

**DIN EN 62129-3
(VDE 0888-429-3)**
DIN

Diese Norm ist zugleich eine **VDE-Bestimmung** im Sinne von VDE 0022. Sie ist nach Durchführung des vom VDE-Präsidium beschlossenen Genehmigungsverfahrens unter der oben angeführten Nummer in das VDE-Vorschriftenwerk aufgenommen und in der „etz Elektrotechnik + Automation“ bekannt gegeben worden.

VDE

ICS 17.180.30; 33.180.99

Einsprüche bis 2017-02-02

Entwurf
**Kalibrierung von Messgeräten für die Wellenlänge/optische Frequenz –
Teil 3: Optisches Frequenzmessgerät mit Verwendung optischer
Frequenzkämme
(IEC 86/501/CD:2016)**

Calibration of wavelength/optical frequency measurement instruments –
Part 3: Optical frequency meters using optical frequency combs
(IEC 86/501/CD:2016)

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2016-12-02 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfs besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal des DIN unter www.entwuerfe.din.de bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an dke@vde.com möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/stellungnahme oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an die DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE, Stresemannallee 15, 60596 Frankfurt am Main.

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 42 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE

Anwendungsbeginn

Anwendungsbeginn dieser Norm ist

Inhalt	Seite
Nationales Vorwort.....	4
Einleitung	5
1 Anwendungsbereich	6
2 Normative Verweisungen	6
3 Begriffe	6
4 Anforderungen an eine Kalibrierprüfung	7
4.1 Vorbereitung	7
4.2 Referenzprüfbedingungen	8
4.3 Rückverfolgbarkeit.....	8
4.3.1 Allgemeines	8
4.3.2 Nationales Normal	8
4.3.3 Übertragungsnormal.....	9
4.3.4 Arbeitsnormal	9
5 Kalibrierung der optischen Frequenz	9
5.1 Allgemeines	9
5.2 Herstellen der Kalibrierbedingungen	11
5.3 Kalibrierverfahren	12
5.3.1 Allgemeines	12
5.3.2 Messkonfiguration	12
5.3.3 Einzelheiten des Verfahrens	13
5.4 Kalibrierunsicherheit	13
5.5 Dokumentation der Ergebnisse	14
Anhang A (normativ) Mathematische Grundlage	15
A.1 Allgemeines	15
A.2 Unsicherheitsbewertung Typ A	15
A.3 Unsicherheitsbewertung Typ B	15
A.4 Bestimmung der kombinierten Standardunsicherheit	16
A.5 Dokumentation der Unsicherheit	17
Anhang B (informativ) Verweisungen auf Quellen optischer Frequenzkämme.....	18
B.1 Verfahren A (modengekoppelter Faserlaser + phasengekoppelte Trägerwelle)	18
B.2 Verfahren B (stabilisierter Laser + elektrooptischer Modulator).....	18
B.3 Verfahren C (stabilisierter Laser + Superkontinuumquelle)	19
Anhang C (informativ) Frequenzabhängigkeit der Unsicherheit.....	20
Literaturhinweise.....	21

Bilder

Bild 1 – Rückverfolgbarkeitskette mit Verwendung eines Messprogramms für optische Frequenz	9
Bild 2 – Schematische Konfiguration einer Technik zur Messung der optischen Frequenz mit Anwendung optischer Frequenzkämme	10
Bild 3 – Optische Spektren von Lasern und optischen Frequenzkämmen	11
Bild 4 – Messung mit optischem Frequenzmessgerät unter Verwendung einer Referenzquelle	12
Bild 5 – Messung mit optischem Frequenzmessgerät unter Verwendung eines Referenzmessgeräts für optische Frequenz	13
Bild B.1 – Modengekoppelter Laser + nichtlineare optische Wirkung.....	18
Bild B.2 – Kammquelle des Typs elektrooptischer Modulator.....	19
Bild B.3 – Superkontinuumquelle	19

Nationales Vorwort

Das internationale Dokument IEC 86/501/CD:2016 „Calibration of wavelength/optical frequency measurement instruments – Part 3: Optical frequency meters using optical frequency combs“ (CD, en: Committee Draft) ist unverändert in diesen Norm-Entwurf übernommen worden. Dieser Norm-Entwurf enthält eine noch nicht autorisierte deutsche Übersetzung.

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung des CD entsprechend der diesbezüglich durch die IEC erteilten Erlaubnis beigelegt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen IEC-Text.

Das internationale Dokument wurde vom TC 86 „Fibre optics“ der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) erarbeitet und den nationalen Komitees zur Stellungnahme vorgelegt.

Die IEC und das Europäische Komitee für Elektrotechnische Normung (CENELEC) haben vereinbart, dass ein auf IEC-Ebene erarbeiteter Entwurf für eine Internationale Norm zeitgleich (parallel) bei IEC und CENELEC zur Umfrage (CDV-Stadium) und Abstimmung als FDIS (en: Final Draft International Standard) bzw. Schluss-Entwurf für eine Europäische Norm gestellt wird, um eine Beschleunigung und Straffung der Normungsarbeit zu erreichen. Dokumente, die bei CENELEC als Europäische Norm angenommen und ratifiziert werden, sind unverändert als Deutsche Normen zu übernehmen.

Da der Abstimmungszeitraum für einen FDIS bzw. Schluss-Entwurf prEN nur 2 Monate beträgt, und dann keine sachlichen Stellungnahmen mehr abgegeben werden können, sondern nur noch eine „JA/NEIN“-Entscheidung möglich ist, wobei eine „NEIN“-Entscheidung fundiert begründet werden muss, wird bereits der CD als DIN-Norm-Entwurf veröffentlicht, um die Stellungnahmen aus der Öffentlichkeit frühzeitig berücksichtigen zu können.

Für dieses Dokument ist das nationale Arbeitsgremium UK 412.2 „Komponenten für Kommunikationskabelanlagen“ der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE (www.dke.de) zuständig.

Für den Fall einer undatierten Verweisung im normativen Text (Verweisung auf ein Dokument ohne Angabe des Ausgabedatums und ohne Hinweis auf eine Abschnittsnummer, eine Tabelle, ein Bild usw.) bezieht sich die Verweisung auf die jeweils aktuellste Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments.

Für den Fall einer datierten Verweisung im normativen Text bezieht sich die Verweisung immer auf die in Bezug genommene Ausgabe des Dokuments.

Der Zusammenhang der zitierten Dokumente mit den entsprechenden Deutschen Dokumenten ergibt sich, soweit ein Zusammenhang besteht, grundsätzlich über die Nummer der entsprechenden IEC-Publikation. Beispiel: IEC 60068 ist als EN 60068 als Europäische Norm durch CENELEC übernommen und als DIN EN 60068 ins Deutsche Normenwerk aufgenommen.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. ISO [und/oder] IEC sind nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Das Original-Dokument enthält Bilder in Farbe, die in der Papierversion in einer Graustufen-Darstellung wiedergegeben werden. Elektronische Versionen dieses Dokuments enthalten die Bilder in der originalen Farbdarstellung.

Kalibrierung von Messgeräten für die Wellenlänge/optische Frequenz – Teil 3: Optisches Frequenzmessgerät mit Verwendung optischer Frequenzkämme

Einleitung

Für die Realisierung von LWL-Systemen ist es wesentlich, dass optische Kanäle im Bereich der optischen Frequenz und nicht im Bereich der Wellenlänge festgelegt werden. Ein Beispiel: Die Ankerfrequenz des ITU-T-Rasters beträgt 193,1 THz und die Kanalabstände des ITU-T-Rasters betragen 12,5 GHz, 25 GHz, 50 GHz und 100 GHz [1]¹⁾.

In ITU-T werden auch λ -Schnittstellen-Systeme behandelt, wie zum Beispiel „black link“ [2]. „Black link“ umfasst WDM-MUX/DEMUX und eine Übertragungsfaser und bietet λ -Schnittstellen. Insbesondere in DWDM-Systemen (Kanalabstand < 100 GHz) muss die Unsicherheit bei der Festlegung von optischen Frequenzen minimiert werden.

Es wird angenommen, dass die Messungen der optischen Frequenz äußerst präzise sein müssen, um zukünftige Telekommunikationssysteme zu implementieren. Um zum Beispiel einen Kanalabstand von 25 GHz zu erreichen, müssen die optische Frequenz des Signals (Uf_{sig}) und die geforderte Messunsicherheit (Uf_{meas}) 2 GHz bis 200 MHz ($Uf_{\text{sig}}/f = 10^{-5}$ bis 10^{-6} beziehungsweise 200 MHz bis 2 MHz ($Uf_{\text{meas}}/f = 10^{-6}$ bis 10^{-8}) betragen. Herkömmliche Wellenlängen-Messgeräte haben aber leider Messunsicherheiten von 10^{-6} bis 10^{-7} . Die Lösung liegt in der Anwendung von Messungen der optischen Frequenz, da die Messunsicherheiten hier in der Größenordnung von 10^{-15} bis 10^{-16} liegen können und die vorgenannten Telekommunikationsanforderung damit erfüllt werden ($Uf_{\text{meas}}/f = 10^{-6}$ bis 10^{-8}). Folglich ist für die Kalibrierung zukünftiger Telekommunikationssysteme ein Programm für die Messung der optischen Frequenz erforderlich.

Technologien für die Messung der optischen Frequenz entwickeln sich sehr schnell. In vielen grundlegenden Arbeiten wurde die Anwendung von abstandsgleichen Linien „optischer Frequenzkämme“ (Abstände bis zu 50 GHz) eines optischen Frequenzkamm als „Maßstab“ für eine Messung der optischen Frequenz untersucht [4-15]. Zum Beispiel ermöglichen modengekoppelte Laser mit einer phasengekoppelten Trägerwelle äußerst niedrige Messunsicherheiten von 10^{-15} bis 10^{-16} . Einige Beispiele von optischen Frequenzkämmen sind in [Anhang B](#) (modengekoppelter Faserlaser + phasenkoppelte Trägerwelle, stabilisierter Laser + elektrooptischer Modulator und stabilisierter Laser + Superkontinuumquelle) dargestellt. Frequenzmessungen liefern genauere Werte als interferometrische Wellenlängenmessungen in Luft, indem die Auswirkungen der Brechzahlen entfernt werden. Außerdem lassen sie zu, dass die Messgeräte wesentlich kleiner sind als Wellenlängen-Messgeräte.

¹⁾ Ziffern in eckigen Klammern verweisen auf die Literaturhinweise.

1 Anwendungsbereich

Dieser Teil von IEC 62129 legt die Kalibrierung von Messgeräten für optische Frequenz fest. Er ist anwendbar für Messgeräte zur Messung der optischen Frequenz, welche von Quellen ausgesendet wird, die für die LWL-Kommunikationsindustrie typisch sind. Es wird angenommen, dass die optische Strahlung mit einem Einmoden-Lichtwellenleiter in das optische Frequenzmessgerät eingekoppelt wird.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente, die in diesem Dokument teilweise oder als Ganzes zitiert werden, sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

IEC 60793-2-50, *Optical fibres – Part 2-50: Product specifications – Sectional specification for class B single-mode fibres*

IEC 60825-1, *Safety of laser products – Part 1: Equipment classification and requirements*

IEC 60825-2, *Safety of laser products – Part 2: Safety of optical fibre communication systems (OFCS)*

IEC TR 61931, *Fibre optic – Terminology*

ISO/IEC Guide 98-3:2008, *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*

ISO/IEC 17025:2005, *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach IEC TR 61931 und die folgenden Begriffe.

ISO und IEC pflegen Terminologie-Datenbanken zur Verwendung bei der Normung unter den folgenden Adressen:

- IEC-Electropedia: verfügbar unter <http://www.electropedia.org/>
- ISO-Internet-Plattform: verfügbar unter <http://www.iso.org/obp>

3.1

akkreditiertes Kalibrierlaboratorium

Kalibrierlabor, das von der entsprechenden nationalen Organisation autorisiert ist, Kalibrierzertifikate mit einer kleinsten festgelegten Unsicherheit auszustellen und welche die Rückführbarkeit auf nationale Messnormale aufzeigen

3.2

Kalibrierung

Reihe von Operationen, die unter festgelegten Bedingungen die Beziehung zwischen den von einem Messgerät angezeigten Werten von Größen und den entsprechenden aus Messnormalen bekannten Werten herstellt

Anmerkung 1 zum Begriff: Das Ergebnis einer Kalibrierung erlaubt entweder die Zuordnung von gemessenen Werten zu den angezeigten Werten oder die Bewertung von Korrekturen in Bezug auf die angezeigten Werte.

Anmerkung 2 zum Begriff: Eine Kalibrierung bestimmt möglicherweise auch andere metrologische Eigenschaften, wie die Wirkungen von Einflussgrößen.

Anmerkung 3 zum Begriff: Das Ergebnis einer Kalibrierung darf in einem Dokument aufgezeichnet werden, welches manchmal Kalibrierzertifikat oder Kalibrierbericht genannt wird.

[QUELLE: ISO/IEC Guide 99:2007, 2.39, geändert – nur der erste Teil der Definition wird verwendet] [3]

3.3

nationales [Mess-] Normal

Messnormal, welches durch eine nationale Entscheidung anerkannt ist, um in einem Land als Grundlage für die Zuordnung von Werten auf andere Messnormale der betreffenden Größe zu dienen

[Verwandt mit ISO/IEC Guide 99:2007, 5.3]

3.4

Laboratorium für nationale Normale

Laboratorium, welches das nationale Messnormal pflegt

3.5

Referenznormal

Messnormal, welches im Allgemeinen die höchste metrologische Qualität aufweist, die an einem gegebenen Standort oder in einer gegebenen Organisation verfügbar ist, von welchem dort durchgeführte Messungen abgeleitet werden

[Verwandt mit ISO/IEC Guide 99:2007, 5.6]

3.6

Rückverfolgbarkeit

Eigenschaft eines Messergebnisses oder des Wertes eines Messnormals, durch welche dieses mittels einer ununterbrochenen Kette von Vergleichsmessungen, alle mit angegebenen Messunsicherheiten, auf angegebene Referenzwerte, im Allgemeinen nationale oder internationale Messnormale, bezogen werden kann

[Verwandt mit ISO/IEC Guide 99:2007, 2.41]

3.7

Rückverfolgbarkeitskette

ununterbrochene Kette von Vergleichen

[Verwandt mit ISO/IEC Guide 99:2007, 2.42]

3.8

Arbeitsnormal

Messnormal, das routinemäßig benutzt wird, um Messgeräte zu kalibrieren oder zu überprüfen

Anmerkung 1 zum Begriff: Ein Arbeitsnormal ist üblicherweise gegen ein Referenznormal kalibriert.

[Verwandt mit ISO/IEC Guide 99:2007, 5.7]

4 Anforderungen an eine Kalibrierprüfung

4.1 Vorbereitung

Die folgenden Empfehlungen sind anwendbar.

Das Kalibrierlaboratorium sollte die Anforderungen nach ISO/IEC 17025 erfüllen.

Für alle Arten von Kalibrierungen sollte ein dokumentiertes Messverfahren vorliegen, mit Schritt-für-Schritt-Bedienungsanleitungen und den zu verwendenden Einrichtungen.

Die Umgebungsbedingungen müssen dem Grad der Unsicherheit entsprechen, der für die Kalibrierung erforderlich ist:

- a) die Umgebung muss sauber sein;
- b) Temperaturüberwachung und -regelung sind erforderlich;
- c) alle Laserquellen müssen sicher betrieben werden (siehe IEC 60825-1).

Alle Prüfungen sind bei einer Umgebungsraumtemperatur von $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ mit einer relativen Luftfeuchte von $(50 \pm 20) \%$ durchzuführen, sofern nicht anders festgelegt. Bevor mit der Prüfung begonnen wird, ist dem Prüfaufbau mindestens 2 h Zeit zu gewähren, um ein thermisches Gleichgewicht mit der Umgebung zu erreichen. Dem optischen Frequenzmessgerät ist entsprechend den Herstelleranweisungen eine ausreichende Aufwärmzeit zu gewähren.

4.2 Referenzprüfbedingungen

Die Referenzprüfbedingungen schließen üblicherweise die folgenden Parameter und, sofern dies erforderlich ist, ihre Toleranzbänder ein: Datum, Temperatur, relative Luftfeuchte, angezeigter Leistungspegel, angezeigte optische Frequenz, Faser, Steckverbinder-Kupplung-Kombination, (spektrale) Bandbreite und eingestellte Auflösungsbandbreite (spektrale Auflösung). Sofern nicht anders festgelegt, ist am Eingang eine optische Einmoden-Anschlussfaser der Kategorie B nach den Vorschriften der IEC 60793-2 mit einer Länge von mindestens 2 m zu verwenden.

Das optische Frequenzmessgerät ist in Übereinstimmung mit den vom Hersteller angegebenen Spezifikationen und Betriebsverfahren zu betreiben. Wenn es praktisch möglich ist, sind Prüfbedingungen und Parameter auszuwählen, welche die tatsächlichen Betriebsbedingungen des geprüften optischen Frequenzmessgerätes nachbilden. Diese Parameter sind so auszuwählen, dass Unsicherheiten des optischen Frequenzmessgerätes optimiert werden, wie in den Betriebsverfahren des Herstellers festgelegt.

Aufgrund des Potentials für gefährliche Strahlung ist sicherzustellen, dass Bedingungen der Lasersicherheit geschaffen und erhalten werden. Siehe IEC 60825-1 und IEC 60825-2.

ANMERKUNG Die Kalibrierergebnisse gelten nur für den Satz von Prüfbedingungen, der im Prozess der Kalibrierung angewendet wurde.

4.3 Rückverfolgbarkeit

4.3.1 Allgemeines

Die Anforderungen nach ISO/IEC 17025 müssen erfüllt werden.

Es ist sicherzustellen, dass alle Prüfeinrichtungen, welche einen maßgeblichen Einfluss auf die Kalibrierergebnisse haben, in einer ununterbrochenen Kette gegenüber dem nationalen Normal oder natürlichen physikalischen Konstanten kalibriert werden. Diese Prüfeinrichtungen und ihre Kalibrierkette(n) sind auf Nachfrage zu spezifizieren. Die Periode(n) für eine Neukalibrierung muss/müssen festgelegt und dokumentiert werden.

In Bild 1 ist ein Beispiel für die Rückverfolgbarkeitskette unter Verwendung eines Frequenzkamms dargestellt. Sie besteht aus einem nationalen Normal, einem Übertragungsnormal und einem Arbeitsnormal. Die Rückverfolgbarkeitskette kann optische Frequenznormale bereitstellen, die für den Telekommunikationsbereich zweckmäßig sind.

4.3.2 Nationales Normal

Das nationale Normal der optischen Frequenz (oder Wellenlänge) kann realisiert werden, indem die Kombination von UTC(k) (Weltzeit, koordiniert) und eines optischen Frequenzkamms angewendet wird, wofür ein Beispiel in 5.1 beschrieben ist. Dieser optische Frequenzkamm erzeugt einen optischen Frequenzkamm mit festen, gleichmäßigen Abständen.

Durch die Anwendung der in 5.1 dargestellten Technik der optischen Frequenzmessung, kann die Unsicherheit bei der Normfrequenz, welche durch den Taktgeber (bis zu 10^{-15}) begrenzt ist, während der gesamten Zeitspanne des Kamms gehalten werden.

4.3.3 Übertragungsnormal

Ein stabilisierter Laser kann als Übertragungsnormal verwendet werden, welches im Allgemeinen zwischen einem akkreditierten Kalibrierlaboratorium und einem Kalibrierlaboratorium eines Unternehmens verwendet wird.

4.3.4 Arbeitsnormal

Das Arbeitsnormal wird aus einem stabilisierten Laser und einem optischen Frequenzkamm in jedem Kalibrierlaboratorium gebildet. Als optischer Frequenzkamm können modengekoppelte Laser, elektro-optische Modulatoren oder Superkontinuumquellen, wie in [Anhang B](#) gezeigt, verwendet werden, da sie eine niedrige Unsicherheit bis zu 10^{-9} bereitstellen.

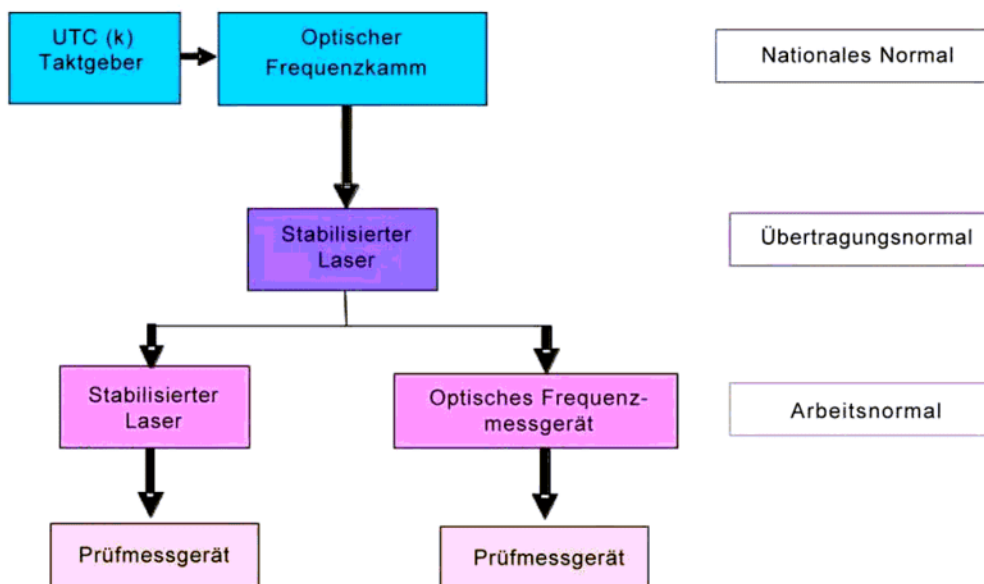


Bild 1 – Rückverfolgbarkeitskette mit Verwendung eines Messprogramms für optische Frequenz

5 Kalibrierung der optischen Frequenz

5.1 Allgemeines

Für Messungen der optischen Frequenz werden abstandsgleiche „Frequenzkamm“-Linien (Abstand von bis zu 50 GHz) eines optischen Frequenzkamms als „Maßstab“ für eine Messung der optischen Frequenz verwendet [4-15]. Messungen der optischen Frequenz liefern eine genauere Kalibrierung als interferometrische Wellenlängenmessungen in Luft, indem die Auswirkungen der Brechzahl entfernt werden.

Einige Beispiele eines optischen Frequenzkamms in der Praxis sind in Abschnitt 5 dargestellt.

In [Bild 2](#) ist eine schematische Konfiguration einer Technik zur Messung der optischen Frequenz dargestellt, bei welcher optische Frequenzkämme angewendet werden.

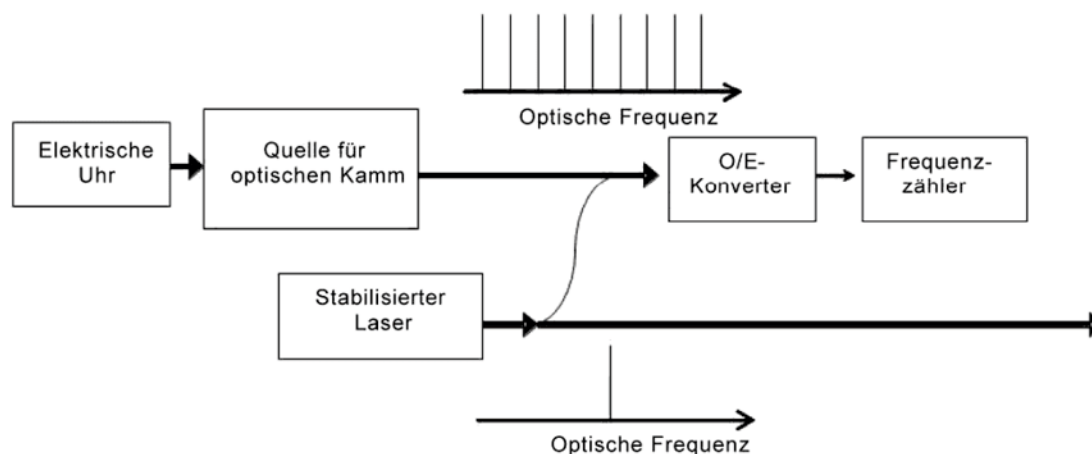


Bild 2 – Schematische Konfiguration einer Technik zur Messung der optischen Frequenz mit Anwendung optischer Frequenzkämme

In Bild 3 sind das optische Spektrum des Lasers und der optischen Frequenzkamm dargestellt. Der optische Frequenzkamm erzeugt einen optischen Frequenzkamm mit gleichmäßigen Abständen ($f(\text{Kammabstand})$), welche gleich der Frequenz des elektrischen Taktgebers sind, welcher den optischen Frequenzkamm taktet. $f(\text{Kammabstand})$ ist auch gleich der Puls wiederholrate. Folglich ist die Unsicherheit der Kammabstände proportional zur Unsicherheit der Frequenz des elektrischen Taktgebers. Der Kammabstand liegt im Allgemeinen zwischen 100 MHz und 25 GHz. In diesem Fall wird der Ausgang des stabilisierten Lasers ($f(\text{stabilisierter Laser})$) mit dem optischen Frequenzkamm kombiniert, und diese zwei Lichtquellen werden in einen optisch-elektrischen (O/E) Konverter eingekoppelt. Die Schwebungsfrequenz ($f(\text{Schwebung})$) zwischen den beiden Lichtquellen wird als Ausgang des O/E-Konverters genommen. Die optische Frequenz ($f(\text{stabilisierter Laser})$) des stabilisierten Lasers kann mit Gleichung (1) berechnet werden.

$$f(\text{stabilisierter Laser}) = f(N) \pm f(\text{Schwebung}) \quad (1)$$

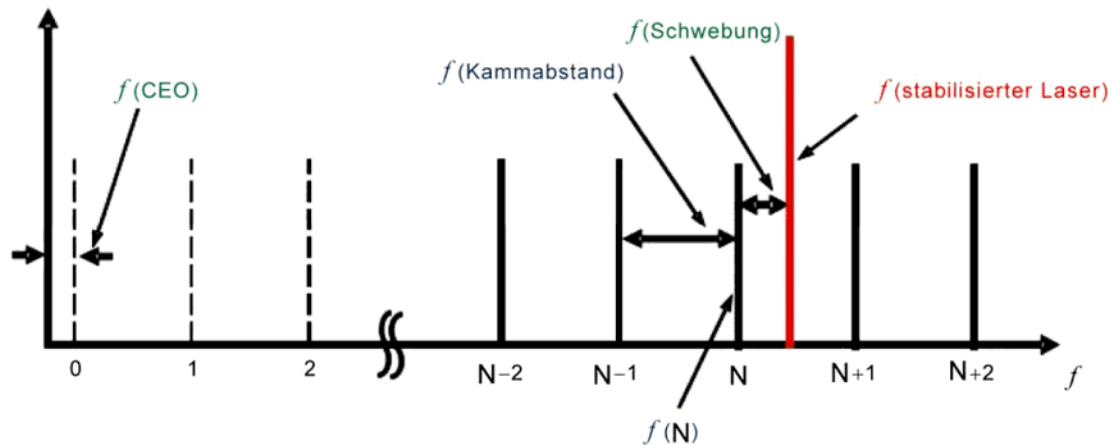
Dabei ist $f(N)$ die optische Frequenz der N-ten Faser des optischen Frequenzkamms, und ist die Summe aus $f(\text{Kammabstand})$ und der Trägerwellen-Versatzfrequenz $f(\text{CEO})$ (en: carrier envelope offset), wie in Gleichung (2) dargestellt.

$$f(N) = N \times f(\text{Kammabstand}) + f(\text{CEO}) \quad (2)$$

Dabei ist N die große Ganzzahl und kann mittels eines Wellenlängen-Messgeräts bestimmt werden. Das Vorzeichen der Schwebungsfrequenz (+ oder -) kann durch eine geringfügige Änderung von $f(\text{stabilisierter Laser})$ ermittelt werden.

$f(\text{CEO})$ steht in Beziehung zur Puls-zu-Puls-Phasenverschiebung $\Delta\phi$ zwischen dem Spitzenwert des elektrischen Feldes und dem Spitzenwert der Trägerwelle [5], wie in Gleichung (3) dargestellt.

$$f(\text{CEO}) = (\Delta\phi/2\pi f(\text{Kammabstand})) \quad (3)$$



Legende

f	optische Frequenz
$f(\text{stabilisierter Laser})$	Frequenz des stabilisierten Lasers
$f(\text{Kammabstand})$	Kammabstand
$f(\text{Schwebung})$	Schwebungsfrequenz
$f(N)$	optische Frequenz der N-ten Kammode
$f(\text{CEO})$	Trägerwellen-Versatzfrequenz

Bild 3 – Optische Spektren von Lasern und optischen Frequenzkämmen

5.2 Herstellen der Kalibrierbedingungen

Das Herstellen und Aufrechterhalten der Kalibrierbedingungen ist ein wichtiger Teil der Kalibrierung, da jede Änderung dieser Bedingungen zu fehlerhaften Messergebnissen führen kann. Die Kalibrierbedingungen sollte eine genaue Annäherung an die bestimmungsgemäßen Betriebsbedingungen sein. Dadurch wird sichergestellt, dass die (zusätzliche) Unsicherheit in der Betriebsumgebung so gering wie möglich ist. Die Kalibrierbedingungen sollten in Form von Nennwerten mit Unsicherheiten, sofern verfügbar, festgelegt werden. Um die Anforderungen der vorliegenden Norm zu erfüllen, müssen die Kalibrierbedingungen mindestens das Folgende umfassen:

- Datum der Kalibrierung;
- Umgebungstemperatur, mit Unsicherheit, zum Beispiel $(23 \pm 3)^\circ\text{C}$. Die Temperatur muss möglicherweise ununterbrochen überwacht werden, um sicherzustellen, dass sie innerhalb der vorgeschriebenen Grenzwerte bleibt;
- Umgebungsluftfeuchte, zum Beispiel 30 % bis 70 %, Die Umgebungsluftfeuchte muss möglicherweise ununterbrochen überwacht werden, um sicherzustellen, dass sie innerhalb der vorgeschriebenen Grenzwerte bleibt. Eine relative Luftfeuchte unterhalb des Taupunktes wird als Vorgabewert angenommen;
- optische Eingangsleistung (diese muss innerhalb der zulässigen Festlegung für die Messgeräte liegen);
- Einzelheiten des Referenzmaterials oder dessen Identifikationsnummer. Beispiele für eine Gasabsorptionszelle sind:
 - Gas und Isotop, z. B. $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$
 - Weglänge, z. B. 15 cm
 - Druck der Zelle, z. B. 1 000 Pa
 - Übergang, z. B. R(21);
- wenn eine Quelle mit fest eingestelltem Übergang benutzt wird, muss die Qualität der Festeinstellung während der Messungen ununterbrochen überwacht werden; dabei kann eine Anzeige der Festeinstellung ausreichend sein.

Die vorgenannten Bedingungen erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Es gibt möglicherweise weitere Parameter geben, die einen maßgeblichen Einfluss auf die Messunsicherheit haben können und die deshalb ebenfalls aufgeführt werden sollten.

5.3 Kalibrierverfahren

5.3.1 Allgemeines

Die wichtigsten Schritte des Kalibrierverfahrens sind die folgenden:

- Herstellen und Aufzeichnen der geeigneten Kalibrierbedingungen (siehe 5.2). Einschalten aller Messgeräte und Gewähren einer ausreichenden Wartezeit für die Stabilisierung;
- Einstellen der Referenzquelle;
- Geräteeinstellung des Prüfmessgeräts für optische Frequenz nach der Gebrauchsanweisung. Auswahl geeigneter Maßeinheiten;
- Aufzeichnen der Geräteeinstellungen des Prüfmessgeräts für optische Frequenz.

5.3.2 Messkonfiguration

In Kalibrierlaboratorien kann ein stabilisierter Laser (ein Übertragungsnormal in Bild 1) als Referenzquelle verwendet werden.

In Bild 4 ist die Konfiguration unter Verwendung der Referenzquelle dargestellt. Die Umgebungstemperatur wird überwacht.

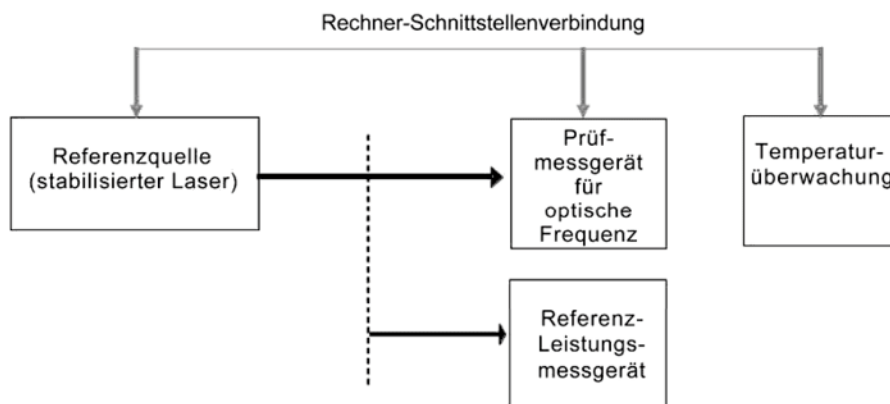


Bild 4 – Messung mit optischem Frequenzmessgerät unter Verwendung einer Referenzquelle

In Bild 5 ist die Konfiguration unter Verwendung eines Referenzmessgeräts für die optische Frequenz als Arbeitsnormal, in Bild 1, dargestellt. Die Umgebungstemperatur wird überwacht.

Es ist erforderlich, dass die Messungen gleichzeitig sowohl an den Referenz- als auch den Prüfmessgeräten für optische Frequenz durchgeführt werden.

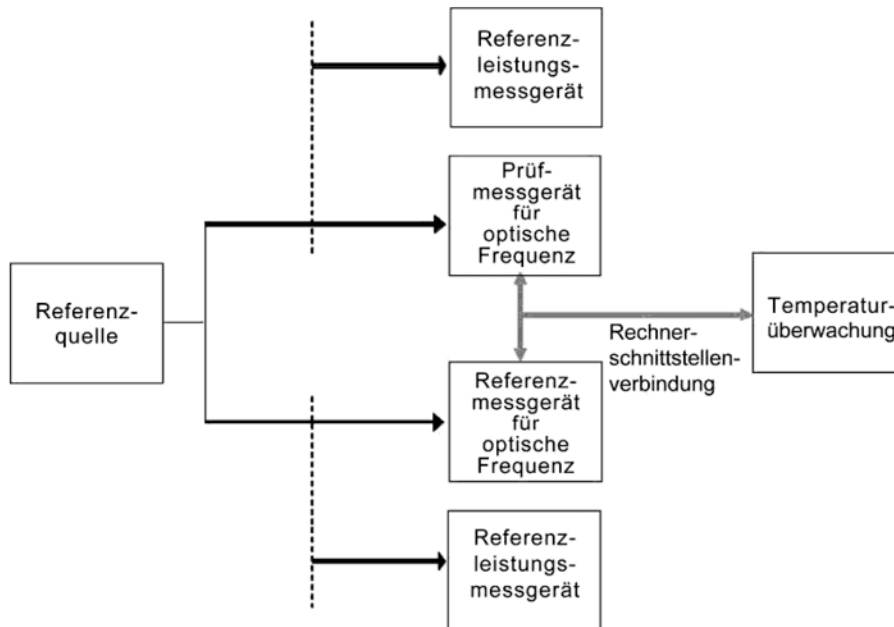


Bild 5 – Messung mit optischem Frequenzmessgerät unter Verwendung eines Referenzmessgeräts für optische Frequenz

5.3.3 Einzelheiten des Verfahrens

Üblicherweise werden 50 Proben (n) je Messung genommen.

Das Messverfahren ist wie folgt:

- Abwarten, bis die Einrichtung einen eingeschwungenen Zustand erreicht hat;
- Konfigurieren der Software zur Datenerfassung;
- Sicherstellen, dass die optische Quelle fest eingestellt ist und sich im ordnungsgemäßen Betrieb befindet;
- Ausführen der Datenerfassungssoftware.

Der Korrekturfaktor wird aus der Differenz zwischen der optischen Referenzfrequenz und den Mittelwerten von jeder Messung ermittelt:

$$CF = f_{ref} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{test_i} \quad (4)$$

Dabei ist f_{ref} die optische Referenzfrequenz und f_{test} die optische Frequenz, die mit dem Prüfmessgerät für optische Frequenz gemessen wurde.

5.4 Kalibrierunsicherheit

Es ist zu beachten, dass die folgende Liste keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt. In Abhängigkeit vom Messaufbau und vom Messverfahren sind möglicherweise weitere Beiträge zu berücksichtigen. Die mathematische Grundlage, [Anhang A](#), sollte verwendet werden, um die Unsicherheit zu berechnen und anzugeben.

- Unsicherheit der Quelle (wie gut die Quelle auf das natürliche Normal stabilisiert ist);
- Normabweichung von Messproben.