

doi:10.15199/48.2024.12.16

## Procedura ograniczająca niepewność wzorcowania przyrządów na 50 m komparatorze interferencyjnym GUM

**Streszczenie.** 50 m komparator interferencyjny Głównego Urzędu Miar umożliwia wzorcowanie przymiarów, interferometrów, dalmierzy laserowych, tachimetrów oraz laser trackerów. Przedstawiona została analiza czynników mechanicznych, środowiskowych oraz odczytowych wpływających na niepewność pomiarów. Przygotowana została procedura wzorcowania tachimetrów geodezyjnych. W ramach projektu EMPIR 20IND02 DynaMITE wykonano testy wielokolorowego absolutnego dalmierza laserowego.

**Abstract.** The 50 m interference comparator at Central Office of Measures enables calibration of steel tapes, interferometers, EDMs, total stations and laser trackers. An analysis of mechanical, environmental, and line detection factors influencing measurement uncertainty is presented. A procedure for calibrating geodetic total stations, has been prepared. Tests of a multicolor laser ADM were performed as part of the EMPIR 20IND02 DynaMITE project. (Procedure for reducing the uncertainty of instrument calibration on the GUM 50 m interferometric comparator).

**Słowa kluczowe:** wzorcowanie, przymiary, tachimetry, niepewność.  
**Keywords:** calibration, steel tapes, total station, uncertainty.

### Wstęp

Laboratorium Precyzyjnych Pomiarów Przemysłowych Zakładu Czasu i Długości Głównego Urzędu Miar wyposażone jest w zautomatyzowany komparator interferencyjny o zakresie pomiarowym 50 m. Komparator umożliwia wzorcowanie przymiarów sztywnych, półsztywnych i wstępowych, interferometrów, dalmierzy laserowych, tachimetrów, laser trackerów oraz czujników liniowego przemieszczenia. Praca przedstawia badania czynników mechanicznych, środowiskowych oraz odczytowych wpływających na całkowitą niepewność uzyskiwanych pomiarów, które prowadzą do zmniejszenia niepewności pomiarów. Podobne stanowiska pomiarowe funkcjonują w innych laboratoriach NMI (National Measurement Institute) na świecie [1 - 2].

### System pomiarowy 50 m komparatora interferencyjnego

Wzorcowanie przyrządów pomiarowych na stanowisku 50 m komparatora interferencyjnego polega na porównaniu wskazań przyrządu wzorcowanego ze wskazaniami wzorca odniesienia, którym jest He-Ne interferometr laserowy HP 5529A o rozdzielczości 1 nm. Łoże komparatora umieszczone zostało w korytarzu w podziemiach GUM, na 51 betonowych podporach odizolowanych od drgań budynku przestrzenią dylatacyjną. Zdjęcie komparatora przedstawione zostało na rysunku 1.



Rys. 1. Stanowisko pomiarowe 50 m komparatora interferencyjnego umieszczonego w klimatyzowanym korytarzu w podziemiach Głównego Urzędu Miar

Wzdłuż komparatora na dwóch szynach przemieszcza się karetką pomiarowa. Ruch karetki z kamerą wzdłuż stanowiska pomiarowego realizowany jest za pomocą silnika krokowego oraz naprężonej linki pociągowej. Oprogramowanie przygotowane w LabView wysyła rozkazy do sterownika MONOPACK-2 zasilającego silnik. Program umożliwia automatyczny szybki dojazd do celu oraz precyzyjne ruchy naprowadzające na kreski z wyborem prędkości i przyśpieszenia. Ze względu na zastosowanie linki precyzyjne trafienie w miejsce docelowe wymaga wielu drobnych ruchów naprowadzających.

Główne czynniki wpływające na niepewność pomiaru to warunki środowiskowe, wyznaczenie położenia kresek pomiarowych oraz geometria łoża komparatora.

### Monitoring warunków środowiskowych

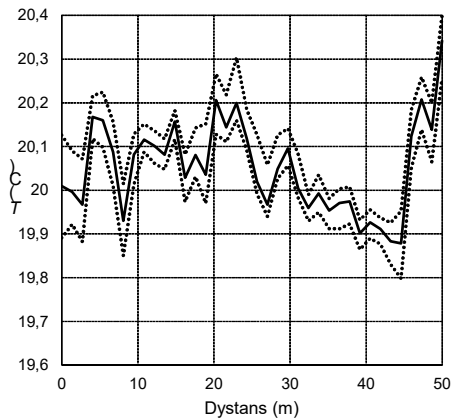
Wskazania interferometru zależą od współczynnika załamania światła w powietrzu, na którego wartość ma wpływ długość fali lasera interferometru oraz warunki środowiskowe, takie jak temperatura, ciśnienie, wilgotność względna oraz zawartość dwutlenku węgla. Obliczanie współczynnika dokonuje się z wykorzystaniem formuły Ciddor [3 - 5] lub Edlena [6].

Warunki środowiskowe mogą różnić się w zależności od położenia wzdłuż wiązki lasera oraz ulegać zmianie w czasie, co sprawia, że konieczne jest stosowanie wielu czujników monitorujących parametry stanowiska w czasie rzeczywistym. Warunki środowiskowe wpływając na wyniki pomiarów powodują wzrost niepewności pomiarów. Dokładny monitoring warunków środowiskowych prowadzi do ograniczenia niepewności wyznaczenia wartości współczynnika załamania światła w powietrzu a tym samym zmniejszenia niepewności pomiaru długości za pomocą interferometru laserowego.

Stanowisko wyposażone jest w czujnik ciśnienia atmosferycznego LB-716 i 5 sensorów wilgotności względnej LB-710A. Rejestratora LB-487 przesyłają wyniki z wykorzystaniem protokołu MODBUS/TCP. Temperatura mierzona jest przez 40 czujników termistorowych YSI współpracujących z multimetrem Keithley 2700. Dane środowiskowe zbierane są przez autorskie oprogramowanie napisane w języku Python.

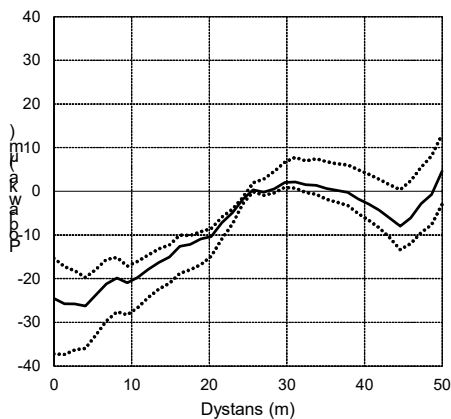
Typową temperaturą odniesienia dla przyrządów do pomiaru długości jest 20 °C, dlatego ważne jest by temperatura w pomieszczeniu była bliska tej wartości. W

celu osiągnięcia pożądaných warunków stanowisko pomiarowe wyposażone jest w dwa klimatyzatory umieszczone na jego końcach. Klimatyzatory pracują niezależnie od siebie w związku z tym ich praca nie jest w żaden sposób ze sobą zsynchronizowana. Skutkuje to ciągłymi zmianami gradientu temperatury wzdłuż komparatora interferencyjnego. Eksperymentalnie dobrane rozmiary i rozmieszczenie otworów nawiewowych oraz parametrów pracy klimatyzatorów pozwoliło na uzyskanie warunków pracy, w których typowe odchylenie temperatury nie przekracza  $\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  od wartości referencyjnej.



Rys.2. Przykładowy rozkład średniej temperatury z zaznaczonym maksymalnym zakresem zmian

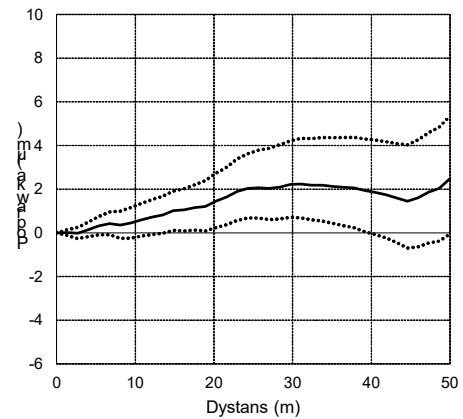
Na rysunku 2 linią ciągłą przedstawiono przykładowy rozkład średniej temperatury wzdłuż 50 m komparatora interferencyjnego. Liniami przerywanymi zaznaczono zakres chwilowych lokalnych zmian temperatury w czasie godziny. Jest to typowy czas konieczna do przeprowadzenia wzorcowania przymiaru lub tachimetru. Największe odchylenia od wartości referencyjnej występują zwykle dla skrajnych czujników na początku i końcu stanowiska pomiarowego.



Rys.3. Poprawka położenia kreski na przymiarze spowodowana przykładowym rozkładem średniej temperatury z rysunku 2 wraz z naniesionym maksymalnym zakresem zmiany jej wartości

Przymiary wykonane są głównie ze stali, aluminium lub szkła w związku z tym rozszerzają się temperaturowo. Zmianie ulega położenie kreski pomiarowych naniesionych na przymiar względem stanowiska pomiarowego. Zmiany zależą sposobu zamontowania przymiaru. Przymiary wstępowe obciążane są na obu końcach siłą 50 N, o ile producent nie wskazał innej wartości. Termiczne zmiany rozmiaru należy wówczas liczyć względem środka stanowiska pomiarowego, a nie środka swobodnie leżącego

przymiaru. Poprawka położenia naniesionych kreski pomiarowych, będąca sumą lokalnych wpływów temperatury, przedstawiona została na rysunku 3.



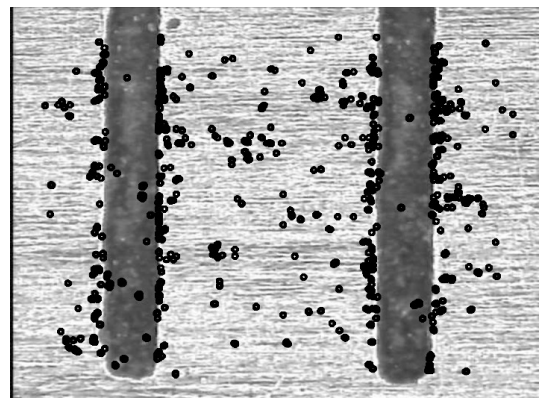
Rys.4. Poprawka wskazań interferometru dla przykładowego rozkładu średniej temperatury z rys. 2 wraz z naniesionym maksymalnym zakresem zmiany wartości

Poprawka wskazań interferometru laserowego wynikająca z przykładowego rozkładu temperatur z rysunku 2 przedstawiona została na rysunku 4. Jej wartość jest o rząd wielkości mniejsza niż poprawka związana z rozszerzaniem się stali. Pomiar temperatury przymiaru ma kluczowe znaczenie na niepewność wzorcowania. Przy powolnych zmianach temperatury przymiar ma taki sam rozkład temperatury co otoczenie. Dla przymiarów szywnych o dużej pojemności termicznej amplituda chwilowych zmian temperatury jest mniejsza od otoczenia.

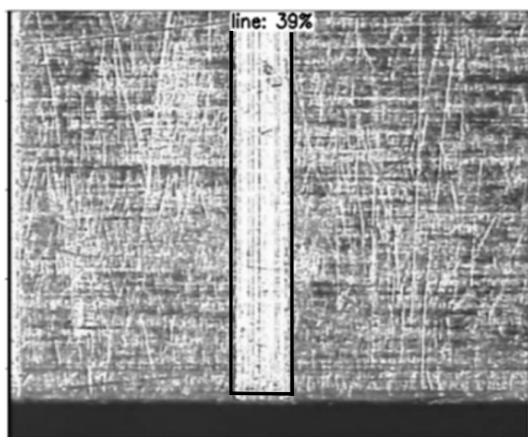
#### Odczyt położenia kreski pomiarowych

Określenie położenia kreski na przymiarach możliwe jest dzięki kamerze z mikroskopem zainstalowanej na karcie pomiarowej. Oprogramowanie wyświetla obraz z kamery i rysuje na nim dwie linie, między którymi ma się znaleźć mierzona kreska. Manualna metoda pomiarów polega na poruszaniu karetką aż do wprowadzenia kreski pomiarowej we właściwe miejsce. Zadanie jest czasochłonne z powodu zmian naprężenia linki w momencie rozpoczęcia poruszania karetką pomiarową oraz czasu potrzebnego na jej zatrzymanie.

Dzięki kalibracji kamery możliwe jest szybsze, bezpośrednie wskazywanie położenia kreski na obrazie. Kalibracja, przedstawiona na rysunku 5, przeprowadzana jest przez porównanie ruchu wykrytych automatycznie punktów charakterystycznych ze wskazaniami interferometru.



Rys.5. Kalibracja skali obrazu z kamery po przez wykrywanie ruchu punktów charakterystycznych

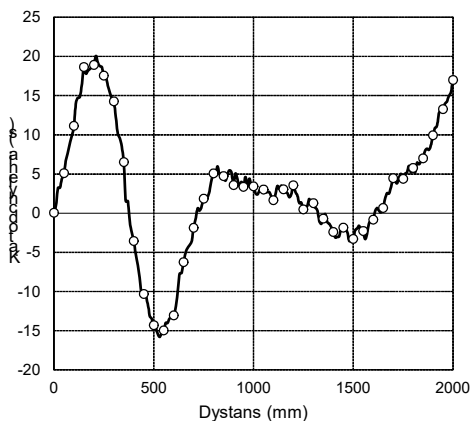


Rys.6. Przykładowe określenie położenia kreski na przymiarze przez sieć neuronową zaznaczoną czarnym prostokątem wraz z procentową oceną prawdopodobieństwa rozpoznania kreski

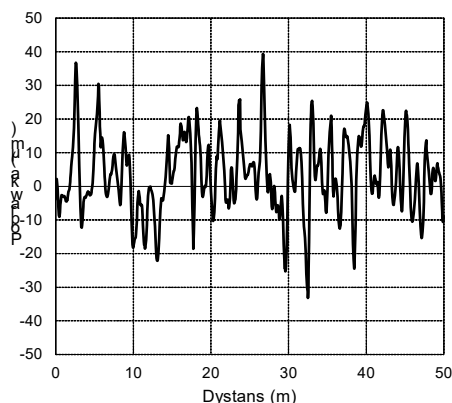
Przykład automatyzacji rozpoznawania kresek pomiarowych z wykorzystaniem analizy obrazu przez sieć neuronową przeszkoloną na 145 wyselekcjonowanych obrazach przedstawiono na rysunku 6. Dotychczas uzyskano 95% skuteczność w wykrywaniu kresek na przymiarze dla 30% progu prawdopodobieństwa rozpoznania określoną przez sieć neuronową. Niepewność wskazania położenia tą metodą jest wciąż 2,5 razy większa od uzyskiwanej przez człowieka i wymaga dalszych prac.

#### Pomiar pochylenia karetki pomiarowej

Kamera z mikroskopem zamontowana jest w centralnej części karetki pomiarowej. Interferometr mierzy odległość do retroreflektora umieszczonego przy krawędzi karetki zwróconej w stronę interferometru. Ekran do wzorcowania dalmierzy oraz retroreflektor do wzorcowania tachimetrów i laser trackerów mocowane są po przeciwnej stronie karetki. Ruch karetki pomiarowej po nieidealnie prostych prowadnicach powoduje odchylenia kątowe, które przekładają się na zmiany położenia osi kamery względem retroreflektora interferometru. Wykonana została analiza wpływu prostoliniowości na wyniki pomiarów przymiarów, dalmierzy laserowych i tachimetrów. W oparciu o pomiary zebrane w odstępach 10 mm na pierwszych 2 m stanowiska pomiarowego określono, że 50 mm jest wystarczającym odstępem pomiędzy kolejnymi punktami pomiarowymi pozwalającymi na określenie odchylenia kątowego karetki pomiarowej (rysunek 7). Zbyt rzadko rozmieszczone punkty mogłyby być niewystarczające do wykonania prawidłowej korekty kątowej.



Rys.7. Odchylenie kątowe zmierzone co 50 mm (punkty) oraz co 10 mm (linia ciągła)



Rys.8. Poprawka stosowania przy wzorcowaniu przymiarów ze względu na odchylenie kątowe karetki pomiarowej.

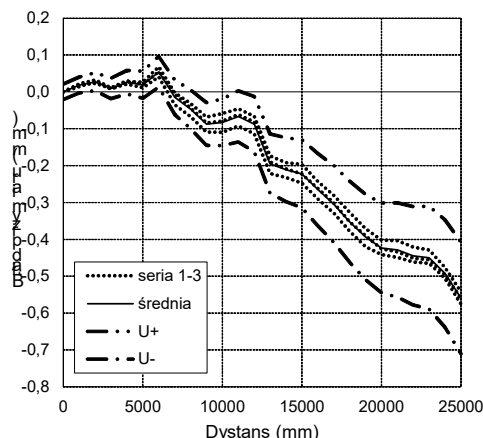
Na rysunku 8 przedstawiono mapę poprawek dla pomiarów przymiarów. Charakteryzuje się ona lokalnymi maksimumi dochodzącymi do 40  $\mu\text{m}$  co jest porównywalne z termicznymi zmianami położenia kresek dla 50 metrowych przymiarów wstęgowych. Określone zostały również poprawki położenia do wzorcowania tachimetrów i laser trackerów.

#### Wzorcowanie przymiarów kreskowych

Stanowisko pomiarowe 50 m komparatora interferencyjnego wykorzystywane jest do zapewnienia spójności pomiarowej dla okręgowej administracji miar oraz laboratoriów wzorcujących poprzez wykonywanie wzorcowań przyrządów pomiarowych.

Wzorcowane przymiary z naniesionymi kreskami układane są na stanowisku pomiarowym równolegle do wiązki lasera. Wzorcowanie polega na pomiarze położenia naniesionych na przymiar kresek, znajdujących się w polu widzenia kamery. Podczas wzorcowania wykonywane są 3 serie pomiarowe. Uwzględniany jest wpływ warunków środowiskowych na wzorcowany przymiar, wskazania interferometru oraz charakterystyka stanowiska.

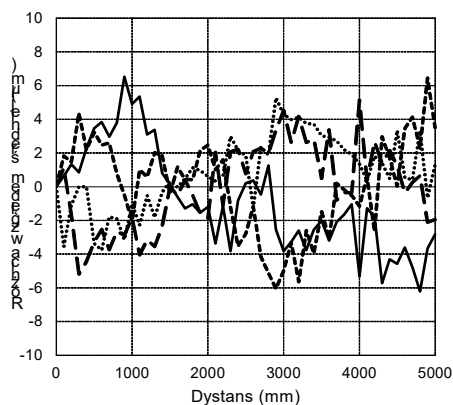
Przykładowe wyniki wzorcowania przymiaru wstęgowego o długości 25 m przedstawione zostały na rysunku 9. Trzy linie kropkowane reprezentują trzy serie pomiarowe. Linia ciągła oznacza wartość średnią z serii pomiarowych. Linie przerywane z jedną i dwoma kropkami oznaczają odpowiednio górny i dolny zakres niepewności rozszerzonej pomiaru zadeklarowanych dla usługi wzorcowania przymiarów kreskowych.



Rys.9. Przykładowe wyniki wzorcowania przymiaru wstęgowego o długości nominalnej 25 m.

Niepewność rozszerzona wzorcowania przymiarów przy poziomie ufności 0,95, naniesiona na rysunku 9, obliczana jest jako pierwiastek z sumy kwadratów czynnika stałego 21  $\mu\text{m}$  oraz zależnego od długości  $L \cdot 6 \mu\text{m}$ , gdzie  $L$  jest długością nominalną wyrażoną w metrach.

Niepewność rozszerzona uwzględniająca niepewność pomiaru interferometrem, ustalenia położenia kresek, charakterystyki łoża oraz pomiaru warunków środowiskowych, została oszacowana zgodnie z przewodnikiem wyrażania niepewności pomiaru [6].



Rys.10. Różnica w wynikach wzorcowania przymiaru sztywnego 5 metrowego dla czterech różnych położzeń początku przymiaru względem początku stanowiska pomiarowego

Skuteczność przedstawionej procedury uwzględniania poprawek termicznych oraz kątowych przedstawiona została na rysunku 10. Porównane zostały wyniki wzorcowania przymiaru sztywnego 5 metrowego dla czterech różnych położzeń punktu zerowego względem początku stanowiska pomiarowego. Różnice wyników względem średniej wartości z czterech wzorcowań sięgają maksymalnie 6  $\mu\text{m}$ .

### Wzorcowanie przyrządów z laserowym pomiarem odległości

W ramach doktoratu wdrożeniowego dokonano modernizacji stanowiska w zakresie wzorcowania przyrządów z laserowym pomiarem odległości jak dalmierze, tachimetry geodezyjne i laser trackery. Procedura wzorcowania uwzględnia zalecenia normy ASME B89.4.19-2021 [7] oraz ISO 17123-4 [8]. Wykorzystano wnioski z porównań międzynarodowych [9].

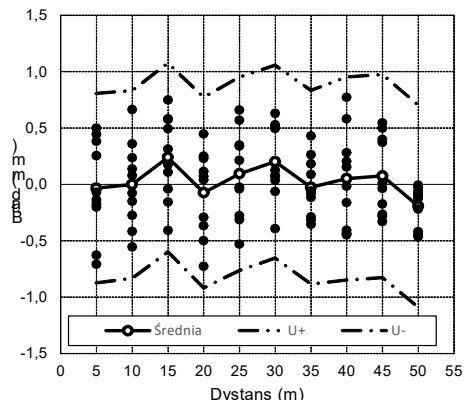
Wzorcowany przyrząd umieszczany jest na końcu komparatora na statywie lub regulowanej podstawie. Wzorcowanie polega na odczycie odległości do ekranu lub retroreflektora poruszającego się na karetkę pomiarowej i porównaniu ze wskazaniami interferometru. Podczas wzorcowania wykonuje się 10 serii pomiarowych. Uwzględniany jest wpływ warunków środowiskowych na wskazana wzorcowanego przyrządu, interferometru oraz charakterystyka stanowiska pomiarowego.

Największymi składnikami budżetu niepewności przy wzorcowaniu dalmierzy i tachimetrów są powtarzalność wyników oraz rozdzielczość wzorcowanego przyrządu. Typowa niepewność rozszerzona wzorcowania tachimetrów i dalmierzy laserowych przy poziomie ufności 0,95 wynosi 0,6 mm. Przykładowe wyniki wzorcowania przedstawione zostały na rysunku 11.

### Udział w międzynarodowych projektach badawczych

Unikalność 50 m komparatora GUM sprawiła, że brał on udział w międzynarodowych projektach metrologicznych EMRP IND53 LUMINAR i EMPiR 17IND03 LaVA. W

ramach projektu EMPiR 20IND02 DynaMITE posłużył do sprawdzenia niepewności dla pomiarów dynamicznych wielokolorowego absolutnego dalmierza laserowego ADM (Absolute Distance Meters) opracowanego przez PTB [10]. W pomiarach wykorzystany został zmodernizowany system pomiarowy 50 m komparatora interferencyjnego.



Rys.11. Przykładowe wyniki wzorcowania tachimetru. Oznaczone zostały wyniki dla 10 serii pomiarowych (czarne punkty), średnie z pomiarów (punkty puste w środku połączone linią) oraz zakres niepewności pomiaru (linie przerywane z kropkami)

### Podziękowania

*This work was performed within the EMPiR project 20IND02 DynaMITE. The 20IND02 DynaMITE project received funding from the EMPiR programme co-financed by the Participating States and from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme.*

*Praca jest wynikiem realizacji programu Doktoratu Wdrożeniowego finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.*

**Autor:** mgr. Mariusz Wiśniewski, Główny Urząd Miar, Zakład Czasu i Długości, ul. Elektoralna 2, 00-139 Warszawa, E-mail: mariusz.wisniewski@gum.gov.pl.

### LITERATURA

- [1] Unkuri J., Rantanen A., Manninen J., Esala V.-P., Lassila A., Interferometric 30 m bench for calibrations of 1D scales and optical distance measuring instruments, *Measurement Science and Technology*, 23 (2012), 094017
- [2] Astrua M., Pisani M., Zucco M., Traceable 28 m-long metrological bench for accurate and fast calibration of distance measurement devices, *Measurement Science and Technology*, 26 (2015), 084008
- [3] Ciddor P.E., Refractive index of air: new equations for the visible and near infrared, *Applied Optics*, 35 (1996), nr 9, 1566-1573
- [4] Pollinger F., Refractive index of air. 2. Group index: comment, *Applied Optics*, 59 (2020), 9771-9772
- [5] Edlén B., The Refractive Index of Air, *Metrologia*, 2 (1966), 71
- [6] BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement JCGM 100:2008, GUM 1995 with minor corrections, *BIPM*, (2008)
- [7] ASME, ASME B89.4.19-2021: Performance Evaluation of Laser-Based Spherical Coordinate Measurement Systems, *ASME*, (2021)
- [8] ISO, ISO 17123-4:2012 Optics and optical instruments—Field procedures for testing geodetic and surveying instruments—Part 4: Electro-optical distance meters (EDM measurements to reflectors), *ISO*, (2012).
- [9] Wiśniewski M., i in., Final report on supplementary comparison EURAMET.L-S20: Comparison of laser distance measuring instruments, *Metrologia*, 51 (2014), 04002
- [10] Köchert P., Meyer T., Yan H., Sauthoff A., Prellinger G. The PTB multiwavelength interferometer for distances up to 5000m, *Physikalisch-Technische Bundesanstalt*, (2023)