

Brechzahlkompensation mittels Mehrwellenlängen-Interferometrie

Karl Meiners-Hagen¹, Florian Pollinger², Ahmed Abou-Zeid³

1 Einleitung

Präzise Längenmessungen werden häufig mit optischen Messmethoden durchgeführt. Neben indirekten Verfahren wie z. B. der Triangulation werden Messverfahren eingesetzt, die direkt auf der Lichtgeschwindigkeit basieren. Wird die Länge über eine Laufzeitmessung des Lichts gemessen, ist die Lichtgeschwindigkeit c in Luft entscheidend, welche etwas kleiner als die Vakuumlichtgeschwindigkeit c_0 ist: $c = c_0/n$. Der Parameter n ist hierbei die Brechzahl der Luft. Bei interferometrischen Längenmessungen ist die Wellenlänge λ in Luft das Längenmaß. Zwischen Wellenlänge, Lichtgeschwindigkeit und der Frequenz ν des Lichts besteht die Beziehung $\lambda = c/\nu$. Die meisten in der Interferometrie verwendeten Laser sind in ihrer Frequenz stabilisiert. Die Wellenlänge ihres Lichts in Luft ist $\lambda = \lambda_0/n$ und damit kleiner als die Vakuumwellenlänge λ_0 . Ein Detail, auf das in diesem Artikel nicht weiter eingegangen werden soll, ist die Unterscheidung zwischen der Phasenbrechzahl, welche bei phasensensitiven Messungen wie der Interferometrie wirkt und der Gruppenbrechzahl, die die Laufzeit eines Wellenpakets mit verschiedenen Wellenlängen beschreibt. Diese ist bei Laufzeitmessungen mit gepulstem Licht entscheidend.

Die Brechzahl ist eng gekoppelt mit der Dichte der Luft, die im wesentlichen durch den Druck, die Temperatur und die Zusammensetzung der Luft (Wasserdampf-, Kohlendioxidanteil) bestimmt wird. Bei 20 °C und atmosphärischem Druck beträgt die Brechzahl ca. 1,00027. Ein komplettes Vernachlässigen der Luftbrechzahl ($n = 1$) würde demnach zu einem systematischen Fehler von ca. +0,27 mm pro Meter Messstrecke führen. Zur Bestimmung der Luftbrechzahl gibt es mehrere Verfahren. Am häufigsten wird die Brechzahl aus der so genannten Edlèn-Formel [1] und ihren Fortentwicklungen [2–4] berechnet, in die als Parameter der Luftdruck p , die Temperatur t , der Wasserdampfpartialdruck p_w und der Kohlendioxidgehalt (CO_2) x eingehen. Da sich der Wasserdampfpartialdruck in Luft nicht direkt messen lässt, wird er normalerweise aus der gemessenen relativen Luftfeuchte RH und der Temperatur berechnet (siehe z. B. [2]). Den Einfluss der Luft-

parameter auf die Brechzahl n und damit den Effekt auf die Längenmessung ($\Delta L/L = \Delta n/n \approx \Delta n$) verdeutlicht Tabelle 1.

Tabelle 1:

Einfluss der Umgebungsparameter auf die Brechzahl n von Luft.

Einflussparameter	Änderung	Effekt
Temperatur	$\Delta t = + 1 \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta n = - 1 \cdot 10^{-6}$
Druck	$\Delta p = + 1 \text{ hPa}$	$\Delta n = + 2,7 \cdot 10^{-7}$
Relative Feuchte	$\Delta RH = + 1\%$	$\Delta n = + 1 \cdot 10^{-8}$
CO ₂ -Gehalt	$\Delta x = + 1 \text{ ppm}$	$\Delta n = + 1,5 \cdot 10^{-10}$

Die Temperatur und der Luftdruck haben somit den praktisch größten Einfluss auf die Brechzahl. Da der Luftdruck zumindest bei horizontalen Messungen sehr homogen ist, lässt er sich mit Präzisionsbarometern recht genau bestimmen. Eine präzise Temperaturmessung ist jedoch umso schwieriger, je inhomogener die Temperaturverteilung und je länger die Strecke ist. Ein extremes Beispiel ist die Messung langer Strecken im Freien (Geodäsie). Hier ist es in der Praxis nicht möglich, die durchschnittliche Temperatur über mehrere hundert Meter auf 1 °C genau zu bestimmen, was zu einer Unsicherheit der Längenmessung von $> 1 \cdot 10^{-6} L$ bzw. $> 1 \text{ mm/km}$ führt. Für Präzisionsmessungen ist es erforderlich, auch die relative Luftfeuchte und den CO₂-Gehalt der Luft zu messen. Dennoch beträgt die Unsicherheit der Längenmessung selbst in gut klimatisierten Laboren und auf Längen L unter einem Meter mindestens wenige $10^{-8} L$. Die Unsicherheit der Edlèn-Formel selbst wird dabei mit $1 \cdot 10^{-8}$ bei 50 % relativer Luftfeuchte angegeben [2].

Alternativ lässt sich die Brechzahl auch direkt mit einem so genannten Refraktometer messen. In einem typischen Refraktometer wird die Länge einer Strecke in Luft mit derselben Strecke im Vakuum interferometrisch verglichen. Das gemessene Längenverhältnis gibt direkt die Brechzahl an. Ein wesentlicher Vorteil dieser Methode ist, dass die gemessene Brechzahl der realen Brechzahl im Refraktometer entspricht und auch Fremdgase wie z. B. Lösungsmittel

¹ Dr. Karl Meiners-Hagen
Arbeitsgruppe „Mehrwellenlängeninterferometrie für geodätische Längen“,
E-Mail: karl.meiners-hagen@ptb.de

² Dr. Florian Pollinger,
Leiter der Arbeitsgruppe „Mehrwellenlängeninterferometrie für geodätische Längen“
E-Mail: florian.pollinger@ptb.de

³ Dr. Ahmed Abou-Zeid,
ehem. Leiter des Fachbereichs „Interferometrie an Maßverkörperungen“
E-Mail: ahmed.abou-zeid@ptb.de

berücksichtigt, welche in der Edlèn-Formel nicht erfasst werden. Ein Nachteil ist, dass das Refraktometer neben der eigentlich zu messenden Strecke angebracht werden muss und somit Brechzahlunterschiede durch Gradienten oder Turbulenzen auftreten können. Refraktometer werden daher möglichst nur unter sehr stabilen Umweltbedingungen verwendet.

Es ist auch möglich, den Einfluss der Brechzahl auf die Längenmessung zu kompensieren. Die Brechzahl der Luft hängt nicht nur von den oben genannten Parametern Temperatur, Druck, Feuchte und CO_2 -Gehalt ab, sondern wegen der Dispersion auch von der Wellenlänge des verwendeten Lichts. Durch Messung einer Länge mit Licht zweier verschiedener Wellenlängen lässt sich unter Ausnutzung der Dispersion der Einfluss der Brechzahl der Luft teilweise oder vollständig kompensieren. Dieses Verfahren ist seit den 1960er Jahren bekannt (siehe z. B. [5, 6]), wird aber in der Praxis bis heute nicht eingesetzt. Gründe hierfür sind, dass die Kompensation nur bei trockener Luft vollständig gelingt und dass die Anforderungen an die Messunsicherheit für beide Einzelwellenlängen prinzipbedingt höher sind. Des Weiteren steigt der technische Aufwand durch die Verwendung zweier Längenmesssysteme. Dieses Messverfahren sowie eine Erweiterung auf feuchte Luft ist Gegenstand dieses Artikels und wird in den folgenden Abschnitten näher vorgestellt.

2 Brechzahlkompensation mit zwei Wellenlängen

Das Verfahren der Brechzahlkompensation lässt sich anschaulich anhand einer Laufzeitmessung erläutern, auch wenn es ebenso für interferometrische Messungen gilt. Zwei Lichtpulse unterschiedlicher Vakuumwellenlängen $\lambda_{1,2}$ werden gleichzeitig zu einem Reflektor gesendet und treffen aufgrund der Dispersion zu unterschiedlichen Zeiten $\tau_{1,2}$ wieder beim Sender ein. Die Länge, d. h. der Abstand zwischen Sender und Reflektor, lässt sich jeweils aus beiden Zeiten und Brechzahlen $n_{1,2}$ berechnen:

$$\begin{aligned} L &= c_0 / n_1 \times \tau_1 / 2 = L_1 / n_1 \\ L &= c_0 / n_2 \times \tau_2 / 2 = L_2 / n_2 \end{aligned} \quad (1)$$

Die fiktiven Längen $L_{1,2} = c_0 \times \tau_{1,2} / 2$ dienen zur Vereinfachung der folgenden Schreibweise. Nach Gl. 1 lässt sich nämlich die Länge L ausdrücken als:

$$L = L_1 - A(L_2 - L_1) \quad \text{mit} \quad A = \frac{n_1 - 1}{n_2 - n_1} \quad (2)$$

Der Vorteil dieser Schreibweise erschließt sich bei näherer Betrachtung der Struktur der empirischen Formel für die Brechzahl von Luft [2]:

$$n(\lambda, t, p, x, p_w) - 1 = K(\lambda)D(t, p, x) - p_w g(\lambda) \quad (3)$$

In trockener Luft ($p_w = 0$) kürzt sich die Funktion $D(t, p, x)$ in der Berechnung der Variablen A heraus, so dass nur noch die Wellenlängenabhängigkeit $K(\lambda)$ den Wert von A bestimmt, d. h. $A = A(\lambda_1, \lambda_2)$. Die Länge L lässt sich dann mit Gl. 2 ohne Kenntnis von Druck, Temperatur und CO_2 -Gehalt berechnen. In der Gleichung 2 wird die Längendifferenz $(L_2 - L_1)$ mit der Variablen A multipliziert. Dies ist ein Nachteil des Verfahrens, da der Faktor A für Wellenlängenpaare aus dem nahen Ultraviolett bis zum nahen Infrarotbereich stets größer als 10 ist. Es ergibt sich z. B. $A \approx 65$ für die Wellenlängen 1064 nm und 532 nm. Messunsicherheiten in der Längendifferenz werden um den Faktor A vergrößert.

In feuchter Luft ($p_w > 0$) kürzen sich die Abhängigkeiten von den Luftparametern in der Berechnung von A im Gegensatz zu trockener Luft nicht heraus. Es ergeben sich systematische Abweichungen, die von Änderungen der Umgebungsbedingungen abhängen. Für eine Korrektur müssten also die Umweltparameter wieder gemessen werden, womit gegenüber der einfachen Bestimmung der Brechzahl mit der Edlèn-Formel nichts gewonnen wäre. Eine mögliche Lösung dieses Problems könnte eine direkte Messung des Faktors A mittels einer Längenmessung einer bekannten Referenzstrecke sein, ähnlich wie beim Refraktometer.

Eine genauere Betrachtung des Problems feuchter Luft erschließt sich, wenn nicht die Gl. 2 verwendet wird, sondern Gl. 3 in die beiden Gleichungen 1 eingesetzt und dieses Gleichungssystem bezüglich der Länge gelöst wird [7]:

$$L = \frac{K(\lambda_1)L_2 - K(\lambda_2)L_1}{K(\lambda_2) - K(\lambda_1) + p_w(g(\lambda_1)K(\lambda_2) - g(\lambda_2)K(\lambda_1))} \quad (4)$$

Die berechnete Länge hängt demnach nicht mehr von der Temperatur, dem Luftdruck und dem CO_2 -Gehalt ab. Einzig die Abhängigkeit vom Wasserdampfpartialdruck p_w verbleibt. Da sich p_w in Luft nicht direkt messen lässt, ist eine indirekte Bestimmung erforderlich. Die einfachste Methode hierfür ist eine konventionelle Messung der relativen Luftfeuchte RH , aus der mittels der Temperatur der Partialdruck berechnet werden kann. Hier stellt sich jedoch die Frage nach der räumlichen Verteilung der Luftfeuchte, da für die Bestimmung der Länge der effektive Wasserdampfpartialdruck im Strahlengang des Lichts erforderlich ist. Mit einem Hygrometer wird dagegen die relative Feuchte nur punktuell gemessen. Zur Umrechnung in den effektiven Wasserdampfpartialdruck seien hier zwei Grenzfälle für die Verteilung genannt. Unter der Annahme einer konstanten relativen Feuchte ist es ausreichend, die Temperatur am Feuchtesensor zu messen und diese zur Umrechnung in den Partialdruck zu verwenden. Der

zweite Grenzfall ist die Annahme eines konstanten Wasserdampfpartialdrucks im Raum, wobei hier zur Umrechnung der relativen Feuchte die effektive Temperatur im Strahlengang bekannt sein muss. Experimentelle Ergebnisse, die mit diesem Verfahren gewonnen wurden, werden im nächsten Abschnitt vorgestellt.

Der Vollständigkeit halber sei noch eine nahe liegende Alternative genannt, nämlich eine Längenmessung mit drei Wellenlängen, wie es von Golubev und Chekhovski vorgeschlagen wurde [9]. Aus drei Gleichungen der Art 1 und Gleichung 3 ergibt sich eine Lösung der Form

$$L = L_1 - B(L_2 - L_1) - C(L_3 - L_1) \quad (5)$$

Die hier auftretenden Faktoren B und C hängen nur von den Wellenlängen und nicht von den Umweltparametern ab, womit eine vollständige Kompensation des Einflusses der Brechzahl gegeben ist. Sie sind jedoch für Wellenlängenkombinationen vom nahen Ultraviolett bis zum nahen Infrarot von der Größenordnung 1000, was die Messunsicherheit stark verschlechtert.

3 Experimentelle Ergebnisse

Zur experimentellen Untersuchung der Brechzahlkompensation wurde ein klassisches Homodyninterferometer aufgebaut, das als Lichtquelle einen frequenzverdoppelten Nd:YVO₄-Laser mit den Wellenlängen von ca. 532 nm und ca. 1064 nm nutzt. Im Gegensatz zu den meisten frequenzverdoppelten Festkörperlasern sind hier beide Wellenlängen gleichzeitig verfügbar. Die Stabilität der Laserfrequenz während der Messungen lag bei ca. $1 \cdot 10^{-7}$. Dieses Interferometer wurde am 50 m-Komparator der PTB aufgebaut (Die geodätische Basis der PTB, PTB-Mitteilungen 120 (2010), S. 115 ff), wobei die Zuführung des Laserlichts über polarisationserhaltende Glasfasern erfolgte. Es wurden Vergleichsmessungen zwischen dem HeNe-Laserinterferometer der geodätischen Basis und

dem brechzahlkompensierenden Interferometer bis zu 50 m Länge durchgeführt. Die Messung der Umweltparameter Temperatur, Druck und relative Feuchte erfolgte mit den vorhandenen Sensoren der geodätischen Basis.

Bild 1 zeigt verschiedene Messungen der Differenz beider Interferometer, die mit der Länge zunimmt und im gesamten Messbereich unter $15 \mu\text{m}$ liegt. Die Streuung von einigen Mikrometern bei kurzen Längen ist für ein Interferometer relativ groß. Die Kompensationsmethode vergrößert Messunsicherheiten in der zwischen beiden Wellenlängen gemessenen Längendifferenz um einen wellenlängenabhängigen Faktor, der hier ca. 65 beträgt. Auch wenn in der verwendeten Gl. 4 kein expliziter Faktor A wie in Gl. 2 auftritt, bleibt der Mechanismus der Vergrößerung der Messunsicherheit in der Längendifferenz erhalten.

Für die Messungen in Bild 1 wurde eine konstante relative Luftfeuchte entlang der Strecke angenommen, welche mit einem Hygrometer gemessen wurde. Mit Hilfe des ebenfalls gemessenen Luftdrucks konnte die effektive Temperatur im Strahlengang des Interferometers berechnet werden [7]. Da der Raum klimatisiert ist, ist der Unterschied zu einem angenommenen konstanten Wasserdampfpartialdruck deutlich kleiner als die Streuung in Bild 1. Die so berechnete effektive Temperatur ist in Bild 2 für eine Messung dargestellt. Die Streuung der Temperatur nimmt mit zunehmender Länge ab, da sie im Prinzip aus der durch Dispersion hervorgerufenen Längendifferenz ($L_1 - L_2$) berechnet wird, die mit zunehmender Länge steigt. Eine größere Längendifferenz lässt sich bei nahezu konstanter Unsicherheit für die Einzellängen mit einer geringeren relativen Unsicherheit messen. Ab einer Länge von ca. 15 m stimmt die berechnete Temperatur innerhalb von $\pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ mit der gemessenen überein. Dies entspricht bei Verwendung der Edlén-Formel einem längenabhängigen

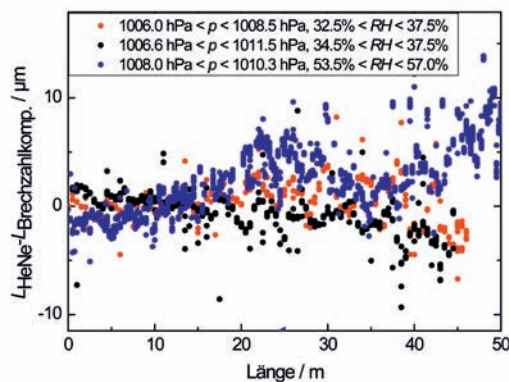


Bild 1: Gemessene Längendifferenzen zwischen dem HeNe-Laserinterferometer der geodätischen Basis und dem brechzahlkompensierenden Interferometer

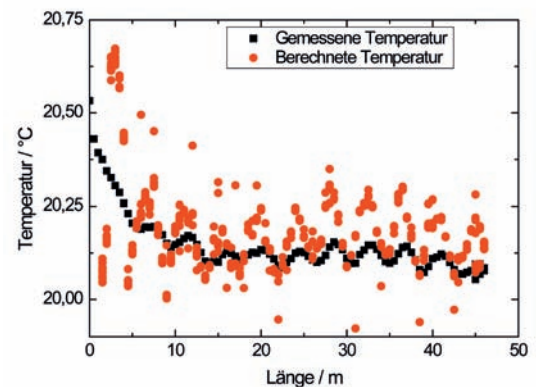


Bild 2: Gemessene Temperatur an der Messstrecke (Quadrate) und berechnete effektive Temperatur im Strahlengang des Interferometers (offene Kreise)

Beitrag zur Unsicherheit der Längenmessung von $\pm 2 \cdot 10^{-7} L$. Diese Unsicherheit ist implizit in Bild 1 enthalten. Der Anstieg der direkt gemessenen Temperatur bei kleinen Längen ist auf den Wärmeeintrag der Elektronik des brechzahlkompensierenden Interferometers zurückzuführen.

4 Spektroskopische Bestimmung der Luftfeuchte

Eine Lösung des Problems der Bestimmung der effektiven Konzentration von Wasserdampf im Strahlengang bietet die spektroskopische Messung der Luftfeuchte. Wasserdampf zeigt vom infraroten bis in den sichtbaren Teil des Spektrums Bereiche, in denen Absorptionslinien liegen. Zur Bestimmung der Stärke der Absorption lässt sich die Emissionsfrequenz $\bar{\nu}$ eines Lasers über den Frequenzbereich einer Absorptionslinie abstimmen. Die Ausgangsintensität $I(0, \bar{\nu})$ des Lasers sinkt nach Durchlaufen der Strecke L auf den Wert $I(L, \bar{\nu})$ ab. Das logarithmische Verhältnis $\alpha(L, \bar{\nu})$ dieser Intensitäten lässt sich nach dem Lambert-Beer Gesetz beschreiben:

$$\alpha(L, \bar{\nu}) \equiv \ln \left(\frac{I(0, \bar{\nu})}{I(L, \bar{\nu})} \right) = N S(T) \phi(\bar{\nu} - \bar{\nu}_0) L \quad (6)$$

Hier bezeichnet N die Dichte des Wasserdampfs in mol/m³, $S(T)$ die temperaturabhängige Linienstärke und $\phi(\bar{\nu} - \bar{\nu}_0)$ die Linienform. Diese beiden Parameter können der so genannten HITRAN-Datenbank entnommen werden [10]. Prinzipiell lässt sich aus einer Absorptionsmessung mittels Gleichung 6 die Dichte N bestimmen und über die Zustandsgleichung des idealen Gases $e = Nk_B T$ der Wasserdampfpartialdruck e berechnen.

Da sich verschiedene Linien der Anzahl j häufig überlappen und zudem die Linienform auch vom Umgebungsdruck beeinflusst wird, ist es für den hier verfolgten Zweck der quantitativen Spektroskopie vorteilhafter das Absorptionsprofil über einen bestimmten Frequenzbereich zu integrieren und die integrale Absorption $\alpha_{\text{int}}(L)$ auszuwerten:

$$\alpha_{\text{int}}(L) \equiv \int_{\bar{\nu}_1}^{\bar{\nu}_2} \ln \left(\frac{I(0, \bar{\nu})}{I(L, \bar{\nu})} \right) d\bar{\nu} = N \left(\sum_j S_j(T) \right)_{\bar{\nu}_1}^{\bar{\nu}_2} L \quad (7)$$

Der Vorteil der Methode der integrierten Absorption liegt in der Summation der diskret abgetasteten Absorptionslinien, so dass sich Rauschteile auf dem Nutzsignal wegmitteln. Trotzdem ist die quantitative Auswertung von Absorptionssignalen nicht trivial: Insbesondere nichtlineare Untergründe, die z. B. durch das nichtideale Verhalten von optischen Bauteilen hervorgerufen werden, können eine automatisierte Auswertung unmöglich machen.

Prinzipiell wird die Messunsicherheit der Auswertung nach dieser Methode aber auch

durch den eingeschränkten Integrationsbereich limitiert. Die einzelnen Absorptionslinien einer Rotations-Schwingungsbande der Wasserdampfmoleküle liegen relativ dicht beieinander. Die sehr weit ausgedehnten Linienflügel der Voigt-Profile benachbarter Absorptionslinien überlappen und können nicht komplett separiert und erfasst werden, so dass in der Praxis nicht über das komplette Signal integriert wird.

Parallel zur normierten Absorption muss zur quantitativen Auswertung nach Gleichung (7) die Frequenzänderung des Lasers gemessen werden. Dies kann z. B. mit einem kalibrierten Festkörperetalon erfolgen.

5 Experimentelle Ergebnisse

Erste Untersuchungen der spektroskopischen Feuchtemessung wurden mit einem DFB-Laser mit einer Wellenlänge von ca. 1,4 μm durchgeführt. In diesem Wellenlängenbereich liegen Absorptionslinien, deren Absorptionsstärke Messungen bis ca. 20 m erlauben. Die Frequenzänderung des Lasers wurde mit einem Festkörperetalon mit einem freien Spektralbereich von 1,2 GHz gemessen. Bei dem in Bild 3 gezeigten experimentellen Aufbau ist angedeutet, dass sich Laser und Festkörperetalon jeweils in einem geschlossenen Gehäuse befinden, das mit Stickstoff geflutet werden kann, um mögliche störende Absorption durch Wasserdampf zu verhindern. Die Zuführung des Strahls zur Aufweitungsoptik und zum Mess- und Referenzeingang des Differenzdetektors erfolgt über Glasfasern.

Für die ersten Messungen wurde die Messstrecke dieses Aufbaus von ca. 30 cm in einem geschlossenen Plexiglasgehäuse auf einem optischen Tisch aufgebaut. In diesem Gehäuse lässt sich z. B. durch Einbringen eines feuchten Schwamms die Luftfeuchte verändern. Zum Vergleich wurde die relative Luftfeuchte im Gehäuse mit einem herkömmlichen kalibrierten Hygrometer gemessen. Bild 4 zeigt beide gemessenen Feuchtwerte über die Zeit aufgetragen, wobei zunächst ein feuchter Schwamm eingebracht und später wieder entfernt wurde. Die

Bild 3: Experimenteller Aufbau zur spektroskopischen Feuchtemessung

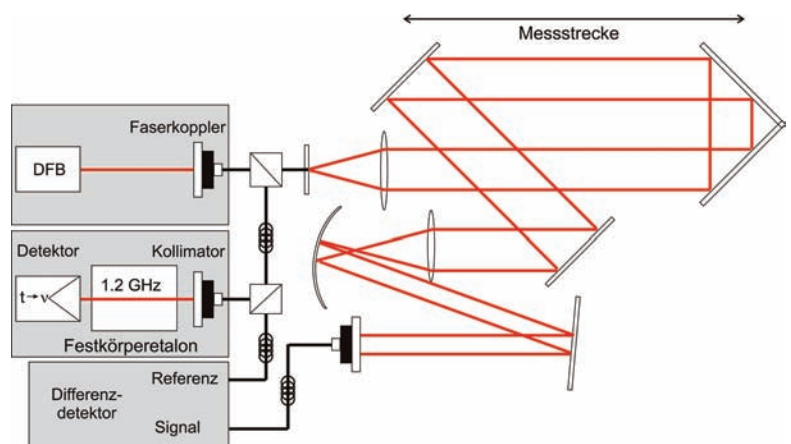


Bild 4:
Vergleich der spektroskopisch und mit einem Hygrometer gemessenen Luftfeuchte

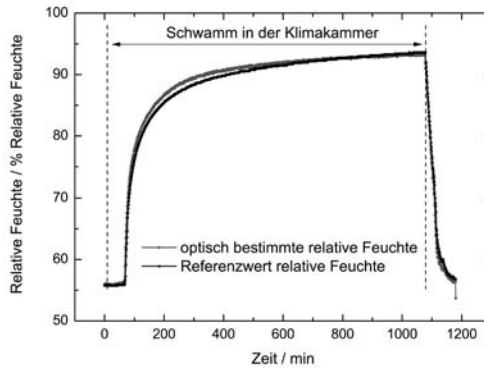
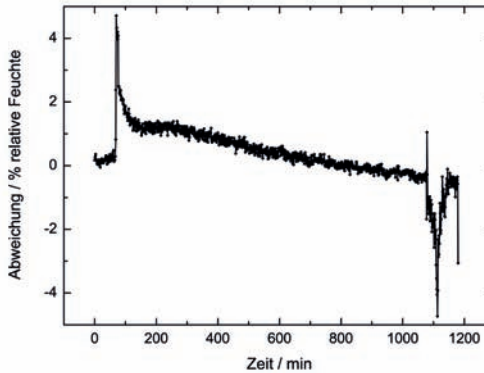


Bild 5:
Differenz zwischen der spektroskopisch und mit einem Hygrometer gemessenen Luftfeuchte aus Bild 4



Differenz beider Messverfahren ist in Bild 5 dargestellt. Die deutlich sichtbaren Abweichungen beim Einfügen und Entfernen des Schwamms sind vermutlich auf die Trägheit des kapazitiv arbeitenden Hygrometers zurückzuführen. Über den sonstigen Zeitbereich liegt die Differenz unterhalb von 2 % relativer Luftfeuchte.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Aufgrund der nachteiligen Eigenschaft der brechzahlkompensierenden Interferometrie, die Messunsicherheit mit einem wellenlängenabhängigen Faktor zu vergrößern, eignet sich das Verfahren vorwiegend für längere Strecken. In diesem Fall wird eine präzise Messung der Lufttemperatur aufgrund der begrenzten Anzahl Sensoren und deren Trägheit zunehmend schwierig. Auch bereitet hier die Messung der Luftfeuchte Probleme. Für die Messungen an der geodätischen Basis wurde ein klassisches Homodyninterferometer verwendet, bei dem die Interferenzordnungen gezählt werden müssen. Dies erfordert einen kontinuierlich verschiebbaren Messreflektor. Bei sehr langen Strecken, insbesondere im Freien, ist eine solche Führung des Reflektors sehr schwierig zu realisieren. Daher wird zurzeit im Rahmen des EMRP Research Projects: JRP 3.1 „Long distance“ ein absolut messendes brechzahlkompensierendes Interferometer entwickelt, welches kein Zählen der Interferenzordnungen erfordert. Im selben Projekt wird auch die spektroskopische Messung der Luftfeuchte untersucht, deren erste Ergebnisse hier dargestellt wurden. Von den drei entschei-

denden Größen zur Bestimmung der Brechzahl der Luft muss dann nur noch der Luftdruck konventionell gemessen werden. Die Temperatur und die Luftfeuchte werden dagegen direkt im Strahlengang des Interferometers bestimmt. Der geplante Messbereich dieses Systems beträgt 1 km bei einer Messunsicherheit von 10^{-7} L.

7 Danksagung

Diese Arbeit ist Teil des Projekts „Long distance“ (Nr. T3.J3.1). Die innerhalb dieses EURAMET-Gemeinschaftsprojekts durchgeführte Forschung wird durch das siebte Rahmenprogramm der EU unter Zuwendungsvereinbarung Nr. 217257 finanziell unterstützt.

Die Autoren bedanken sich bei Tobias Meyer und Martin Wedde für die technische Unterstützung und bei Jens Beyer und Katya Makhonina für die Unterstützung bei der Durchführung der Feuchtemessungen.

8 Literatur

- [1] B. Edlén: The refractive index of air. *Metrologia* **2**, (1966), S. 71–80
- [2] G. Bönsch, E. Potulski: Measurement of the refractive index of air and comparison with modified Edlén's formula. *Metrologia* **35**, (1998), S. 133–139
- [3] K. P. Birch and M. J. Downs: An Updated Edlén Equation for the Refractive Index of Air. *Metrologia* **30**, S. 155–162 (1993) und K. P. Birch and M. J. Downs: Correction to the Updated Edlén Equation for the Refractive Index of Air. *Metrologia* **31**, (1994), S. 315–316
- [4] P. E. Ciddor: Refractive index of air: new equations for the visible and near infrared. *Appl. Optics* **35**, (1996), S. 1566–1573
- [5] K. B. Earnshaw and J. C. Owens: Dual wavelength optical distance measuring instrument, which corrects for air density. *IEEE J. Quantum Electron.* **3** (1967), No. 11, pp. 544–550
- [6] A. Ishida: Two-wavelength displacement-measuring interferometer using second-harmonic light to eliminate air-turbulence-induced errors. *Japan. J. Appl. Phys.* **28** L473–5 (1989)
- [7] Karl Meiners-Hagen and Ahmed Abou-Zeid: Refractive index determination in length measurement by two-colour interferometry. *Meas. Sci. Technol.* **19** 084004 (2008)
- [8] Website des EMRP Research Projects: JRP 3.1 „Long distance“: <http://www.longdistanceproject.eu/>
- [9] N. Golubev and A. M. Chekhovsky: Three-colour optical range finding. *Appl. Optics* **33**, (1994), S. 7511–7517
- [10] L. Rothman et al.: The HITRAN 2004 molecular spectroscopic database. *JQRST* **96**, (2005), S. 139–204