

Rückführbare Messung langer Distanzen in der PTB

Traceable Measurements of Long Distances in the PTB

Karl Meiners-Hagen, Florian Pollinger

Der PTB (= **Physikalisch-Technische Bundesanstalt**) stehen für die Kalibrierung von Längenmessmitteln oder -geräten für „lange“ Strecken zwei Messeinrichtungen zur Verfügung. Bis zu einer Länge von 50 m können Kalibrierungen in einem klimatisierten Messraum, der sog. Geodätischen Basis, durchgeführt werden. Für Strecken bis zu 600 m steht eine Kalibrierbasis mit einem dichten Sensornetzwerk zur Bestimmung der Umweltparameter zur Verfügung, die vom finnischen geodätischen Institut auf die Längeneinheit Meter rückgeführt wurde. Dieser Beitrag liefert einen kurzen Überblick über diese Messeinrichtungen.

Des Weiteren werden Ergebnisse eines von der EU geförderten EURAMET-Gemeinschaftsprojekts mit anderen europäischen Metrologieinstituten vorgestellt, das sich mit der präzisen Messung langer Distanzen mit einer Kompensation der Umweltparameter beschäftigt.

Schlüsselwörter: Kalibrierbasis, Rückführung, Brechzahlkompensation

*Two measurement capabilities for long range calibrations of length measuring devices are available within the PTB (= **Physikalisch-Technische Bundesanstalt**). Calibrations can be performed up to a length of 50 m in an air conditioned measuring room, the so-called Geodetic Base. For lengths up 600 m an outdoor baseline with a dense network of environmental sensors is available. This baseline was traced back to the definition of the metre by the Finnish Geodetic Institute. This article covers a brief overview about these measuring capabilities.*

Furthermore, the results of a EU funded collaborative EURAMET project with other European metrology institutes are presented, which deals with precise long range measurement with a compensation of the environmental influences on the length measurement.

Keywords: Calibration baseline, traceability, refractive index compensation

1 EINFÜHRUNG

Präzise Messungen langer Distanzen im Bereich bis zu einigen hundert Metern stellen eine besondere Herausforderung dar. Insbesondere der Einfluss der Luftbrechzahl, die im Wesentlichen durch Temperatur, Luftdruck, und -feuchte bestimmt wird, ist schwierig zu erfassen. Aufgrund der begrenzten Anzahl der Sensoren und ihrer Trägheit liegt das Hauptproblem in der Erfassung der Lufttemperatur. Eine Unsicherheit von 1 K führt zu einer Unsicherheit der Längenmessung von ca. 1 mm/km. Der Luftdruck, der einen Beitrag von ca. 0,27 mm/km pro hPa Änderung liefert, lässt sich dagegen relativ leicht messen bzw. bei Messungen an Steigungen oder Gefällen

entsprechend modellieren. Die Luftfeuchte, die wie die Temperatur über lange Strecken schwer präzise zu messen ist, hat nur einen geringen Einfluss von ca. 0,01 mm/km pro Prozent relativer Feuchte.

In der PTB steht für die Kalibrierung von Längenmessmitteln und -geräten bis zu 50 m Länge ein Längenkomparator zur Verfügung, der aufgrund der Klimatisierung eine präzise Bestimmung der Umweltparameter erlaubt. Für größere Strecken bis zu 600 m wurde in den Jahren 2010 und 2011 die vorhandene Kalibrierbasis mit acht Pfeilern mit einem ausgesprochen dichten Sensornetzwerk ausge-

rüstet, um die Umweltparameter zu erfassen. Diese beiden Anlagen werden auch im Bereich der Forschung auf dem Gebiet der Längenmessung eingesetzt. Die PTB arbeitet hier an Verfahren, große Längen mit geringer Messunsicherheit rückführbar darstellen zu können. Ein Schwerpunkt dieser Arbeiten liegt zzt. auf einer interferometrischen Längenmessung mit einer Kompensation der Luftbrechzahl. Die Luftbrechzahl wird dabei über die Dispersion im Strahlengang des Lasers bestimmt, wodurch sie synchron zur Längenmessung erfasst wird. Abschnitt 4 zeigt Ergebnisse dieser Methode, die an der Normalstrecke in Nummela (Finnland) gewonnen wurden.

2 DIE GEODÄTISCHE BASIS DER PTB

Für Kalibrierungen bis zu 50 m Länge steht in der PTB Braunschweig die sogenannte *Geodätische Basis* zur Verfügung (Abb. 1). Eine ausführliche Beschreibung der Arbeitsweise und der Messmöglichkeiten findet sich in /Wedde, Meiners-Hagen, Abou-Zeid 2010/. Sie besteht aus einer 50 m langen Schiene, auf der ein Messwagen manuell oder rechnergesteuert verfahren wird. Die Position des Messwagens wird mit einem HeNe-Laserinterferometer gemessen. Zur Bestimmung der Brechzahl der Luft sind neben zwei Druck- und Feuchtemessgeräten 21 Pt100 Temperatursensoren im Abstand von 2,5 m entlang der Schiene angebracht. Zur Kalibrierung von Messbändern sind weitere 21 Pt100 Sensoren zur Messung der Materialtemperatur vorhanden. Die messtechnische Rückführung der Länge erfolgt über die separate Kalibrierung aller Sensoren und des Laserinterferometers.

Kalibrierungen folgender Messmittel sind routinemäßig möglich:

- Messbänder bis 100 m,
- Strichmaßstäbe bis 4 m,
- Entfernungsmessgeräte bis 50 m und
- Laserinterferometer bis 5 m.



Abb. 1 | Ansicht des Längenkomparators

Das vollständige Kalibrierangebot mit den entsprechenden Messunsicherheiten ist in Tab. 1 angeführt.

Die Anlage war ursprünglich zur Kalibrierung von Messbändern und Strichmaßstäben ausgelegt. Die Messachse liegt daher innerhalb der Schiene auf Höhe der eingebrachten Prüflinge, um die Abbe-Fehler zu minimieren. Dies erschwert die Kalibrierung moderner berührungsloser Längenmesssysteme. Tachymeter z.B. müssen an dem dem Interferometer gegenüberliegenden Ende der Schiene angebracht werden, um die gleiche Strahlhöhe wie das Interferometer zu erreichen. Hierbei wird eine Messunsicherheit ($k = 2$) von 0,102 mm erreicht.

Kalibrierungen von größeren Lasertrackern bereiten aufgrund ihrer kleineren Messunsicherheit Probleme. Bisher wurde für interne Zwecke der PTB ein Leica LT500 Lasertracker versuchsweise kalibriert. Die stehende Aufstellung am dem Interferometer gegenüberliegenden Ende der Schiene war nicht erfolgreich, da die Messachse

Messgröße / Gegenstand	Messbereich	erweiterte Messunsicherheit
Strichmaßstäbe aus Stahl	bis 4 m	Q[5,8; 1,8 L] in μm , L in m
Strichmaßstäbe aus Invar oder Glas mit aufliegenden Strichen	bis 4 m	Q[5,8; 0,4 L] in μm , L in m
Messbänder, aufliegend, aus Stahl mit gerissenen Strichen	bis 50 m	Q[13,4; 2,6 L] in μm , L in m
Messbänder, aufliegend, aus Stahl mit gerissenen Strichen	50 bis 100 m	Q[132; 2,6 (L-50 m)] in μm , L in m
Messbänder, aufliegend, aus Invar mit gerissenen Strichen	bis 50 m	Q[13,4; 0,72 L] in μm , L in m
Messbänder, aufliegend, aus Invar mit gerissenen Strichen	50 bis 100 m	Q[41; 0,72 (L-50 m)] in μm , L in m
Laser-Entfernungsmesser mit flachem Reflektor	bis 50 m	460 μm
Laser-Entfernungsmesser mit Retroreflektor	bis 50 m	102 μm
Laserinterferometer für Längenmessungen mit Kompensation der Brechzahl der Luft	bis 5 m $a = 0 \text{ K}^{-1}$ 15°C bis 25°C $p = \pm 30 \text{ hPa}$	Q[0,015; 0,031 L] in μm , L in m
Laserinterferometer für Längenmessungen mit Kompensation der Brechzahl der Luft und der thermischen Ausdehnung	bis 5 m a : beliebig 15°C bis 25°C $p = \pm 30 \text{ hPa}$	Q[0,015; 0,074 L] in μm , L in m (z.B. für den thermischen Ausdehnungskoeffizient $a = 11,5 \cdot 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$)

Tab. 1 | Kalibrierangebot für den Längenkomparator; die Abkürzung Q[a, b L] bezeichnet die erweiterte Messunsicherheit in der Form $\sqrt{a^2 + (bL)^2}$

ca. 50 cm über der des Interferometers lag und der Abbe-Fehler zu groß wurde. Das Gerät wurde schließlich liegend in der Nähe des Interferometers angebracht. Es konnte dabei allerdings nicht geklärt werden, ob die liegende Position einen Einfluss auf die Funktionsweise hat. Die Kalibrierung von großen Lasertrackern kann aufgrund der mechanischen Probleme bisher nur als experimentell bezeichnet werden.

3 DIE 600 M KALIBRIERBASIS DER PTB

3.1 Aufbau der Kalibrierbasis

Die in den 1970er Jahren gebaute Kalibrierbasis befindet sich am Nordrand des PTB-Geländes (Abb. 2). Sie besteht aus acht Pfeilern an den Positionen 0 m, 50 m, 100 m, 150 m, 250 m, 350 m, 500 m und 600 m, die auf einer Geraden angeordnet sind. Die Strecke steigt vom Pfeiler 0 m bis zu 600 m um ca. 1,5 m an, wobei die Bezugspunkte auf den Pfeilern näherungsweise in einer Flucht liegen. Die Strecke verläuft von nordwestlicher in südöstliche Richtung und ist im Südwesten von Wald begrenzt, der bis auf ca. 5 m an die Pfeiler heranreicht.

Durch die Anordnung der Pfeiler sind insgesamt 28 Kombinationen zweier Pfeiler möglich, die alle Längen von 50 m bis zu 600 m in 50 m Abständen ergeben. Da die Pfeilerabstände Vielfache von 50 m sind, ist eine Messung an definierten Punkten der Modulati-



Abb. 2 | Übersicht der Kalibrierbasis; rechts neben den Pfeilern sind die Temperatursensoren in wettergeschützten Kapselungen zu erkennen

onsperiode eines EDMs, wie sie z.B. in /ISO 2002/ vorgesehen ist, im Allgemeinen nicht möglich. Auf den Pfeilern ist jeweils ein Kern-Zentrieradapter fest montiert, auf dem mittels passenden Adapters ein EDM oder Reflektor angebracht werden kann.

Für Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet der Messung langer Strecken sowie zur Schaffung einer hochgenauen Kalibriermöglichkeit wurde die Strecke von Ende 2010 bis März 2011 aufgerüstet. Zur Unterbringung von Experimenten wurde neben dem Pfeiler bei 0 m

ein klimatisiertes Containerlabor aufgestellt. Da die Messköpfe dieser experimentellen Gerätschaften während der Entwicklung nicht wetterfest sind, ist der Pfeiler 0 m durch einen Carport überdacht.

Eine bedeutende Einschränkung der Messunsicherheit optischer Entfernungsmessungen ist durch die Brechzahl der Luft gegeben, die im Wesentlichen mit der Temperatur, dem Luftdruck und der Luftfeuchte variiert. Zur Erfassung der Lufttemperatur wurden entlang der Strecke 60 Platin-Widerstandsthermometer (Pt100) im Abstand von je 10 m angebracht. Jeweils 10 Sensoren werden mit einem Messdatenerfassungssystem vom Typ Agilent 34901A oder 34972A ausgelesen. Diese sechs Messdatenerfassungssysteme sind in beheizbaren Schaltschränken untergebracht, in denen auch je ein Luftfeuchtemessgerät vom Typ Testo 6681 installiert ist. Die Luftfeuchtesensoren vom Typ Testo 6610 sind außerhalb des Schaltschranks montiert. Des Weiteren ist in zwei Schaltschränken ein Druckmessgerät vom Typ Setra 470 untergebracht. Die Daten aller Sensoren werden über ein Glasfasernetzwerk in das Containerlabor übertragen und dort ausgewertet und aufgezeichnet. Für Kalibrierungen ist es auch möglich, die aufbereiteten Daten, wie z.B. die mittleren Werte von Temperatur, Druck und Feuchte eines Streckenabschnitts, mittels WLAN auf der Strecke abzufragen.

3.2 Rückführung der Strecke

Die Rückführung der Pfeilerabstände auf die SI-Basiseinheit Meter wurde im Juni 2011 vom Finnischen Geodätischen Institut (FGI) durchgeführt. Dazu wurde ein sogenannter Skalentransfer der Länge der finnischen Normalstrecke in Nummela (Nummela Standard Baseline) auf die Kalibrierbasis der PTB vorgenommen.

Die Normalstrecke in Nummela wird seit 1947 mit einem Weißlichtinterferometer, dem sog. Väisälä-Interferometer, auf die Länge eines 1-m-Quarzendmaßes zurückgeführt, welches heutzutage interferometrisch an die Längeneinheit angeschlossen wird. Durch optische Multiplikation der Länge des Endmaßes werden die Pfeilerabstände bis zu 864 m Länge rückgeführt, wobei die erweiterte Messunsicherheit ($k = 2$) bei 864 m $\pm 0,149$ mm beträgt. Eine ausführliche Beschreibung dieses Verfahrens findet sich in /Jokela, Häkli 2010/. Der Skalentransfer auf eine zu kalibrierende Strecke erfolgt in drei Schritten /Jokela u.a. 2010/: zunächst wird ein EDM vom Typ Kern Mekometer ME5000 auf der Normalstrecke in Nummela kalibriert. Mit diesem Gerät wird die zu kalibrierende Strecke eingemessen und schließlich wird das Gerät auf der Normalstrecke in Nummela ein weiteres Mal kalibriert, um etwaige Veränderungen durch die Transporte auszuschließen. Zur Ermittlung der Brechzahl der Luft werden dabei die Trocken- und Feuchtetemperatur der Luft mit zwei Aspirationspsychrometern nach Aßmann an den Enden der jeweiligen Strecke gemessen. Der Luftdruck wird mit zwei Aneroidbarometern bestimmt.

Während der Rückführung der PTB-Kalibrierbasis stand zusätzlich das oben beschriebene dichte Sensornetz zur Messung von Temperatur, Druck und Luftfeuchte zur Verfügung. Jede der 28 Teilstrecken wurde innerhalb einer Woche zehn Mal bei verschiedenen Wetterbedingungen gemessen. Die sich ergebende erweiterte Messunsicherheit der Kalibrierung beträgt:

$$U(I_{Ref})_{(k=2)} = \sqrt{(0,18\text{ mm})^2 + (6,8 \times 10^{-7} l)^2}$$

Die hier angegebene erweiterte Messunsicherheit U der Referenzlängen entspricht einer Überdeckungswahrscheinlichkeit von etwa 95 %. Sie wurde gemäß des „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“ (GUM) /JCGM 2008/ berechnet. Laut Kalibrierschein vom FGI besteht der konstante Anteil aus der Unsicherheit der Zentrierung und Ausrichtung (0,019 mm bis 0,049 mm für $k = 1$), der Unsicherheit der Projektionsmessungen in Nummela (0,083 mm für $k = 1$, siehe /Jokela u.a. 2010/ und der Unsicherheit der Additionskorrektion des Mekometers (0,022 mm für $k = 1$). Die größten Beiträge zum längenabhängigen Term sind die Unsicherheit der Temperaturmessung mit den beiden Aspirationspsychrometern ($3,0 \cdot 10^{-7}$ für $k = 1$), die Unsicherheit der Normalstrecke in Nummela ($1,0 \cdot 10^{-7}$ für $k = 1$) und die Unsicherheit der Luftdruckmessung ($0,9 \cdot 10^{-7}$ für $k = 1$). Sie ergeben sich insbesondere aus den während der Kalibrierung beobachteten Gradienten (siehe Abschnitt 3.3).

3.3 Erreichbare Messunsicherheit

Die rückgeführten Strecken (Distanzen) zwischen den Pfeilern können nun dazu verwendet werden, Entfernungsmessgeräte zu kalibrieren. Das ausführliche vorläufige Messunsicherheitsbudget nach GUM /JCGM 2008/ für derartige Kalibrierungen ist in /Pollinger u.a. 2012a/ beschrieben. Für den Vergleich einer mit einem Entfernungsmesser ermittelten Schrägdistanz zwischen zwei Pfeilern mit der entsprechenden Referenzlänge ergibt sich unter optimalen Witterungsbedingungen eine Unsicherheit von

$$U(I)_{(k=2)} = \sqrt{(0,62\text{ mm})^2 + (7,6 \times 10^{-7} l)^2}$$

Der Begriff „vorläufig“ bezieht sich im Wesentlichen auf den Beitrag der Langzeitstabilität der Pfeiler. Aus Messungen des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie der TU Braunschweig von 1996 bis 2009 in Abständen von typisch ein oder zwei Jahren ergeben sich Änderungen der Pfeilerabstände von bis zu 0,5 mm zwischen aufeinander folgenden Messreihen. Die Änderungen zeigen keine systematische Verschiebung der Pfeiler, sondern streuen zufällig. Dieser recht große Wert von 0,5 mm wurde für das Messunsicherheitsbudget verwendet und führt zu dem relativ großen konstanten Anteil der Unsicherheit von 0,62 mm. Zur Kompensation der Brechzahl der Luft wurden bei diesen Messungen nur ein oder zwei Thermometer verwendet. Zukünftige Beobachtungen mit dem neuen Sensornetzwerk werden eine bessere Abschätzung der Langzeitstabilität erlauben.

Für die Kalibrierung eines EDM werden üblicherweise alle 28 Kombinationen der Strecken zwischen den Pfeilern mindestens einmal vorwärts und einmal rückwärts gemessen. Aus einer Ausgleichsrechnung ergeben sich die Additionskorrektion und die Maßstabskorrektion des Geräts als Kalibrierergebnis /Rüeger 1996/. Für die Bestimmung der Additionskorrektion spielt die Langzeitstabilität der Strecke keine Rolle. Die erreichbare Unsicherheit U_A aus der Ausgleichsrechnung beträgt in diesem Fall

$$U_{A(k=2)} = 0,061\text{ mm}$$

Die Unsicherheit U_M der Maßstabskorrektur dagegen wird durch die Stabilität der Strecke beeinflusst und beträgt

$$U_{(M)} = 8,2 \cdot 10^{-7}$$

Die Maßstabskorrektur wird häufig aus einer Kalibrierung der Modulationsfrequenz des EDM bestimmt, was die oben genannten Probleme mit der Stabilität der Normalstrecke vermeidet. Die Rückführung auf eine Frequenz ist relativ leicht mit sehr kleiner Unsicherheit möglich. Die oben genannten Werte der Messunsicherheit gelten nur für einen idealen Prüfling unter guten Wetterbedingungen. Die genaue Datenerfassung ermöglicht es, „gute Wetterbedingungen“ quantifizieren zu können. *Abb. 3* zeigt den Verlauf der über 600 m gemittelten Temperatur und die jeweilige Standardabweichung der 60 Thermometer während eines sonnigen und eines teilweise bewölkten Tages. Während der Erwärmung am Vormittag des sonnigen Tages (um diese Zeit liegt die Strecke im Sonnenschein) erreicht die Standardabweichung 0,8 K. Wird diese Standardabweichung als Unsicherheitsbeitrag angenommen, liefert diese allein einen Beitrag von $8 \cdot 10^{-7} \cdot l$ (l = Streckenlänge) zur Längenmessung. In den Nachmittags- und Abendstunden liegt die Strecke im Schatten der Bäume und die Standardabweichung nimmt ab. Bei bewölktem Himmel beträgt die Standardabweichung weniger als 0,15 K.

Da die Thermometer ca. 70 cm neben der Messachse der Kalibrierbasis angebracht sind, wurden auch die Temperaturgradienten quer zur Strecke untersucht, indem ein weiterer Pt100 Sensor neben einem festinstallierten in der Messachse angebracht wurde. Wie in *Abb. 4* dargestellt, kann die Temperaturdifferenz an einem sonnigen Tag während des Temperaturanstiegs am Vormittag bis zu 1 K betragen. An einem bewölkten Tag liegt die Differenz weitgehend unterhalb von 0,1 K. Für das Messunsicherheitsbudget in /Pollinger u.a. 2012a/ wurden die gemessenen Werte für die Standardabweichung (0,15 K) und den Temperaturquergradienten (0,1 K) bei bewölktem Himmel in die Unsicherheit der Temperaturmessung aufgenommen.

Diese Messergebnisse erlauben auch fundierte Rückschlüsse über die Umweltbedingungen, bei denen Präzisionsmessungen im Feld möglich sind. Nur bei optimalen Bedingungen (bewölkter Himmel, leichter Wind) sind über Strecken von mehreren hundert Metern

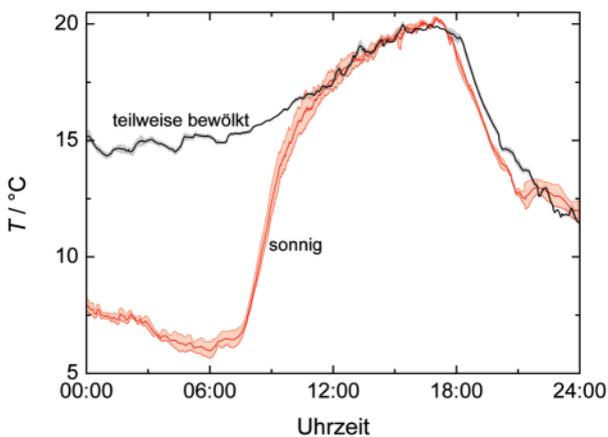


Abb. 3 | Temperaturverlauf (Kurve) und Standardabweichung σ (schattiertes Band als $\pm\sigma$) der Temperatur für einen sonnigen und einen teilweise bewölkten Tag im September 2011

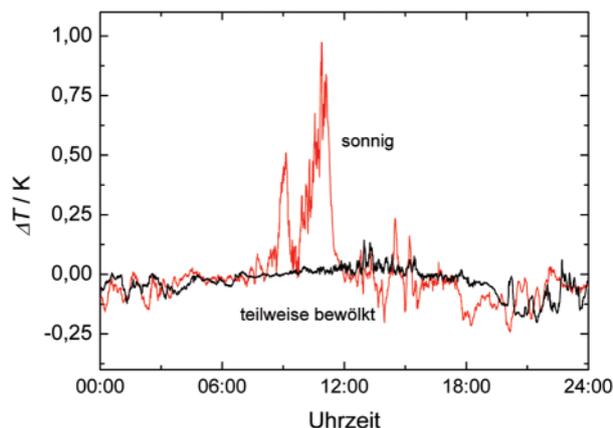


Abb 4 | Temperaturdifferenz zwischen einem fest installierten Sensor 70 cm neben der Messachse und einem Sensor in der Messachse

Unsicherheiten der Temperaturmessung in der Größenordnung von 0,1 K zu erreichen. Bei wechselnden Beleuchtungsverhältnissen, insbesondere auch bei direkter Sonneneinstrahlung, kann eine solche Unsicherheit nicht mit konventionellen Sensoren erreicht werden. Werden derartige Anforderungen gestellt, so muss hier eine *in-situ* Bestimmung der effektiven Temperatur entlang des gesamten Strahlwegs erfolgen.

4 EIN BEISPIEL AUS DER FORSCHUNG

Im Rahmen des EURAMET-Projekts „Absolute Long-distance Measurement in Air“, eines Forschungsprojekts mehrerer europäischer Metrologieinstitute /Wallerand u.a. 2008/, wurden Methoden entwickelt, die die rückführbare Längenmessung mit geringer Unsicherheit von etwa 0,1 mm/km ermöglichen sollte. An der PTB wurde unter anderem ein absolut messendes Interferometer mit einem Messbereich von 1 km und einer intrinsischen Brechzahlkompensation entwickelt. Das Interferometer arbeitet mit einem frequenzverdoppelten Nd:YAG-Laser mit den Wellenlängen 1064 nm und 532 nm. Mittels akustooptischer Frequenzschieber, die die Laserfrequenzen um 82 MHz bzw. 1,7 GHz verschieben, werden Schwebungssignale erzeugt, sogenannte „synthetische Wellenlängen“. Mit diesen synthetischen Wellenlängen der Längen 3,656 m und 176 mm erfolgt die eigentliche Längenmessung. Die lange synthetische Wellenlänge erlaubt eine eindeutige Längenbestimmung innerhalb von $3,656 \text{ m}/4 \approx 0,91 \text{ m}$. Das Ergebnis dieser sog. Grobmessung wird verwendet, um die Interferenzordnung der kurzen synthetischen Wellenlänge von $176 \text{ mm}/4 \approx 44 \text{ mm}$ zu bestimmen. Mit dieser erfolgt die eigentliche Längenmessung mit einer Auflösung von einigen 10 μm . Der Aufbau des absolut messenden Interferometers und erste Messungen in der Geodätischen Basis bis zu 50 m Länge sind in /Meiners-Hagen, Köchert, Abou-Zeid 2011/ beschrieben. Die beiden Wellenlängen des frequenzverdoppelten Lasers werden gleichzeitig verwendet, um den Einfluss der Luftbrechzahl mittels der Dispersion zu kompensieren (z.B. /Earnshaw, Owens 1967/).

Die ursprüngliche Methode der Brechzahlkompensation gilt nur für trockene Luft. Mit einer modifizierten Methode ist es möglich, bei Kenntnis des Wasserdampfpartialdrucks der Luft sowohl die Länge als

auch die effektive Temperatur im Strahlengang aus der Dispersion zu berechnen /Meiners-Hagen, Abou-Zeid 2008/. Eine weitere Methode, die im Rahmen des EURAMET-Projekts untersucht wurde, ist die spektroskopische Messung mittels Absorptionslinien von Sauerstoff /Hieta u.a. 2011/. Beide Methoden erlauben eine Messung der effektiven Temperatur im Strahlengang; bei der spektroskopischen Messung ist ein separates Interferometer zur Längenmessung notwendig.

Mit dem brechzahlkompensierenden Interferometer wurden Messungen an der Normalstrecke des FGI in Nummela durchgeführt. Abb. 5 zeigt eine optische Messung der Temperatur mit dem Interferometer im Vergleich zu einer herkömmlichen Temperaturmessung mit einem Pt100-Sensor bei einer Länge von 24 m. Es sind relativ schnelle Temperaturänderungen sichtbar, die aufgrund seiner thermischen Trägheit nicht vom Pt100-Sensor erfasst werden können. Im Zeitbereich von ca. 170 s bis 220 s ändert sich die optisch gemessene Temperatur um 0,4 K, während das Widerstandsthermometer nur ca. 0,1 K registriert. Der sehr kurze Temperaturanstieg bei ca. 235 s ist vermutlich auf eine teilweise Strahlunterbrechung durch ein Insekt oder ein fallendes Blatt hervorgerufen. Die bei den Messungen in Nummela verwendete Auswertung der Interferometerphasen in Hardware auf der Analog-Digitalwandlerkarte /Meiners-Hagen, Köchert, Abou-Zeid 2011/ erlaubte noch keine Messung der Signalamplituden, um Signaleinbrüche zu detektieren und die entsprechenden Messwerte zu verwerfen. Die in Abb. 5 dargestellten Werte der optischen Messung wurden über jeweils 10 ms gemittelt, bei einer Zykluszeit der Phasenmessung von 16,5 μs . Mit dem Interferometer kann die Temperatur somit sehr schnell und synchron zur Länge gemessen werden. Die Streuung der Temperaturwerte auf kurzen Zeitskalen beträgt weniger als $\pm 0,03 \text{ K}$, wobei hier keine entsprechend genaue Vergleichsmessung mit anderen Methoden möglich ist. Aufgrund der Messungen in der klimatisierten Geodätischen Basis ist zu erwarten, dass die Messunsicherheit unterhalb von $\pm 0,1 \text{ K}$ liegt.

Ähnlich schnelle Änderungen der Luftfeuchte konnten auch mit spektroskopischen Messungen nachgewiesen werden /Pollinger u.a. 2012b/. Bei einer Messdistanz von 272 m änderte sich die relative Feuchte innerhalb weniger Minuten um bis zu 7%, was aber nicht durch eine korrespondierende Temperaturänderung verursacht wur-

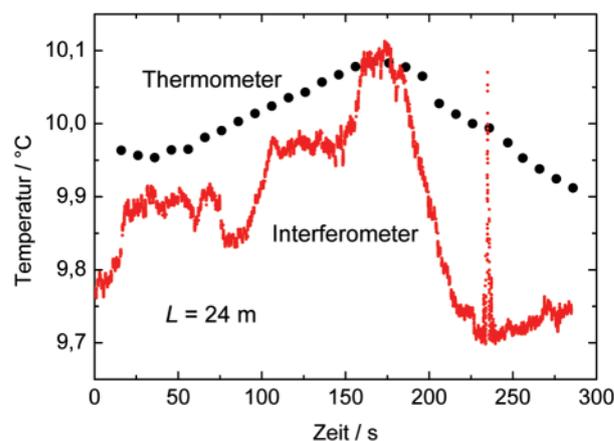


Abb 5 | Optisch gemessene Temperatur bei einer Mittelungszeit von 10 ms im Vergleich zu der mit einem Pt100-Sensor gemessenen bei 24 m Länge

de. Dies konnte über die entsprechende Änderung des Wasserdampfpartialdrucks nachgewiesen werden.

Die optische Temperaturmessung lieferte eindeutige Daten bis zum Pfeiler bei 72 m. Beim nächsten Pfeiler bei 216 m entstanden Probleme mit der eindeutigen Bestimmung der Interferenzordnungen zur Temperaturmessung, was in nicht eindeutigen Temperaturwerten resultiert. Möglich bleibt dennoch eine Verfolgung von Temperaturänderungen. In *Abb. 6* ist solch eine Messung bei einer Länge von 864 m dargestellt. Die gesamte Zeitskala beträgt hier nur 0,3 s bei der minimal möglichen Mittelungszeit von 16,5 μ s. Die Streuung der Messwerte ist gegenüber der *Abb. 5* deutlich kleiner und beträgt nur noch wenige mK. Eine besondere Eigenschaft der Temperaturmessung mittels Dispersion ist die Tatsache, dass die theoretisch erreichbare Messunsicherheit mit zunehmender Länge kleiner wird. Als Einschränkung ist aber zu bemerken, dass das Verfahren auf der Gültigkeit der verwendeten Edlén-Gleichung für die Luftbrechzahl beruht. Eine verlässliche Aussage der geringsten möglichen Messunsicherheit für die Temperaturmessung kann nicht gegeben werden.

Abb. 7 zeigt die Differenz der mit dem Interferometer gemessenen Längen zu den Referenzwerten. Sie liegen bei 864 m bei $\pm 0,75$ mm. Die mit der Länge zunehmende Streuung ist auf die o.g. Probleme mit der Brechzahlkompensation bei Längen ≥ 216 m zurückzuführen. Die Streuung bei 864 m lässt sich mit einer Unsicherheit der Temperaturmessung von $\pm 0,9$ K erklären. Die Probleme mit der Eindeutigkeit der optischen Temperaturmessung sollen mit einem neuen Ansatz mit zwei Laserquellen gelöst werden. Die entsprechenden Messungen werden auf der PTB-Kalibrierbasis durchgeführt, was aufgrund des dichten Sensornetzwerks klarere Aussagen über die Unsicherheit der optischen Temperaturmessung erlaubt. Ein ähnliches Interferometer, jedoch ohne die Brechzahlkompensation, wurde innerhalb des EURAMET-Projekts bereits untersucht /Azouigui u.a. 2010/. Durch den Einsatz zweier Laserquellen konnten hier die synthetischen Wellenlängen deutlich kürzer gewählt werden als es mit den akustooptischen Frequenzschiebern im vorliegenden Aufbau möglich ist. Die Auflösung des Interferometers nimmt zu kürzeren synthetischen Wellenlängen hin zu.

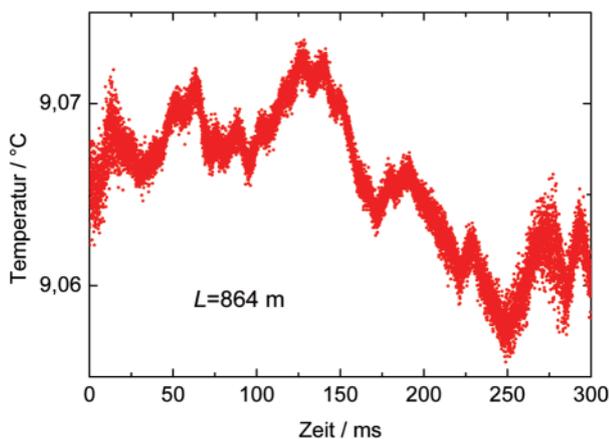


Abb. 6 | Optisch gemessene Temperaturänderung bei einer Mittelungszeit von 16,5 μ s bei 864 m Länge

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Mit der Geodätischen Basis und der 600 m Normalstrecke stehen in der PTB zwei Messeinrichtungen zur rückführbaren Längenmessung zur Verfügung. Bis zu 50 m Länge erfolgen die Messungen in einem klimatisierten Messraum, der eine präzise Bestimmung der Luftbrechzahl erlaubt. Auch wenn für die größeren Längen ein dichtes Umweltsensornetzwerk mit Thermometern in 10 m Abständen installiert ist, sind Messungen mit Unsicherheiten im Bereich von $< 1 \cdot 10^{-6}$ / nur bei günstigen Wetterbedingungen zu erreichen. Dieses weltweit einzigartige Umweltnetzwerk ermöglicht es, Entfernungsmessgeräte weitgehend unbeeinflusst durch die Umweltbedingungen, aber dennoch unter Feldbedingungen zu kalibrieren und zu charakterisieren. Auch kann das Netzwerk verwendet werden, um Rückschlüsse über erreichbare Unsicherheiten bei bestimmten Wetter Szenarien zu gewinnen. Die Kalibrierbasis kann von Externen zur Rückführung ihrer Entfernungsmessgeräte verwendet werden.

Im Bereich der Forschung auf dem Gebiet der Längenmessung konnte ein Interferometer realisiert werden, mit dem absolute Längenmessungen bis zu 864 m durchgeführt wurden. Die Grenze des Verfahrens war bei dieser Länge noch nicht erreicht, sodass von einem Messbereich > 1 km ausgegangen werden kann. Die intrinsische Kompensation der Luftbrechzahl gelang dabei allerdings nur sicher bis zu einer Länge von 72 m, was durch Probleme der Eindeutigkeit bei der Temperaturmessung hervorgerufen wurde. Ein Ansatz zur Lösung mittels eines zweiten Lasers liegt vor und ist zzt. im Aufbau. Ziel ist es, den konstanten Beitrag zur Messunsicherheit durch Verwendung kürzerer synthetischer Wellenlängen auf wenige Mikrometer zu reduzieren und mittels der Kompensation der Luftbrechzahl einen längenabhängigen Beitrag von 10^{-7} / zu realisieren.

DANKSAGUNG

Die Autoren danken N. R. Doloca, W. Malek, T. Meyer und M. Wedde für technische Unterstützung. Dank gebührt auch J. Jokela vom FGI für die Betreuung der Messungen an der Normalstrecke in Nummela. Ebenso gilt unser Dank W. Niemeier und W. Schellin vom Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der TU Braunschweig für fruchtbare Diskussionen und die jahrelange Betreuung der Normalstrecke.

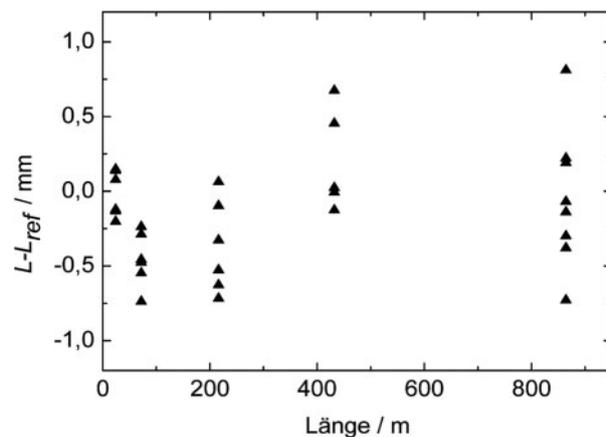


Abb. 7 | Ergebnis der Längenmessungen auf der Normalstrecke in Nummela. Aufgetragen ist die Differenz der gemessenen Längen und der Referenzwerte

Ein Teil dieser Arbeit (Abschnitt 4) war Bestandteil des Projekts „Absolute Long-distance Measurement in Air“ (Nr. T3.J3.1). Die innerhalb dieses EURAMET-Gemeinschaftsprojekts durchgeführte Forschung wurde durch das siebte Rahmenprogramm der EU unter Zuwendungsvereinbarung Nr. 217257 finanziell unterstützt.

LITERATUR

Azouigui, S.; Badr, T.; Wallerand, J.-P.; Himbert, M.; Salgado, J.; Juncar, P. (2010): Transportable distance measurement system based on superheterodyne interferometry using two phase-locked frequency-doubled Nd:YAG lasers. *Review of Scientific Instruments*; 81 (2010), 053112.

Earnshaw, K. B.; Owens, J. C. (1967): Dual wavelength optical distance measuring instrument, which corrects for air density. *IEEE J. Quantum Electron*, 3 (1967), 544.

ISO (2002): Optics and optical instruments – Field procedures for testing geodetic and surveying instruments – Part 4: Electro-optical distance meters (EDM instruments). ISO (2002), 17123-4, 1.

Hieta, T.; Merimaa, M.; Vainio, M.; Seppä, J.; Lassila, A. (2011): High-precision diode-laser-based temperature measurement for air refractive index compensation. *Applied Optics*, 50 (2011), 5990.

JCGM (2008): Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement. <http://www.bipm.org/en/publications/guides/gum.html>.

Jokela, J.; Häkli, P. (2010): Interference measurements of the Nummela standard baseline in 2005 and 2007. Veröffentlichungen des Finnischen Geodätischen Instituts, Band 144 (2010). http://www.fgi.fi/julkaisut/publications_eng.php.

Jokela, J.; Häkli, P.; Kugler, R.; Skorpil, H.; Matus, M.; Poutanen, M. (2010): Calibration of the BEV Geodetic Baseline, In FIG Congress 2010: Facing the Challenges – Building the Capacity. <http://www.fig.net/pub/fig2010/techprog.htm>.

Meiners-Hagen, K.; Abou-Zeid, A. (2008): Refractive index determination in length measurement by two-colour interferometry. *Meas. Sci. Technol.* 19 (2008), 084004.

Meiners-Hagen, K.; Köchert, P.; Abou-Zeid, A. (2011): A Multiwavelength Interferometer for Geodetic Lengths. *VDI-Berichte Nr. 2156* (2011), 125.

Pollinger, F.; Meyer, T.; Beyer, J.; Doloca, N. R.; Schellin, W.; Niemeier, W.; Jokela, J.; Häkli, P.; Abou-Zeid, A.; Meiners-Hagen, K. (2012a): The upgraded PTB 600 m baseline: A high-accuracy reference for the calibration and the development of long distance measurement devices. *Meas. Sci. Technol.*, 23 (2012) 094018.

Pollinger, F.; Hieta, T.; Vainio, M.; Doloca, N. R.; Abou-Zeid, A.; Meiners-Hagen, K.; Merimaa, M. (2012b): Effective humidity in length measurements: comparison of three approaches. *Meas. Sci. Technol.* 23 (2012), 025503.

Rüeger, J. M. (1996): *Electronic Distance Measurement*. 4. Auflage, Berlin, Springer.

Wallerand, J.-P.; Abou-Zeid, A.; Badr, T.; Balling, P.; Jokela, J.; Kugler, R.; Matus, M.; Merimaa, M.; Poutanen, M.; Prieto, E.; van den Berg, S. A.; Zucco, M. (2008): Towards new absolute long distance measurement in air. *NCSL Int. Workshop and Symp. Orlando, USA* (2008). <http://www.longdistanceproject.eu/references>.

Wedde, M.; Meiners-Hagen, K.; Abou-Zeid, A. (2010): Interferometrische Kalibrierung von Strichmaßen, Laserinterferometern und Entfernungsmessgeräten: Die Geodätische Basis der PTB. *PTB-Mitteilungen*, 120 (2010) 2, 110.

Dr. Karl Meiners-Hagen

PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT (PTB)
AG 5.42 „MEHRWELLENLÄNGENINTERFEROMETRIE
FÜR GEODÄTISCHE LÄNGEN“

Bundesallee 100 | 38116 Braunschweig
Karl.Meiners-Hagen@ptb.de



Dr. Florian Pollinger

PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT (PTB)
AG 5.42 „MEHRWELLENLÄNGENINTERFEROMETRIE
FÜR GEODÄTISCHE LÄNGEN“

Bundesallee 100 | 38116 Braunschweig
Florian.Pollinger@ptb.de



Manuskript eingereicht: 26.03.2012 | Im Peer-Review-Verfahren begutachtet