

Einflussgrößen bei elektrooptischen Distanzmessungen und ihre Erfassung

Influence Qualities for Electro-Optical Distance Measurements and their Acquisition

Willfried Schwarz

Von der EURAMET-Gruppe, einem Zusammenschluss einiger europäischer Prüfinstitutionen, wurde in den letzten Jahren die Forderung aufgestellt, Strecken mit einer Länge bis zu einem Kilometer mit einer Genauigkeit von $1 \cdot 10^{-7}$ bis $2 \cdot 10^{-7}$ messen zu können. In diesem Beitrag wird versucht, in Anbetracht dieser Genauigkeitsforderung, relevante Einflussfaktoren in ihren Auswirkungen bei der elektrooptischen Distanzmessung zu identifizieren, zu bewerten und, wo erforderlich, Handlungsbedarf aufzuzeigen, um dem gesteckten Ziel näher zu kommen.

Schlüsselwörter: Elektrooptische Distanzmessung, Messprinzipien, Einflussgrößen, Additionskorrektion, Maßstabskorrektion, zyklischer Phasenfehler, Zentriersysteme, Reflektor, Gruppenbrechungsindex, meteorologische Korrektion, Dispersionsverfahren, optischer Frequenzkamm, Reduktionen

From the EURAMET Group, an European Association of National Metrology Institutes, was set up in recent years, the demand to be able to measure distances with a length of up to one kilometer with an accuracy of $1 \cdot 10^{-7}$ to $2 \cdot 10^{-7}$. This paper attempts to identify, in respect to the given accuracy requirement, relevant factors in their effects on the electro-optical distance measurement, evaluate and, where necessary, identify need for action to reach the ambitious aim.

Keywords: Electro-optical distance measurement, measurement principles, influence qualities, addition correction, scale factor, cyclic error, centering systems, reflector, group refractive index, meteorological correction, dispersion method, optical frequency comb, reductions

1 EINFÜHRUNG

Der Wunsch, auch geometrische Messgrößen mit einer noch höheren Genauigkeit zu bestimmen als es derzeit standardmäßig üblich ist, ist ungebrochen. Besonders in den vielfältigen Bereichen des Maschinenbaus können damit Effizienzsteigerungen im Produktionsprozess erzielt werden. Ebenso gibt es Forderungen, die Komponenten von Anlagen der Hochenergiephysik (Teilchenbeschleuniger), die mit immer höheren Energien betrieben werden, hochgenau auszurichten. Gefordert werden dabei Genauigkeiten, allerdings in den beiden Querrichtungen zum Teilchenstrahl, von z.B. wenigen 0,1 mm über einen Bereich von 600 m. In speziellen Fällen, z.B. bei der Justierung der Komponenten von Undulatoren, mit denen Synchrotronlicht erzeugt wird, werden Standardabweichungen von wenigen 0,01 mm über 100 m verlangt. Aber auch in der Ingenieurgeodäsie wünscht man sich, die Messungen immer genauer ausführen zu können. Besonders bei der Überwachung von sensiblen Bauwerken (Talsperren,

Brücken, Türmen, Tunneln, Kirchen) könnten sich abzeichnende Verformungen frühzeitiger signifikant erkannt werden, wenn man genauer messen könnte. Auf dem Gebiet der Erdbebenvorhersage schließt man u.a. aus plötzlich zunehmenden Verformungen der Erdkruste auf das unmittelbar bevorstehende Eintreten eines Erdbebens. Auch hierfür werden hochgenaue Messungen, von z.B. Distanzen, zwischen großräumig verteilten Punkten durchgeführt, um entsprechende Veränderungen erkennen zu können. Ein weiterer Bereich, in dem der Wunsch nach höheren Genauigkeiten besteht, ist der der Kalibrierung. Distanzmesser messen zwar heutzutage Strecken mit Längen bis zu mehreren Kilometern hochpräzise (hohe Auflösung), aber es ist sehr aufwendig zu überprüfen, inwieweit die Ergebnisse dieser Messungen mit der tatsächlichen (wahren) Distanz übereinstimmen.

In den letzten Jahren wurde verstärkt durch die EURAMET-Gruppe¹ die Forderung aufgestellt, Strecken mit einer Länge bis zu einem

¹ Die EURAMET-Gruppe ist der Zusammenschluss einiger europäischer Prüfinstitutionen, wie z.B. der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig.

Kilometer mit einer Genauigkeit von $1 \cdot 10^{-7}$ bis $2 \cdot 10^{-7}$ messen zu können /EMRP 2011/, d.h. also auf 0,1 bis 0,2 mm bzw. eine 10 m lange Distanz auf 1 bis 2 μm . In diesem Zusammenhang ist der Begriff „Genauigkeit“ noch zu interpretieren. Handelt es sich um eine Wiederholgenauigkeit im Sinne der Präzision oder um eine Standardabweichung mit Bezug zum „wahren Wert“ oder um eine (erweiterte) Messunsicherheit nach dem ISO/BIPM-Leitfaden „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“ (GUM) /Pesch 2004/ aus dem Jahre 1993 in der 2008 überarbeiteten Form? Dabei ist auch festzulegen, ob der Begriff „Genauigkeit“ sich auf absolute und/oder relative Streckenmessungen beziehen soll. Im Weiteren wird davon ausgegangen, dass absolute Streckenmessungen gemeint sind, und es wird als Genauigkeitsmaß in der Regel die Standardabweichung verwendet.

Im Folgenden wird versucht, in Anbetracht der genannten Genauigkeitsforderungen, relevante Einflussgrößen in ihren Auswirkungen, speziell bei der elektrooptischen Distanzmessung, zu diskutieren, zu werten und, wo erforderlich, Handlungsbedarf aufzuzeigen, um den gesteckten Zielen näher zu kommen. Wegen der hier zu betrachtenden Genauigkeitsforderung von bis zu $1 \cdot 10^{-7}$ bis $2 \cdot 10^{-7}$ werden reflektorlose Distanzmessungen sowie Messungen zu Mehrfach- und Rundumreflektoren ausgeklammert.

2 ELEKTROOPTISCHE DISTANZMESSUNG

Eine wesentliche Voraussetzung, die geforderte Genauigkeit zu erreichen, ist, dass der einzusetzende Distanzmesser aufgrund seines Messprinzips sowie seiner elektronischen und optischen Eigenschaften Strecken mit einer Auflösung bzw. Präzision von $<0,1$ mm bei Kilometerstrecken bzw. von wenigen μm bei kürzen Strecken signifikant messen kann. Darüber hinaus wird von ihm verlangt, dass er über eine entsprechende Reichweite und über eine hohe Langzeitstabilität verfügt. Nicht alle am Markt verfügbaren Distanzmesser eignen sich also für derartige Präzisionsmessungen. Im Folgenden wird nach einer Erwähnung der bekannten Prinzipien zur elektrooptischen Streckenmessung eine Auswahl von Streckenmessgeräten kurz beschrieben, die aufgrund ihrer Leistungspotenziale für derartige Messungen derzeit in Frage kommen könnten.

2.1 Messprinzipien

Das bekannteste Verfahren der elektrooptischen Distanzmessung ist das der *Laufzeitmessung*. Aus der Laufzeit eines vom Distanzmesser ausgesendeten Lichtimpulses, der von einem Reflektor auf dem Endpunkt der Strecke wieder zum Distanzmessgerät reflektiert wird, wird bei bekannter Lichtgeschwindigkeit in der Atmosphäre die Distanz berechnet. Dieses Verfahren dürfte auch in absehbarer Zeit allerdings nicht in der Lage sein, die geforderte Auflösung bzw. Präzision in der Streckenmessung zu erreichen.

Beim *Phasenvergleichsverfahren*, bei dem das Dauerlichtsignal des Distanzmessers in seiner Amplitude moduliert wird, wird die Laufzeit indirekt aus dem Vergleich der Phasenlagen des ausgesandten und des zurückkommenden Lichtsignals bestimmt. Untersuchungen an neueren Instrumenten zeigen, dass mit diesem Verfahren gegebenenfalls die geforderte Präzision von $<0,1$ mm bei Kilometerstrecken erreicht werden kann.

Moderne Distanzmesser benutzen heutzutage zum Teil eine Kombination dieser beiden aufgezeigten Verfahren und leiten über eine *komplexe Analyse* der verwendeten Signale das Ergebnis der Streckenmessung ab. Dabei wird das über die Strecke gesendete Licht im Distanzmesser in elektrische Signale gewandelt und digitalisiert /Köhler 2012/. Mit dieser Technik wird die Präzision der Distanzmessung gesteigert und der gesamte Messprozess optimiert. Auch mit dieser Technik wäre gegebenenfalls die geforderte Präzision erreichbar.

Für Präzisionsmessungen besonders geeignet ist das Verfahren der *Polarisationsmodulation*. Es wird z.B. beim Mekometer 5000 und in modifizierter Form bei den Lasertrackern der Firma Leica eingesetzt und ist in /Loser u.a. 1991/ ausführlich beschrieben. Heutzutage werden mit dieser Technik Auflösungen im μm -Bereich erzielt.

Das Laserradarverfahren ist ein reflektorlos arbeitendes Distanzmessverfahren; das Streckenmessprinzip ist beschrieben, z.B. in /Naab, Hennes 2012/. Bei einer Reichweite von ca. 60 m können mit ihm Genauigkeiten im Submillimeterbereich erreicht werden und es ist damit wesentlich genauer als die anderen reflektorlosen Streckenmessverfahren. Es ist aber fraglich, ob mit dieser Technik die geforderte Auflösung von $<1 \cdot 10^{-7}$ erreichbar ist.

Hochpräzise Streckenmessungen können mit *Laserinterferometern* erreicht werden. Die Streckeninformation wird dabei aus der Zählung der Hell-Dunkelübergänge zweier sich überlagernder, kohärenter Lichtwellen gleichen Ursprungs erhalten. Auflösungen im Bereich von 0,01 μm sind dabei problemlos zu erreichen. Allerdings muss bei der Messung zum einen der Reflektor vom Anfangs- zum Endpunkt der auszumessenden Distanz transportiert werden, ohne den Strahl zu verlieren, und zum anderen ist die Reichweite aufgrund der eingeschränkten Kohärenzlänge des Laserlichtes auf ca. 30 m bis 60 m begrenzt.

Ein neuartiges Verfahren der Distanzmessung befindet sich derzeit in der Entwicklung; es handelt sich um das Verfahren „*Optischer Frequenzkamm (Optical Frequency Comb (OFC))*“ /Holzwarth u.a. 2012/. Mit dieser Technik wird es u.a. möglich sein, die Zeit wesentlich genauer zu messen als bisher. Neben vielen anderen Anwendungsszenarien der OFC-Technik wäre eines das der Distanzmessung /NN 2012/.

2.2 Instrumentelle Realisierungen

Das *Terrameter LDM2*, von dem bereits im Jahre 1969 ein Prototyp von der Firma Terra Technology Corporation (USA) vorgestellt worden ist, kam zu Beginn der 1980er - Jahre auf den Markt. Es ist ein sog. Zweifarbengerät und führt Streckenmessungen zum einen mit einem He-Ne-Laser (rot, $\lambda_1 = 632,8$ nm) und zum anderen mit einem He-Cd-Laser (blau, $\lambda_2 = 441,6$ nm) aus. Aus der Differenzen beider Streckenmessungen wird dann nach dem Dispersionsverfahren (vgl. Abschnitt 3.3.5) direkt die meteorologisch korrigierte Distanz berechnet und angezeigt /Joekel, Stober, Huep 2008/. Das *Terrameter* hat eine Reichweite zwischen 15 und 20 km und wurde ursprünglich u.a. zur Vorhersage von Erdbebenereignissen entwickelt. /Gervaise, Olsfors 1987/ geben für das Terrameter eine relative Standardabweichung von $0,9 \cdot 10^{-7}$ an, die aus Mehrfachmessungen von 3,5 bis 13,6 km langen Distanzen im LEP-Netz abgeleitet worden ist.

Einige Jahre später, im Jahre 1986, hat dann die Firma Leica AG (Schweiz), früher Kern & Co., das Gerät *Mekometer 5000* vorgestellt. Es ist ein Einfarbengerät, verfügt aber über ein sehr interessantes Messprinzip, das in /Loser u.a. 1991/ ausführlich beschrieben worden ist. Die Reichweite des *Mekometers* beträgt ca. 8 km und seine Genauigkeit ($200 \mu\text{m} + 200 \mu\text{m}/\text{km}$).

In jüngster Zeit wurde, z.B. auch von der Firma Leica AG, der *Absolute Tracker AT401*, ebenfalls ein Einfarbengerät, entwickelt. Es arbeitet nach dem Mekometer-Prinzip und hat bei einer Reichweite von lediglich 160 m eine Auflösung von $0,1 \mu\text{m}$ und eine Genauigkeit (MPE = Maximum Permissible Error) von $\pm 10 \mu\text{m}$ /Hexagon 2010/.

Für den extremen Nahbereich (Messbereich = 15 m) wurde der LaserTRACER von der Firma ETALON AG in Braunschweig speziell für Anwendungen im Maschinenbau entwickelt. Dieses Gerät arbeitet nach dem interferometrischen Prinzip. Es hat bei einer Auflösung von $0,001 \mu\text{m}$ eine Messunsicherheit für räumliche Versatzmessungen nach GUM mit $k=2$ von ($0,2 \mu\text{m} + 0,3 \mu\text{m}/\text{m}$) /ETALON 2012/.

Normale *Laserinterferometer* sind schon im Abschnitt 2.1 angesprochen werden. Bei einer Reichweite von 30 bis 50 m kann nach /HP 1984/ eine Genauigkeit von $0,1 \text{ ppm} = 1 \cdot 10^{-7}$ erreicht werden.

Tachymeter der neuesten Generation, wie z.B. der Leica TS 30 bzw. der Trimble S8, erreichen mit einer Technik aus einer Kombination des Laufzeit- und Phasenvergleichsverfahrens bzw. nach einem modifizierten Phasenvergleich auch über längere Distanzen vergleichsweise hohe Genauigkeiten. Die Streckenmessgenauigkeit als Standardabweichung nach ISO 17123-4 beträgt bei guten atmo-

sphärischen Bedingungen beim Leica-Gerät für den Präzise-Modus ($0,6 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$) /Leica 2012/ und beim Trimble-Geräte für den DR HP-Precision-Modus ($0,8 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$) /Trimble 2012/.

3 EINFLUSSGRÖSSEN

Die Einflussgrößen bei der elektrooptischen Distanzmessung, besonders unter dem Gesichtspunkt, eine Standardabweichung von $1 \cdot 10^{-7}$ bis $2 \cdot 10^{-7}$ erreichen zu wollen, sind vielschichtig. Im Folgenden werden diese Einflussgrößen eingeteilt in solche, die sich

- auf das *Instrument*,
- auf den *Reflektor* und
- auf die *Atmosphäre*, die der Messstrahl durchläuft,

beziehen. Daneben ist aber auch der *Raumbezug* zu betrachten. Die Messungen sind in einer zu definierenden Art und Weise in ein Koordinatensystem zu reduzieren, um weiterverwendet werden zu können. Da die Streckenmessungen in der Regel zwischen vermarkten Punkten durchgeführt werden, spielen auch Fragen zur Stabilität dieser Punkte aufgrund der *Untergrundverhältnisse* (z.B. Bodeneigenschaften, Grundwasserschwankungen, langsame Massenbewegungen, tektonische Einflüsse) eine Rolle, besonders dann, wenn Messungen zu verschiedenen Zeitpunkten miteinander verglichen werden sollen. Eine eindeutige Trennung bzw. Zuordnung der Einflussgrößen nach diesem Schema ist nicht immer in allen Fällen möglich.

Als wichtigste, instrumentelle Einflussgrößen wären zu nennen:

- Driften des elektronischen Nullpunktes,
- Driften des Maßstabes,
- optisches und elektronisches Übersprechen mit dem daraus sich ergebenden zyklischen Phasenfehler,
- Reflexionen/Spiegelungen,
- Phaseninhomogenitäten,
- geräteinterne thermische Effekte,
- elektromagnetische Felder,
- radioaktive Strahlung,
- Störungen entlang der Messstrecke, die die geräteinterne Streckenmessung beeinflussen,
- wellenlängenabhängige Dämpfung des Lichtsignals,
- Alterung der elektronischen Komponenten,
- mechanischer Verschleiß,
- Zentrierung,
- ...

Auf der Seite des Reflektors wären folgende Einflussgrößen relevant:

- Bauart des Reflektors (Glas- oder Spiegelreflektor),
- Ausrichtung des Reflektors,
- Lage der Stehachse des Reflektors in Bezug zum Glaskörper,
- Qualität/Güte der optischen und mechanischen Bauelemente (z.B. Inhomogenitäten des Glaskörpers, Qualität der Ebenheit bzw. der Vergütung von Glas- und Spiegeloberflächen),
- Temperaturunterschiede, z.B. innerhalb des Glaskörpers,
- Materialspannungen, z.B. im Glaskörper,
- Reflexionen/Spiegelungen,
- Zentrierung,
- ...

Die Atmosphäre beeinflusst die elektrooptische Distanzmessung hauptsächlich durch:

- ihre Dichte,
- Fluktuationen,
- Schwebungen,
- Dämpfung des Lichtsignals,
- ...

Die Stabilität des Untergrundes spielt dann, wie bereits ausgeführt, eine wichtige Rolle, wenn Messungen zu verschiedenen Zeitpunkten ausgeführt worden sind, die miteinander verglichen werden sollen. Aber auch während der Messungen kann die Stabilität der Aufstellpunkte durch äußere Einflüsse, wie z.B. einseitig wirkende Temperaturfelder, beeinträchtigt werden. Um diese Einflüsse möglichst gering zu halten, sollten die Aufstellpunkte stets als massive, doppelwandige Pfeiler in geologisch stabilen Untergrundverhältnissen ausgebildet werden. Der Einsatz von Stativen ist in Anbetracht der Genauigkeitsforderung von $1 \cdot 10^{-7}$ bis $2 \cdot 10^{-7}$ auszuschließen.

Die Punkte, zwischen denen die Streckenmessungen durchgeführt werden, sind in der Regel in einem speziellen Koordinatensystem (Raumbezug) definiert (vgl. Abschnitt 3.4). Es ist zu beachten, inwieweit die Resultate der Streckenmessungen durch die vorzunehmenden Reduktionen beeinflusst werden.

Streckenmessungen unterliegen im Prinzip nicht den Einflüssen des Erdschwerefeldes. Nur für die Senkrechtstellung der Stehachsen des Instruments und des Reflektors werden Libellen benutzt und damit der Bezug zum Schwerefeld hergestellt. Die Einflüsse des Erdschwerefeldes auf Distanzmessungen sind daher wesentlich geringer als z.B. bei Richtungsmessungen.

Im Folgenden werden nur einige der aufgeführten Einflussfaktoren im Hinblick auf die Genauigkeitsforderung von $1 \cdot 10^{-7}$ bis $2 \cdot 10^{-7}$ näher betrachtet.

3.1 Instrument

3.1.1 Nullpunkt, Additionskorrektur

Die Summe der Differenzen zwischen dem elektronischen Nullpunkt im Entfernungsmesser und dem Nullpunkt im Reflektor in Bezug zu ihren Aufstellzentren wird als *Additionskorrektur* bezeichnet. Die Additionskorrektur schließt beide Anteile ein. Eine Trennung in ihre Einzelanteile, also in eine Instrumenten- und in eine Reflektorkonstante, ist nicht möglich. Die Additionskorrektur wird durch Kalibrierung bestimmt. Es stehen dafür eine Reihe von Verfahren bereit, die z.B. in /Joeckel, Stober, Huep 2008/ zusammengestellt sind. Die Verfahren haben ihre spezifischen Vor- und Nachteile, die ebenfalls in /Joeckel, Stober, Huep 2008/ bzw. in der dort angegebenen, weiterführenden Literatur nachgelesen werden können.

Ein sehr effizientes Verfahren ist die Messung der Strecken in allen Kombinationen auf einer (linearen) Kalibrierbasis, wobei deren Punkte durch entsprechend ausgebildete Pfeiler vermarktet sind. Die Länge der Kalibrierbasis ist auf den zu nutzenden Messbereich des Distanzmessers abzustimmen. Die Abstände zwischen den Pfeilerpunkten sollen im Vergleich zur Präzision des zu kalibrierenden Distanzmessers mit übergeordneter Genauigkeit, d.h. 5 bis 10mal genauer, bekannt sein. Sind für die Kalibrierung normaler Distanzmesser Kalibrierbasen vielerorts verfügbar, mangelt es jedoch an derartigen Einrichtungen für die Kalibrierung von Präzisionsdistanzmessern besonders unter der Genauigkeitsforderung von $1 \cdot 10^{-7}$ bis $2 \cdot 10^{-7}$. In diesen Fällen lässt sich die Additionskorrektur auch auf der Kalibrierbasis bestimmen, wobei dann aber die Abstände zwischen den Pfeilern als weitere Unbekannte in die Auswertung eingeführt werden. Diese Vorgehensweise ist aber nur gerechtfertigt, wenn der Einfluss des zyklischen Phasenfehlers anderweitig erfasst worden ist und keine Entfernungsabhängigkeit der Additionskorrektur besteht. Dabei ist ferner zu beachten, dass bei einer gemeinsamen Bestimmung der Additionskorrektur und der Korrektur des zyklischen Phasenfehlers gewisse Abhängigkeiten bestehen /Rüeger 1976/. Unter guten atmosphärischen Bedingungen erscheint es möglich, die Additionskorrekturen bei Präzisionsdistanzmessern mit einer Standardabweichung zwischen 0,1 mm und 0,01 mm bestimmen zu können, so dass die Genauigkeitsforderung von $1 \cdot 10^{-7}$ eingehalten werden kann.

In seltenen Fällen kann es vorkommen, dass die Additionskorrektur auch Entfernungsabhängigkeiten zeigt, die nicht unbedingt mit der eigentlichen Maßstabskorrektur in Zusammenhang stehen. Ursache für derartige Effekte können ein schlechtes Signal-Rausch-Verhältnis, Intensitätsunterschiede oder aber auch ausgeprägte

Phaseninhomogenitäten der Sendediode des Distanzmessers sein (siehe auch Abschnitt 3.1.2).

Weiterhin sind auch Abhängigkeiten der Additionskorrektion von der Temperatur des Distanzmessers denkbar. Diese Effekte sind schwer zu untersuchen; deshalb gibt es dazu in der Literatur kaum verlässliche Aussagen.

Eine bewährte Methode, die Leistungspotenziale eines Distanzmessers zu verifizieren, besteht in sog. Ringvergleichen. Eine bestimmte Kalibrierbasis wird mit einer Vielzahl von Distanzmessern unterschiedlicher Funktionsprinzipien zu verschiedenen Zeitpunkten ausgemessen. Aus der gegenseitigen Streuung der Messungen der einzelnen Distanzmesser können dann Aussagen über die Qualität der Pfeilerabstände abgeleitet werden, so wie es für die neue Kalibrierbasis des Geodätischen Instituts der Universität der Bundeswehr München im Jahre 2011 erfolgt ist /Heunecke 2012/. Dabei ist auch der Gesichtspunkt der Rückführung /Heister 2012/ zu beachten, d.h. inwieweit die Messungen an das von der PTB in Braunschweig vorgehaltene, nationale Längennormal angeschlossen, also als rückgeführt, gelten können.

3.1.2 Maßstabskorrektion

Der Begriff *Maßstabskorrektion* wird hier als Obergriff verstanden. Er drückt zum einen aus, dass der Maßstab eines EDM-Instruments, z.B. aus den Messungen auf einer Kalibrierbasis (vgl. Abschnitt 3.1.1), und zum anderen direkt aus dem Vergleich der Sollfrequenz des Oszillators zur tatsächlichen Frequenz abgeleitet worden ist. Speziell beim zweiten Fall kann man auch von einer *Frequenzkorrektion* sprechen.

Der Maßstab eines Distanzmessers wird sowohl beim Phasenvergleichs- als auch beim Impulslaufzeitverfahren durch die Frequenz des Oszillators festgelegt. Beim Phasenvergleichsverfahren steuert der Oszillator die Frequenz der Amplitudenmodulation, die sowohl intern als auch extern aus dem gesendeten Lichtsignal mit einem kalibrierten Frequenzzähler bestimmt werden kann. Für den externen Abgriff sind schon vor geraumer Zeit Photodiodenschaltungen /Sobotta, Schwarz, Witte 1980/ entwickelt worden. Die Frequenz hängt zum einen von der Temperatur des Oszillators und zum anderen aufgrund von Alterungseffekten auch vom Alter des Quarzes ab. Mit den zur Verfügung stehenden Einrichtungen ist es möglich, die Modulationsfrequenz mit einer Standardabweichung von $<1 \cdot 10^{-7}$ zu messen, um dann daraus die eigentliche Maßstabs- bzw. Frequenzkorrektion abzuleiten.

Einige Herstellerfirmen berücksichtigen die Temperaturabhängigkeit des Oszillators bereits intern im Gerät. Damit der Nutzer die Frequenzkorrektion selbst bestimmen und die Messwerte korrigieren kann, ist es erforderlich, dass seitens des Herstellers vorgenommene Kompensationen offen gelegt sind. Geräte, bei denen diese Informationen nicht verfügbar sind, sind für Präzisionsmessungen nur bedingt geeignet.

Zum anderen kann die Maßstabskorrektion aber auch aus den Messungen auf einer Kalibrierbasis mit bekannten Pfeilerabständen bestimmt werden. Unzulänglichkeiten in der Erfassung der atmosphärischen Kenngrößen führen aber dazu, dass es selbst unter guten atmosphärischen Bedingungen kaum möglich sein wird, die Maßstabskorrektion mit einer Standardabweichung von $<5 \cdot 10^{-7}$ bis $10 \cdot 10^{-7}$ zu ermitteln (vgl. Abschnitt 3.3.4). Auf der anderen Seite

enthält diese „Maßstabskorrektion“ bereits eventuell vorhandene lineare Entfernungsabhängigkeiten der Additionskorrektion; sie ist deshalb zuverlässiger, als wenn sie allein nur aus Frequenzmessungen ermittelt worden ist.

3.1.3 Zyklischer Phasenfehler

Durch elektronisches und optisches Übersprechen in den Tachymetern, die nach dem Verfahren der Amplitudenmodulation arbeiten, entstehen zyklische Phasenfehler. Sie sind in erster Linie periodisch mit dem Feinmaßstab, können unter Umständen aber auch mit den Perioden der Grobmaßstäbe auftreten. Distanzmesser nach dem interferometrischen Verfahren zeigen keine zyklischen Phasenfehler. Heutzutage wird die Korrektion des zyklischen Fehlers, die mit der Periode des Feinmaßstabes auftreten, beim Hersteller für jedes Gerät individuell bestimmt, so dass die Messwerte, bereits mit dieser Korrektion versehen, angezeigt werden. Eventuell vorhandene Periodizitäten mit den Grobmaßstäben werden nicht berücksichtigt, zumal diese Korrekturen zumeist auch um einiges kleiner sind als die beim Feinmaßstab. Bestimmt der Nutzer den zyklischen Phasenfehler selbst, so sieht er nur noch die Abweichungen zu der bereits werkseitig vorgenommenen Korrektion. Der zyklische Phasenfehler kann sich mit der Zeit verändern; ebenso sind Abhängigkeiten von der Temperatur vorstellbar.

Die Größe der zyklischen Korrektion kann sich spontan ändern, wenn z. B. der Sendestrahle an Flächen gespiegelt wird (z.B. an einer Schaufensterscheibe, an der Karosserie eines PKW, an der Vorderfläche des angezielten Prismas) und Anteile mit dem eigentlichen Lichtsignal in den Empfänger gelangen. Der Beobachter hat dafür Sorge zu tragen, dass derartige Effekte bei den Messungen nicht auftreten. Auch sollte das Prisma nicht exakt zum Gerät ausgerichtet werden, sondern dazu leicht verdreht, damit Reflexionsanteile des Messsignals an seiner Vorderfläche nicht ins Gerät gelangen.

Die Korrektion des zyklischen Phasenfehlers wird vielfach auf Längenkompaktoren bestimmt. Über eine Länge von bis zu 30 m, in seltenen Fällen länger, kann ein Schlitten automatisch verschoben werden. Die tatsächliche Position des Schlittens wird mit dem Laserinterferometer mit übergeordneter Genauigkeit eingemessen, so dass mit den Messwerten des zu überprüfenden Distanzmessers ein direkter Soll-Ist-Vergleich durchgeführt werden kann, aus dem sich die zyklische Korrektion ableitet (*Abb. 7*).

Bei hochpräzisen Distanzmessern kann die zyklische Korrektion mit einer Standardabweichung von $<0,1$ mm bestimmt werden. Allerdings bleiben andere Abhängigkeiten, wie z.B. von der Entfernung, der Temperatur, von den Grobmaßstäben, zumeist unberücksichtigt. Für die Genauigkeitsforderung von $1 \cdot 10^{-7}$ ist somit besonders bei kurzen Strecken von einigen 100 m die Bestimmbarkeit dieser Korrektion mit der erforderlichen Genauigkeit als kritisch einzustufen. Im Prinzip sind Distanzmesser, die nach dem Verfahren der Amplitudenmodulation arbeiten, für diese Genauigkeitsforderung nur bedingt geeignet.

3.1.4 Zentrierung

Bei steigenden Messgenauigkeiten ist der Zentrierung des Instruments und des Reflektors in zunehmendem Maße Beachtung zu schenken. Die Zentrierungen sind mechanisch, und deshalb ist die

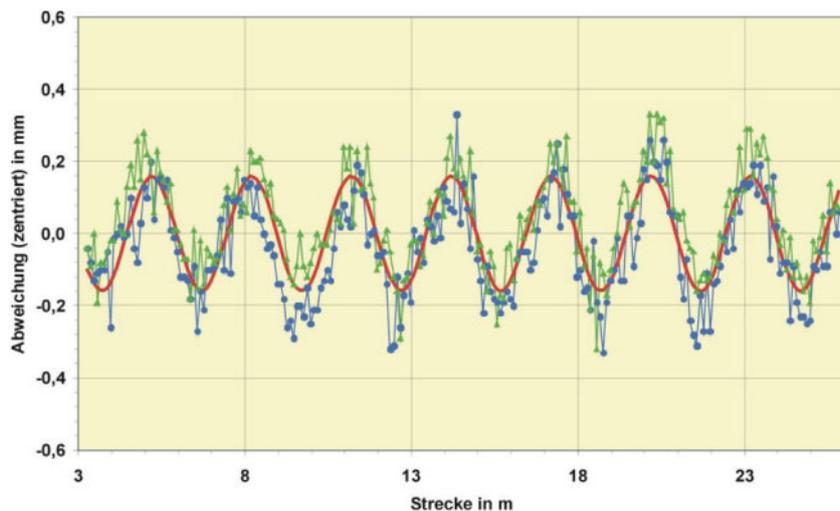


Abb. 1 | Beispiel einer zyklischen Phasenfehlerbestimmung

Genauigkeit auf wenige 0,01 mm begrenzt. Ihr Einfluss ist unabhängig von der Streckenlänge, weshalb sie besonders bei Strecken im Bereich von <100 m problematisch ist. Als Präzisionszentrierungen gelten derzeit folgende Systeme (Abb. 2):

- Kern-Zentrierung (a),
- Wild-Zentrierkugel (b),
- Freiburger-Zentrierung (c),
- Taylor-Hobson-Kugel (d),
- Zentriersystem der Universität der Bundeswehr München (e) oder
- in Anlehnung daran entwickelte Zentriersysteme.

In diesem Zusammenhang ist auch zu betrachten, mit welcher Genauigkeit die Bezugspunkte des Distanzmessers und des Reflektors für die Streckenmessungen auf die Zentrierungen übertragen werden können. Diese Zuordnung erfolgt bei der Horizontierung. Wird angenommen, dass die Instrumenten- bzw. die Reflektorhöhe bezogen auf die Zentrierung 300 mm beträgt und die Ungenauigkeiten nicht mehr als 0,01 mm betragen sollen, so sind die Stehachsen auf 6,9" senkrecht zu stellen. Diese Genauigkeit ist unter Verwendung von Röhrenlibellen mit entsprechender Angabe problemlos erreichbar. Die Horizontierung mit einer Dosenlibelle, so wie es in der Regel in der Praxis unter Nutzung des geräteinternen Kompensators gemacht wird, ist nicht ausreichend.

Das Taylor-Hobson-System besteht z.B. aus einer Kugel mit einem Durchmesser zwischen 88,900 mm und 88,913 mm. Diese Kugel wird in eine kegelförmige Aufnahme gelegt. In der Kugel können Zielzeichen eingesetzt werden, deren Zielmarke sich im Mittelpunkt der Kugel befindet, so dass nur eine grobe Ausrichtung auf den Ins-

trumentenstandpunkt erforderlich ist. Ebenso ist es nicht erforderlich, dieses Zielzeichen mit Libellen zu horizontieren. In der Kugel können auch Prismen für die elektrooptische Distanzmessung montiert werden (Abb. 2d).

3.2 Reflektor

Bei den Reflektoren werden folgende Bauarten unterschieden:

- Reflektoren mit einem Glaskörper,
- Cat-Eye-Reflektoren,
- Kugelreflektoren und
- Spiegelreflektoren.

Glasreflektoren sind die Standardreflektoren in der Praxis. Sie bestehen aus einem Glaskörper, der die Form einer räumlichen Ecke eines Würfels hat. Die drei Seitenflächen stehen alle senkrecht aufeinander. Ein über die Vorderfläche des Reflektors einfallender Lichtstrahl wird an allen drei Seitenflächen reflektiert (Totalreflexion oder Spiegelung) und verlässt dann parallel zu sich wieder den Reflektor und gelangt so zum Empfänger. Für besondere Distanzmesser sind die Seitenflächen speziell verspiegelt, wie z.B. beim Verfahren der Polarisationsmodulation. Die Güte eines Reflektors wird bestimmt durch die Genauigkeit, mit der die drei Seitenflächen senkrecht aufeinander stehen. Herstellerfirmen können dies mit interferometrischen Verfahren im Werk prüfen. Weiterhin sollte der Glaskörper hinsichtlich seiner Dichte möglichst homogen sein. Bei Reflektoren, deren Seitenflächen verspiegelt sind, hat auch die Qualität des aufgetragenen Materials einen Einfluss auf die Streckenmessgenauigkeit.

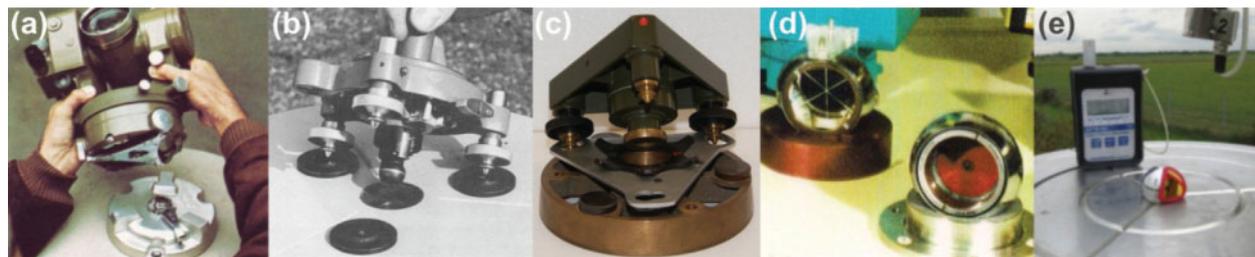


Abb. 2 | Präzisionszentrierungen

Bei Glasreflektoren ändern sich die Messwerte des Distanzmessers mit dem Verdrehwinkel α . Der Streckenfehler Δs kann nach /Pauli 1969/ berechnet werden (Abb. 3):

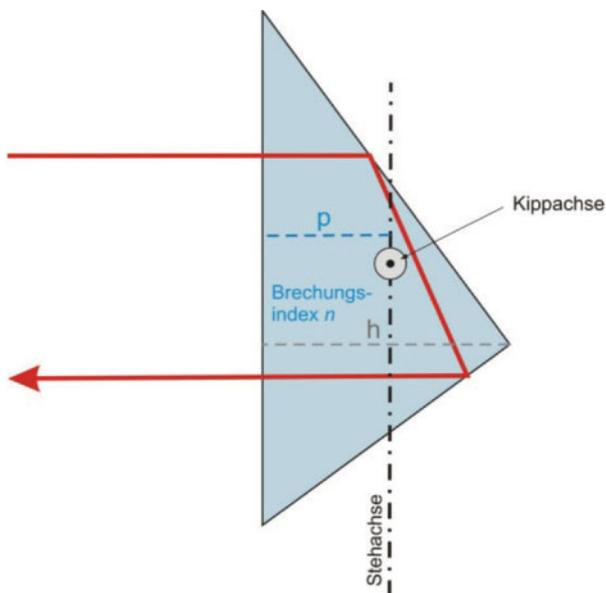


Abb. 3 | Prinzipskizze zur Berechnung des Streckenfehlers nach /Pauli 1969/

$$\Delta s = p \cdot (1 - \cos \alpha) - h \cdot (n - \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}) \quad (1)$$

- mit Δs = Streckenfehler
- α = Verschwenkungswinkel
- n = Brechungsindex des Glases für die jeweils benutzte Lichtwellenlänge
- h = Prismenhöhe
- p = Abstand der Stehachse von der Eintritsfläche

Eine optimale Lage der Stehachse, bei der die Streckenfehler am kleinsten sind, kann man berechnen, wenn man den Grenzwert für $\alpha \rightarrow 0$ bestimmt. Er ergibt sich danach

$$p = \frac{h}{n} \quad (2)$$

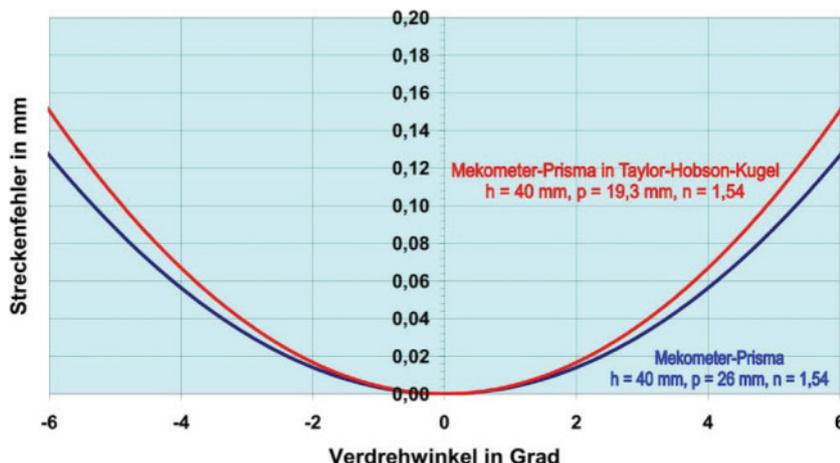


Abb. 4 | Streckenfehler durch Verdrehung des Prismas

In der Abb. 4 sind die nach Formel (1) berechenbaren Streckenfehler zum einen für den Mekometer-Reflektor und zum anderen für das Mekometer-Prisma, eingebaut in eine Taylor-Hobson-Kugel, mit den aus der Abbildung ersichtlichen Parametern in Abhängigkeit vom Verschwenkungswinkel dargestellt. Um den Streckenfehler, der entfernungsunabhängig ist, auf wenige 0,01 mm zu begrenzen, sollte das Prisma auf einige Grad genau ausgerichtet werden, abgesehen von einer leichten Schiefstellung, um direkte Reflexionen von der Eintrittsfläche zu vermeiden (siehe Abschnitt 3.1.3). Mit einer kleinen Zielvorrichtung (z.B. Kimme und Korn), die am Reflektor befestigt ist, lässt sich die Genauigkeitsvorgabe erreichen.

Die anderen Reflektortypen sind speziell für den Einsatz von Lasertrackern und von Lasertracern im Bereich des Maschinenbaus entwickelt worden, um den Arbeitsbereich der Reflektoren von $\pm 20^\circ$ auf $\pm 80^\circ$ /Bernhart, Hennes 2012/ zu vergrößern. Mit diesen Prismen ist die Genauigkeitsforderung bei den großen Verschwenkungswinkeln nicht realisierbar.

Für die Aufstellung und die Zentrierung des Reflektors gelten die im Abschnitt 3.1.4 auf den Distanzmesser bezogenen Ausführungen in gleicher Weise.

3.3 Atmosphäre

Um aus der Laufzeit des Lichtsignals die genaue Streckenlänge ableiten zu können, ist die Kenntnis der Lichtgeschwindigkeit in der Atmosphäre erforderlich. Die Lichtgeschwindigkeit wird dabei von der Dichte bzw. vom Brechungsindex n_L der Luft bestimmt. Für die Berechnung der meteorologischen Korrektur ist zuerst die Gruppengeschwindigkeit (Abschnitt 3.3.1) für die Standardatmosphäre (T, p, ϱ) der benutzten Lichtstrahlung zu berechnen. Danach ist dann mit der Interpolationsformel (Abschnitt 3.3.3) die Korrektur auf die aktuellen Verhältnisse der Atmosphäre vorzunehmen.

3.3.1 Gruppenbrechungsindex

Wellenpakete, mit denen die aufmodulierten Signale übertragen werden, breiten sich in der Atmosphäre nicht mit der Phasengeschwindigkeit c_{ph} , sondern mit der Gruppengeschwindigkeit c_{gr} aus. Der Unterschied zwischen beiden Geschwindigkeiten beträgt rund $100 \cdot 10^{-7}$ und ist deshalb höchst bedeutsam. Die Gruppengeschwindigkeit c_{gr} kann durch den Gruppenbrechungsindex n_{gr} ausgedrückt

werden. Anstelle des Gruppenbrechungsindex n_{Gr} wird oftmals auch die Gruppenbrechzahl $N_{Gr} = (n_{Gr} - 1) \cdot 10^6$ verwendet. Es ist mit c_0 als die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum

$$c_{Gr} = \frac{c_0}{n_{Gr}} \quad (3)$$

Die Gruppenbrechzahl N_{Gr} kann nach folgender Formel berechnet werden /Zetsche 1979/:

$$N_{Gr} = A + \frac{3B}{\lambda_T^2} + \frac{5C}{\lambda_T^4} \quad (4)$$

Da also der Gruppenbrechungsindex bzw. die Gruppenbrechzahl von der effektiven Wellenlänge λ_T abhängig ist, bezeichnet man diese Gleichung auch als Dispersionsformel. Die effektive Wellenlänge sollte dabei als gewichteter Mittelwert der in der benutzten Strahlung enthaltenen Wellenlängen berechnet werden, damit die Bandbreite des verwendeten Lichtspektrums berücksichtigt wird.

Die Konstanten A , B und C wurden von verschiedenen Forschern bestimmt (Tab. 1). Die Formel von Edlen (1953) wurde auf der Generalversammlung der IUGG und IAG im Jahre 1963 für die Berechnung der Gruppengeschwindigkeit empfohlen. Dabei fällt auf, dass diese Formel streng genommen nicht für die bei elektrooptischen Distanzmessungen am meisten genutzte Infrarotstrahlung im Bereich von 0,9 μm gilt. Die Formeln von Barrell und Sears (1939) sowie von Edlen (1953) gelten für $t = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ ($T=273,15 \text{ K}$), $p = 1013,25 \text{ hPa}$, $\text{CO}_2\text{-Gehalt} = 0,0300 \text{ \%} = 300 \text{ ppm}$ und trockene Luft. Die Formel von Ciddor (1999) gilt für $t = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ ($T=273,15 \text{ K}$), $p = 1013,25 \text{ hPa}$, $\text{CO}_2\text{-Gehalt} = 0,0375 \text{ \%} = 375 \text{ ppm}$ und trockene Luft ($e = 0,0 \text{ hPa}$). In der Formel von Ciddor (1999) ist die Zunahme des CO_2 -Gehalts der Atmosphäre in den letzten Jahrzehnten berücksichtigt. Die Formel von Ciddor (1999) wurde auf der XXII. Generalversammlung der IUGG und IAG im Jahre 1999 empfohlen. Innerhalb der EUROMET-Gruppe wird allerdings die Formel von /Bönsch, Potulski 1998/ verwendet.

Barrell und Sears (1939)	$0,43 < \lambda_T < 0,65 \text{ } \mu\text{m}$
Edlen (1953)	$0,18 < \lambda_T < 0,65 \text{ } \mu\text{m}$
Edlen (1966)	$0,18 < \lambda_T < 2,10 \text{ } \mu\text{m}$
Ciddor (1999)	$0,35 < \lambda_T < 1,30 \text{ } \mu\text{m}$

Tab. 1 | Gültigkeitsbereiche der Dispersionsformeln /Joeckel, Stober, Huep 2008/, /Ciddor, Hill 1999/

In der Abb. 5 sind die Unterschiede der nach diesen Formeln berechneten Gruppenbrechzahlen bezogen auf die Werte von /Ciddor, Hill 1999/ dargestellt.

Die verschiedenen Dispersionsformeln differieren besonders im unteren Wellenlängenbereich um bis zu $-1,7 \cdot 10^{-7}$. Auch wenn diese Differenz nicht besonders gravierend ist, wäre es wünschenswert, präzisere Dispersionsformeln zu entwickeln und zukünftig anwenden zu können. Weiterhin erkennt man, dass /Ciddor, Hill 1999/ die Formel von Barrell & Sears aus dem Jahre 1939 mit einem konstanten Faktor verändert hat, der den Einfluss des gestiegenen CO_2 -Gehalts von 300 ppm auf 375 ppm berücksichtigt.

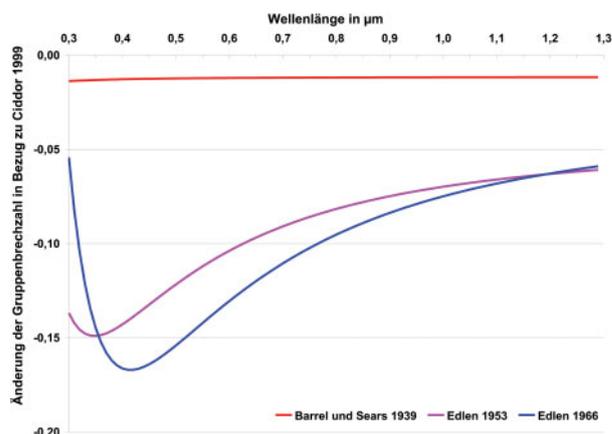


Abb. 5 | Unterschiede der Gruppenbrechzahlen bezogen auf /Ciddor, Hill 1999/

3.3.2 Der atmosphärische Luftdruck

Der atmosphärische Luftdruck p setzt sich aus folgenden Partialdrücken zusammen

$$p = \rho_1 + \rho_2 + e$$

- mit ρ_1 = Partialdruck der trockenen, CO_2 -freien Luft
- ρ_2 = Partialdruck des Kohlendioxids
- e = Partialdruck des Wasserdampfes

Die Erhöhung des CO_2 -Gehalts von 300 auf 375 ppm (siehe Abschnitt 3.3.1) führt zu einer Änderung des Partialdrucks um 0,08 hPa bzw. $0,12 \cdot 10^{-7}$ /Deichl 1984/. Nach Ansicht des Verfassers hätte man die Änderung des CO_2 -Gehalts nicht als eine Konstante in der Dispersionsformel nach Ciddor (1999) berücksichtigen sollen, sondern vielmehr in der Interpolationsformel (siehe Abschnitt 3.3.3) als weitere Variable, um von zukünftigen weiteren Veränderungen des CO_2 -Gehalts unabhängig zu sein.

3.3.3 Interpolationsformel

Mit der Interpolationsformel wird der Brechungsindex n_L bzw. die Brechzahl N_L für die aktuellen meteorologischen Daten der Atmosphäre, die das Lichtsignal durchläuft, berechnet, um dann damit die erste Geschwindigkeitskorrektur zu ermitteln. Der Brechungsindex n_L bzw. die Brechzahl N_L ist eine Funktion der Gruppenbrechzahl N_{Gr} der Temperatur T , des Luftdrucks p und des Dampfdrucks e . Nach der Empfehlung der IAG aus dem Jahre 1999 gilt folgende Formel:

$$N_L = (n_L - 1) \cdot 10^6 = N_{Gr} \cdot \frac{273,15}{1013,25} \cdot \frac{p}{T} - 11,27 \cdot \frac{e}{T} \quad (5)$$

Auch die Koeffizienten in dieser Formel wurden für unterschiedliche Temperatur- und Luftdruckbereiche experimentell ermittelt. Der Gültigkeitsbereich der Koeffizienten ist aus Tab. 2 ersichtlich.

Barrell und Sears (1939)	12 bis 31°C	100 bis 800 mmHg
Edlen (1966)	5 bis 30°C	
Owens (1967)	-23 bis 57°C	0 bis 4 bar
Ciddor (1999)	-40 bis 100°C	800 bis 1200 hPa

Tab. 2 | Gültigkeitsbereiche der Interpolationsformeln /Deichl 1984/, /Ciddor 1999/

Erst mit der Formel von /Ciddor, Hill 1999/ werden die in der Praxis vorkommenden Temperatur- und Luftdruckbereiche abgedeckt. In der Literatur, z.B. /Rüeger 1998/ und /Ciddor 2002/, wird die Genauigkeit dieser Formel mit $5 \cdot 10^{-7}$ bis $10 \cdot 10^{-7}$ abgeschätzt. Im Hinblick auf die eingangs angesprochene Genauigkeitsforderung von $1 \cdot 10^{-7}$ bis $2 \cdot 10^{-7}$ besteht also hier die Notwendigkeit, die Genauigkeit der Interpolationsformel zu steigern.

Weiterhin ist festzustellen, dass für besondere Verhältnisse, wie z.B. in industriellen Bereichen, die Atmosphäre aufgrund von z.B. austretenden Öl- und Lösungsmitteldämpfen anders als die allgemein angenommene Normatmosphäre zusammengesetzt ist. Diese Abnormalitäten werden bei der meteorologischen Korrektur in der Regel nicht berücksichtigt. Nach /Profos, Pfeifer 1994, Seite 459/ kann der Einfluss mehrere $10 \cdot 10^{-7}$ betragen. Also auch hier ist im Hinblick auf die Genauigkeitsforderung Forschungsbedarf gegeben.

Auf die *zweite Geschwindigkeitskorrektur* /Joeckel, Stober, Huet 2008, Seite 209/, die dem Umstand Rechnung trägt, dass die Kurve des Messsignals nicht parallel zur Erdoberfläche verläuft, sondern wesentlich flacher, wird an dieser Stelle nicht weiter eingegangen. Ihr Einfluss bleibt für Streckenlängen < 20 km stets unter $1 \cdot 10^{-7}$ und kann deshalb vernachlässigt werden.

3.3.4 Messung der meteorologischen Parameter

Die meteorologischen Parameter wirken sich unterschiedlich auf die zu berechnende erste Geschwindigkeitskorrektur aus. So werden Messwertänderungen der Strecken von $1 \cdot 10^{-7}$ von einer Änderung der Lufttemperatur von $0,10$ K bzw. von einer Änderung des Luftdrucks von $-0,34$ hPa bzw. von einer Änderung des Wasserdampfdrucks von $1,67$ hPa hervorgerufen /Joeckel, Stober, Huet 2008/. Die kritische Größe ist dabei die Lufttemperatur. Es ist außerordentlich schwierig, die mittlere Lufttemperatur entlang des Lichtsignals über z.B. eine Streckenlänge von 1 km auf $0,1$ K zu bestimmen.

Normalerweise werden zur Messung der *Lufttemperatur* Thermometer in Form von

- Flüssigkeitsthermometern (z.B. Schleuderthermometer, Aspirationspsychrometer nach Assmann),
- Widerstandsthermometern (Pt100- oder NTC-Widerstand),
- Quarzthermometern und
- Ultraschallthermometern

eingesetzt. Dabei ist besonders wichtig, dass der eigentliche Temperatursensor durch einen nach Möglichkeit doppelwandigen Strahlungsschutz abgedeckt wird und dass der Luftstrom ventiliert am Sensor vorbei geführt wird, z.B. mit $2,5$ m/s, wie z.B. beim Aspirationspsychrometer nach Assmann. Aufgrund der Masse des eigentlichen Temperatursensors in Form der Flüssigkeit im Vorratsbehälter beim Flüssigkeitsthermometer oder der elektronischen Komponenten wird die tatsächliche Lufttemperatur verzögert angezeigt. Diese Filterwirkung ist zum einen gewollt, da dadurch kurzfristige Schwankungen der Lufttemperatur ausgemittelt werden, aber zum anderen eben dadurch kurzfristige Änderungen der Temperatur mit diesen Thermometern nicht bestimmt werden können.

Ein Ultraschallthermometer, das aus der Laufzeit eines Schallimpulses in der Atmosphäre die Lufttemperatur berechnet, arbeitet hingegen verzögerungsfrei /Schwarz 1985/. Zudem wird hier direkt die mittlere (virtuelle) Temperatur innerhalb des durchschallten Bereichs gemessen und dies mit einer hohen Auflösung im Bereich weniger mK. Von Nachteil ist dabei, dass bei Frequenzen im Ultraschallbereich nur verhältnismäßig kurze Distanzen bis zu 10 m durchschallt werden können /Meiners-Hagen, Pollinger 2012/.

Mit den normalen Thermometern kann die punktuelle, örtliche Lufttemperatur bestenfalls auf $0,1$ K genau ermittelt werden unter der Voraussetzung einer sorgfältigen Kalibrierung, z.B. mit einem geeichten Präzisions-Kalorimeter-Thermometer. Inwieweit dann der Mittelwert der z.B. an den Endpunkten einer Strecke gemessenen punktuellen Temperaturen der integralen Temperatur entspricht, hängt wesentlich von den

Witterungsverhältnissen ab. Gute Verhältnisse liegen bei bedecktem Himmel mit leichtem Windgang vor.

Die Messung des (absoluten) *Luftdrucks* erfolgt mit Aneroid-Barometern bzw. mit elektronischen Drucksensoren. Der örtliche Luftdruck ist im Vergleich zur Lufttemperatur gleichmäßiger. Er kann nach einer Kalibrierung der Barometer (Nullpunktfehler, Teilungsfehler, Temperaturabhängigkeit, Hysteresefehler) auf ca. 0,2 hPa bis 0,4 hPa bestimmt werden. Mit dieser Standardabweichung kann der Anteil des Luftdrucks an der meteorologischen Korrektur auf $1 \cdot 10^{-7}$ bestimmt werden, so dass die Genauigkeitsforderung eingehalten wird.

Unproblematisch ist hingegen die Bestimmung der *Luftfeuchte*. Der Partialdruck des Wasserdampfes kann mit dem Aspirations-Psychrometer nach Assmann bzw. mit elektronischen Luftfeuchtesensoren nach einer Kalibrierung auf ca. 0,4 hPa ermittelt werden.

Eine andere Möglichkeit, den meteorologischen Einfluss zu bestimmen, ohne dass präzise Messungen der atmosphärischen Zustände notwendig sind, wird in der „Lokale-Maßstab-Parameter-Methode (LSPM)“ /Brunner, Lienhart 2012/ gesehen. Wie Untersuchungen von /Brunner, Lienhart 2012/ gezeigt haben, sind Resultate von $2 \cdot 10^{-7}$ bis $3 \cdot 10^{-7}$ möglich.

Die Qualität der meteorologischen Daten, insbesondere die der Temperatur, kann gesteigert werden, wenn

1. die Daten am Stand- und Zielpunkt gemessen und gemittelt werden,
2. die Daten über einen längeren Zeitraum registriert und dann ausgeglichen werden,
3. die Messungen nur bei ausgesuchten Wetterlagen (bedeckt, leichter Wind) ausgeführt werden,
4. die „Lokale-Maßstabs-Parameter-Methode (LSPM)“ verwendet wird,
5. die Daten, z.B. mit unbemannten Luftfahrzeugen (UAV) längs des Messweges ermittelt werden,
6. die automatische Korrektur der Messwerte im Distanzmesser abgeschaltet und die Messwerte separat korrigiert werden,
7. die meteorologische Korrektur mit dem Dispersionsverfahren (siehe Abschnitt 3.3.5) bestimmt wird.

Es wird aber aufgrund der Inhomogenitäten der Atmosphäre, besonders denen der Lufttemperatur, kaum möglich sein, selbst unter idealen Bedingungen, die meteorologische Korrektur, z.B. mit Thermometern, besser als auf $5 \cdot 10^{-7}$ bis $10 \cdot 10^{-7}$ genau zu ermitteln. Die präzise Bestimmung der integralen Temperatur längs des Messweges ist derzeit das entscheidende Hemmnis für hochgenaue Streckenmessungen mit $< 1 \cdot 10^{-7}$.

3.3.5 Dispersionsverfahren

Eine Möglichkeit, direkt den integralen Brechungsindex zu bestimmen, ist mit dem Dispersionsverfahren gegeben. Hier werden mit entsprechenden Distanzmessern die Strecken mit mindestens zwei unterschiedlichen Lichtwellenlängen gemessen. Aus dem Unterschied der beiden Messungen d_{rot} und d_{blau} kann nach /Joekel, Stober, Huet 2008, Seite 243/

$$d = d_{rot} - (d_{blau} - d_{rot}) \cdot \frac{u_{rot}}{u_{blau} - u_{rot}} + d_{rot} \cdot 11,27 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{e}{T} \quad (6)$$

$$\text{mit } \begin{aligned} u_{rot} &= N_{rot} \cdot 10^{-6} \cdot 0,26959 \\ u_{blau} &= N_{blau} \cdot 10^{-6} \cdot 0,26959 \end{aligned}$$

$$Q = \frac{u_{rot}}{u_{blau} - u_{rot}} = \frac{N_{rot}}{N_{blau} - N_{rot}} \quad (7)$$

N_{rot} = Gruppenbrechzahl für die Wellenlänge rot

N_{blau} = Gruppenbrechzahl für die Wellenlänge blau

die meteorologisch korrigierte Distanz berechnet werden.

In der *Tab. 3* sind die Kenndaten der beiden Distanzmessgeräte, die nach dem Dispersionsverfahren arbeiten, zusammengestellt /Joekel, Stober, Huet 2008, Seite 243/.

Instrument	λ [μm]	Faktor Q
Georan I	0,514 (grün)	57
	0,458 (blau)	
Terrameter	0,6328 (rot)	21
	0,4416 (blau)	

Tab. 3 | Kenndaten der Distanzmesser, die nach dem Dispersionsverfahren arbeiten

Das Problem beim Dispersionsverfahren ist die Auflösungsgenauigkeit der Differenzstrecke $d_{rot} - d_{blau}$. Die Standardabweichung dieser Differenzstrecke multipliziert mit dem Faktor Q ergibt letztlich die Genauigkeit der Distanz. Da die Auflösungsgenauigkeit unabhängig von der Streckenlänge ist, zeigt das Dispersionsverfahren folglich erst bei längeren Strecken einen Genauigkeitserfolg.

Mit den Daten des Terrameters ist in der *Abb. 6* in Abhängigkeit von der Streckenlänge das erforderliche Auflösungsvermögen dargestellt, um Strecken auf $1 \cdot 10^{-7}$ genau zu bestimmen. Es beträgt bei einer Streckenlänge von 1 km ca. 4 μm und bei einer Strecke von 100 m sogar nur 0,5 μm . Der Faktor Q sollte demnach möglichst klein sein mit der Folge, dass der Unterschied zwischen den Wellenlängen der benutzten Lichtstrahlungen möglichst groß zu wählen ist. Weitere Hinweise zum Einsatz des Dispersionsverfahrens bei der elektrooptischen Streckenmessung enthält die Dissertation /Hübner 1985/.

Neue Möglichkeiten in der Realisierung des Dispersionsverfahrens könnte das Verfahren „*Optischer Frequenzkamm*“ bringen (Abschnitt 2.1). Alle im Wellenlängenbereich von 0,45 μm bis 1,20 μm vorhandenen hochpräzisen Spektren mit unterschiedlichen Wellenlängen, es sind ca. 1 Million Spektren, könnten zur Distanzmessung herangezogen werden. Man darf auf die Ergebnisse dieser Entwicklungen gespannt sein.

Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass das Dispersionsverfahren nur bei trockener Luft korrekt arbeitet. Es muss die Korrektur wegen der relativen Luftfeuchtigkeit noch manuell am Ergebnis angebracht werden. Der Einfluss der relativen Luftfeuchtigkeit kann mit ca. $6 \cdot 10^{-7}$ abgeschätzt werden; wird die Luftfeuchtigkeit gemessen, sollte diese Korrektur mit einer Standardabweichung von $< 1 \cdot 10^{-7}$ bestimmbar sein.

Labormessungen bei der PTB /Meiners-Hagen 2006/ über eine Distanz von 3,20 m und mit den Wellenlängen $\lambda_1 = 1,064 \mu\text{m}$ sowie $\lambda_2 = 0,532 \mu\text{m}$ zeigen, dass ohne Berücksichtigung der relativen Luftfeuchtigkeit Genauigkeiten von $< 8 \cdot 10^{-7}$ und zum anderen unter

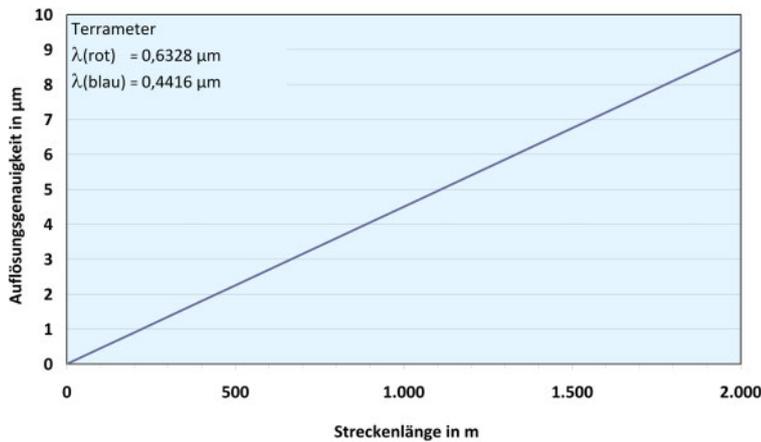


Abb. 6 | Auflösungsgenauigkeit der Differenzstrecke $d_{rot} - d_{blau}$ für $1 \cdot 10^{-7}$ für die Daten des Terrameters

Berücksichtigung der Luftfeuchtigkeit Genauigkeiten von $< 2,5 \cdot 10^{-7}$ möglich sind (Abb. 7). Weitere Forschungsarbeiten müssen zeigen, inwieweit diese Techniken auf längere Strecken übertragbar sind.

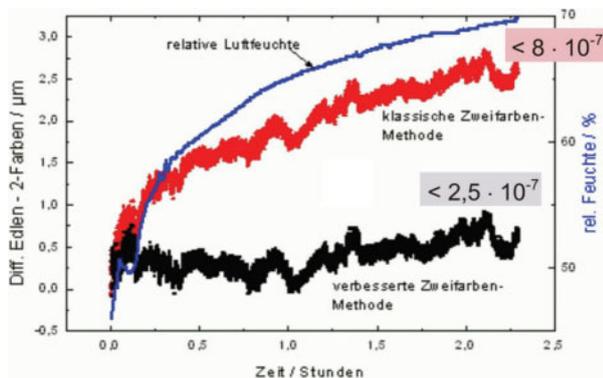


Abb. 7 | Messungen nach dem Dispersionsverfahren bei ansteigender Luftfeuchtigkeit /Meiners-Hagen 2006/

3.4 Raumbezug

Der Distanzmesser und der Reflektor werden auf den Endpunkten der auszumessenden Distanz aufgebaut und ihre Stehachsen mit Libellen, also mit Bezug zum Erdschwerefeld, senkrecht gestellt (vgl. Abschnitt 3.1.4). In der Regel sind diese Punkte in einem Koordinatensystem (örtlich oder global) definiert. Mithin ist festzulegen, in welcher Art und Weise das Ergebnis der Streckenmessung in das Koordinatensystem zu reduzieren ist. Abb. 8 verdeutlicht die Zusammenhänge für ein lokales Koordinatensystem.

Das Ergebnis der Streckenmessung ist die Länge der aufgrund der Schichtung der Atmosphäre gekrümmten Lichtkurve. Es ist also diese Kurvenlänge auf die Raumsehne zu reduzieren. Nach der in /Joeckel, Stober, Huep 2008, Seite 211/ angegebenen Formel ist diese Reduktion für Streckenlängen < 76 km stets kleiner als $1 \cdot 10^{-7}$ und kann deshalb für Strecken bis zu 1 km bedenkenlos vernachlässigt werden.

Jetzt muss entschieden werden, worauf die Raumsehne zu reduzieren ist:

1. auf die gerade Verbindungslinie (Schrägstrecke in Abb. 8) der Zentren der Streckenendpunkte oder

2. auf die Strecke in der x-y-Ebene des Koordinatensystems (Strecke 1 in der Abb. 8) oder
3. auf die Oberfläche der Niveaufäche (Strecke 2 in der Abb. 8), z.B. NHN.

Wird als Ergebnis die Schrägstrecke zwischen den Zentren der Endpunkte der Strecke gewünscht, so ist das Messergebnis lediglich um den Einfluss der Konvergenz der Lotlinien auf die Instrumenten- bzw. Reflektorhöhe zu reduzieren. Bei einer Distanz von 1000 m und einer Instrumentenhöhe von 300 mm beträgt die Reduktion 47 µm. Auch wenn der Effekt sehr klein ist, sollte er, da er entfernungsabhängig ist, zumindest bei längeren Strecken beachtet werden.

Um die Strecken 1 bzw. 2 (Abb. 8) zu erhalten, sind die Höhen- und die Neigungsreduktionen zu berechnen. Die Höhenreduktion, z.B. für die Strecke 2, berücksichtigt die Konvergenz der Lotlinien. Geht man vom Modell einer kugelförmigen Erde aus, diese Annahme ist für Streckenlängen bis zu mehreren Kilometern sicherlich gerechtfertigt, so sind die Höhen für eine angestrebte Genauigkeit der Reduktion von $1 \cdot 10^{-7}$ mit einer Standardabweichung von 0,6 m zu bestimmen. Diese Genauigkeitsforderung ist unkritisch. Sind die Strecken wesentlich länger, ist unter Umständen auch das Modell einer kugelförmigen Erde nicht mehr ausreichend; die Reduktion ist dann mit den tatsächlichen Lotabweichungen zu berechnen, die zuvor zu bestimmen sind /Grafarend 1987/.

Problematischer gestaltet sich die Berechnung der Neigungsreduktion. Bekanntermaßen hängt die Genauigkeit, mit der diese Re-

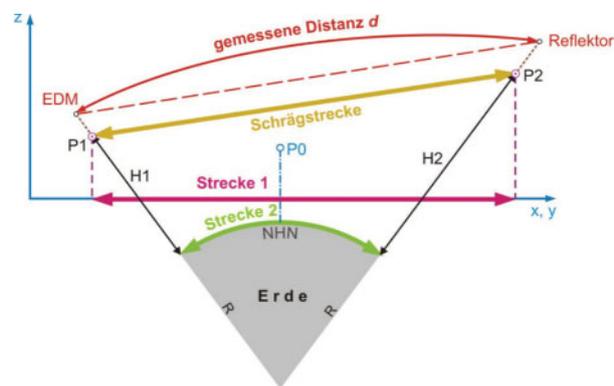


Abb. 8 | Reduktion der Streckenmessung

duktion bestimmt werden kann, von der Genauigkeit des Höhenunterschiedes der Streckenendpunkte bzw. des Zenitwinkels der Strecke ab. In der *Abb. 9* ist diese Situation graphisch dargestellt. Bei z.B. einem Höhenunterschied von 5 m einer 100 m langen Strecke ist der Höhenunterschied mit einer Standardabweichung von $<0,2$ mm zu messen, damit die Neigungsreduktion mit einer Standardabweichung von $<1 \cdot 10^{-7}$ erhalten wird. Die Genauigkeitsforderung, Höhenunterschiede für die Neigungsreduktion auf wenige 0,1 mm genau zu bestimmen, ist mitunter schwer realisierbar. Hierdurch sind die Grenzen gegeben, um horizontale Strecken aus steilen Distanzen hochgenau abzuleiten. Erst bei Streckenlängen größer als 240 m ist bei gleichem Höhenunterschied eine Standardabweichung des Höhenunterschiedes von 1 mm ausreichend, die wiederum problemlos realisiert werden kann.

4 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Eine Streckenmessgenauigkeit von $1 \cdot 10^{-7}$ zu realisieren, stellt eine hohe Herausforderung dar. Die Umsetzung dieser Forderung hängt von den jeweiligen örtlichen Randbedingungen ab und ist in jedem Einzelfall speziell zu analysieren. Die wichtigsten Erkenntnisse der zuvor diskutierten Einflussgrößen sollen deshalb hier wiederholt werden:

■ Zentrierung

Die Zentrierung des Distanzmessers bzw. des Reflektors an den Endpunkten der auszumessenden Strecke erfolgt mechanisch. Toleranzen von $<0,01$ mm können hier kaum unterschritten werden. Da dieser Einflussfaktor streckenunabhängig ist, wirkt er sich besonders bei kurzen Strecken aus. Strecken, die kürzer als 100 m sind, können demnach nicht reproduzierbar mit einer Standardabweichung von $<1 \cdot 10^{-7}$ bestimmt werden.

■ Reflektor

Die Ausrichtung des Reflektors auf den Distanzmesser kann in der Regel mit der erforderlichen Genauigkeit vorgenommen werden. Auch die anderen reflektorspezifischen Einflussfaktoren sind bei entsprechender Sorgfalt und bei einer hohen Fertigungsqualität für die Genauigkeitsforderung von $<1 \cdot 10^{-7}$ beherrschbar.

■ Additions- und Maßstabskorrektur

Sind die instrumentellen Voraussetzungen hinsichtlich des Auflösungsvermögens, der Langzeitstabilität und des Temperaturverhaltens des Distanzmessers gegeben, lassen sich auch die Additions- und die Maßstabs- bzw. die Frequenzkorrekturen mit der erforderlichen Genauigkeit bestimmen.

■ zyklischer Phasenfehler

Unter der Voraussetzung, dass nur zyklische Phasenfehler mit der

Wellenlänge des Feinmaßstabes auftreten, kann diese Einflussgröße in den meisten Fällen mit der erforderlichen Genauigkeit ermittelt werden. Nichtsdestoweniger können sich z.B. aufgrund örtlicher Besonderheiten Abweichungen des zyklischen Phasenfehlers von seiner labormäßigen Bestimmung bei den Feldmessungen ergeben. Die Genauigkeitsforderung von $<1 \cdot 10^{-7}$ wird von Distanzmessern, die nach dem Verfahren der Amplitudenmodulation arbeiten, aufgrund der unzureichenden Bestimmbarkeit dieses Fehlers in der Regel nicht erreicht.

■ physikalische Grundlagen der meteorologischen Korrektur

Die experimentell bestimmten Konstanten für die Formeln, mit denen die meteorologische Korrektur berechnet wird, erfüllen nicht immer die Anforderungen, um die geforderte Genauigkeit von $<1 \cdot 10^{-7}$ in der Streckenmessung gewährleisten zu können. Hier ist weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeit zu leisten. Es ist auch unzureichend erforscht, wie sich spezielle Zusammensetzungen der Atmosphäre in industriellen Bereichen auf die meteorologische Korrektur auswirken.

■ atmosphärische Parameter für die meteorologische Korrektur

Die atmosphärischen Parameter, wie z.B. Lufttemperatur- und Luftdruck sowie der Partialdruck des Wasserdampfes, können in der Regel nicht mit der Genauigkeit als repräsentative Werte für die gesamte Strecke ermittelt werden, um die meteorologische Korrektur mit einer Standardabweichung von $<1 \cdot 10^{-7}$ berechnen zu können. Hier sind bestehende Ansätze ihrer integralen Bestimmung weiterzuentwickeln bzw. praxistauglich zu machen sowie ganz neue Verfahren auf ihre Anwendbarkeit und Effizienz zu untersuchen.

■ Reduktionen

Eine Vielzahl der bekannten Reduktionen sind für Streckenlängen kleiner 1 km vernachlässigbar oder mit ausreichender Genauigkeit bestimmbar. Lediglich bei der Neigungsreduktion ergeben sich besonders bei steilen Strecken Einschränkungen, die genauigkeitsbestimmend sind.

■ Stabilität der Untergrundes

Obwohl die Stabilität des Untergrundes nur bedingt mit der Streckenmessgenauigkeit in Beziehung steht, so ist dieser Einflussfaktor entscheidend, wenn die Ergebnisse von Streckenmessungen in zeitlicher Hinsicht untereinander verglichen werden sollen. Auch wenn die Endpunkte der Strecken durch massiv ausgebildete, doppelwandige Betonpfeiler vermarktet werden, können sich Veränderungen der Pfeiler aufgrund von langsamen Massenbewegungen bzw. von tektonisch bedingten, lokalen Bewegungen der Erdkruste mit der Zeit ergeben. Durch Kontrollmessungen kann man versuchen, die Stabilität der Pfeiler nachzuweisen.

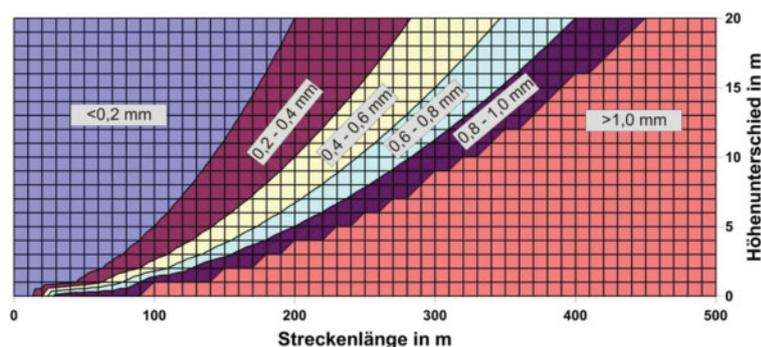


Abb. 9 | Standardabweichung des Höhenunterschiedes für eine Neigungsreduktion von $<1 \cdot 10^{-7}$

Jeder der hier betrachteten Einflussfaktoren wurde an der Genauigkeitsforderung von $<1 \cdot 10^{-7}$ beurteilt. Konsequenterweise hätte die Übertragung der Einzeleinflüsse auf die Streckenmessgenauigkeit nach dem Varianzfortpflanzungsgesetz erfolgen müssen. Folglich hätte dann jeder einzelne Einflussfaktor nur einen Bruchteil der Genauigkeitsforderung von $<1 \cdot 10^{-7}$, also schätzungsweise $0,03 \cdot 10^{-7}$ bis $0,05 \cdot 10^{-7}$, betragen dürfen. Trotzdem wäre man schon einen großen Schritt weiter, wenn es gelänge, jeden einzelnen Einflussfaktor mit einer Genauigkeit von $<1 \cdot 10^{-7}$ zuverlässig zu bestimmen.

LITERATUR

- Bernhart, F.; Hennes, M. (2012): Leistungsfähigkeit eines „Reflektor 160“ in Kombination mit einem Lasertracker. In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn) 119(2012)2, 63-69.
- Bönsch, G.; Potulski, E. (1998): Measurement of the refractive index of air and comparison with modified Edlén's formulae. In: Metrologia 35(1998)2, 133-139.
- Brunner, F. K.; Lienhart, W. (2012): Anwendung der Lokalen-Maßstab-Parameter-Methode (LSPM) bei der Vermessung einer Kalibrierbasis. In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn) 119(2012) 11/12.
- Ciddor, P. E.; Hill, R. J. (1999): Refractive index of air: 2. Group index. Applied Optics, 38(1999)9, 1663-1667.
- Ciddor, P. E. (2002): Refractive index of air: 3. The roles of CO₂, H₂O, and refractivity virials. Applied Optics, Vol. 41, No. 12, 2292-2298, 2002.
- Deichl, K. (1984): Der Brechungsindex für Licht und Mikrowellen. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN) 91(1984)3, 85-100.
- EMRP (2011): 3rd Workshop on Absolute long distance measurement in air, May 27th 2011 - Prague. 1st Announcement. Internet: http://www.euramet.org/fileadmin/docs/EMRP/JRP/New/Flyer_3rd_Workshop_on_Long_distance_measurement_in_Air_1st_announcement_.pdf; <http://www.long-distanceproject.eu/workshops> und <http://www.sooft.es/wp-content/files/Presentations.zip> (Stand der Recherche: 10.04.2012).
- ETALON (2012): Was ist der LaserTRACER? Internet: <http://etalon-ag.de/index.php/de/produkte/49-lasertracer?format=pdf> (Stand der Recherche: 10.04.2012).
- Gervaise, J.; Olsfors, J. (1987): The lep trilateration network. Lecture Notes in Earth Sciences, 1987, Volume 12, Applied Geodesy, Seiten 89-110. Internet: <http://www.springerlink.com/content/?Author=J.+Gervaise> (Stand der Recherche: 10.04.2012).
- Grafarend, E. W. (1987): Der Einfluß der Lotrichtung auf lokale geodätische Netze. Zeitschrift für Vermessungswesen 112(1987)8, 413-424.
- Heister, H. (2012): Die neue Kalibrierbasis der UniBw München. In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn) 119(2012) 10, 336-343.
- Heuneker, O. (2012): Auswertung des Ringversuchs auf der neuen Kalibrierbasis der UniBw München zur Bestimmung der Sollstrecken. In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn) 119(2012) 11/12.
- Hexagon (2010): Leica Absolute Tracker AT401. Internet: http://www.aicon3d.de/fileadmin/user_upload/produkte/de/leica/leica_at401/pdf/AICON_Leica_Absolute_Tracker_AT401_DE.pdf (Stand der Recherche: 10.04.2012).
- Holzwarth, R.; Fendel, P.; Herrman, M.; Zimmermann, M.; Gohle, Chr.; Udem, T.; Hänsch, T. (2012): Messung der Frequenz von Licht. Internet: <http://www.mpg.de/~haensch/comb/prosa/prosa.html> (Stand der Recherche: 10.04.2012).
- HP (1984): Laser-Meßsystem HP 5528A. Druckschrift der Firma Hewlett-Packard.
- Hübner, W. (1985): Zur Ausnutzung der Dispersion für die elektromagnetische Streckenmessung. DGK, Reihe C, Nr. 310.
- Joeckel, R.; Stober, M.; Huep, W. (2008): Elektronische Entfernung- und Richtungsmessung und ihre Integration in aktuellen Positionierungsverfahren. 5. neu bearb. und erw. Auflage, Wichmann.
- Köhler, M. (2012): Distanzmessverfahren elektrooptischer Tachymeter – Stand der Trimble Technik. In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn) 119(2012) 8/9, 291-304.
- Leica (2012): Leica TS30 – Technische Daten. Druckschrift der Firma Leica Geosystems AG (www.leica-geosystems.com)
- Loser, R.; Meier, D.; Münch, K. H.; Schwarz, W. (1991): Das Funktionsprinzip des Mekometers ME 5000. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN) 98(1991)10, 324-345.
- Meiners-Hagen, K. (2006): Brechzahlkompensierende Interferometer. http://www.ptb.de/de/org/5/nachrichten5/archiv/2006/wirtschaft/abteilung5_23.htm (Stand der Recherche: 10.04.2012).
- Meiners-Hagen, K.; Pollinger, F. (2012): Rückführbare Messung langer Distanzen in der PTB. In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn) 119(2012) 8/9, 283-290.
- Naab, Chr.; Hennes, M. (2012): Das Laser Radar - reflektorlose Distanzbestimmung mittels Frequenzmodulation. In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn) 119(2012)2, 48-53.
- NN 2012: Frequenzkamm. Internet: <http://de.wikipedia.org/wiki/Frequenzkamm> (Stand der Recherche: 14.04.2012).
- Pauli, W. (1969): Vorteile eines kippbaren Reflektors bei der elektrooptischen Streckenmessung. In: Vermessungstechnik 17(1969)11, 412-415.
- Pech, B. (2004): Bestimmung der Messunsicherheit nach GUM. Books on Demand GmbH, ISBN: 13-8330-1039-8.
- Profos, P.; Pfeiler, T. (1994): Handbuch der industriellen Meßtechnik. 6. Auflage, R. Oldenbourg, München Wien.
- Rüeger, J. M. (1976): Probleme bei der gemeinsamen Bestimmung von zyklischen Fehlern und Additionskonstante bei elektrooptischen Distanzmessern. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN) 83(1976)10, 338-344.
- Rüeger, J. M. (1998): Refractive index formulae for electro-optical distance measurement. Proceedings, Comm. 5, 21st International Congress (FIG 98), International Federation of Surveyors, 19-25 July 1998, Brighton, UK, paper TS28/1, 191-208.
- Schwarz, W. (1985): Zur Ermittlung der integralen Temperatur der Atmosphäre mit Ultraschall für Refraktionsbestimmungen im Nahbereich. Veröffentlichung des Geodätischen Instituts der RWTH Aachen Nr. 38, Dissertation.
- Schwarz, W. (1994): Zur Reduktion der Messungen bei räumlichen Punktbestimmungen. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN) 101(1994)6, 207-218.
- Sobotta, Chr.; Schwarz, W.; Witte, B. (1980): Frequenzprüfung elektrooptischer Entfernungsmesser mit Photodioden. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN) 87(1980)6, 257-265.
- Trimble (2012): Datenblatt - Trimble S8 Total Station. Druckschrift der Firma Trimble Germany GmbH (www.trimble.com).
- Zetsche, H. (1979): Elektronische Entfernungsmessung (EDM). Konrad Wittwer, Stuttgart.

Prof. Dr.-Ing. Willfried Schwarz

BAUHAUS-UNIVERSITÄT WEIMAR
PROFESSUR GEODÄSIE UND PHOTOGRAMMETRIE

Marienstraße 9 | 99425 Weimar
willfried.schwarz@uni-weimar.de



Manuskript eingereicht: 20.04.2012 | Im Peer-Review-Verfahren begutachtet