

XVIII Kalibrierung von faseroptischen Messgrößen

Zur Kalibrierung von faseroptischen Komponenten und Messgeräten steht das optische Kalibriersystem im Mainframe EXFO IQ-203 und dessen Kalibrieranwendungen IQ-12002 bzw. IQ-200 zur Verfügung.

XVIII.1 Vorbereitung

Die optischen Geräte mit denen in diesem Kapitel gearbeitet wird, sind größtenteils mit Laserlicht betriebene Systeme. In diesem Anwendungsbereich können Strahlungsleistungen auftreten, die bei unsachgemäßer Handhabung eine Gefährdung für den Benutzer darstellen. Je nach Laserleistung und Wellenlänge sind die Lasersender verschiedenen Laserklassen zugeordnet.

Vorsicht: Laserstrahl ist unsichtbar/sichtbar und kann beim Auftreffen auf die Netzhaut zu irreparablen Schäden führen!

Deshalb darf unter keinen Umständen bei eingeschalteten Lasersender in den Senderausgang bzw. auf die Steckerendflächen des angeschlossenen Kabels (freies Ende) geblickt werden. Auf keinen Fall darf bei eingeschaltetem Sender der Messadapter am Messanschluss entfernt werden und mit einem Mikroskop die Endfläche des internen Steckerstiftes auf Verschmutzung kontrolliert werden. Vor einer solchen Überprüfung ist ein Einschub aus dem Grundgerät herauszunehmen.

XVIII.1.1 Reinigung von Steckerstirnflächen

Sichere Kalibrierergebnisse sind erst nach visueller Inspektion sämtlicher Konnektoren und optischen Schnittstellen des Kalibriergegenstandes zu erreichen. Um den Zustand der Anschlüsse zu überprüfen werden bei 400-facher Vergrößerung alle Steckerstirnflächen inspiziert und gereinigt. Kratzer und Verunreinigungen werden mittels USB-Mikroskop vor und nach der Reinigung festgehalten und als Anhang den Messergebnissen beigelegt. Ggf. muss auch der Austausch von verschlissenen Schnittstellen veranlasst werden. Details, weitere Hilfsmittel, Bewertungskriterien, benötigtes Reinigungsmaterial etc. sind der Arbeitsanweisung (Application Note) *EXFO ANOTE058.2an Connector Maintenance* zu entnehmen.

XVIII.1.2 Starten einer IQ-12002 Anwendung

Über den IQ-200 Launcher der Softwareoberfläche des optischen Kalibriersystems werden die Anwendungen gestartet. Dabei können die Mess- und Hilfsgeräte im manuellen Modus oder halbautomatisch betrieben werden. Die Einzelheiten hierzu sind in der Betriebsanleitung *IQ-200 Optical Test System* nachzulesen. In der Regel erfolgt die Kalibrierung geführt über die Kalibrieroberfläche in immer denselben Einzelschritten des Ablaufs.

XVIII.1.3 Aufwärmphase

Für den ordnungsgemäßen Betrieb werden Aufwärmphasen aller elektrischen und elektronischen Geräte von 30 Minuten und länger empfohlen. Die Normale werden dabei min. immer erst nach den vom Hersteller empfohlenen Aufwärmzeiten betrieben oder bleiben dauerhaft eingeschaltet. Des Weiteren sollten Kalibriergegenstände zur Vorbereitung vor der Kalibrierung mindestens 8 Stunden zum Temperatenausgleich im Labor gelagert werden.

XVIII.1.4 Verwendete Fasertypen

Es werden unterschiedliche Fasertypen für die Kalibrierung verwendet. Zum einen die Singlemode Faser (9 µm). Sie wird ab einer Wellenlänge von 1310 nm verwendet. Die zweite Faser ist die Multimode Faser (62,5 / 50 µm), diese wird für Wellenlängen bis 1300 nm verwendet.

Polymer Fasern (POF) mit einem Kerndurchmesser von ca. 1000 µm werden hauptsächlich im sichtbaren Wellenlängenbereich bis 650 nm verwendet und werden in Ausnahmefällen oder auf speziellen Kundenwunsch für Kalibrieraufgaben anstelle der Multimode-Fasern eingesetzt.

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.4	von: PF am: s.DMS06.08.2018	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XVIII Kalibrierung von faseroptischen Messgrößen	1

XVIII.2 Absolutleistung (Kalibrierungsfaktor) faseroptischer Leistungsmessgeräte

XVIII.2.1 Kalibrierverfahren

Die Kalibrierung auf Absolutleistung von optischen Leistungsmessgeräten erfolgt im Vergleichsverfahren, indem zuerst die über einen variablen Abschwächer (EXFO IQ-1300) zur Verfügung gestellte Leistung am Lichtleiterende mit dem Normleistungsmesser

- EXFO IQ-1502 (kalibrierte Wellenlängen bei 850 nm / 1310 nm / 1550 nm)
- W&G OLP-150 (kalibrierte Wellenlänge bei 650 nm)

gemessen und in der Folgemessung bei identischen Testparametern am Kalibriergegenstand eingespeist wird. Dafür stehen folgende hochstabile Laser-Lichtquellen zur Verfügung (TE Cooled Distributed Feedback Laser):

- EXFO IQ-2102 BLD (1310 nm) und
- EXFO IQ-2403 BLD (1550 nm)
- LDC1000 (Grundgerät)
 - Profile 650 nm
 - Profile 841 nm
- W&G OCD (850 nm / 654 nm)

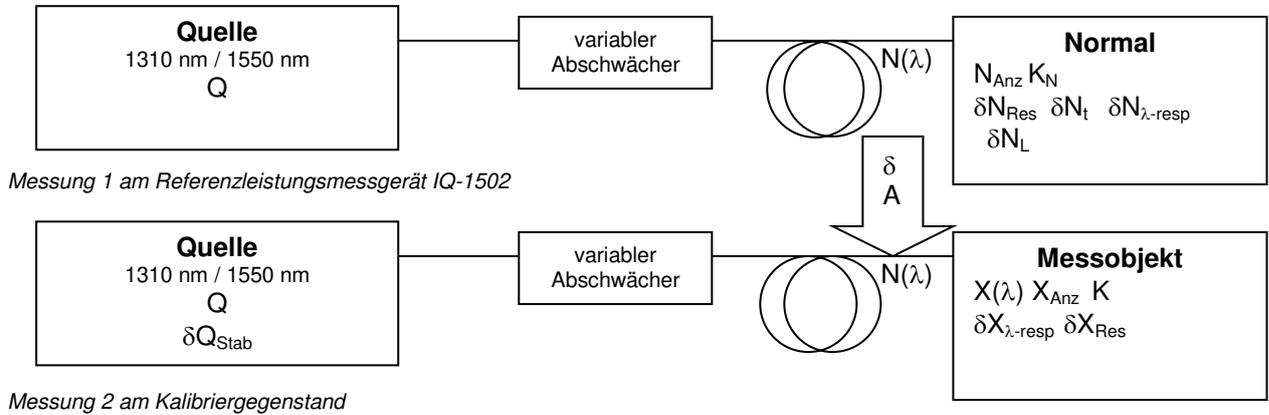
Vor Beginn jeder Kalibrierung wird sowohl am Referenzgerät als auch am Kalibriergegenstand (soweit vorhanden) ein Nullabgleich ohne Lichteinfall mit geschlossenem Detektor durchgeführt. Die Anschlusstechnik der Konnektoren wird an das Messobjekt angepasst (z.B. FC/PC) und darf während der Kalibrierung nicht mehr gewechselt werden. Das IQ-1502 besitzt hierzu einen universellen faseroptischen Adapter (FOA), der einen Anschluss der gängigsten Konnektortypen ohne weitere Adapter zulässt. Da Bewegungen der Faser den hauptsächlichen Anteil für die Wiederholbarkeit der Messergebnisse an Referenzleistungsmesser und Messobjekt bilden darf die Anschlussfaser nur möglichst wenigen Bewegungen oder Drehungen unterworfen werden: Bei jeder Messung ist auf minimale Änderung der Lage als auch auf Einhaltung des Biegeradius (>10 cm) zu achten. Hintereinander werden dann die Messungen im Wechsel am Referenzgerät IQ-1502 und am Kalibriergegenstand durchgeführt, deren Mittelwerte aus mindestens 5 Einzelmessungen gebildet und zur Berechnung des Kalibrierungsfaktors herangezogen werden. Alle Parameter des Messaufbaus, Testwellenlänge, verwendete Faser (z.B. Singlemode 9/125 µm), Konnektoren und Geräteeinstellungen werden soweit sinnvoll im Kalibrierschein vermerkt.

Ein Teil der Strahlung des Senders wird bei der Kalibrierung über einen optischen Koppler einem zweiten optischen Leistungsmessgerät zur Stabilitätskontrolle zugeführt werden. Zeitabhängige Veränderungen werden so festgestellt und wenn nötig korrigiert.

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.4	von: PF am: s.DMS06.08.2018	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XVIII Kalibrierung von faseroptischen Messgrößen	2

XVIII.2.2 Messunsicherheitsbilanz

Skizze des Messverfahrens:



vorgegebene bzw. abgelesene Größen:

- $N(\lambda)$ einfallende Leistung bei Wellenlänge λ z.B. mit $\lambda = 1310 \text{ nm}$, $\lambda = 1550 \text{ nm}$, $\lambda = 850 \text{ nm}$
- $X(\lambda)$ angezeigte Leistung bei Wellenlänge λ
- $K_N(\lambda)$ Kalibrierungsfaktor des Normal
Die Kalibrierungsfaktoren wurden bei Kalibrierung des Normal mit Unsicherheiten $U(N_{\text{Kal}})$ von 0,7 % bis 1,2 % (2σ -Normalverteilung) nachgewiesen. Dieser Beitrag ist dem Kalibrierschein des Normal entnehmbar.
- N_{Anz} abgelesener Kalibrierwert am Normal. Das Anzeigerauschen wird als Typ A Unsicherheit automatisch ermittelt und im Unsicherheitsbudget aufgenommen. In der Regel ist das Anzeigerauschen der Einzelmessung am Referenzleistungsmesser aber hinreichend klein und kann für die Berechnung der kleinsten angebbaren Messunsicherheit daher zu Null angenommen werden (s.a. X_{Anz}).
- X_{Anz} Anzeige am Kalibriergegenstand. Die Standardunsicherheiten aus den Beobachtungen der Einzelmessungen (Anzeigerauschen, $u(X_{\text{Anz}})$) können gemäß DKD-3 ermittelt und als Typ A Unsicherheit dem Unsicherheitsbudget hinzugefügt werden. Die gemeinsame Standardabweichung der Reproduktion an Referenzleistungsmesser und Kalibriergegenstand wird jedoch während der Messung bereits errechnet und in $u(\bar{k})$ berücksichtigt. Daher wird dieser Unsicherheitsbeitrag ebenfalls zu Null gesetzt werden.
- Q Ausgangsleistung der Lichtquelle

Gesuchte Größe:

- $K(\lambda)$ Kalibrierungsfaktor des Messobjekts

Einflussgrößen:

- δQ_{Stab} Abweichung aufgrund zeitlicher Leistungsinstabilität der Lichtquelle. Stabilitätsmessungen der verschiedenen Quellen ergaben maximale Differenzen von 0,12 % (0,005 dB) innerhalb von 15 Minuten. Diese maximale Abweichung wird als Intervallgrenze einer Rechteckverteilung angenommen

Ausgabe: DMS.4	erstellt von: PF am: s.DMS06.08.2018	geprüft/ genehmigt von: s. DMS am: s. DMS	Kapitel Qualitätsmanagementhandbuch - XVIII Kalibrierung von faseroptischen Messgrößen	Seite 3
--------------------------	--	--	--	-------------------

δN_t zeitliche Drift des Normals seit der letzten Kalibrierung. Durch die Historie der Rekalibrierung wird angenommen, dass die Drift des Kalibrierungsfaktors im Kalibrierintervall maximal 0,8 % bzw. 1 % bei 850 nm beträgt.

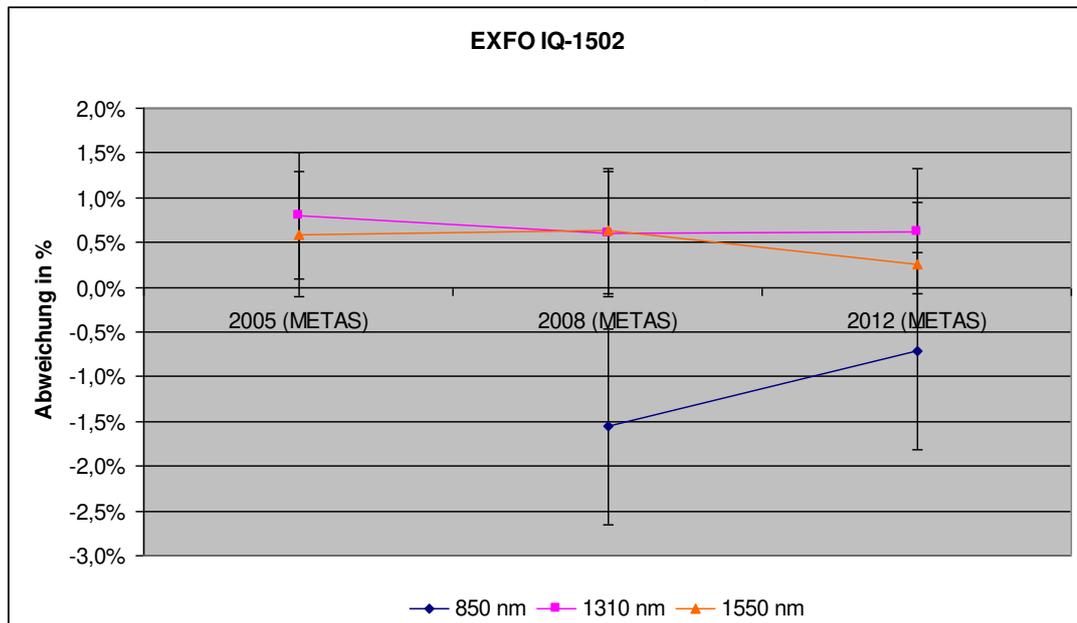


Bild XVIII.2.1 Historie der Kalibrierungen des Leistungsnormal Exfo IQ 1502

δN_L Linearitäts und Interpolationskorrektur des Kalibrierfaktors am Normal an von direkt rückgeführten Kalibrierpunkten abweichenden Werten. Im Bereich von -50 dBm bis -3 dBm wird angenommen, dass die Interpolation maximale Abweichungen von 0,23 % ($\pm 0,01$ dB) von der idealen Kennlinie aufweist.

δN_{Res} , δX_{Res} Die Rundungsabweichungen von max. 1 Digit durch die letzte Stelle und Auflösung der Anzeigen von Referenzgerät und Messobjekt. Das Rundungsintervall der Auflösung am Referenzleistungsmesser ist verglichen mit den übrigen Einflüssen vernachlässigbar klein und wird daher zu Null gesetzt. Das Auflösungsintervall des Kalibriergegenstandes kann je nach Gerätebauart unterschiedlich sein und erst im konkreten Fall berücksichtigt werden. Für die kleinste angebbare Messunsicherheit wird es zunächst ebenfalls zu Null angenommen.

δA Verfahrensbedingte Abweichungen z.B. durch Rückreflexionen oder Temperaturabhängigkeit des Kalibrierungsfaktors werden zu maximal 0,1% mit Rechteckverteilung angenommen. Korrekturen durch Bewegung und Drehung der Faser sind bereits durch die Berücksichtigung des gemeinsamen Unsicherheitsintervalls von X_{Anz} beinhaltet.

$\delta N_{\lambda-resp}$, $\delta X_{\lambda-resp}$ Abweichungen aufgrund der Neigung der spektralen Empfindlichkeit (Abhängigkeit der Leistungsanzeige von der Wellenlänge) des Leistungsmessgerätes Exfo IQ-1502 und des Kalibriergegenstandes bezüglich der tatsächlichen Wellenlänge der Lichtquelle. Die Abweichungen von den idealen Zentral-Wellenlängen werden maximal zu 0,1 nm angenommen und konnten am Wellenlängenmessgerät Burleigh WA-1100 sogar auf maximal 0,03 nm nachgewiesen werden. Mit der abstimmbaren Quelle Exfo IQ-2403 wurde durch Leistungsmessungen bei 1550,0 nm und 1550,5 nm die spektrale Neigung des IQ-1502 zu 1,5 % pro nm gemessen. Damit ergibt sich eine maximale Empfindlichkeitsabweichung bezüglich der Wellenlänge zu 0,15 %. Für genaue Bestimmungen kann die exakte Wellenlänge der Quelle vor der Kalibrierung gemessen werden.
Genauso kann die spektrale Neigung des Messobjekts durch Abstimmung der 1310 nm-Quelle gemessen werden. In der Messunsicherheitsbilanz für die kleinst angebbare Messunsicherheit wird exemplarisch ebenfalls ein Wert von maximal 0,15 % angenommen.

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.4	von: PF am: s.DMS06.08.2018	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XVIII Kalibrierung von faseroptischen Messgrößen	4

Bei Kalibrierungen mit Quellen im Bereich 650 nm und 850 nm wird die spektrale Empfindlichkeit anhand der Messwertveränderung bei Veränderung des abgespeicherten Kalibrierfaktors des OLP-Empfängers bzw. des IQS-1502 abgeschätzt. Experimentell ergeben sich z.B. 0,5 %/nm bei 850 nm.

Modellgleichung:

Mit den oben aufgeführten Größen ergibt sich der Kalibrierungsfaktor des Messobjektes zu (mit $\delta N_{Res} = 0$):

$$K(\lambda) = \frac{K_N(\lambda) \cdot N(\lambda)}{X(\lambda)} = \frac{K_N \cdot N_{Anz} + \delta N_t + \delta N_L + \delta N_{\lambda-resp} + \delta Q_{Stab} + \delta A}{X_{Anz} + \delta X_{Res} + \delta X_{\lambda-resp}}$$

Messunsicherheitsbilanz:

Für die dem Ergebnis beizuordnende Standardmessunsicherheit ergibt sich daraus:

$$u^2(K) = c_K^2 u^2(K_N) + c_{Anz}^2 u^2(N_{Anz}) + c_N^2 (u^2(\delta N_t) + u^2(\delta N_L) + u^2(\delta N_{\lambda-resp}) + u^2(\delta Q_{Stab}) + u^2(\delta A)) + c_X^2 (u^2(X_{Anz}) + u^2(\delta X_{\lambda-resp}) + u^2(\delta X_{Res}))$$

mit den Sensitivitätskoeffizienten

$$|c_{Anz}| = \frac{K_N}{X_{Anz}}, |c_N| = \frac{1}{X_{Anz}}, |c_x| = \frac{K_N N_{Anz}}{X_{Anz}^2} \text{ und } |c_k| = \frac{N_{Anz}}{X_{Anz}}$$

Tabellarische Darstellung der Messunsicherheitsbilanz (einzelner Durchgang):

Größe	Schätzwert	Standardmessunsicherheit	Verteilung	Sensitivität	Unsicherheitsbeitrag
N_{Anz}	\bar{n}	$s_N / \sqrt{n_N}$	Normal (Typ A)	c_{Anz}	$u(N_{Anz})$
K_N	k_N	$U(N_{Kal}) / 2$	Normal	c_k	$u(K_N)$
X_{Anz}	\bar{x}	$s_X / \sqrt{n_X}$	Normal (Typ A)	c_x	$u(X_{Anz})$
δN_t	0	$\Delta(N_t) / \sqrt{3}$	Rechteck	c_N	$u(N_t)$
δN_L	0	$\Delta(N_L) / \sqrt{3}$	Rechteck	c_N	$u(N_L)$
$\delta N_{\lambda-resp}$	0	$\Delta(N_{\lambda-resp}) / \sqrt{3}$	Rechteck	c_N	$u(N_{\lambda-resp})$
δQ_{Stab}	0	$\Delta(Q_{Stab}) / \sqrt{3}$	Rechteck	c_N	$u(Q_{Stab})$
δA	0	$\Delta(A_{Reprod}) / \sqrt{3}$	Rechteck	c_N	$u(A_{Reprod})$
δX_{res}	0	$\Delta(X_{Res}) / \sqrt{3}^1$	Rechteck	c_X	$u(X_{Res})$
$\delta X_{\lambda-resp}$	0	$\Delta(X_{\lambda-resp}) / \sqrt{3}$	Rechteck	c_X	$u(X_{\lambda-resp})$
K	$\frac{k_N \cdot \bar{n}}{\bar{x}}$				$u(k)$

¹ Null für die Berechnung der kleinsten angebbaren Messunsicherheit

Effektive Freiheitsgrade:

Da die Streuung der Messergebnisse einen beträchtlichen Anteil aufweist, werden die effektiven Freiheitsgrade einer Stichprobe der Länge n berücksichtigt (Abschätzung nach DAkkS-DKD-3, Anhang E). Die Ergebnisse der Durchgänge der Stichprobe werden in dem Modell

$$K_{av} = K + \delta K$$

für den gemittelten Kalibrierungsfaktor K_{av} als unabhängige Beobachtungen behandelt. Mit K ermittelter Kalibrierungsfaktor je Durchgang: Der Mittelwert der Durchgänge mit Stichprobenlänge $n \approx 5$ und Streuungen beispielsweise durch Bewegung oder Drehung der Faser, wird typischerweise mit einer Standardabweichung von 0,4 % bei einer Stichprobenlänge $n=5$ angenommen. Höhere Unsicherheiten durch die Reproduktion müssen individuell im konkreten Fall berücksichtigt werden. Für die Berechnung der kleinsten angebbaren Messunsicherheit wird vom typischen Fall ausgegangen. Die gemeinsame Standardabweichung der Reproduktion an Referenzleistungsmesser und Kalibriergegenstand wird dazu während der Messung bereits errechnet und ausgegeben (sie enthält dabei bereits die Streuungen von N_{Anz} und X_{Anz})

δK Korrektur aufgrund der Wiederholpräzision und Faserbewegung

Größe	Schätzwert	Standard-messunsicherheit	eff. Freiheitsgrade	Verteilung	Sensitivität	Unsicherheitsbeitrag
K	\bar{k}	$\frac{s}{\sqrt{n}}$	n-1	Normal, Typ A	1	$u(\bar{k})$
δK	0	$u(k)$	∞	Normal	1	$u(\delta k)$
K_{av}	\bar{k}		$v_{eff} = \frac{u^4(\delta k)}{u^4(\bar{k})/(n-1)}$			

Beispielrechnung für typische Messung von 100 µW (-10 dBm) bei 1550 nm

Größe	Schätzwert	Standard-messunsicherheit	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag
N_{Anz}^2	99,93 µW	0			
K_N	0,9941	0,8 % / 2	Normal	1	$4,0 \cdot 10^{-3}$
X_{Anz}	96,66 µW	0			
δN_t	0	$0,8 \mu W / \sqrt{3}$	Rechteck	$0,010 \mu W^{-1}$	$4,6 \cdot 10^{-3}$
δN_L	0	$0,23 \mu W / \sqrt{3}$	Rechteck	$0,010 \mu W^{-1}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$
$\delta N_{\lambda-resp}$	0	$0,15 \mu W / \sqrt{3}$	Rechteck	$0,010 \mu W^{-1}$	$0,86 \cdot 10^{-3}$
δQ_{Stab}	0	$0,12 \mu W / \sqrt{3}$	Rechteck	$0,010 \mu W^{-1}$	$0,69 \cdot 10^{-3}$
δA	0	$0,1 \mu W / \sqrt{3}$	Rechteck	$0,010 \mu W^{-1}$	$0,58 \cdot 10^{-3}$
$\delta X_{\lambda-resp}$	0	$0,15 \mu W / \sqrt{3}$	Rechteck	$0,011 \mu W^{-1}$	$0,89 \cdot 10^{-3}$
K	1,0278				$6,4 \cdot 10^{-3}$

² Hinweis: Da im menügeführten automatischen Modus der gemessene Wert des Systems nicht mit dem Kalibrierfaktor korrigiert werden kann, wird stattdessen durch Aufnahme des Wertes X_{Anz}/K_N oder am Ende der Messung durch $K_{DUT} = K_N \cdot K_{auto}$ der Kalibrierungsfaktor der Rekalibrierung berücksichtigt

Effektive Freiheitsgrade:

Größe	Schätzwert	Standard-messunsicherheit	eff. Freiheitsgrade	Verteilung	Sensitivität	Unsicherheitsbeitrag
K	1,0278	$0,004 / \sqrt{5}^3$	4	Normal, Typ A	1	$1,8 \cdot 10^{-3}$
δK	0	$6,4 \cdot 10^{-3}$	∞	Normal	1	$6,4 \cdot 10^{-3}$
K_{av}	1,0278	$v_{eff} = \frac{(6,7 \cdot 10^{-3})^4}{(1,8 \cdot 10^{-3})^4 / 4} = 777$				$6,7 \cdot 10^{-3}$

Mit den oben aufgeführten Größen ergibt sich gemäß DKD-3:2002 Abschnitt 4 aus der Modellgleichung für die dem Ergebnis K beizuordnende erweiterte Messunsicherheit (mit $k=2$ nach Tabelle E2) die **erweiterte Messunsicherheit**:

$$U_{abs}(K)_{k=2} = W_{rel}(K) = 1,3 \%$$

Es kann gezeigt werden, dass bei Stichproben der Länge $n=5$ Standardabweichungen bis etwa 0,9% für einen von $k=2$ abweichenden Erweiterungsfaktor nicht relevant sind.

Logarithmische Angaben

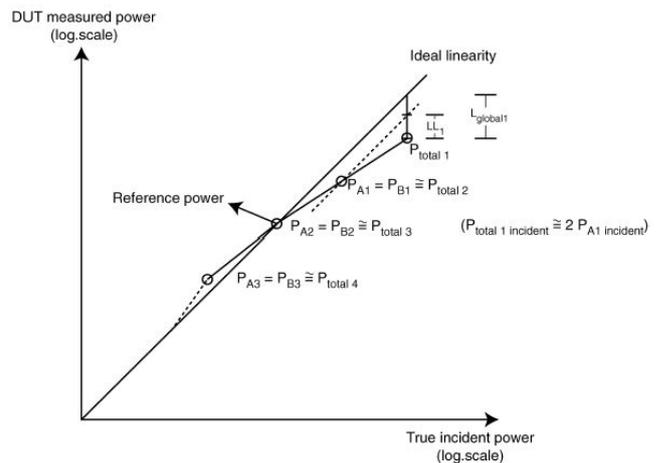
Messtechnisch oft üblich sind logarithmische Leistungs- oder Kalibrierfaktorangaben. Der Zusammenhang zwischen Anzeigeabweichung ΔX_{Anz} (in dB) und Kalibrierfaktor $K(\lambda)$ kann dann beschrieben werden zu

$$\Delta X_{Anz} = 10 \cdot \log\left(\frac{1}{K(\lambda)}\right) dB$$

XVIII.3 Linearität

XVIII.3.1 Additionsmethode

Kleinste Messunsicherheiten bei Linearitätsmessung werden durch Anwendung der Additions-Methode erzielt. Dabei wird mit einem Koppler zunächst die Quelleistung aufgeteilt und mit einem zweiten Koppler wieder zusammengeführt. Durch die elektronischen Verschlusskappen (Shutter) der Koppler können die getrennten Leistungspfade („Arme“) einzeln ausgeblendet und zusammengeführt werden. Bei einem linearen Leistungsmessgerät muss die Summe der Einzelpfade dann die Gesamtleistung bei geöffneten Verschlusskappen ergeben. Dazu wird die Leistung jedes Pfades (P_a und P_b) getrennt voneinander und die Leistung beider Pfade zusammen (P_{total}) gemessen. Die lokale Linearität im k -ten Messschritt bei N Messungen errechnet sich dann zu



Lokale, globale Linearität und ideale Kennlinie (Quelle: Exfo)

³ Hier: typischer Wert für die Berechnung der kleinsten angebbaren Messunsicherheit. Erst ab einer tatsächlichen Standardabweichung über den genannten Grenzen von 0,4 % hat dies Auswirkung auf das Gesamtergebnis und wird im konkreten Fall zusammen mit dem Einfluss auf die effektiven Freiheitsgrade berücksichtigt

Ausgabe: DMS.4	erstellt von: PF am: s.DMS06.08.2018	geprüft/ genehmigt von: s. DMS am: s. DMS	Kapitel Qualitätsmanagementhandbuch - XVIII Kalibrierung von faseroptischen Messgrößen	Seite 7
--------------------------	--	--	--	-------------------

$$L_{lokal,k} = P_{total,k} - (P_{a,k} + P_{b,k}) \text{ für } 1 \leq k \leq N$$

als Differenz aus Gesamtleistung und Summe der einzelnen Pfade. Die Summe der lokalen Linearitätswerte von der Referenzleistung aus ergibt die globale Linearität der k-ten Zeile (Messung).

$$L_{global,k} = 0 \text{ dB} - \sum_{n=0}^{k-1} L_{lokal,n} \text{ und } 1 \leq k \leq N+1$$

Der höchste Betrag der globalen Linearität ergibt dann die totale Linearität im gemessenen Bereich des Kalibriergegenstandes.

$$L_{total} = \text{Max}(L_{global})$$

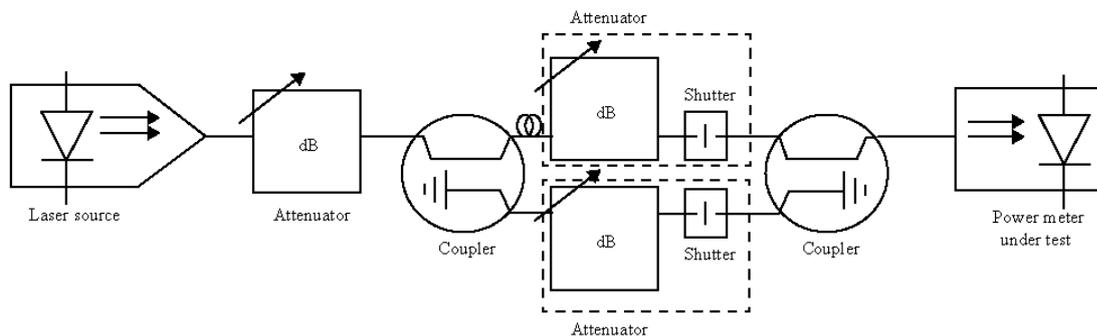
Die Berechnung der lokalen, globalen und totalen Linearitätswerte geschieht Software-gesteuert und automatisch bei Eingabe der Messwerte des Messobjektes. Gemessen wird jeweils abwärts und aufwärts bei abnehmender bzw. zunehmender Leistung und vorigem Nullabgleich der Instrumente. Um sicherzustellen, dass die optischen Splitter symmetrisch auskoppeln

Pa (dBm)	Pb (dBm)	Pa + Pb (dBm)	Ptotal (dBm)	LL (%)	LL (dB)	Lglobal (dB)
-11.6350	-11.6220	-8.6182	-8.6180	0.00	0.0002	0.0000
-14.7340	-14.7210	-11.7172	-11.7170	0.00	0.0002	-0.0002
-17.7300	-17.7180	-14.7137	-14.7140	-0.01	-0.0003	-0.0004
-20.7440	-20.7320	-17.7277	-17.7280	-0.01	-0.0003	-0.0001
-23.7550	-23.7450	-20.7397	-20.7390	0.02	0.0007	0.0002

Berechnung der lokalen und globalen Linearitäten

automatisch bei Eingabe der Messwerte des Messobjektes. Gemessen wird jeweils abwärts und aufwärts bei abnehmender bzw. zunehmender Leistung und vorigem Nullabgleich der Instrumente. Um sicherzustellen, dass die optischen Splitter symmetrisch auskoppeln

wird der Messaufbau vor Beginn der Messung mit variablen Abschwächern in den Pfaden a und b abgeglichen, so dass die Summe der Einzelpfade mit der Gesamtleistung aus beiden Pfaden übereinstimmt. Dieser Schritt ist sehr wichtig um eine gleichmäßige Leistungsverteilung in beiden Armen zu garantieren. Daneben müssen die beiden Pfade unterschiedliche Länge besitzen um Interferenz-Schwankungen zu minimieren oder ganz auszuschließen. Den Nachteil dieser Methode stellt die relativ hohe Einfügedämpfung des Messaufbaus, der typischerweise zwischen 7 und 8 dB liegen kann, dar.



Messaufbau für Linearitätsmessung der Additionsmethode (Quelle: Exfo)

Zur Vermeidung von Interferenzen des kohärenten Lichtes bei Kopplung der Pfade a und b ist in einem der beiden Pfade eine Faser-Verlängerung des Lichtweges von ca. 100 m bereits fest in dem Koppler eingefügt (>Kohärenzlänge). Sofern nicht modifizierte Koppler verwendet werden ist mit einer zusätzlichen Faser die Interferenzvermeidung sicher zu stellen. Aus der spektralen Breite Δf des schmalbandigsten Lasers (1550 nm, $\Delta f = 20$ MHz) ergibt sich mit der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum c und dem Brechungsindex n die Mindestlänge l dieser Faser zu

$$l = \frac{c}{n \cdot \Delta f} = \frac{299792458 \frac{m}{s}}{1,46 \cdot 20 \text{ MHz}} = 10,3 \text{ m}$$

Messunsicherheitsbilanz

Die Modellgleichung für die lokale Linearität (da sich die Absolutanteile bei dieser Methode aufheben) wird formuliert zu

$$L_{\text{lokal}} = P_{\text{total}} - (P_a + P_b) + \delta P_S + \delta P_V + \delta P_R$$

- P_{total} Am Kalibriergegenstand gemessene Gesamtleistung bei Durchschaltung der Arme A und B
- P_a, P_b Leistung bei Messung der einzelnen Pfade A und B hintereinander
- δP_S Abweichung aufgrund zeitlicher Leistungsinstabilität der Lichtquelle. Stabilitätsmessungen der verschiedenen Quellen ergaben maximale Differenzen von 0,005 dB innerhalb von 15 Minuten. Die lokale Linearitätsmessung erfordert jedoch nur eine hohe Stabilität von etwa einer Minute. Es wird daher $\pm 0,023 \%$ (0,001 dB) als maximale Intervallgrenze dieser Korrektur mit Rechteckverteilung angenommen
- δP_V Korrektur durch weitere verfahrensbedingte Einflüsse wie Rückreflexionen, Interferenzschwankungen, Wiederholpräzision, Empfängerrauschen oder Temperaturabhängigkeiten. Dieser Anteil ist nicht bekannt und wird aus der üblichen Digitabweichung guter Empfänger im Bereich -40 dBm bis -50 dBm innerhalb $\pm 0,023 \%$ (0,001 dB) Rechteckverteilt angenommen („worst case“). Abhängig vom Kalibriergegenstand können sich zusätzlich höhere Anteile des Empfängerrauschens und dessen Standardunsicherheit (Typ A Unsicherheit) ergeben.
- δP_R Die Rundungsabweichungen durch die letzte Stelle und Auflösung der Anzeige des Messobjekts ergeben sich zu max. 0,5 Digits. Für Leistungsmessgeräte mit einer Anzeige von mehr als 3,5 Digits (z.B. 100,00 μW und damit innerhalb des Intervalls von $\pm 0,005 \mu\text{W}$) wird dieser Beitrag nahezu vernachlässigbar klein. Eine Rundung erfolgt bei jeder Ausgabe eines Messwertes aber insgesamt dreimal.

Für die beigeordnete **relative** erweiterte Messunsicherheit (k=2) für die Messung der lokalen Linearität ergibt sich

$$W(L_{\text{lokal}}) = 2 \cdot w = 2 \cdot \sqrt{w_S^2 + w_V^2 + w_R^2}$$

Totale Linearität

Je nach Anzahl der Messschritte treten Messunsicherheitsanteile häufiger auf. So ist durch die Rundungskorrekturen in Abhängigkeit der Messpunkte mit einem direkt proportionalen Anteil zu rechnen ($N \cdot w_R$), d.h. im 3 dB Abstand und etwa 15 Messpunkten ($15 \cdot w_R$). w_V jedoch ist nur im niedrigen Messbereich -40 dBm bis -50 dBm relevant (etwa $4 \cdot w_V$). Die Stabilität der Quelle wird in diesem Fall zu 0,005 dB für die gesamte Messreihe angenommen und multipliziert sich so etwa zu $5 \cdot w_S$. Damit ergibt sich im allgemeinen Fall:

$$W(L_{\text{total}}) = 2 \cdot \sqrt{5w_S^2 + 4w_V^2 + 15w_R^2}$$

Bei Nachweis der Linearität in einem kleineren Dynamikbereich mit weniger Messpunkten liegt die Messunsicherheit der totalen Linearität also immer unter diesem Wert.

Tabellarische Darstellung der Messunsicherheitsbilanz (y=L_{lokal}):

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.4	von: PF am: s.DMS06.08.2018	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XVIII Kalibrierung von faseroptischen Messgrößen	9

Größe	Schätzwert	Halbbreite	Verteilung	Unsicherheit	Sensitivität skoeffizient	Unsicherheitsbeitrag (relativ)
x_i	x_i	a		$w(x_i)$	$ c_i $	$w_i(y)$
P_{total}	p_{total}					
P_a	p_a					
P_b	p_b					
δP_S	0	a_S	Rechteck	$w(\delta P_S) = \frac{a_S}{\sqrt{3}}$	1	w_S
δP_V	0	a_V	Normal	$w(\delta P_V) = a_V$	1	w_V
δP_R	0	a_R	Rechteck	$w(\delta P_R) = 3 \frac{a_R}{P_a \cdot \sqrt{3}}$	1	w_R
L_{lokal}	$p_{total} - (p_a + p_b)$			$w(L_{lokal}) = \sqrt{\sum_{i=1}^N w_i^2(y)}$		$w(L_{lokal})$
L_{lokal}	rel. erweiterte Messunsicherheit(k=2)			$W(L_{lokal}) = k \cdot w(L_{lokal})$		$W(L_{lokal})$

Bei Einsetzen der Zahlenwerte ergibt sich als Ergebnis für die Berechnung:

Größe	Schätzwert	Halbbreite	Verteilung	Unsicherheit	Sensitivität skoeffizient	Unsicherheitsbeitrag (relativ)
x_i	x_i	a		$w(x_i)$	$ c_i $	$w_i(y)$
P_{total}	100,00 μW					
P_a	50,00 μW					
P_b	49,00 μW					
δP_S	0	0,00023	Rechteck	$1,3 \cdot 10^{-4}$	1	$1,3 \cdot 10^{-4}$
δP_V	0	0,00023	Normal	$2,3 \cdot 10^{-4}$	1	$2,3 \cdot 10^{-4}$
δP_R	0	0,005 μW	Rechteck	$1,7 \cdot 10^{-4}$	1	$1,7 \cdot 10^{-4}$
L_{lokal}	1,0 μW			$w(L_{lokal}) = \sqrt{\sum_{i=1}^N w_i^2(y)}$		$3,2 \cdot 10^{-4}$
L_{lokal}	rel. erweiterte Messunsicherheit(k=2)			$W(L_{lokal}) = 2 \cdot w(L_{lokal})$		$6,3 \cdot 10^{-4}$ (0,0028 dB)
L_{total}				$W(L_{total}) = 2 \cdot \sqrt{5w_S^2 + 4w_V^2 + 15w_R^2}$		$1,7 \cdot 10^{-3}$ (0,008 dB)

XVIII.3.2a Vergleichsmethode - Nichtlinearität faseroptischer Strahlungsempfänger

Alternativ, aber mit höheren Messunsicherheiten verbunden, erfolgt eine Messung im direkten Vergleich mit dem Kalibrierleistungsmessgerät Exfo IQ-1502. Dazu wird die an einem Koppler geteilte Leistung der Laserquelle gleichzeitig am Referenzleistungsmesser und Kalibriergegenstand gemessen. Bei Annahme proportionaler Auskopplung muss sich die Anzeige des Normalleistungsmessers mit zunehmender Dämpfung im selben Maße verändern wie die des Kalibriergegenstandes. Die globale Linearität lässt sich dann sofort als Leistungs-Differenz ΔP der Änderungen im k -ten Schritt bezogen auf den Referenzwert P_{ref} ($k=1$) angeben.

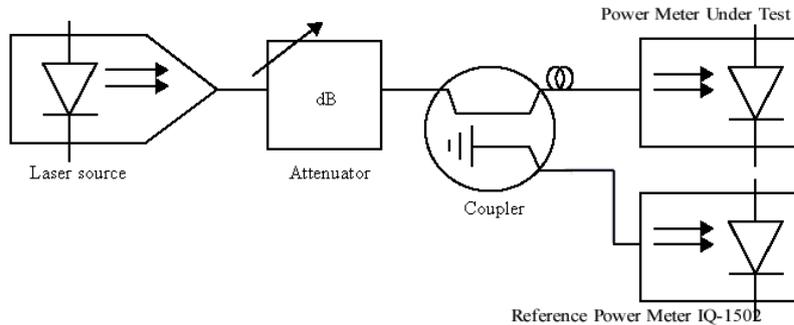
$$L_{global,k} = \Delta P_{DUT,k} - \Delta P_{Normal,k} \text{ mit } \Delta P_k = P_{ref(k=1)} - P_k$$

Mit

- $L_{global,k}$ globale Linearität im Schritt k
- $\Delta P_{DUT,k}$ Leistungsdifferenz am Messobjekt bezogen auf den Referenzwert im Schritt k
- $\Delta P_{Normal,k}$ Leistungsdifferenz am Normalleistungsmessgerät bezogen auf den Referenzwert im Schritt k

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.4	von: PF am: s.DMS06.08.2018	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XVIII Kalibrierung von faseroptischen Messgrößen	10

P_{ref} Anzeige im ersten Messschritt z.B. am Messobjekt (DUT) bzw. am Normal



Messaufbau für Linearitätsmessung bei direktem Vergleich (Quelle: z.T. Exfo)

Messunsicherheitsbilanz

Die Modellgleichung für die globale Linearität wird mit den sich aufhebenden Absolutanteilen formuliert zu

$$L_{global} = (P_{ref,DUT} - P_{DUT}) - (P_{ref,Normal} - P_{Normal} + \delta P_L) + \delta P_S + \delta P_V + \delta P_R$$

$P_{ref,Normal}$ Am Normal bzw. am Kalibriergegenstand abgelesene Bezugsleistung der Linearitätsangabe (1. Messung)
 $P_{ref,DUT}$

P_{Normal}, P_{DUT} Aktuell abgelesene Messwerte am Normal und Kalibriergegenstand

δP_S Abweichung aufgrund zeitlicher Leistungsinstabilität der Lichtquelle. Stabilitätsmessungen der verschiedenen Quellen ergaben maximale Differenzen von 0,005 dB innerhalb von 15 Minuten. Es wird daher $\pm 0,12\%$ als maximale Intervallgrenze dieser Korrektur mit Rechteckverteilung angenommen

δP_V Korrektur durch weitere Verfahrensbedingte Einflüsse wie Rückreflexionen, Wiederholpräzision, Temperaturabhängigkeiten und Empfängerrauschen. Dieser Anteil ist nicht bekannt und wird zu 0,023 % normalverteilt angenommen. Abhängig vom Kalibriergegenstand können sich zusätzlich höhere Anteile (Typ A Unsicherheit) ergeben.

δP_L Korrektur durch die Nicht-Linearität des Referenzleistungsmessgerätes IQ-1502. Aus dem Kalibrierschein wird dieser Teil im Bereich bis -50 dBm innerhalb der Summe aus maximaler Abweichung und deren Unsicherheit kleiner $\pm 0,5\%$ vermutet (1310 nm, bis -55 dBm, bzw. $\pm 0,6\%$ bis -65 dBm und $\pm 1,7\%$ bis -70 dBm). Die Kontrollmessung in Additionsmethode bei 1550 nm ergab maximale Nicht-Linearitäten von $\pm 0,57\%$ und damit ein identisches Unsicherheitsintervall.

δP_R Die Rundungsabweichungen durch die letzte Stelle und Auflösung der Anzeige der Geräte ergeben sich zu maximal 0,5 Digits. Die Rundungskorrektur des Referenzleistungsmessers IQ-1502 mit seiner hohen Auflösung ist vernachlässigbar klein. Für Kalibriergegenstände mit einer Anzeige von mehr als 4 0,5 Digits (besser als 0,01 dB oder 1,000 mW Auflösung) ist dieser Beitrag ebenfalls wenig ausschlaggebend. Eine daraus abgeleitete mögliche Rundungskorrektur von $\pm 0,023\%$ ist je Anzeigegerät zweimal zu berücksichtigen und ist im „worst case“ entgegengesetzt gleich groß.

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.4	von: PF am: s.DMS06.08.2018	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XVIII Kalibrierung von faseroptischen Messgrößen	11

Die beigeordnete **relative** erweiterte Messunsicherheit (k=2) für die Messung der globalen bzw. der totalen Linearität (Summe einzelner lokaler Linearitätswerte) ergibt sich zu:

$$W(L_{global}) = W(L_{total}) = 2 \cdot w = 2 \cdot \sqrt{w_S^2 + w_V^2 + w_L^2 + w_R^2}$$

Tabellarische Darstellung der Messunsicherheitsbilanz (y=L_{global}):

Größe X_i	Schätzwert x_i	Halbbreite a	Verteilung	Unsicherheit $w(x_i)$	Sensitivitätskoeffizient $ c_i $	Unsicherheitsbeitrag (relativ) $w_i(y)$
$P_{ref,Normal}$	$p_{r,n}$					
$P_{ref,DUT}$	$p_{r,D}$					
P_{Normal}	p_N					
P_{DUT}	p_D					
δP_S	0	a_S	Rechteck	$w(\delta P_S) = \frac{a_S}{\sqrt{3}}$	1	w_S
δP_V	0	a_V	Normal	$w(\delta P_V) = a_V$	1	w_V
δP_L	0	a_L	Rechteck	$w(\delta P_L) = \frac{a_L}{\sqrt{3}}$	1	w_L
δP_R	0	a_R	Rechteck	$w(\delta P_R) = 2 \frac{a_R}{P_{DUT} \cdot \sqrt{3}}$	1	w_R
L_{global}	$(p_{r,D} - p_D) - (p_{r,N} - p_N)$			$w(L_{global}) = \sqrt{\sum_{i=1}^N w_i^2(y)}$		$w(L_{global})$
L_{global}	rel. erweiterte Messunsicherheit(k=2)			$W(L_{global}) = k \cdot w(L_{global})$		$W(L_{global})$

Einsetzen der Zahlenwerte ergibt als Ergebnis für die Berechnung:

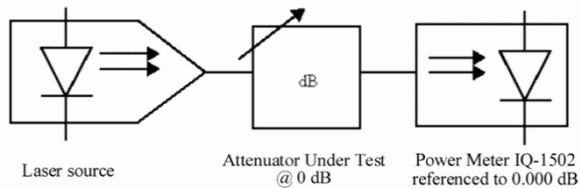
Größe X_i	Schätzwert x_i	Halbbreite a	Verteilung	Unsicherheit $w(x_i)$	Sensitivitätskoeffizient $ c_i $	Unsicherheitsbeitrag (relativ) $w_i(y)$
$P_{ref,Normal}$	100,00 μW					
$P_{ref,DUT}$	101,05 μW					
P_{Normal}	50,00 μW					
P_{DUT}	49,01 μW					
δP_S	0	0,0012	Rechteck	$6,9 \cdot 10^{-4}$	1	$6,9 \cdot 10^{-4}$
δP_V	0	0,00023	Normal	$2,3 \cdot 10^{-4}$	1	$2,3 \cdot 10^{-4}$
δP_L	0	0,005	Rechteck	$2,9 \cdot 10^{-3}$	1	$2,9 \cdot 10^{-3}$
δP_R	0	0,00046	Rechteck	$2,7 \cdot 10^{-4}$	1	$2,7 \cdot 10^{-4}$
L_{global}	2,04 μW			$w(L_{global}) = \sqrt{\sum_{i=1}^N w_i^2(y)}$		$3,0 \cdot 10^{-3}$
L_{global}	rel. erweiterte Messunsicherheit(k=2)			$W(L_{global}) = 2 \cdot w(L_{global})$		$6,0 \cdot 10^{-3}$ (0,026 dB)

XVIII.3.2b Vergleichsmethode - Dämpfungsglieder, passive und aktive Geräte und Elemente

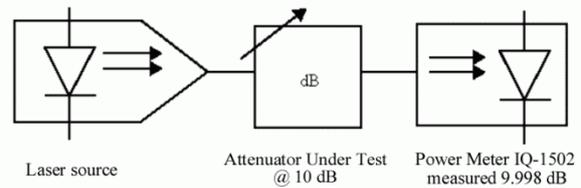
In ähnlicher Weise können Dämpfungsglieder im Vergleich zum kalibrierten Referenzempfänger bei den verschiedenen Wellenlängen kalibriert werden. Die Messung erfolgt zum Beispiel bei konstanter (maximaler) Leistung im Pfad relativ gegenüber der 0 dB-Abschwächerstellung. Bei etwa 1 mW

Ausgabe: DMS.4	erstellt von: PF am: s.DMS06.08.2018	geprüft/ genehmigt von: s. DMS am: s. DMS	Kapitel Qualitätsmanagementhandbuch - XVIII Kalibrierung von faseroptischen Messgrößen	Seite 12
--------------------------	--	--	---	--------------------

Absolutleistung auf dem Empfänger in Ausgangsstellung lassen sich somit Dämpfungen bis 50 dB unter Annahme idealer Empfängerlinearität kalibrieren.



Einmessen gegenüber 0 dB am Dämpfungsglied

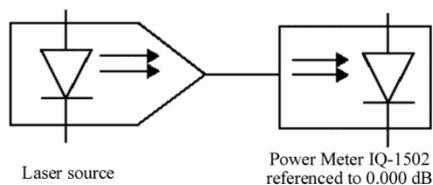


Messung einer Abschwächerstufe

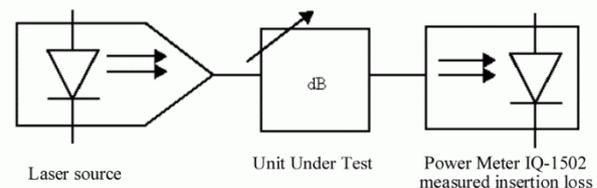
Um zusätzliche Aussagen zur Wiederholbarkeit treffen zu können sollte (Anteil δP_V) sollte die Messung mindestens zweimal wiederholt werden.

XVIII.3.2c Einfügedämpfung - Dämpfungsglieder, passive und aktive Geräte und Elemente

Um die Einfügedämpfung bzw. die Dämpfung von passiven Elementen zu bestimmen muss zunächst in direkter Kopplung am Leistungsmesser gemessen und im zweiten Schritt zusammen mit den eingefügten Komponenten gemessen werden. Auch in diesem Fall sind mehrere Messungen zu empfehlen, da Konnektorstabilitäten je nach Art der Verbindung in Größenordnungen um 0,1 dB nicht unüblich sind.



Messung der Einfügedämpfung von Dämpfungsgliedern oder Komponenten

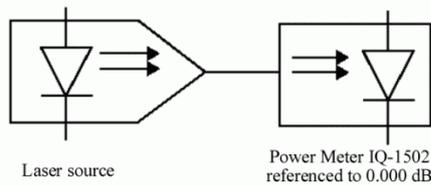


Aufgrund des identischen Modells zur Unsicherheitsbetrachtung kann das Messunsicherheitsbilanz aus XVIII.3.2a verwendet werden.

Ausgabe: DMS.4	erstellt von: PF am: s.DMS06.08.2018	geprüft/ genehmigt von: s. DMS am: s. DMS	Kapitel Qualitätsmanagementhandbuch - XVIII Kalibrierung von faseroptischen Messgrößen	Seite 13
--------------------------	--	--	--	--------------------

XVIII.4 Kalibrierung/ Prüfung von optischen Quellen

In Anlehnung an das in XVIII.2 genannte Verfahren können in Direktmessung mit kalibrierten Empfängern oder einem optischen Spektrumanalysator optische Quellen auf ihre charakteristischen Parameter kalibriert werden.



Direktmessverfahren zur Bestimmung optischer Kenngrößen von Quellen

Der Anschluss erfolgt direkt an die Quelle. Bei der Bestimmung der Ausgangsleistung ist zu beachten, dass die Angabe nur unter Berücksichtigung der („hohen“) Dämpfung der Konnektoren (Steckverbinder) und der verwendeten Faser angegeben werden kann.

XVIII.4.1 Prüfung der Ausgangsleistung

Die maximale Ausgangsleistung P_{out} von Quellen ist ein charakteristisches Leistungsmerkmal. Um eine Prüfung der Funktion und die Übereinstimmung der Konformität zu bestimmten kann dieser Parameter an einem kalibrierten Leistungsmessgerät bestimmt werden. Es soll jedoch keine Aussage über den absoluten Wert der Leistung, sondern nur eine Prüfung z.B. auf ein Kriterium wie $P_{out} \geq 1 \text{ mW}$ gemacht werden. Dabei sind Regler, Abschwächer oder sonstige Einstellelemente der Quelle in definierte und wiederholbare Position zu bringen (z.B. rechter Anschlag oder interner Abschwächer "aus"), der Messwert bezieht sich auf die angegebenen Bedingungen (z.B. Fasertyp) mit der Referenzebene möglichst am direkten Ausgang der Quelle (z.B. Gehäuseplatte).

Das Modell für die Prüfung der maximalen Ausgangsleistung P_{out} kann mit der am Normal abgelesenen Leistung P_N ähnlich wie in XVIII.2.2 formuliert werden zu

$$P_{out} = K_N \cdot (N_N + \delta N_t + \delta N_L + \delta N_{\lambda-resp} + \delta Q_{Stab} + \delta A + \delta N_{conn})$$

Zusätzlich mit

δN_{conn} Die Konnektor-, Faserdämpfung und Wiederholbarkeit z.B. durch die außermittige Fassung der Faser in der Ferule stellt einen wesentlichen Anteil zur Messunsicherheit dar. Erfahrungswerte, Kontroll- und Testmessungen haben gezeigt, dass dieser Einfluss innerhalb der maximalen Intervallgrenzen von $\pm 0,15 \text{ dB}$ liegt (Rechteckverteilung).

Die resultierende erweiterte Messunsicherheit in dB lässt sich dann ausgehend von der Unsicherheit der optischen Strahlungsleistung bei der Empfängerkalibrierung U_K angeben zu

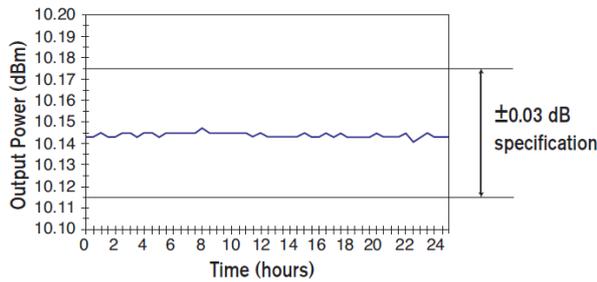
$$U(P_{out}) = 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{U_K}{2}\right)^2 + \left(\frac{0,15 \text{ dB}}{\sqrt{3}}\right)^2} < 0,2 \text{ dB}$$

XVIII.4.2 Prüfung der Stabilität

Neben der Ausgangsleistung ist die Stabilität einer Lichtquelle ein wichtiges Auswahlkriterium und charakteristisches Leistungsmerkmal. Die Stabilitätsangabe einer Lichtquelle wird bei deren Verwendung z.B. benötigt um Aussagen zum Einfluss im entsprechenden Messaufbau zu erhalten. Je nach Anwendung werden die Leistungsstabilität $S_{out,P}$ und die Wellenlängenstabilität $S_{out,\lambda}$ unterschieden. So ergeben sich Hilfsmessgrößen, die je nach weiterer Verwendung des Messobjektes als Einfluss im Messaufbau berücksichtigt werden können. Ähnlich wie bei der Ausgangsleistung ist weniger der Absolutwert der Messung, sondern viel mehr die Einhaltung individueller Intervallgrenzen von Interesse. Ein (vom Hersteller) spezifizierter Wert könnte beispielsweise als "Stabilität, 15

Ausgabe: DMS.4	erstellt von: PF am: s.DMS06.08.2018	geprüft/ genehmigt von: s. DMS am: s. DMS	Kapitel Qualitätsmanagementhandbuch - XVIII Kalibrierung von faseroptischen Messgrößen	Seite 14
--------------------------	--	--	--	--------------------

Minuten: 0,005 dB" angegeben sein (siehe auch Arbeitsanweisung AA0137 und Addendum AA0137-E1). Damit ergäbe sich das Akzeptanzkriterium für diese Überprüfung zu $S_{out,P} \leq 0,01$ dB.



Power stability c, d (dB)	15 min	±0.005 ($\Delta= 0.01$)
	8 h	±0.03 ($\Delta= 0.06$)

c. Specified at 23 °C ± 1 °C with 50 % relative humidity.

d. After a 1-hour warmup period.

Die Leistungs- oder Wellenlängenstabilität (Stabilitätsintervall) einer optischen Quelle ergeben sich im spezifizierten Zeitintervall (z.B. ≥ 1 h) aus den gemessenen Extremwerten N_{max} und N_{min} zu

$$S_{out} = (N_{max} - N_{min}) + 2\delta N_{Res}$$

Da die Extremwertmessungen und deren Unsicherheitsbeiträge bis auf die Auflöse- bzw. Rundungsabweichung δN_{Res} bei einem kleinen Einfluss von dem Messwert überlagertem Rauschen voll korreliert sind, ist lediglich das Rundungsintervall von $\pm 0,5$ Digit (niederwertigste Stelle der Anzeige, z.B. 0,001 dB, bei der Leistungsanzeige und 0,001 nm bei der Wellenlänge) der Extremwertmessungen als Grenze einer Rechteckverteilung im Unsicherheitsbudget zu berücksichtigen. Für die Unsicherheit der Stabilitätsangaben für die Leistung $S_{out,P}$ bzw. der Wellenlänge $S_{out,\lambda}$ gilt also

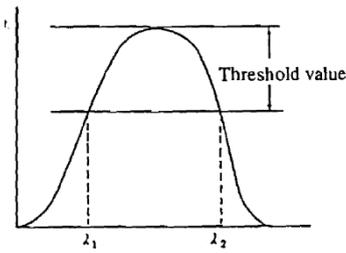
$$U(S_{out,P}) = 2 \cdot \sqrt{2 \cdot \left(\frac{0,001 dB}{2\sqrt{3}}\right)^2} < 0,001 dB$$

$$U(S_{out,\lambda}) = 2 \cdot \sqrt{2 \cdot \left(\frac{0,001 nm}{2\sqrt{3}}\right)^2} < 0,001 nm$$

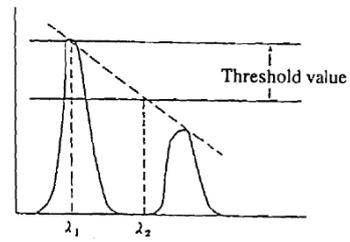
XVIII.4.3 Prüfung der spektralen (Halbwerts-)Breite

Die spektrale Halbwertsbreite (-3 dB-Bandbreite) ist ein Maß für die Schmal- oder Breitbandigkeit einer Quelle und ein häufig spezifiziertes Leistungsmerkmal. Dabei sind grundsätzlich unterschiedliche Definitionen und Messmethoden möglich, die direkt am optischen Spektrumanalysator ANDO AQ-6315A verwendet und ausgewertet werden können. Die universellste Methode, da sowohl für DFB-Laser (mehrere Spitzen) als auch für FP-Laser (Fabry Perot) oder LEDs (eine Spitze) einsetzbar, stellt die Einhüllendenmethode dar ("envelope method" <ENV>). Dabei werden im Falle mehrerer Spitzen (Peaks) diese linear miteinander verbunden, um die korrespondierende Signalpegeldifferenz (Schwellwert "Threshold value" TH1 = 3 dB) und deren Wellenlängen zu ermitteln. Die dazu gehörige Wellenlängendifferenz stellt das Ergebnis dar, das z.B. zur Konformitätsbewertung verwendet werden kann.

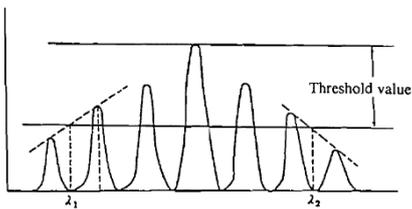
Ausgabe: DMS.4	erstellt von: PF am: s.DMS06.08.2018	geprüft/ genehmigt von: s. DMS am: s. DMS	Kapitel Qualitätsmanagementhandbuch - XVIII Kalibrierung von faseroptischen Messgrößen	Seite 15
--------------------------	--	--	--	--------------------



The wavelengths where the spectrum and threshold value TH1 (set by <ENV TH1> intersect are specified as λ_1 and λ_2 and $\lambda_2 - \lambda_1$ is regarded as spectrum width $\Delta\lambda$.



The difference ($\lambda_2 - \lambda_1$) between wavelength λ_2 and peak wavelength λ_1 where the straight line (envelope) connecting individual peaks intersects with the threshold value TH1 is regarded as spectrum width $\Delta\lambda$. However, when the envelope does not intersect with TH1, the wavelength of 2 mode peak is specified as λ_1 or λ_2 .



Connect individual mode peaks by straight line (envelope).

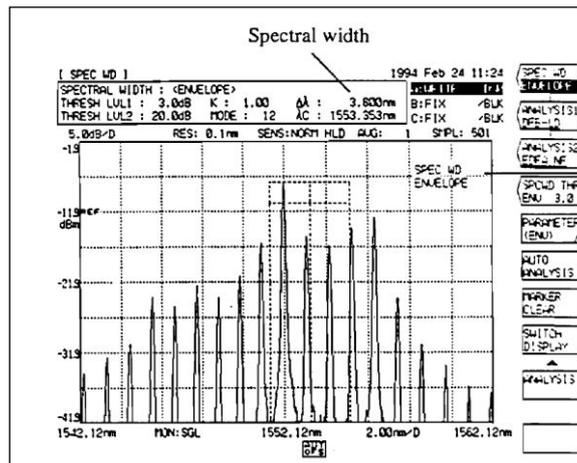


Bild XVIII.4.3.1 Einhüllendenmethode verschiedener Signalspektren und Schwellwertinterpolation

Ausgabe: DMS.4	erstellt von: PF am: s.DMS06.08.2018	geprüft/ genehmigt von: s. DMS am: s. DMS	Kapitel Qualitätsmanagementhandbuch - XVIII Kalibrierung von faseroptischen Messgrößen	Seite 16
--------------------------	--	--	---	--------------------

Das Modell dieser Messung kann angegeben werden zu

$$W_{out} = W_N + 2\delta\lambda + 2\delta L_{3dB} + 2\delta L_{Res}$$

mit

W_{out} gesuchte spektrale Breite der Quelle

W_N gemessene (abgelesene) spektrale Breite am Normal (Spektrumanalysator) im Modus Einhüllende (<ENV>)

$\delta\lambda$ Einfluss der Leistungsschwankungen des Messobjekts, typischerweise < 0,01 dB. Der Einfluss ist dabei zwei Mal zu berücksichtigen, da die Halbwertsbreite aus Messung der -3 dB Signalpegeldifferenz in beide „Richtungen“, also als Differenz der oberen und unteren Wellenlänge, gewonnen wird.

Bei Messungen von Breiten W ergibt sich bei Näherung mit „linearer“ relativer Steilheit (Steigung = 1, d.h. eine Änderung von 1 % auf der Leistungsachse bewirkt eine Veränderung von ebenfalls 1 % auf der Wellenlängenachse) im -3 dB-Punkt

$$a_{\delta\lambda} = 0,0023 \cdot W$$

δL_{3dB} Bei der Bestimmung der -3 dB-Werte spielt lediglich die Linearitätsabweichung des Empfängers eine Rolle. Diese ist in jedem Fall $\leq 0,05$ dB bzw. 1,2 %. Da jedoch der Einfluss der (Nicht-)Linearität auf die Wellenlängenmessung das Ergebnis bestimmt muss anhand der tatsächlichen spektralen Breite der Quelle das dadurch entstehende Werteintervall a_{3dB} wie oben abgeschätzt werden. Auch dieser Beitrag tritt wie oben genannt zwei Mal auf.

δL_{Res} Die Auflösung und Linearität der Wellenlänge von 0,025 nm spielt bei der Messung kleiner spektraler Breiten eine wesentliche Rolle und kann daher nicht vernachlässigt werden.

Tabellarisch ergibt sich

Größe	Schätzwert	Halbbreite	Verteilung	Unsicherheit	Sensitivität	Unsicherheitsbeitrag
X_i	x_i	a		$u(x_i)$	$ c_i ^4$	$u_i(y)$
W_{out}	W_N					
$\delta\lambda$	0	$0,0023 \cdot W$	Rechteck	$\frac{0,0023 \cdot W}{\sqrt{3}}$	2	$0,0027 \cdot W$
δL_{3dB}	0	$0,012 \cdot W$	Rechteck	$\frac{0,012 \cdot W}{\sqrt{3}}$	2	$0,0139 \cdot W$
δL_{Res}	0	0,025 nm	Rechteck	$\frac{0,025nm}{\sqrt{3}}$	2	0,029 nm
W_{out}	Standardunsicherheit			$u(W_{out}) = \sqrt{\sum_{i=1}^N c_i^2 u_i^2(y)} \approx$		$0,014 \cdot W_{out} + 0,029$ nm
	erweiterte Messunsicherheit (k=2)			$U(W_{out}) = k \cdot u(y)$		$3 \% \cdot W_{out} + 0,06$ nm

⁴ $c_i = \frac{\partial Y}{\partial X_i}$

XVIII.4.4 Kalibrierung der Wellenlänge

Die Zentralwellenlänge kann am optischen Wellenlängenmessgerät Burleigh WA-1100 ("Wavemeter") oder optischen Spektrumanalysator (ANDO AQ-6315A) kalibriert werden. Das Wellenlängenmessgerät ist am besten für schmalbandige Quellen (sog. "continuous wave / CW" bzw. FP-Laserquellen) geeignet, der Spektrumanalysator ermöglicht auch die Messung an zusammengesetzten Signalen (mehrere Spitzen) oder "breiten" LEDs. Dabei ist zu beachten dass die lediglich die Spitzenwellenlänge (Peak) des Signals eindeutig bestimmbar ist, andere Angaben (z.B. mittlere Wellenlänge "mean") erfordern die Angabe des Berechnungsalgorithmus, Schwellwerte oder Methode wie Mittelung aus der Einhüllenden ähnlich zu XVII.4.3). Zum Anschluss an die Messgröße "Länge" wird dazu das Wellenlängenmessgerät direkt rückgeführt, die Rückführung des Spektrumanalysators kann indirekt über die eigenen Quellen im Vergleich zum Wellenlängenmessgerät und einen HeNe-Laser als Naturkonstante angeschlossen werden. Zusätzlich kann im Vergleich zu einer vorher oder gleichzeitig eingemessenen Quelle oder zum HeNe-Laser ein weiteres Wellenlängenmessgerät kalibriert werden.

Das Kalibrierverfahren ist ein Direktmessverfahren basierend auf digitaler Zählmessung.

XVIII.4.4.1 Modellgleichung

$$\lambda_{out} = \lambda_{measured} - \delta\lambda_N - \delta\lambda_{Cal} - \delta\lambda_{Drift} - \delta\lambda_{Stab} - \delta\lambda_{resolution}$$

mit

- $\delta\lambda_{out}$ Zentralwellenlänge der Quelle
- $\lambda_{measured}$ gemessene Wellenlänge am Normal (Wavemeter)
- $\delta\lambda_N$ Korrektion aufgrund der Abweichung (z.B. durch die interne Referenz) des Normals
- $\delta\lambda_{Cal}$ Kalibrierunsicherheit des Normals
- $\delta\lambda_{Drift}$ Langzeitsstabilität des Normals des Normals
- $\delta\lambda_{Stab}$ zufälliger Einfluss der Triggerunsicherheit und Kurzzeitstabilität
- $\delta\lambda_{resolution}$ unbekannte Rundungskorrektion bedingt durch die endliche Auflösung des Wavemeters

Unsicherheitsbeiträge und Halbbreiten

- $\lambda_{measured}$ Die Wellenlängenmessung am Normal erfolgt über ein ausreichendes Integrationsintervall von beispielsweise einer Sekunde Messzeit.
- $\delta\lambda_N$ Die maximale Abweichung der Anzeige des Normals wird dem Kalibrierschein entnommen. Für das Wavemeter ergibt sich diese ohne Korrektion zu maximal 1,3 pm (bzw. bei Korrektur der Anzeige aus der Differenz der korrigierten Anzeige zur bekannten Abweichung aus den Kalibrierscheinen zu max. 0,7 pm) als rechteckförmiges Unsicherheitsintervall. Für Wellenlängen unterhalb des kleinsten kalibrierten Wertes werden durch die Korrelation mit dem internen Referenzlaser Intervallgrenzen von maximal 2 pm angenommen. Für den Spektrumanalysator werden 0,5 nm spezifiziert.
- $\delta\lambda_{Cal}$ Die Unsicherheit der Kalibrierung ist dem Kalibrierschein des Normals, z.B. zu 0,6 pm für das Wavemeter entnehmbar (Normalverteilung, k=2).
- $\delta\lambda_{Drift}$ Aus dem Vergleich vergangener Kalbrierungen ergibt sich über alle Wellenlängen eine mittlere Drift von ca. 0,15 pm. Dieser Anteil entfällt, sofern die Herstellerspezifikation als kombinierte „worst-case“-Anzeigeabweichung verwendet wird.
- $\delta\lambda_{Stab}$ Die Wellenlängenstabilität der Quelle ist vom Messobjekt abhängig und kann separat gemessen werden (s.u.). Der kleinste angebbare Wert ist etwa $\pm 0,5$ pm, der die Grenzen einer Rechteckverteilung darstellt. Die Instabilität des Normals selbst ist vernachlässigbar klein.
- $\delta\lambda_{resolution}$ Das maximale Rundungsintervall wird durch die niederwertigste Stelle zu $\pm 0,5$ „Digit“ beschrieben. Im gezeigten Fall ergibt sich $\pm 0,5$ pm.

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.4	von: PF am: s.DMS06.08.2018	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XVIII Kalibrierung von faseroptischen Messgrößen	18

Tabellarische Darstellung der Messunsicherheitsbilanz

Beispiel für die Messung bei einer Einstellung von 850 nm am Wavemeter (ohne Messwertkorrektur)

Größe X_i	Schätzwert x_i	Halbbreite a	Verteilung	Unsicherheit $u(x_i)$	Sensitivität $ c_i $	Unsicherheitsbeitrag $u_i(y)^5$
$\lambda_{measured}$	850,000 nm					
$\delta\lambda_N$	0	2 pm	Rechteck	$\frac{2 \text{ pm}}{\sqrt{3}}$	1	1,15 pm
$\delta\lambda_{Cal}$	0	0,6 pm	Normal	$\frac{0,6 \text{ pm}}{2}$	1	0,30 pm
$\delta\lambda_{Stab}$	0	0,5 pm	Rechteck	$\frac{0,5 \text{ pm}}{\sqrt{3}}$	1	0,29 pm
$\delta\lambda_{resolution}$	0	0,5 pm	Rechteck	$\frac{0,5 \text{ pm}}{\sqrt{3}}$	1	0,29 pm
λ_{out}	850,000 nm			$u(\lambda_{out}) = \sqrt{\sum_{i=1}^N c_i^2 u_i^2(\lambda_{out})}$		1,26 pm
	abs. erweiterte Messunsicherheit (k=2)			$U(\lambda_{out}) = k \cdot u(\lambda_{out})$		2,5 pm

Analog ergibt sich für 1550 nm (mit Messwertkorrektur)

Größe X_i	Schätzwert x_i	Halbbreite a	Verteilung	Unsicherheit $u(x_i)$	Sensitivität $ c_i $	Unsicherheitsbeitrag $u_i(y)$
$\lambda_{measured}$	1550,000 nm					
$\delta\lambda_N$	0	0,7 pm	Rechteck	$\frac{0,7 \text{ pm}}{\sqrt{3}}$	1	0,40 pm
$\delta\lambda_{Cal}$	0	0,6 pm	Normal (k=2)	$\frac{0,6 \text{ pm}}{2}$	1	0,30 pm
$\delta\lambda_{Drift}$	0	0,15 pm	Normal	0,15 pm	1	0,15 pm
$\delta\lambda_{Stab}$	0	0,5 pm	Rechteck	$\frac{0,5 \text{ pm}}{\sqrt{3}}$	1	0,29 pm
$\delta\lambda_{resolution}$	0	0,5 pm	Rechteck	$\frac{0,5 \text{ pm}}{\sqrt{3}}$	1	0,29 pm
λ_{out}	1550,000 nm			$u(\lambda_{out}) = \sqrt{\sum_{i=1}^N c_i^2 u_i^2(\lambda_{out})}$		0,67 pm
	abs. erweiterte Messunsicherheit (k=2)			$U(\lambda_{out}) = k \cdot u(\lambda_{out})$		1,3 pm

Zusammengefasst lässt sich im Betriebsbereich angeben

700 nm bis <1250 nm: $U(\lambda_{out}) = 2,5 \text{ pm}$

1250 nm bis 1700 nm: $U(\lambda_{out}) = 1,3 \text{ pm}$

Für die Messung der Spitzenwellenlänge (Peak) am Spektrumanalysator für Wellenlängen von 350 nm bis 1750 nm dominiert der Anteil der maximalen Messabweichung

$$U(\lambda) = 0,5 \text{ nm}$$

⁵ relative Beiträge werden mit w referenziert; absolute Beiträge mit u

Ausgabe: DMS.4	erstellt von: PF am: s.DMS06.08.2018	geprüft/ genehmigt von: s. DMS am: s. DMS	Kapitel Qualitätsmanagementhandbuch - XVIII Kalibrierung von faseroptischen Messgrößen	Seite 19
--------------------------	--	--	--	--------------------

XVIII.5 Ergebnisse

Die vollständigen Berechnungen aller Stützpunkte und Werte sind den mitgeltenden XL Tabellen

- <http://dmserver/technik/Messunsicherheiten/QMH-Tabellen/Messunsicherheiten-Tabelle-XVIII-LWL-Leistung.xls>

zu entnehmen.

Ausgabe: DMS.4	erstellt von: PF am: s.DMS06.08.2018	geprüft/ genehmigt von: s. DMS am: s. DMS	Kapitel Qualitätsmanagementhandbuch - XVIII Kalibrierung von faseroptischen Messgrößen	Seite 20
--------------------------	--	--	--	--------------------



© esz AG, 2018

Dieses Werk ist unter einer Creative Commons Lizenz vom Typ Namensnennung - Nicht-kommerziell - Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International zugänglich. Um eine Kopie dieser Lizenz einzusehen, konsultieren Sie <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/> oder wenden Sie sich brieflich an Creative Commons, Postfach 1866, Mountain View, California, 94042, USA.

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.4	von: PF am: s.DMS06.08.2018	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XVIII Kalibrierung von faseroptischen Messgrößen	21