

Themenschwerpunkt
Interferometrie an
Maßverkörperungen
Teil 2

Fachorgan für Wirtschaft und Wissenschaft
Amts- und Mitteilungsblatt der
Physikalisch-Technischen Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin

120. Jahrgang, Heft 2, Juni 2010

Inhalt

Themenschwerpunkt	Interferometrie an Maßverkörperungen, Teil 2	
	• <i>Ahmed Abou-Zeid</i> : Diodenlaser für die interferentielle Längenmesstechnik	95
	• <i>Florian Pollinger, Karl Meiners-Hagen, Ahmed Abou-Zeid</i> : Absolutlängen mittels Mehrwellenlängen-Diodenlaserinterferometrie	105
	• <i>Karl Meiners-Hagen, Florian Pollinger, Ahmed Abou-Zeid</i> : Brechzahlkompensation mittels Mehrwellenlängen-Interferometrie	110
	• <i>Martin Wedde, Karl Meiners-Hagen, Ahmed Abou-Zeid</i> : Interferometrische Kalibrierung von Strichmaßen, Laserinterferometern und Entfernungsmessgeräten: Die Geodätische Basis der PTB	115
	• <i>Nicolae R. Doloca, Martin Wedde, Karl Meiners-Hagen, Ahmed Abou-Zeid</i> : Femtosekundenlaserbasierendes Messsystem für geodätische Längen	120
	• <i>Ingo Lohse, Michael Voigt</i> : „Altes“ Material in „neuen“ Bändern	124
	• <i>Ingo Lohse, Rudolf Mascherek, Ahmed Abou-Zeid</i> : Zulassung gestern, Zertifizierung heute	127
Recht und Technik	Prüfungen der staatlich anerkannten Prüfstellen für Messgeräte für Elektrizität, Gas, Wasser und Wärme im Jahr 2009	132
	<i>Norbert Greif, Volker Hartmann, Dieter Richter</i> : Analyse von Wahlgerätekonzepthen in Bezug auf das Bundesverfassungsgerichtsurteil	133
Amtliche Bekanntmachungen	(eigenes Inhaltsverzeichnis)	148

Zum Titelbild:

Das Foto auf der Titelseite zeigt den 50-m-Interferenzkomparator der PTB, die sogenannte „Geodätische Basis“. Auf dieser werden sowohl verkörpert Längenmessmittel und Laserinterferometer kalibriert und geprüft, als auch die Eigenentwicklungen zur langreichweitigen interfero-

metrischen Entfernungsmessung getestet und gegen das nationale Normal verglichen. Der linke Bereich der Abbildung zeigt in der oberen Hälfte ein zur Prüfung auf der Basis aufgelegtes handelsübliches Maßband. In den unteren Segmenten ist schematisch eine moderne mehrdimensionale Messeinrichtung für Frachtgüter abgebildet, die im Fachbereich „Interferometrie an Maßverkörperungen“ zertifiziert werden.

Impressum

Die **PTB-Mitteilungen** sind metrologisches Fachjournal und amtliches Mitteilungsblatt der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin. Als Fachjournal veröffentlichen die PTB-Mitteilungen wissenschaftliche Fachaufsätze zu metrologischen Themen aus den Arbeitsgebieten der PTB. Als amtliches Mitteilungsblatt steht die Zeitschrift in einer langen Tradition, die bis zu den Anfängen der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt (gegründet 1887) zurückreicht. Die PTB-Mitteilungen veröffentlichen in ihrer Rubrik „**Amtliche Bekanntmachungen**“ unter anderem die **aktuellen Geräte-Prüfungen** und -Zulassungen aus den Gebieten des Eich-, Prüfstellen- und Gesundheitswesens, des Strahlenschutzes und der Sicherheitstechnik.

Verlag

Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Bürgermeister-Smidt-Str. 74–76,
27568 Bremerhaven
Postfach 10 11 10, 27511 Bremerhaven
Internet: www.nw-verlag.de
E-Mail: info@nw-verlag.de

Herausgeber

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB),
Braunschweig und Berlin
Postanschrift:
Postfach 33 45, 38023 Braunschweig
Lieferanschrift:
Bundesallee 100, 38116 Braunschweig

Redaktion/Layout

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit, PTB
Dr. Dr. Jens Simon (verantwortlich)
Gisela Link
Telefon: (05 31) 592-82 02
Telefax: (05 31) 592-30 08
E-Mail: gisela.link@ptb.de

Leser- und Abonnement-Service

Marina Kornahrens
Telefon: (04 71) 9 45 44-61
Telefax: (04 71) 9 45 44-88
E-Mail: vertrieb@nw-verlag.de

Anzeigenservice

Karin Drewes
Telefon: (04 71) 9 45 44-21
Telefax: (04 71) 9 45 44-77
E-Mail: info@nw-verlag.de

Erscheinungsweise und Bezugspreise

Die PTB-Mitteilungen erscheinen viermal jährlich. Das Jahresabonnement kostet 55,00 Euro, das Einzelheft 16 Euro, jeweils zzgl. Versandkosten. Bezug über den Buchhandel oder den Verlag. Abbestellungen müssen spätestens drei Monate vor Ende eines Kalenderjahres schriftlich beim Verlag erfolgen.

© Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bremerhaven, 2010

Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil dieser Zeitschrift darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages vervielfältigt oder verbreitet werden. Unter dieses Verbot fällt insbesondere die gewerbliche Vervielfältigung per Kopie, die Aufnahme in elektronische Datenbanken und die Vervielfältigung auf CD-ROM und in allen anderen elektronischen Datenträgern.

Diodenlaser für die interferentielle Längenmesstechnik

Ahmed Abou-Zeid*

Einleitung

Die Entwicklung von Diodenlasern (Halbleiterlasern) wird hauptsächlich durch die Massenproduktion für Anwendungen wie z. B. in der Unterhaltungselektronik und der faseroptischen Nachrichtenübertragung sowie von Laserdruckern, Barcode Scannern u. v. m. stimuliert. Die Hauptkriterien für solche Anwendungen von Diodenlasern sind die emittierte optische Leistung, die Betriebszuverlässigkeit und der Preis. Dagegen war deren ultimative Frequenzstabilität weniger von Bedeutung. Dies erschwerte den Fortschritt zur Fertigung spezieller Diodenlaser für interferometrische Anwendungen.

Diodenlaser stellen im Vergleich zu den meist in der interferentiellen Längenmesstechnik verwendeten He-Ne-Lasern eine interessante Alternative dar. Dies gilt insbesondere in Bezug auf Miniaturisierung, Lebensdauer, Kosten, Wirkungsgrad, Strahlungsleistung und hochspannungsfreiem Betrieb. Als nachteilig erweist sich bei Diodenlasern die Streuung der Emissionswellenlängen, die auch bei Dioden der gleichen Charge in einem Bereich von etwa 10 nm liegt. Außerdem ist die Emissionswellenlänge relativ stark von Parametern, wie der Temperatur der Diodenwärmesenke und des Injektionsstroms abhängig. Andere Nachteile sind die spektrale Alterung der emittierten Wellenlänge, die relativ starke Rücklichtempfindlichkeit sowie das elliptische Strahlprofil. Diese Nachteile können durch geeignete Verfahren zur Frequenzstabilisierung sowie Verwendung zusätzlicher Optiken kompensiert werden, um von den vielen Vorteilen von Diodenlasern für den Einsatz in der interferentiellen Längenmesstechnik profitieren zu können [1].

Die emittierte Frequenz eines Diodenlasers kann durch Konstanthaltung seiner Parameter [2] oder durch Verwendung eines Außenresonators [3] passiv stabilisiert werden. Eine aktive

Frequenzstabilisierung kann durch Anschluss an eine externe Referenz wie z. B. an ein Fabry-Perot-Etalon [4] oder eine atomare oder molekulare Absorptionslinie [5–7] realisiert werden. Hier können vergleichbare Frequenzstabilitäten wie beim He-Ne-Laser erreicht werden (siehe Kap. 4.2).

Mit welcher Methode die Frequenz eines Diodenlasers stabilisiert wird, richtet sich nach der geforderten Messunsicherheit, welche durch die Anwendung bestimmt wird. So ist die bei der Methode der Parameterstabilisierung erreichte Messunsicherheit der Diodenfrequenz von ca. 10^{-6} im Allgemeinen ausreichend bei der Messung von Führungsabweichungen an Werkzeug- und Messmaschinen, der Brechzahl von Luft, der Oberflächenrauheit sowie von Längen von Nivellierlatten, Messbändern, Inkrementalmaßstäben und bewegten Materialien [8–11]. Ein auf ein Fabry-Perot-Etalon wellenlängenstabilisierter Diodenlaser ($< 10^{-7}$) kann für Mehrachseninterferometrie an Koordinatenmessmaschinen angewendet werden [12]. Bei dem Präzisionsinterferometer und den Endmaßkomparatoren der PTB [13, 14] wird ein auf Rb-D₂-Absorptionslinien stabilisierter Diodenlaser ($< 10^{-9}$) neben einem He-Ne- und einem Nd-YAG-Laser eingesetzt. Für Absolut- bzw. Mehrwellenlängeninterferometrie (siehe Kap. 3 und 5) stellt der Diodenlaser eine unersetzliche Lichtquelle wegen seines breiten spektralen Emissionsbereichs in Verbindung mit einfacher Abstimbarkeit und schneller Modulierbarkeit bis in den GHz-Bereich dar [15–18].

2 Grundlagen

Ein Diodenlaser stellt eine in Vorwärtsrichtung betriebene pn-Diode dar, die die Form eines geeigneten Hohlraums aufweist. Als Laser Spiegel dienen die natürlichen Spaltflächen des Kristalls. Die heute für den Dauerstrichbetrieb gängigen Diodenlaser besitzen eine Doppel-Heterostruktur (DH) [19, 20]. Hierbei liegt

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

die aktive Zone z. B. eines GaAlAs-DH-Lasers (n- oder p-Ga_{1-x}Al_xAs, $x \geq 0$) zwischen einer n- und einer p-Ga_{1-y}Al_yAs-Schicht ($x < y$). Diese Schichten haben eine größere Energielücke und eine kleinere Brechzahl als die aktive Zone. Folglich entsteht senkrecht zur Schichtebene sowohl eine Potentialmulde für die injizierten Ladungsträger als auch ein dielektrischer Wellenleiter zur Führung der Lichtwelle. Damit ein Laserbetrieb in einem Diodenlaser stattfinden kann, müssen zwei Bedingungen erfüllt sein: Zum einen muss eine Besetzungsinversion in der aktiven Zone erzeugt werden. Dies wird durch Minoritätsträgerinjektion erreicht. Zum anderen muss die Resonatorgüte groß genug sein, um die entstehenden Verluste zu kompensieren. Bei kleinen Diodenströmen überwiegt die spontane Emission, bei höheren die stimulierte Emission. Ab einem bestimmten Schwellstrom ($i = i_{th}$) ist die optische Verstärkung größer als die Absorptionsverluste und die Laserstrahlung setzt ein. Aufgrund der Temperaturabhängigkeit des Verstärkungs- und Verlustfaktors in der aktiven Zone ändert sich der Schwellstrom eines Diodenlasers mit der Temperatur und somit die emittierte Wellenlänge.

Die DH-Diodenlaser (Kantenemitter) ordnet man je nach ihrer lateralen Wellenführung prinzipiell in zwei Klassen ein. Eine Klasse bilden die gewinngeführten Diodenlaser [21]. Bei ihnen beruht die parallel zur aktiven Zone stehende Wellenführung auf dem durch die laterale Verteilung der Ladungsträger erzeugten optischen Gewinnprofil. Diese Laser sind meist longitudinal mehrmodig und haben einen astigmatischen Fehler unterhalb von 50 µm in der Strahlachse. Zur zweiten Klasse gehören die indexgeführte Diodenlaser [22]. Diese besitzen einen durch ein Brechzahlprofil erzeugten Wellenleiter und sind bei $i > 1,1 i_{th}$ im Allgemeinen longitudinal einmodig und fast astigmatismusfrei ($< 1 \mu\text{m}$). Je nach optischer Resonatorlänge liegt der Abstand zwischen zwei benachbarten Longitudinalmoden zwischen etwa 0,2 nm und 0,5 nm. Die Transversale Einmodigkeit, d. h. die Emission des Grundmode TEM₀₀ senkrecht zur Schichtenebene, ist ohnehin gewährleistet, da die Dicke der aktiven Zone $< 0,5 \mu\text{m}$ ist. Um auch in der Zonenbreite transversalen Grundmodenbetrieb zu erreichen, wird die aktive Zone sehr schmal ausgelegt.

Neben den DoppelheterostrukturLasern ist eine Reihe von Laserstrukturen bereits entwickelt worden, wie Diodenlaser mit gesteuerten Rückkopplungsmechanismen („Distributed Feedback“: DFB, „Distributed Bragg Reflector“: DBR) [23, 24], Diodenlaser auf der Basis zweidimensionaler elektronischer Systeme („Quantum Well Lasers“) [25], C3-Laser („Cleaved Coupled Cavity“) [26], Diodenlaserzeilen („Diode Laser Arrays“) [27] und vertikal emittierende Laserdi-

oden („Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser Diodes“: VCSEL) [28]. Je nach Zusammensetzung der aktiven Zone des Diodenlasers und ihrer benachbarten Schichten existieren verschiedene kommerziell erhältliche Diodenlasertypen wie z. B. InGaN, GaN, GaInAsP, GaAlAs, AlGaAsSb, GaInAsSb, InAsSbP u. a. [29, 30]. Diese emittieren Laserstrahlen vom sichtbaren (400 nm) bis zum infraroten Spektralbereich (3500 nm).

3 Spektrale Eigenschaften von Diodenlasern

Die spektralen Eigenschaften kommerziell erhältlicher Diodenlaser verschiedener Typen und Hersteller wurden mit einem in der PTB aufgebauten Messplatz bestimmt [31, 32]. In diesem Beitrag wird lediglich über die spektralen Eigenschaften indexgeführter DH-Diodenlaser mit Emissionswellenlängen zwischen 630 nm und 850 nm in Zusammenhang mit deren Einsatz in Interferometern berichtet. Solche Diodenlaser kommen für interferometrische Anwendungen in der Längenmesstechnik am besten in Frage, u. a. wegen deren Nähe zum sichtbaren Spektralbereich (700 nm – 850 nm), was den Einsatz der gleichen Interferometeroptik wie beim in der Längenmesstechnik meist verwendete He-Ne-Laser begünstigt, sowie deren Verfügbarkeit am Markt und deren spektrale Anpassung an übliche Si-Photoempfänger.

3.1 Strahlleistung

Die emittierte Strahlleistung eines Diodenlasers nimmt vom Schwellstrom i_{th} an je nach Diodentyp mit einem differentiellen Wirkungsgrad von etwa 0,1mW/mA bis zu 1mW/mA linear zu [31]. Mit wachsender Temperatur der Diodenwärmesenke steigt der Schwellstrom i_{th} an, während die Strahlleistung abnimmt.

Bei Homodyninterferometern führt eine Leistungsänderung zu Interpolationsfehlern, weil die üblicherweise angewandte Phasenkorrektur konstante Leistung voraussetzt. Die Phasenkorrektur wird durch Anpassung einer Ellipse an die mit einem Quadraturdetektor gewonnenen Interferenzsignale erreicht [33]. Die Spur dieser Signale folgt aber bei Leistungsänderungen nicht mehr einer Ellipse sondern einer Spirale. Die dadurch hervorgerufenen Interpolationsfehler vergrößern die Messunsicherheit eines Diodenlaserinterferometers, vor allem wenn die Stabilisierung oder das Abstimmen der Frequenz des Diodenlasers über seinen Strom erfolgt. Leistungsschwankungen können ggf. mittels akusto-optischem Modulator kompensiert werden [32]. Heterodyninterferometer sind zwar aufwendiger zu realisieren als Homodyninterferometer, dafür aber nahezu unempfindlich gegenüber Leistungsschwankungen.

3.2 Strahlprofil

Das Strahlprofil einer Lichtquelle entscheidet über die Kollimierbarkeit des Strahls und damit auch über den maximalen Messbereich. Die beste Kollimation lässt sich mit einem gaußförmigen Strahlprofil erreichen. Bedingt durch Beugung an der Austrittsfläche eines Diodenlasers (Breite $< 5 \mu\text{m}$, Dicke $< 0,5 \mu\text{m}$) unterscheidet sich die Strahldivergenz parallel bzw. senkrecht zur pn-Übergangsebene der laseraktiven Zone: Divergenzwinkel $\theta_{\parallel} < 15^\circ$ und $\theta_{\perp} < 50^\circ$ [31]. Das entsprechend elliptische Strahlprofil ist für kleinere Messbereiche ($< 5 \text{m}$) ausreichend gut. Bei größeren Messbereichen kommt es wegen des Astigmatismus zu systematischen Abweichungen, weil der Strahl das Interferometer, je nach Position des Messreflektors, mit stark unterschiedlicher Divergenz durchläuft [32]. Mit zusätzlichen Optiken (Zylinderlinsen, anamorphe Prismen) lässt sich die Strahlform korrigieren. Zur Strahlformung können auch Raumfilter (mit Lochblenden $< 10 \mu\text{m}$) oder Monomodefasern verwendet werden.

3.3 Strahlpolarisation

Die aus dem Diodenlaser emittierte Strahlung ist nahezu linear polarisiert und wie der elektrische Feldvektor parallel zur Übergangsebene [19, 20, 30]. Der Polarisationsgrad nimmt mit steigendem Diodenstrom, $i > i_{\text{thr}}$, zu, da der unpolarisierte Anteil der Strahlung durch die spontane Emission oberhalb des Schwellstroms etwa konstant bleibt.

Die meisten Interferometer enthalten polarisationsempfindliche Optiken. Die Polarisation des Eingangsstrahls sollte deshalb stabil sein, was bei den meisten Diodenlasern nicht der Fall ist. Diesem Umstand lässt sich mittels Verwendung eines Polarisators gerecht werden.

3.4 Emissionsspektren

Die emittierten Spektren eines Diodenlasers hängen von den Diodenparametern Temperatur und Strom ab [2]. Dabei existieren lineare Wellenlängenbereiche, die durch hysteresebehaftete Modensprünge unterbrochen sind. Für $i > i_{\text{th}}$ konzentriert sich fast die gesamte emittierte Strahlungsleistung in einer Longitudinalmode. Die Wellenlänge dieser Hauptmode nimmt im modensprungfreien Bereich mit ansteigenden Diodenparametern, z. B. für GaAlAs-Diodenlaser um etwa $0,006 \text{ nm/mA}$ bzw. $0,06 \text{ nm/K}$, linear zu [31]. Dies ist hauptsächlich auf die Änderung des Brechzahl der aktiven Zone mit der Temperatur zurückzuführen. Der Modensprung beruht im Allgemeinen auf den unterschiedlichen Temperaturabhängigkeiten der Energielücke und der Brechzahl der aktiven Zone und kann das ein- bis fünffache des Modenabstandes betragen, z. B. für GaAlAs-Diodenlaser etwa $0,25 \text{ nm}$ bis

$1,25 \text{ nm}$. Der Hystereseffekt macht sich dadurch bemerkbar, dass der Diodenlaser beim Aufheizen der Wärmesenke kleinere Wellenlängen emittiert als beim Abkühlen. Dadurch hat ein Diodenlaser die Tendenz die Laserwellenlänge beizubehalten, welche durch ihren vorhergehenden Zustand bestimmt wurde.

Für interferometrische Anwendungen ist die Reinheit der Emissionswellenlänge eine wichtige spektrale Eigenschaft. Neben der Hauptmode emittieren Diodenlaser immer auch etwas Leistung in eine große Zahl von Nebenmoden. Diese Nebenmoden führen zu Schwankungen der emittierten Leistung und verursachen damit Fehler bei der Interpolation des Interferenzsignals (siehe Kap. 3.1). Da bei der Absolutinterferometrie, d. h. Messung von absoluten Abständen ohne Verschiebung des Messreflektors, besonders hohe Anforderungen an die Interpolation gestellt werden, sollten die Nebenmoden also möglichst gering sein, z. B. durch Verwendung eines Außenresonators [32]. Bei der Verschiebeinterferometrie, d. h. Messung von Abständen durch Verschiebung des Messreflektors, ist der Effekt der Nebenmoden für relative Längenmessunsicherheiten oberhalb von 10^{-7} vernachlässigbar.

3.5 Emissionswellenlänge

Die Emissionswellenlänge eines kommerziell erhältlichen Diodenlasers ist mit nur etwa 1% Unsicherheit bekannt, wenn keine Kalibrierung der Wellenlänge durchgeführt wurde. Um die Wellenlänge genauer zu bestimmen, muss für jeden Diodenlaser die Abhängigkeit der Wellenlänge von den Parametern Temperatur und Strom gemessen werden. Diese müssen während des Betriebes stabilisiert werden. Ein so parameterstabilisiert betriebener Diodenlaser hat eine Wellenlängenunsicherheit von etwa 10^{-6} . Infolge von Alterungsprozessen des Diodenlasers (siehe Kap. 4.1) können sich die Bereiche der Betriebsparameter, für die eine stabile Emission gewährleistet ist, verschieben [31]. Die Charakterisierung muss also regelmäßig wiederholt werden, falls man auf die genaue Kenntnis der Wellenlänge angewiesen ist, was sehr aufwendig ist. Für die Verschiebeinterferometrie muss daher der Diodenlaser an eine zeitstabile Referenz angeschlossen werden (siehe Kap. 4.2), um Wellenlängenunsicherheiten unterhalb von 10^{-5} zu erreichen. Im Falle der Absolutinterferometrie ist der Einfluss der Wellenlänge auf das Messergebnis äußerst gering, weil der Wert der Verschiebung der Wellenlänge durch das Abstimmen für jede Einzelmessung mit einer Referenz bestimmt wird und so die Wellenlänge für die Berechnung der Weglänge nicht benötigt wird [15, 32].

3.6 Kohärenzlänge

Im Vergleich zu Gaslasern haben Diodenlaser eine größere Emissionslinienbreite und dem entsprechend kleinere Kohärenzlänge bedingt durch deren relativ kleine Resonatorlänge und -güte [20, 30]. Die Kohärenzlänge wird aus Messungen der Sichtbarkeit der Interferenzstreifen (Kontrast) bestimmt. Sie nimmt mit wachsendem Diodenstrom zu, da der inkohärente Anteil der Laserstrahlung, erzeugt durch die spontane Emission, oberhalb der Laserschwelle ungefähr konstant bleibt. Einfach parameterstabilisierte Diodenlaser haben je nach Typ und Strahlungsleistung eine Kohärenzlänge bis zu etwa 20 m (siehe Kap. 3.7) [34]. Durch die Entwicklung von Verfahren der wellenlängenselektiven Strahlrückkopplung mittels Beugungsgitter konnte die Kohärenzlänge deutlich vergrößert werden [35, 36]. Ein Beispiel ist ein „External Cavity Diode Laser“ (ECDL) in der Littman- oder Littrow-Konfiguration [37, 38]. Diese können Kohärenzlängen bis etwa 150 m aufweisen.

Für den Einsatz im Interferometer begrenzt die Kohärenzlänge den Messbereich. Mit der Sichtbarkeit der Interferenzstreifen verringert sich das Signal zu Rausch Verhältnis des Interferenzsignals, so dass eine Interpolation der Interferenzstreifen immer schlechter gelingt. Mit der Verschlechterung der Sichtbarkeit bei zunehmendem Interferenzweg geht eine zunehmende Verschmierung der Interferenzphase einher. Auch wenn die Sichtbarkeit für eine Messung noch ausreichend gut ist, hat dieser Effekt bereits bei Interferenzwegen kleiner als die Kohärenzlänge erheblichen Einfluss auf die Messunsicherheit. Während bei der Verschiebeinterferometrie eine Phasenunsicherheit von z. B. $2\pi/100$ zur Unsicherheit der gemessenen Länge mit einigen Nanometern beiträgt, ist die Unsicherheit bei einem Absolutinterferometer um den Faktor $\lambda/\Delta\lambda \approx 1000$ bis 5000 größer [32].

3.7 Abstimmen der Wellenlänge

Die Wellenlänge eines Diodenlasers kann über Variation des Stroms abgestimmt werden. Der modensprungfreie Abstimmbereich kann bis zu ca. 0,2 nm [2, 31] betragen, für ein ECDL durch Drehung der Spiegelwinkel bis zu etwa 1 nm [37, 39].

Die Entwicklung von Absolutinterferometern, d. h. von Interferometern, mit denen sich Abstände ohne Verschiebung des Messreflektors messen lassen, ist erst mit der weiten und kontinuierlichen Abstimmbarkeit von Diodenlasern möglich geworden [40]. Neben der Forderung der weiten und schnellen Abstimmbarkeit sollte die Abstimmung darüber hinaus möglichst linear sein, denn obwohl die Abstimmung kontinuierlich mit einer Referenz gemessen wird, sind Phasenverzögerungen infolge des Tiefpass-

verhaltens der Elektronik und unterschiedlicher Signallaufzeiten vorhanden. Bei nichtlinearem Abstimmen führen diese Phasenverzögerungen zu Messwertabweichungen, während bei linearem Abstimmen die Einflüsse der Phasenverzögerungen auf das Messergebnis durch geeignete Mittelungsverfahren deutlich reduziert werden können. Darüber hinaus bietet ein mit linearer Wellenlängenabstimmung gewonnenes Interferenzsignal bessere Möglichkeiten der Rauschunterdrückung, weil es nur einen schmalen Bereich an Signalfrequenzen enthält [32].

3.8 Rücklichtempfindlichkeit

Kehrt das von einem Diodenlaser emittierte Licht in den Diodenlaser zurück (Rücklicht), so ändern sich im Allgemeinen die fundamentale Linienbreite sowie die emittierte Wellenlänge und die Anzahl der Longitudinalmoden aufgrund der Variation der Besetzungsinversion in der aktiven Zone und der Veränderung der Resonatorgüte. Die auftretenden Änderungen hängen von den Außenresonatorparametern (Reflexionsvermögen des Außenspiegels und dessen Abstand zur aktiven Zone) sowie vom Diodenlasertyp und dessen Parametern ab [41]. Insbesondere unkontrolliertes Rücklicht, wie es beispielsweise von den optischen Elementen eines Interferometers erzeugt wird, führt im Allgemeinen bei Diodenlasern zu einer Destabilisierung der Emissionsfrequenz, welche interferometrische Längenmessungen unsicher macht. Das unerwünschte Rücklicht kann durch den Einsatz optischer Isolatoren sowie optischer Elemente mit Antireflexionsschichten unterdrückt werden, wodurch sich allerdings die Gesamtkosten des Lasersystems vervielfachen. Diodenlaser mit externem Resonator, also mit wellenlängenselektivem und in der optischen Phase kontrolliertem Rücklicht, sind in der Regel unempfindlicher als Diodenlaser ohne externen Resonator. Ein optischer Isolator ist dennoch immer erforderlich. Falls ein Diodenlaser erheblich mehr Leistung emittiert, als für den Betrieb des Interferometers erforderlich, kann eine Dämpfung des Rücklichtes auch mittels einfacher Graufilter realisiert werden.

4 Frequenzstabilisierung von Diodenlasern

Für den Einsatz von Diodenlasern in der interferentiellen Längenmesstechnik ist eine Frequenzstabilisierung erforderlich. Hierfür existieren verschiedene Methoden, die unterschiedlichen Aufwand erfordern und dementsprechend unterschiedliche Frequenzstabilitäten aufweisen. Mit welcher Methode die Frequenz eines Diodenlasers stabilisiert wird, richtet sich je nach Anwendung nach der geforderten Messunsicherheit bzw. der zu messenden Länge.

4.1 Parameterverfahren

Die emittierte Frequenz eines Diodenlasers kann durch Konstanthaltung seiner Parameter passiv stabilisiert werden. Sind die Werte der Temperatur bzw. des Stroms um etwa 0,01 K bzw. 0,1 mA stabil, so können relative Frequenzstabilitäten $\Delta f/f \approx 10^{-6}$ erreicht werden [31].

Die Abhängigkeit der emittierten Frequenz von den Diodenparametern kann zur Frequenzstabilisierung eines Diodenlasers auch bei Variation seines Stroms ausgenutzt werden. Dabei wird die Frequenzverschiebung durch die Stromänderung durch eine gezielte Änderung der Temperatur kompensiert. Bei einer Stromänderung um ca. 20 mA liegt die gesamte Frequenzverschiebung um ca. 0,4 GHz, was einer relativen Frequenzstabilität $\Delta f/f \approx 10^{-6}$ entspricht [42].

Die spektrale Alterung von Diodenlasern ist im Allgemeinen auf Änderungen der optischen Eigenschaften des Resonators, des thermischen Widerstandes zwischen der aktiven Zone und der Diodenwärmesenke sowie des elektrischen Serienwiderstandes zurückzuführen. Bedingt durch diese können Verschiebungen der emittierten Wellenlänge eines Diodenlasers trotz Konstanthaltung seiner Parameter um $> 10^{-5}$ auftreten [43]. Somit ist es notwendig, parameterstabilisierte Diodenlaser für relative Frequenzstabilitäten unterhalb von 10^{-5} regelmäßig zu recalibrieren.

4.2 Referenzverfahren

Stabilisiert man die emittierte Frequenz eines Diodenlasers durch Anschluss an eine Referenz, so wird die spektrale Alterung eines Diodenlasers eliminiert und somit eine höhere Frequenzstabilität erreicht. Bei den Referenzverfahren wird im Allgemeinen der Diodenstrom moduliert, um ein Nutzsignal für die Frequenzstabilisierung zu gewinnen. Dieses Signal wird mittels Lock-in-Technik zur Nachführung der Frequenz des zu stabilisierenden Diodenlasers an die der Referenz benutzt. Die Frequenz von Diodenlasern kann durch Ankoppeln an einen Fabry-Perot-Etalon stabilisiert werden [44]. Die erreichten relativen Kurzzeitstabilitäten liegen unterhalb 10^{-8} . Langzeitstabilitäten werden durch die Alterung der Etalonspiegel (Änderung des Reflexionsvermögens) und dessen Halterung (z. B. Zerodur) bestimmt.

Für die Frequenzstabilisierung von Diodenlasern durch einen direkten Anschluss an eine atomare bzw. molekulare Absorptionslinie existieren im Emissionsbereich 630 nm bis 850 zahlreiche gut bekannte Absorptionslinien von Cs, Rb, Kr, Xe, Na, Ca, Ar, H_2O , J_2 , u. a. [45–47]. So kann ein Diodenlaser auf einen Hyperfeinstrukturübergang D_2 des ^{87}Rb bei 780,24 nm mit Hilfe des Zeeman- sowie des Faraday-Effekts [48, 49] mit einer relativen Frequenzstabilität von etwa

10^{-7} modulationsfrei stabilisiert werden. Eine absolute Frequenzstabilität von etwa 10^{-8} kann für einen Diodenlaser erreicht werden, der auf eine Doppler-verbreiterte Rb- D_2 -Absorptionslinie stabilisiert ist [50]. Ein in der Littrow-Konfiguration aufgebauter ECDL kann mittels Doppler-freier Polarisationspektroskopie auf eine gesättigte Rb- D_2 -Absorptionslinie mit einer relativen Frequenzstabilität $< 10^{-9}$ modulationsfrei stabilisiert werden, bei einer Frequenzmodulation der Laseremission mit dem 3f-Verfahren $< 3 \cdot 10^{-10}$ [51]. Ein in Littman-Konfiguration aufgebauter ECDL kann mittels Frequenzmodulationspektroskopie auf eine gesättigte $^{127}\text{J}_2$ -Absorptionslinie (633 nm) mit einer relativen Frequenzstabilität $< 10^{-12}$ modulationsfrei stabilisiert werden [7].

5 Diodenlaserminterferometer für die Längenmesstechnik

5.1 Längenmessungen bei Kompensation der Luftbrechzahl

Wird die Wellenlänge einer Lichtquelle in Luft stabilisiert, z. B. durch Anschluss an eine stabile Maßverkörperung als Referenz, so wird der Einfluss der Brechzahl der Luft auf die Längenmessung großenteils eliminiert und somit der Aufwand zur Messung der Luftparameter (Temperatur, Druck, Feuchte u. a.) wesentlich reduziert. Durch seine einfache und schnelle Abstimbarkeit über den Diodenstrom ist der Diodenlaser eine gut geeignete Lichtquelle, um Änderungen der Brechzahl der Luft quasi-instantan zu kompensieren.

Die Luftwellenlänge eines Diodenlasers mit einer optomechanischen Messanordnung bestehend aus einem Diodenlaser-Verschiebeinterferometer und einem damit gekoppelten Messtaster als „Längennormal“ [52] konnte mittels digitaler Regelung so stabilisiert werden, dass die gemessenen Verschiebelängen beider Systeme gleich groß sind. Untersuchungsergebnisse zeigten eine relative Messunsicherheit der Luftwellenlänge von ca. $8 \cdot 10^{-7}$ bei simulierten Schwankungen der Brechzahl der Luft um etwa 10^{-5} . Dieses vielversprechende Ergebnis könnte für viele Anwendungen in der industriellen Längenmesstechnik interessant werden, da auf den Einsatz von Luftrefraktometern bzw. -sensoren verzichtet werden kann. Darüber hinaus kann solch eine einfache Messanordnung zur regelmäßigen Recalibrierung der Arbeitsbereiche und der Emissionswellenlänge kommerzieller Diodenlaser verwendet werden, was aufwendige Zusatzkalibrierungen, z. B. mittels Monochromator, Spektrumanalysator oder „Lambda Meter“, überflüssig macht [53].

Zur Längenmessung in zwei Achsen an Koordinatenmessmaschinen unter Labor- und Werkstattbedingungen wurde ein Diodenlaser-

interferometer aufgebaut. Dabei wurde die Luftwellenlänge des Diodenlasers an ein mit Luft gefülltes Fabry-Perot-Etalon als Referenz aus Zerodur stabilisiert [54]. Die relative Messunsicherheit der Luftwellenlänge lag unterhalb von 10^{-7} , die der Länge einer mit Löchern versehenen Zerodurplatte, in der X- und der Y-Achse sowie in der XY-Ebene, oberhalb von 10^{-6} .

Zur interferentiellen Längenmessung an ein kommerziell erhältliches Gerät zur Kalibrierung einfacher Längenmessmittel, wie z. B. Mikrometerschrauben, Messschieber u. a., wurde ein mit Luft gefülltes Fabry-Perot-Etalon mit Abstandshaltern aus Stahl zur Stabilisierung der Wellenlänge des Diodenlasers verwendet, um die Messunsicherheitsbeiträge durch die thermische Ausdehnung des zu kalibrierenden Prüflings (meistens aus Stahl) und die der Berechnung der Luft zu kompensieren [55]. Damit konnte eine relative Messunsicherheit der Luftwellenlänge unterhalb von 10^{-7} und für Verschiebelängen diverser Messmittel bis zu 300 mm eine relative Längenmessunsicherheit unterhalb von 10^{-5} erreicht werden.

5.2 Oberflächenrauheit

Konventionelle Laserinterferometer weisen zwar Auflösungen im Nanometerbereich auf, liefern jedoch keine eindeutigen Ergebnisse, wenn Wegänderungen zwischen zwei Messpunkten größer sind als die halbe Lichtwellenlänge. Ein Ausweg aus dieser Problematik ist die Hinzunahme eines oder mehrerer Laser mit verschiedenen Wellenlängen. Die Differenz der Interferometerphasen zweier Wellenlängen wirkt wie die Phase einer sog. „synthetischen“ Welle, die länger ist als die verwendeten optischen Wellenlängen. Mittels Mehrwellenlängeninterferometrie kann der Eindeutigkeitsbereich um die Hälfte der resultierenden synthetischen Wellenlänge $\Lambda_{ij} = \lambda_i \lambda_j / (|\lambda_j - \lambda_i|)$ erweitert werden. Unter Verwendung mehrerer Wellenlängen kann der Eindeutigkeitsbereich theoretisch nahezu beliebig gesteigert werden, in der Praxis steigt aber der Aufwand dabei unverhältnismäßig.

Zur berührungslosen Messung der Topographie von Oberflächen wurde ein punktweise abtastendes Diodenlaserinterferometer mit drei Wellenlängen, 780 nm, 823 nm und 825 nm, aufgebaut [56], die parameterstabilisiert sind. Die drei Laserstrahlen werden in eine gemeinsame Monomodefaser eingekoppelt und durchlaufen nach der Auskopplung im Interferometer den gleichen Weg. Die zu messende Oberfläche, die in x- und y-Richtung mechanisch verstellbar ist, stellt den Messspiegel des Interferometers dar. Die durch Modulation der Diodenströme mit unterschiedlichen Frequenzen, um ca. 1 MHz, hervorgerufene Wellenlängenmodulation führt zu entsprechenden Modulationen der Inter-

ferometersignale. Diese werden mittels Lock-in-Technik getrennt und gleichzeitig von nur einem Empfänger detektiert. Ein so entwickeltes Diodenlaserprofilometer weist eine Auflösung von ca. 4 nm und eine Messunsicherheit < 20 nm für einen Messbereich von ca. 145 μm auf. Die Leistungsfähigkeit des Diodenlaserprofilometers konnte durch Messungen von Rillentiefen [56] und Stufenhöhen [57] auf glatten Oberflächen unter Beweis gestellt werden. Das Verfahren stößt bei rauen Oberflächen, bei denen der Interferenzkontrast abnimmt, an seine Grenzen. Vergleichsmessungen an sog. „superfeinen Rauheitsnormalen“ zeigten dennoch, dass es innerhalb gewisser Grenzen der Rauheit möglich ist, die technischen Rauheitsparameter in guter Übereinstimmung mit den Kalibrierdaten der Rauheitsnormale zu ermitteln [56].

5.3 Rundheit

Der entwickelte berührungslose Diodenlaserprofilometer von Kap. 5.2 wurde an ein kommerzielles taktiles Formmessgerät montiert. Damit konnten Rundheitsmessungen nach den beiden Messverfahren durchgeführt und verglichen werden. Derartige Vergleichsmessungen zeigen [58], dass mit dem Diodenlaserinterferometer Rundheitsmessungen an verschiedenen Prüflingen (Wellennormale) aus Stahl, Aluminium, Nickel und Glas mit Rundheitsabweichungen von weniger als 1 μm bis 22 μm und 2,5 mm bis 80 mm Durchmesser möglich sind. Die Unsicherheit der Messungen hängt allerdings wesentlich von den Reflexionseigenschaften des Prüflings ab. Bei ungünstigen Reflexionseigenschaften betragen die Abweichungen zu herkömmlichen mit mechanischen Tastern durchgeführten Messungen bis zu einigen μm . Bei guten Reflexionseigenschaften ist die Abweichung typischerweise kleiner 1 μm . Dabei war die Messunsicherheit des Interferometers durch Vibrationen des luftgelagerten Drehtisches des verwendeten Formmessgeräts (< 100 nm) begrenzt.

5.4 Form dünner Zylinder

Zur Formmessung dünner Zylinder ($\varnothing < 2,5$ mm) mittels taktile Verfahren können Deformationen des Prüflings durch die Anstastkräfte auftreten, was die Messunsicherheit erheblich beeinflusst. Ein neuartiges Verfahren, welches auf Basis eines Mehrwellenlängen-Diodenlaserinterferometers (651 nm, 671 nm und 827 nm), entwickelt wurde [59], ermöglicht berührungslose Form- und Durchmesserbestimmungen dünner zylindrischer Objekte. Darüber hinaus kann auf die sehr aufwendige Drehführung kommerzieller Rundheitsmessgeräte verzichtet werden. Kernstück des Verfahrens ist ein Innenkegelspiegel, der die Wellenfronten des einfallenden Lichtes zylindersymmetrisch

auf den Prüfling lenkt, der als Messreflektor des Interferometers dient. Die Formmessung erfolgt mittels räumlicher Phasenschiebeinterferometrie.

Die verwendeten Diodenlaser werden automatisch auf dopplerverbreiterte Absorptionslinien von Joddampf stabilisiert, um die Nachteile des Diodenlasers bezüglich Stabilität und Kenntnis seiner Wellenlänge zu kompensieren.

Die Messergebnisse an verschiedenen Proben zeigen, dass mit diesem Verfahren die Oberflächenmorphologie geeigneter zylindrischer Objekte mit einer Auflösung von wenigen Nanometern gemessen werden kann. Die Verwendung von drei verschiedenen Lasern zur Erzeugung synthetischer Wellenlängen ermöglicht die Erweiterung des Messbereiches von ca. 328 nm bis hin zu 14 μm . Somit können Formabweichungen vom Nanometer- bis hin zum Mikrometerbereich gemessen werden und dies für relativ gut reflektierende Prüflinge [60].

5.5 Absolute Distanzen

Führungsfreie Messung absoluter Distanzen im Bereich bis zu mehreren zehn Metern ist heutzutage für praktische Anwendungen z. B. bei der präzisen Positionierung von großen Bauteilen im Flugzeug- sowie im Windkraftanlagenbau notwendig. Hierfür existieren diverse Verfahren wie z. B. Laser-Radar, Triangulation, Autofokus und Laufzeitmessung (EDM, Tachymeter, Laser-Tracker), die je nach Aufwand Messunsicherheiten oberhalb von 10^{-6} aufweisen. Demgegenüber wurden seit den 1980er Jahren verschiedene Verfahren der Absolutinterferometrie entwickelt. Absolutinterferometer sind jedoch bis heute praktisch nicht eingesetzt worden. Höchstwahrscheinlich sind die bisher entwickelten Absolutinterferometer zu aufwendig und komplex für den kommerziellen Einsatz [61–65].

Der erste Ansatz in der Absolutinterferometrie ist das so genannte Mehrwellenlängenverfahren. Dabei werden die Interferometerphasen verschiedener Laserwellenlängen nacheinander gemessen. Ein entscheidender Nachteil dieses Verfahrens ist, dass es sehr empfindlich auf Distanzänderungen während der Messung reagiert, da die bei den verschiedenen Wellenlängen nacheinander gemessenen Interferometerphasen zu verschiedenen Distanzen gehören. Messunsicherheiten oberhalb von 10^{-7} konnten für Distanzen < 1 m erreicht werden [61, 62].

Ein weiterer Ansatz in der Absolutinterferometrie ist die Verwendung eines Lasers, der in seiner Emissionsfrequenz kontinuierlich abgestimmt werden kann. Durch das Abstimmen entsteht quasi eine variable synthetische Wellenlänge, die bei unendlich startet und bei der maximalen Frequenzänderung den kürzesten Wert einnimmt. Während des Abstimmens wird die Phasenänderung des Interferometersignals

gemessen. Hier kann die Distanz ohne Kenntnis der Wellenlänge berechnet werden, solange die Frequenzänderung bekannt ist. Die Nachteile des Verfahrens sind der notwendige weite Abstimmbereich des Lasers [63], die relativ lange Messzeit [64] und der aufwendige und komplexe Aufbau [65]. Dabei wurden Messunsicherheiten oberhalb von 10^{-6} für Distanzen zwischen 4 und 40 m erreicht.

Ein neuartiger Ansatz in der Absolutinterferometrie basiert auf zwei Diodenlasern als Lichtquellen und ermöglicht einen kostengünstigen und relativ kompakten Aufbau. Das Verfahren beruht auf einer Kombination der oben beschriebenen Verfahren: Der Mehrwellenlängeninterferometrie mit konstanter und variabler synthetischer Wellenlänge [66, 67]. Dabei kompensieren sich die Schwächen der Einzelverfahren. Außerdem können die gleichen optischen Komponenten in beiden Verfahren verwendet werden, was den Aufwand für den optischen Aufbau deutlich reduziert. Das Verfahren arbeitet in zwei Schritten: Zunächst wird ein Laser in seiner Frequenz periodisch abgestimmt, so dass die Länge aus der Phasenänderung des Interferometers grob bestimmt werden kann. Der abstimmbare Laser emittiert bei einer Frequenz nahe der Kalium-D1-Absorptionslinie (770,1 nm), auf die er auch stabilisiert werden kann. Der zweite Laser wird während der gesamten Messung auf die Kalium-D2-Linie (766,7 nm) stabilisiert. Während des ersten Messschrittes dient dieser Laser dazu, Reflektorbewegungen zu erfassen. Diese gehen, verstärkt um das Verhältnis der Laserfrequenz zum Abstimmbereich, in das Messergebnis ein und müssen daher entsprechend korrigiert werden. Nach dem automatischen Umschalten des ersten Lasers von der modulierten auf eine stabilisierte Betriebsart stellen beide Laser eine synthetische Wellenlänge von ca. 173 μm zur Verfügung. Mit dieser synthetischen Wellenlänge wird das Ergebnis des ersten Messschrittes weiter interpoliert, um die angestrebte Messunsicherheit mit der optischen Wellenlänge zu erreichen. Die Ergebnisse zeigen [67], dass es durch die Kombination der zwei Einzelverfahren möglich ist, absolute Distanzen bis zu 20 m mit einer Messunsicherheit unterhalb von $6 \cdot 10^{-7}$ zu messen.

6 Schlussbemerkung

Diodenlaser, die aufgrund ihrer spektralen Eigenschaften den Ersatz des in der zählenden Verschiebeinterferometrie zur Längenmessung meist verwendeten He-Ne-Lasers erlauben, konnten mit vergleichbarer Frequenzstabilität ($< 10^{-9}$) zwar entwickelt werden, haben sich kommerziell großenteils aber nicht durchgesetzt, weil die zahlreichen Vorteile des Diodenlasers den Mehraufwand bei der Frequenzstabilisierung und

der Vergrößerung der Kohärenzlänge sowie die Verfügbarkeit geeigneter Diodenlaser am Markt nicht aufwiegt. Dennoch stellen luftwellenlängenstabilisierte Diodenlaser bedingt durch ihre einfache Abstimbarkeit und schnelle Modulierbarkeit zur Kompensation der Brechzahl und der thermischen Ausdehnung in Verschiebeinterferometern mit Messunsicherheiten unterhalb von 10^{-7} eine attraktive Alternative dar.

In der nicht zählenden Absolut- bzw. Mehrwellenlängeninterferometrie zur Längenmessung, z. B. absoluter Distanzen, der Oberflächenrauheit, Rundheit sowie Form und Durchmesser zylindrischer Objekte, sind Diodenlaser aufgrund ihrer Abstimbarkeit, ihres breiten spektralen Emissionsbereichs und ihrer Emissionsleistung nicht zu ersetzen.

Danksagung

Der Autor bedankt sich bei Herrn Dr. Peter Wiese, Dipl.-Phys. Günther Prellinger, Dipl.-Ing. Nizar Bader, Dipl.-Phys. Volker Burgarth, Dr. Michael Wolf, Dr. Karl Meiners-Hagen, Dr. Lutz Hartmann, Dipl.-Phys. Alexander Höink und Dr. Florian Pollinger für fachlich nützliche Diskussionen sowie Herrn Günter Leppelt für den Aufbau elektronischer Geräte.

Referenzen

- [1] *Abou-Zeid, A.*: Diode lasers for interferometry. *J. of Prec. Engineering* **11** (1988), (3), p. 139
- [2] *Abou-Zeid, A.*: Emissionswellenlänge kommerzieller Laserdioden als Funktion ihrer Betriebsparameter. *PTB-Mitteilungen* **94** (1984), S. 163
- [3] *Maki, J. J.; Cambell, N. S.; Grande, C. M.; Knorpp, R. P.; McIntyre, D. H.*: Stabilized diode-laser system with grating feedback and frequency-offset locking. *Opt. Comm.* **102** (1993), p. 251
- [4] *Tsuchida, H.; Mitsuhashi, Y.*: *Appl. Opt.* **27** (1988), (2), p. 302
- [5] *Camparo, J. C.*: *Contemp. Phys.* **26** (1985), p. 443
- [6] *Abou-Zeid, A.; Bader, N.; Prellinger, G.*: Rb-stabilized diode Laser for dimensional metrology, *Ultra Precision in Manufacturing Engineering*. Franz Rhiem Verlag, Duisburg (1994), p. 283
- [7] *Zarka, A.; Abou-Zeid, A.; et. al.*: Int. Comparison of eight semiconductor lasers stabilized on $^{127}\text{J}_2$ at 633 nm. *Metrologia* **37** (2000), (4), p. 329
- [8] *Abou-Zeid, A.*: Diode lasers for industrial length measurements, *Progress in Precision Engineering*. Springer Verlag, Berlin (1991), p. 50
- [9] *Abou-Zeid, A.; Wiese, P.*: Diodenlaser-Refraktometer für die interferometrische Längenmesstechnik. *Technisches Messen* **65** (1998), S. 91
- [10] *Abou-Zeid, A.; Wiese, P.*: Interferometer with a wavelength-tuned diode laser for surface profilometry. *Measurement Science Technology* **9** (1998), p. 1105
- [11] *Abou-Zeid, A.; Steinfeldt, H.; Zervos, P.*: Ein Laser-Doppler-Längenmessgerät für bewegte Materialien. *PTB-Mitteilungen* **104**, (1994), S. 74
- [12] *Abou-Zeid, A.; Bechstein, H.; Enghave, C.*: A multi channel diode laser interferometer for displacement measurements on CMMs. *Annals of CIRP* **451** (1996), p. 489
- [13] *Schödel, R.; Abou-Zeid, A.*: "PTB's precision interferometer for high accuracy characterization of thermal expansion properties of low expansion materials": Nanoscale calibration standards and methods: dimensional and related measurements in the micro- and nanometer range, *Wilkening, G. and Koenders, L. (eds.)* (2005), p. 500
- [14] *Franke, P.; Schödel, R.*: Interferometrische Kalibrierung von Parallelendmaßen. *PTB-Mitteilungen* **120** (2010), S. 16
- [15] *Pollinger, F.; Meiners-Hagen, K.; Wedde, M.; Abou-Zeid, A.*: Diodelaser-based high-precision absolute distance interferometer of 20 m range. *Appl. Opt.* **48** (2009), p. 6188
- [16] *Höink, A.; Meiners-Hagen, K.; Jusko, O.; Abou-Zeid, A.*: Application of diode lasers in interferometrical length measurements. *Key Engineering Materials* **437** (2010), p. 423
- [17] *Imkenberg, F.; Nicolaus, A., Abou-Zeid, A.*: Tunable 633 nm diode lasers and application for phase stepping interferometry, *Proc. of the 1st Inter. euspen Conference, Pat McKewon a. o. (ed.)*, Bremen (1999), 2, pp. 769
- [18] *Telle, H. R.*: Stabilization and modulation schemes of laser diodes for applied spectroscopy. *Spectrochimica Acta Review* **15** (1993), (5), p. 301
- [19] *Casey, H. C. Jr.; Panish, M. B.*: *Heterostructure Lasers*, Academic Press, London (1978)
- [20] *Kressel, H.; Butler, I. K.*: *Semiconductor Lasers and Heterojunction LEDs*, Academic Press, London (1977)
- [21] *Nash, F. R.*: *J. Appl. Phys.* **44** (1973), p. 4696
- [22] *Lang, R.*: *Jap. J. Appl. Phys.* **16** (1977), p. 205
- [23] *Nakamura, M.; Tsuji, S.*: *IEEE J. Quant. Electron.* **QE-17** (1981), p. 994
- [24] *Bell, T. E.*: *IEEE Spectrum* **20** (1983), p. 38
- [25] *Holonyak, N.; Kolbas, R. M.; Dupuis, R. D.; Dapkus, P. D.*: *IEEE J. Quant. Electron.* **QE-16** (1980), p. 170
- [26] *Tsang, W. T.; Olsson, N. A.; Logan, R. A.*: *Appl. Phys. Lett.* **43** (1983), p. 339
- [27] *Streifer, W.; Hardy, A.; Burnham, R. D.; Thornton, R. L.; Scifres, D. R.*: *Electron. Lett.* **21** (1985), p. 505

- [28] *Boiko, D. L.; Le Cren, E.; Stephan G. M.; Besnard, P.*: Spectrum of vertical-cavity surface-emitting lasers: linewidth properties and non-degeneracy of relaxation oscillation frequencies. *Journal of Optics B: Quantum and Semiclassical Optics* 3 (2001), p. 166
- [29] *Nakamura, S.; Fasol, Gerhard*: The blue Laser diode, Springer-Verlag, Berlin (1997)
- [30] *Ohtsu, M.*: Highly coherent semiconductor lasers. Artech House, Inc., Boston (1992)
- [31] *Abou-Zeid, A.*: Diodenlaser in der industriellen Messtechnik. *Techn. Mitt.* 85 (1992), S. 34
- [32] *Burgarth, V.; Abou-Zeid, A.*: Untersuchung von Halbleiterlasern für die Längenmesstechnik. Abschlußbericht des Industrieprojekts PTB/52010 (2004), 215.
- [33] *K. P. Birch.*: Optical fringe subdivision with nanometric accuracy. *Precision Engineering* 125 (1990), p. 19
- [34] *Abou-Zeid, A.; Wiese, P.*: Kohärenzlängen von Diodenlasern: F&M Feinwerktechnik Mikrotechnik Messtechnik, 103 (1995), (6), S. 300
- [35] *Wieman, E.; Hollberg, L.*: Using diode lasers for atomic physics. *Review of scientific Instruments*, 62 (1991), (1), p. 1
- [36] *Liu, K.; Littman, M. G.*: Novel geometry for single-mode scanning of tunable lasers. *Optics Letters* 6 (1981), (3), p. 117
- [37] *Abou-Zeid, A.; Imkenberg, F.*: Abstimmbare und frequenzstabilisierte 633 nm-Diodenlaser für die interferometrische Längenmesstechnik. *Technisches Messen*. 65 (1998) S. 147
- [38] *Burgarth, V.; Zhang, C.; Abou-Zeid, A.*: Absolutmessendes Diodenlaserinterferometer. *Technisches Messen* 70 (2003), S. 53
- [39] *Buus, J.; Amann, M.-C.; Blumenthal, D. J.*: Tunable laser diodes and related optical sources. John Wiley & Sons, Inc, Hoboken (2004)
- [40] *Kikuta, H., K. Iwata, R. Nagata*: Distance measurement by the wavelength shift of laser diode light. *Applied Optics* 25 (1986), (17), p. 2976
- [41] *Agrawal, G. P.*: *IEEE J. of Quant. Electr.* QE-20 (1984), (5), p. 468
- [42] *Abou-Zeid, A.*: Verfahren zur Frequenzstabilisierung eines Diodenlasers. Deutsches Patent, Nr. 3706635 (1988)
- [43] *Abou-Zeid, A.*: Spektrale Alterung kommerzieller GaAlAs-Diodenlaser. *Laser-Optoelektronik in der Technik*, Springer Verlag München (1989), S. 141
- [44] *Tsuchida, H.; Mitsuhashi, Y.*: *Appl. Opt.* 27 (1988), (2), p. 302
- [45] *Camparo, J. C.*: *Contemp. Phys.* 26 (1985), p. 443
- [46] *Peovtschin, V.; Ezekiel, S.*: *Opt. Lett.* 12 (1987), (3), p. 172
- [47] *Telle, H. R.*: *Verh. Dtsch. Phys. Ges.* 23 (1988), (7), Q 12.7
- [48] *Abou-Zeid, A.; Vogel, A.*: Modulation-free frequency stabilization of a diode laser: Zeeman effect. *Laser-Optoelektronik in der Technik*, Springer Verlag, München (1995) S. 26
- [49] *Abou-Zeid, A.; Vogel, A.*: Modulation-free frequency stabilization of a diode laser: Faraday Effect, *Technical Digest: Novel Lasers. Devices and Applications*, München (1997), p. 21
- [50] *Abou-Zeid, A., Bader, N., Prellinger, G.*: Absolute Frequenzstabilität eines auf Rb stabilisierten Diodenlasers, *Laser-Optoelektronik in der Technik*, Springer Verlag, München, (1993), S. 240
- [51] *Bodermann, B.; Burgarth, V.; Abou-Zeid, A.*: Modulation-free stabilised diode laser for interferometry using Doppler-reduced Rb transitions. *Proc. of the 2nd Int. Conf. euspen*, Turin, Italy, A. Balsamo et. al. (eds.), Vol. 1 (2001), p. 294
- [52] *Abou-Zeid, A.; Erdtmann, B.; Kunzmann, H.; Prellinger, G.*: Wellenlängenstabilisierung eines Diodenlasers durch Vergleich mit einer Maßverkörperung, *PTB-Mitteilungen* 101 (1991), S. 333
- [53] *Abou-Zeid, A.; Bader, N.; Prellinger, G.*: A transportable lambda meter for the calibration of the emitted wavelength of diode lasers. *PTB-Mitteilungen* 105 (1995), p. 90
- [54] *Abou-Zeid, A.; Bechstein, H.; Enghave, C.*: Real-time position and form measurements on CMMs by means of multi-function laser interferometry based on laser diodes, *BCR Information Report Applied Metrology, EUR 15930EN*, Brüssel (1995), 103 p.
- [55] *Burgarth, V.; Abou-Zeid, A.*: Wavelength stabilised diode laser interferometer for calibration of length measuring instruments. *Proc. of the 2nd Int. Conf. euspen*, Turin, Italy, A. Balsamo et. al. (eds.), Vol. 1 (2001), p. 338
- [56] *Meiners-Hagen, K.; Burgarth, V.; Abou-Zeid, A.*: Profilometry with a multi-wavelength diode laser interferometer, *Measurement Science and Technology* 15 (2004), p. 741
- [57] *Meiners-Hagen, K.; Wolf, M., Abou-Zeid, A.*: Measuring micrometer steps with nanometer resolution. *Proc. of the 2nd Int. Conf. euspen*, Turin, Italy, A. Balsamo et. al. (eds.), Vol. 1 (2001), p. 226
- [58] *Burgarth, V.; Meiners-Hagen, K.; Abou-Zeid, A.*: Rundheitsmessungen mit einem Diodenlaserinterferometer. *Technisches Messen* 71, (2004), S. 335
- [59] *Höink, A.; Meiners-Hagen, K.; Jusko, O.; Abou-Zeid, A.*: Form measurement of thin cylinders using three-wavelength interfero-

- metry. International Symposium on Optomechatronic Technologies (ISOT), Istanbul (2009), p. 110
- [60] Höink, A.; Meiners-Hagen, K.; Abou-Zeid, A.: Formmessungen dünner Zylinder mittels Mehrwellenlängen-Diodenlaserinterferometers. PTB-Mitteilungen **120** (2010), (1), S. 31
- [61] Bourdet, G. L.; Orszag, A. G.: Absolute distance measurements by CO₂ laser multiwave-length interferometry. Appl. Optics, **18** (1979), p. 225
- [62] Lay, O. P.; Dubovitsky, S.; Peters, R. D.; Burger, J. P.; Ahn, S.-W.; Steiner, W. H.; Fetterman, H. R.; Chang, Y.: MSTAR: a submicrometer absolute metrology system. Optics Letters **28** (2003), p. 890
- [63] Thiel, J.; Pfeifer, T.; Hartmann, M.: Interferometric measurement of absolute distances of up to 40 m. Measurement **16** (1995), p. 1
- [64] Bechstein, K. H.; Fuchs W.: Absolute interferometric distance measurement applying a variable synthetic wavelength. Journal of Optics A **29** (1998), p. 179
- [65] Kinder, T.; Salewski, K. D.: Absolute distance interferometer with grating-stabilized tunable diode laser at 633 nm. Journal of Optics A **4** (2002), p. 364
- [66] Hartmann, L.; Meiners-Hagen, K.; Abou-Zeid, A.: An absolute distance interferometer with two external cavity diode lasers. Measurement Science and Technology **19** (2008), p. 741
- [67] Pollinger, F.; Meiners-Hagen, K.; Abou-Zeid, A.: Absolutlängen mittels Mehrwellenlängen-Diodenlaserinterferometrie. PTB-Mitteilungen **120** (2010), S. 105

Absolutlängen mittels Mehrwellenlängen-Diodenlaserinterferometrie

Florian Pollinger¹, Karl Meiners-Hagen², Ahmed Abou-Zeid³

1 Einleitung

Die Messung von Längen in der Größenordnung von einigen bis hin zu einigen zehn Metern ist ein scheinbar alltägliches Problem. Verkörperte Längenmaße, also Maßbänder und -stäbe sind im Alltag routinemäßig genutzte Messmittel. Die Genauigkeit solcher Längenmessmittel ist aber offensichtlich beschränkt. Die exaktesten aus der Genauigkeitsklasse I erreichen eine Genauigkeit von $\pm(0,1 + 0,1 L/m)$ mm. Moderne Produktionsprozesse stellen ganz andere Anforderungen: Etwa im Flugzeugbau oder bei der Produktion moderner Windräder müssen Dimensionen von bis zu 100 m mit einer relativen Genauigkeit besser als $1 \cdot 10^{-6}$ vermessen werden. Solche Distanzen werden üblicherweise mit optischen Methoden ermittelt. Klassisch werden dabei zwei verschiedene Verfahren verwendet: Zum einen Laufzeit-basierte Messmethoden, zum anderen zählende Interferometrie. Im ersten Fall wird aus der Laufzeit eines Lichtpulses oder der Phase einer Amplitudenmodulation des Lichts der Abstand berechnet. Die Genauigkeit ist vor allem durch die Zeit- bzw. die Phasenauflösung limitiert, was bei den besten, auf Modulation basierenden Geräten zu einem konstanten Fehler in der Größenordnung 0,1 mm führt. Eine relative Unsicherheit unter $1 \cdot 10^{-5}$ auf den oben genannten Distanzen ist mit dieser Technik also nicht zu erreichen. Wesentlich präzisere Messungen sind mit konventioneller Interferometrie möglich, für die unter gut kontrollierten äußeren Bedingungen auf längeren Strecken routinemäßig Messunsicherheiten unter $1 \cdot 10^{-7}$ erreicht werden. Die zu messende Strecke wird dabei mit einem Reflektor abgefahren und die Änderung des Interferenzsignals ausgelesen. Mit dieser Methode sind unter gut kontrollierten Bedingungen Distanzmessungen mit Nanometerauflösungen möglich. Allerdings erfordert eine solche Messung eine kontinuierliche mechanische Führung. Eine Unterbrechung derselben führt zum sofortigen Verlust der Information über die absolute Länge.

Da eine solche Führung offensichtlich für den flexiblen Einsatz in Werkhallen wenig ge-

eignet und insbesondere für längere Distanzen mit einem hohen Aufwand verbunden ist, sind in den letzten drei Jahrzehnten diverse hochspezialisierte Methoden zur führungsreifen interferometrischen Absolutmessung entwickelt worden (vgl. z. B. Referenzen [1–6]). Obwohl dabei auf längeren Distanzen bis zu 25 m relative Unsicherheiten von bis zu $1 \cdot 10^{-6}$ erreicht worden sind, haben sich diese Methoden nicht in der Anwendung durchsetzen können. Ein wichtiger Grund dafür ist nicht zuletzt deren Komplexität, die den notwendigen Optimierungen und Fehlerkorrekturen geschuldet ist. Anstatt nun die einzelnen Methoden in ihrer Präzision auf die Spitze zu treiben und somit auch den Aufwand zu maximieren, ist man seit kurzem dazu übergegangen, „Hybridlösungen“ zu entwickeln, die aus Kombinationen einzelner Methoden bestehen. Individuelle Nachteile der Einzelmethode können so im Idealfall gegenseitig kompensiert werden. In der PTB ist ein solches Hybridverfahren erfolgreich realisiert und demonstriert worden [7–9]. Es basiert auf zwei Diodenlasern als Lichtquellen, was einen kostengünstigen und relativ kompakten Aufbau ermöglicht. Zwei Messmethoden, die Interferometrie mit variabler und fester synthetischer Wellenlänge, werden in dem Verfahren kombiniert. Der komplementäre Charakter der Einzelmessungen in Bezug auf Eindeutigkeit und Genauigkeit erlaubt es, in der Gesamtmessung bis 20 m absoluter Länge eine Messunsicherheit von deutlich unter $1 \cdot 10^{-6}$ zu erreichen. Im Folgenden werden die zwei Messmethoden genauer vorgestellt und demonstriert, wie die Kombination der Ergebnisse eine hochpräzise Rekonstruktion der absoluten Länge ermöglicht.

2 Interferometrie mit variabler synthetischer Wellenlänge

Einer sich im Raum in z-Richtung ausbreitenden elektromagnetischen Welle kann die Phase $\Phi(z)$ zugeordnet werden. Die Phasenänderung nach der Weglänge L beträgt

$$\Phi(L) = \frac{2\pi}{\lambda_0/2} nL = \frac{4\pi\nu}{c} nL \quad (1)$$

¹ Dr. Florian Pollinger, Leiter der Arbeitsgruppe „Mehrwellenlängeninterferometrie für geodätische Längen“
E-Mail: florian.pollinger@ptb.de

² Dr. Karl Meiners-Hagen, Arbeitsgruppe „Mehrwellenlängeninterferometrie für geodätische Längen“,
E-Mail: karl.meiners-hagen@ptb.de

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

wobei λ_0 der Wellenlänge und c der Geschwindigkeit des Lichts im Vakuum, ν seiner Frequenz und n dem Brechungsindex des Mediums bei λ_0 entspricht. Überlagert man nun zwei kohärente Wellenzüge mit der Weglängendifferenz L , so addieren sich die Feldstärken phasenabhängig und man misst eine Intensität I , die über

$$I = I_0 \left[1 + \gamma \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda/2} nL\right) \right] \quad (2)$$

von L abhängt (γ entspricht dem Interferenzkontrast). Auf der Auswertung dieser Grundgleichung beruht jede interferometrische Längenmessung. In ihr ist allerdings auch das Grundproblem dieser Messtechnik manifestiert: In einer einzelnen Messung kann die Phase nur modulo 2π bestimmt werden, Strecken der Länge $L = l_0 + k \times \lambda_0/2$ (mit $0 < l_0 < \lambda_0/2$ und $k = 0, 1, 2, \dots$) sind für eine solche singuläre Messung nicht zu unterscheiden. Daher wird in der klassischen zählenden Interferometrie die Strecke L mit einem Reflektor überstrichen und dabei die Phasenänderung Φ kontinuierlich gemessen und mitgezählt.

Hält man nun die gesuchte Weglänge L_x konstant und variiert stattdessen die Frequenz ν des verwendeten Lichts, so ändert sich nach

$$\Delta\Phi(\Delta\nu) = \frac{4\pi n}{c} L_x \Delta\nu \quad (3)$$

die Phase Φ linear mit der Frequenzänderung $\Delta\nu$. Die Länge ergibt sich in einer solchen Messung aus dem Proportionalitätsfaktor zwischen Phasenänderung $\Delta\Phi_i$ und Frequenzänderung $\Delta\nu$, wenn der Brechungsindex n mit unabhängigen Methoden (vgl. [10]) bestimmt wird. Die Längenmessung ist damit auf eine Messung der Frequenzänderung zurückgeführt. In der Praxis hat es sich jedoch bewährt, den Frequenzshift $\Delta\nu$ nicht direkt (z. B. über ein Fabry-Perot-Interferometer) zu messen. Misst man parallel zur unbekanntem Strecke L_x die bekannte Länge L_{ref} eines kalibrierten Referenzinterferometers nach derselben Methode, so erhält man aus Gleichung (3)

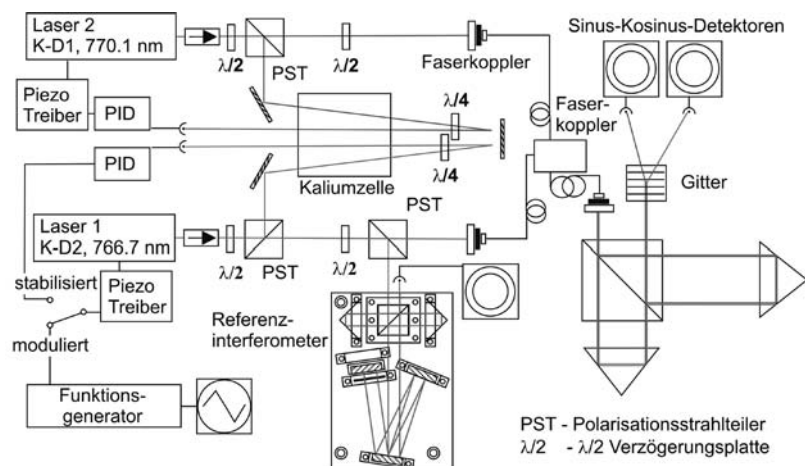
$$\Delta\Phi(\Delta\nu) = \frac{n_x}{n_{ref}} \frac{L_x}{L_{ref}} \Delta\Phi_{ref}(\Delta\nu) \quad (4)$$

einen leicht auswertbaren linearen Zusammenhang. Sind Referenz- und Messinterferometer nahe aneinander aufgebaut, kann zudem davon ausgegangen werden, dass die Brechzahl in den unterschiedlichen Interferometern nicht stark variiert. In diesem Falle ist die gesuchte Länge aus einer linearen Regression mit einer soliden statistischen Basis aus den gemessenen Datenpaaren $(\Delta\Phi(\Delta\nu), \Delta\Phi_{ref}(\Delta\nu))$ gut bestimmbar. Der Nachteil dieser Messmethode ist allerdings die Tatsache, dass sie extrem sensitiv auf kleinste Längenänderungen reagiert. Vibrationen und thermische Driften im Aufbau skalieren mit dem Verhältnis von absoluter Frequenz ν zur Frequenzänderung $\Delta\nu$, was einem Faktor von 1000 bis 10 000 entspricht. Da dies die Messgenauigkeit der Methode stark beeinträchtigt, werden in dem von der PTB entwickelten Verfahren solche Längenänderungen von einigen Nanometern mit einem zweiten, klassisch zählenden Interferometer simultan gemessen und korrigiert.

Realisiert ist dieses Messprinzip im Absolutinterferometer der PTB mit zwei Diodenlasern mit externem Resonator als Quellen. Der Aufbau ist in Bild 1 wiedergegeben. Laser 1 wird bei 766,7 nm betrieben, und kann etwa 80 GHz modensprungfrei durchgestimmt werden. Der zweite Diodenlaser wird bei 770,1 nm betrieben. Er ist permanent auf einen Hyperfeinstrukturübergang der Kalium D1-Linie stabilisiert und wird für das zählende Interferometer verwendet. Beide Laser werden in das Messinterferometer über Glasfasern eingekoppelt und am Interferometerausgang über ein Gitterspektrometer wieder getrennt. Referenz- und Messinterferometer selbst sind in Michelsonbauart mit homodyner Datenerfassung realisiert, die Phase wird mit kommerziellen Sinus-Kosinus-Detektoren rekonstruiert und über eine schnelle AD-Karte in einen Messrechner eingelesen.

Eine Längenmessung in Meterschritten bis 20 m mit der variablen synthetischen Wellenlänge ist in Bild 2 aufgeführt. Sie wurde auf der geodätischen Basis der PTB [11] gegen ein konventionelles HeNe-Referenzinterferometer verglichen. An jedem Punkt wurde zehn Sekunden lang gemessen, was achtzig unabhängigen Einzelmessungen entspricht. Der Median dieser achtzig Messungen ergibt den in Bild 2 angegebenen Messwert. Um die Streuung der Messwerte visualisieren zu können, wurden aus den Rohdaten gleitende Unterdatensätze von sechs Sekunden Messzeit gebildet. Die Streuung dieser (nicht unabhängigen) Unterdatensätze nimmt mit der Gesamtlänge zu. Dies ist in der Art der Datenerfassung begründet und limitiert ultimativ die Reichweite des Interferometers [9].

Bild 1: Schematischer Messaufbau des PTB-Absolutinterferometers. Laser 1 kann sowohl moduliert (für Interferometrie mit variabler synthetischer Wellenlänge) als auch stabilisiert (für Interferometrie mit fester synthetischer Wellenlänge) betrieben werden



Aber auch unter 20 m mit Mittelungszeiten bis zu zehn Sekunden weichen die Messwerte von den Referenzwerten um einige bis einige zehn Mikrometer von der Referenzmessung ab. Für sich genommen erreicht dieses Absolutinterferometer also trotz Vibrations- und Driftkorrektur nur unbefriedigende relative Genauigkeiten in der Größenordnung von $3 \cdot 10^{-6}$.

3 Interferometrie mit fester synthetischer Wellenlänge

Jedoch auch die bisher aufwendigste Realisation eines solchen Messprinzips basierend auf der variablen synthetischen Wellenlänge von Kinder und Salewski [5] konnte die relative Messunsicherheit nicht unter $1 \cdot 10^{-6}$ reduzieren. Um die Messunsicherheit der Längenmessung signifikant zu verbessern, wird beim PTB-Interferometer eine zweite, komplementäre Messung durchgeführt. Dafür wird Laser 1 auf eine Hyperfeinstrukturlinie des Kalium D2 Überganges stabilisiert und von den nun wohldefinierten Wellenlängen λ_1 und λ_2 die interferometrischen Phasen Φ_1 und Φ_2 gemessen. Die Differenz Φ_{synth} dieser beiden Phasen,

$$\Phi_{synth} = \Phi_2 - \Phi_1 = \left(\frac{2\pi n_g}{\lambda_2/2} - \frac{2\pi n_g}{\lambda_1/2} \right) L \quad (5)$$

entspricht formal über

$$\Phi_{synth} = \frac{2\pi n_g}{\Lambda/2} L \quad (6)$$

einer „synthetischen Wellenlänge“ Λ mit

$$\Lambda = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (7)$$

wobei n_g dem refraktiven Index eines aus λ_1 und λ_2 bestehenden Wellenpaketes entspricht:

$$n_g = n_1 - \frac{n_1 - n_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \lambda_1 \quad (8)$$

Bei den hier verwendeten Wellenlängen der Kaliumabsorptionslinien ergibt sich somit eine synthetische Wellenlänge Λ von etwa $174 \mu\text{m}$. Der Eindeutigkeitsbereich dieser Messung liegt also bei $\Lambda/2 = 87 \mu\text{m}$. Auf dieser Längenskala kann nun eine deutlich kleinere Messunsicherheit von [9]

$$U(L) = \sqrt{(0,53 \mu\text{m})^2 + (0,51 \mu\text{m/m})^2 L^2} \quad (9)$$

erreicht werden. Außer der Stabilisierung des Diodenlasers 1 sind keine weiteren Modifikationen am Aufbau für diese Messung notwendig. Beide Messungen können folglich in ein- und demselben Aufbau durchgeführt werden.

Eine exemplarische Messung bis 20 m ist in Bild 3 wiedergegeben. In jedem Punkt wurde über 10 000 Einzelmessungen der synthetischen

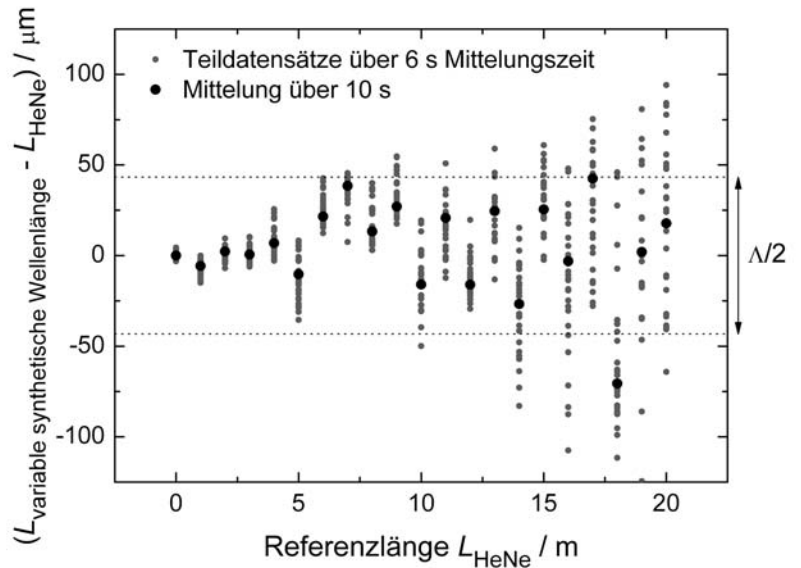


Bild 2: Vergleich der mit variabler synthetischer Wellenlänge ermittelten Länge gegen das PTB HeNe-Referenzinterferometer

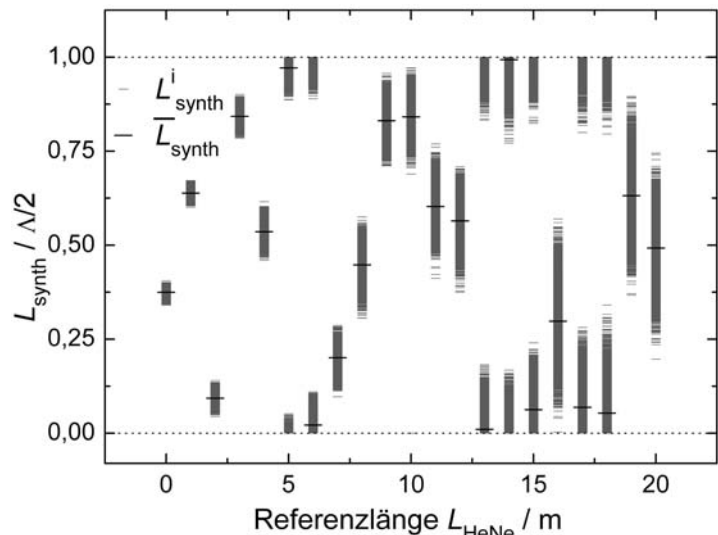


Bild 3: Synthetische Längen L_{synth} an zwanzig Messpunkten bis 20 m Gesamtlänge. Die gemessenen Phasenwerte sind für die Darstellung in die korrespondierende „synthetischen Längen“ umgerechnet worden (vgl. Gleichung (10)). An jedem Punkt wurden 10 000 Einzelmessungen L_{synth}^i durchgeführt und daraus der Mittelwert \bar{L}_{synth} gebildet.

Phase gemittelt. Aufgrund des limitierten Eindeutigkeitsbereiches ist die ermittelte „synthetische Länge“ L_{synth} definiert als

$$L_{synth} = \frac{\Phi_{synth}}{2\pi n_g} \frac{\Lambda}{2} \quad (10)$$

in $\Lambda/2$ periodisch. Die Messunsicherheit dieser Methode nimmt nach Gleichung (9) mit der absoluten Länge signifikant zu, was sich in der größeren Streuung der Messwerte in Bild 3 widerspiegelt.

4 Kombination der Einzelmessungen

Um nun zu einem Gesamtergebn zu kommen, das sowohl präzise als auch eindeutig ist, werden die beiden Messergebnisse kombiniert. Dafür wird die Länge L der Gesamtstrecke ausgedrückt als Linearkombination aus dem ganzzahligen Vielfachen N ($N = 0, 1, 2, \dots$) der halben synthetischen Wellenlänge $\Lambda/2$ und des verbleibenden Bruchteiles f ($0 \leq f < 1$) der Gesamtstrecke:

$$L = N \frac{\Lambda}{2} + f \frac{\Lambda}{2} \quad (11)$$

Die Ordnung N wird aus den Ergebnissen beider Teilmessungen bestimmt. „Perfekte“, also rauschfreie Messdaten L der variablen synthetischen Messmethode könnten auf N abgebildet werden über

$$N = \text{floor}\left(\frac{L_x}{\Lambda/2}\right) \quad (12)$$

wobei die $\text{floor}(x)$ -Funktion so definiert ist, dass sie die größte ganze Zahl z liefert, für die die Bedingung $z \leq x$ erfüllt ist. Dieser denkbar einfachste Algorithmus ist aber für reale Daten nicht stabil. Die Punkte im Intervall $[N\Lambda/2, (N+1)\Lambda/2[$ sind nicht äquivalent. Insbesondere an den Intervallgrenzen kann kleinstes Rauschen auf den Daten an den Grenzen zu einer falschen Identifikation der Ordnung führen. Um trotz Streuung der Daten verlässlich die korrekte Ordnung aus den Messdaten zu extrahieren, müssen diese

weiterverarbeitet werden. Das Verfahren ist in Bild 4 graphisch mit simulierten Daten skizziert. In einem ersten Schritt wird zunächst der Anstieg der Datenpunkte innerhalb eines Intervalls entfernt. Dafür wird der mit der komplementären Methode bestimmte Längenteil f ,

$$f = \frac{\Phi_{\text{synth}}}{2\pi n_g} \quad (13)$$

vom Ergebnis der Absolutmessung abgezogen. Alle Messpunkte im Intervall $[N\Lambda/2, (N+1)\Lambda/2[$ sind nun formal auf den Punkt $N\Lambda/2$ abgebildet, sind also äquivalent. Durch Addition von $\Lambda/4$ werden diese Punkte nun auf den Punkt $(N+0,5)\Lambda/2$ in der Mitte des Intervalls $[N\Lambda/2, (N+1)\Lambda/2[$ verschoben (vgl. Bild 4b). Damit wird erreicht, dass für jede Abweichung der Daten kleiner als $\Lambda/4$ die floor -Funktion die korrekte Ordnung liefert. Analytisch ergibt sich diese deutlich stabilere Variante des Algorithmus (12) zu

$$N = \text{floor}\left(\frac{L_{\text{ADI}}}{\Lambda/2} - \frac{\Delta\Phi_{\text{synth}}}{2\pi n_g} + \frac{1}{2}\right) \quad (14)$$

Die Anwendung auf die simulierten Daten ist in Bild 4c dargestellt. Ist die Streuung der Daten also kleiner als $\Lambda/4$, so liefert diese Auswertung die korrekte, fehlerfreie Ordnung N . Dieses Ergebnis kann nun mit dem sehr viel genaueren Ergebnis f der Messung mit der festen synthetischen Wellenlänge nach Gleichung (11) ergänzt werden. Der Fehler dieser rekonstruierten Gesamtlänge wird bei korrekt bestimmtem N allein durch die hochpräzise Zweifarbenmessung

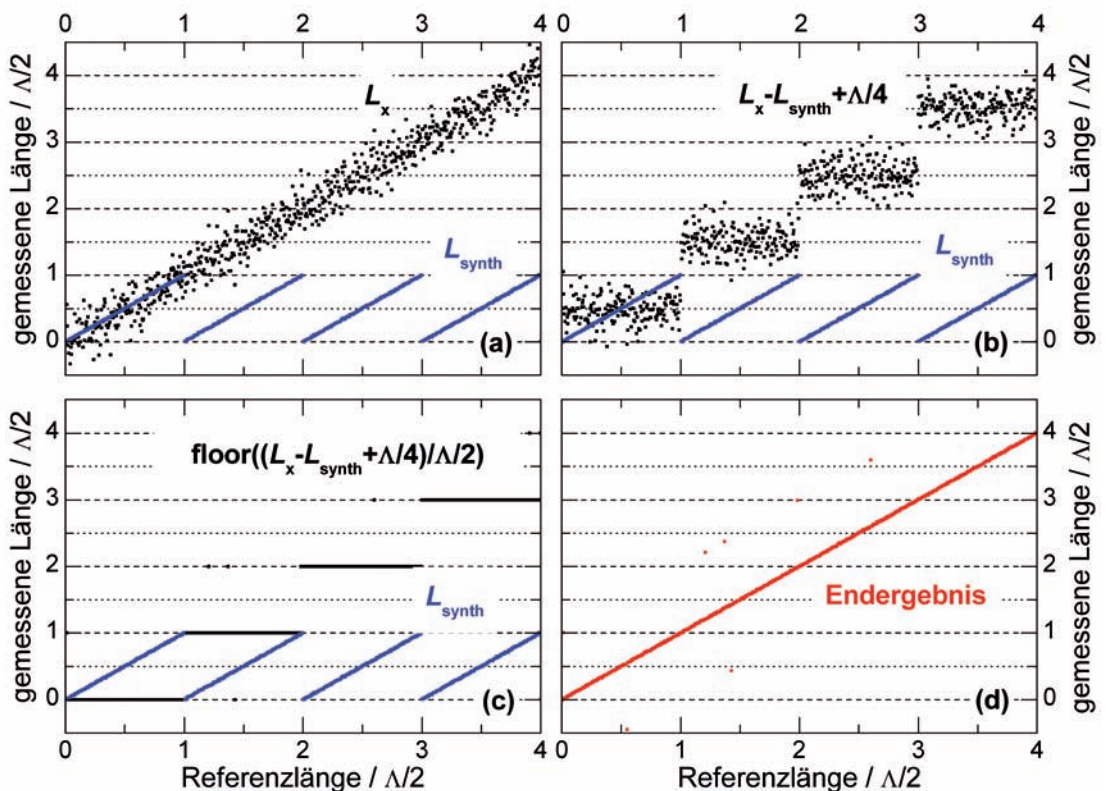


Bild 4: Extraktion der absoluten Länge aus den (hier simulierten) Ergebnissen beider Teilmessungen

bestimmt. Der Anspruch an die Absolutlängenmessung ist also nur, dass sie die Länge genauer als $\Lambda/4$ bestimmt, was im Falle des PTB-Interferometers einer Genauigkeit von ungefähr $43,5 \mu\text{m}$ entspricht. Diese zulässige Fehlergrenze ist in Bild 2 gestrichelt eingetragen.

Die Testmessungen auf der geodätischen Basis der PTB bestätigen, dass sich dieses Hybridmessprinzip auch in der Praxis mit der entsprechenden Genauigkeit umsetzen lässt. In Bild 5 sind Daten verschiedener exemplarischer Messungen bis 20 m zusammengefasst. Die Abweichung der Daten vom HeNe-Referenzinterferometer stimmt sehr gut mit der in Gleichung (9) angegebenen Messunsicherheit überein.

5 Zusammenfassung

Die Ergebnisse zeigen, dass es durch die Kombination der zwei Einzeltechniken in der Tat möglich ist, eine absolute Längenmessung mit einer Messunsicherheit kleiner als $6 \cdot 10^{-7}$ bis 20 m Länge durchzuführen. Die benötigten optischen Komponenten können in beiden Techniken verwendet werden, was den Aufwand für den optischen Aufbau minimiert. Mit der hier realisierten Hybridtechnik ist es also möglich, die Nachteile der Einzelmethoden, mangelnde Präzision bzw. überbordende Komplexität, die einer praktischen Anwendung bisher im Wege standen, zu überwinden. An der weiteren Vergrößerung der Reichweite bei gleichzeitiger Verbesserung der Auflösung wird derzeit gearbeitet.

6 Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Förderung des Vorhabens unter dem Vertrag ME2691/1-2. Weiterhin soll Martin Wedde für seine Unterstützung bei den elektronischen Aufbauten gedankt werden.

7 Literatur

- [1] G. L. Bourdet, A. G. Orszag: Absolute distance measurements by CO_2 laser multiwavelength interferometry. *Applied Optics* **18** (1979), p. 587
- [2] H. Kikuta, K. Iwata, R. Nagata: Distance measurement by the wavelength shift of laser diode light. *Applied Optics* **25** (1986), p. 2976
- [3] R. Dändliker, R. Thalmann, D. Prongué: Two-wavelength laser interferometry using superheterodyne detection. *Optics Letters* **13** (1988), p. 339
- [4] J. A. Stone, A. Stejskal, L. Howard: Absolute interferometry with a 670 nm external cavity diode laser. *Applied Optics* **38** (1999), p. 6981
- [5] Th. Kinder, K. D. Salewski: Absolute distance interferometer with grating-stabilized tunable diode laser at 633 nm. *Journal of Optics A* **4** (2002), p. S364

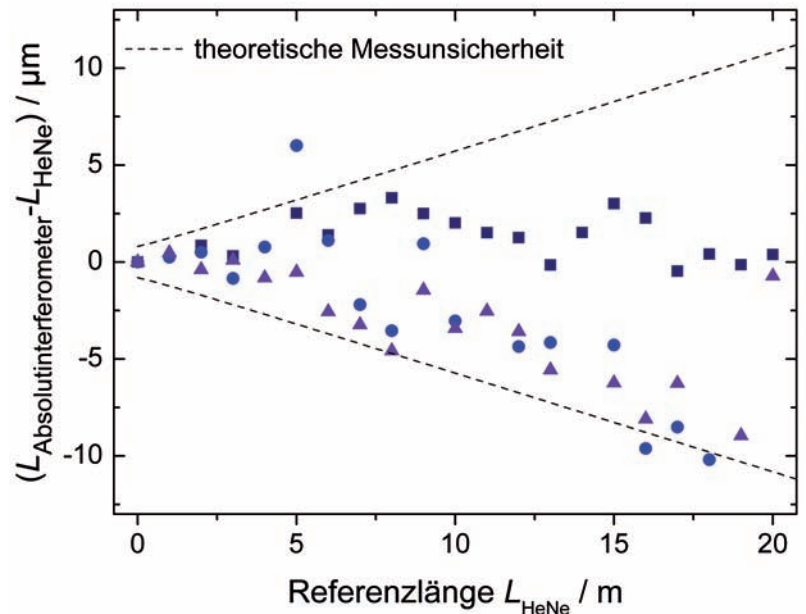


Bild 5: Abweichung der Referenzlänge von dem mit der Hybridmethode ermittelten Endwert

- [6] H. J. Yang, J. Deibel, S. Nyberg, K. Riles: High-precision absolute distance and vibration measurement with frequency-scanned interferometry. *Applied Optics* **44** (2005), p. 3937
- [7] L. Hartmann, K. Meiners-Hagen, A. Abou-Zeid: An absolute distance interferometer with two external cavity diode lasers. *Measurement Science and Technology* **19** (2008), p. 045307
- [8] K. Meiners-Hagen, R. Schödel, F. Pollinger, A. Abou-Zeid: Multi-Wavelength Interferometry for Length Measurements Using Diode Lasers. *Measurement Science Review* **9** (2009), p. 16
- [9] F. Pollinger, K. Meiners-Hagen, M. Wedde, A. Abou-Zeid: Diode-laser-based high-precision absolute distance interferometer of 20 m range. *Applied Optics* **48** (2009), p. 6188
- [10] K. Meiners-Hagen, F. Pollinger, A. Abou-Zeid: Brechzahlkompensation mittels Mehrwellenlängen-Interferometrie. *PTB-Mitteilungen* **120** (2010), S. 110
- [11] M. Wedde, K. Meiners-Hagen, A. Abou-Zeid: Interferometrische Kalibrierung von Strichmaßen, Laserinterferometern, und Entfernungsmessgeräten: Die Geodätische Basis der PTB. *PTB-Mitteilungen* **120** (2010), S. 115

Brechzahlkompensation mittels Mehrwellenlängen-Interferometrie

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

1 Einleitung

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

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

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

Tabelle 1:
Einfluss der Umgebungsparameter auf die Brechzahl n von Luft.

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

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

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

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

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

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

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

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

2 Brechzahlkompensation mit zwei Wellenlängen

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

3 Experimentelle Ergebnisse

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

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

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

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

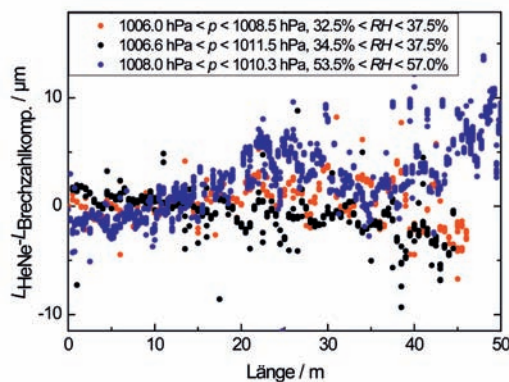


Bild 1: Gemessene Längendifferenzen zwischen dem HeNe-Laserinterferometer der geodätischen Basis und dem brechzahlkompensierenden Interferometer

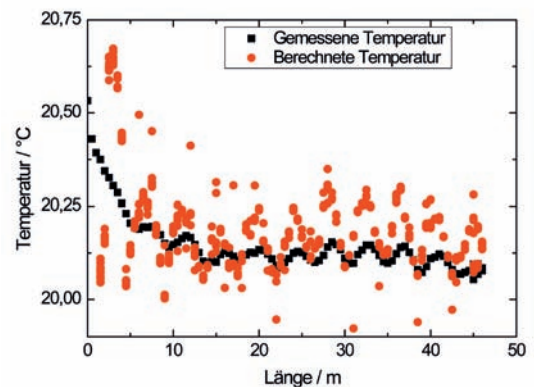


Bild 2: Gemessene Temperatur an der Messstrecke (Quadrate) und berechnete effektive Temperatur im Strahlengang des Interferometers (offene Kreise)

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

4 Spektroskopische Bestimmung der Luftfeuchte

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

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

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

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

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

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

Prinzipiell wird die Messunsicherheit der Auswertung nach dieser Methode aber auch

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

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

5 Experimentelle Ergebnisse

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

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

Bild 3: Experimenteller Aufbau zur spektroskopischen Feuchtemessung

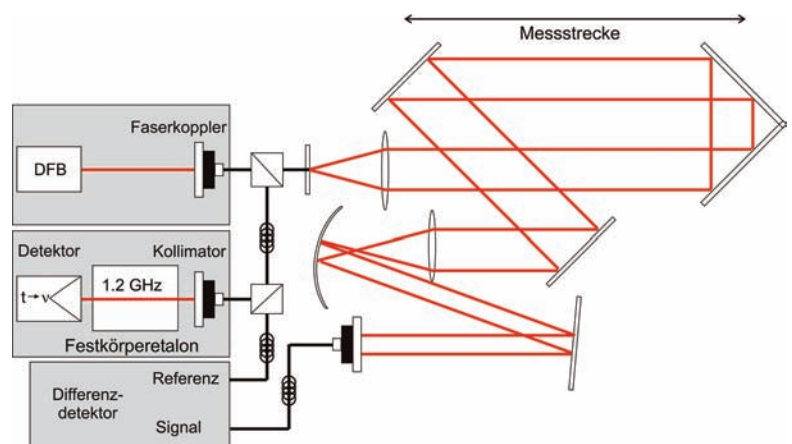


Bild 4:
Vergleich der spektroskopisch und mit einem Hygrometer gemessenen Luftfeuchte

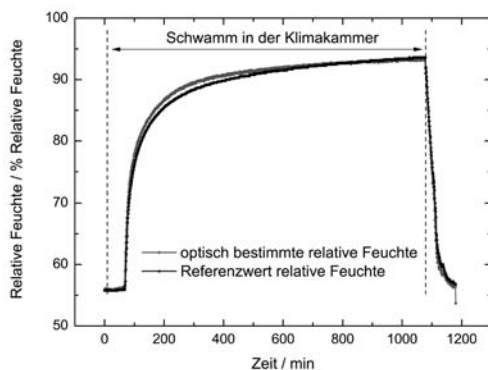
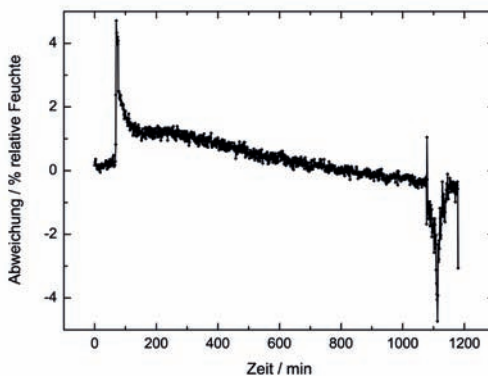


Bild 5:
Differenz zwischen der spektroskopisch und mit einem Hygrometer gemessenen Luftfeuchte aus Bild 4



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

6 Zusammenfassung und Ausblick

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

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

7 Danksagung

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

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

8 Literatur

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

Interferometrische Kalibrierung von Strichmaßen, Laserinterferometern und Entfernungsmessgeräten: Die Geodätische Basis der PTB

Martin Wedde¹, Karl Meiners-Hagen², Ahmed Abou-Zeid³

1 Einleitung

In vielen Bereichen der Produktion werden heute immer höhere Fertigungsgenauigkeiten benötigt. Dafür werden entsprechend leistungsfähige Längenmesssysteme eingesetzt, die für eine gleich bleibende Messunsicherheit regelmäßig kalibriert, also auf die SI-Definition des Meters rückgeführt werden müssen. In der PTB werden verkörperte Längenmessmittel wie Strichmaße, aber auch moderne Entfernungsmessgeräte und Laserinterferometer auf der „Geodätischen Basis“ kalibriert. In diesem Beitrag sollen sowohl die Ausrüstung der Basis, als auch die dort möglichen verschiedenen Kalibrierungen vorgestellt werden.

2 Die Geodätische Basis

Die Geodätische Basis besteht aus einem 50 m langen Komparatorbett (siehe Bild 1) mit einem verfahrbaren Messwagen. Das Komparatorbett ruht auf Betonsockeln, die direkt auf den Boden des Messraumes im Keller des Gebäudes aufgesetzt sind. Die Steuerung der Messung erfolgt weitgehend automatisiert. Steuer- und Messraum sind räumlich voneinander getrennt. Während der Messung muss kein Personal im Messraum anwesend sein.



Bild 1:
Die Geodätische Basis der PTB

Als Längennormal wird ein He-Ne Laserinterferometer nach dem klassischen Michelson-Prinzip eingesetzt: Der Laserstrahl wird durch einen optischen Strahlteiler in zwei Interferometerarme aufgeteilt. Ein Strahl fällt auf einen festen Retroreflektor, der andere auf einen Tripelspiegel, der am Messwagen angebracht ist und über die zu messende Strecke bewegt wird. Für bestimmte Anwendungen, z. B. zur Kalibrierung von Laserinterferometern, wird ein weiteres He-Ne-Laserinterferometer verwendet, dessen Messstrahl gefaltet ist. Der Längensbereich dieses Interferometers ist auf 20 m begrenzt. Nach Durchlaufen von Referenz- und Messstrecke werden die beiden Teilstrahlen wieder in Deckung und zur Interferenz gebracht. Das in der Beobachtungsebene entstehende Interferenzmuster wird elektronisch erfasst und zur Ermittlung des Verschiebewegs des beweglichen Spiegels verwendet.

Die Frequenz der Längennormale ist über ein Frequenznormal der PTB auf die SI-Definition des Meters rückgeführt [1]. Für das eigentliche interferometrische Messprinzip wird jedoch nicht direkt die Laserfrequenz, sondern die Wellenlänge des Lasers verwendet. Da die Messung nicht im Vakuum stattfindet, hängt diese von den Umgebungsbedingungen Druck, Temperatur, sowie relativer Feuchte der Luft ab. Die in die Auswertung eingehende Wellenlänge wird daher nach der von Bönsch und Potulski entwickelten, modifizierten Edlén-Formel entsprechend korrigiert [2]. Dafür werden diese Umweltparameter in der Geodätischen Basis durch ein umfangreiches Sensorennetzwerk von 21 gleichverteilten Lufttemperatursensoren, zwei Barometern, sowie zwei Hygrometern während der gesamten Messung kontinuierlich erfasst.

Zudem muss bei einer Kalibrierung eines verkörperten Längenmaßes dessen temperaturinduzierte Ausdehnung berücksichtigt werden. Dafür wird die entsprechende Körpertemperatur bei Messbändern durch bis zu 21 Materialtem-

¹ Martin Wedde, Arbeitsgruppe „Mehrwellenlängeninterferometrie für geodätische Längen“
E-Mail: martin.wedde@ptb.de

² Dr. Karl Meiners-Hagen Arbeitsgruppe „Mehrwellenlängeninterferometrie für geodätische Längen“,
E-Mail: karl.meiners-hagen@ptb.de

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

peratursensoren im Abstand von 2,5 m auf dem Messband bestimmt. Bei Maßstäben bis maximal 4 m Länge werden vier Temperatursensoren in gleichen Abständen auf einem Maßstab verteilt.

Ursprünglich wurde die Geodätische Basis in den 50er Jahren des 20. Jahrhunderts für die Kalibrierung von Messbändern konzipiert. Mit steigender Anforderung und einer zunehmenden Vielfalt an Längenmessmitteln wurde sie im Laufe der Zeit zu einer vielseitig einsetzbaren Messeinrichtung weiterentwickelt. Heute sind nun Kalibrierungen folgender Messmittel routinemäßig möglich:

- Messbänder bis 100 m
- Strichmaßstäbe bis 4 m
- Entfernungsmessgeräte bis 50 m
- Laserinterferometer bis 5 m

Im Folgenden werden die einzelnen Kalibriermöglichkeiten auf der geodätischen Basis kurz dargestellt und erläutert.

3 Verkörperte Längenmaße

Messbänder und Strichmaßstäbe sind robuste und universal einsetzbare verkörperte Längenmaße, die in der Industrie und im Handwerk verwendet werden. Die Verkörperung der Länge erfolgt durch die Abstände der Striche. Bei der Kalibrierung spielen die Abweichung der Position der Striche, die Strichbreite sowie die Strichqualität eine Rolle.

In der Geodätischen Basis wird zur Kalibrierung von Messbändern und Strichmaßstäben ein Reflektor aus drei Einzelspiegeln verwendet, der unter dem Messwagen angebracht ist (siehe

Bild 2). Die drei Einzelspiegel sind so aufgebaut, dass sich die zu prüfende Maßverkörperung im Zentrum des Reflektors befindet. Durch diese Anordnung werden die Abbe-Fehler minimiert.

Die Messbänder werden auf dem Komparatorbett reibungsarm auf Rollen gelagert (siehe Bild 3), am Anfang befestigt und am Ende über ein Seil und eine Rolle mit der erforderlichen Messkraft belastet (siehe Bild 4). Messbänder über 50 m Länge werden in zwei Anläufen über 50 m Länge gemessen, müssen also nach 50 Metern neu angelegt werden. Maßstäbe werden auf ihre Bessel-Punkte, die eine minimale Durchbiegung des Maßstabes verursachen, aufgelegt. Das Ausrichten erfolgt mit Hilfe eines Mikroskops auf dem Messwagen.

Bei der Kalibrierung werden die Positionen der Striche, die Strichbreite sowie die Strichqualität bestimmt [3]. Zur Erfassung der Strichpositionen lassen sich verschiedene Messmikroskope auf dem Messwagen anbringen (siehe Bild 5). Lässt die Strichqualität dies zu, wird die Strichposition automatisiert bestimmt, um subjektive Messeinflüsse zu minimieren.

Die Kalibrierung von verkörperten Längenmaßen ist eine Standardmessaufgabe, deren wirtschaftliche Bedeutung nicht zu unterschätzen ist. Die Qualität und Vergleichbarkeit dieser Kalibrierungen muss also auch immer wieder international abgesichert werden. Letztmalig nahmen im Zeitraum von Februar 2003 bis August 2004 sechzehn nationale Metrologieinstitute an einem EUROMET-Ringvergleich (EUROMET 677) zur Kalibrierung von Stahlmessbändern teil

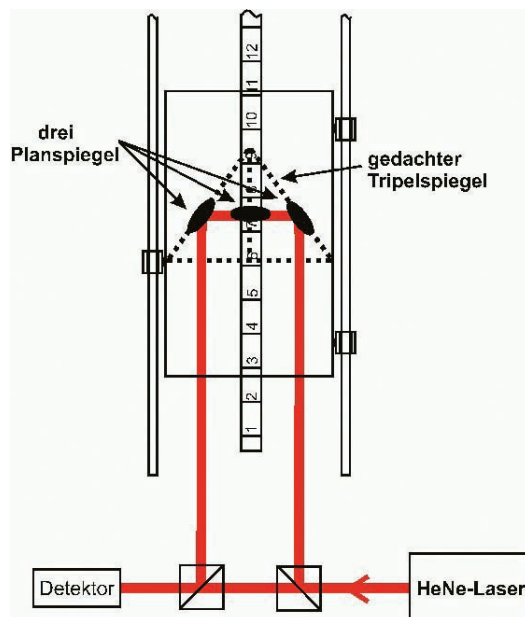
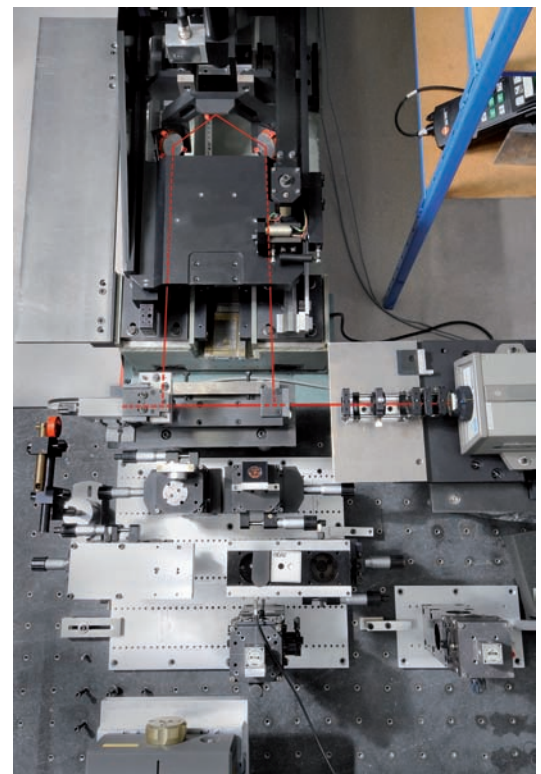


Bild 2:
Laserinterferometer mit Reflektor aus drei Einzelspiegeln



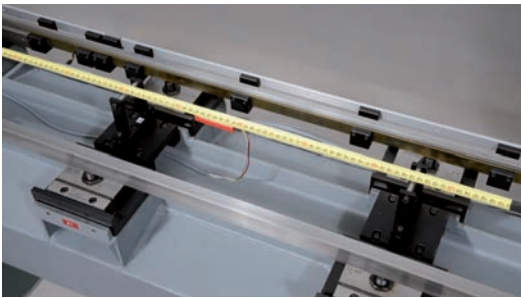


Bild 3:
Aufgelegtes Maßband

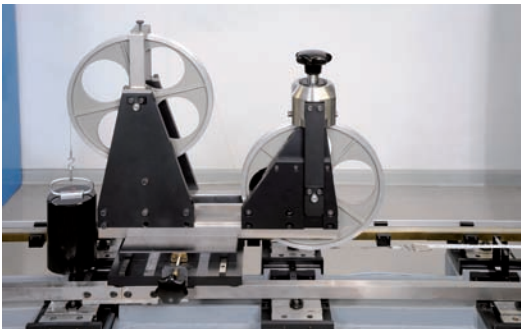


Bild 4:
Spannvorrichtung

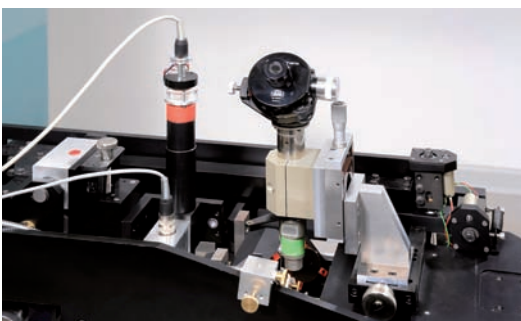


Bild 5:
Messwagen mit Messmikroskopen

[4], der durch das schweizerische Bundesamt für Metrologie und Akkreditierung METAS koordiniert und ausgewertet wurde. Die Messaufgabe der Institute bestand darin, die Längen von drei Stahlmessbändern (10 m, 30 m, und 50 m) in jeweils 10 Intervallen zu bestimmen. Die angegebenen Messunsicherheiten lagen in einem weiten Bereich. So wurden zum Beispiel für das 50 m Intervall Messunsicherheiten von 17 µm bis zu 632 µm angegeben (PTB: 121 µm).

Mit den drei Bändern, 10 Messintervallen und den 16 Teilnehmern des Ringvergleichs ergaben sich 480 Einzelergebnisse. Bild 6 zeigt exemplarisch die Abweichungen der Messergebnisse unter Angabe der Messunsicherheit der einzelnen Institute vom gewichteten Mittelwert des 50 m-Intervalls am 50 m-Band.

Die Validität einer Kalibrierung wird international nach dem E_n -Wert beurteilt. Dieser spiegelt das normalisierte Verhältnis der Abweichung des Messwerts vom Referenzwert zur gemeinsamen Messunsicherheit (Mess- und Referenzwert) wieder. Bei einem E_n -Wert kleiner als 1 stimmt das Messergebnis im Rahmen der angegebenen Messunsicherheit mit dem Referenzwert überein. Dieses Kriterium wurde von 16 % der Einzelergebnisse verletzt. Alle Messwerte der PTB erfüllten das E_n -Kriterium jedoch mit einem maximalen E_n -Wert von 0,54. Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass die in der Geodätischen Basis erzielten Messunsicherheiten realistisch abgeschätzt wurden.

4 Entfernungsmessgeräte

In vielen Anwendungen, z. B. in der Landvermessung, in Handwerksbetrieben, aber auch im Heimwerkerbereich werden verkörperte Längemaße immer stärker von berührungslos messenden Entfernungsmessgeräten verdrängt.

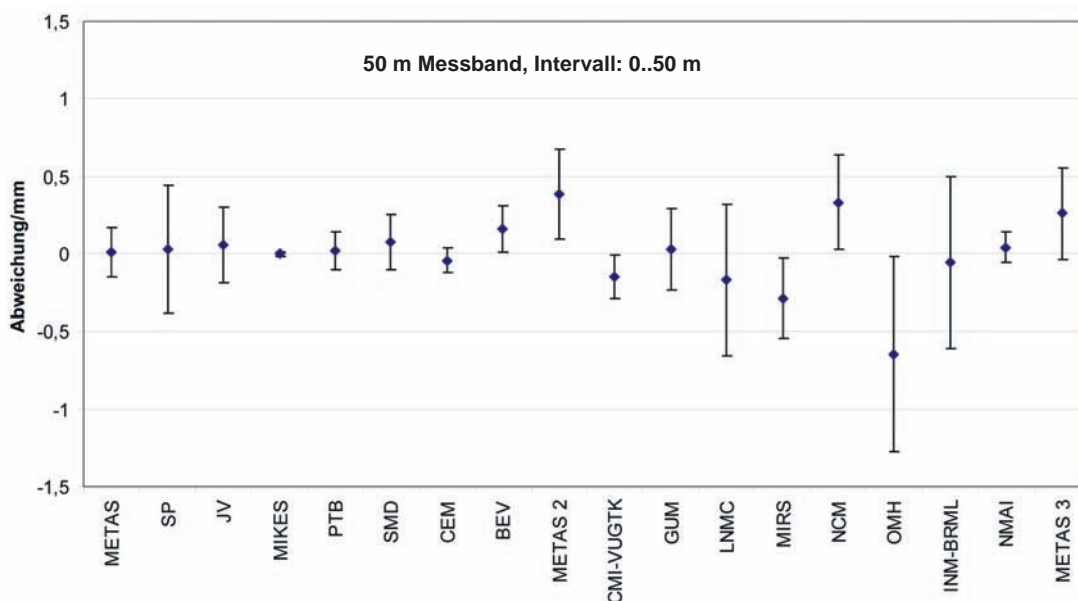


Bild 6:
Abweichung vom gewichteten Mittelwert für das 50 m Intervall mit Angabe der Messunsicherheiten

Das Leistungsvermögen solcher elektronischer Entfernungsmessgeräte (EDM) spiegelt das breite Spektrum der Anwendungsmöglichkeiten wieder: Typische „Heimwerkergeräte“ verfügen über einen Messbereich von etwa 20 m bei einer Auflösung von 1 mm, während professionelle Landvermessungsgeräte, sogenannte Tachymeter, im Kilometerbereich eine Auflösung von bis zu 0,1 mm erreichen.

Die eigentliche Längenmessung kann dabei auf verschiedenen Prinzipien beruhen. Der einfachste Ansatz basiert auf der Messung der Laufzeit eines ausgesendeten Lichtpulses. Ist dieser moduliert, so kann über die Messung der Phasenlage eine bessere Auflösung erreicht werden. Ein alternatives Messprinzip basiert nicht auf Laufzeitbestimmung, sondern auf dem traditionellen Winkelmessverfahren, der Triangulation.

Das Anwendungsspektrum demonstriert die wirtschaftliche Bedeutung der Messergebnisse dieser Geräte. Eine regelmäßige Kalibrierung ist für diese Geräte daher zwingend notwendig. Diese kann ebenfalls auf der Geodätischen Basis durchgeführt werden. Dafür wird der Entfernungsmesser am Anfang des Komparatorbetts auf einem Halter montiert. Auf den beweglichen Messwagen wird entweder ein ebener Reflektor oder der zum Gerät gehörende Tripelreflektor befestigt. Der Nullpunkt des Interferometers in Bezug zum Entfernungsmesser wird mittels eines Endmaßes festgelegt (siehe Bild 7). Die Messabweichung des Entfernungsmessgerätes kann so im direkten Vergleich mit dem Referenzlaserinterferometer ermittelt werden.

Um der zunehmenden Bedeutung von EDMs gerecht zu werden wird in diesem Jahr ein zweites Laserinterferometer-Messsystem in die Geodätische Basis an das Kopfende der 50 m Schiene integriert. Dadurch wird es möglich mehrere Kalibrieraufgaben gleichzeitig oder mit geringerer Umrüstzeit durchzuführen, was die Kalibrierkapazität der geodätischen Basis deutlich erhöht

5 Laserinterferometer

Inkrementell zählende Laserinterferometer sind die präzisesten Längenmesssysteme und finden in der Fertigungsmesstechnik, z. B. in der



Bild 7:
Entfernungsmesser

Prüfung von Werkzeugmaschinen, Koordinatenmessgeräten, und integrierten Positionierrichtungen Anwendung. Die Kalibrierung dieser Geräte gegen das Normal-Laserinterferometer der PTB ist sicherlich die anspruchsvollste Aufgabe der Geodätischen Basis.

Um die Messunsicherheit zu minimieren wird mit einer besonderen, gefalteten Strahlführung gearbeitet (siehe Bild 8). Die beiden Messstrahlen treffen parallel zueinander auf einen großen, vollständigen Tripelspiegel, der auf dem beweglichen Messwagen montiert wird. Von diesem werden sie antiparallel auf ihre jeweiligen, feststehenden Mess-Tripelprismen reflektiert und schließlich zu den entsprechenden Detektoren der Laserinterferometer geführt. Durch diese Strahlführung werden die Längen der beiden Messstrahlen um den gleichen Betrag, und insbesondere frei von Abbefehlern, variiert [5].

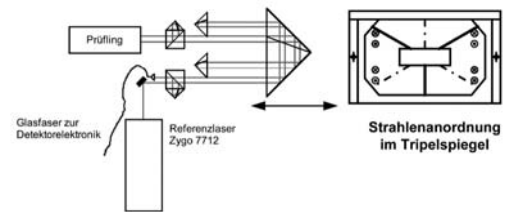


Bild 8:
Laserinterferometer mit gefaltetem Strahlengang

Ein weiterer Vorteil dieser Messanordnung ist, dass die Messstrahlen von Normal und Prüfling im gleichen Strahlkorridor laufen. Daher kann für beide Laserinterferometer von der gleichen Brechzahl und der gleichen thermischen Ausdehnung ausgegangen werden. Dies ermöglicht während der Kalibrierung verschiedene äußere Bedingungen zu simulieren und das Laserinterferometer als Gesamtsystem bei verschiedenen Umweltbedingungen zu kalibrieren. Dafür werden die Temperatursensoren von Normal und Prüfling in einem zwischen 15 und 25°C temperierbaren Kupfergehäuse montiert und auf die entsprechende Messtemperatur gebracht. In einer Druckkammer sind zudem die zu den Systemen gehörenden Manometer Druckänderungen im Bereich von ± 30 hPa, bezogen auf den Umgebungsdruck, ausgesetzt.

Die Messwertaufnahme selbst erfolgt statisch in einem Arbeitsbereich von etwa 5 m und in Schritten von üblicherweise 80 mm. Dabei werden die gemessenen Längen beider Laserinterferometer synchron mit Hilfe von externen Triggerimpulsen registriert. Die Luftparameter und die Körpertemperaturen werden ebenfalls synchron dazu aufgenommen. Aus dem Normal-Laserinterferometer zugeordneten Luftparametern wird zu jedem Messpunkt die aktuelle, simulierte absolute Brechzahl der Luft und aus den entsprechenden Körpertemperaturen und

dem linearen Ausdehnungskoeffizienten α die jeweilige thermische Ausdehnung bestimmt. Die korrigierten Längenmesswerte des Normal-Laserinterferometers werden dann aus den gemessenen Inkrementen, der kalibrierten Vakuumwellenlänge, der ermittelten Brechzahl der Luft und der thermischen Ausdehnung berechnet. Schließlich wird die mittlere längenabhängige systematische Messabweichung $\overline{\Delta L}$ des zu kalibrierenden Laserinterferometers mittels einer linearen Regression aus allen Wertepaaren $[L_{Normal}; \Delta L]$ berechnet.

6 Fazit

Die Anforderungen an die Messunsicherheit von Längenmesssystemen unter Umgebungsbedingungen haben sich im Laufe der Zeit kontinuierlich erhöht und werden auch in Zukunft weiter steigen. Eine Kalibrierung solcher Längenmesssysteme für den praktischen Gebrauch erfordert neben der Frequenzkalibrierung eine genaue Erfassung der Umweltparameter. Die Aufgabe der Geodätischen Basis ist es, eine solche umfassende Kalibrierung anbieten zu können. Das derzeitige Standardkalibrierangebot der Geodätischen Basis ist in Tabelle 1 mit den dazugehörigen Messunsicherheiten zusammengefasst. Eine aktuelle Liste kann auf der Homepage der PTB (www.ptb.de) eingesehen werden. Damit sie auch den zukünftigen Herausforderungen gewachsen ist, wird die Geodätische Basis systematisch weiterentwickelt.

7 Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei Tobias Meyer für die sorgfältige Pflege und Instandhaltung der Mechanik und der Software der Anlage, und bei Alexandra Korte für die gewissenhafte Pflege der Sensorik.

8 Literatur

- [1] T. J. Quinn: *Mise en Pratique of the Definition of the Metre* (1992)
- [2] G. Bönsch, E. Potulski: *Metrologia* 35, (1998), S. 133
- [3] OIML R-35 1, **Material measures of length for general use. Part 1: Metrological and technical requirements**
- [4] EUROMET 677 Final report. (http://www.bipm.org/utis/common/pdf/final_reports/L/S14/EUROMET.L-S14.pdf)
- [5] G. Sparrer: Anordnung zum direkten Vergleich und zur Kalibrierung von Laserinterferometern. Patent specification G 01 B 9/02 DE 4208189 A of 08.04.1993

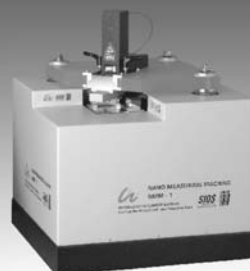
Tabelle 1:
Übersicht der Erweiterten Messunsicherheiten

Kalibrierung von Längenmessmitteln

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 $\alpha = 0 \text{ K}^{-1}$ 15° C bis 25° C $p = 30 \text{ hPa}$	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 α : 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 $\alpha = 11,5 \cdot 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$)

Nanopositionier- und Nanomessmaschine NMM-1

- Dreidimensionales, hochgenaues Positioniersystem
- Mess- und Positionierbereich: 25 mm x 25 mm x 5 mm
- Auflösung: 0,1 nm, • kundenspezifische Antastensoren



SIOS Meßtechnik GmbH
Am Vogelherd 46
D-98693 Ilmenau
Tel.: 03677/6447-0
E-mail: info@sios.de
www.sios.de

SIOS 
Meßtechnik GmbH

Femtosekundenlaserbasierendes Messsystem für geodätische Längen

Nicolae R. Doloca¹, Martin Wedde², Karl Meiners-Hagen³,
Ahmed Abou-Zeid⁴

1 Motivation

Die Genauigkeit von Abstandmessungen über lange Strecken (> 10 m bis hin zu einigen Kilometern) muss nach Ansicht der Metrologieinstitute in EURAMET deutlich verbessert werden. So benötigt zum Beispiel die Produktion großer Teile, wie in der Raumfahrtindustrie, hochpräzise Metrologie in Bereichen bis 100 m. Typische Lösungen, wie z. B. zur Vermessung von Tragflügelstrukturen, nutzen kommerziell erhältliche Systeme mit mehreren Lasertrackern. Diese Geräte sind üblicherweise nur bis etwa 30 m Entfernung ausgelegt. Eine andere wichtige Anwendung liegt in der Sicherung von nuklearen Endlagern. Um die Integrität des Lagergesteins für Atom Müll abzusichern, sind hochgenaue Abstandmessungen über Langstrecken nötig, um die Stabilität der Umgebung zu prüfen. Dafür werden Längenmessungen in freien Strecken über einige hunderte Meter bis einige Kilometer mit einer Messunsicherheit unter 0,1 ppm benötigt.

Weiterhin besteht auch ein Bedarf an hochpräzisen, rückführbaren Längenmesstechniken über 100 m, um eine signifikante Lücke in der Kalibrierkette zu füllen. Zur Zeit gibt es keine hinreichende Möglichkeit zu verifizieren, ob die auf GPS basierenden Längenmessmittel die spezifizierten Detektionsgenauigkeit einhalten. In der GPS Technologie wird die Phasenverschiebung eines modulierten Signales über die zu messende Strecke ausgewertet, eine Methode, die eine Messunsicherheit von ca. 10^{-6} aufweist. Abstandmessungen mit GPS sind daher nicht direkt auf die SI-Definition des Meters rückführbar. Angesichts der rasant steigenden wirtschaftlichen Bedeutung solcher Messsysteme besteht jedoch die Notwendigkeit, die angegebenen Messunsicherheiten verifizieren zu können.

2 Messverfahren zur Messung absoluter Längen

Grundsätzlich lassen sich Längenmessmethoden in drei Gruppen einteilen. Laufzeitbasierte Methoden basieren auf der Detektion von Lichtpulsen. Zur Messung der Entfernung werden

Lichtimpulse von einer Lichtquelle auf einen Zielreflektor ausgesendet. Aus der Umlaufzeit wird die Entfernung zu dem Zielreflektor ermittelt. Diese Methoden sind besonders für eine Absolutmessung über die Langstrecke geeignet, allerdings ist wegen der limitierten zeitlichen Auflösung die Messgenauigkeit auf einige Millimeter begrenzt.

Bei optoelektronischen Phasenschiebe-Entfernungsmessgeräten (EDM) wird ein amplitudenmodulierter Laserstrahl von einem Messobjekt reflektiert und von einer Fotodiode empfangen. Ein Teil des Laserstrahls kann als Referenzsignal genutzt und direkt auf eine Fotodiode geführt werden. Solche Phasenschiebemethoden führen im Allgemeinen zu einer besseren Messgenauigkeit ($10^{-6} L$) als bei laufzeitbasierten Methoden, allerdings wird der Eindeutigkeitsbereich der Messung von der Modulationswellenlänge bestimmt.

Die genauesten Abstandmessungen über Langstrecken sind aber auf kohärenter Detektion eines Laserstrahls basiert, nämlich auf interferometrischer Phasenauswertung. Interferometrische Entfernungsmessungen sind meist auf inkrementelle Phasendetektion angewiesen, wobei vorige Angaben über die gemessene Länge nötig sind, oder ein Mehrwellenlängensystem verwendet werden muss [1, 2, 3]. Allgemein gilt jedoch, dass mit zunehmender Messgenauigkeit der Eindeutigkeitsbereich der Messung abnimmt. Deshalb ist es sinnvoll für eine Absolutabstandmessung eine Kombination der oben beschriebenen Methoden mit unterschiedlichen Eindeutigkeitsbereichen zu verwenden. Setzt man ein fs-Lasersystem in der Längenmesstechnik ein, so ist es abhängig von der Resonatorlänge möglich, Eindeutigkeitsbereiche zwischen etwa 30 cm bis hin zu 3 m zu erhalten. Zudem lässt sich der Femtosekunden-Frequenzkamm für alle drei Längenmessmethoden erfolgreich anwenden. Eine inkrementelle Messung ist daher nicht mehr nötig.

In der Längenmetrologie wurde der Femtosekunden-Laser erstmals als Modulator eines EDM eingesetzt [4], indem Phasenmessungen der Intermodebeatfrequenzen eines Femtosekun-

¹ Dr. Nicolae R. Doloca, Arbeitsgruppe „Mehrwellenlängeninterferometrie für geodätische Längen“, E-Mail: nicolae.r.doloca@ptb.de

² Martin Wedde, Arbeitsgruppe „Mehrwellenlängeninterferometrie für geodätische Längen“, E-Mail: martin.wedde@ptb.de

³ Dr. Karl Meiners-Hagen, Arbeitsgruppe „Mehrwellenlängeninterferometrie für geodätische Längen“, E-Mail: karl.meiners-hagen@ptb.de

⁴ Dr. Ahmed Abou-Zeid, ehem. Leiter des Fachbereichs „Interferometrie an Maßverkörperungen“, E-Mail: ahmed.abou-zeid@ptb.de

denlaser-Systems durchgeführt wurden. Aber auch interferometrische Ansätze zu Längenmessung sind mit Femtosekunden-Lasern bereits realisiert worden [5, 6]. Ye et al. [7] schlugen erstmals einen phasenstabilisierten Femtosekundenlaser-Pulszug vor, sowohl für nicht-kohärente, laufzeitbasierte Lichtdetektion, als auch für kohärente Kreuzkorrelation der Pulse mit Interferenzstreifenbewertung. Für Messungen, die auf einer Auswertung der Kreuzkorrelationsfunktion basieren, wurde eine relative Messunsicherheit von ca. $3 \cdot 10^{-8}$ nachgewiesen [8].

3 Messung absoluter Längen mit einem Femtosekundenlaser

In der PTB wird im Rahmen eines EURAMET Projekts der Frequenzkamm eines Femtosekunden-Lasers als ein Frequenzmodulator der nächsten Generation verwendet. Der Vorteil eines Femtosekunden-Lasers als Strahlquelle ist die sehr große Anzahl der phasengekoppelten Frequenzen im Bereich von 100 MHz bis hin zu einigen zehn THz. Der zu Verfügung stehende Frequenzbereich ist daher sehr viel größer als bei konventionellen Instrumenten, deren Frequenzspektrum nur bis ca. 1 GHz reicht. Bei der Detektion von Femtosekunden-Pulsen mit einer modernen Hochgeschwindigkeitsfotodiode entsteht ein elektrisches Signal im Radio- und Mikrowellenbereich mit Harmonischen der Pulsrepetitionsrate bis hin zur Empfindlichkeitsfrequenzgrenze der Fotodiode (vgl. Bild 1).

Basierend auf der Phasendetektion zweier Kammlinien wurde ein relativ aufwandarmes Femtosekundenlaser-basiertes Längenmesssystem entwickelt. Ziel des Projekts ist es für Längen bis 1 km eine Messunsicherheit von besser als $10^{-6} L$ zu erreichen. Als Quelle wird ein modengekoppelter, Erbium-dotierter Femtosekunden-Faserlaser mit einer Wellenlänge von $\lambda = 780 \text{ nm}$ genutzt, dessen Pulse von 100 fs Breite eine Repetitionsrate von $f_{rep} = 100 \text{ MHz}$ aufwei-

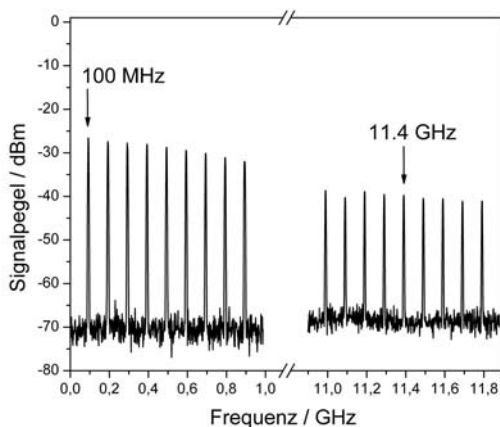


Bild 1: Frequenzkamm im Mikrowellenbereich bei Detektion der Femtosekundenpulse mit einer schnellen Fotodiode

sen. Eine Änderung in der Strahlengänglänge induziert kontinuierliche Phasenverschiebungen an jeder einzelnen Linie des Frequenzkammes. Das von der PTB entwickelte Längenmessgerät wertet nun die Phasenauswertung zweier Kammlinien aus, was eine direkte Aussage über die absolute Länge des durchlaufenden Strecke erlaubt. Die wichtigste Voraussetzung für dieses Verfahren ist eine sehr gute Stabilität der Pulsrepetitionsrate.

Der experimentelle Aufbau für der Optik ist in Bild 2a dargestellt. Die Optik und die Elektronik des Messgeräts wurden auf zwei unterschiedlichen Ebenen aufgebaut (vgl. Bild 2b). Der Laserstrahl wird mit dem polarisierenden Strahlteiler PST_1 aufgespalten. Der reflektierte Anteil wird auf die Hochgeschwindigkeitsfotodiode PD_{REF} fokussiert, mit der Frequenzen bis 25 GHz aufgelöst werden können. Hier entsteht das Referenzsignal in Form eines elektrischen Signals mit Frequenzkammlinien bis hin zu 25 GHz. Der Messstrahl wird aufgeweitet und zum interessierenden Messziel in Form eines Tripelspiegel-Retroreflektors weitergeleitet. Der rückreflektierte Strahl, wird schließlich auf die zweite schnelle Fotodiode PD_{MESS} fokussiert, wobei im Fourierraum der Frequenzkamm des Messsignals entsteht.

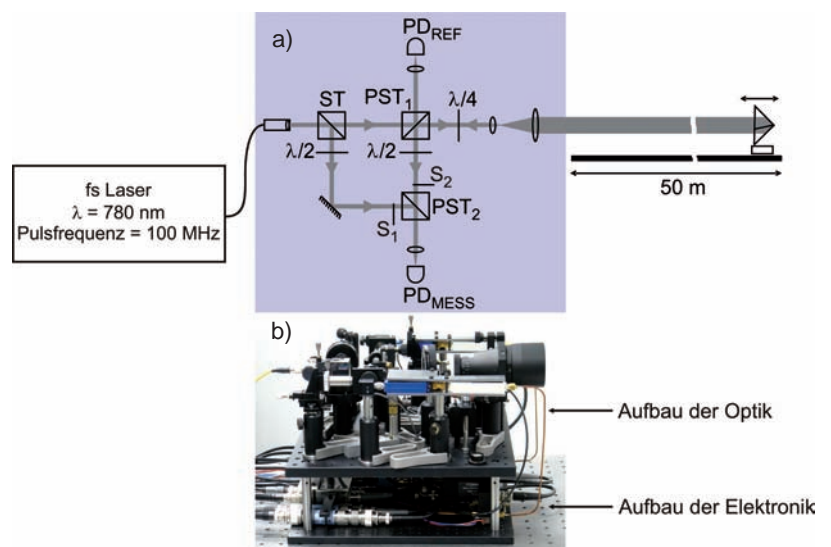
Die Ausbreitung der Femtosekundenpulse in Luft wird wegen der Dispersion von der Gruppenbrechzahl n_g bestimmt:

$$n_g = n - \lambda \frac{\partial n}{\partial \lambda} \tag{1}$$

wobei n der Phasenbrechzahl entspricht. Die relevante Gruppenbrechzahl in Luft wird mit Hilfe einer empirischen Formel aus den Luftparametern Druck, Temperatur, Feuchte und CO_2 -Gehalt ermittelt [9].

Die Messung besteht aus drei Einzelschritten. In einem ersten Schritt wird die Länge fein bestimmt, indem die Hochfrequenzlinie von

Bild 2: Optischer Aufbau



$f_1 = 11,4$ GHz ausgelesen wird. Weil in einer einzelnen Messung die Phase nur modulo 2π bestimmt werden kann, liefert der Phasenwert Φ_1 des 11,4 GHz Signals die Längeninformation L_1 innerhalb eines Eindeutigkeitsbereiches von $\Lambda_1 \approx 13$ mm:

$$L_1 = \frac{\Phi_1}{2\pi} \frac{c}{2f_1 n_g} = \frac{\Phi_1}{2\pi} \Lambda_1 \quad (2)$$

wobei c der Geschwindigkeit des Lichts in Vakuum und n_g der Gruppenbrechzahl der Luft bei $\lambda = 780$ nm entspricht. Um die Entfaltung dieses Ergebnisses zu ermöglichen wird im zweiten Schritt die Länge grob bestimmt:

$$L_2 = \frac{\Phi_2}{2\pi} \frac{c}{2f_{rep}} = \frac{\Phi_2}{2\pi} \Lambda_2 \quad (3)$$

indem der Phasenwert Φ_2 der ersten Linie des Frequenzkammes von $f_{rep} = 100$ MHz ausgelesen wird, womit ein Eindeutigkeitsbereich von $\Lambda_2 \approx 1,5$ m erhalten wird. Die Messunsicherheit muss hierbei unterhalb des halben Eindeutigkeitsbereiches des ersten Schrittes Λ_1 liegen [10]. Die Ordnung N_1 der Messung mit 11,4 GHz wird aus den Ergebnissen beider Teilmessungen bestimmt. Schließlich wird in einem dritten Schritt die Entfaltung des Resultates mit Λ_2 Periode durchgeführt. Durch eine definierte Variation der Pulsrepetitionrate nach $f'_{rep} = 100,1$ MHz wird die Phase der ersten Frequenzlinie modulationsabhängig ausgewertet. Die entstehende Phasenverschiebung ermöglicht eine grobe Bestimmung der Länge mit einer Messunsicherheit unter 1,5 m mit einem Eindeutigkeitsbereich $\Lambda_3 \approx 1,5$ km:

$$\Lambda_3 = \frac{c}{2(f'_{rep} - f_{rep}) n_g} \quad (4)$$

Damit kann die Ordnung N_2 der Messung mit 100 MHz bestimmt werden. Nach Kombination aller drei Einzelschritte, wie in [3] beschrieben, entsteht die Länge L der Gesamtstrecke als:

$$L = \text{floor} \left[\frac{N_2 \Lambda_2 + \frac{\Phi_2}{2\pi} \Lambda_2}{\Lambda_1} - \frac{\Phi_1}{2\pi} \Lambda_1 + \frac{1}{2} \right] \Lambda_1 + \frac{\Phi_1}{2\pi} \Lambda_1 \quad (5)$$

Die Elektronik des Aufbaus ist schematisch in Bild 3 dargestellt. Um Signalverlust zu vermeiden, werden zunächst mit Hilfe zweier Diplexer die Hochfrequenz- von den Niederfrequenzsignalen getrennt. Dafür werden die Hochfrequenzkammlinien über 500 MHz von den ersten fünf Niederfrequenzkammlinien bis 500 MHz abgeteilt.

Um die Phaseninformation für die hochaufgelöste Messung gewinnen zu können, wird eine Hochfrequenzkammlinie mit einem leicht unterschiedlichen Frequenzsignal eines Hochfrequenzgenerators gemischt. Dabei entstehen Schwebungen ZF_{MESS} und ZF_{REF} im Kilohertz Bereich. Diese zwei Zwischenfrequenzsignale werden gefiltert und zum Eingang eines Lock-In Verstärkers weitergeleitet, womit die Phasendifferenz zwischen Mess- und Referenzsignalen erfasst wird.

Die HF-Elektronik ist so sensitiv, dass kleinste Änderungen der äußeren Bedingungen zu Änderung in der detektierten Phasenlage führen (z. B. durch Temperatur-induzierte Längenänderungen der Zuleitungen). Zur Kompensation solcher Driften wird eine zusätzliche Referenzmessung verwendet. Wie in Bild 1 dargestellt, wird der von Strahlteiler ST und PST_2 ausgekoppelte Anteil des Laserstrahls auf der Photodiode PD_{MESS} aufgenommen, ohne die eigentliche Messstrecke durchlaufen zu haben. Dieses Signal dient zur Messung eines sehr kurzen und konstanten Abstandes. Mit Hilfe zweier mechanischer Shutter (S_1 und S_2) werden das Mess- und das zusätzliche Referenzsignal getrennt und sequenziell auf der Fotodiode PD_{MESS} aufgenommen. Weil die durch die Elektronik verursachte Phasenabweichung gleichermaßen auf der Mess- und Kurzstrecke auftritt, können durch Abzug des Referenzsignals solche Störungen vom eigentlichen Messsignal entfernt werden.

Bild 4a zeigt die derzeit erreichte Messunsicherheit für eine Versuchsstrecke von 100 m auf der Geodätischen Basis der PTB [11]. Der Vergleich der Ergebnisse mit den Daten eines HeNe-Referenzinterferometers belegt Messabweichungen von ca. $\pm 10 \mu\text{m}$ bei einer absoluten Messlänge von 100 m, was einer relativen Genauigkeit von $10^{-7} L$ entspricht. Die Abweichung der Grobmessung liegt unterhalb des halben Eindeutigkeitsbereiches der hochaufgelösten Messung (Vgl. Bild 4b)

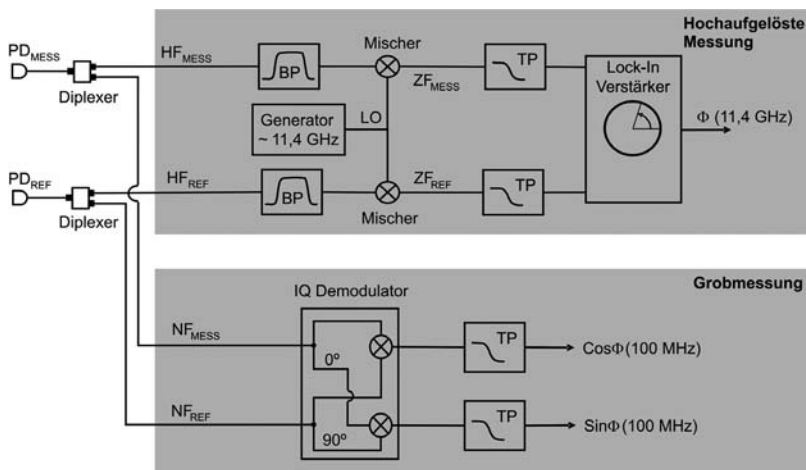


Bild 3: Die Elektronikanordnung zur Signalerfassung

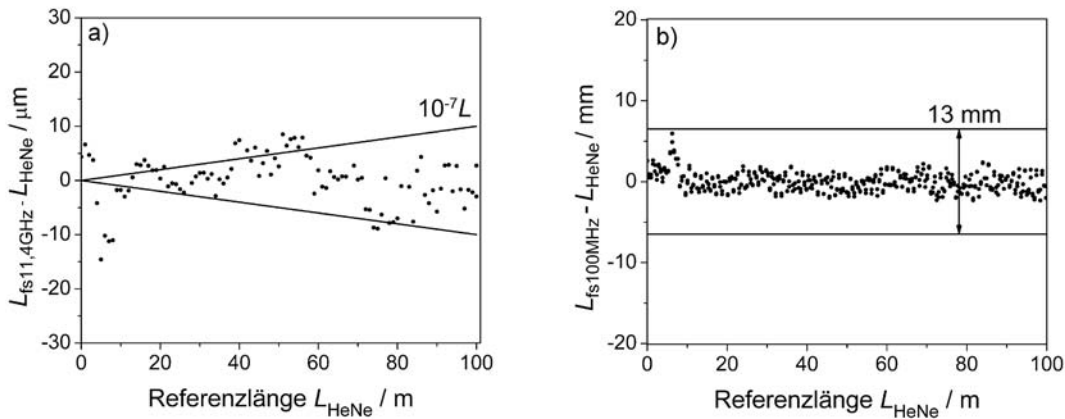


Bild 4:
Gemessene Längendifferenz zwischen einem inkrementellen Referenz-HeNe-Laserinterferometer und dem Femtosekunden-Messsystem für 11,4 GHz Signal (a) und 100 MHz Signal (b).

4 Zusammenfassung

Bei der Detektion von Femtosekundenlaserpulsen mit einer schnellen Photodiode entsteht ein Frequenzkamm im Mikrowellenbereich, der hochgenaue Abstandsmessungen über längere Distanzen ermöglicht. Ein auf diesem Prinzip basierendes System wurde in der PTB im Rahmen eines iMERA plus Projektes entwickelt und für Längenmessungen bis zu 100 m mit 10^{-7} L Abweichung erfolgreich getestet. Die Messverfahren des dritten Schrittes müssen noch implementiert werden. Weitergehende Messungen unter normalen Umweltbedingungen sind auf der 600 m Pfeilermessstrecke der PTB geplant.

5 Danksagung

Diese Arbeit ist Teil des Projekts „Long distance“ (Nr. T3.J3.1). Die innerhalb dieses EURAMET-Gemeinschaftsprojektes durchgeführte Forschung wird durch das siebte Rahmenprogramm der EU unter der Zuwendungsvereinbarung Nr. 217257 finanziell unterstützt. Weiterhin möchten sich die Autoren bei Dr. Harald Schnatz für wertvolle Anregungen, bei Tobias Meyer und Jens Beyer für die technische Unterstützung und bei Dr. Florian Pollinger für die gründliche Durchsicht der Arbeit bedanken.

6 Literatur

- [1] L. Hartmann, K. Meiners-Hagen and A. Abou-Zeid: An absolute distance interferometer with two external cavity diode lasers, *Meas. Sci. Technol.* **19** (2008), p. 045307
- [2] K. Meiners-Hagen, R. Schödel, F. Pollinger, A. Abou-Zeid: Multi-Wavelength Interferometry for Length Measurements Using Diode Lasers. *Measurement Science Review* **9** (2009), p. 16
- [3] F. Pollinger, K. Meiners-Hagen, M. Wedde, A. Abou-Zeid: Diode-laser-based high-precision absolute distance interferometer of 20 m range. *Applied Optics* **48** (2009), pp. 6188–6194
- [4] K. Minoshima and H. Matsumoto: High-accuracy measurement of 240-m distance in an optical tunnel by use of a compact femtosecond laser. *Applied Optics* **39** (2000), pp. 5512–5517
- [5] Ki-Nam Joo, Yunseok Kim, and Seung-Woo Kim: Distance measurements by combined method based on a femtosecond pulse laser. *Optics Express* **16** (2008), pp. 19799–19806
- [6] Petr Balling, Petr Kren, Pavel Mašika, and S. A. van den Berg: Femtosecond frequency comb based distance measurement in air. *Optics Express* **17** (2009), pp. 9300–9313
- [7] J. Ye: Absolute measurement of a long, arbitrary distance to less than an optical fringe. *Optics Letters* **29** (2004), pp. 1153–1155
- [8] M. Cui, M. G. Zeitouny, N. Bhattacharya, S. A. van den Berg, H. P. Urbach, and J. J. M. Braat: High-accuracy long-distance measurements in air with a frequency comb laser. *Optics Letters* **34** (2009), pp. 1982–1984
- [9] K. Meiners-Hagen and A. Abou-Zeid: Compensation of refractive index of air, 7th International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology (euspen). Bremen, 20–24, May, 2007
- [10] F. Pollinger, K. Meiners-Hagen, A. Abou-Zeid: Absolutlängen mittels Mehrwellenlängen-Diodenlaserinterferometrie. *PTB-Mitteilungen* **120** (2010), S. 105
- [11] M. Wedde, K. Meiners-Hagen, A. Abou-Zeid: *Geodätische Basis: Interferometrische Kalibrierung von Strichmaßen, Laserinterferometern und Entfernungsmessgeräten*. *PTB-Mitteilungen* **120** (2010), S. 115

„Altes“ Material in „neuen“ Bändern

Ingo Lohse¹, Michael Voigt²

Die Materialanforderungen an verkörperte Längenmaße unter dem Blickwinkel der Europäischen Messgeräte-Richtlinie (MID) und der OIML R35 betrachtet

Die Anforderungen an verkörperte Längenmaße sind durch die Einführung der Europäischen Messgeräte-Richtlinie (MID) [1] und der Verabschiedung der OIML-Empfehlung R35 [2] auf eine neue Grundlage gestellt worden. Die alte EWG-Richtlinie 73/362/EWG vom 19. November 1973 wird durch die neue OIML R35 abgelöst, in der die technischen Anforderungen der alten EWG-Richtlinie jedoch weitestgehend wieder zu finden sind. Die Empfehlung macht z. B. eine konkrete Vorgabe zu den Strichbreiten auf den verkörperten Längenmaßen. In den Teilen 2 und 3, welche noch den Entwurfsstatus haben, wird das Verfahren zur Auswertung beschrieben. Durch die zeitlich unterschiedliche Verabschiedung der Europäischen Messgeräte-Richtlinie (MID) und der OIML R35 ist eine Implementierung dieser Empfehlung in die Mitteilung der Kommission im Rahmen der Umsetzung der MID (2006/ C 269/01) [3] noch nicht erfolgt. Dies bedeutet auch, dass die technischen und grundlegenden Anforderungen nicht eindeutig gegenüber gestellt und durch die Europäische Union beschlossen worden sind. Insbesondere vor dem Hintergrund der fehlenden Übernahme in die Mitteilung zur Umsetzung (2006/ C 269/01) stellt zum augenblicklichen Zeitpunkt die MID mit ihren Anforderungen eine Untermenge der OIML R35 dar.

In dieser Situation müssen die Aussagen zu den technischen Anforderungen aus rechtlicher und technischer Sicht differenziert betrachtet werden. Eine wesentliche Rolle spielt hierbei die Wahl der Werkstoffe. Die MID sieht im Anhang MI-008 unter der Überschrift spezifische Anforderungen zwei Abschnitte hierfür vor. Im ersten Abschnitt wird im Teil Referenzbedingungen auf eine die Länge beeinflussende Zugkraft eingegangen. Der zweite Abschnitt mit der Überschrift Werkstoffe trifft Aussagen über die Längenänderung bei Abweichungen von der Referenztemperatur. Die in diesen beiden Abschnitten getroffenen Aussagen sollen im

Folgenden näher betrachtet werden. Im Vordergrund stand dabei die Fragestellung, ob die verwendeten Werkstoffe so gewählt wurden, dass die Richtlinienforderungen erfüllt sind, damit bei Abweichungen von der Referenztemperatur (im Normalfall 20 °C) um ± 8 K die Fehlergrenzen eingehalten werden. Setzt man diese Anforderung um, lassen sich Funktionen (Bild 2) in Abhängigkeit des thermischen Ausdehnungskoeffizienten und der Nennlänge unter Berücksichtigung der Genauigkeitsklassen berechnen. Die MID legt für besondere verkörperte Längenmaße wie z. B. Gliedermaßstäbe oder Peilmessbänder Einschränkungen in der Wahl der Genauigkeitsklassen fest. Jedoch ist die Einstufung in die drei Genauigkeitsklassen für Taschen- oder Rollmessbänder frei wählbar.

In diesem Artikel werden Ergebnisse zur thermischen Ausdehnung von verkörperten Längenmaßen vorgestellt. Die Messungen des thermischen Ausdehnungskoeffizienten wurden mit dem in [4] vorgestellten Gerät durchgeführt. Um einen repräsentativen Querschnitt aller Längenmaße zu erhalten, wurde eine quantitative Abschätzung der auf dem Markt befindlichen verkörperten Längenmaße durchgeführt. Als Ergebnis dieser Abschätzung wurden 17 zertifizierte Längenmaße verschiedener Werkstoffe aus verschiedenen Herstellerländern gemessen.

Bei der Vielzahl der im Handel befindlichen verkörperten Längenmaße erfolgte eine Einteilung entsprechend der Gliederung der OIML R35. Gemessen wurden drei Gliedermaßstäbe, davon zwei aus Kunststoff und einer aus Holz, vier Taschenbandmaße aus gewölbtem Stahl und neun Rollbandmaße, davon acht aus Kunststoff und eins aus Stahl, sowie ein Schneiderbandmaß. Alle gemessenen Längenmaße wurden im Losverfahren einer Serienproduktion entnommen.

Für die zu ermittelnden Längenänderungen wurde der thermische Ausdehnungskoeffizient aller Längenmaße mit der in Bild 1 dargestellten Messeinrichtung bestimmt [4].

Die Messung der Längenänderung der Prüflinge erfolgte mittels eines interferometrischen Messverfahrens. Die Prüflinge wurden unter Federspannung zwischen zwei Tripelspiegeln

¹ Ingo Lohse, Arbeitsgruppe „Zulassung von Längenmessmaschinen“

E-Mail: ingo.lohse@ptb.de

² Michael Voigt, Arbeitsgruppe „Längenteilungen“

E-Mail: michael.voigt@ptb.de

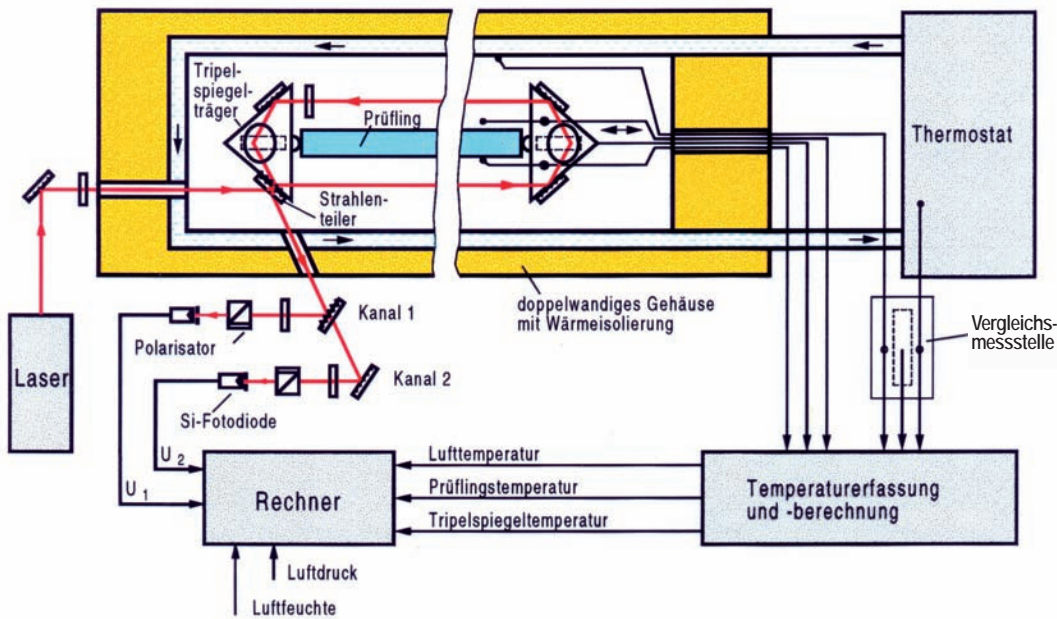


Bild 1: Alpha-Messeinrichtung zur Bestimmung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten

eines speziellen Polarisationsinterferometers eingespannt. Einer der Tripelspiegel ist beweglich, so dass sich bei einer Längenänderung des Prüflings der Abstand der beiden Tripelspiegel verändert, was vom Interferometer erfasst wird. Als Strahlungsquelle diente ein frequenzstabilisierter HeNe-Laser der Wellenlänge von $0,6328 \mu\text{m}$. Prüflinge und Interferometer waren in einer thermisch isolierten Box mit integrierten Wasserkreisläufen montiert, deren Innentemperatur über temperiertes Wasser reguliert wird. Mittels computergesteuerter Wasserumwälzthermostate wurden nacheinander konstante Temperaturniveaus im Gehäuse eingestellt.

Wird die Temperatur verändert, so ändert sich die Länge des Prüflings in guter Näherung proportional zu seinem thermischen Ausdehnungskoeffizienten und zur Temperatur. Zur Bestimmung der Temperatur der Prüflinge, der Tripelspiegel und der relevanten Umgebung wurden Pt-100-Widerstandsthermometer verwendet. Um den Brechungsindex der Luft im Gehäuse zu bestimmen wurden zusätzlich der Luftdruck und die Luftfeuchte bestimmt. Aus der infolge der Temperaturänderung eingetretenen Längenänderung wurde der thermische Ausdehnungskoeffizient berechnet.

Die thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Prüflinge, in diesem Fall 1-m-Abschnitte innerhalb der Nennlänge, konnten mit einer Messunsicherheit von $\pm 8 \cdot 10^{-8} \text{ K}^{-1}$ bestimmt werden.

Schneiderbandmaße auf dem Prüfstand

Die Messungen für den zu ermittelnden thermischen Ausdehnungskoeffizienten wurden mit den Schneiderbandmaßen gestartet. Gleich zu Beginn der Messreihen traten aber bei diesem Typ von verkörpertem Längenmaßen eine Reihe

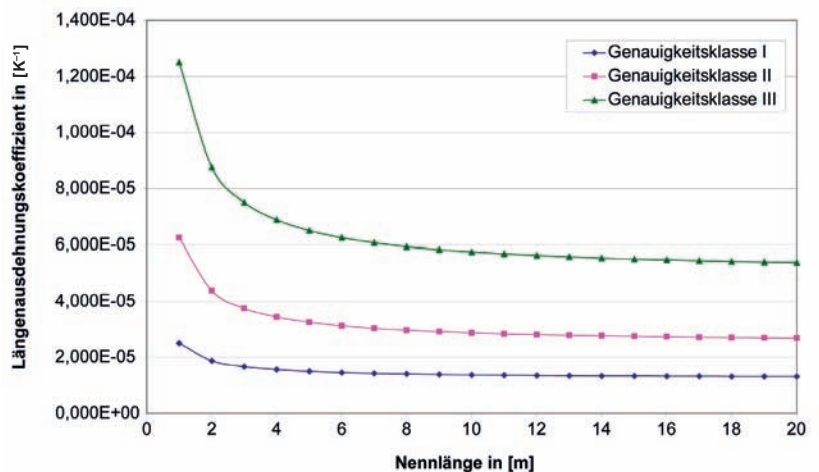


Bild 2: Der thermische Ausdehnungskoeffizient in Abhängigkeit der Nennlänge

von Schwierigkeiten auf. Nach der Bestimmung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten unter den verschiedensten Randbedingungen zeigte sich, dass eine unerwünschte Krafteinwirkung auf das Schneiderbandmaß durch die Messeinrichtung selbst verursacht wurde. Selbst Kräfte von weniger als 10 N bewirkten, dass sich das Bandmaß kontinuierlich ausdehnte. Diese mechanische Ausdehnung überlagerte die thermische, so dass kein eindeutiger thermischer Ausdehnungskoeffizient bestimmt werden konnte.

Die Gliedermaßstäbe oder umgangssprachlich Zollstöcke

In der Kategorie der Gliedermaßstäbe, welche aus den Werkstoffen Holz und Kunststoff bestanden, sollte ebenfalls der thermische Ausdeh-

nungskoeffizient bestimmt werden. Bei Gliedermaßstäben aus Holz ist laut OIML-Empfehlung R35 die Genauigkeitsklasse I ausgeschlossen. Auch bei der MID werden nur die Genauigkeitsklassen II oder III vergeben, wenn eine Änderung des Längenmaßes durch den Einfluss unterschiedlicher relativer Luftfeuchten vorliegt. Bei Gliedermaßstäben aus Kunststoff erlaubt die MID allerdings auch die Vergabe der Genauigkeitsklasse I.

Für Gliedermaßstäbe aus Holz ist der Einfluss der relativen Luftfeuchte in der Messeinrichtung zu berücksichtigen. Der Einfluss der relativen Luftfeuchte auf die Gliedermaßstäbe konnte ermittelt werden. Dieser Einfluss auf den thermischen Ausdehnungskoeffizienten konnte auch für einen einzelnen Gliedermaßstab quantifiziert werden. Es zeigt sich jedoch, dass bei der Messung von mehreren Gliedermaßstäben aus Holz Schwankungsbreiten des thermischen Ausdehnungskoeffizienten von über 50% auftraten, was, wie sich zeigte, auf die Wahl der Maserung des Holzes beim Produktionsprozess zurück zu führen ist. Somit konnten auch für Holz-Gliedermaßstäbe kein thermischer Ausdehnungskoeffizient bestimmt werden, der für eine gesamte Serie Gültigkeit besitzt.

Die ausgewählten Gliedermaßstäbe aus Kunststoff oder Verbundwerkstoffen wie z. B. glasfaserverstärktem Kunststoff ermöglichten im Gegensatz zum Werkstoff Holz eine gute Bestimmung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten. Alle ermittelten Koeffizienten lagen um $50 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ mit einer Messunsicherheit von $\pm 5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Bei solch einem thermischen Ausdehnungskoeffizienten ist es für Gliedermaßstäbe aus dem o. g. Materialien für gängige Raumtemperaturen nicht oder kaum noch möglich, die Genauigkeitsklasse I oder II einzuhalten (siehe Bild 2).

Taschenbandmaße

Die Kategorie der Taschenbandmaße aus gewölbtem Stahl zeigte durchweg zufriedenstellende Ergebnisse für die Möglichkeit der Einhaltung der Genauigkeitsklasse I. Die gemessenen thermischen Ausdehnungskoeffizienten lagen für alle Taschenbandmaße bei $11,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ mit einer Messunsicherheit von $\pm 2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Die große Gruppe der Rollbandmaße

Ein besonderes Augenmerk lag auf der Kategorie der Rollbandmaße aus Kunststoff oder Verbundwerkstoffen. Bei diesen Maßen hat nach MID und OIML R35 die anzuwendende Zugkraft und der Längenausdehnungskoeffizient einen Einfluss auf die Einhaltung der Genauigkeitsklassen. Die zu vermessenden Rollmessbänder wurden im ersten Versuchsdurchlauf mit einer Zugkraft von 9 N gespannt, entgegen

der auf den Bändern aufgeprägten Zugkraft von üblicherweise 20 N. Diese Zugkraft von 9 N bewirkte aber bei der Messung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten bereits eine kontinuierliche Dehnung des Bandes. Deshalb war es nicht möglich, einen thermischen Ausdehnungskoeffizienten mit der für diese Bänder angegebenen Zugkraft zu quantifizieren. Erst eine Reduzierung der Zugkraft auf 3,5 N ermöglichte die Bestimmung des Koeffizienten. Alle gemessenen Rollmessbänder aus Kunststoff oder Verbundwerkstoffen liegen mit den thermischen Ausdehnungskoeffizienten zwischen $7,2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ und $9,7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Diese Koeffizienten, der vom Hersteller ausgewählten Werkstoffe, eignen sich grundsätzlich für die Produktion von Bandmaßen mit einer Genauigkeitsklasse I.

Fazit

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass für eine Vielzahl der zertifizierten verkörperten Längenmaße ein Werkstoff zu wählen ist, der die OIML-Empfehlungen und die Forderungen der MID einhält. In den Randbereichen wie z. B. bei den Schneiderbandmaßen oder Gliedermaßstäben aus Holz fällt eine Einhaltung der technischen Anforderungen sehr schwer. Dennoch gibt es durchaus ein breites Spektrum an verkörperten Längenmaßen die sämtliche Anforderungen erfüllen, wie z. B. die Taschenbandmaße oder diverse Rollbandmaße.

Das Einpflegen der OIML-Empfehlungen R35 als ein technisch untersetzendes Dokument für die MID, sollte deshalb mit sehr viel Augenmaß geschehen, um nicht Anforderungen aufzustellen, die weltweit noch nicht eingehalten werden können.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei Herrn Dr. Michael Wolf für fachlich nützliche Diskussionen und Herrn Tobias Meyer für die Vorbereitung der Messungen.

Literatur:

- [1] Richtlinie 2004/22/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 31. März 2004 über Messgeräte
- [2] International Organization of Legal Metrology, International Recommendation OIML R35-1 Edition 2007 (E)
- [3] Mitteilung der Kommission im Rahmen der Umsetzung der Richtlinie 2004/22/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 31. März 2004 über Messgeräte
- [4] Suska, J.; Tschirmich, J.: An Interferometric Device for Precise Thermal Expansion Measurements on Bar-shaped Materials. *Measurement Science and Technology* **10** (1999), N55–N59

Zulassung gestern, Zertifizierung heute

Ingo Lohse¹, Rudolf Mascherek², Ahmed Abou-Zeid³

1 Einleitung

Die Messung der Länge ist neben der Massebestimmung eine der tragenden Säulen im amtlichen und geschäftlichen Verkehr. Einheitliche Maße und Gewichte waren schon im Altertum die Grundlage für Aufstieg und Bestand der uns bekannten Großreiche. Bei den Ägyptern war man auf Längenmessungen angewiesen, die sich vergleichen lassen. Dazu benutzten diese so genannte Körpermaße wie z. B. Elle oder Fuß. Viele weitere Kulturen übernahmen die ägyptischen Längenmaße. In der Antike wurden dann auch andere Maße für die Länge wie z. B. Stadion (griechisch) und Meile eingeführt. Im 2. Jahrhundert n. Chr. galten 2200 Meter als gallische Meile (= Leuge, lat. Leuca), diese war in den gallischen und germanischen Provinzen des Römischen Reiches gültig. So entwickelten sich viele Längenmaße bis zum heutigen Meter, das seit 1875 mit dem Beitritt zur Internationalen Meterkonvention in Deutschland als einheitliches Längenmaß gilt.

Längenmessungen, die heutzutage als Basis für eine Preisermittlung dienen und somit dem amtlichen oder geschäftlichen Verkehr unterliegen, sind vielen von uns vertraut. Die einfachste Art dieser Messung kann mit einem Taschenbandmaß durchgeführt werden.

Weniger bekannt sind spezielle Messeinrichtungen für Längen-, Flächen- und Volummessungen in den verschiedensten Produktbereichen wie z. B. bahnförmige Güter (Stoffe, Bänder und Kabel), Frachtgüter oder auch in der Lebensmittelindustrie im Bereich Schlachtvieh [1]. Hierbei entstand seitens der Gesetzgebung seit Einführung der Europäischen Messgeräte Richtlinie 2004/22/EG (MID) eine Aufteilung der gesetzlichen Regelungen für Produkte, die nach gesetzlichen Längeneinheiten abgerechnet werden. Für Rundholzmessanlagen (welche Stammholz vermessen) und für Choirometer (zur Klassifizierung von Schweineschlachtkörpern) gibt es in Deutschland innerstaatliche Anforderungen nach dem Eichgesetz. Für im weitesten Sinne textile Produkte, Kabel, Frachtgüter und verkörperte Längenmaße, um nur einige der wichtigsten Produkte zu nennen,

gilt seit Oktober 2006 die MID. Diese Richtlinie regelt das in Verkehr bringen der Maßverkörperungen und Geräte zur Messung der Längen und ihrer Kombinationen u. a. in den Anhängen MI-008 und MI-009. In diesen beiden Anhängen sind die messgerätespezifischen Anforderungen beschrieben.

In Deutschland fällt die Zulassung bzw. Zertifizierung von solchen Messgeräten in den Zuständigkeitsbereich des Fachbereichs 5.4 „Interferometrie an Maßverkörperungen“ der PTB, insbesondere der Arbeitsgruppe 5.45 „Zulassung von Längenmessmaschinen“.

Im Folgenden wird ein kurzer Einblick in die metrologische Tätigkeit im Rahmen der innerstaatlichen Bauartzulassung und der Konformitätsbewertungsverfahren nach Modul B der MID zu den o. g. Messeinrichtungen anhand von einigen Beispielen gegeben.

2 Längenmessgeräte mit Bauartzulassungen nach innerstaatlichen Anforderungen

2.1 Rundholzmessanlagen

Deutschland hat im Jahr 2007 deutlich mehr Rohholz in andere Länder exportiert als aus dem Ausland importiert. Wie das Statistische Bundesamt (Destatis) in Wiesbaden mitteilt, stand der Einfuhr von 4 Millionen Kubikmetern Rohholz im Wert von 346 Millionen Euro die Ausfuhr von 6,7 Millionen Kubikmetern im Wert von 515 Millionen Euro gegenüber.

Mit Rundholzmessanlagen werden die Länge und der Durchmesser von Holzstämmen automatisch gemessen. Bei modernen Rundholzmessanlagen besteht außerdem noch die Möglichkeit, einen Vollkontur-Scan über die gesamte Oberfläche des Stammes durchzuführen. Die aus diesen Daten berechneten Volumina bilden, zusammen mit einer Qualitätsbewertung nach holzwirtschaftlichen Kriterien, die Grundlage für die Entgeltberechnung. Die Messanlagen unterliegen somit der Eichpflicht.

Für die Messung der Stammdurchmesser kommen sowohl optische als auch akustische Messverfahren, unter Verwendung von so genannten „Parallellichtvorhängen“ bzw. Ultra-

¹ Ingo Lohse, Arbeitsgruppe „Zulassung von Längenmessmaschinen“, E-Mail: ingo.lohse@ptb.de

² Rudolf Mascherek, Arbeitsgruppe „Zulassung von Längenmessmaschinen“, E-Mail: rudolf.mascherek@ptb.de

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

schallsensoren, zum Einsatz. Im ersten Fall wird ein dem Durchmesser proportionales „Schattenbild“ des Holzstammes auf den Sensoren erzeugt. Im zweiten Fall ergibt sich der Stammdurchmesser aus Laufzeitmessungen von Ultraschallimpulsen in Verbindung mit der bekannten Ultraschallgeschwindigkeit und der Geometrie der Messstelle [2–4].

Ein weiteres optisches Messverfahren (siehe Bild 1) verwendet Lichtschnittsensoren. Hierbei wird Laserlicht derart auf die Stammoberfläche projiziert, dass eine kreisförmige Lichtlinie entsteht. Diese Lichtlinie wird mit CCD-Kameras aufgenommen und in Durchmesserwerte umgerechnet. Die Stammlänge und die Lage der Durchmesserwerte längs des Stammes werden, bei allen oben geschilderten Verfahren, mit Hilfe eines mit dem jeweiligen Stammförderer gekoppelten Rotationsimpulsgebers bestimmt.

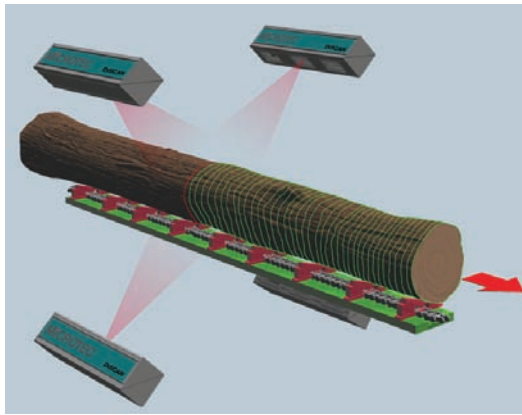


Bild 1:
Eine Rundholzmessanlage nach dem aktuellen Stand der Technik

2.2 Choirometer

Choirometer sind Längenmessgeräte, die an einer gesetzlich vorgegebenen Stelle die Länge zwischen Haut und Rippe von Schweineschlachtkörpern (SK) messen, um daraus mit zugelassenen Fleischformeln deren Muskelfleisch- und Speckanteil zu bestimmen. Der Name Choirometer wurde von der PTB eingeführt. Er ist aus dem Griechischen abgeleitet, als Kombination der Begriffe choiros = Schwein und metros = Maß.

In der deutschen Umsetzung entsprechender EU-Verordnungen ist festgelegt, dass in Betrieben, die durchschnittlich wöchentlich mehr als 200 Schweine schlachten, die Einzelmesswerte oder Variablen zur Ermittlung des Muskelfleischanteils durch geeichte Geräte erhoben und automatisch protokolliert werden müssen. Sämtliche Schlachthöfe, die die o. g. Voraussetzungen erfüllen, müssen seit 1991 zur Klassifizierung jeden Schlachtkörper mit Choirometern erfassen, welche eine innerstaatliche Bauartzulassung haben und geeicht sind.

Man unterscheidet aufgrund der verschiedenen physikalischen Messtechniken zwischen Choirometer-Bauarten in optoelektronischen

Ausführungen, die invasiv arbeiten, Ultraschall-Ausführungen (siehe Bild 2), bei denen der Messkopf auf die Oberfläche des Schlachtkörpers aufgesetzt wird und vollautomatischen Choirometern, die ganze Schweine klassifizieren [5]. Im letzten Fall werden diese rücklings über ein Array mit 16 Ultraschallköpfen gezogen. Dabei werden die Messfrequenz und die Geschwindigkeit des Förderers so synchronisiert, dass in äquidistanten Abständen Querschnittsbilder entstehen. Für einen Schlachtkörper werden so bis zu 200 Schnittbilder erzeugt. Aus diesen 3200 Einzelmessungen berechnet das System automatisch mit Hilfe eines umfangreichen Algorithmus den Muskelfleischanteil als Endergebnis.

Zurzeit ist ein Choirometer, welches mittels digitaler Bildauswertung den prozentualen Muskelfleischanteil der Schlachtkörper bestimmt, noch in der Zulassungsphase. Entsprechende Messeinrichtungen zur Klassifizierung von Rindfleisch sind in naher Zukunft zu erwarten. Herstellerseitig sind die EU-Zulassung und die innerstaatliche Bauartzulassung für neue Messeinrichtungen beantragt, welche auf digitaler Bildauswertung der Schnittflächen der SK basieren, die gesetzlich vorgeschriebene Messstelle automatisch lokalisieren und die eigentlichen Längenmessungen ausführen.



Bild 2:
Ein Klassifizierungsautomat vom Typ UltraFom 300

3 Längenmessgeräte mit Konformitätsbewertungsverfahren nach Richtlinie 2004/22/EG (MID)

Seit dem 30.10.2006 wird in allen Mitgliedsstaaten des Europäischen Wirtschaftsraumes (EWR = EU + EFTA) die Europäische Messgeräterichtlinie 2004/22/EG angewandt.

Für Maßverkörperungen und Geräte zur Messung von Längen und ihrer Kombinationen ist seitdem eine Ausstellung von innerstaatlichen bzw. EWG-Bauartzulassungen nicht mehr möglich.

Hersteller, die Maßverkörperungen (Anhang MI-008) oder Geräte zur Messung von Längen und ihrer Kombinationen (Anhang MI-009) in den Verkehr bringen wollen, benötigen eine EG-Baumusterprüfbescheinigung, eine EG-Entwurfsprüfbescheinigung oder eine

QM-Anerkennung gemäß MID. Um diese zu erhalten, ist ein erfolgreich durchgeführtes Konformitätsbewertungsverfahren mit Beteiligung einer benannten Stelle erforderlich. Durch die europäische Harmonisierung ist das ausgestellte Zertifikat im gesamten EWR gültig.

3.1 Verkörperte Längenmaße

Die verkörperten Längenmaße haben in der Geschichte des Zulassungswesens wahrscheinlich den größten Wandel erfahren. Zum einen werden die verkörperten Längenmaße immer mehr durch berührungslose Längenmesssysteme ersetzt, zum anderen werden immer weniger verkörperte Maße eingesetzt, um deren Messwerte im amtlichen oder geschäftlichen Verkehr zu verwenden.

Verkörperte Längenmaße sind laut Begriffsbestimmung Längenmessgeräte mit Einteilungsmarken, deren Abstände in gesetzlichen Längeneinheiten angegeben sind. Die messtechnischen Prüfungen von solchen Längenmaßen, wie z. B. Gliedermaßstäbe und Messbänder, werden in der PTB auf dem 50 m-Komparator (geodätische Basis) durchgeführt. Dieser Komparator hat einen Messbereich von 0,5 m bis 50 m. Die von der jeweiligen Prüflingsnennlänge abhängige erweiterte Messunsicherheit beträgt 40 µm bis 150 µm.

Zu der Gruppe der berührungslos messenden Längenmessgeräte gehören auch die optischen Entfernungsmessgeräte. Sie verwenden in der Regel amplitudenmoduliertes Laserlicht zur Längenmessung. Hierbei wird ein Phasenvergleich zwischen dem ausgesandten und dem vom Zielobjekt reflektierten Licht durchgeführt. Die Kalibrierung solcher optischen Entfernungsmessgeräte, mit einem Messbereich bis 50 m, erfolgt ebenfalls auf dem 50 m-Komparator (erweiterte Messunsicherheit von 105 µm) durch Vergleichsmessungen mit interferometrisch gemessenen Längen.

Für Entfernungsmessgeräte mit einem Messbereich bis zu 600 m steht auf dem Außengelände der PTB eine Pfeilerstrecke zur Verfügung. Die Gruppe der berührungslos messenden Längenmessgeräte unterliegt nicht der Europäischen Messgeräte Richtlinie.

3.2 Längenmessgeräte für bahn- oder strangförmige Messgüter

Längenmessungen an bewegten, bahnförmigen Messgütern, wie z. B. textile Stoffe, Kunststoffe, Folien, technische und Hygienevliese, aber auch an Flach- und Rundkabeln werden meist berührend durchgeführt [6]. Ein Messrad mit bekanntem Umfang rollt dabei auf dem sich bewegenden Messgut ab und ist kraft- oder form-schlüssig mit einem Impulsgeber verbunden. Der Drehwinkel des Messrades ist ein Maß für die maschinell gemessene Länge, die auf dem Display vom Zählwerk angezeigt wird.

Die Ansprüche an die Konstruktion derartiger Längenmessgeräte sind sehr hoch, da eine Reihe von Fehlerquellen berücksichtigt werden muss. So führen ein unzureichender Kraftschluss zwischen Messrad und Messgut, eine unzulässige Dehnung des Messgutes während der maschinellen Messung, besondere Oberflächeneigenschaften (Textilien mit Florcharakter) und eine an der Messstelle gekrümmte Messgutführung zu Messfehlern [7].

Zur Vermeidung von mechanischen Fehlerinflüssen gehen immer mehr Hersteller von Längenmessmaschinen dazu über, berührungslose Längenmessenrichtungen zu verwenden. Diese arbeiten im Allgemeinen nach dem Laser-Doppler-Prinzip [8]. Die Einflüsse von möglichen optischen Fehlerquellen (z. B. Farbe des Messgutes) sind wesentlich geringer. Es ist allerdings nicht zu erwarten, dass die taktile Messtechnik vollständig von der berührungslosen verdrängt wird. Vielmehr werden sich die Verfahren dergestalt ergänzen, dass je nach Messaufgabe und Material die eine oder andere Messtechnik eingesetzt wird [9].

3.3 Flächenmessgeräte

Die Fläche unregelmäßig begrenzten Messguts, insbesondere von Lederhäuten, wird in den Fabriken mit Hilfe spezieller Flächenmessgeräte bestimmt. Diese Maschinen gliedern das Messgut in Streifen gleicher Breite und unterteilen diese Streifen in Abschnitte gleicher Länge. Die früher weit verbreiteten konventionellen mechanischen Stiftrad-Messmaschinen, bei denen das Messgut von radial in Rädern verteilten Stiften abgetastet und von einer unterhalb der Räder angeordneten Förderwalze transportiert wurde, sind weitgehend durch neue Maschinengenerationen ersetzt worden. Diese arbeiten zwar auch mit mechanischer Abrollung, jedoch mit elektronischer Messwertbildung und Weiterverarbeitung [10]. Bei neuesten Entwicklungen wird das Messgut berührungslos optisch abgetastet und mit Hilfe einer bandartigen Fördereinrichtung durch die Maschine geführt (siehe Bild 3).



Bild 3:
Flächenmessgerät mit
Durchlichtprinzip

Bei Leder hängen die das Flächenmaß beeinflussenden Eigenschaften dieser Messgutart von den Umgebungsbedingungen, dem mechanischen Spannungszustand und der Ebenheit des Leders ab [11].

Flächenmessgeräte werden mit Normalflächen geprüft, die aus Gummi oder Kunststoff bestehen und in der Querschnittsmittte durch eine Gewebeeinlage verstärkt sind. So ähneln die Normalflächen in ihrem Biegeverhalten flexiblem Leder, verändern jedoch unter mechanischen Einflüssen ihren Flächeninhalt nicht. Als geometrische Normalflächenform wurde der Kreis gewählt, weil mit Hilfe einfacher Durchmesserbestimmungen der richtige Wert des Flächeninhalts innerhalb der vom Hersteller festgelegten Fehlergrenzen messbar ist.

3.4 Messeinrichtungen für Frachtstücke

Die Ausweitung des weltweiten Handels hat das Frachtaufkommen stetig steigen lassen. Die daraus resultierende millionenfache Versendung von Frachtstücken erfordert einen hohen logistischen Aufwand, denn zur Ermittlung des Beförderungsentgeltes muss jedes Frachtstück vermessen werden. Um große Stückzahlen zu bewältigen, werden die Messungen bei hoher Geschwindigkeit durchgeführt. Die führenden Logistikunternehmen setzen dazu mehrdimensionale Messeinrichtungen ein, die berührungslos die Volumina der Frachtstücke bestimmen. Sie sind typischerweise in Verbindung mit Transportbändern in Frachtverteilzentren installiert (siehe Bild 4) und arbeiten vollautomatisch [12].

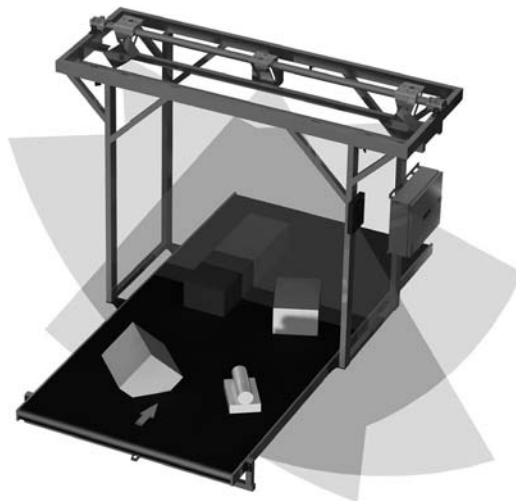


Bild 4:
Mehrdimensionale Messeinrichtung für Frachtstücke

Das Volumen von Frachtstücken ist konform nach Richtlinie 2004/22/EG (MID) als kleinster, das Messobjekt umschließender Quader definiert. Dieses Quadermaß ergibt sich aus drei senkrecht zueinander stehenden Längenmessungen. Beim Einsatz herkömmlicher Verfahren werden die Breite und die Höhe des kleinsten, das Messobjekt umhüllenden Quaders durch optische Abtastung und die Länge mit Hilfe eines

inkrementalen Drehimpulsgebers bestimmt. Aktuelle Messeinrichtungen arbeiten nach dem Prinzip der Lichtlaufzeitmessung: Die eigentliche Messgröße dieses Verfahrens ist die Phasenverschiebung des ausgesendeten Signals. Ein amplitudenmodulierter Laserstrahl wird über ein rotierendes Spiegelpolygon zu einem Lichtfächer aufgeweitet, der vom Messobjekt und der Transportbandoberfläche reflektiert wird. Aus der Messung der Laufzeit des reflektierten Lichtes wird auf die Kontur und den höchsten Punkt des Messobjektes relativ zur Bandoberfläche geschlossen. Der Vorschub des Transportbandes und somit die dritte Dimension der Messobjekte wird von einem Inkrementalgeber mit hoher Auflösung abgetastet. Durch die Bandbewegung entsteht so ein zweidimensionales Netz von Höheninformationen über das Messobjekt. Daraus wird der kleinste, das Messobjekt umschließende Quader berechnet.

Aufgrund der Integration solcher Messeinrichtungen in automatisierte Sortieranlagen ist eine vollständige Zulassungsprüfung häufig zweigeteilt. Die grundsätzlichen metrologischen Eigenschaften der jeweiligen Messverfahren werden in der Regel unter Laborbedingungen nach der internationalen Empfehlung OIML-R129 vorgeprüft. Hierbei sind die Abhängigkeit der Messergebnisse von der Gestalt, der Farbe und der Oberfläche der Messobjekte sowie von den Umgebungsbedingungen, wie Licht, Temperatur und Feuchte wesentliche Prüfungskriterien. Der zweite Teil der Zulassungsprüfung wird vor Ort durchgeführt und hat die Prüfung von Sonderfunktionen sowie Tests zur Software-sicherheit zum Inhalt. Die Zahl und Beschaffenheit der Prüfkörper wird im Rahmen der EG-Baumusterprüfbescheinigung festgelegt [13]. Praktischerweise handelt es sich um formstabile Körper einfacher, meist kubischer Geometrie, die den alltäglich zu messenden Frachtstücken nahe kommen. Die Fehlergrenze beträgt für Länge, Breite und Höhe $1,0 \cdot d$ (d ist der Teilungswert der Messwertanzeige).

Die weiter zunehmende Internationalisierung des Marktes für Transportdienstleistungen hat eine verstärkte Nachfrage weltweit akzeptierter Zertifikate wie Konformitätserklärungen nach der internationalen Empfehlung OIML-R129 zur Folge [14].

4 Fazit

Vorangetrieben durch Anforderungen aus der Industrie werden die zukünftigen Arbeiten im Aufgabenbereich der Konformitätsbewertungsverfahren geprägt sein durch das immer weitere Streben nach einer weltweiten und zeitnahen Verfügbarkeit von Messergebnissen. Als Folge dieser neuen Ausrichtung kommen noch komplexere Messgeräte in den Verkehr,

welche stetig steigende Anforderungen an den Zertifizierungs- oder Zulassungsprozess stellen. Diese Tendenz wird auch den Bereich der Softwareprüfung weiter in den Vordergrund rücken. Das zukünftige EU- Binnenmarktpaket und das Messgerätegesetz lassen neue Herausforderungen für die in diesem Beitrag erwähnten Gerätearten erwarten. Dieses geänderte Anforderungsprofil wird, angesichts der zunehmenden Tragweite von Normung und Akkreditierung, in den nächsten Jahren von großer Bedeutung sein.

5 Danksagung

Die Autoren danken allen Kollegen, die die Zertifizierungen im Bereich der Zulassungen von Messmaschinen begleitet haben.

Der Dank gilt insbesondere Herrn Dr. Michael Wolf für zahlreiche wertvolle Diskussionen und seine Unterstützung bei schwierigen Zulassungsangelegenheiten.

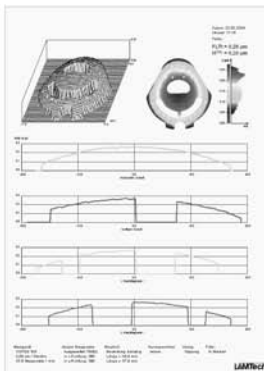
Literatur

- [1] Wolf, M.; Abou-Zeid, A.: Längenmesstechnik. PTB-Mitteilungen 114 (2004), 2, S. 152–155, ISSN 0030-834X, Verlag Bremerhaven: Wirtschaftsverl. NW, Verl. für neue Wissenschaft (2004)
- [2] Mann, R.; Zervos, P.: Rundholzmeßanlage mit kombinierter Licht- und Ultraschallsensorik. Forst und Technik 8 (1996), S. 18–23
- [3] Lohse, I.; Lindemann, H.: Neue Verfahren bei der Rundholzvermessung im Rahmen eichpflichtiger Längenmessung. Holz-Zentralblatt (2008)
- [4] Lohse, I.; Müller, M.: Optische Vermessung von Rundholzpoltern : Physikalisch-Technische Bundesanstalt und Bayerische Staatsforsten erheben Referenzdaten. Holz-Zentralblatt (2008)
- [5] Mann, R.; Zervos, P.: Optoelektronische und Ultraschall-Choimrometer. PTB-Mitteilungen 102 (1992), S. 357–364
- [6] Gillandt, I.; Zervos, P.; Abou-Zeid, A.: Messtechnische Konzepte für die maschinelle Längenmessung von Kabeln und Drähten. Eurowire 22 (2001), S. D6–D12
- [7] Zervos, P.; Mann, R.: Entspannungseinrichtungen bei der eichfähigen Längenmessung von Textilien. Melliand-Textilberichte 70 (1989), S. 257–262
- [8] Abou-Zeid, A. Steinfeldt, H.; Zervos, P.: Ein Laser-Doppler-Längenmeßgerät für bewegte Materialien. PTB-Mitteilungen 104 (1994), S. 75–82
- [9] Wolf, M.; Lohse, I.; Zimmermann, H.: Length measuring instruments under legal control used for textiles. Tagungsband, ITMA 2007, München, 13.–20. September 2007
- [10] Mann, R.; Zervos, P.: Flächenmeßmaschine mit berührungsloser Abtastung. Der Versuchs- und Forschungsingenieur 19 (1986), Nr.1, S. 40–44
- [11] Lohse, I.; Mascherek, R.; Püschel, F.: Length measuring instruments under legal control used for area measuring instruments. Posterbeitrag, Braunschweig, 20. März 2010
- [12] Mann, R.; Zervos, P.: Berührungslose Meßeinrichtung zur Bestimmung der Abmessungen von Frachtstücken. PTB-Mitteilungen 107 (1997), S. 409–415
- [13] Wolf, M.; Lohse, I.: German type approvals for multi-dimensional measuring instruments CeMAT 2005 „World Fair for Intralogistics“. Tagungsband, Hannover, 11.–15. Oktober 2005
- [14] Elben, R.; Lohse, I.: Messsystem für die Stückgut-Logistik; MaschinenMarkt – Online-Publikation (2009)

Interferometer für die Ebenheitsprüfung von feinbearbeiteten Teilen



TOPOS 100



- Ebenheitsmessung von geläppten, feingeschliffenen und polierten Teilen
- Genauigkeit im sub- μm Bereich
- Berührungslos

LAMTech

Lamtech Lasermesstechnik GmbH
Tel.: +49 711 232810
www.lamtech.de
info@lamtech.de

Prüfungen der staatlich anerkannten Prüfstellen für Messgeräte für Elektrizität, Gas, Wasser und Wärme im Jahr 2009

Anzahl der Eichungen, Befundprüfungen, Vorprüfungen, sonstigen Prüfungen

Prüfstellen für Messgeräte für	Anzahl der Prüfstellen	Art der Messgeräte	Eichungen	Befundprüfungen	Vorprüfungen sonstige Prüfungen
Elektrizität	110	Wechselstromzähler	282094	798	0
		Drehstromzähler	916939	5446	0
		Stromwandler	115839	17	0
		Spannungswandler	15495	0	0
		Zusatzeinrichtungen	1716	7	0
		Summe		1332083	6268
Gas	102	Balgengaszähler ≤ G 6	1529276	2592	0
		G 10 bis G 25	112325	239	0
		> G 25	10104	60	0
		Summe	1651705	2891	0
		Drehkolben-, Turbinenrad- und Wirbelgaszähler	26302	52	918
		Statische Gaszähler	0	0	0
		Wirkdruckgaszähler, Teilgeräte	19	0	89
		Mengennumwerter, Teilgeräte	5205	1	6332
		Gaskalorimeter, Teilgeräte	285	0	107
		Gasdruckregelgeräte	525	0	0
		Zusatzeinrichtungen	6109	0	858
Prüf- und Kalibriergase	821	0	180		
Summe	39266	53	8484		
Wasser	78	Kaltwasserzähler $Q_n \leq 10$	5880984	4943	0
		$Q_n > 10$	58342	249	0
		Warmwasserzähler $Q_n \leq 10$	1713713	75	0
		$Q_n > 10$	190	3	0
		Zusatzeinrichtungen	0	0	0
Summe	7653229	5270	0		
Wärme	40	Volumenmessteile von Wärmezählern			
		Prüfung mit Warmwasser $Q_n \leq 10$	237286	193	0
		$Q_n > 10$	8831	15	0
		Prüfung mit Kaltwasser $Q_n \leq 10$	2576	0	0
		$Q_n > 10$	10930	3	0
		Temperaturfühler: Einzelfühler	651264	220	0
		Rechenwerke ohne Temperaturfühler	98546	129	0
		mit Temperaturfühler	14542	17	0
		Kompaktwärmezähler	995806	651	0
		Zusatzeinrichtungen	326	0	0
Energiebewertende Warmwasserzähler	0	0	0		
Summe	2020107	1228	0		
Gesamtsumme	330		12696390	15710	8484

Bemerkungen

G... Größenbezeichnungen von Gaszählern
 Q_n Nenndurchfluss von Wasserzählern in m³/h

Analyse von Wahlgerätekonzepten in Bezug auf das Bundesverfassungsgerichtsurteil

Norbert Greif¹, Volker Hartmann², Dieter Richter³

Zusammenfassung

Das Bundesverfassungsgericht hat in seinem Urteil zu Wahlgeräten vom 3. März 2009 festgestellt, dass die wesentlichen Schritte der Wahlhandlung und der Ergebnisermittlung vom Bürger zuverlässig und ohne besondere Sachkenntnis überprüfbar sein müssen. Es werden nun Diskussionen darüber geführt, wie viel Transparenz der Wahlhandlungen einerseits und wie viel Nachprüfbarkeit andererseits in der Konsequenz erforderlich sind.

Die vorliegende Studie trägt zu dieser Diskussion bei, indem bekannte Wahlgerätekonzepte hinsichtlich jener Merkmale untersucht werden, die in der Begründung des Verfassungsgerichtsurteils herangezogen worden sind. Es wird bewusst darauf verzichtet, eine Interpretation des Urteils oder eine Prioritätensetzung unter den Merkmalen vorzunehmen. Vielmehr werden die im Urteil genannten Aspekte gleichrangig behandelt.

Die Studie kommt zu dem Ergebnis, dass die bekannten, um einen zusätzlichen Papierbeleg erweiterten Wahlgeräte (so genannte VVPAT-Geräte) beschränkte individuelle Überprüfmöglichkeiten bieten. Zudem sind die Kontrollpotenzen, die Papierbelegauszählungen bieten, auch von beschränkter Aussagekraft hinsichtlich einer nachträglichen Überprüfung elektronischer Stimmen, da Differenzen zwischen elektronischer und Papierstimme nicht vom System verursacht sein müssen, sondern von Wählern herbeigeführt worden sein könnten.

Die im Vergleich zu den VVPAT-Geräten verbesserten Nachweiseigenschaften bei den End-to-End-verifizierbaren Systemen gehen auf Kosten einer Entfernung von dem für die Wähler bekannten Umgang mit Stimmzetteln.

Weiter wird festgestellt, dass bei allen Wahlgerätekonzepten die Wahrung des Wahlgeheimnisses während der Wahl nicht transparent ist. Eine Ausnahme bilden scannerbasierte Zählsysteme, da sie erst nach der Stimmabgabe einsetzen. Für Experten besteht die Möglichkeit, vor und nach der Wahl die für die Wahrung des Wahlgeheimnisses einschlägigen technischen Eigenschaften zu überprüfen.

Scannerbasierte Zählsysteme bieten im Vergleich zu den anderen untersuchten Konzepten die geringste technische Unterstützung an, haben aber im Gegenzug nahezu keine Transparenz- bzw. Nachvollziehbarkeitsdefizite.

1 Einführung

Im Nachgang zum Urteil des Bundesverfassungsgerichtes über den Einsatz elektronischer Wahlgeräte vom 3. März 2009 [1] hat eine Diskussion zur Interpretation des Urteils eingesetzt, sowohl aus juristischer Sicht [2] als auch unter Informatikern [3]. Bei den Diskussionen geht es um die Frage, in welchem Maße Kontrollierbarkeit während der Wahlhandlungen und Überprüfbarkeit der Wahlergebnisse nach Abschluss der Wahlhandlungen betroffen sind. Es geht nach [2] darum, wie viel Transparenz der Wahlhandlungen einerseits und wie viel Nachprüfbarkeit andererseits erforderlich sind. Weiterhin wird darüber diskutiert, welche Wahlhandlungen bzw. -abläufe oder welche Ergebniskomponenten davon betroffen sind.

Die vorliegende Studie will nicht versuchen, die aufgeworfenen Fragen direkt zu beantworten und strebt auch keine Teilantworten an. Die Studie will vielmehr jene Merkmale bei geräteunterstützten Wahlsystemen analysieren, die im Urteil des Bundesverfassungsgerichtes herangezogen worden sind oder aus diesen Merkmalen abgeleitet werden können. Bei der Analyse wird bewusst darauf verzichtet, eine bestimmte Interpretation des Urteils zu unterstellen sowie eine Gewichtung zwischen den untersuchten Merkmalen vorzunehmen.

Die untersuchten Merkmale werden in drei Gruppen eingeteilt. Bei der ersten Gruppe von Merkmalen geht es um die Transparenz von Wahlhandlungen bzw. -abläufen. Dabei werden die Wahlgerätekonzepte hinsichtlich folgender Merkmale analysiert:

- Gesamtablauf,
- Wahlberechtigungsprüfung,
- Darstellung der Wahlvorschläge und Stimmenvergabe,
- Entstehung der zu zählenden Stimme,
- Aufbewahrung und Verwendung der zu zählenden Stimme,

¹ Dr. Norbert Greif, Leiter der Arbeitsgruppe „Software und elektronische Wahlen“, E-Mail: norbert.greif@ptb.de

² Dr. Volker Hartmann, Arbeitsgruppe „Software und elektronische Wahlen“, E-Mail: volker.hartmann@ptb.de

³ Prof. Dr. Dieter Richter, Leiter des Fachbereichs „Metrologische Informationstechnik“, E-Mail: dieter.richter@ptb.de

- Wahrung des Wahlheimnisses,
- Stimmenauszählung.

Die zweite Gruppe von Merkmalen betrifft die Nachprüfbarkeit des Wahlergebnisses und seines Zustandekommens. Folgende Merkmale werden untersucht:

- Einhaltung von technischen Anforderungen und Vorschriften,
- Wahlbeteiligung,
- Stimmenverwendung bei der Auszählung,
- Wahrung des Wahlheimnisses,
- Stimmenauszählung.

Schließlich werden mit der dritten Gruppe von Merkmalen Manipulationsgefahren bewertet. Einbezogen werden die Merkmale:

- Schwierigkeitsgrad der Manipulationen,
- Breitenwirksamkeit erfolgreicher Manipulationen,
- Entdeckungschancen von Manipulationen.

Diese dritte Gruppe wird in die Betrachtung einbezogen, weil die Gefahren durch Breitenwirksamkeit und geringe Entdeckungschancen in der Urteilsbegründung Erwähnung finden.

Bei der Festlegung abgeleiteter Merkmale wird auch auf Überlegungen zurückgegriffen, die in der PTB bereits im Jahre 2006 zur technischen Spezifizierung der Nachprüfbarkeit einer ordnungsgemäß durchgeführten Online-Wahl angestellt worden sind [4].

In die Betrachtung einbezogen werden folgende Wahlgerätekonzepte:

- Digitales Wahlstiftsystem (DWS),
- NEDAP-System (NEDAP),
- Scannerbasiertes Wahlsystem (SWS),
- Punchscan-Voting (PS),
- Bingo-Voting (BV),
- Three-Ballot-Voting (TBV),
- Scannerbasiertes Zählsystem (SZS).

Bei der Auswahl der Wahlgerätekonzepte war entscheidend, einerseits in ausreichendem Umfang Beschreibungen verfügbar zu haben, um die oben genannten Merkmale beurteilen zu können, und andererseits ein möglichst breites Spektrum von Konzepten zu analysieren. Unter Wahlgerätekonzept wird im Folgenden nicht nur das technische System, sondern auch die umgebenden Abläufe um das eingebettete technische System verstanden.

Das Konzept der Firma NEDAP in der um einen Papierausdruck erweiterten Form, das digitale Wahlstiftsystem und das Scannerbasierte Wahlsystem sind typische Vertreter der so genannten VVPAT-Wahlgeräte (VVPAT steht für Voter-Verifiable Paper Audit Trail). VVPAT-Wahlgeräte oder Wahlsysteme mit vergleichbaren wählerverifizierbaren Aufzeichnungen werden in den USA in den „Voluntary Voting System Guidelines“ [5] vorgeschrieben.

Die zu den drei Wahlgerätekonzepten Punchscan-Voting, Bingo-Voting und Three-Bal-

lot-Voting gehörenden Wahlverfahren gehören zu den End-to-End-verifizierbaren Verfahren [6]. Sie haben das Ziel, folgende Sachverhalte zu verifizieren:

- Die abgegebenen Stimmen entsprechen jeweils dem Wählerwillen.
- Die Stimmen wurden korrekt gespeichert.
- Die Stimmen wurden korrekt ausgezählt.

Zur Implementierung dieser Verifikationsmethoden verwenden sowohl Punchscan-Voting als auch Bingo-Voting kryptographische Techniken. Zu dieser Klasse von Verfahren zählt auch das prêt-à-voter-Verfahren [7]. Es ähnelt hinsichtlich der hier durchgeführten Untersuchung dem Punchscan-Voting und wird deshalb nicht zusätzlich in die vergleichende Betrachtung aufgenommen. Three-Ballot-Voting benutzt keine kryptographischen Techniken zur Verifikation.

Beim scannerbasierten Zählsystem handelt es sich um eine reine Zählhilfe innerhalb eines konventionellen Wahlsystems.

Das Wahlgerätekonzept von NEDAP (in seiner noch nicht erweiterten Form) und das Konzept des digitalen Wahlstiftes sind über die Konzepte hinaus in der PTB als komplett implementierte Wahlsysteme geprüft worden. Sie sind als funktionierende Systeme bekannt. Darüber hinaus gibt es für diese Konzepte ein bekanntes organisatorisches Umfeld, das bei der Analyse berücksichtigt wird. Scannerbasierte Wahl- und Zählsysteme sind als funktionierende Systeme bekannt, wurden aber bisher in der PTB nicht geprüft.

Bei den End-to-End-verifizierbaren Wahlverfahren liegen der Analyse Beschreibungen aus Veröffentlichungen zu Grunde. In der PTB sind keine implementierten Wahlsysteme verfügbar. Begleitende Regelungen zum Einsatz der Systeme existieren nicht oder sind nicht ausgereift. Daher muss bei einigen Bewertungen ein gewisser Grad von Unbestimmtheit verbleiben.

Die Studie repräsentiert den Kenntnisstand von März 2010. Weiterentwicklungen können zu modifizierten Bewertungen führen.

2 Beschreibung der Wahlgerätekonzepte

Um das Verständnis zu vereinfachen, wird hier eine kurze Beschreibung der betrachteten Wahlgerätekonzepte vorgenommen.

2.1 Digitales Wahlstiftsystem

Beim digitalen Wahlstiftsystem [8] wird die Stimmenabgabe mit Hilfe eines Computersystems, eines digitalen Stiftes und eines speziell gerasterten Stimmzettels vollzogen (Bild 1). Der Wähler markiert mit dem digitalen Stift seinen Wählerwillen auf dem speziellen Stimmzettel. Die Besonderheit des Stiftes besteht darin, dass er zusätzlich über ein „elektronisches Auge“ verfügt, das aufgrund der Rasterung des Stimm-

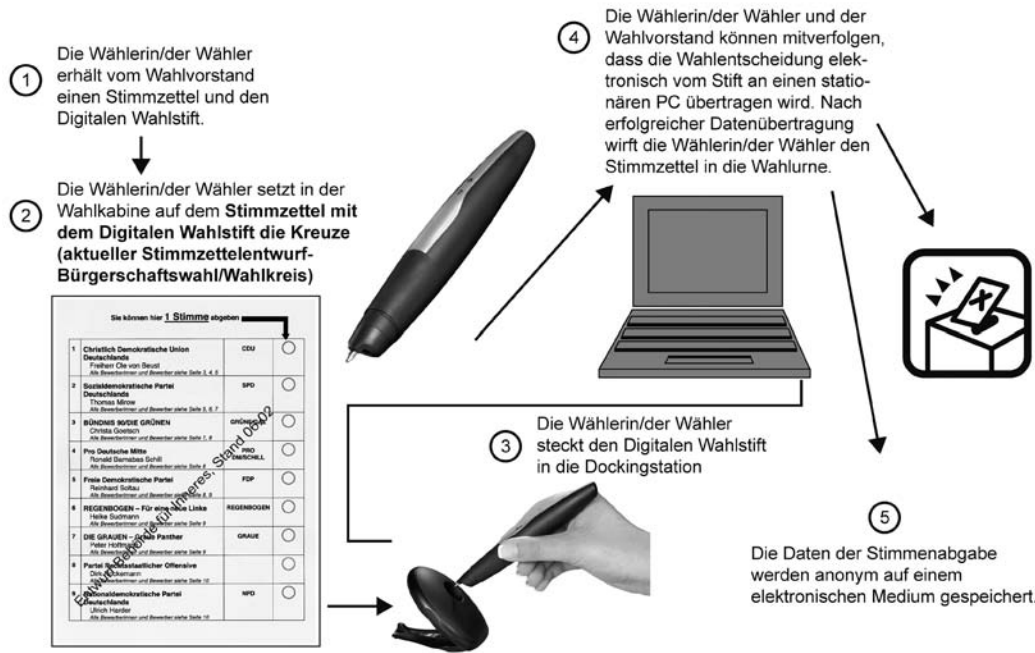


Bild 1: Prinzipdarstellung des digitalen Wahlstiftsystems nach [9]

zettels die genaue Position der Wahlmarkierung auf dem Stimmzettel elektronisch erfasst. Der Stimmzettel wird wie herkömmlich in die Wahlurne eingeworfen. Die elektronisch erfassten Stimmen werden im Beisein des Wählers aus dem Stift ausgelesen, in das Computersystem übertragen und auf dem Stift gelöscht.

Die im Computer gespeicherten Informationen werden nach der Wahl im Wahllokal bewertet und die Stimmen elektronisch ausgezählt. Zu Kontrollzwecken stehen die Papierstimmzettel zur Verfügung.

2.2 NEDAP-System

Die Firma NEDAP hat unter Berücksichtigung des Bundesverfassungsgerichtsurteils ihr bisheriges Gerätekonzept überdacht und erweitert (Bild 2).

Die in den letzten Jahren in Deutschland zugelassenen NEDAP-Wahlgeräte boten eine Stimmzetteldarstellung auf dem Gerät. Der Wähler konnte an einem freigeschalteten Gerät mit einem berührungsempfindlichen Tableau zur Darstellung des Stimmzettels per Fingerdruck auf ein Feld des favorisierten Kandidaten eine Auswahl treffen, diese auf einem Display überprüfen und bestätigen oder verwerfen. Nach der Stimmenabgabe wurde die Freischaltung des Gerätes aufgehoben und die Stimme im Gerät gespeichert. Die Stimmenauszählung erfolgte erst nach Beendigung der Wahl unmittelbar am Gerät. Der mit den Stimmen beschriebene elektronische Speicherbaustein konnte für eventuelle spätere Überprüfungen entnommen werden.

Im erweiterten Konzept der Firma NEDAP wird unter Beibehaltung der bisherigen Vorgehensweise zusätzlich ein Belegdrucker einbezogen, der zur Erstellung eines Stimmenbeleges

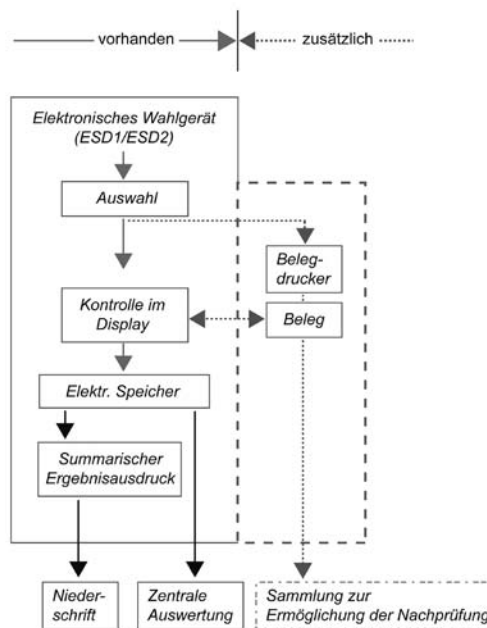


Bild 2: Prinzipdarstellung des NEDAP-Systems nach [10]

benutzt wird. Dieser enthält in einer durch den Wähler überprüfbaren Form den Stimmeninhalt und wird durch den Wähler zur eventuellen Nachprüfung in die Urne eingeworfen und dort gesammelt.

2.3 Scannerbasiertes Wahlsystem

Unter scannerbasierten Wahlsystemen sind Systeme zu verstehen, die vom Wähler zum Einscannen des von ihm ausgefüllten Stimmzettels verwendet werden. Sie bestehen aus einem optischen Scanner zum Digitalisieren des Stimmzettels sowie der dazugehörigen Auswerte- und Auszähl-Software [11]. An Stimmzettel können Eignungsvoraussetzungen gestellt werden, wie z. B. bestimmte Rasterungen oder das Aufbringen eines Barcodes.

Die scannerbasierten Wahlsysteme können als ein eigenständiges Wahlgerätekonzept verstanden werden, auch wenn Scanner im Rahmen anderer Wahlgerätekonzepte als Teilkomponente oder als selbständige Auszählhilfe verwendet werden können. So verwenden z. B. zwei der hier betrachteten Konzepte, Punchscan-Voting und Three-Ballot-Voting, optische Scanner. Ebenso umfasst das digitale Wahlstiftsystem einen optischen Scannvorgang.

Der Wähler markiert bei Verwendung von scannerbasierten Wahlsystemen seinen Wählerwillen auf dem Papierstimmzettel. Dieser Stimmzettel wird von ihm mit Hilfe des optischen Scanners digitalisiert und wie bei konventionellen Wahlen in die Wahlurne eingeworfen. Alternativ kann der Einwurf in die Urne auch ohne Digitalisierung erfolgen. Dann muss der Wahlvorstand die Digitalisierung nach Abschluss der Wahlhandlungen vornehmen. Die Papierstimmzettel stehen für Kontrollzwecke zur Verfügung.

Die elektronisch erfassten Stimmen werden am Ende des Wahlvorgangs elektronisch ausgezählt.

2.4 Punchscan-Voting

Das von David Chaum entwickelte Punchscan-Voting gehört zu den End-to-End-verifizierbaren Verfahren, die Verifikationsmöglichkeiten als Konzeptbestandteil vorsehen. Ein Beleg für den Wähler soll die Überprüfung der korrekten Verwendung der Wählerstimme ermöglichen.

Ein Stimmzettel besteht beim Punchscan-Voting aus zwei Papierlagen (Bild 3). Die obere umfasst die Namen der Wahlkandidaten/-optionen und kennzeichnet sie durch ein Symbol. Darüber hinaus befinden sich eine der Kandidaten-/Optionenanzahl entsprechende Anzahl von ausgestanzten Sichtfenstern auf dem Stimmzettel. Die untere Lage enthält alle Symbole in der Weise, dass sie durch die Sichtfenster der oberen Lage zu sehen sind. Die Anordnung der Symbole auf beiden Lagen ist für die Stimmzettel pseudozufällig permutiert. Klappt man die beiden Teilstimmzettel übereinander, erhält man einen kompletten Stimmzettel.

Zur Stimmenabgabe kennzeichnet der Wähler das Symbol des Kandidaten, den er wählen möchte. Dabei kommt ein Farbstempel zur Anwendung, der – durch das Sichtfenster – das Symbol auf der unteren Lage sowie den umgebenden Rand der oberen Lage markiert. Nun werden die Lagen vom Wähler getrennt. Eine der beiden bestimmt der Wähler als seinen Beleg, die andere wird vernichtet. Bevor der Wähler das Wahllokal mit seinem Beleg verlässt, wird dieser eingescannt und kann somit zum Nachweis der Wahlteilnahme und zur Stimmenzählung verwendet werden.

Die Belege zeigen keine geheim zu haltenden Informationen. Die vorhandenen Belege, die zur Stimmenauszählung heranzuziehen sind, werden nach der Wahl auf einem Bulletin-Board veröffentlicht. Über die Seriennummer des Beleges kann der Wähler die korrekte Speicherung seiner Stimme überprüfen.

Für die Auszählung erfolgt eine Rückführung der aktuellen Permutation jedes eingescannten Beleges auf den Basisstimmzettel. Erst dann entsteht wieder eine auswertbare Information, die zur Auszählung verwendet wird. Die Korrektheit der Stimmenauszählung wird durch mathematisch-kryptographische Verfahren gewährleistet. Die abgelegten Informationen sind kryptographisch geschützt.

Basierend auf kryptographischen Algorithmen bietet das Punchscan-Voting Verifizierungsmöglichkeiten wie Stichproben oder Kontrolle von Teilergebnissen, welche die Überprüfung von richtigem Druck und Aufbau der Stimmzettel sowie richtiger Aufzeichnung und Entschlüsselung der markierten Stimmzettel erlauben [12].

Basierend auf dem Punchscan-Voting entwickelte ein Team um Chaum die Verfahren Scantegrity [13] und Scantegrity II (II für invisible ink, [14]). Diesen beiden Verfahren liegt die gleiche kryptographische Verarbeitung der Stimmen wie beim Punchscan-Voting zugrunde, jedoch zeichnen sie sich hinsichtlich der Stimmzettelgestaltung durch eine höhere Ähnlichkeit mit der konventionellen Wahl aus.

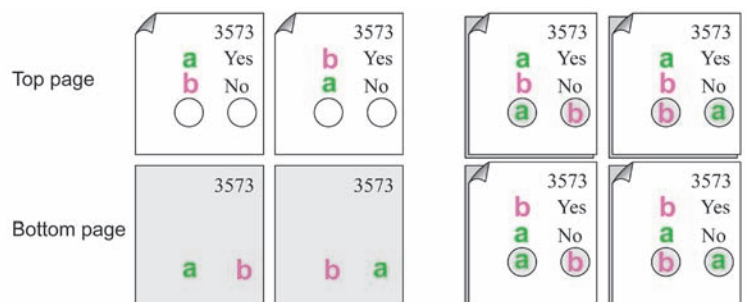


Bild 3: Punchscan-Stimmzettel für eine Ja/Nein-Abstimmung nach [12]

(a) All possible pages of a Yes/No ballot

(b) All possible ballots containing Yes/No contest

2.5 Bingo-Voting

Wie das Punchscan-Voting ist auch Bingo-Voting ein End-to-End-verifizierbares Wahlverfahren. Es wurde am Europäischen Institut für Systemsicherheit (EISS) der Universität Karlsruhe von einem Team um Müller-Quade entwickelt [12]. Bingo-Voting bietet auf kryptographischen Verfahren basierende Verifizierungen der Integrität der Wählerstimmen sowie der Integrität der Stimmenauszählung, wie z. B. einen Nachweis darüber, dass die abgegebene Stimme bei der Auszählung verwendet wurde.

In der Wahlvorbereitung werden bei diesem Ansatz für jeden Kandidaten auf dem Wahlvorschlag exakt gleich viele Zufallszahlen erzeugt (Füllstimmen). Die Anzahl der Zufallszahlen pro Kandidat entspricht mindestens der Anzahl der Wähler. Die Korrektheit und Vollständigkeit dieser vorbereitenden Maßnahmen wird durch kryptographiebasierte Verfahren bewiesen.

Während des Wahlvorgangs (Bild 4) wird für den Kandidaten, den der Wähler auswählt, von einem zum Wahlsystem gehörigen Zufallszahlengenerator eine neue Zufallszahl erzeugt und dem ausgewählten Kandidaten zugeordnet. Den verbleibenden Kandidaten wird jeweils eine der bereits im Vorfeld gebildeten Zufallszahlen (Füllstimmen) auf dem Stimmzettel zugeordnet. Der Wähler muss überprüfen, ob die neue Zufallszahl tatsächlich dem Kandidaten zugeordnet ist, den er wählen möchte. Bestätigt er dies, so wird dem Wähler ein Beleg mit allen von ihm benutzten Zufallszahlen ausgedruckt. Die Stimmzettel können veröffentlicht werden, da sie keine Auskunft über die Wahlentscheidung geben, denn den Zufallszahlen sieht man es nicht an, ob sie vorab oder während der Wahlhandlung erzeugt worden sind.

Nach dem Wahlvorgang werden die Belege und andere zur Verifizierung benötigte Informationen auf einem Bulletin-Board veröffentlicht. Die Auszählung der Stimmen erfolgt auf Basis der nicht verwendeten Füllstimmen. Am meisten Stimmen hat der Kandidat, dem am meisten Füllstimmen verblieben sind. Für die genaue Bestimmung der Stimmenanzahl müssen die Anzahl der Wähler sowie die Ausgangszahl der Füllstimmen einbezogen werden. Die Korrektheit der Stimmenauszählung wird durch kryptographiebasierte Verfahren bewiesen.

2.6 Three-Ballot-Voting

Three-Ballot-Voting verwendet zur Verifizierung der Integrität von Stimmenabgabe und Stimmenauszählung keine kryptographischen Verfahren. Ausschließlich der Wähler selbst vollzieht Verifikationsaktionen anhand unverschlüsselter Informationen eines Bulletin-Boards.

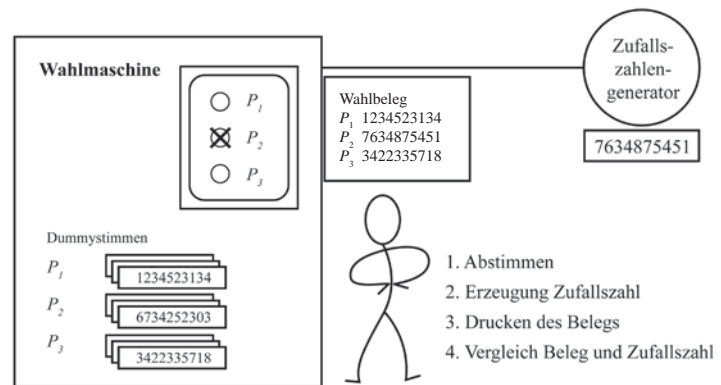


Bild 4:
Der Wahlvorgang bei Bingo-Voting nach [15]

In der Wahlvorbereitung werden die Stimmzettel als Dreifach-Stimmzettel (Bild 5) angelegt. Sie umfassen drei Teilstimmzettel, die erst nach der Stimmenabgabe voneinander zu trennen sind. Bis auf die Seriennummer sind die Teilstimmzettel identisch. Die Reihenfolge der Kandidaten ist für alle Teilstimmzettel fest vorgegeben.

Zur Stimmenabgabe ist vom Wähler nun jeder Kandidat einmal zu kennzeichnen. Auf welchem der drei Teilstimmzettel dies erfolgt, bleibt dem Wähler überlassen. Derjenige Kandidat, der die Wählerstimme bekommen soll, erhält darüber hinaus eine weitere Kennzeichnung auf einem der beiden Stimmzettel, wo er noch nicht markiert worden ist. In Bild 5 wurde zum Beispiel für „Bob Smith“ als „President“ sowie „Ed Zinn“ als „Senator“ gestimmt.

Um eventuelle Verwirrungen bei diesem Vorgehen zu vermeiden, ist ein Kontrollmechanismus („Checker“) zur Überprüfung der Gültigkeit der Stimme vorgesehen. Nachdem der Stimmzettel in seine drei Teilstimmzettel zerlegt wurde, kann der Wähler einen dieser Teilstimmzettel auswählen und eine Kopie dieses ausgewählten Teilstimmzettels als Beleg mitnehmen. Alle drei Teilstimmzettel werden in die Wahlurne geworfen.

Die Stimmzettel können nach der Wahl per Hand ausgezählt werden. Favorisiert wird jedoch das Einscannen der Stimmzettel und anschließendes elektronisches Auszählen. Als tatsächliche Stimmenanzahl pro Kandidat ergibt sich die ausgezählte Anzahl vermindert um die Anzahl der abgegebenen Stimmen. Die Gesamtheit der eingescannten (Teil-) Stimmzettel kann auf einem Bulletin-Board (elektronisch) zugänglich gemacht werden, so dass für jeden Wähler eine Überprüfung möglich ist, ob seine Stimme bei der Auszählung berücksichtigt wurde.

BALLOT	BALLOT	BALLOT
President	President	President
Alex Jones ○	Alex Jones ○	Alex Jones ●
Bob Smith ●	Bob Smith ●	Bob Smith ○
Carol Wu ○	Carol Wu ●	Carol Wu ○
Senator	Senator	Senator
David Yip ●	David Yip ○	David Yip ○
Ed Zinn ○	Ed Zinn ●	Ed Zinn ●
3147524	7523416	5530219

Bild 5:
Ausgefüllter, gültiger Stimmzettel für das Three-Ballot-Voting nach [16]

2.7 Scannerbasiertes Zählsystem

Scannerbasierte Zählsysteme arbeiten mit optischen Scannern, die nach Abschluss aller Stimmenabgaben von Wahlvorständen als Auszählhilfsmittel für die zuvor in einer klassischen Wahlurne gesammelten, herkömmlich gestalteten Stimmzettel eingesetzt werden. Die verwendeten optischen Scanner haben keine Speicher zur Aufbewahrung von elektronischen Stimmen, sondern nur Zählwerke für alle zur Wahl stehenden Kandidaten.

Möglicherweise sind auch hier spezielle, für die Digitalisierung durch optische Scanner geeignete Stimmzettel (z. B. versehen mit einem Barcode) zu verwenden.

3 Vergleichende Analyse

3.1 Transparenz der Wahlabläufe

3.1.1 Gesamtablauf

Allen Wahlgerätekonzepten ist gemein, dass die Abläufe und Sicherungsmaßnahmen von einschlägigen Experten* verstanden werden können, jedoch für den Wähler ohne Spezialkenntnisse mit Ausnahme des scannerbasierten Zählsystems nicht transparent sind.

Digitales Wahlstiftsystem

Ein speziell gerasterter Stimmzettel wird mit dem digitalen Wahlstift markiert, der sowohl ein konventionelles Markieren als auch die Aufnahme der Markierung durch ein „elektronisches Auge“ ermöglicht. Es entsteht ein wie üblich ausgefüllter Stimmzettel, der für nachträgliche Kontrollzwecke geeignet ist, jedoch für die weiteren, elektronisch ausgeführten Schritte bis hin zur Auszählung keine Verwendung findet, so dass hier das Vertrauen des Wählers in die korrekte Ausführung der elektronisch realisierten Schritte gefordert ist.

NEDAP-System

Bei NEDAP-Geräten kann der Wähler den Prozess der Stimmenabgabe bis zur endgültigen Bestätigung der Stimmenabgabe überblicken. Danach „verschwindet“ die Stimme im Gerät.

Im vorgeschlagenen neuen Vorgehen (erweitertes NEDAP-Konzept) wird zusätzlich ein maschinenlesbarer Beleg für die Stimme ausgedruckt, der für nachträgliche Kontrollen in eine konventionelle Wahlurne eingeworfen werden muss. Dieser Beleg bietet dem Wähler auch eine Kontrolle der richtigen Aufnahme seiner Wahlabsicht. Für die Verfolgung der weiteren geräteinternen Abläufe besteht wie beim alten NEDAP-Konzept keine Möglichkeit.

Scannerbasiertes Wahlsystem

Der Papierstimmzettel wird wie üblich markiert und dann vom Wähler eingescannt. Es entsteht ein ausgefüllter Stimmzettel, der für nachträgliche Kontrollzwecke geeignet ist, jedoch für die weiteren, elektronisch ausgeführten Schritte bis hin zur Auszählung keine Verwendung findet, so dass hier das Vertrauen des Wählers in die korrekte Ausführung der elektronisch realisierten Schritte gefordert ist.

Punchscan-Voting

Der Wähler markiert seine Auswahl auf dem Stimmzettel mittels eines Stempels so, dass die Markierung sowohl auf der oberen als auch auf der unteren Stimmzettellage erkennbar ist.

Der Wähler kann den Verbleib seiner Stimme an Hand einer laufenden Nummer überprüfen, da er eine der Stimmzettellagen nach dem Einscannen mitnehmen kann. Jedoch ist die korrekte Funktionsweise des Scannvorgangs und des Bulletin-Boards für den Wähler nicht beurteilbar. Da zudem die Ableitung der Wahlentscheidung aus einer Stimmzettellage im System elektronisch mit Hilfe von codierten Beziehungen zwischen den laufenden Stimmzettelnummern und der jeweiligen Kandidatenpermutation erfolgt, bleibt auch dieser Ablauf dem Wähler verborgen. Er muss wegen der Wahrung des Wahlheimnisses sogar verborgen bleiben.

Bingo-Voting

Während des Wahlvorgangs wird dem Wähler durch Zuordnung von Zufallszahlen zu den Kandidaten seine Stimmenabgabe dadurch transparent gemacht, dass der von ihm ausgewählte Kandidat eine neue Zufallszahl erhält. Durch die Ausgabe eines Wahlbelegs erhält der Wähler die Möglichkeit, den Verbleib seiner Stimme zu verfolgen.

Verborgen bleibt dem Wähler die Funktionsweise der Systemkomponenten einschließlich des erforderlichen vertrauenswürdigen Zufalls-

* Hier und im Folgenden werden darunter Spezialisten verstanden, die über das jeweils notwendige Wissen zu Hard- und Software der entsprechenden Wahlgerätekonzepte verfügen.

zahlengenerators. Zudem ist der mathematische Nachweis, dass das Vorgehen insgesamt korrekt ist und insbesondere der Auszählungsprozess richtig arbeitet, für den Wähler im Allgemeinen nicht transparent.

Three-Ballot-Voting

Das spezielle Kennzeichnungsverfahren der gewählten Kandidaten ist, wenn auch ungewöhnlich, verständlich. Unterstützende Hilfsmittel zur Kontrolle der korrekten Stimmzettelmarkierung sind dagegen nicht mehr transparent. Die Veröffentlichung der eingescannten Stimmzettel auf dem Bulletin-Board schafft Transparenz hinsichtlich des Verbleibs der Stimme. Jedoch ist die korrekte Funktionsweise des Scannvorgangs und des Bulletin-Boards für den Wähler nicht beurteilbar. Zudem erfolgt eine rechnergestützte Auszählung der Stimmen auf Basis der eingescannten Stimmzettel. Dieser Vorgang ist ebenfalls nicht transparent.

Für den Wähler wäre der Gesamtablauf transparent, wenn das Verfahren bei einem reinen Papierwahlverfahren bliebe, d. h., dass auch die Auszählung unter Verwendung der Papierstimmzettel erfolgt. In diesem Fall ist Three-Ballot-Voting jedoch uninteressant, weil es dann viel komplizierter als das konventionelle Wahlverfahren wäre. Mit der beabsichtigten Digitalisierung der Stimmen und den nachfolgenden elektronischen Abläufen entstehen Transparenzdefizite.

Scannerbasiertes Zählsystem

Der Papierstimmzettel wird wie üblich markiert und in die Wahlurne geworfen. Soweit ist der Ablauf völlig identisch zur herkömmlichen Wahl. Auch der Scannvorgang ist verständlich, lediglich die inneren Vorgänge im Scanner können nicht nachvollzogen werden.

Denkbar ist eine Konstruktion der Scanner, so dass ein äußerlich sichtbarer Zählvorgang entsteht. Dann wäre sogar die von Scannern vorgenommene Zählung ohne weitere Hilfsmittel transparent.

3.1.2 Wahlberechtigungsprüfung

Bei allen betrachteten Wahlgerätekonzepten ist die Wahlberechtigungsprüfung identisch zum konventionellen Wahlverfahren.

3.1.3 Darstellung der Wahlvorschläge und Stimmenvergabe

In diesem Abschnitt geht es um die Verständlichkeit dessen, was dem Wähler als Wahlvorschläge angeboten wird und was er zum Treffen seiner Wahlentscheidung zu tun hat. Neben der Beurteilung der Verständlichkeit an sich wird auch die Nähe zur konventionellen Papierwahl bewertet, weil dies ein wesentliches Akzeptanzkriterium sein könnte.

Die Transparenz von Wahlabläufen, die nach der Stimmenabgabe stattfinden, wird hier nicht behandelt.

Digitales Wahlstiftsystem, scannerbasiertes Wahlssystem und scannerbasiertes Zählsystem

Da die Kennzeichnung des Stimmzettels bei der Stimmenabgabe der konventionellen Form entspricht, ergibt sich für den Wähler an dieser Stelle keine Veränderung des gewohnten Verfahrens.

Die zusätzlichen Handlungen beim digitalen Wahlstiftsystem, wie z. B. die Entgegennahme und Rückgabe des speziellen Wahlstiftes, stellen kein Transparenzproblem dar.

NEDAP-System

Die Stimmenabgabe über das Tableau der NEDAP-Geräte ist eng an konventionelle Wahlen angelehnt und daher ebenso transparent wie bei konventionellen Wahlen.

Für die sekundierende Erzeugung eines Papierbeleges bedeuten die zusätzliche Kontrolle und ein eventuelles Problemmanagement bei Fehlern/Irrtümern einen Mehraufwand für den Wähler, der jedoch überschaubar und verständlich bleibt.

Punchscan-Voting

Der Wähler erhält im Allgemeinen nicht die kanonische Form des Stimmzettels. Die Anordnung der wahlrelevanten Informationen auf dem Stimmzettel können sämtliche möglichen Permutationen aufweisen. Somit ist durch die notwendige Permutation der Stimmzettelinformationen a priori eine Uneinheitlichkeit der Stimmzettel vorgegeben, die den Wähler verwirren könnte. Im Unterschied zu konventionellen Wahlen müssen beim Punchscan-Voting zwei Stimmzettellagen markiert werden.

Trotz der genannten Abweichungen bleibt die Stimmenabgabe aufgrund der noch vorhandenen Ähnlichkeit zum konventionellen Wahlverfahren transparent.

Bingo-Voting

Nach der Markierung eines Kandidaten erfolgt der Vollzug der Stimmenabgabe durch die Zuordnung einer neu generierten Zufallszahl zum ausgewählten Kandidaten. Das ist ein im Vergleich zur konventionellen Wahl ungewöhnliches Verfahren. Akzeptanzprobleme sind zu erwarten. Bedarf die Kontrolle der richtigen Zuordnung der neu generierten Zufallszahl bereits bei wenigen Kandidaten einer gewissen Aufmerksamkeit, so wird es bei beispielsweise 25 Kandidaten und zwei Stimmen, d. h. der Durchmusterung von 50 Zufallszahlen, zu einer Aufgabe, die für viele Wähler unzumutbar ist.

Eventuelle Kontrollhilfsmittel an dieser Stelle würden zu Intransparenz führen.

Three-Ballot-Voting

Der Abstimmungsvorgang ist logisch verständlich, aber ungewöhnlich und fehleranfällig. Es könnten Akzeptanzprobleme auftreten.

Elektronische Hilfsmittel zur Vermeidung von Fehlern, z. B. kombiniert mit dem Einscannen der Stimmzettel, sind nicht transparent.

3.1.4 Entstehung der zu zählenden Stimmen

Die untersuchten Wahlgerätekonzepte basieren mit Ausnahme des scannerbasierten Zählsystems sämtlich auf dem Prinzip der Erzeugung elektronischer Stimmen. Die elektronisch gespeicherten Stimmen sind bei diesen Verfahren die Grundlage für die Anwendung elektronischer Auszählverfahren, an denen das eigentliche Interesse besteht. Da dies für die scannerbasierten Zählsysteme nicht zutrifft, werden sie im Folgenden bei der Diskussion ausgeklammert.

Die betrachteten Wahlgerätekonzepte lassen sich hier in zwei Gruppen einteilen. Einerseits gibt es die Konzepte, die direkt eine elektronische Stimme erzeugen. Dies trifft für das NEDAP-Konzept und Bingo-Voting zu. Andererseits existieren Konzepte, die eine elektronische Stimme auf Basis eines anderen Mediums indirekt, d. h. nachträglich, erzeugen. Dies trifft für die anderen Konzepte zu. Diese Konzepte haben grundsätzlich das optische Scannen als Eingabemethodik gemeinsam. Das digitale Wahlstiftsystem nimmt eine gewisse Sonderrolle ein, da hier der Prozess des konventionellen Markierens und das optische Scannen unmittelbar und untrennbar miteinander gekoppelt sind. Bei den Systemen, die Scanner benutzen (Scannerbasierte Wahlsysteme, Punchscan-Voting und Three-Ballot-Voting), kann die gleiche Technik sowohl für Verfahren benutzt werden, bei denen der Wähler das Einscannen vornimmt, als auch bei solchen, wo die Wahlvorstände das Scannen durchführen.

Es existieren optische Scanner, die den gesamten Stimmzettel in eine elektronische Form bringen. Diese pixelbasierte Darstellung kann dann softwaregestützt ausgewertet werden, um eine elektronische Stimme zu implementieren. Ebenso gibt es optische Scanner, welche die relevanten Stimmzettelbereiche in eine elektronische Form übertragen und so die elektronische Stimme erzeugen. Dies kann – wie bei dem digitalen Wahlstiftsystem – durch eine spezielle Stimmzettelablaufunterstützung unterstützt werden. Auch Mischformen beider Ansätze sind bekannt.

Bei den betrachteten Wahlgerätekonzepten ist als zu zählende Stimme immer die elektronische Stimme zu verstehen. Primär erzeugte und dann eingescannte Stimmzettel oder zusätzlich erzeugte Stimmzettel haben Kontroll- oder Nachweisfunktion.

Unter diesen Gesichtspunkten ist mit Ausnahme der scannerbasierten Zählsysteme bei keinem der untersuchten Wahlgerätekonzepte eine Transparenz während der Entstehung der zu zählenden Stimmen vorhanden, weder für die Wähler im Allgemeinen noch für Experten.

3.1.5 Aufbewahrung und Verwendung der zu zählenden Stimmen

Da bei scannerbasierten Zählsystemen keine elektronisch abgelegten Stimmen entstehen, sondern die Stimmzettel wie bei konventionellen Wahlen in Wahlurnen aufbewahrt werden, ergeben sich keine Änderungen im Vergleich zur traditionellen Wahl.

Bei den anderen Wahlgerätekonzepten wird unter der Aufbewahrung und Verwendung der zu zählenden Stimme die Speicherung der elektronischen Stimmen bis zur Verwendung bei der Auszählung und ggf. die Aufbereitung zur Auszählung verstanden. Interne Übertragungen oder Datenpflegeoperationen gehören ebenfalls dazu.

Grundsätzlich gilt für diese Wahlgerätekonzepte, dass die hier betrachteten elektronischen Abläufe nicht transparent sind. Jedoch gibt es Differenzierungen bei den Kontrollmöglichkeiten über den Verbleib der eigenen Stimme (individuelle Verifizierbarkeit) und bei der Überprüfung der Gesamtheit der Stimmen (universelle Verifizierbarkeit).

Digitales Wahlstiftsystem, NEDAP-System und scannerbasiertes Wahlsystem

Die Speicherung und Verwendung der Stimmen finden vollständig elektronisch innerhalb des Wahlsystems statt.

Es ist während der Wahl keine Transparenz vorhanden, auch nicht für Experten.

Punchscan-Voting

Die Speicherung und Verwendung der Stimmen finden ebenfalls innerhalb des Wahlsystems statt und sind daher während der Wahl nicht transparent.

Über die Nummer seines Beleges kann sich der Wähler jedoch davon überzeugen, dass sich unter den eingescannten, veröffentlichten Stimmzetteln auf dem Bulletin-Board sein eigener Stimmzettel in unveränderter Form befindet.

Bingo-Voting

Die Speicherung und Verwendung der Stimmen finden ebenfalls innerhalb des Wahlsystems statt und sind daher während der Wahl nicht transparent.

Da der Wähler jedoch über einen Beleg für seine Stimme verfügt und eine Kopie desselben auf einem Bulletin-Board veröffentlicht wird, kann er den Verbleib seiner Stimme überprüfen.

Three-Ballot-Voting

Die Speicherung und Verwendung der Stimmen finden ebenfalls innerhalb des Wahlsystems statt und sind daher während der Wahl nicht transparent.

Da der Wähler über eine Kopie eines der drei Teilstimmzetteln seines Dreifach-Stimmzettels verfügt, kann er mit Hilfe eines Bulletin-Boards überprüfen, ob seine Stimme bei der Stimmenauszählung berücksichtigt wird.

3.1.6 Wahrung des Wahlheimnisses

Während der Wahl besteht mit Ausnahme der scannerbasierten Zählsysteme bei allen Wahlgerätekonzepten sowohl für den Wähler als auch für Experten keine Möglichkeit, sich von der Wahrung des Wahlheimnisses zu überzeugen. Das liegt daran, dass zum Einen die Prozesse zur Erzeugung, Aufbewahrung und Verwendung der elektronischen Stimmen nicht transparent sind und zum Anderen im Allgemeinen die technischen Hilfsmittel zur Überprüfung von Nebeneffekten, wie z. B. Abstrahlungen, nicht verfügbar bzw. nicht beherrschbar sind.

3.1.7 Stimmenauszählung

Wegen der elektronischen Stimmenauszählung besteht bei allen Wahlgerätekonzepten keine Transparenz, weder für Wähler im Allgemeinen noch für Experten.

Bei scannerbasierten Zählsystemen ist eine Konstruktion der Scanner denkbar, bei der der Zählvorgang von außen sichtbar und damit kontrollierbar ist. Dann wäre sogar die von Scannern vorgenommene Zählung ohne weitere Hilfsmittel für jeden Stimmzettel transparent.

3.2 Nachprüfbarkeit der Wahlergebnisse

3.2.1 Einhaltung von Anforderungen und Vorschriften

Hier geht es um die Frage, inwieweit nachträglich festgestellt werden kann, ob die bei der Wahl eingesetzte Technik die für sie geltenden Anforderungen erfüllt hat und ob die Wahl entsprechend den auf sie anzuwendenden Vorschriften durchgeführt worden ist.

Wie in der Einführung schon erwähnt, besteht bei der Bewertung dieses Aspektes eine gewisse Unbestimmtheit, weil die begleitenden Vorschriften, deren nachträgliche Überprüfbarkeit ebenso bewertet werden soll, nicht durchgängig existieren.

Allen betrachteten Wahlgerätekonzepten ist gemein, dass durch nachträgliche technische Prüfungen von Experten festgestellt werden kann, ob die verwendete Technik authentisch und unversehrt ist, wenn die organisatorischen Regelungen für die Wahlvorbereitung und die Wahldurchführung die Voraussetzungen dazu

bieten. Geeignete Voraussetzungen könnten z. B. eine angemessene Dokumentationsvorschrift, eine vorgeschriebene Baumusterprüfung, eine gesicherte Auslieferung und durchgängige Verwahrung außerhalb der Wahl, eine Bewachung während der Wahl und Kontrollen bzw. Aufzeichnungen zur Vorbereitung der Wahlsysteme für eine konkrete Wahl sein.

Personen ohne Expertenwissen sind bei allen Konzepten nicht in der Lage, solche Prüfungen vorzunehmen.

Digitales Wahlstiftsystem

Die Vorbereitung der Wahl mit dem digitalen Wahlstiftsystem erfordert die Bereitstellung von Wahlvorschlägen auf speziell gerastertem Papier in einer für die konkrete Wahl gültigen Form. Die Software des digitalen Wahlstiftsystems muss kompatibel zum Aufbau der Wahlvorschläge für die jeweilige konkrete Wahl sein. Die Richtigkeit dieser Vorbereitungen kann nachträglich von Experten überprüft werden. Personen ohne Spezialwissen können nur die Richtigkeit und Vollständigkeit der Wahlvorschläge prüfen.

Die Abläufe im Wahllokal finden unter Kontrolle der Wahlvorstände statt und entsprechen mit einer Ausnahme den Abläufen der konventionellen Wahl. Abgesehen von dieser Ausnahme gilt insofern für die nachträgliche Feststellung der Einhaltung von Vorschriften das gleiche wie für konventionelle Wahlen.

Die Ausnahme betrifft die Stimmenabgabe in der Wahlkabine. Während bei der konventionellen Wahl nur eine zählbare Stimme auf Papier entsteht, werden bei Anwendung des digitalen Wahlstiftsystems zwei grundsätzlich zählbare Stimmen erzeugt, nämlich die elektronische Form und die Papierform. Das Prinzip des digitalen Wahlstiftsystems geht davon aus, dass beide Materialisierungen des Wählerwillens identisch sind. Genau dieses Prinzip könnte aber durch Wähler gestört werden (z. B. durch Verwendung eines anderen, persönlich mitgebrachten Stiftes). Eine solche Störung ist nachträglich nicht sicher nachweisbar. Sie kann nachträglich nur dann ausgeschlossen werden, wenn neben der elektronischen Auszählung auch die Auszählung der Papierstimmen erfolgt und beide Auszählungen zum gleichen Ergebnis kommen. Das macht aber den Vorteil des digitalen Wahlstiftsystems zunichte.

NEDAP-System

Die Vorbereitung der Wahl mit dem NEDAP-System erfordert die Programmierung des Speichermoduls mit den jeweils geltenden Wahlvorschlägen und die Anfertigung bzw. Programmierung des NEDAP-spezifischen Wahltableaus für die Stimmenabgabe. Die Rich-

tigkeit dieser Vorbereitungen kann nachträglich von Experten überprüft werden. Personen ohne Spezialwissen können nur die Richtigkeit und Vollständigkeit der Wahlvorschläge prüfen.

Für die Einhaltung sonstiger Vorschriften gilt das gleiche wie bei konventionellen Wahlen.

Nachvollziehbarkeitsdefizite wie beim digitalen Wahlstiftsystem entstehen nicht in der gleichen Schärfe, da das Wahlsystem selbst den Papierausdruck erzeugt, also für den Wähler zunächst keine Möglichkeit besteht, Differenzen zwischen der elektronischen Stimme und der Papierstimme zu erzeugen. Allerdings sind sie auch nicht auszuschließen, denn der Wähler könnte den Papierbeleg durch einen mitgebrachten Beleg austauschen oder den Einwurf in die Urne verweigern. Ein erhöhter Kontrollaufwand kann diese Defizite teilweise kompensieren.

Scannerbasiertes Wahlsystem

Die Software des scannerbasierten Wahlsystems muss kompatibel zum Aufbau der Wahlvorschläge für die jeweilige konkrete Wahl sein, damit aus der eingescannten Information der Wählerwille erkannt werden kann. Die Richtigkeit dieser Vorbereitungen kann nachträglich von Experten überprüft werden.

Die Abläufe im Wahllokal finden unter Kontrolle der Wahlvorstände statt und entsprechen mit einer Ausnahme den Abläufen der konventionellen Wahl. Abgesehen von dieser Ausnahme gilt insofern für die nachträgliche Feststellung der Einhaltung von Vorschriften das gleiche wie für konventionelle Wahlen.

Die Ausnahme betrifft wie beim digitalen Wahlstiftsystem die Stimmenabgabe in der Wahlkabine. Während bei der konventionellen Wahl nur eine zählbare Stimme auf Papier entsteht, werden bei Anwendung des scannerbasierten Wahlsystems zwei grundsätzlich zählbare Stimmen erzeugt, nämlich die elektronische Form und die Papierform. Das Prinzip des scannerbasierten Wahlsystems geht davon aus, dass beide Materialisierungen des Wählerwillens identisch sind. Genau dieses Prinzip könnte aber durch den Wähler gestört werden (z. B. durch Verwendung von Spezialtinten, welche die Erkennbarkeit der Markierung verändern; durch Verwendung von vorgefertigten Stimmzetteln, die sich von den aktuell benutzten unterscheiden). Eine solche Störung ist nachträglich nicht sicher nachweisbar. Sie kann nachträglich nur dann ausgeschlossen werden, wenn neben der elektronischen Auszählung auch die Auszählung der Papierstimmen erfolgt und beide Auszählungen zum gleichen Ergebnis kommen. Das macht aber den Vorteil des scannerbasierten Wahlsystems zunichte.

Punchscan-Voting

Zur Vorbereitung der Wahl muss die Menge der doppelagigen Stimmzettel mit den Permutationen der Wahlvorschläge erzeugt werden. An der nachträglichen Feststellbarkeit der Korrektheit dieses Prozesses bestehen Zweifel. Möglicherweise bestehen aber für Experten Aussichten auf eine Überprüfung, wenn geeignete ergänzende Vorschriften entwickelt werden können, in die der Generierungsprozess eingebettet wird. Es erscheint kaum möglich, den Stimmzettelgenerierungsprozess so zu gestalten, dass er nachträglich für Wähler ohne Spezialkenntnisse nachvollziehbar ist.

Die Abläufe im Wahllokal finden unter Kontrolle von Wahlvorständen statt und entsprechen den Abläufen der konventionellen Wahl.

Bingo-Voting

Die Korrektheit des zur Vorbereitung der Wahl erforderlichen Erzeugungs- und Zuordnungsprozesses von Zufallszahlen zu den Kandidaten ist – geeignete Begleitregelungen vorausgesetzt – durch Experten nachträglich überprüfbar, jedoch nicht vom Wähler im Allgemeinen.

Das gleiche trifft für die während der Wahl neu erzeugten und zugeordneten Zufallszahlen zu.

Ansonsten finden die Abläufe im Wahllokal unter Kontrolle von Wahlvorständen in sehr ähnlicher Form wie bei konventionellen Wahlen oder wie mit NEDAP-Wahlgeräten statt. Insofern ist die Bewertung der Nachvollziehbarkeit übertragbar.

Three-Ballot-Voting

Da beim Three-Ballot-Voting die Stimmzettel wie bei der konventionellen Wahl vorbereitet werden und auch das gleiche Aussehen haben können, entstehen im Vergleich zur konventionellen Wahl keine Nachvollziehbarkeitsdefizite, auch nicht für Personen ohne Spezialkenntnisse.

Die Abläufe im Wahllokal finden unter Kontrolle von Wahlvorständen statt und entsprechen zunächst vollständig den Abläufen der konventionellen Wahl. Lediglich die Kennzeichnung auf dem Stimmzettel unterscheidet sich.

Im Vergleich zur konventionellen Wahl findet zusätzlich das Einscannen der Stimmzettel statt. Das Konzept sieht vor, dass der Wähler eine Kopie eines der drei Teilstimmzettel als Beleg mitnehmen kann. Um individuelle, nicht nachweisbare Störungen des Wählers mit der Folge von Nachvollziehbarkeitsdefiziten (vergleichbar dem Problem beim digitalen Wahlstiftsystem) auszuschließen, muss der Kopiervorgang und das Einscannen wohlüberlegt gestaltet werden. Das sollte möglich sein.

Scannerbasiertes Zählsystem

Die Software des scannerbasierten Zählsystems muss wie beim scannerbasierten Wahlsystem kompatibel zum Aufbau der Wahlvorschläge für die jeweilige konkrete Wahl sein, damit aus der eingescannten Information der Wählerwille erkannt werden kann. Die Richtigkeit dieser Vorbereitungen kann nachträglich von Experten überprüft werden.

Die wählerbezogenen Abläufe im Wahllokal finden unter Kontrolle der Wahlvorstände statt und entsprechen vollständig den Abläufen der konventionellen Wahl.

Das Scannen wird vom Wahlvorstand durchgeführt. Insofern gilt für die nachträgliche Überprüfbarkeit das gleiche wie bei anderen Handlungen von Wahlvorständen.

3.2.2 Wahlbeteiligung

Digitales Wahlstiftsystem, NEDAP-System und scannerbasiertes Wahlsystem

Ein nachträglicher Abgleich der Wahlbeteiligung ist für die Wahlleitung durch die Ermittlung der Anzahl der vorhandenen elektronischen Stimmen und der Papierstimmen möglich. Allerdings sind Diskrepanzen zwischen der Anzahl der im Wahlbüro registrierten Wähler zur Zahl der vorhanden elektronischen Stimmen bzw. Papierstimmen sowie zwischen der Anzahl der elektronischen Stimmen und der Papierstimmen nicht nachträglich aufklärbar.

Punchscan-Voting, Bingo-Voting und Three-Ballot-Voting

Der Beleg des Wählers ermöglicht ihm die Kontrolle der persönlichen Wahlbeteiligung (individuelle Verifikation), indem er seinen Beleg in der veröffentlichten Information (Bulletin-Board) ausfindig macht. Für diese individuelle Überprüfung bedarf es keiner Spezialkenntnisse, vorausgesetzt, die Überprüfungsmöglichkeit selbst baut nicht neue Hürden auf.

Es besteht für die Wahlleitung die Möglichkeit, die Anzahl der im Wahlbüro registrierten Wähler mit der Anzahl der auf dem Bulletin-Board dargestellten Stimmen abzugleichen. Eventuelle Diskrepanzen sind auch hier nicht aufklärbar, da die Wählerregistrierung nicht Bestandteil der hier betrachteten Wahlgerätekonzepte ist.

Scannerbasiertes Zählsystem

Es gibt die gleichen Nachweismöglichkeiten wie bei der konventionellen Wahl.

3.2.3 Stimmenverwendung bei der Auszählung

Digitales Wahlstiftsystem und scannerbasiertes Wahlsystem

Die korrekte Verwendung der elektronischen Stimmen kann nur summarisch und nur durch Abgleich mit den in Papierform vorliegenden Stimmen bestätigt werden. Dies ist für Personen ohne Spezialkenntnisse durchführbar. Wenn jedoch die Anzahl der elektronischen und der Papierstimmen differiert, sind die Abweichungen nicht aufklärbar, auch nicht durch Experten.

NEDAP-System

Die korrekte Verwendung der elektronischen Stimmen kann nur summarisch und nur durch Abgleich mit den in Papierform vorliegenden Stimmen bestätigt werden. Dies ist für Personen ohne Spezialkenntnisse durchführbar. Wenn jedoch die Anzahl der elektronischen und der Papierstimmen differiert, können Personen ohne Spezialkenntnisse keine weiteren Aufklärungen vornehmen. Experten können mit entsprechendem Aufwand die systembedingten Ursachen für die Abweichungen feststellen, falls wählerverursachte Abweichungen ausgeschlossen werden können.

Punchscan-Voting und Bingo-Voting

Die Einbeziehung seiner Stimme kann der Wähler durch den Vergleich seines Belegs mit den veröffentlichten Informationen auf dem Bulletin-Board nachprüfen (individuelle Verifikation). Er muss sich dabei allerdings auf die korrekte Implementation des Verfahrens verlassen. Diese Korrektheit ist von Experten überprüfbar.

Eine Möglichkeit für die Wahlleitung, die korrekte Verwendung aller Stimmen zu überprüfen, besteht nicht. Diese Überprüfung ist wiederum für Experten durchführbar.

Three-Ballot-Voting

Die korrekte Verwendung der elektronischen Stimmen kann nur summarisch und nur durch Abgleich mit den in Papierform vorliegenden Stimmen bestätigt werden. Dies ist für Personen ohne Spezialkenntnisse durchführbar. Wenn jedoch die Anzahl der elektronischen und der Papierstimmen differiert, hängt die Aufklärungsmöglichkeit für Experten davon ab, auf welche Art und Weise das Einscannen aller Stimmzettel und das Kopieren eines Stimmzettelteils implementiert sind.

Die Verwendung der persönlichen Stimme kann durch den Wähler mit Hilfe des Bulletin-Boards überprüft werden (individuelle Verifikation). Der Wähler muss sich dabei allerdings auf die korrekte Implementation des Verfahrens verlassen. Die Korrektheit des Verfahrens ist jedoch von Experten überprüfbar.

Scannerbasiertes Zählsystem

Es gibt die gleichen Nachweismöglichkeiten wie bei der konventionellen Wahl.

3.2.4 Wahrung des Wahlheimnisses

Bei allen untersuchten Konzepten können die technischen Maßnahmen, die zur Gewährleistung des Wahlheimnisses notwendig sind, durch Experten nachträglich überprüft werden. Bei scannerbasierten Zählsystemen entsteht durch die Technik keine im Vergleich zu konventionellen Wahlen zusätzliche Gefährdung des Wahlheimnisses.

Für die Abläufe, die unter Überwachung der Wahlvorstände stattfinden, gilt das gleiche wie für konventionelle Wahlen.

3.2.5 Stimmenauszählung

Digitales Wahlstiftsystem, NEDAP-System und scannerbasiertes Wahlsystem

Die elektronische Stimmenauszählung kann auf Basis der abgelegten Daten mit der systemeigenen Software sowie mit alternativer Software wiederholt werden. Die Erstellung alternativer Software ist Experten vorbehalten.

Die Möglichkeit zur Auszählung der Papierstimmen besteht. Sie ist identisch zum Auszählverfahren bei konventionellen Wahlen.

Punchscan-Voting

Die elektronische Stimmenauszählung kann auf Basis der abgelegten Daten mit der systemeigenen Software sowie mit alternativer Software wiederholt werden. Die Erstellung alternativer Software ist Experten vorbehalten.

Eine Auszählung per Hand ist mangels vollständiger Papierstimmzettel nicht möglich.

Bingo-Voting

Bezüglich der elektronischen Stimmenauszählung gilt die gleiche Bewertung wie beim Punchscan-Voting.

Die Integrität der Stimmenauszählung kann durch Experten auf der Basis mathematisch-kryptographischer Verfahren verifiziert werden. Dies ist aber für Wähler im Allgemeinen nicht verständlich. Zusätzlich entsteht durch die Veröffentlichung der unbenutzten Zufallszahlen die Möglichkeit, das Ergebnis unabhängig von der elektronischen Auszählung nachzuvollziehen. Das verlangt jedoch eine gewisse Übung und ist mit einem hohen Aufwand verbunden.

Three-Ballot-Voting

Bezüglich der elektronischen und der Papierstimmenauszählung gilt die gleiche Bewertung wie beim digitalen Wahlstiftsystem. Jedoch ist die Auszählung der auf dem Bulletin-Board

veröffentlichten Stimmen aufwändiger als bei konventionellen Wahlen.

Scannerbasiertes Zählsystem

Die Stimmenauszählung kann mit alternativer Technik, ggf. sogar durch Personen ohne Spezialkenntnisse, wiederholt werden. Zudem besteht die Möglichkeit der Papierstimmenauszählung.

3.3 Bewertung von Manipulationsgefahren

3.3.1 Schwierigkeitsgrad von Manipulationen

Der Schwierigkeitsgrad für Manipulationen ist nicht unmittelbar durch das Wahlgerätekonzept vorbestimmt. Keines der Konzepte hat an sich die Potenz, leichter oder schwerer manipulierbar zu sein. Der Schwierigkeitsgrad hängt vielmehr von der Eignung der jeweils implementierten Sicherheitsverfahren und von den organisatorischen Begleitvorschriften ab, die grundsätzlich für alle Konzepte mehr oder weniger stark ausgebaut sein können.

3.3.2 Breitenwirksamkeit von Manipulationen

Hier geht es um die Frage, welche Auswirkungen Fehler bzw. erfolgreiche Manipulationen haben können. Neben Manipulationen mit lokaler Bedeutung (Angriffe auf die fertigen Stimmzettel oder auf die Wahlgeräte in einem Wahllokal) gibt es Manipulationsmöglichkeiten, die früher ansetzen und somit dann globale Wirkung haben (z. B. Angriffe auf den Herstellungsprozess der Wahlgeräte oder den Druckprozess der Stimmzettel). Für jedes Wahlgerätekonzept muss daher vor dessen Einsatz geklärt werden, ob Manipulationen nur für ein Gerät bzw. System anwendbar oder ob sie auf andere Systeme der gleichen Bauart übertragbar sind.

Nach bisheriger Kenntnis ist bei allen betrachteten Wahlgerätekonzepten eine gelungene Manipulation jeweils auf Geräte der gleichen Bauart übertragbar. Inwieweit die Verbreitung gehemmt oder unterbunden werden kann, hängt von der Ausgestaltung und Wirksamkeit der zukünftig technisch implementierten und der begleitenden organisatorischen Sicherungsmaßnahmen ab.

3.3.3 Entdeckungschancen für Manipulationen

Hier werden die Chancen für die Entdeckung von Manipulationen betrachtet. Einbezogen werden sowohl die Möglichkeiten, die Wähler ohne Spezialkenntnisse haben, als auch die Möglichkeiten von Experten. Bei letzteren spielt am Ende der Aufwand, der zur Aufdeckung von Manipulationen getrieben werden muss, für die Bewertung der Chancen eine erhebliche Rolle.

Bei allen betrachteten Wahlgerätekonzepten sind Manipulationen an Hard- und Software grundsätzlich für Experten erkennbar. Allerdings kann der Aufwand, den man zur Aufdeckung der Manipulationen betreiben muss, hoch sein.

Digitales Wahlstiftsystem, NEDAP-System und scannerbasiertes Wahlsystem

Der für Personen ohne Spezialkenntnisse mögliche Vergleich zwischen elektronisch gezählten Stimmen und den ausgezählten Papierstimmen gibt keine sichere Auskunft über Manipulationen an den Geräten, da Abweichungen auch durch Wähler in den Wahlkabinen erzeugt worden sein könnten.

Punchscan-Voting

Die Wähler können anhand des Vergleichs ihrer Belege mit den Informationen des Bulletin-Boards ggf. die Nichtberücksichtigung ihrer Stimme bei der Auszählung aufdecken.

Experten können die Integrität der Stimmenauszählung mit mathematisch-kryptographischen Mitteln verifizieren.

Bingo-Voting

Die Wähler können anhand des Vergleichs ihrer Belege mit den Informationen des Bulletin-Boards ggf. die Nichtberücksichtigung ihrer Stimme bei der Auszählung aufdecken.

Experten können die Integrität der Stimmenauszählung mit mathematisch-kryptographischen Mitteln verifizieren.

Es ist eine Schwachstelle bekannt geworden [17], wonach es möglich ist, dass die Angabe auf dem Bulletin-Board in Folge einer Manipulation eine trügerische Gewissheit über die Korrektheit der Stimme vermitteln könnte. Im Moment ist nicht beurteilbar, ob diese Schwachstelle bereits im Konzept behebbar ist.

Three-Ballot-Voting

Die Wähler können anhand des Vergleichs ihrer Belege mit den Informationen des Bulletin-Boards ggf. die Nichtberücksichtigung ihrer Stimme bei der Auszählung aufdecken.

Jeder Wähler kann aufgrund der auf dem Bulletin-Board dargestellten Gesamtheit aller Stimmzettel die Korrektheit der Stimmenauszählung überprüfen.

Abweichungen beim Vergleich der Wählerbelege mit den Informationen des Bulletin-Boards bzw. zwischen elektronisch gezählten Stimmen und den ausgezählten Papierstimmen sind Hinweise auf Manipulationen oder Fehler in den Geräten, falls beim Kopieren und Einscannen ausgeschlossen werden kann, dass durch Wähler Störungen vorgenommen wurden. Durch Stichprobenauszählungen können die Entdeckungschancen von Manipulationen erhöht werden.

Scannerbasiertes Zählsystem

Die Entdeckungschancen – auch für Personen ohne Spezialkenntnisse – sind durch ein stichprobenbasiertes Verfolgen der Auszählung gut.

4 Fazit

Zusammenfassend können einige interessante Feststellungen getroffen werden. Hervorgehoben werden sollen die folgenden Tendenzen:

- Mit Ausnahme des scannerbasierten Zählsystems bietet keines der untersuchten Wahlsysteme eine vollständige Transparenz während der Wahl.
- Die Wahrung des Wahlgeheimnisses ist mit Ausnahme des scannerbasierten Zählsystems während der Wahl nicht transparent. Für Personen ohne Spezialkenntnisse ist die Wahrung des Wahlgeheimnisses auch nicht nachträglich überprüfbar.
- Die für scannerbasierte Zählsysteme zutreffende Transparenz für die Wahrung des Wahlgeheimnisses trifft auch für scannerbasierte Wahlsysteme zu, wenn der Scannvorgang nicht durch die Wähler, sondern im Anschluss für alle Stimmzettel durch den Wahlvorstand vorgenommen wird.
- Unter Zugrundelegung geeigneter organisatorischer Begleitregelungen kann die Erfüllung der Anforderungen einschließlich der Wahrung des Wahlgeheimnisses bei allen untersuchten Wahlsystemen vor und nach der Wahl von Experten im Wesentlichen nachvollzogen werden.
- Das digitale Wahlstiftsystem, das NEDAP-Konzept und das scannerbasierte Wahlsystem bieten im Vergleich zu den End-to-End-verifizierbaren Systemen keine individuellen Nachweismöglichkeiten über den Verbleib der Stimme.
- Für die Wähler ist der Preis für die Verifizierbarkeitseigenschaft bei den End-to-End-verifizierbaren Systemen die mehr oder weniger starke Abweichung von den bekannten, konventionellen Wahlverfahren.
- Das digitale Wahlstiftsystem, das scannerbasierte Wahlsystem und mit Abstrichen auch das NEDAP-System haben eine Schwäche: Man muss einkalkulieren, dass eventuelle Differenzen zwischen elektronischer und Papierstimme kein Systemfehler sind, sondern von Wählern herbeigeführt worden sein könnten. Beim NEDAP-Konzept kann diese Schwäche am ehesten durch entsprechende organisatorische Regelungen kompensiert werden.
- Scannerbasierte Zählsysteme bieten im Vergleich zu den anderen Konzepten die geringste technische Unterstützung an, haben aber im Gegenzug nahezu keine Transparenz- bzw. Nachvollziehbarkeitsdefizite.

	DWS	NEDAP	SWS	PS	BV	TBV	SZS
Tranzparenz der Wahlbläufe							
Gesamtablauf	E	E	E	E	E	E(W)	W
Wahlvorschläge und Stimmenabgabe	W	W	W	(W)	E(W)	(W)	W
Entstehung der zu zählenden Stimme	-	-	-	-	-	-	W
Aufbewahrung und Verwendung der zu zählenden Stimme	-	-	-	(W)	(W)	(W)	W
Wahrung des Wahlgeheimnisses	-	-	(W)	-	-	-	W
Stimmenauszählung	-	-	-	-	-	-	(W)
Nachprüfbarkeit der Wahlergebnisse							
Anforderungen und Vorschriften	(E)	(E)	(E)	(E)	E	E	E(W)
Wahlbeteiligung							
individuell	-	-	-	W	W	W	-
gesamt	(W)	(W)	(W)	(W)	(W)	(W)	W
Stimmenverwendung bei der Auszählung	(W)	(W)	(W)	(E)	E	(W)	W
Wahrung des Wahlgeheimnisses	E	E	E	E	E	E	E(W)
Stimmenauszählung							
elektronisch	E	E	E (W)	E	E	E	E (W)
Papier bzw. ohne Spezialkenntnisse	W	W	W	-	(W)	W	W

Tabelle 1:
Übersicht der merkmals-
bezogenen Bewertungen
für ausgewählte Wahl-
gerätekonzepte

W „für die Wähler verständlich“, „von den Wählern durchführbar“ oder „von den Wählern nachvollziehbar“,
E „nur für Experten verständlich“, „nur von Experten durchführbar“ oder „nur von Experten nachvollziehbar“,
- weder für Wähler noch für Experten verständlich bzw. nachvollziehbar.

Mit der Darstellung in Tabelle 1 wird versucht, eine Übersicht über die Bewertungen zu geben. Es ist offenkundig, dass die Unterschiede mit ihren Feinheiten in der Tabelle nicht erfassbar sind. Interpretationsdifferenzen sind nicht ausgeschlossen. Dennoch gibt die Tabelle einen Gesamteindruck.

Wenn eine Eigenschaft nur mit Einschränkungen zutrifft, ist sie in Klammern gesetzt.

5 Referenzen

- [1] BVerfG, 2 BvC 3/07 vom 3.3.2009, Absatz-Nr. (1–163), http://www.bverfg.de/entscheidungen/cs20090303_2bvc000307.html
- [2] Wahlcomputer und der verfassungsrechtliche Grundsatz der Öffentlichkeit der Wahl, NVwZ 11/2009, 700–702
- [3] Fischer, Maehle, Reischuk (eds.): Informatik 2009 – Im Focus das Leben, Workshop „Elektronische Wahlen, elektronische Teilhabe, Societyware – mitten im Leben!“, Lecture Notes in Informatics, Bd. 154, GI, Bonn, 1767–1862, 2009
- [4] V. Hartmann, N. Meißner, D. Richter: Unter-
setzung des gesetzlichen Anspruches auf
Nachweisbarkeit der ordnungsgemäßen
Durchführung einer Online-Wahl, Arbeits-
papier im Rahmen des BMWi-geförderten
Vorhabens „Online-Wahlen:Zertifizierung
und Verifikation“, Förderkennzeichen
01 MS 06003, 25. Oktober 2006
- [5] Voluntary Voting System Guidelines Re-
commendations to the Election Assistance
Commission, Technical Guidelines Deve-
lopment Committee, August 2007,
[http://www.eac.gov/files/vvsg/Final-TGDC-
VVSG-08312007.pdf](http://www.eac.gov/files/vvsg/Final-TGDC-VVSG-08312007.pdf)
- [6] NIST Workshop on End-to-End Voting Sys-
tems, The George Washington University,
Washington DC, October 13–14, 2009
- [7] P. Y. A. Ryan: The Computer Ate my Vote,
University of Newcastle upon Tyne, Com-
puting Science, Technical Report Series,
No. CS-TR-988 November, 2006,
[http://www.cs.ncl.ac.uk/research/pubs/trs/
papers/988.pdf](http://www.cs.ncl.ac.uk/research/pubs/trs/papers/988.pdf)

- [8] Schutzprofil „Digitales Wahlstift-System“, V 1.0.1 BSI-PP-0031, <http://www.bsi.de/zertifiz/zert/reporte/PP0031b.pdf>, 2007
- [9] *Willi Beiß*: Hamburg-Wahlen 2008: Hamburg wählt digital, Präsentation des Landeswahlleiters der Freien und Hansestadt Hamburg, 27.01.2007
- [10] *Herbert Schulze Geiping*: Wahlgeräte nach dem Karlsruher Urteil vom 03. März 2009, Eine Betrachtung der zukünftigen Möglichkeiten, NEDAP HSG Wahlsysteme, http://wahlsysteme.de/Wahlnachrichten/2009/09-04-20_Wahlgeraete_nach_dem_Karlsruher_Urteil_HSG_02.pdf, 2009
- [11] AVANTE Precinct-Based Optical Scan Solution is First To Provide Verifiability and Auditability, <http://www.avantetech.com/products/elections/optical/>
- [12] *Stefan Popoveniuc, Ben Hosp*: An Introduction to Punchscan, The George Washington University – CS Dept. Washington DC 20052, October 15, 2006, www.punchscan.org/papers/popoveniuc_hosp_punchscan_introduction.pdf
- [13] *David Chaum, Richard Carback, Alan Sherman, Jeremy Clark, Stefan Popoveniuc, Poorvi Vora*: Scantegrity: end-to-end voter-verifiable opticalscan voting, IEEE Computer society, IEEE security & privacy 1540-7993/08, pp. 40–46, <http://scantegrity.org/papers/scantegrity-IEEEESP.pdf>, 2008
- [14] *David Chaum, Richard Carback, Jeremy Clark, Aleksander Essex, Stefan Popoveniuc, Ronald L. Rivest, Peter Y. A. Ryan, Emily Shen, Alan T. Sherman*: Scantegrity II: End-to-End Verifiability for Optical Scan Election Systems using Invisible Ink Confirmation Codes, <http://scantegrity.org/papers/ScantegrityII-EVT.pdf>
- [15] *Stefan Röhrich*: Bingo Voting – technische Kurzbeschreibung, <http://www.bingovoting.de/docs/bingovoting-deutsch.pdf>
- [16] *Ronald L. Rivest*: The ThreeBallot Voting System, Computer Science and Artificial Intelligence Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139, October 1, 2006 <http://people.csail.mit.edu/rivest/Rivest-TheThreeBallotVotingSystem.pdf>
- [17] *Hupf, Katharina; Meletiadou, Anastasia*: End-to-End-verifizierbare Wahlverfahren in Hinblick auf den Grundsatz der Öffentlichkeit der Wahl. In: [3], 1847–1855

VACUUM



precision made in germany



77 K up to 100°C • Up to UHV • Custom design



Phone: + 49 7634 50 57 - 0 | www.micos.ws