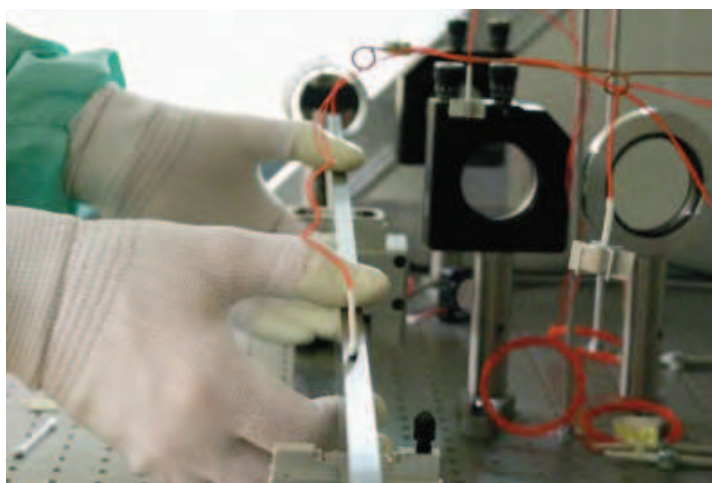


Nouvel interféromètre pour cales étalon jusqu'à 1 m

Le laboratoire de longueur de METAS met en service un interféromètre à multiples longueurs d'ondes pour la mesure de cales étalon jusqu'à 1 m.

ALAIN KÜNG, RUDOLF THALMANN



1 Le nouvel interféromètre du METAS.

Depuis la définition du mètre au temps de la révolution française (1790) comme étant la 40-millionième partie de la circonférence terrestre, les cales étalon « en bout », puis les étalons à traits, ont servi d'étalon primaire pour cette unité fondamentale.

Importances des cales de 1 m

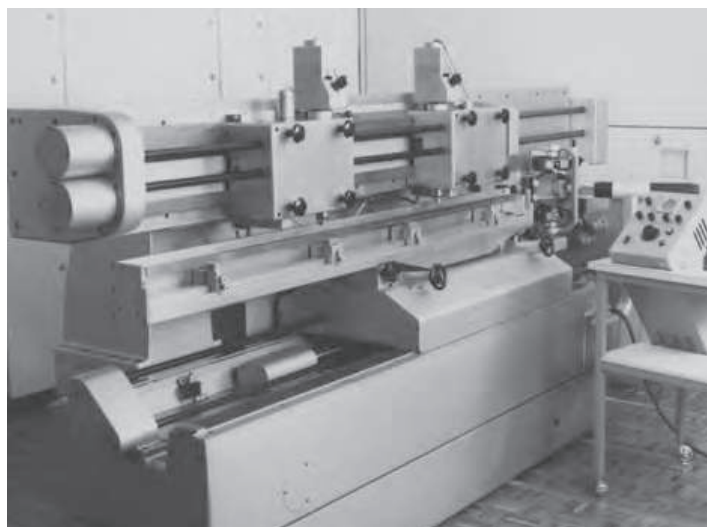
Ce n'est qu'en 1960 que le mètre abandonne sa définition physique pour être basée sur la longueur d'onde de la lumière émise par l'atome de krypton 86, puis défini de manière plus générale en 1983 sur la base de la vitesse de la lumière dans le vide. Depuis, les étalons à traits de précision ont donc été progressivement abandonnés, mais l'utilisation des cales « en bout » en tant qu'étalon de transfert reste d'actualité, car elles servent aujourd'hui encore au réglage de la plupart des machines outils et des instruments à mesurer de l'industrie.

Le comparateur SIP CLP-10 de 1960

En 1958, l'Office fédéral des poids et mesures mandate la Société Genevoise d'Instruments de Physique (SIP) pour concevoir un comparateur pour étalons à traits et étalons à bouts adapté aux dernières nouveautés de l'époque. Après quatre années de développement avec le Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) à Paris, l'office reçoit en

1962 un comparateur muni d'un chariot à palier hydrostatique à huile supportant l'étalon à mesurer, de deux microscopes photoélectriques pour le repérage précis des traits et d'un interféromètre à lumière blanche pour la localisation des faces de l'étalon à mesurer. Ce système permettait ainsi de comparer la longueur des étalons à traits et les cales « en bout » selon l'ancienne définition du mètre. Par la suite, ce comparateur fut modifié à plusieurs reprises, notamment pour être équipé d'un interféromètre laser pour garantir la traçabilité à la nouvelle définition optique du mètre (photo 2).

Après plus de 46 années de bons et loyaux services, le comparateur prend aujourd'hui sa retraite, car la méthode de mesure possède un inconvénient majeur : elle nécessite le déplacement de la cale à mesurer. La méthode est délicate

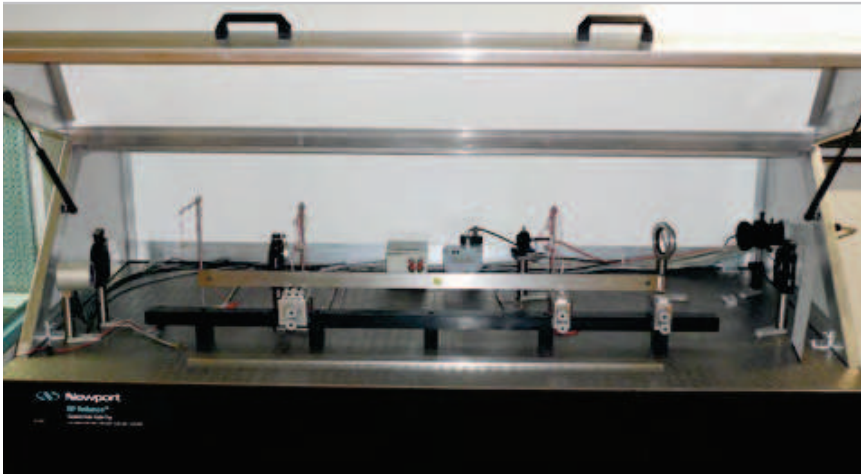


2 Comparateur SIP CLP-10 des années soixante installé à l'ancien Office fédéral des poids et mesures à Wabern.

et laborieuse ce qui justifie son remplacement par une mesure tout optique utilisant l'interférométrie à excédents de franges à plusieurs longueurs d'ondes.

Principe de mesure du nouvel interféromètre

Le nouveau système est composé, d'une part, d'un caisson renfermant l'interféromètre entièrement passif, et d'autre part, d'un rack ventilé renfermant tous les instruments de mesure qui dissipent de la chaleur (photo 3).



3 Caisson renfermant l'interféromètre et rack ventilé renfermant tous les instruments de mesure.

L'interféromètre, dont la structure est décrite sur la photo et l'illustration 4, permet la mesure de cales étalon jusqu'à 1000 mm sans aucun déplacement. Ce genre d'interféromètre équipe déjà certains laboratoires de métrologie nationaux.

Le faisceau optique parallèle formé par la lentille L_1 à la sortie de la fibre optique FO est divisé en deux par la lame semi-transparente B , formant ainsi les deux bras de l'interféromètre de type Michelson. La cale à mesurer G est placée dans le bras de mesure dont le faisceau est réfléchi sur lui-même par sa face avant et par le miroir A accolé à sa face arrière. Re combiné avec le faisceau réfléchi par le miroir M_2 du bras de référence, une image des franges d'interférences est formée sur la camera C . Le miroir PZ monté sur des actuators piézo-électriques permet de faire varier la phase des interférences, ainsi que d'aligner le faisceau perpendiculairement à la face arrière de la cale à mesurer. Les capteurs de température TM_1 et TM_2 mesurent la température de la cale tandis que les capteurs de température TA_1 à TA_3 , les capteurs d'humidité H , de teneur en CO_2 et de pression atmosphérique P déterminent l'indice de réfraction de l'air.

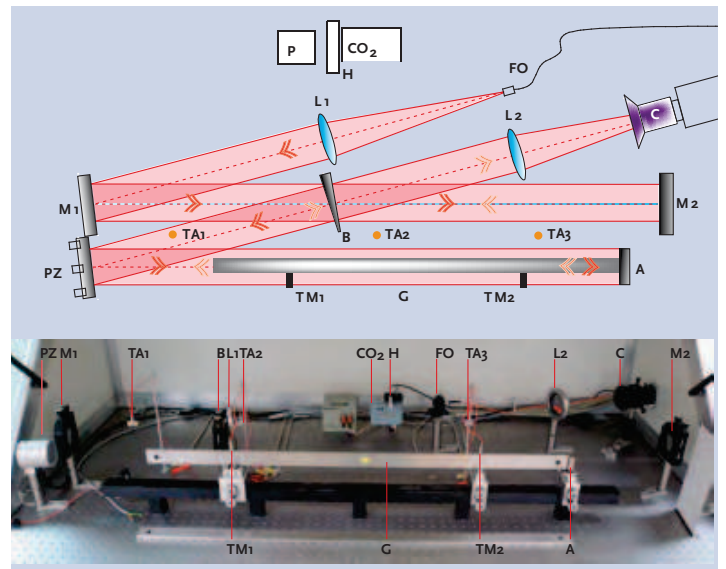
L'analyse de l'image des franges d'interférence (photo 5) permet de déterminer la différence de phase $\delta\phi_i$ (excédent de frange) entre la lumière réfléchie par la face avant de la cale et la lumière réfléchie par le miroir accolé à sa face arrière.

$$L = \left(N_i + \frac{\delta\phi_i}{2\pi} \right) \frac{\lambda}{2}$$

La longueur L de la cale est ainsi connue modulo un nombre entier N_i de la demi longueur d'onde λ_i . Pour déterminer sa longueur sans l'ambiguïté due à N_i , la mesure des excédents de franges $\delta\phi_i$ est effectuée plusieurs fois en changeant la longueur d'onde de la lumière λ_i . Connaissant la longueur absolue de la cale à l'aide d'une pré mesure mécanique à quelques μm près, la longueur exacte peut être déterminée en cherchant la meilleure coïncidence des facteurs N_i de l'équation ci-dessus.

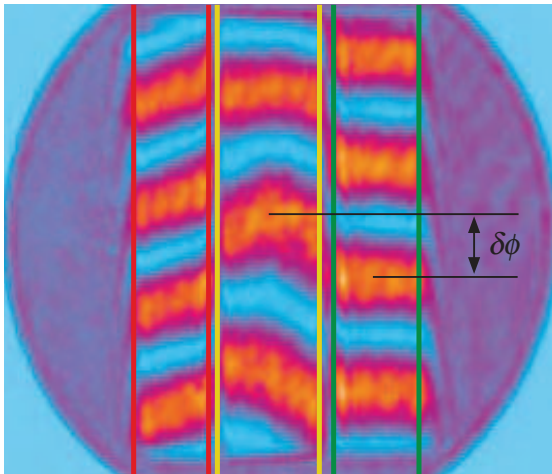
Traçabilité et sources lasers

L'interféromètre utilise actuellement deux lasers HeNe de longueurs d'onde 633 nm (rouge) et 543 nm (vert). Les modes des deux lasers sont stabilisés sur le centre de la courbe de gain de l'HeNe, ce qui leur confère une stabilité relative supérieure à 10^{-8} à court et à long terme. Le laser rouge à 633 nm est directement raccordé à la réalisation de la définition du mètre, soit le laser primaire de METAS stabilisé à l'iode.



4 Illustration et photo de l'interféromètre avec la cale à mesurer au premier plan.

Le laser vert est de plus petite priorité dans la chaîne de traçabilité avec des exigences moins poussées. Il peut être étalonné à l'aide d'une cale connue ou d'un peigne de fréquences à disposition dans le laboratoire des fibres optiques de METAS. Afin d'élargir la zone d'ambiguïté et de ne plus devoir recourir à une pré mesure mécanique, l'achat d'une troisième



5 Images en fausses couleurs des franges d'interférences sur la face avant de la cale à mesurer (zone au centre) et sur le miroir accolé à la face arrière de la cale (zones latérales). Le saut de phase entre les zones latérales et centrale permet de déduire la longueur de la cale.

source est envisagée : un laser stabilisé Nd : YAG doublé en fréquence qui offre une longueur d'onde de 532 nm.

Imperfections optiques

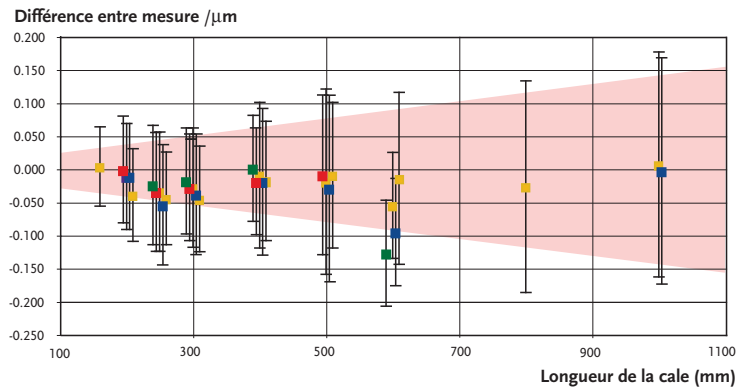
Bien qu'étant de la meilleure facture, les composants optiques ont toujours une imperfection qui déforme le front d'onde du faisceau optique. La configuration choisie pour l'interféromètre utilise donc un minimum de composants. De plus, une fois l'interféromètre ajusté, l'ensemble du système optique est calibré à l'aide de mesures permettant la séparation d'erreur afin de pouvoir calculer et corriger numériquement le défaut du front d'onde optique.

La matière du miroir d'accolement est identique à celle de la cale, généralement de l'acier, pour garantir que le saut de phase lors de la réflexion de la lumière sur la cale soit rigoureusement identique à celle sur le miroir.

Les mesures de température

La détermination de l'indice de réfraction de l'air est primordiale et dépend entre autre fortement de la température de l'air. La configuration de l'interféromètre avec son bras de mesure replié parallèlement au bras de référence assure que l'air dans les deux bras ait des caractéristiques très similaires. Tout l'interféromètre est placé dans un caisson isolant pour le protéger de toute influence extérieure, toutes les sources de chaleur (lasers instruments de mesure, camera...) étant situées à l'extérieur ou dans le rack d'instrumentation ventilé.

A l'intérieur du caisson, l'air est brassé en douceur pour assurer son homogénéité, permettant ainsi de mesurer précisément ses paramètres en évitant au mieux tout gradient de température. L'uniformité de la température de l'air au sein du caisson est de l'ordre de 0.002 °C. Les cales étant généralement en acier, elles présentent de ce fait un coefficient de



■ Différence avec mesure de 2004 ■ 2001 ■ 1996 ■ 1991.

6 Validation du nouveau système interférométrique par comparaison des mesures de cales effectuées sur l'ancien comparateur.

dilatation élevé ($11.5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$). Il est donc primordial de déterminer la température absolue de la cale lors de la mesure et d'effectuer la mesure aussi proche que possible de la température de référence de 20 °C. Les capteurs de température sont étalonnés avec un thermomètre étalon à résistance de platine qui est une des références secondaires du laboratoire de thermométrie de METAS.

Malgré les plus grands soins, ce rattachement à l'échelle absolue de température présente une incertitude de 0.01 °C, ce qui correspond, pour une cale de 1 m en acier, à une incertitude sur sa longueur de 115 nm. La mesure de la température de la cale à mesurer représente ainsi la contribution dominante au budget d'incertitude total pour une cale en acier.

Paramètres mécaniques

Malgré le fait que la mesure interférométrique permet de déterminer la longueur de la cale à mesurer sans déplacement de celle-ci, la méthode est tout de même sensible à quelques paramètres mécaniques. La mesure nécessite l'accolement d'un miroir sur la face arrière de la cale pour en déterminer sa longueur. L'épaisseur du film d'huile utilisé pour l'accolement, le défaut de forme du miroir et le poids de ce dernier, malgré le fait qu'il soit compensé par un système adéquat, sont autant de facteurs qui limitent la reproductibilité de la mesure. La cale est ainsi mesurée plusieurs fois et retournée pour accoler le miroir tantôt sur sa face arrière ou avant. La reproductibilité de la mesure est néanmoins généralement de $\pm 21 \text{ nm}$ (écart type).

Traitement des données automatisées

Conformément à la norme ISO 3650, la cale est placée horizontalement et par conséquent plie sous son propre poids. La cale doit donc être supportée précisément sous ses points

de Airy qui assurent malgré la flexion de la cale que ses faces avant et arrière soient parallèles. La position de ces points est généralement indiquée par une gravure sur la cale.

L'étalonnage d'une cale selon la norme ISO 3650 prévoit de déterminer non seulement la longueur au centre de la cale, mais aussi la planéité de chaque face, leur parallélisme et la variation de longueur de la cale en tout point de ses faces. La norme fixe aussi des valeurs limites pour ces paramètres afin de satisfaire aux différentes classes de qualité des cales.

Une fois la cale en position et grossièrement alignée dans le bras de l'interféromètre, le logiciel de traitement des données prend en charge l'alignement fin et détermine automatiquement grâce à l'image des franges d'interférence tous les paramètres de la cale selon la norme. La mesure est ainsi rapide et indépendante de l'alignement effectué par l'opérateur.

Incertitude de mesure et validation

L'incertitude de mesure élargie de l'interféromètre est donnée par

$$U = \sqrt{(27 \text{ nm})^2 + (0.14 \cdot 10^{-6} \cdot L)^2} \approx 16 \text{ nm} + 0.13 \cdot 10^{-6} \cdot L$$

soit de 146 nm pour une cale en acier de 1 m. Comme mentionné précédemment, la principale contribution au budget d'incertitude provient de l'étalonnage en température des thermistors, qui elle n'a pas changée suite à l'introduction du nouvel interféromètre. L'incertitude de mesure est néanmoins meilleure que celle obtenue par l'ancien comparateur car la nouvelle méthode est plus rapide, ne nécessite pas de déplacement de l'étalon à mesurer, ni l'estimation visuelle des excédents de franges.

La validation de la place de mesure a eu lieu par comparaison avec des mesures de cales de 200 mm à 1000 mm effectuées à plusieurs reprises entre 1991 et 2004 sur l'ancien comparateur. En moyenne, les différences entre ces mesures (voir diagramme 6) sont largement inférieures à l'incertitude de mesure. Elles montrent tout de même un léger écart systématique de 29 nm, par contre aucun écart significatif proportionnel à la longueur n'est observable, ce qui tend à démontrer que les alignements de l'optique, l'étalonnage des capteurs d'environnement et l'étalonnage des capteurs de température ne peuvent être incriminés et ont été réalisés avec une très bonne reproductibilité.

Des mesures pour une comparaison internationale ont été effectuées en 2001 à l'aide de l'ancien comparateur. Les excellents résultats obtenus lors de cette comparaison permettent donc aussi de rattacher indirectement la validation du nouvel interféromètre à des résultats internationaux.

Interféromètre de précision très élevée

Le nouvel interféromètre à multiples longueurs d'onde remplace donc avantageusement le comparateur de 1960, car en plus d'une amélioration de la précision de mesure, il permet un gain de temps et de fiabilité dans l'étalonnage de cales jusqu'à 1 m. Le fait que le nouvel interféromètre n'est pas adapté à la mesure des étalons à traits en acier n'est pas un inconvénient car leur utilisation a été abandonnée au profit des règles à traits en verre ou des photo masques 2D, pour lesquelles METAS dispose d'une machine à mesurer spécifique de précision très élevée.



Alain Küng (à gauche),
Section Longueur, optique et temps,
tél. +41 31 32 34 641, alain.kueng@metas.ch
Rudolf Thalmann (à droite),
Chef de Section Longueur, optique et temps,
tél. +41 31 32 33 385, rudolf.thalmann@metas.ch

Neues Interferometer für Parallelendmasse bis 1 m

Als Ersatz für den aus den frühen Sechziger-Jahren stammenden SIP-Komparator hat METAS ein neues Interferometer für die Kalibrierung langer Parallelendmasse bis 1000 mm gebaut. Unter Verwendung von zur Zeit zwei HeNe-Lasern der Wellenlänge 633 nm (rot) und 543 nm (grün) und der Streifenbruchteilermethode können die Endmasse direkt an die Realisierung der Meterdefinition angeschlossen werden. Die Messungen erfolgen statisch, d. h. ohne Verschiebung der Endmasse.

Das eigens entwickelte Steuerungs- und Auswerteprogramm übernimmt die automatische Feinausrichtung des Endmasses und bestimmt aus den aufgenommenen Interferenzstreifenbildern alle relevanten Messgrößen gemäß ISO 3650. Die Messungen sind schnell und unabhängig vom Operator.

Bedingt durch die thermische Ausdehnung von Stahlendmassen ist eine genaue Messung der Temperatur der Endmasse, die möglichst nahe bei der Bezugstemperatur von 20 °C liegen muss, unumgänglich. Durch ein thermisch isolierendes Gehäuse ist das Interferometer vor äusseren Einflüssen optimal geschützt. Trotz diesen Massnahmen bleibt im Messunsicherheitsbudget der Temperatureinfluss der dominierende Beitrag.

Ein Vergleich mit mehreren Endmassen, die in den Jahren 1991 bis 2004 auf dem alten Komparator kalibriert und deren Werte durch die Teilnahme an internationalen Messvergleichen abgestützt worden sind, ergab eine sehr gute Übereinstimmung. Mit der Inbetriebnahme des neuen Messplatzes am METAS konnten die Messunsicherheit und die Zuverlässigkeit verbessert und zusätzlich ein Zeitgewinn für die Endmasskalibrierung realisiert werden.

Nuovo interferometro per blocchetti di riscontro fino a 1 m

Il laboratorio della lunghezza del METAS mette in servizio un interferometro a eccedenti di frangia a lunghezza d'onda multipla per la misurazione senza alcuno spostamento di blocchetti di riscontro fino a 1 000 mm. L'interferometro utilizza attualmente due laser HeNe di lunghezza d'onda pari a 543 nm (verde) e a 633 nm (rosso); quest'ultimo è direttamente connesso con la realizzazione della definizione del metro.

Il programma di elaborazione dei dati si occupa dell'allineamento fine del blocchetto all'interno dell'interferometro e mediante l'immagine delle frange d'interferenza determina automaticamente tutti i parametri del blocchetto secondo la norma ISO 3650. In tal modo le misurazioni sono rapide e indipendenti dall'allineamento effettuato dall'operatore.

Siccome i blocchetti sono generalmente di acciaio e quest'ultimo possiede un coefficiente di dilatazione elevato, è indispensabile determinare esattamente la loro temperatura, che deve essere il più vicino possibile alla temperatura di riferimento di 20°C. L'interferometro è quindi rinchiuso in una custodia per isolarlo in modo ottimale da ogni fonte di calore. L'analisi dettagliata del budget d'incertezza di misura mostra che, malgrado le precauzioni prese, il contributo principale proviene dalla taratura a livello di temperatura dei termistori.

La convalida del posto di misura è stata fatta mediante raffronto con misurazioni di blocchetti da 200 mm a 1 000 mm effettuate a varie riprese tra il 1991 e il 2004 sul comparatore precedentemente in servizio. Dato che nel 2001 sono state eseguite delle misure per un confronto internazionale, la convalida del nuovo interferometro è quindi pure collegata indirettamente a dei risultati internazionali. Rispetto al vecchio sistema il nuovo interferometro consente un risparmio di tempo e una migliore affidabilità nella calibrazione di blocchetti fino a 1 m.

New interferometer for gauge blocks up to 1 m

Replacing the old SIP-comparator, which was installed in the early sixties, METAS has built a new interferometer for the calibration of gauge blocks up to 1000 mm. Based on the method of exact fringe fractions and using two HeNe-Lasers with wavelengths 633 nm (red) and 543 nm (green), the measurements are directly traceable to the realisation of the metre definition, this without necessity to physically displace the gauge blocks.

The specially developed software takes care of the automatic fine alignment of the gauge block under test and determines from the recorded images of the interference fringe all relevant quantities according to ISO 3650. The measurements are thus fast and independent of the operator.

Due to the thermal expansion of the steel gauge blocks a precise measurement of the gauge block temperature, which has to accure as close as possible to the 20°C reference, is absolutely essential. A thermally isolated housing protects the interferometer from external disturbance. In spite of these measures, the temperature remains the perturbation factor with the largest contribution in the uncertainty budget.

A comparison with several gauge blocks, calibrated between 1991 and 2004 on the old comparator and whose values are confirmed through participation in international key comparisons, resulted in an excellent agreement. Thanks to this new interferometer; METAS has improved measurement uncertainty, liability and processing time for the calibration of long gauge blocks.