

## Lichtstärkeinheit im europäischen Vergleich - Stand der Bearbeitung des aktuellen EURAMET- Schlüsselvergleichs -

Maatje Hilmer, Johannes Ledig

Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig

### Abstract

Die nationalen Metrologieinstitute (NMIs) der Mitgliedsstaaten der Meterkonvention verpflichteten sich 1999 in einer gemeinsamen Vereinbarung, dem „Mutual Recognition Arrangement (MRA)“, zur gegenseitigen Anerkennung der in den NMIs bewahrten Normale und der ausgestellten Ergebnisberichte. Diese Vereinbarung beinhaltet die Aufforderung zu regelmäßig durchgeführten Schlüsselvergleichen um jeweils die Äquivalenz der realisierten Einheiten mit einem Vergleichsreferenzwert, dem „Key Comparison Reference Value“ (KCRV), festzustellen.

Mit der Veröffentlichung des Abschlussberichts im Mai 2022 wurde der aktuelle weltweite Lichtstärkevergleich von 2014 abgeschlossen. Den in diesem Vergleich ermittelte KCRV gilt es nun in den einzelnen Metrologieregionen (Regional Metrology Organizations – RMOs) in einem abgeleiteten Vergleich weiterzugeben.

Anfang 2020 startete ein RMO-Schlüsselvergleich in der EURAMET-Region. Auf dieser Vergleichsebene kann jedes Institut mit der nötigen technischen Kompetenz teilnehmen. Für diesen Sternvergleich mittels glühlampenbasierten Lichtstärkenormallampen vom Typ Osram Wi41/G haben sich 21 Institutionen angemeldet. Als Pilotlabor, welches die Organisation, die Koordination vom Entwurf des Technischen Protokolls für den Ablauf des Vergleichs sowie die Durchführung und Auswertung der Vergleichsmessungen übernimmt, fungiert das METAS, das NMI der Schweiz.

Der KCRV aus dem aktuellen Weltvergleich wird in diesen abgeleiteten Vergleich anhand der Link-Labore PTB (Deutschland), METAS (Schweiz) und IO-CSIC (Spanien) eingebracht.

Die Messungen am Pilotlabor wurden im Dezember 2022 abgeschlossen und die Teilnehmer sind nun angehalten, ihre TransfERNormale abzuholen, bis April 2023 die notwendigen Rückmessungen in ihren Laboren durchzuführen und dem Piloten die Ergebnisse zur finalen Auswertung mitzuteilen.



## 1. Einleitung

Die nationalen Metrologie Institute (NMIs) der Mitgliedsstaaten der Meterkonvention verpflichteten sich 1999 in einer gemeinsamen Vereinbarung dem „Mutual Recognition Arrangement (MRA)“ zur gegenseitigen Anerkennung der in den NMIs bewahrten Normalen und der ausgestellten Ergebnisberichte.

Diese Vereinbarung beinhaltet die Aufforderung zu regelmäßig durchgeführten Schlüsselvergleichen um die Äquivalenz der realisierten Einheiten mit einem Referenzwert, dem „Key Comparison Reference Value“ (KCRV) festzustellen. Die Äquivalenz nationaler Normale im Bereich der Photometrie und Radiometrie wird durch, vom Consultative Committee of Photometry and Radiometry (CCPR) ausgewählte und organisierte, Schlüsselvergleiche festgestellt. Seit Inkrafttreten des MRA wurden für die Lichtstärke zwei weltweite Schlüsselvergleiche durchgeführt. Der erste Schlüsselvergleich wurde 1998/99 durchgeführt und der Zweite, der CCPR-K3.2014 startete im Jahr 2014 und wurde im Mai 2022 mit Veröffentlichung des Abschlussberichtes abgeschlossen. Der in diesem zweiten weltweiten Vergleich ermittelte KCRV wird nun in den jeweiligen Regional Metrology Organisations (RMO) in abgeleiteten Vergleichen an Institute weitergegeben, die nicht am weltweiten Vergleich teilnehmen konnten. In der EURAMET-Region startete ein abgeleiteter Schlüsselvergleich Anfang 2020.

Im Folgenden wird kurz der aktuelle Weltvergleich für die Lichtstärke umrissen und einige Aspekte zur Organisation zum Ablauf und aktuellen Stand des derzeit noch laufenden EURAMET-Schlüsselvergleichs vorgestellt.

## 2. CCPR-K3.2014 globaler Schlüsselvergleich für die Lichtstärke

Das CCPR beschloss 2009, dass ein zweiter weltweiter Schlüsselvergleich für die Lichtstärke stattfinden sollte. Als Pilotlabor, welches die Messungen durchführen und auswerten sollte, wurde das NRC, das nationale Metrologie Institut Kanadas, bestimmt. Aus 5 verschiedenen RMOs wurden insgesamt 12 Teilnehmer ausgewählt. Voraussetzung für die teilnehmenden Institute waren unter anderem eine eigene Realisierung der Lichtstärkeeinheit, Mitgliedschaft im CCPR, Vorhandensein der notwendigen technischen Voraussetzungen und die Bereitschaft, den KCRV in den jeweiligen RMOs in abgeleiteten Schlüsselvergleichen weiterzugeben.

Der Transport der Lichtstärkeeinheit erfolgte ausschließlich unter Verwendung von Glühlampen für wissenschaftliche Zwecke. Nach Befragung der Teilnehmer wurden als zulässige Lampentypen OSRAM Wi41/G und Polaron LIS-T75 ausgewählt.

Aufgrund der Empfindlichkeit der Transfernormale wurde der Vergleich als Sternvergleich durchgeführt und die relativen Vergleichsmessungen fanden sämtlich am National Research Council (NRC) in Kanada von 2014-2015 statt. Die Normallampen wurden zunächst am Institut des jeweiligen Teilnehmers gemessen; anschließend wurden die Normale per Handtransport oder Versand an das NRC nach Kanada gegeben, wo die entscheidenden Vergleichsmessungen durch das

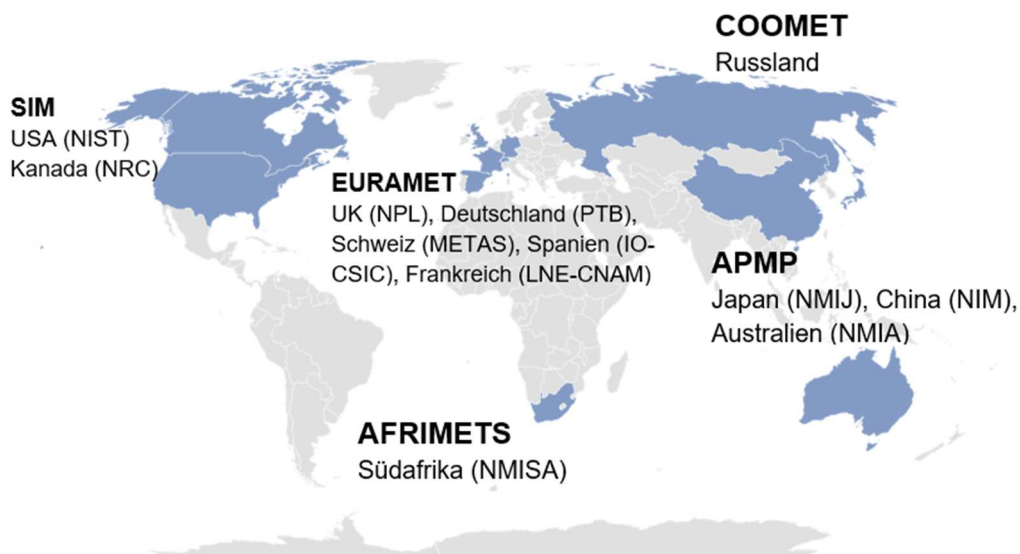


Abbildung 1: Weltkarte, Staaten der Institute die am CCPR-K3.2014 teilgenommen haben sind blau eingefärbt.

© Australian Bureau of Statistics, GeoNames, Geospatial Data Edit, Microsoft, Navinfo, OpenStreetMap, TomTom, Wikipedia  
 Unterstützt von Bing

Pilotlabor durchgeführt wurden. 2015 konnten die Teilnehmer ihre Normallampen wieder abholen und die erforderlichen Rückmessungen durchführen. Die PTB brachte ihre Einheit mit einer Lampengruppe, bestehend aus sechs Lampen vom Typ OSRAM Wi41/G, welche direkt an das nationale Normal für die Lichtstärke angeschlossen wurden, in den Vergleich ein. Das NRC wertete die Messungen aus und 2022 wurde der finale Bericht des CCPR Schlüsselvergleichs veröffentlicht.

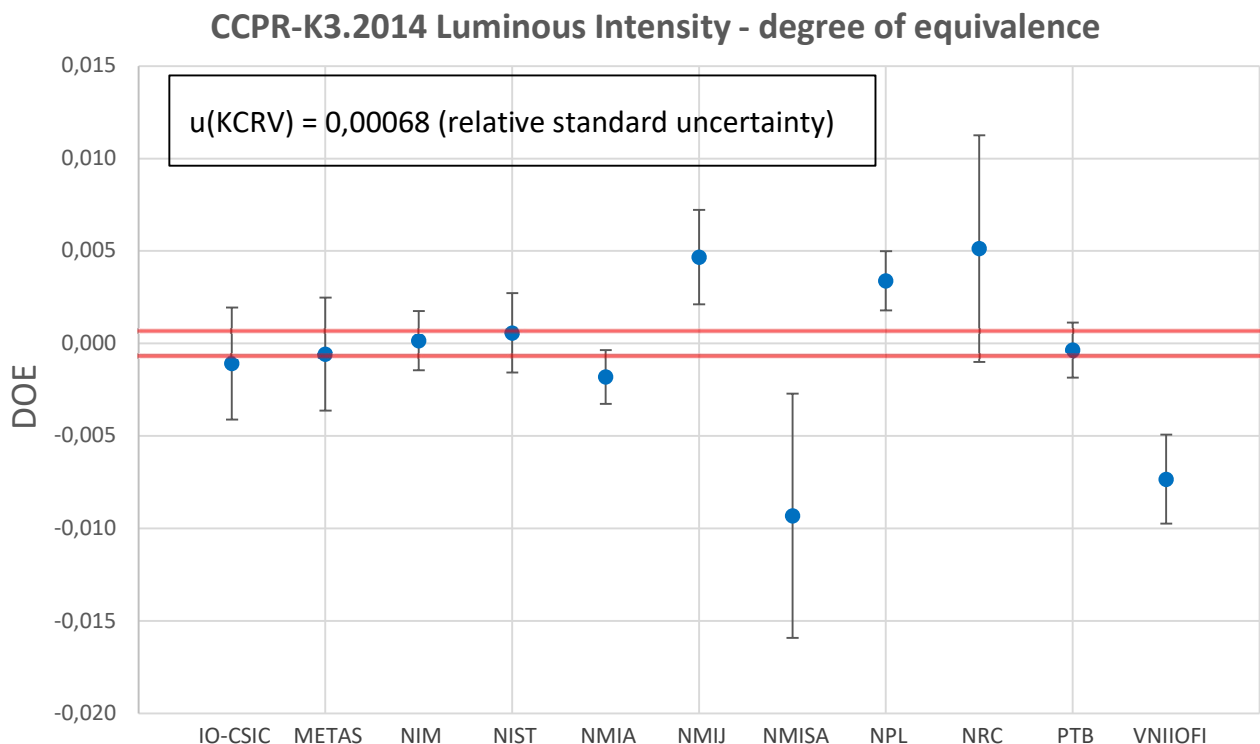


Abbildung 2: Ergebnis des CCPR-K3.2014, Daten entnommen aus [1]

Abbildung zwei zeigt das Ergebnis des CCPR Schlüsselvergleichs. Es ist die relative Abweichung der Lichtstärkewerte der Teilnehmer jeweils mit der beigeordneten relativen Standardunsicherheit (schwarzer Balken) vom ermittelten KCRV dargestellt. In rot ist die Standardabweichung des KCRV selbst dargestellt.

Das technische Protokoll <sup>[5]</sup> und der vollständige Abschlussbericht <sup>[1]</sup> des aktuellen weltweiten Schlüsselvergleichs für die Lichtstärke, dem CCPR-K3.2014, wurden auf folgender Webseite veröffentlicht: <https://www.bipm.org/kcdb/comparison?id=719>  
Der Abschlussbericht enthält unter anderem Beschreibungen der Messapparaturen und -abläufe sowie die Berechnung der Messunsicherheit für die Lichtstärkewerte der einzelnen Teilnehmer.

### 3. EURAMET Key Comparison EURAMET.PR-K3.2020

Nach Abschluss des weltweiten Schlüsselvergleichs für die Lichtstärke muss das Ergebnis, der Key Comparison Reference Value (KCRV), desselbigen in den einzelnen RMOs an Institute weitergegeben werden, die nicht Teilnehmer am Weltvergleich waren. Im RMO EURAMET geschieht dies durch den Anfang 2020 beschlossenen abgeleiteten Schlüsselvergleich EURAMET.PR-K3.2020. Anders als im CCPR-Vergleich müssen die Teilnehmer beim abgeleiteten EURAMET-Vergleich zwar eine Rückführung der Einheit Candela vorweisen, eine eigene Realisierung ist jedoch keine Voraussetzung. Auf dieser Vergleichsebene kann jedes Institut mit der nötigen technischen Kompetenz teilnehmen.

Zusätzlich zu Instituten aus 18 Ländern der EURAMET-Region nehmen das NMI Usbekistan aus der RMO COOMET und das NMI Saudi-Arabiens aus der RMO GULFMET teil.



Abbildung 3: Staaten der Teilnehmer am EURAMET.PR-K3.2014 sind blau eingefärbt

Das Pilotlabor, welches die Organisation, die Koordination vom Entwurf des technischen Protokolls und für den Ablauf des Vergleichs sowie die Durchführung und Auswertung der Vergleichsmessungen übernimmt, ist das METAS, das NMI der Schweiz. Als Linklabore zum KCRV des CCPR-K3.2014 fungieren das METAS (Schweiz), die PTB (Deutschland) und das IO-CSIC (Spanien). Diese Institute sind dazu angehalten, ihre Transfornormale so zu kalibrieren, dass die Werte für die Lichtstärke die Größe der Einheit Candela zum Zeitpunkt der Messungen im CCPR-Schlüsselvergleich darstellen.

Aufgrund der großen Teilnehmerzahl wurde entschieden, als Transfornormal nur ein Glühlampentyp als Transfornormal zu verwenden, die WI41/G-Glühlampe von OSRAM. Jeder Teilnehmer soll eine Lampengruppe von mindestens 3 und maximal 6 Lampen bereitstellen. Bei der WI41/G-Glühlampe handelt es sich um eine Glühlampe für wissenschaftliche Zwecke. Sie ist gasgefüllt, hat einen E27-Sockel und laut Hersteller für einen Betrieb bei einer Stromstärke von ca. 6 A und eine Spannung von etwa 31 V spezifiziert. Der Leuchtkörper besteht aus einem, mäanderförmig in einer Ebene angeordnetem, Filament und der konische Glaskolben ist einseitig mit einer schwarzen, lichtundurchlässigen Maske mit einem Fenster beschichtet. Der Aufbau der Lampe ist dazu ausgelegt Streulicht zu vermindern (z.B. durch Spiegelungen in der Lampe sowie dem Einfluss vom Lampenhintergrund) und möglichst ideale Eigenschaften, wie z.B. ein definierter Lichtschwerpunkt und ein möglichst homogenes Strahlungsfeld in Messrichtung, zur Bestimmung einer Lichtstärke, zu bieten. Die Transfornormallampen müssen von den Teilnehmern vorgealtert werden und werden mit Gleichstrom mit festgelegter Polarität betrieben. Glühlampen eignen sich, besonders aufgrund ihrer Eigenschaft nur während des Betriebes zu altern, als Transfornormal in Vergleichsmessungen, die über einen längeren Zeitraum stattfinden. Die Betriebsdauer der Normale soll während der Vergleichsmessungen möglichst geringgehalten werden und zur Überwachung der Stabilität wird bei jeder Messung stromlos die Lampenspannung direkt am Lampensockel gemessen. Messungen zur Bestimmung der Lichtstärke werden mindestens zweimal durchgeführt, wobei die Lampe nach jeder Messung neu ausgerichtet wird, um die Reproduzierbarkeit einschätzen zu können. Die Messunsicherheit soll nach dem "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement" (GUM)<sup>[2]</sup> ermittelt werden. Die PTB ermittelt die Messunsicherheit, die den Lichtstärkewerten der Transfornormallampen zugeordnet ist, nach der CIE 198:2011<sup>[3]</sup>. Für die Substitutionsmethode „Lampe kalibriert Lampe“ wird die



Abbildung 4: Foto einer Lichtstärkenormallampe vom Typ OSRAM WI41/G

Messunsicherheit gemäß „CIE E13 Calibration of a luminous standard (source based)<sup>[4]</sup>“ ermittelt.

Aufgrund der fragilen Transfornormale erfolgt der EURAMET-Vergleich als ein Sternvergleich. Jeder Teilnehmer nimmt mit einem eigenen Satz von Transfornormalen teil. Diese wurden zunächst in den Laboren der Teilnehmer gemessen; diese Initialmessungen erfolgten im Jahr 2021. Danach erfolgte der Transfer der Glühlampen zum Piloten (METAS), welcher die Hauptmessungen durchführte. Als Termin für die Anlieferung war zunächst Januar 2021 vereinbart. Aufgrund von Verzögerungen durch die Corona-Pandemie musste dieser Termin mehrfach verschoben werden und erst Mitte 2022 waren die Normale aller Teilnehmer am METAS bereitgestellt worden. Da Normallampen sehr empfindlich auf Erschütterungen reagieren, entschieden sich viele der Teilnehmer dafür, die Lampen per Handtransport im METAS abzuliefern. Starke Erschütterungen während des Transportes führen nicht unbedingt zu sichtbaren Schäden am Normal, aber die vorher kalibrierten Eigenschaften der Lampe, z.B. die Lichtstärke oder die Alterungskoeffizienten, können sich verändern.

Die Hauptmessungen der Lampen, es handelt sich dabei um relative Vergleichsmessungen nach der Substitutionsmethode, wurden am METAS durchgeführt. Diese sind bereits beendet und die Teilnehmer können seit Februar 2023 ihre Normale abzuholen bzw. abholen lassen. Im nächsten Schritt erfolgen die Rückmessungen in den Laboren der Teilnehmer, um beispielsweise die Alterung der Normale und die Unversehrtheit derselbigen festzustellen. Anschließend sollen die Messergebnisse der Initialmessungen und Rückmessungen dem Piloten mitgeteilt werden.

Alle Messungen am Pilotlabor sind Relativmessungen; die Einheit Candela wird durch die Linklabore eingebracht, wobei mit den von den Linklaboren berichteten Lichtstärkewerten vom Piloten der KCRV aus dem letzten Weltvergleich ermittelt und die Ablage der Teilnehmer vom KCRV berechnet wird.

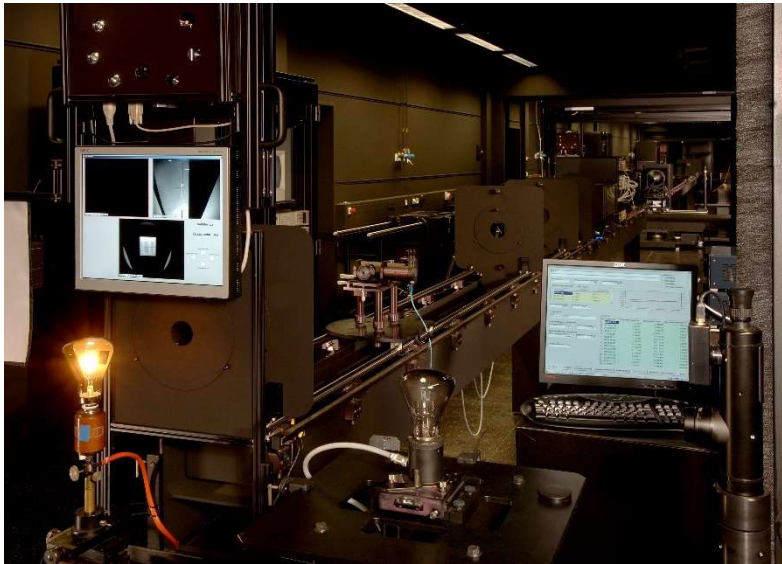
Zum jetzigen Zeitpunkt wird der EURAMET-Schlüsselvergleich voraussichtlich im Juni 2024 mit Veröffentlichung eines Abschlussberichtes abgeschlossen sein, diesem gehen mehrere Versionen und mindestens zwei Entwürfe voraus.

#### **4. Messungen in der PTB**

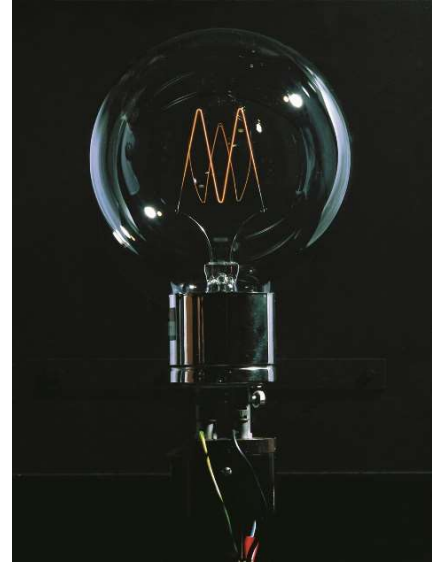
Als Linklabor hat die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) die Aufgabe, die gleiche Einheit der Lichtstärke in den EURAMET.PR-K3.2020 einzubringen, die auch im CCPR-Schlüsselvergleich eingebracht wurde. Die den Transfornormalen zugeordneten Lichtstärkewerte müssen die Größe der Lichtstärkeeinheit zum Zeitpunkt der Messungen des CCPR-K3.2014 darstellen.

Am aktuellen EURAMET-Vergleich nimmt die PTB mit einer Lampengruppe bestehend aus sechs Osram Wi41/G Glühlampen teil. Die einzelnen Glühlampen wurden ausgewählt aufgrund ihrer Reproduzierbarkeit, Stabilität und geringen

Alterung. Diese Eigenschaften wurden über viele Jahre (im Mittel etwa 30 Jahre), und daraus folgend durchschnittlich über etwa 30 Betriebsstunden hinweg, überwacht und dokumentiert. Eine wichtige Eigenschaft einer Wi41/G Glühlampe, um eine besonders hohe Reproduzierbarkeit zu erreichen, ist die geometrische Ausrichtung der Lampe. Wie gut eine Lampe reproduzierbar ausgerichtet werden kann, ist z.B. von der Ausprägung des mäanderförmigen Filaments abhängig. Ein Beispiel für die Ausrichtung einer Wi41/G Glühlampe ist im Anhang 1 gelistet.



*Abbildung 5: Foto vom Messplatz Photometerbank der PTB*



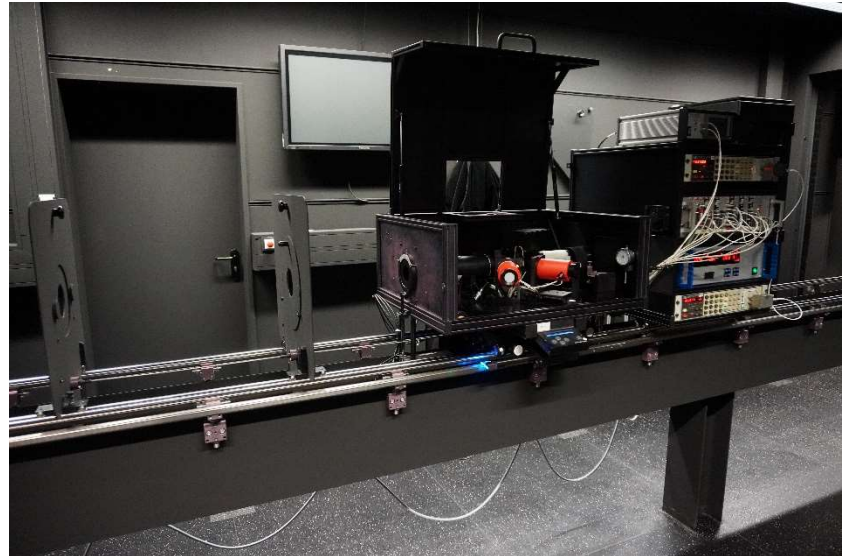
*Abbildung 6: Foto einer Toshiba Glühlampe*

Die Lichtstärkeeinheit wird in der PTB mit einer Lampengruppe aus 17 Toshiba Glühlampen - welche das nationale Normal für die Lichtstärkeeinheit bilden - bewahrt. Glühlampen altern nur, während sie betrieben werden, daher werden die Toshiba Lampen auch nur wenige Minuten jedes Jahr bei einer sehr niedrigen Verteilungstemperatur betrieben. Die Größe der Einheit für die Lichtstärke, die Candela, wurde seit dem letzten CCPR-Schlüsselvergleich nicht verändert. Aufgrund dessen sind die Normallampen, die im EURAMET-Vergleich verwendet wurden, direkt an das nationale Normal angeschlossen worden. Die Kalibrierung der 6 Transfornormallampen wurde nach der Substitutionsmethode gegen das nationale Normal durchgeführt und durch Vergleiche mit weiteren Lampengruppen vom Typ WI41/G, die in der PTB als Bezugs- und Transfornormale eingesetzt werden, verifiziert.

In der PTB finden Messungen von Größen der gerichteten Photometrie an der Photometerbank statt. Der Messplatz Photometerbank erstreckt sich über sechs separat klimatisierte Messräume und besteht aus drei verschiedenen Photometerbänken, die mit einer gemeinsamen optischen Achse so (koaxial) angeordnet sind, dass Messentfernungen bis zu 40 m möglich sind. Hinter einem

Rolltor (in Abbildung 5 ist das Rolltor geöffnet) werden die Lichtquellen betrieben und mithilfe von einem Kamerasystem in sechs Freiheitsgraden ausgerichtet. Auf Schienen fährt ein Photometerbankwagen, der bis zu 6 Empfänger gleichzeitig in einem Photometerkarussell aufnehmen kann. Für die Messungen im EURAMET-Vergleich wurden zwei Photometerköpfe ausgewählt, die sich in ihren Eigenschaften wie z.B. der photometrischen Empfindlichkeit, der spektralen Fehlanpassung usw. unterscheiden. Die 6 Transfernornallampen werden mit Gleichstrom stromkonstant betrieben. Die Lampenstromstärke wurde dabei so gewählt, dass die Glühlampen eine Verteilungstemperatur um die 2800K haben.

Zur Verminderung des Einflusses von Fremdlicht und Streulicht werden Streulichtblenden zwischen der Lampe und den Empfängern so platziert, dass ein Lichtkanal geschaffen wird und kein Licht, welches nicht direkt von der Lampe ausgesendet wird, den Empfänger beleuchten kann und die Lampe zudem nichts außerhalb des Lichtkanals beleuchtet.



*Abbildung 7: Foto vom geöffneten Photometerbankwagen mit Photometerkarussell, Anhänger mit Ausrüstung zur Messung der Photoströme sowie Streulichtblenden*

## 5. Schlussfolgerung

Schlüsselvergleiche wie der CCPR- und der EURAMET-Vergleich dienen der Äquivalenzfeststellung zwischen NMIs mit dem Ziel der gegenseitigen Anerkennung der Ergebnisberichte und der nationalen Normale nach dem MRA. Für Messgerätehersteller, die Lampen- und Leuchtenindustrie und auch für Kalibrierlaboratorien mit einer Rückführung auf ein NMI sind solche Vergleiche der Schlüssel zur Erschließung internationaler Absatzmärkte.

In der PTB sind Vergleiche mit anderen Instituten, mit eigener Realisierung bzw. Rückführung auf eine andere Realisierung der Einheit Candela, eine Grundlage der Qualitätssicherung nach der DIN EN 17025.



## 6. Akronyme

CCPR Consultative Committee of Photometry and Radiometry

KCRV Key Comparison Reference Value

CIPM Comité international des poids et mesures

RMO Regional Metrology Organisation

NMI National Metrology Institute

EURAMET European Association of National Metrology Institutes

GUM Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement

CIE Commission internationale l'Eclairage

## 7. Literatur- und Quellennachweise

[1] Arnold Gaertner, Éric Côté, Joaquin Campos, Gaël Obein, Peter Blattner, Reto Schafer, Liu Hui, Jiang Xiaomei, Cameron Miller, Yuqin Zong, Errol Atkinson, Erik Thorvaldson, Kenichi Kinoshita, Rheinhardt Sieberhagen, Irma Rabe, Teresa Goodman, Barry Scott, Armin Sperling, Detlef Lindner, Boris Khlevnoy, Evgeniy Ivashin. *CCPR Key Comparison CCPR-K3.2014, Luminous Intensity, Final Report, 2022-May-20*

[2] JCGM, “*JCGM 100 – Evaluation of measurement data – Guide to the Expression of uncertainty in measurement*”, BIPM, Sèvres/Frankreich, September 2008

[3] CIE Publication 198:2011, *Determination of measurement uncertainties in photometry*, CIE-Commission internationale de l'Eclairage, Wien/Österreich

[4] CIE Publication 198-SP1, *Determination of measurement uncertainties in photometry -Supplement 1: Modules and Examples for the determination of measurement uncertainties*, CIE - Commission internationale de l'Eclairage, Wien/Österreich

[5] CCPR Key Comparison CCPR-K3.2014, *Luminous Intensity, Technical Protocol*, 2014-January-15

[6] EURAMET Key Comparison EURAMET.PR-K3.2020, *Luminous Intensity, Technical Protocol*, Version: 1.3

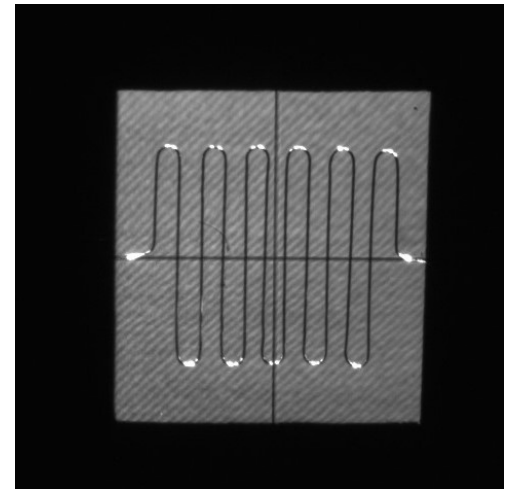
[7] CIPM, *Mutual recognition of national measurement standards and of calibration and measurement certificates issued by national metrology institutes*, 1999-Oktober-14

Bildquelle: PTB (falls nicht anders angegeben)

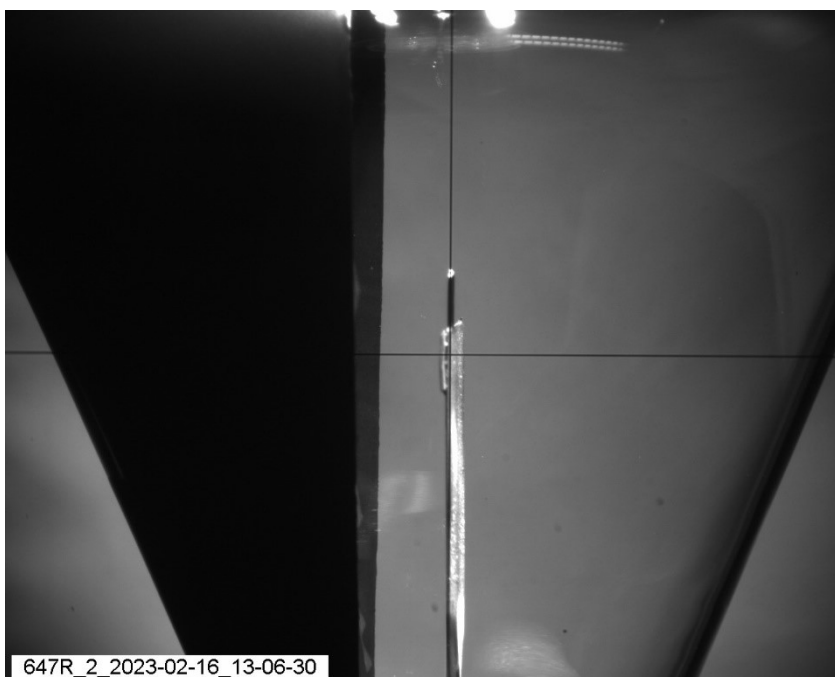
Anhang 1: Beispiel für die kamerabasierte Ausrichtung einer WI41/G-Glühlampe



Seitenansicht rechts



Vorderansicht



Seitenansicht links