

# Neue optische Strahlungsmessbasis am METAS

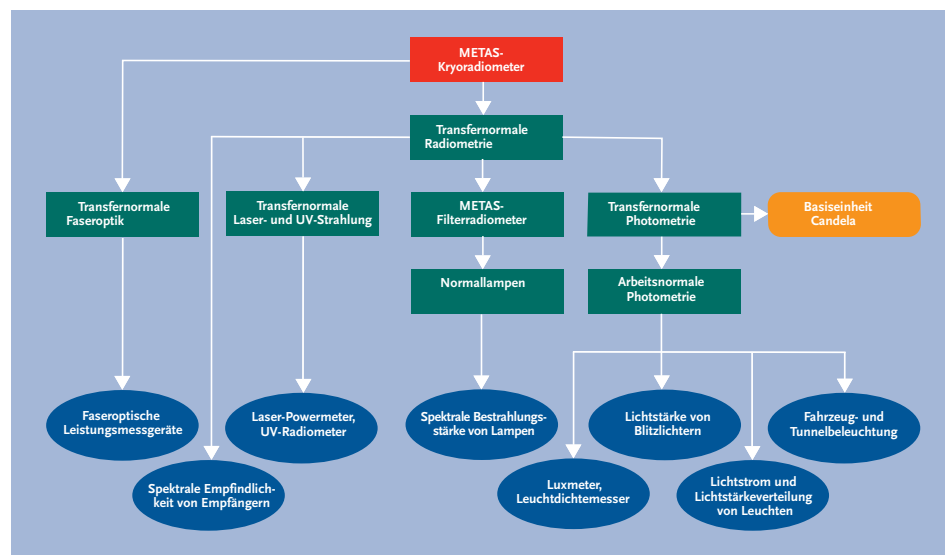
Der Schutz der Bevölkerung vor gefährlicher Strahlung, die globale Überwachung der Umwelt, die faseroptische Kommunikation und die Entwicklung neuartiger Lichtquellen auf Basis von Leuchtdioden (LED) haben eines gemeinsam: Sie sind auf eine hoch genaue Messung der optischen Strahlung angewiesen. Aus diesem Grund hat METAS ein neues Tieftemperatur-Radiometer in Betrieb genommen. Dieses Primärnormal ist in der Lage, die optische Strahlungsleistung mit einer relativen Genauigkeit unterhalb  $10^{-4}$  zu bestimmen.

Peter Blattner

Viele Lichtquellen basieren heute auf Leuchtdioden (LED), deren Vorteile klar auf der Hand liegen: LED sind extrem klein und wartungsfrei, haben eine enorm lange Lebensdauer und bieten eine grosse Leuchtdichte bei niedrigem Energiebedarf. Die Weiterentwicklung solcher Lichtquellen stellt an die Messtechnik neue Anforderungen. Das genaue Bestimmen der optischen Strahlungsleistung gewinnt aber auch in den anderen erwähnten Bereichen an Bedeutung. Um die Messgenauigkeit zu verbessern und die Messmöglichkeiten zu erweitern, hat METAS ein Tieftemperatur-Radiometer (Kryoradiometer) in Betrieb genommen, dessen Aufbau und Spezifikationen hier vorgestellt werden.

## Bisher: aufwändige Rückverfolgbarkeit ins Ausland

Zur Kalibrierung optischer Strahlungsmessgeräte wird eine Basis benötigt. Bis vor wenigen Jahren benutzte METAS in der Optik verschiedene Rückverfolgbarkeitsketten: Für die Messgrösse «Spektrale Bestrahlungsstärke von Lampen» wurden Normallampen verwendet, die regelmässig am National Physical Laboratory (NPL) in Teddington (Grossbritannien) mit einem Hochtemperatur-Schwarzstrahler verglichen wurden. Dieses Rückverfolgbarkeitsverfahren war aufwändig, weil



1: Rückverfolgbarkeit der verschiedenen optischen Strahlungsmessgrössen am METAS auf das neue Kryoradiometer. (Bilder und Illustrationen: METAS).

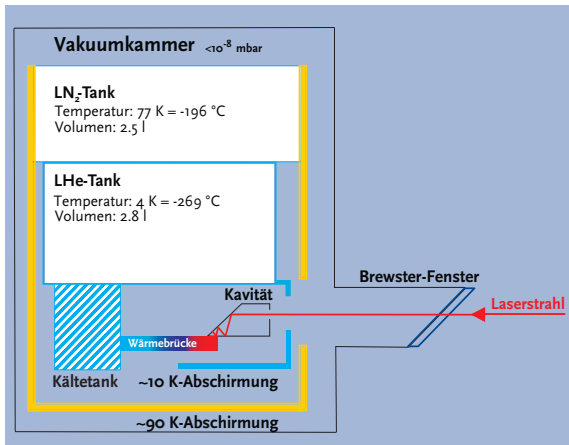
die schockempfindlichen Lampen nicht versandt werden konnten, sondern persönlich nach Teddington gebracht werden mussten.

Im Bereich der Lichtmesstechnik (Photometrie) war METAS lange Zeit mittels Lichtstärke-Normallampen an das Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) in Paris angeschlossen. Seit einiger Zeit verfügt METAS über eine eigene Primärrealisierung photometrischer Empfänger, bestehend aus Trapdetektoren (Erklärung folgt) und einem temperaturstabilisierten Farbfilter zur Anpassung an die Hellempfindlichkeitskurve  $V(\lambda)$  des mensch-

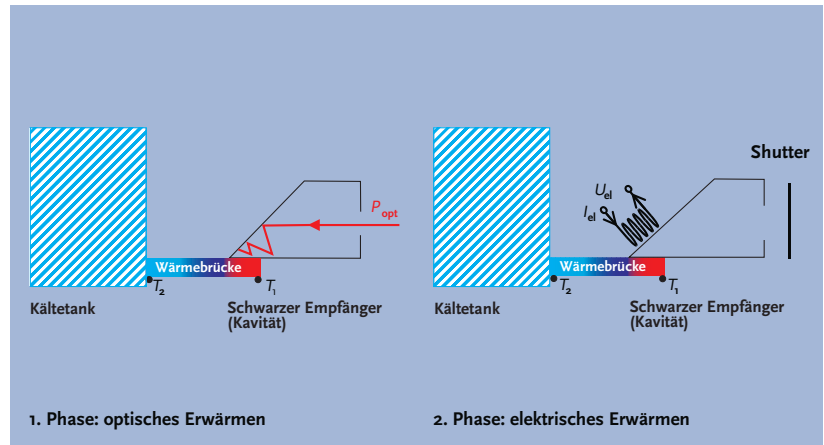
lichen Auges. Diese  $V(\lambda)$ -Trapempfänger werden am METAS regelmässig mittels Vergleich an die Skala der spektralen Empfindlichkeit angeschlossen. Die Rückverfolgbarkeit der spektralen Empfindlichkeit von Empfängern wie auch der Leistungsmessgeräte der Faseroptik erfolgte bis vor kurzem auch über das NPL.

## Neu: eigene optische Strahlungsmessbasis

Mit dem neuen Kryoradiometer verfügt nun METAS über eine eigene optische Strahlungsmessbasis. Das hat den grossen Vorteil, dass sämtliche opti-



2: Schematische Darstellung des Kryoradiometers. Kernstück ist die schwarze Kavität, die für die optische Strahlung einen Absorptionsgrad grösser 0.999 hat.



3: Funktionsprinzip des Kryoradiometers: In Phase 1, links dargestellt, erfolgt die optische Erwärmung, in Phase 2 die elektrische. Unter idealen Bedingungen entspricht die gut messbare elektrische Leistung der zu bestimmenden optischen Leistung.

schen Strahlungsmessgrössen auf diese neue Basis rückverfolgt werden können (Illustration 1).

Die Vorteile liegen auf der Hand: Die Rückverfolgbarkeit auf das Internationale Einheitensystem (SI) kann jederzeit und wiederholt erfolgen. Zudem kann die neue optische Strahlungsmessbasis den spezifischen Anforderungen angepasst werden. Dadurch erweitert METAS seine Dienstleistungen (z. B. den Wellenlängenbereich) und verbessert die Genauigkeit (Unsicherheit der Strahlungsleistungsmessung, vor allem auch in der Faseroptik). Die Möglichkeiten für eine Forschungszusammenarbeit mit anderen Instituten in der Schweiz und im Ausland werden gestärkt. Von wissenschaftlichem Interesse ist beispielsweise der Vergleich mit der optischen Strahlungsmessung in der Meteorologie. Erste erfolgreiche Vergleichsmessungen wurden in dieser Hinsicht bereits mit dem Weltstrahlungszentrum (WRC) des Physikalisch-Meteorologischen Observatoriums Davos (PMOD) unternommen.

### Aufbau und Funktionsweise des Kryoradiometers

Kernstück der neuen optischen Strahlungsmessbasis ist ein kommerzielles Tiefsttemperatur-Radiometer (Kryoradiometer), das angepasst und weiter entwickelt wurde. Der Aufbau des Kryoradiometers ist in Illustration 2 dargestellt. Ein wichtiger Bestandteil ist der

schwarze Empfängerhohlraum, die Kavität. Er hat eine Grösse von ungefähr  $1 \text{ cm}^3$  und besteht aus Kupfer, das mit einer hoch spekularen schwarzen Farbe beschichtet ist. Der Absorptionsgrad  $A_{cav}$  dieser Kavität beträgt ( $0.999\ 865 \pm 0.000\ 003$ ) für optische Strahlung im sichtbaren, im nahen Ultraviolett- und im nahen Infrarotbereich. Das heisst, dass fast 100 % der optischen Strahlung in Wärme umgewandelt wird. Diese Wärme wird über eine Wärmebrücke abgeleitet. Die Arbeitstemperatur beträgt wenige Kelvin und wird mit Hilfe von flüssigem Helium erreicht.

Der Messablauf besteht, wie in Illustration 3 dargestellt, aus zwei Phasen: In der ersten Phase wird die Kavität optisch erwärmt. Zu diesem Zweck wird die Strahlung eines leistungsstabilisierten Lasers verwendet. In der zweiten Phase wird mit Hilfe eines Regelkreises der gleiche Wärmefluss durch elektrisches Heizen eingestellt. Unter idealen Bedingungen entspricht die dafür notwendige und gut messbare elektrische Leistung  $P_{el}$  der zu bestimmenden optischen Leistung  $P_{opt}$ . Das Kryoradiometer entspricht somit weitgehend einem klassischen, das heisst bei Raumtemperatur arbeitenden elektrischen Substitutionsradiometer.

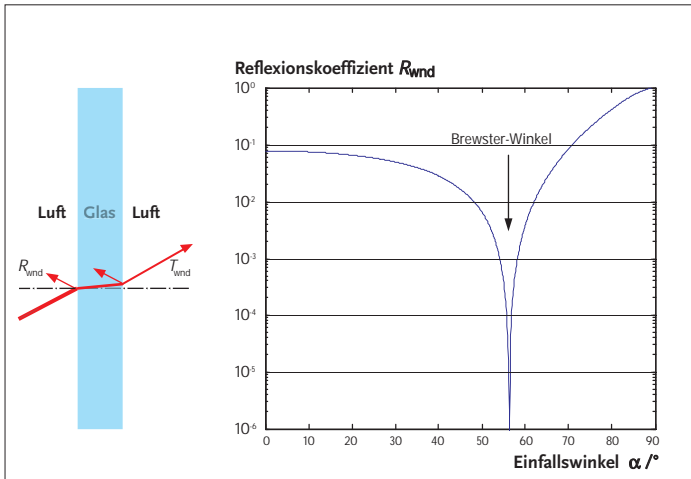
Dank der tiefen Temperatur können aber für wichtige Materialeigenschaften optimale Werte erzielt werden. So ist die Wärmekapazität der Kupferkavität bei 4 Kelvin rund tausendmal kleiner als bei Raumtemperatur. Die er-

zeugte Wärme innerhalb der Kavität wird somit augenblicklich abgeführt; die Einschwingzeit beträgt nur wenige Sekunden, die Empfindlichkeit wird drastisch erhöht.

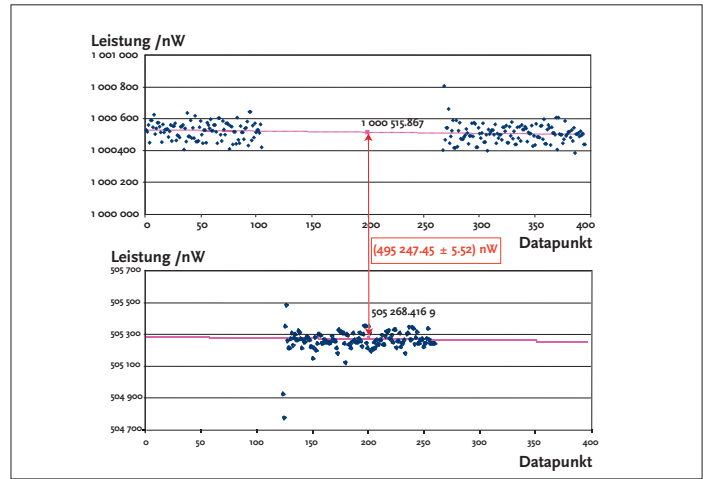
Ausserdem wird der Einfluss der Umgebungsstrahlung durch geeignete Abschirmung auf ein Minimum reduziert. Dank supraleitenden elektrischen Zuleitungen werden auch die elektrischen Verluste minimiert. Die mit dem Kryoradiometer erreichbare relative Messunsicherheit ist kleiner als  $10^{-4}$ , also mindestens um Faktor 10 besser als bei Raumtemperatur-Radiometern.

### Brewster-Fenster

Da sich die Kavität in einer Vakuumschrank befindet, muss die optische Strahlung durch ein Fenster geführt werden. Die gemessene optische Leistung am Eingang des Kryoradiometers muss somit um den optischen Durchlassgrad des Fensters  $T_{wnd}$  korrigiert werden. Durch die optimale Wahl des Einfallswinkels (Brewster-Winkel) und der Polarisierung kann der Verlust am Fenster minimiert werden. Illustration und Diagramm 4 verdeutlichen die Zusammenhänge. Theoretisch beträgt der Reflexionskoeffizient  $R_{wnd} = 0$ , das heisst, 100 % des unter dem Brewster-Winkel von ungefähr  $56^\circ$  einfallenden Lichts wird durchgelassen. Der experimentell bestimmte Wert des Transmissionsgrades beträgt  $T_{wnd} = (0.999\ 901 \pm 0.000\ 031)$  für die Wellenlänge von 633 nm.



4: Die Illustration links zeigt die Reflexion eines optischen Strahls an einem Brewster-Fenster. Im Diagramm rechts ist die Abhängigkeit der Reflexion eines geeignet polarisierten Strahls vom Einfallswinkel dargestellt. Im Winkel von ungefähr 56° (Brewster-Winkel) verschwindet die Reflexion.



5: Messung der Strahlungsleistung eines He-Ne-Lasers der Wellenlänge 633 nm und einer Leistung von ungefähr 0,5 mW mit dem Kryoradiometer. Die Standardabweichung der Differenz der mittleren Leistung in Phase 1 und Phase 2 beträgt rund 5 nW.

### Messgleichung

Unter Berücksichtigung des Absorptionskoeffizienten der Kavität  $A_{cav}$  und des Transmissionsgrades des Fensters  $T_{wnd}$  lautet die Messgleichung des Kryoradiometers in ihrer einfachsten Form.

$$P_{opt} = \frac{P_{el}}{T_{wnd} A_{cav}}$$

In Wirklichkeit müssen Einflüsse wie der Kalibrierfaktor der elektrischen Messgrößen berücksichtigt, das heisst mathematisch korrigiert werden. Diagramm 5 zeigt eine typische Messung der Strahlungsleistung eines He-Ne-Lasers der Wellenlänge 633 nm und einer Leistung von ungefähr 0,5 mW. Die Standardabweichung der Differenz der mittleren Leistung in Phase 1 und Phase 2 beträgt rund 5 nW. Die Drift des Messsystems beträgt rund 0,07 nW pro Messpunkt.

Voraussetzung für das Gelingen der Messung ist, dass die Leistung des Laserstrahls über die ganze Messdauer von rund fünf Minuten stabil bleibt. Dies wird erreicht, indem der Laserstrahl mittels eines Flüssigkristallmodulators, eines Überwachungsempfängers und eines Rückkopplungskreises reguliert wird. Die erreichbare relative Stabilität der optischen Leistung des Lasers beträgt rund  $10^{-5}$ .

### Raumfilter

Der Laserstrahl ist geometrisch nicht perfekt. Bedingt durch den Modulator,

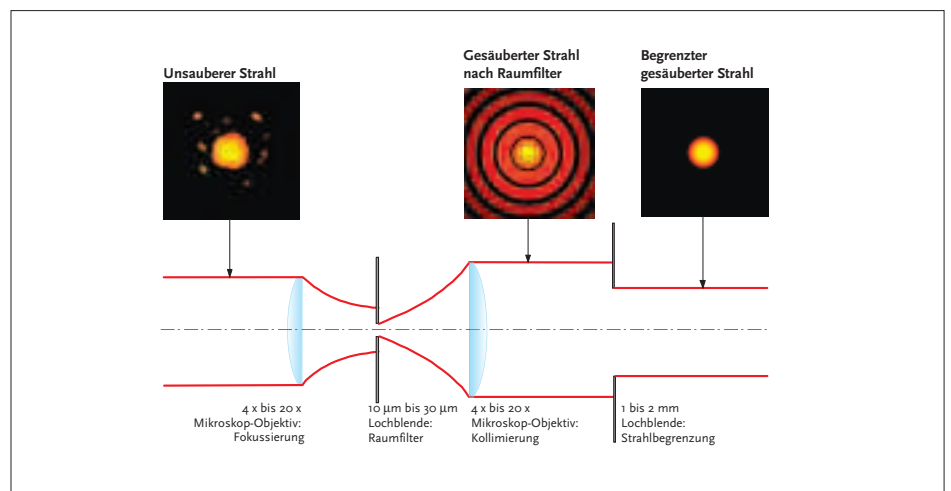
die verschiedenen optischen Elemente und den Laser selbst enthält er einen nicht vernachlässigbaren Anteil an Streu- und Störlicht. Dieses Licht wird mit einem geeigneten Raumfilter gesäubert (Illustration 6). Ein Raumfilter besteht im Wesentlichen aus einer Fokussierungsoptik (z. B. ein Mikroskop-Objektiv), einer kleinen Lochblende und einer Kollimationsoptik.

Feinstrukturiges Streulicht wird durch die Lochblende blockiert. Speziell in der für das Kryoradiometer gewählten Konfiguration ist, dass die Lochblende weit überfüllt wird. Dadurch geht zwar ein grosser Anteil der Lichtleistung verloren, es entsteht aber ein klassisches Airy-Beugungsbild. In den Nullstellen des Beugungsbildes kann nun mit einer weiteren, viel grösseren Lochblende eine saubere Strahl-

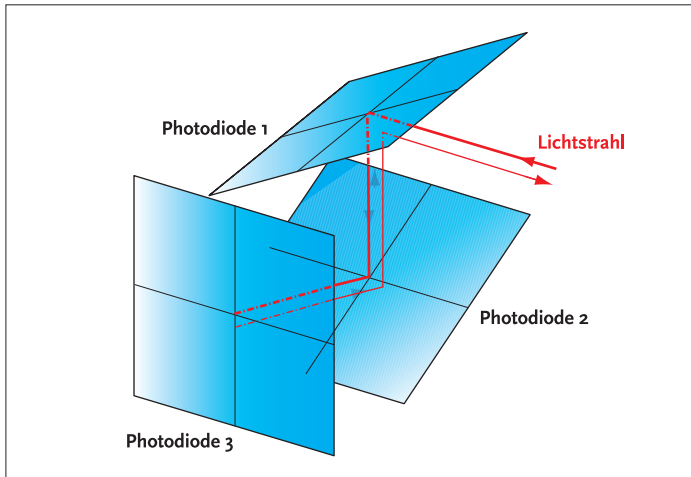
begrenzung erfolgen. Dieser saubere Strahl bleibt dadurch auch nach längerer Ausbreitungsdistanz streulichtarm.

### Weitergabe auf Transferempfänger

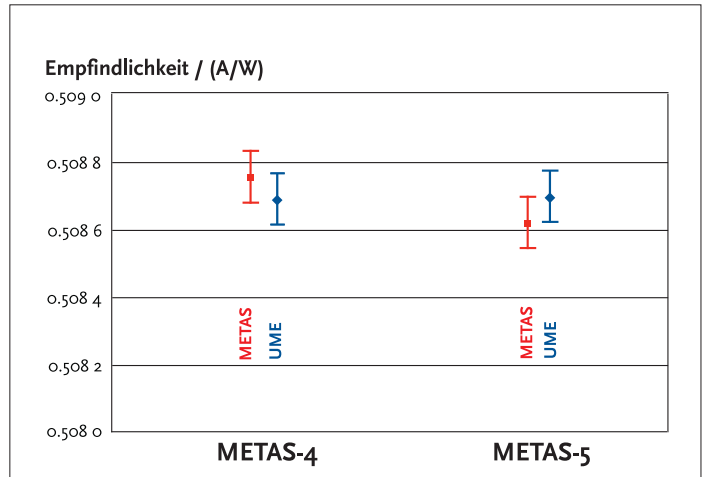
Das Kryoradiometer erlaubt die Bestimmung der optischen Strahlungsleistung in höchster Genauigkeit. Die gemessene Leistung muss nun auf geeignete Transferempfänger übertragen werden. Für Strahlungen im nahen UV-, im sichtbaren und im nahen IR-Bereich werden typischerweise Empfängersysteme verwendet, die aus mehreren Silizium-Photodioden bestehen. Bei der Absorption eines Photons im p-n-Übergang der Photodiode wird im sichtbaren Wellenlängenbereich pro Photon genau ein Elektron-Lochpaar erzeugt. Die interne Quantenausbeute ist also eins. Leider verhindert die Oberflächen-



6: Weil der verwendete Laserstrahl geometrisch nicht perfekt ist, wird er mit einem Raumfilter gesäubert.



7: Trapempfänger: Durch geschickte Anordnung mehrerer Dioden lassen sich die Reflexionsverluste des einfallenden Lichtstrahls auf unter 0,3 % reduzieren. Trapempfänger sind sehr uniform und nur in geringem Mass von der Polarisation abhängig.



8: Mit Hilfe zweier Trapdetektoren (METAS-4 und METAS-5) wurde ein Messvergleich des METAS-Kryoradiometers mit dem Primärnormal des türkischen Metrologieinstituts Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME) durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass die relativen Abweichungen der beiden Messungen innerhalb der kombinierten Messunsicherheit liegen.

reflexion, dass sämtliche Photonen in die Zelle eindringen.

Die Oberflächenreflexion einer einzelnen Photodiode beträgt – je nach Einfallswinkel, Polarisation und Wellenlänge – zwischen 20 % bis 50 %. Durch eine geschickte Anordnung mehrerer Dioden (Lichtfallenstruktur, siehe Illustration 7) lassen sich die Reflexionsverluste des einfallenden Lichtstrahls im Wellenlängenbereich zwischen 450 nm und 850 nm auf rund 0,3 % reduzieren. Diese so genannten Trapdetektoren zeichnen sich zudem durch eine hohe Uniformität und eine sehr kleine Polarisationsabhängigkeit aus. Die relative Änderung der Empfindlichkeit über die gesamte Messöffnung ist bei Trapdetektoren kleiner als 0,01 %. Sie können somit im sichtbaren Bereich als Absolutradiometer mit erhöhter Messunsicherheit eingesetzt werden. Wird eine kleinere Messunsicherheit gefordert oder müssen Kalibrierungen ausserhalb des erwähnten Wellenbereichs vorgenommen werden, muss der Empfänger gegenüber dem Kryoradiometer verglichen werden.

Die Kalibrierung des Trapempfängers erfolgt, indem man ihn vor den Eingang des Kryoradiometers schiebt und der gleichen optischen Strahlung aussetzt wie das Kryoradiometer. Ein kalibrierter Strom-Spannungs-Wandler und ein Präzisionsvoltmeter messen den vom Trapempfänger erzeugten Strom. Man erhält somit den Wert der

Empfindlichkeit des Transferempfängers, ausgedrückt in A/W, für eine bestimmte Wellenlänge.

### Validierung mittels Messvergleichen

Wichtig für die Validierung eines Primärnormalen ist der Vergleich mit anderen Primärnormalen. Ein erster Messvergleich erfolgte mit dem Kryoradiometer des türkischen Metrologieinstituts Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME). Als Transferempfänger wurden zwei Trapdetektoren (METAS-4 und METAS-5) eingesetzt. Die relativen Abweichungen der beiden Messungen betragen  $+1,3 \cdot 10^{-4}$  und  $-1,5 \cdot 10^{-4}$ . Wie Diagramm 8 zeigt, liegen sie innerhalb der kombinierten Messunsicherheit.

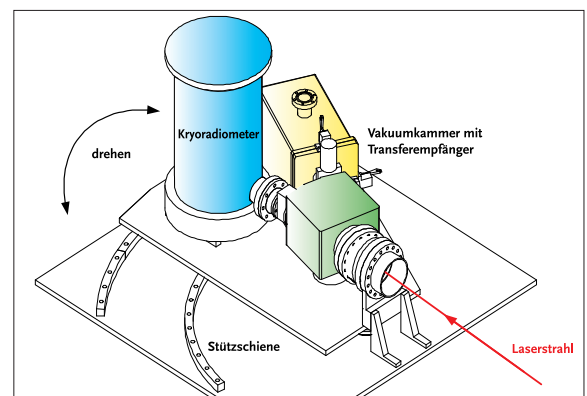
Weitere Vergleichsmessungen unternahm METAS mit dem Weltstrahlungszentrum (WRC) des Physikalisch-Meteorologischen Observatoriums Davos (PMOD). Die vom WRC/PMOD eingesetzten Radiometer werden typischerweise zur Langzeitüberwachung der Sonnenbestrahlung eingesetzt. In einem indirekten Vergleich zwischen der SI-Skala der spektralen Empfindlichkeit und der WRC/PMOD-Skala der solaren Bestrahlungsstärke (World Radiation Reference, WRR) wurde eine

Abweichung festgestellt, die kleiner als  $7 \cdot 10^{-4}$  ist.

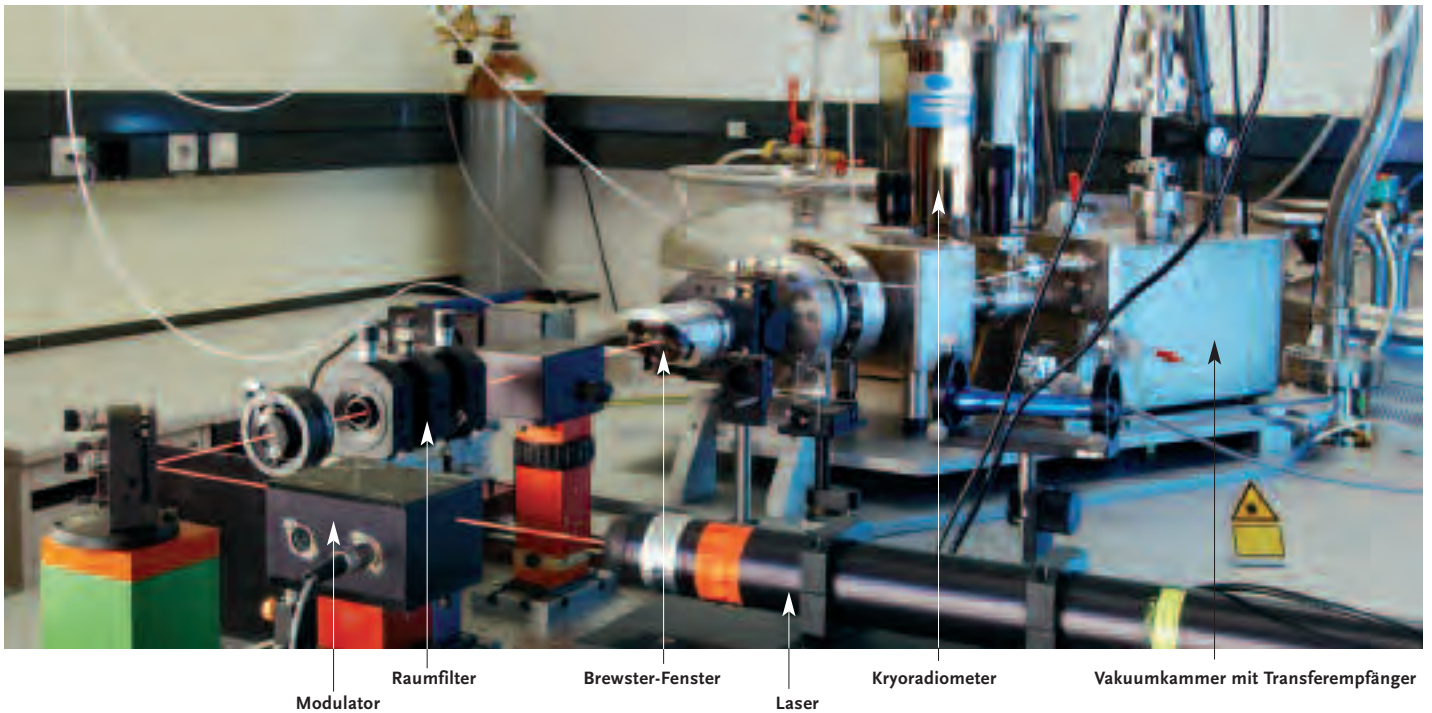
### Schwenkbares Kryoradiometer

Ein Hauptproblem der Messung der optischen Strahlung mit dem Kryoradiometer ist die Abhängigkeit des optischen Durchlassgrades des Brewster-Fensters von der Wellenlänge und der Strahlgeometrie. Sie muss für jede Wellenlänge und Strahlgeometrie explizit bestimmt werden. Wie aus der Betrachtung des Brewster-Winkels ersichtlich (Illustration 4), sind die Ansprüche bezüglich der Winkelgenauigkeit sehr hoch.

Ein weiteres Problem liegt darin, dass der Transferempfänger die Strahlung nicht in der gleichen Ebene misst wie das Kryoradiometer. Es kann also



9: Schematische Darstellung des ausgebauten METAS-Kryoradiometers: Eine gekrümmte Führung und ein Vakuumbalgen ermöglichen es, abwechselungsweise das Kryoradiometer und den Transferempfänger in den optischen Strahl zu drehen. Der Transferempfänger befindet sich dabei in der Vakuumkammer.



10: Das neue Kryoradiometer, Primärnormal für alle optischen und faseroptischen Strahlungsleistungsmessungen am METAS.

sein, dass – bedingt durch restliche Streustrahlung – die beiden Empfänger nicht die gleiche Strahlung «sehen» und es somit zu systematischen Fehlern kommt. Aus diesem Grund entwickelte METAS das kommerzielle Kryoradiometer weiter.

Idealerweise sollte der Transferempfänger die optische Strahlung an der gleichen Stelle und hinter dem gleichen Brewster-Fenster messen. Dies ist nur möglich, wenn sich der Empfänger in der Vakuumkammer befindet und das Kryoradiometer aus dem Strahl weggeschwenkt werden kann. Der dazu konzipierte Messaufbau ist in Illustration 9 dargestellt. Mittels gekrümmter Stützschiene und eines Vakuumbalgens kann abwechslungsweise das Kryoradiometer oder der Transferempfänger in den optischen Strahl gedreht werden. Der Transferempfänger befindet sich dabei in der Vakuumkammer. Die praktische Realisierung auf dem optischen Tisch ist in Bild 10 zu sehen. Erste experimentelle Untersuchungen sind erfolversprechend verlaufen.

### Verwendung monochromatischer Lichtquellen

Dadurch, dass sich der Transferempfänger beim Aufbau im METAS auf der gleichen Ebene wie das Kryoradiometer

### Die Basiseinheit Candela

Die ursprüngliche Definition der Basiseinheit Candela beruhte auf Lichtquellen. Die ältesten Realisierungen davon waren Kerzen (Hefnerkerze, Neue Kerze, Internationale Kerze), daher der Name Candela. Zwischen 1948 und 1979 diente die Strahlung eines schwarzen Körpers (Planck'scher Strahler) bei der Temperatur des erstarrten Platins zur Definition und Realisierung der Einheit Candela.

1979 beschloss die Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM) die heute noch gültige Definition:

*Die Candela (cd) ist die Lichtstärke in einer bestimmten Richtung einer Strahlungsquelle, die monochromatische Strahlung der Frequenz  $540 \cdot 10^{12}$  Hertz aussendet und deren Strahlstärke in dieser Richtung  $1/683$  Watt pro Steradian beträgt.*

Der Vorteil dieser Definition ist, dass sie die photometrische Einheit Candela mit der radiometrischen Einheit Strahlstärke (Watt pro Steradian) verknüpft. Damit wird deutlich, dass Licht nichts anderes ist als optische Strahlung, die in einem bestimmten Wellenlängenbereich für das menschliche Auge sichtbar ist. Und die photometrischen Einheiten sind nichts anderes als radiometrische Einheiten, die zusätzlich die Eigenschaften des menschlichen Auges berücksichtigen.

Die neue Definition lässt somit auch verschiedene Wege für die Realisierung offen. Am METAS basiert die Realisierung der Basiseinheit Candela auf Referenzphotometer, die ihrerseits an die Basis der Radiometrie und somit ans Kryoradiometer angeschlossen sind.

befindet, öffnet sich die Möglichkeit, auch andere Lichtquellen zu verwenden. Insbesondere wird es möglich sein, breitbandige Lichtquellen mit einem Monochromator einzusetzen. Der Vorteil der monochromatischen Lichtquelle ist, dass sie über ein breites Spektrum durchstimmbare ist und somit eine Vielzahl von Wellenlängen zugänglich macht.



Dr. Peter Blattner, Leiter des Labors Optik und Stv. Chef der Sektion Länge und Optik, Tel. +41 31 32 33 340, peter.blattner@metas.ch.

***Cryoradiomètres: nouvelle base de mesure de rayonnement optique à METAS***

*La protection de la population contre les rayonnements dangereux, la surveillance globale de l'environnement et le développement de nouvelles sources de lumière à partir de diodes lumineuses ont un point commun : ils dépendent de mesures très exactes du rayonnement lumineux. C'est pourquoi METAS a mis en service un nouveau radiomètre à très basse température. Sa construction et ses spécifications sont présentées ici. C'est à l'origine un cryoradiomètre commercial, perfectionné pour remplir de hautes exigences. Cet étalon primaire permet de déterminer des puissances de rayonnements optiques avec une exactitude relative meilleure que  $10^{-4}$ . Le rattachement au Système international d'unité SI est maintenant possible en tout temps, à court terme et de manière répétitive. Les prestations métrologiques correspondantes peuvent être en partie élargies, en partie améliorées.*

***Radiometro criogenico: Nuova base di misurazione della radiazione ottica al METAS***

*La protezione della popolazione da radiazioni pericolose, la sorveglianza globale dell'ambiente, la comunicazione mediante fibre ottiche e lo sviluppo di nuove fonti luminose basate su diodi luminosi (LED) hanno un denominatore comune: necessitano di una misurazione altamente accurata della radiazione ottica. A tale scopo, il METAS si è dotato di un nuovo radiometro a temperatura bassissima di cui il presente articolo illustra la costruzione e le caratteristiche. Si tratta di un radiometro criogenico, analogo a quelli reperibili in commercio, ma ulteriormente sviluppato per il particolare impiego. Tale campione primario è in grado di determinare la potenza della radiazione ottica con un'accuratezza relativa dell'ordine di  $10^{-4}$ . La riferibilità al Sistema internazionale d'unità SI può ora avvenire in ogni momento, in breve tempo e in modo ripetitivo. Le rispettive prestazioni metrologiche possono essere in parte ampliate, in parte migliorate.*

***Cryoradiometer: New basis for the measurement of optical radiation at METAS***

*The protection of the general public from harmful radiation, global monitoring of the environment, fibre-optical communication and the development of new light sources on the basis of light-emitting diodes (LED) have one thing in common: They all depend on the highly accurate measurement of optical radiation. Consequently, METAS has installed a new lowest-temperature radiometer, the construction and specifications of which are presented here. It is based on a commercial cryoradiometer, which has been further developed to fulfil the higher requirements. This primary standard is capable of determining the optical radiation to a relative accuracy of less than  $10^{-4}$ . Traceability to the International System of Units SI is now possible, repeatedly and without delay at all times. The corresponding metrological services can be partly expanded, partly improved.*