

PMD erkennen und beseitigen



EXFO PMD-Analysatoren auch ortsauflösend

PMD kann nicht einfach kompensiert werden und ist daher eine große Hürde bei Übertragungen mit hohen Datenraten. Die bestehenden LWL-Netze sind oft gewachsene Strukturen. Das führt zu einem Mix von hohen und niedrigen PMD-Raten auf einer Übertragungsstrecke. Daher ist es ein großer (Kosten-) Vorteil zu lokalisieren, wo genau hohe PMD auftritt. Nur kritische Abschnitte müssen erneuert werden.

Messtechnik für alle (Netz-) Ebenen



EXFO OTDR, OSA und Netzwerkprotokollmesstechnik

Innovative Messtechnik zeichnet sich dadurch aus, dass sie sich steigenden Anforderungen anpasst. Deshalb macht es Sinn, modulare Systeme einzusetzen.

EXFO hat das verstanden und bietet mit Grundgeräten, die Module für alle Layer aufnehmen, die besten Voraussetzungen.

Die aktuellen Module für Protokollmesstechnik bieten darüber hinaus die Möglichkeit, sogar die Transceiver-Slots separat zu tauschen.

So bleiben Ihre Investitionen geschützt.

Ihr Lösungsanbieter für optische Spleiss- & Messtechnik

Grundlagen der Polarisationsmodendispersion und der PMD-Messung

1 Physikalische Grundlagen

Die Impulsverbreiterung durch [Polarisationsmodendispersion](#) ist ein statistisches Phänomen: Die Impulsbreite schwankt im Mikrosekundenbereich. Nachfolgend wird geklärt, wie man dennoch eine stabile Übertragung realisieren kann.

Das Licht ist gekennzeichnet durch Amplitude und Phase. Die Phase beeinflusst den Polarisationszustand. Das menschliche Auge kann nur das komplexe Betragsquadrat des Lichtes registrieren: die Intensität (Helligkeit).

Die Phase des Lichts kann nicht wahrgenommen werden. Auch Empfängerdioden registrieren nur die Helligkeit des Lichts. Es gibt Lebewesen (zum Beispiel der Tintenfisch), die auch den Polarisationszustand des Lichts wahrnehmen können.

Das Licht ist eine elektromagnetische Welle. Es schwingt senkrecht zur Ausbreitungsrichtung (z-Achse). Die Welle besteht aus einem waagrecht (x-Komponente: rot) und einem senkrecht (y-Komponente: blau) schwingenden Anteil (Bild 1).

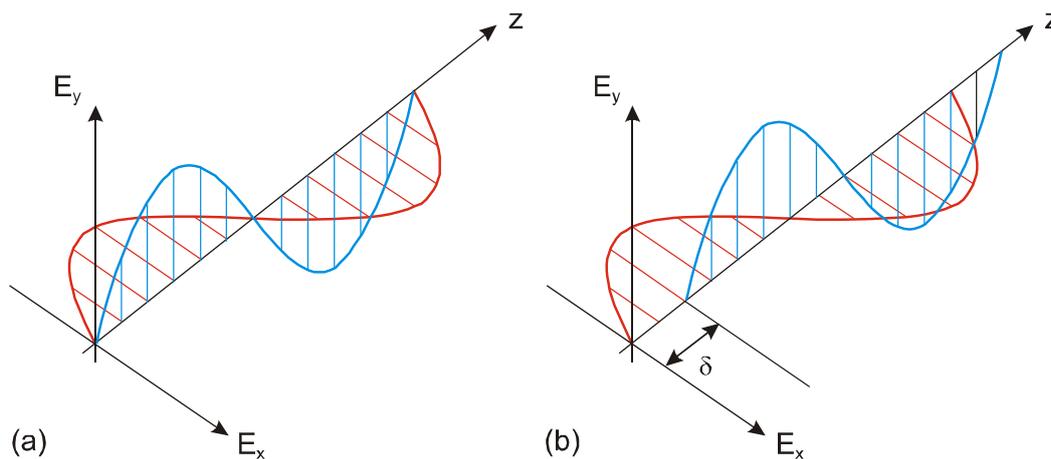


Bild 1: Räumlich Darstellung der elektromagnetischen Welle (a) Phasendifferenz 0; (b) Phasendifferenz δ

Die beiden Anteile überlagern sich. Die Phasendifferenz beeinflusst den Polarisationszustand. Blickt man in Ausbreitungsrichtung, beschreibt der Vektor die Bahn einer Geraden, eines Kreises bzw. einer Ellipse (Bild 2).

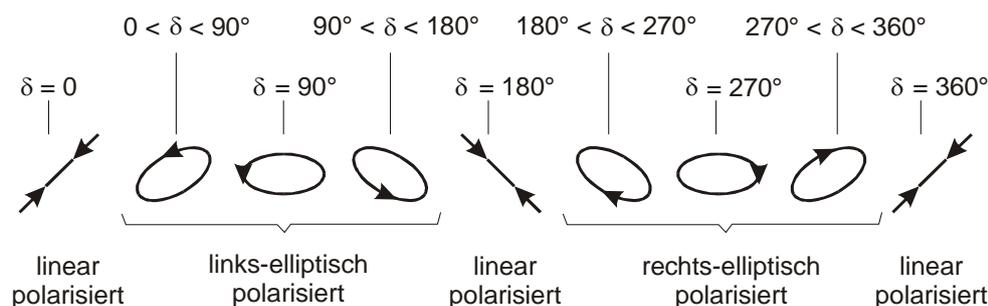


Bild 2: Polarisationszustände in Abhängigkeit von der Phasendifferenz δ

2 Der PMD-Effekt

Das Licht im Singlemode-LWL besteht nicht aus einer Mode, sondern aus zwei senkrecht zueinander schwingenden Anteilen (Bild 1).

Durch lokale, zufällige und zur Achse asymmetrische Mechanismen wird die radiale Symmetrie des Brechzahlprofils zerstört und der Lichtwellenleiter wird doppelbrechend. Die Brechzahlen unterscheiden sich in den beiden Schwingungsebenen und schwanken entlang der Strecke. Es gibt unterschiedliche Effekte, die diese Unregelmäßigkeiten verursachen:

Intrinsische Effekte (infolge Faserherstellung):

- Bild 3 (a): mechanische Beanspruchung des Faserkerns
- Bild 3 (b): Kern-Mantel-Exzentrizität (im Bild stark übertrieben dargestellt)
- Bild 3 (c): Kern bzw. Mantel sind nicht rotationssymmetrisch
- innere Spannungen (zum Beispiel durch Einfärben)

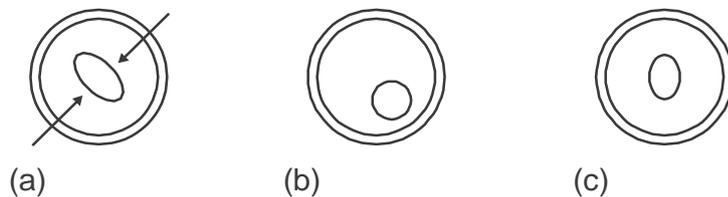


Bild 3 (a), (b), (c): Intrinsische Effekte als Ursachen für die PMD

Extrinsische Effekte (infolge Verkabelung bzw. Verlegung):

- Bild 4 (d): Torsion
- Bild 4 (e): mechanischen Beanspruchung der Faser
- Bild 4 (f): Biegung
- Dehnung

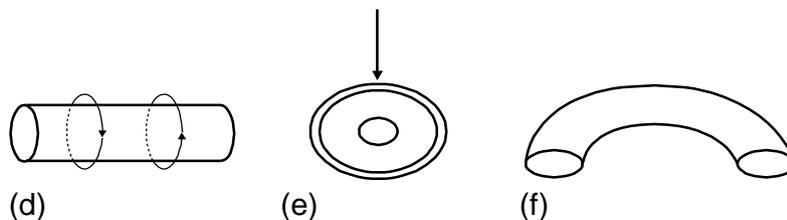


Bild 3 (d), (e), (f): Extrinsische Effekte als Ursachen für die PMD

Durch die Schwankungen der Brechzahl haben die beiden Moden unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeiten, die sich rasch statistisch ändern. Die Polarisationsmodendispersion wächst nicht proportional zur Streckenlänge, sondern lediglich proportional zur Wurzel der Länge an (Gleichung (2)). Ursache ist eine starke Kopplung zwischen dem senkrecht und dem waagrecht schwingenden Anteil. Die Laufzeitunterschiede werden dadurch verringert.

Das Zusammenspiel zwischen [Doppelbrechung](#) und Modenkopplung führt zur Polarisationsmodendispersion. Der Laufzeitunterschied zwischen den beiden orthogonalen Hauptzuständen der Polarisation ([PSP](#)) ist die Differenzgruppenlaufzeit ([DGD](#): Differential Group Delay $\Delta\tau$ in ps; Bild 4).

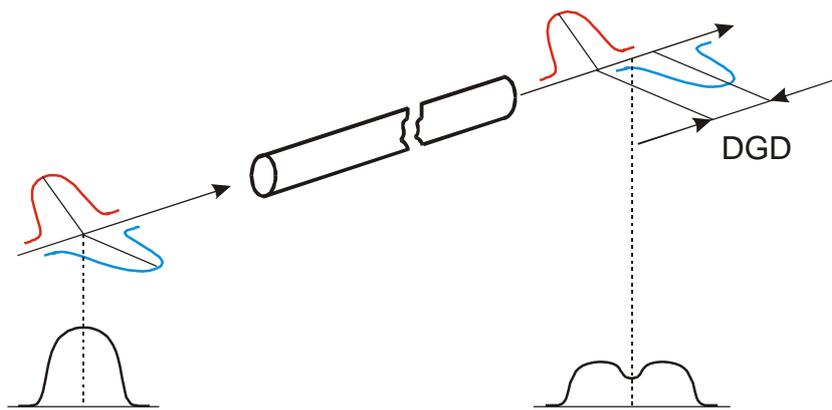


Bild 4: PMD-Effekt in der Singlemode-Faser

Die Differenzgruppenlaufzeit ist eine statistische Größe, die in Abhängigkeit von der Wellenlänge und der Zeit fluktuiert.

Beispiel: In Bild 5 ist die DGD bei 1550 nm sehr klein (dunkelblau gekennzeichnet). Es bringt aber nichts, bei dieser Wellenlänge besonders hohe Datenraten zu übertragen, weil die Differenzgruppenlaufzeit in Abhängigkeit von der Zeit alle möglichen Farben durchlaufen, also auch größere DGD-Werte annehmen, kann.

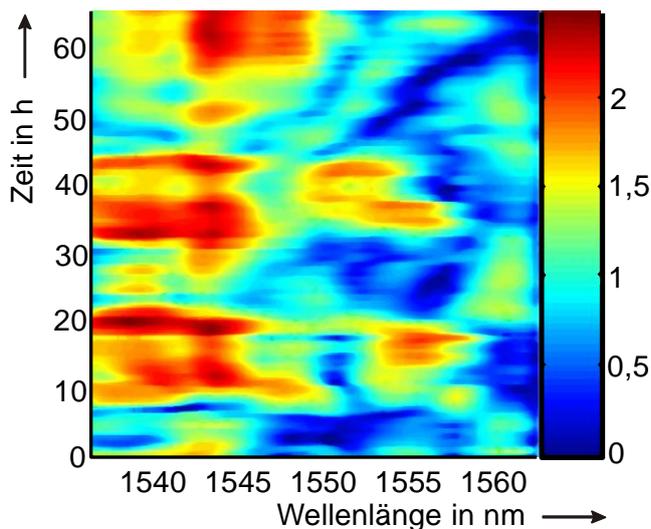


Bild 5: Differenzgruppenlaufzeit in Abhängigkeit von der Wellenlänge (C-Band) und der Zeit; rechte Säule: DGD in ps (Quelle: T-Systems/Adaptif)

Die meisten PMD-Feldmessgeräte arbeiten mit einem breitbandigen Sender und benötigen eine endliche Messzeit. Das Messergebnis ist der zeitliche und spektrale **Mittelwert** der Differenzgruppenlaufzeit.

Bezeichnung: PMD-Delay („PMD-Verzögerung“), Erwartungswert (Mittelwert) der Polarisationsmodendispersion $\langle \Delta\tau \rangle$ in ps, **PMD-Wert**. Der statistische Charakter der Polarisationsmodendispersion kann mit dieser Messtechnik nicht nachvollzogen werden!

Zur Planung benötigt man einen Parameter, der den Laufzeitunterschied in der Faser durch die Polarisationsmodendispersion in Abhängigkeit von der Länge beschreibt: **PMD-Koeffizient erster Ordnung PMD_1** . Das ist ein Materialparameter, der im Datenblatt spezifiziert wird:

- Bei **schwacher** Modenkopplung (polarisationserhaltende Faser) gilt:
$$\text{PMD}_1 = \langle \Delta\tau \rangle / L \text{ in ps/km} \quad (1)$$

- Bei **starker** Modenkopplung (Telekommunikationsfaser) gilt:
$$\text{PMD}_1 = \langle \Delta\tau \rangle / \sqrt{L} \text{ in ps} / \sqrt{\text{km}} \quad (2)$$

Der PMD-Wert $\langle \Delta\tau \rangle$ lässt sich abschätzen, wenn der PMD-Koeffizient PMD_1 (und die Faserlänge L) bekannt sind.

Die Polarisationsmodendispersion zweiter Ordnung PMD_2 kann ab 40 Gbit/s eine Rolle spielen. Sie ist ein Maß für die Änderung des PMD-Vektors mit der Wellenlänge. Polarisationsmodendispersion zweiter Ordnung äußert sich in der „Depolarisation“ und der „Polarization Chromatic Dispersion ([PCD](#))“.

Die polarisationsabhängige chromatische Dispersion (PCD) hat die gleiche Maßeinheit wie der [Koeffizient der chromatischen Dispersion](#). Sie kann einen zufälligen, sich ändernden Beitrag zur chromatischen Dispersion bringen.

3 Der statistische Charakter der Polarisationsmodendispersion

Wenn man in der Lage wäre, im Mikrosekundenbereich (bei einer bestimmten Wellenlänge) zu messen würde man einen Verlauf entsprechend Bild 6 erhalten. Die Differenzgruppenlaufzeit folgt einer Maxwell-Verteilung: Wahrscheinlichkeit 0 für $\Delta\tau = 0$; stark abfallende Wahrscheinlichkeiten für große $\Delta\tau$ -Werte.

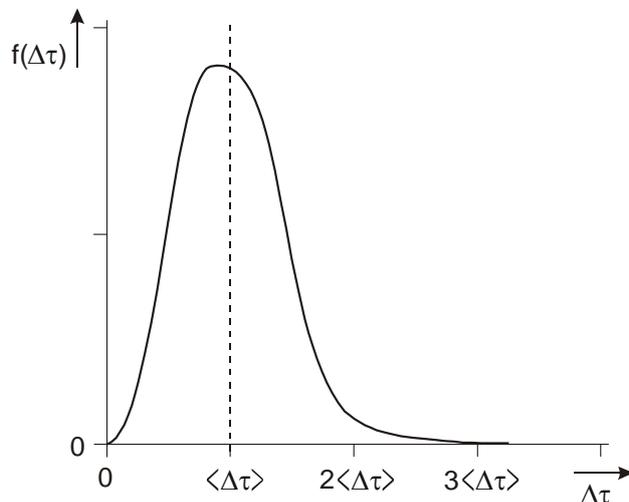


Bild 6: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion $f(\Delta\tau)$ der Differenzgruppenlaufzeit

Eine Maxwellverteilung entsteht nur:

- bei hinreichend langen Strecken (≥ 1 km)
- bei hinreichend großen PMD-Werten (≥ 1 ps)
- bei starker Modenkopplung (Telekommunikationsfasern)

Eine Impulsverbreiterung um $3/10$ der Bitdauer (Bitlänge) T_{bit} bewirkt bei [NRZ](#)-Modulation eine Leistungseinbuße ([Power Penalty](#)) am Empfänger von maximal 1 dB, wenn die Leistung beider Polarisationsmoden gleich groß ist (Worst Case). Dieser Wert wird als Grenze festgelegt (R : Datenrate):

$$\Delta\tau_{\text{Grenz}} = \frac{3 \cdot T_{\text{bit}}}{10} = \frac{3}{10 \cdot R} \quad (3)$$

Die maximal zulässige Impulsverbreiterung muss Schwankungen der Differenzgruppenlaufzeit tolerieren. Setzt man $\Delta\tau_{\text{Grenz}} = \langle \Delta\tau \rangle$, dem Mittelwert der Polarisationsmodendispersion (senkrechte gestrichelte Linie in Bild 6), wird in 50 % der Fälle die zulässige Impulsverbreiterung überschritten. Setzt man $\Delta\tau_{\text{Grenz}} = 2\langle \Delta\tau \rangle$, liegt die Überschreitungswahrscheinlichkeit noch bei einigen Prozent (Bild 6).

Die zulässige Impulsverbreiterung wird so festgelegt, dass sie mit einer äußerst geringen Wahrscheinlichkeit überschritten wird. Der Statistik trägt man Rechnung, indem man fordert, dass der Grenzwert $\Delta\tau_{\text{Grenz}}$ deutlich größer als der PMD-Wert ist.

Die Wahrscheinlichkeit, dass das **Dreifache** des PMD-Wertes überschritten wird, beträgt $4,2 \cdot 10^{-5}$. Daraus ergibt sich für den zulässigen Grenzwert der Impulsverbreiterung (ITU-T G.691): $\Delta\tau_{\text{Grenz}} = 3\langle \Delta\tau \rangle$. Mit Gleichung (3) erhält man:

$$\langle \Delta\tau \rangle = \frac{T_{\text{bit}}}{10} = \frac{1}{10 \cdot R} \quad (4)$$

Der PMD-Wert darf 1/10 der Bitdauer (Bitlänge) nicht überschreiten. Für Telekommunikationsfasern gilt entsprechend Gleichung (2) für den PMD-Wert:

$$\langle \Delta\tau \rangle = \sqrt{L} \cdot \text{PMD}_1 \quad (5)$$

Durch Gleichsetzen erhält man für die Längenbegrenzung durch Polarisationsmodendispersion (gilt für herkömmliche NRZ-Modulation):

$$L \leq \frac{1}{100 \cdot R^2 \cdot \text{PMD}_1^2} \quad (6)$$

Die Längenbegrenzung durch Polarisationsmodendispersion reduziert sich umgekehrt proportional zum **Quadrat der Datenrate** und umgekehrt proportional zum **Quadrat des PMD-Koeffizienten**.

Beim Übergang zur nächst höheren Hierarchiestufe, zum Beispiel von 2,5 Gbit/s auf 10 Gbit/s reduziert sich die Länge auf 1/16. Bei 2,5 Gbit/s bereitet die Polarisationsmodendispersion noch keine Probleme, bei 10 Gbit/s kann sie schon begrenzend wirken.

Die quadratische Abhängigkeit der Streckenlänge vom PMD-Koeffizienten zeigt, wie wichtig die Auswahl einer Faser **mit möglichst kleinem PMD-Koeffizienten** ist.

Allgemeiner kann man Gleichung (6) folgendermaßen schreiben:

$$L \leq \left(\frac{\text{const.}}{R \cdot \text{PMD}_1} \right)^2 \quad (7)$$

Für const. = 0,1 ergibt sich Gleichung (6). Bei **modernen Modulationsverfahren** (Return-to-Zero ([RZ](#)), Duobinary ([DB](#)), Differential Quarternary Phase Shift Keying ([DQPSK](#)),...) ist const. größer: größere Streckenlängen sind überbrückbar.

Eine PMD-Kompensation ist aufwändig und kostenintensiv, weil sich der Polarisationszustand zufällig mit der Zeit und der Wellenlänge ändert. Darüber hinaus muss in Wellenlängenmultiplex-Systemen jeder Kanal einzeln kompensiert werden.

Man sollte im Vorfeld alles tun, dass eine PMD-Kompensation **nicht** erforderlich ist:

- Fasern und Komponenten mit minimaler Polarisationsmodendispersion einsetzen.
- Identifizieren und ersetzen schlechter Faserabschnitte. Das ist möglich mit einem orts aufgelösten PMD-Messgerät ([PMD-OTDR](#)).
- Moderne Modulationsverfahren, zum Beispiel kohärente Modulation.

Mit Gleichung (4) und (6) erhält man für NRZ-Modulation die Werte in Tabelle 1. Für moderne Modulationsverfahren gelten andere Werte, vergleiche „Understanding PMD Specifications in New Advanced Very High-Speed Networks“ (EXFO White Paper).

Datenrate R in Gbit/s	Bitdauer T _{bit} in ps	maximal zulässiger PMD-Wert $\langle \Delta\tau \rangle$ in ps	zulässiger PMD-Koeffizient bei 400 km Streckenlänge in ps/ $\sqrt{\text{km}}$
2,5	400	40	2
10	100	10	0,5
40	25	2,5	0,125
100	10	1	0,05

Tabelle 1: Maximal zulässige PMD-Werte $\langle \Delta\tau \rangle$ und PMD-Koeffizienten für unterschiedliche Datenraten R

Fordert man eine geringere Wahrscheinlichkeit für die Überschreitung des Grenzwertes $\Delta\tau_{\text{Grenz}}$ muss gelten (Tabelle 2):

Verhältnis des Grenzwertes $\Delta\tau_{\text{Grenz}}$ zum Mittelwert $\langle \Delta\tau \rangle$	Wahrscheinlichkeit für die Überschreitung des Grenzwertes	Ausfallzeit innerhalb eines Jahres
3,0	$4,2 \cdot 10^{-5}$	22 Minuten
3,5	$7,7 \cdot 10^{-7}$	24 Sekunden
4,0	$7,4 \cdot 10^{-9}$	0,23 Sekunden

Tabelle 2: Ausfallzeiten in Abhängigkeit von der Überschreitungswahrscheinlichkeit

zulässiger PMD-Wert $\langle \Delta\tau \rangle$	Wahrscheinlichkeit für die Überschreitung des Grenzwertes
30 ps : 3 = 10 ps	$4,2 \cdot 10^{-5}$
30 ps : 3,5 = 8,6 ps	$7,7 \cdot 10^{-7}$
30 ps : 4 = 7,5 ps	$7,4 \cdot 10^{-9}$

Tabelle 3: Zulässiger PMD-Wert in Abhängigkeit von der Überschreitungswahrscheinlichkeit

Daraus ergeben sich die maximal zulässigen PMD-Werte entsprechend Tabelle 3 (im Fall von 10 Gbit/s-NRZ-Modulation).

Man erkennt, dass sich die Überschreitungswahrscheinlichkeit um fast vier Zehnerpotenzen reduziert, wenn man den PMD-Wert um lediglich 25 % (von 10 ps auf 7,5 ps) verringert.

4 Polarisationsmodendispersion in alten und modernen Lichtwellenleitern

Bis zum Jahr 1994 wurden die Fasern bezüglich des PMD-Koeffizienten nicht spezifiziert und die PMD wurde nicht minimiert, weil der PMD-Effekt nicht bekannt war.

Ältere Fasern haben einen relativ großen PMD-Koeffizienten, der sich mit den Umgebungsbedingungen ändern und sich stark von Faser zu Faser innerhalb des Kabels und zwischen aufgetrommelten und verlegten Lichtwellenleitern unterscheiden kann.

Die Deutsche Telekom hat schon sehr zeitig Singlemode-LWL in großem Umfang verlegt, so dass genügend Fasern für eine umfassende Charakterisierung der PMD-Koeffizienten zur Verfügung standen (H.-J. Tessmann u.a.: „Measurements of PMD in the installed fiber plant of Deutsche Telekom“; 14.08.2003):

- Fasern verlegt bis 1991: 0,32 ps/ $\sqrt{\text{km}}$
- Fasern verlegt von 1992 bis 1998: 0,13 ps/ $\sqrt{\text{km}}$
- Fasern verlegt von 1999 bis 2003: 0,052 ps/ $\sqrt{\text{km}}$
- Fasern verlegt von 2004 bis heute: noch kleinere PMD-Koeffizienten

Tabelle 4 zeigt die Häufigkeiten bestimmter PMD-Koeffizienten (Zeitraum bis 2003):

- Über 91,6 % der Strecken können 10 Gbit/s bis 400 km übertragen werden.
- Über 71,6 % der Strecken können 40 Gbit/s bis 400 km übertragen werden.
- Über 53,7 % der Strecken können 100 Gbit/s bis 160 km übertragen werden.

Häufigkeit	99,7 %	98,5 %	91,6 %	86,8 %	71,6 %	53,7 %
PMD-Koeffizient in ps/ $\sqrt{\text{km}} \leq$	2,0	1,26	0,5	0,316	0,125	0,079
Längenbegrenzung bei 10 Gbit/s	25	100	400	1000	6400	16.000
Längenbegrenzung bei 40 Gbit/s	1,56	6,25	25	62,5	400	1000
Längenbegrenzung bei 100 Gbit/s	0,25	1	4	10	64	160

Tabelle 4: Gemessene PMD-Koeffizienten und realisierbare Streckenlängen in Abhängigkeit von der Häufigkeit

Die PMD-Koeffizienten älterer Fasern haben eine große Schwankungsbreite. Sie können kleine, aber auch sehr große Werte annehmen. Anders als beim CD-Koeffizient ist der PMD-Koeffizient nicht determiniert. Er ist ein Qualitätsparameter der Faser.

Seit der PMD-Effekt bekannt ist, hat man die Faserproduktion optimiert, um kleine PMD-Koeffizienten zu erreichen. Das wird möglich durch Sicherung einer geometrischen und optischen zirkularen Geometrie und Minimierung von Spannungen in der Faser.

Durch Drehen der Faser während des Ziehens wird eine starke Kopplung zwischen den Moden erzwungen. Das führt zur Verringerung der absoluten Werte und der Streuung der Polarisationsmodendispersion.

Folgende PMD-Koeffizienten ([PMD-Konstruktionswert \$PMD_Q\$](#) : PMD-Koeffizient einer langen Strecke bestehend aus vielen Faserabschnitten; vergleiche Abschnitt 7) wurden standardisiert:

- Forderung laut [ITU-T](#) G.652.A, C; G.653.A; G.654.A; G.657.B:
 $PMD_Q \leq 0,50 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$
- Forderung laut ITU-T G.652.B, D; G.653.B; G.654.B, C, D, E; G.655.C, D, E; G.656; G.657.A: $PMD_Q \leq 0,20 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$.

Tabelle 5 zeigt die realisierbaren Streckenlängen in Abhängigkeit von typischen Datenraten und typischen PMD-Koeffizienten (bei NRZ-Modulation).

Datenrate in Gbit/s	PMD-Koeffizient in $\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$	Maximal realisierbare Streckenlänge in km
2,5	0,5	6.400
	0,2	40.000
	0,04	1.000.000
10	0,5	400
	0,2	2.500
	0,04	62.500
40	0,5	25
	0,2	156
	0,04	3.906
100	0,5	4
	0,2	25
	0,04	625

Tabelle 5: Längenbegrenzung durch Polarisationsmodendispersion in Abhängigkeit von der Datenrate und dem PMD-Koeffizienten

Aus Tabelle 5 ist ersichtlich: Wenn man beste Fasern auswählt ($PMD_Q = 0,04 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$) ist selbst eine Übertragung bei 100 Gbit/s möglich. Allerdings tragen nicht nur die Fasern, sondern auch die optischen Bauelemente auf der Strecke zur Polarisationsmodendispersion bei (Abschnitt 8). Man muss Bauelemente mit möglichst geringen PMD-Werten auswählen.

Tabelle 5 gilt für die Überschreitungswahrscheinlichkeit $4,2 \cdot 10^{-5}$. Bei geringeren Wahrscheinlichkeiten sind die überbrückbaren Streckenlängen geringer, weil die zulässigen PMD-Werte geringer sind. Die Abhängigkeit ist allerdings relativ schwach (vergleiche Beispiele Tabelle 3).

Bei modernen Modulationsverfahren spielt die Polarisationsmodedispersion eine wesentlich geringere Rolle.

Beispiel: Datenrate 100 Gbit/s; PMD-Koeffizient $0,5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$:

- **Herkömmliche NRZ-Modulation.** Zulässiger PMD-Wert: **1 ps** (Tabelle 1); maximal überbrückbare Streckenlänge: **4 km** (Tabelle 5).
- **DP-QPSK.** Zulässiger PMD-Wert: **2,5 ps**; mit Gleichung (5) folgt für die maximale Streckenlänge: **25 km**.
- **DP-QPSK kohärente Modulation.** Zulässiger PMD-Wert: **30 ps**; mit Gleichung (5) folgt für die maximale Streckenlänge: **3.600 km**.

5 Zur Zuverlässigkeit der Messungen

Prinzipiell sind die gemessenen PMD-Werte determiniert. Eine einmalige Abnahmemessung ist ausreichend. Schwankungen werden durch die Statistik berücksichtigt. Es schwankt nur die Differenzgruppenlaufzeit mit der Zeit und der Wellenlänge, jedoch nicht der PMD-Wert. Die erzielbare Reproduzierbarkeit liegt bei $\pm 15 \%$ (G.650.2, Anhang IV).

Bei einer guten Installation sollte die Faser isoliert von Belastungen und mechanischen Spannungen sein. Die Faser liegt lose mit einer bestimmten Überlänge im Kabel. Der PMD-Wert sollte sich durch externe Einflüsse nicht verändern. Dennoch sind langfristige Beeinflussungen denkbar:

- tages- und jahreszeitliche Temperaturschwankungen
- hochfrequente Schwingungen durch einen vorbeifahrenden Zug
- Einfluss von Wind auf Luftkabel

Moderne Messtechnik bietet die Möglichkeit einer Langzeitüberwachung, um eine Drift zu erkennen.

6 Von der Faser-PMD zur Strecken-PMD

Die Faserhersteller geben die PMD-Koeffizienten der einzelnen Fasern an. Der Planer des Übertragungssystems muss die Polarisationsmodendispersion der gesamten Strecke kennen. Für die Ermittlung der Dispersion ist die Streckenlänge maßgebend, über die durchgängig eine optische Übertragung erfolgt.

Das Zusammenspleißen der einzelnen Faserabschnitte bewirkt einen PMD-Wert der Strecke $\langle \Delta\tau_{\text{Strecke}} \rangle$. Dieser ergibt sich nicht einfach aus der Summe der PMD-Werte $\langle \Delta\tau_i \rangle$ der einzelnen Teilstücke, sondern berechnet sich wegen der starken Modenkopplung folgendermaßen:

$$\langle \Delta\tau_{\text{Strecke}} \rangle = \sqrt{\sum_i \langle \Delta\tau_i \rangle^2} \quad (8)$$

Ersetzt man $\langle \Delta\tau \rangle$ in Gleichung (8) durch Gleichung (5), lässt sich ein PMD-Koeffizient $\text{PMD}_1^{\text{Strecke}}$ der Gesamtstrecke aus den PMD-Koeffizienten PMD_1^i der Streckenabschnitte mit den Längen L_i durch quadratische Mittelwertbildung berechnen:

$$\text{PMD}_1^{\text{Strecke}} = \frac{\sqrt{\sum_i [L_i \cdot (\text{PMD}_1^i)^2]}}{\sqrt{L}} \quad (9)$$

Bei bekannten PMD-Koeffizienten und bekannte Längen der Streckenabschnitte kann der PMD-Koeffizient der gesamten Strecke abgeschätzt werden.

Beispiel: Zehn Strecken gleicher Länge, neun Abschnitte mit guten PMD-Koeffizienten ($\text{PMD}_1^{1\dots 9} = 0,2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$), ein Abschnitt mit schlechtem PMD-Koeffizient ($\text{PMD}_1^{10} = 2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$). Mit Gleichung (9) ergibt sich $\text{PMD}_1^{\text{Strecke}} = 0,66 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$.

Eine lineare Mittelwertbildung würde einen kleineren PMD-Koeffizienten ergeben: $\text{PMD}_1^{\text{Strecke}} = 0,38 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$. **Ein einziger schlechter Faserabschnitt kann die Polarisationsmodendispersion der Strecke beträchtlich verschlechtern!**

Der PMD-Wert des Gesamtsystems $\langle \Delta\tau_{\text{Total}} \rangle$ wird sinngemäß zu Gleichung (8) berechnet:

$$\langle \Delta\tau_{\text{Total}} \rangle = \sqrt{\langle \Delta\tau_{\text{Strecke}} \rangle^2 + \sum_i \langle \Delta\tau_c^i \rangle^2} \quad \text{wobei } \langle \Delta\tau_c^i \rangle \text{ PMD-Wert des } i\text{-ten Teilsystems} \quad (10)$$

7 PMD-Konstruktionswert (**LDV**: Link Design Value)

Werden viele hinreichend lange Faserabschnitte hintereinandergeschaltet, multiplizieren sich die Maxwell-Verteilungen miteinander (Abschnitt 3, Bild 6): Seltene sehr kleine oder sehr große Werte verschwinden. Die statistische Verteilung der Strecken-PMD ist schmäler als die der Faser-PMD.

Die Verteilung wird umso schmäler, je mehr Faserstücke (hinreichender Länge) in der Strecke sind, also je länger die Strecke ist. Die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Ausreißern wird geringer. Um eine bestimmte Wahrscheinlichkeit nicht zu überschreiten, liegt man näher am Mittelwert (Bild 7).

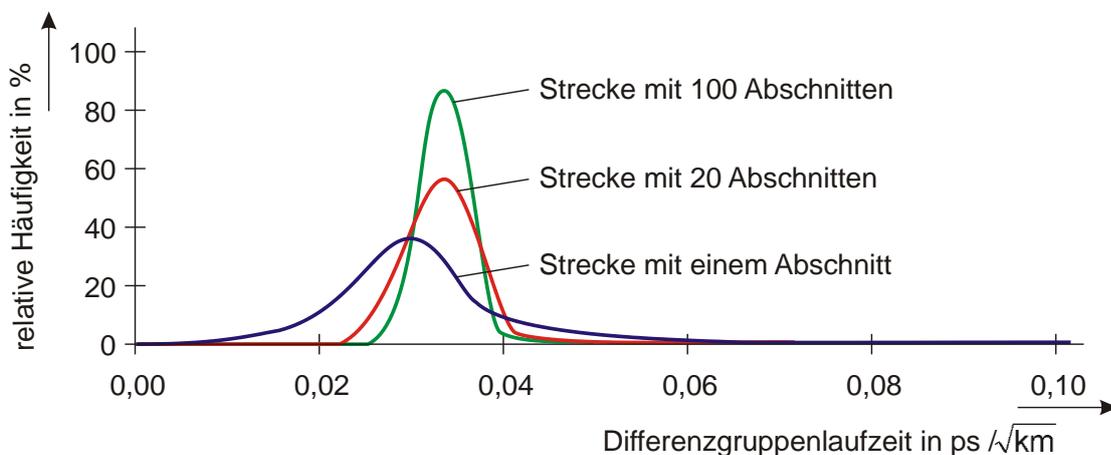


Bild 7: Häufigkeitsverteilung der Differenzgruppenlaufzeit einer Faser und von Strecken mit 20 bzw. 100 Fasern (Quelle: SIECOR)

Während man bei der blauen Kurve beim Dreifachen des Mittelwertes die Wahrscheinlichkeit $4,2 \cdot 10^{-5}$ unterschreitet, ist das bei der roten bzw. grünen Kurve schon beim 1,5- bis Zweifachen möglich. Es kann mit kleineren PMD-Koeffizienten geplant werden.

Zur Definition des PMD-Konstruktionswertes wird eine fiktive Übertragungsstrecke bestehend aus 20 zufällig ausgewählten Faserabschnitten **hinreichender Länge** betrachtet. Der PMD-Konstruktionswert (PMD_Q) ist der PMD-Koeffizient, der von 99,99 % aller Strecken eingehalten wird (ITU-T G.650.2, Anhang 4).

„Hinreichende Länge“ bedeutet, dass der Faserabschnitt so lang sein muss, dass sich eine Maxwellverteilung ausbildet. Im Text unter Bild 6 wurde „hinreichende Länge“ mit mindestens einem Kilometer angegeben. Man erreicht also eine schmalere Wahrscheinlichkeitsverteilung **nicht** dadurch, indem man 20 kurze Faserabschnitte miteinander verspleißt.

Beispiel: Faser eines namhaften Herstellers.

- PMD-Koeffizient: $PMD_1 \leq 0,1 \text{ ps} / \sqrt{\text{km}}$
- PMD-Konstruktionswert: $PMD_Q \leq 0,04 \text{ ps} / \sqrt{\text{km}}$

=> Bei langen Strecken kann mit wesentlich geringeren PMD-Koeffizienten geplant werden.

8 Polarisationsmodendispersion optischer Bauelemente

Es verursachen nicht nur die Fasern, sondern auch die Bauelemente auf der Strecke Polarisationsmodendispersion. Bei starker Modenkopplung (Telekommunikationsfasern) hat der PMD-Koeffizient die Maßeinheit $\text{ps} / \sqrt{\text{km}}$. Bei kurzen LWL-Längen oder bei polarisationserhaltenden Lichtwellenleitern ist die Modenkopplung vernachlässigbar und die Maßeinheit lautet ps/km .

Die Polarisationsmodendispersion optischer Bauelemente hat die Maßeinheit ps , da diese quasi keine Längenausdehnung haben. Tabelle 6 listet einige Beispiele auf.

Bauelement	PMD in ps
SM-LWL, ca. 1 m	$\approx 0,001$
variables optisches Dämpfungsglied	$\approx 0,05$
Isolator	$< 0,3$
Zirkulator	$< 0,1$
Koppler	$< 0,02$
Polarisator	$< 0,02$
Multiplexer/Demultiplexer	$\approx 0,2$
optischer Verstärker (EDFA)	$\approx 0,5$
dispersionskompensierendes Gitter	$< 0,5$
dispersionskompensierende Faser in Abhängigkeit von der Länge	bis 1
wellenlängenselektiver Schalter	≤ 1

Tabelle 6: Beispiele für die Polarisationsmodendispersion von Bauelementen

Die Polarisationsmodendispersion der Übertragungsstrecke wird durch **alle** Elemente beeinflusst (Lichtwellenleiter, optische Komponenten). Für eine zuverlässige Planung sind **alle** PMD-Anteile zu berücksichtigen.

Das ist besonders wichtig in 40 Gbit/s- bzw. 100 Gbit/s-Systemen, wo der PMD-Wert der Strecke maximal 2,5 ps bzw. 1 ps (bei NRZ-Modulation) betragen darf. Ein einzelnes schlechtes Bauelement kann bereits einen beträchtlichen Beitrag bringen. Es sind Bauelemente mit möglichst geringen PMD-Werten auszuwählen.

9 Messung der Polarisationsmodendispersion

9.1 Besonderheiten

Das menschliche Auge kann den Polarisationszustand des Lichts nicht registrieren, da es nicht die Lichtamplitude, sondern nur die Lichtintensität (Betragsquadrat der komplexen Amplitude) erkennt. Auch optische Empfänger reagieren nur auf Intensitäten.

Aufwändige Messverfahren sind erforderlich, um den Polarisationszustand des Lichts bzw. seine Veränderungen beim Durchlaufen des Lichtwellenleiters zu erkennen. Darüber hinaus müssen sehr kleine Laufzeitunterschiede (im Pikosekundenbereich) gemessen werden können (erfordert breitbandigen Empfänger).

9.2 Notwendigkeit der Messung der Polarisationsmodendispersion

Die Messung der Polarisationsmodendispersion ist erforderlich:

- an Lichtwellenleitern von No-Name-Anbietern bei Datenraten ab 2,5 Gbit/s. Derartige Lichtwellenleiter wurden in Deutschland nicht verlegt.
- an herkömmlichen Lichtwellenleitern (Fertigung etwa bis zum Jahr 1995) mit nicht minimiertem unbekanntem PMD-Koeffizienten bei Datenraten ab 10 Gbit/s.
- an Lichtwellenleitern, die während des Telekommunikationsbooms installiert wurden (1998 bis 2001) bei Datenraten ab 10 Gbit/s. In diesem Zeitraum wurden wegen der hohen Nachfrage auch Lichtwellenleiter mit minderer Qualität ausgeliefert.
- an gemischten Strecken (gute und schlechte Fasern) bei Datenraten ab 10 Gbit/s (vergleiche Abschnitt 6).
- an allen LWL-Strecken bei Datenraten größer als 10 Gbit/s.

Fasern, die die chromatische Dispersion kompensieren, bringen einen Beitrag zur Polarisationsmodendispersion (Tabelle 6). Dann ist es sinnvoll, die Polarisationsmodendispersion der Strecke erst nach der CD-Kompensation zu messen.

Bei modernen Modulationsverfahren spielt die Polarisationsmodendispersion eine wesentlich geringere Rolle. Für eine zuverlässige Charakterisierung des Lichtwellenleiters ist dennoch eine PMD-Messung an allen Fasern des Kabels nach der Verlegung sinnvoll, da im Laufe des Lebens des LWL-Kabels (mindestens 30 Jahre) die Anforderungen wachsen (höhere Datenraten). Eine nachträgliche Messung ist aufwändig, da die Fasern dann schon teilweise beschaltet sind.

9.3 Kriterien für die Auswahl der PMD-Messtechnik

Das **Messverfahren** muss eine Messung am **verlegten** Lichtwellenleiter ermöglichen. Es muss ein abgesetzter Betrieb zwischen Sender und Empfänger möglich sein (Feldeinsatz!).

Folgende Parameter bzw. Aspekte sind zu berücksichtigen:

- **Dynamik:** Beschreibt die maximal zulässige Dämpfung des Messobjektes.
- **Messbereich:** Um zu überprüfen, ob die Strecke in Ordnung ist, muss der Messbereich mindestens das Drei- bis Vierfache des zulässigen PMD-Wertes betragen. Der zulässige PMD-Wert beträgt bei NRZ-Modulation beispielsweise maximal 10 ps bei einer Datenrate von 10 Gbit/s. In diesem Fall muss der Messbereich 30 ps bis 40 ps betragen.
- **Messzeit:** Eine geringe Messzeit ist ein wichtiger Kostenfaktor.
- **Automatische Langzeitmessungen** sind empfehlenswert, beispielsweise wenn Kabel schwankenden Umweltbedingungen ausgesetzt sind.
- **Bedienbarkeit/Feldtauglichkeit:** Es gelten die gleichen Anforderungen, wie an die OTDR-Messtechnik.
- **Masse:** Das Messgerät sollte möglichst leicht sein.

Die Auswahl des richtigen Messgeräts hängt vom Messbereich, möglichen Faserbewegungen während der Messung und Feldtauglichkeit ab.

Die meisten Geräte haben ausreichend Dynamik (typisch 47 dB), um sehr lange Strecken messen zu können. Man beachte jedoch, dass in den Datenblättern häufig die günstigsten Werte angegeben werden. Die nutzbare Dynamik verringert sich mit zunehmendem PMD-Wert.

Beispiel: Bei Messung von $\langle \Delta\tau \rangle = 10$ ps stehen 8 dB weniger Dynamik zur Verfügung als bei Messung von $\langle \Delta\tau \rangle = 1$ ps! Allerdings sind so große PMD-Werte sehr selten.

Es gibt eine obere und eine untere Grenze für den PMD-Wert, der gemessen werden kann:

- Falls $\langle \Delta\tau \rangle > 50$ ps, ist die Strecke nicht in Ordnung und der konkrete Wert spielt keine Rolle.
- Falls $\langle \Delta\tau \rangle < 0,1$ ps, ist die Verbindung in Ordnung und der konkrete Wert ist meist nicht so wichtig.

9.4 Messverfahren

Es wurden eine Reihe teils aufwändige Methoden bzw. Verfahren zur Messung der Polarisationsmodendispersion spezifiziert.

ITU-T G.652.2: Definitions and test methods for statistical and non-linear related attributes of single-mode fibre and cable; August 2015:

- Referenzmethode: Stokes parameter evaluation technique ([JME](#) und [PSA](#)).
- erste alternative Methode: State of polarization method ([SOP](#)): zu ungenau; nicht mehr zugelassen.

- zweite alternative Methode: Interferometric method ([TINTY](#) (traditionelle interferometrische Methode) und [GINTY](#) (verallgemeinerte interferometrische Methode)).
- dritte alternative Methode: Fixed analyser technique ([EC](#) (Extremwertzählung), [FT](#) (Fouriertransformation) und [CFT](#) (Kosinus-Fouriertransformation)).

DIN EN 60793-1-48; VDE 0888-248: Lichtwellenleiter – Teil 1-48; Messmethoden und Prüfverfahren – Polarisationsmodendispersion; Juli 2018:

- Anhang A: Messverfahren mit Festanalysator
- Anhang B: Auswertung der Stokesschen Parameter; Referenzprüfverfahren
- Anhang C: Interferometerverfahren ([INTY](#))

9.5 Praktische Hinweise zur PMD-Messung

Das Messgerät muss robust und für den Feldeinsatz geeignet sein. Weder Vor- noch Nachlauf-LWL, wie bei der [OTDR](#)-Messung, sind zulässig, da diese den PMD-Wert beeinflussen. Es kommen höchstens kurze Adapter-LWL zum Einsatz.

Stecker mit hohen Reflexionsdämpfungen einsetzen. Ein Luftspalt im Stecker kann Interferenzeffekte bewirken und das Messergebnis verfälschen. Gegebenenfalls Immersionsgel verwenden (anschließend reinigen!).

Beim verallgemeinerten Interferometerverfahren bleibt das Messergebnis unbeeinflusst von Faserbewegungen.

Durch Verwendung eines Polarisations-Scramblers kann die Messgenauigkeit erhöht werden.

Die PMD-Koeffizienten der aufgetrommelten Faser, des aufgetrommelten Kabels bzw. des verlegten Kabels können sich unterscheiden. Bei modernen Fasern gibt die Messung an der Kabeltrommel einen guten Anhaltspunkt für den zu erwartenden PMD-Wert nach der Verlegung.

Die Messung sehr kleiner PMD-Werte (vor allem an Bauelementen wichtig) ist mit dem verallgemeinerten Interferometerverfahren oder einem geeigneten Labormessverfahren möglich.

9.6 Zusammenfassung zu PMD-Messungen

Anders als bei der OTDR-Messung wird nur in einer Richtung und in einem breiten Wellenlängenbereich (nicht in mehreren optischen Fenstern) gemessen. Es sind **starke** Modenkopplung (gilt für Telekommunikationsfasern) und beim zweiseitigen Messverfahren die Faserlänge (aus der OTDR-Messung) einzustellen.

Das Messergebnis ist der PMD-Wert $\langle \Delta\tau \rangle$ und der PMD-Koeffizient $\text{PMD}_Q = \langle \Delta\tau \rangle / \sqrt{L}$ (gilt für starke Modenkopplung), der aus dem PMD-Wert berechnet wird. Die Polarisationsmodendispersion zweiter Ordnung spielt meist keine Rolle.

Das Messergebnis kann unter zweierlei Gesichtspunkten interpretiert werden:

Qualität der Übertragung: maßgebend ist der PMD-Wert. Nachfolgende Werte gelten für NRZ-Modulation:

- 2,5 Gbit/s: $\langle \Delta\tau \rangle \leq 40 \text{ ps}$
- 10 Gbit/s: $\langle \Delta\tau \rangle \leq 10 \text{ ps}$
- 40 Gbit/s: $\langle \Delta\tau \rangle \leq 2,5 \text{ ps}$
- 100 Gbit/s: $\langle \Delta\tau \rangle \leq 1 \text{ ps}$

Qualität der Faser: maßgebend ist der PMD-Koeffizient.

- Forderung laut ITU-T G.652.A, C; G.653.A; G.654.A; G.657.B:
 $\text{PMD}_Q \leq 0,50 \text{ ps} / \sqrt{\text{km}}$.
- Forderung laut ITU-T G.652.B, D; G.653.B; G.654.B, C, D, E; G.655.C, D, E;
G.656; G.657.A: $\text{PMD}_Q \leq 0,20 \text{ ps} / \sqrt{\text{km}}$.

10 Zusammenfassung

Die Polarisationsmodendispersion ist ein sehr kleiner Effekt, der nur im Singlemode-LWL bei hohen Datenraten eine Rolle spielt. Da die Polarisationsmodendispersion ein statistisches Phänomen ist, lässt sie sich nur mit großem Aufwand (teuer!) kompensieren.

Besser ist es, bereits bei der Planung Fasern mit kleinen PMD-Koeffizienten und Bauelemente mit kleinen PMD-Werten auszuwählen. Der PMD-Effekt wird bei Einsatz moderner Modulationsverfahren stark reduziert.

Während die Hintergründe zum Verständnis der Polarisationsmodendispersion komplex sind, ist die Messung einfach. Anders als bei der OTDR-Messung müssen nur wenige Parameter vor der Messung eingestellt werden (Art der Modenkopplung, eventuell Faserlänge) und die Interpretation des Messergebnisses ist simpel (Abschnitt 9.6).

Dr. Dieter Eberlein, Lichtwellenleiter-Technik
D-01219 Dresden, Barlachstraße 11
Tel.: +49-351-3129945, Fax: +49-351-3129947
E-Mail: LWLTechnik@t-online.de, Internet: www.LWLTechnik.de
Dresden 26. September 2020