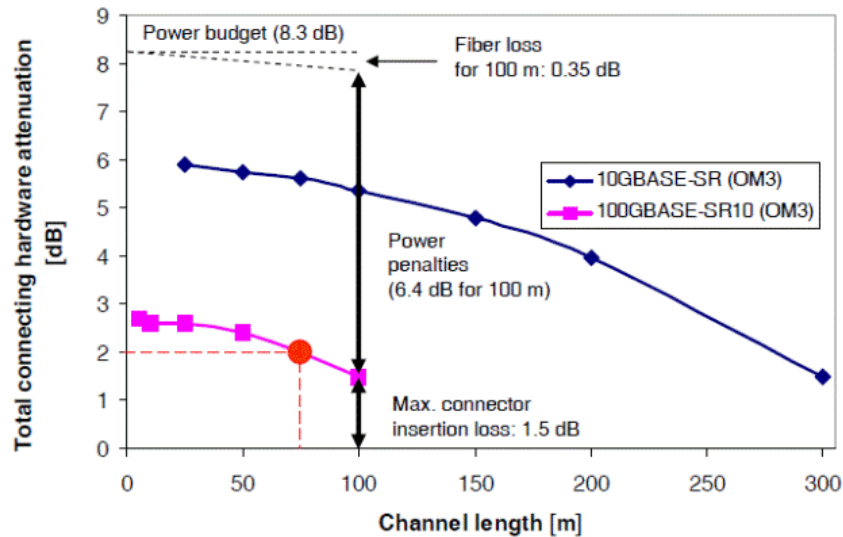


Abb. 3: Gesamt-Dämpfungsbudget für 40/100 GbE und im Vergleich zu 10 GbE. Ein Kanal mit Steckerverlusten von 2 dB dürfte nur noch 75 m lang sein. Bei der rosa Kurve für 40GBASE-SR4/100GBASE-SR10 handelt es sich um eine Simulation, welche auf dem 10G Ethernet Modell der IEEE basiert. Die Werte sind folglich noch nicht standardisiert.

Für einen 40G oder 100G Kanal mit OM3 Faser, welcher über 100 m reichen soll bliebe somit eine maximale Einfügedämpfung der Steckverbindungen von 1.5 dB.

2. Planung der Kanalverluste

Für die nachfolgenden Betrachtungen soll im ersten Ansatz eine einfache Strecke für 10 GbE bestehend aus zwei MPO- und zwei LC-Steckverbindungen über 300 m OM3 Faser betrachtet werden. Die maximalen Steckerverluste betragen in diesem Fall, nach Abbildung 2, 1.5 dB. Folgende Grafik zeigt den Anwendungsfall:



Abb. 4: 10 GbE-Kanal mit zwei MPO- und zwei LC-Steckverbindungen.

Für die beiden Steckertypen werden folgende Daten angenommen:

	Mittlere Dämpfung pro Stecker (dB)	Standardabweichung pro Stecker (dB)	Maximale Dämpfung pro Stecker (dB)
MPO/MTP Elite (Grade C_M)	0.20	0.09	0.60
LC (Grade B_M)	0.15	0.06	0.50

Tab. 1: Dämpfungswerte für MPO/MTP- und LC-Stecker, welche auf den R&M multimode Grades basieren.

Die Gesamtdämpfung für alle Steckverbindungen innerhalb eines Kanals kann auf drei Arten ermittelt werden.

- **Maximale Dämpfungswerte**
- **Statistische Dämpfungswerte**
- **Monte Carlo Simulation**

Diese drei Arten werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

2.1. Maximale Dämpfungswerte

Bei der Methode der *maximalen Dämpfungswerte* werden einfach die maximalen Dämpfungswerte aller Stecker eines Kanals addiert. Im Beispiel nach Tab. 1 folgt dann:

	Maximale Dämpfung pro Stecker (dB)	Anzahl Stecker	Maximale Dämpfung (dB)
MPO/MTP Elite	0.60	2	1.20
LC	0.50	2	1.00
Dämpfung Kanal			2.20

Tab. 2: Gesamtdämpfungswert für den Kanal.

Die maximal zulässige Dämpfung wäre um 0.7 dB überschritten und der Link somit nicht realisierbar.

2.2. Statistische Dämpfungswerte

Während die Methode mit den *maximalen Dämpfungswerte* lediglich einen groben Anhaltspunkt für das Dämpfungsbudget liefert, kann mittels *statistischer Dämpfungswerte* eine deutlich differenziertere Aussage getroffen werden.

Eine gebräuchliche Formel zur Berechnung des Dämpfungswertes ist „Mean + 3σ“. Durch die Addition der mittleren Dämpfung und der dreifachen Standardabweichung werden 99,7% aller zu erwartenden Verluste erfasst. Diese Vorgehensweise beruht allerdings auf der Annahme normalverteilter Steckerverluste.

Die Standardabweichung für mehr als einen Stecker berechnet sich nach der Formel: $\sigma_n = \sqrt{n \times \sigma^2}$ (n = Anzahl der Stecker). Im Beispiel nach Tab. 2 folgt dann:

	Mittlere Dämpfung pro Stecker (dB)	Standardabweichung pro Stecker (dB)	Mean + 3σ	Anzahl Stecker	Statistische Dämpfung (dB)
MTP/MPO Elite	0.20	0.09	0.58	2	0.58
LC	0.15	0.06	0.40	2	0.40
Dämpfung Kanal					0.98

Tab. 3: Gesamtdämpfungswert für den Kanal nach der statistischen Methode.

Somit würde nach der statistischen Berechnungsmethode das Dämpfungsbudget bei weitem nicht ausgenutzt und der Link wäre realisierbar.

2.3. Monte Carlo Simulation

Die *Monte Carlo Simulation* ist ein Verfahren, bei dem mit Hilfe von Algorithmen das Verhalten physikalischer und mathematischer Systeme simuliert wird. Während das „Mean + 3 σ “-Verfahren realistischere Werte liefert als das Aufaddieren der maximalen Dämpfungswerte, vereinfacht es durch die Annahme normalverteilter Verluste bei den Komponenten dennoch zu stark. Gleichzeitig richtet es sich nach den durch die R&M multimode Grades garantierten Verlusten und nicht auf den tatsächlichen Messwerten einer Steckerfamilie. Tatsächlich fallen diese optischen Verluste in der Realität geringer aus. Zudem findet sich bei optischen Komponenten eine Gammaverteilung mit einer Verschiebung zu den geringeren Werten hin. Abbildung 5 zeigt die beiden Verteilungskurven.

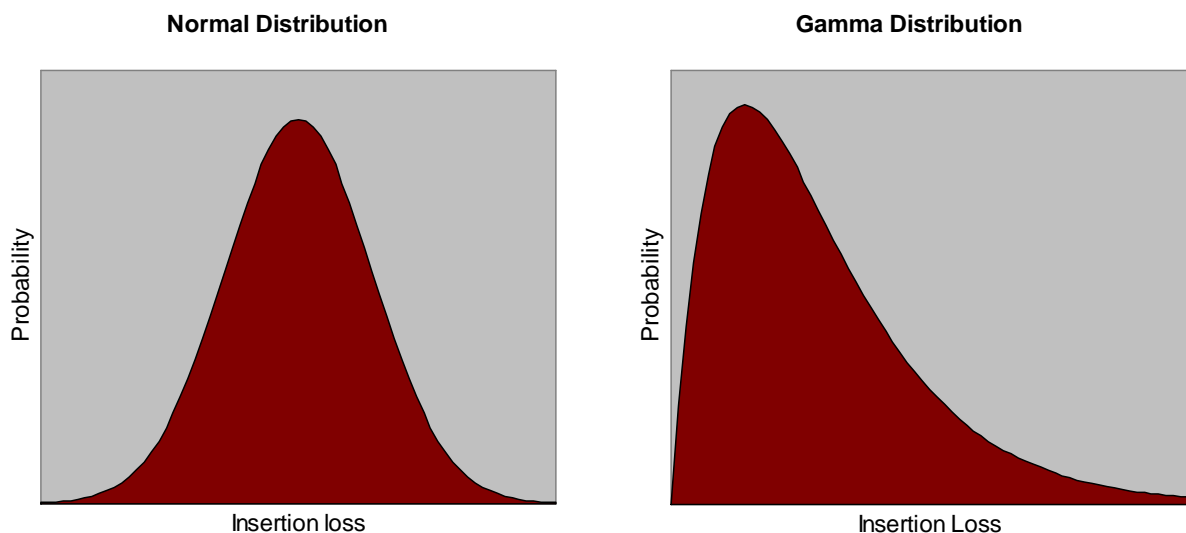


Abb. 5: Normalverteilung (links) und Gammaverteilung (rechts), wie sie bei optischen Komponenten zu finden ist.

Für diese Vorgehensweise werden experimentell ermittelte Verteilungen der Steckerverluste verwendet, die sich auf die „random mated“-Messmethode beziehen. Diese Verteilung wird mathematisch modelliert und möglichst präzise an die gemessenen Daten angepasst. Anschliessend werden die kombinierten Einfügedämpfungen aus zwei LC- und zwei MPO-Verbindungen mittels wiederholter simulierter Stichproben berechnet. Nach 10.000 Simulationen findet sich eine Verteilungskurve wie in Abbildung 6 dargestellt.

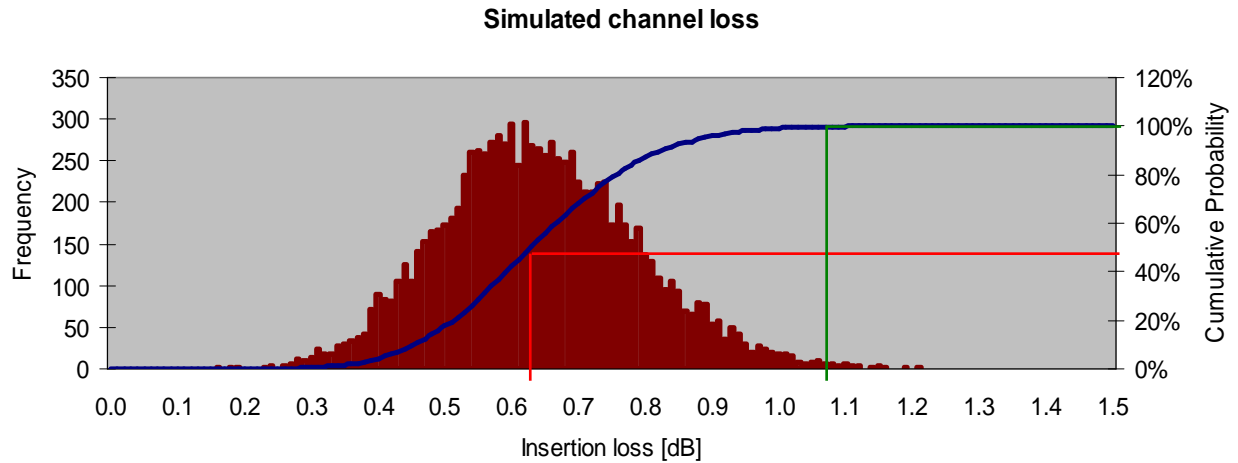


Abb. 6: Ergebnis einer Monte Carlo Simulation: Wahrscheinlichkeitsdichte (dunkelrot) und Verteilungsfunktion der Dämpfungswerte (blau). Mit einer Wahrscheinlichkeit 50% sind die Kanalverluste für zwei LC und zwei MPO Steckverbindungen 0.63 dB oder geringer (rot), und mit einer Wahrscheinlichkeit von 99,7% sind die Verluste 1.07 dB oder geringer (grün).

2.4. Vergleich der Methoden

Nachfolgende Tabelle stellt nochmals die Ergebnisse aus allen drei Verfahren gegenüber:

	Maximale Dämpfung (dB)	Statistische Dämpfung (dB)	Monte Carlo Simulation (dB)
Kanalverluste (Verbindungen)	2.20	0.98	1.07

Tab. 4: Gesamtdämpfungswerte im Vergleich.

Wie sofort zu erkennen ist, liegt das Ergebnis für das Aufaddieren der Maximalwerte so weit entfernt von realistisch zu erwartenden Resultaten, dass mit dieser Methode noch nicht mal eine grobe Abschätzung sinnvoll ist. Wo mit den maximalen Dämpfungswerten ein Link bereits verworfen werden könnte, erlauben die statistische Methode nach Mean + 3 σ oder die Monte Carlo Simulation eine realistischere Einschätzung der Verluste. Die Monte Carlo Simulation liefert leicht höhere Verluste, da sie die gammaverteilte Natur der Steckerverluste berücksichtigt und somit den geringen Anteil höherer Verluste mit einbezieht.

Somit können Netzwerkplaner relativ sicher die maximale Anzahl von Steckverbindungen in einem Kanal berechnen. Da die Bestimmung der Dämpfungsbudgets ein wichtiger Schritt innerhalb der Planung optischer Netzwerke ist, sollten die dafür Verantwortlichen daher unbedingt eine dieser beiden Methoden verwenden.

3. Literatur

- [1] EN 50173-5, „Information technology – Generic cabling systems – Part 5: Data centres,“ European Committee for Electrotechnical Standardization, Brussels (May 2007).
- [2] IEEE Std 802.3ae, “IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements Part 3: Carrier sense multiple access with collision detection (CSMA/CD) access method and physical layer specifications, Section Four: 10 Gb/s Operation,“ Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York (2008).
- [3] IEEE Std 802.3ba, “IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements Part 3: Carrier sense multiple access with collision detection (CSMA/CD) access method and physical layer specifications, Amendment 4: Media Access Control Parameter, Physical Layers and Management Parameters for 40 Gb/s and 100 Gb/s Operation,“ Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York (June, 2010).