



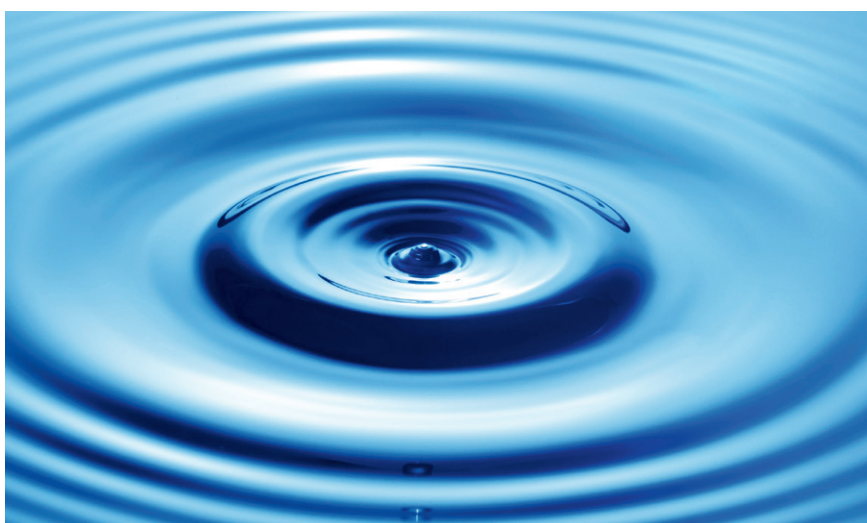
Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Institut für Metrologie METAS

# METinfo

*Zeitschrift für Metrologie*

*Spezialausgabe/April 2015*



**Die Messunsicherheit beim Messen  
elektromagnetischer Felder**

# Die Messunsicherheit beim Messen elektromagnetischer Felder

*Mobiltelefone werden heute von einem Grossteil der Bevölkerung verwendet. Aber niemand möchte einer starken Strahlung ausgesetzt sein. Um die elektromagnetischen Felder zu kontrollieren, müssen diese gemessen werden, und das ist gar nicht so einfach, wie man meint. Nur eine Messung mit Angabe der Messunsicherheit ist aussagekräftig. In den Messempfehlungen des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) und des METAS wird von einer Messunsicherheit von 45% ausgegangen. Derartige Unsicherheiten scheinen enorm und überholt. Was bedeutet diese Messunsicherheit eigentlich und wie kommt sie zustande?*

FRÉDÉRIC PYTHOUD

Jede Installation einer neuen Mobilfunkantenne muss öffentlich aufgelegt werden. Bei einer solchen Auflage in der Gemeinde Murten konnten die Meinungsdivergenzen zwischen den Gegnern und dem Mobilfunkbetreiber nicht beigelegt werden. Dies führte dazu, dass der Fall vor das Verwaltungsgericht und anschliessend vor das Bundesgericht kam. Das Bundesgericht hat im September 2013 ein Urteil veröffentlicht [1], in dem es folgendes festgehalten hat: Angesichts der technischen Entwicklung auf dem Gebiet der Telekommunikation in den letzten zehn Jahren wäre eine Überprüfung der Messempfehlungen angebracht. Zu prüfen sei, ob die Messempfehlungen, welche für GSM [3] und UMTS [4] aus den Jahren 2002 und 2003 stammen, noch dem heutigen Stand der Technik entsprechen. Das Bundesgericht hat daher verlangt, dass zu dieser Frage ein Amtsbericht des Eidgenössischen Instituts für Metrologie (METAS) eingeholt werde. Dieser Bericht [6] bestätigt, dass die erweiterte Messunsicherheit von rund 40%, die in den Messempfehlungen genannt ist, noch immer aktuell ist.

## Die Messunsicherheit: Begründung

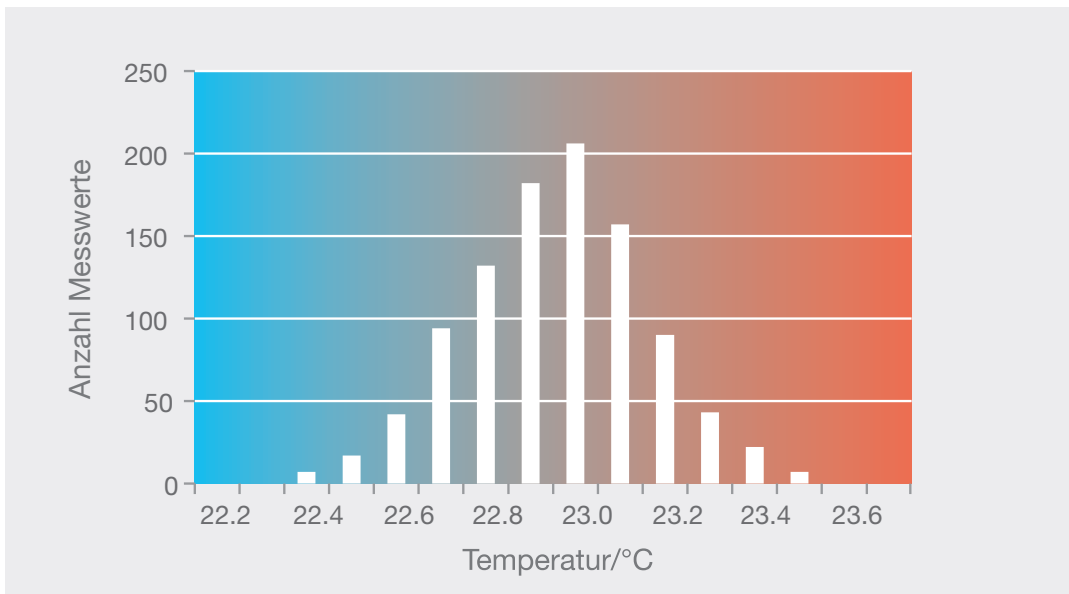
Die Messunsicherheit ist ein dem Messergebnis zugeordneter Parameter, der eine Aussage über die Qualität der Messung erlaubt. Je geringer die Messunsicherheit, umso präziser ist die Messung. Dieses Konzept stellt eines der Grundelemente der Messtechnik dar. Ohne Angabe der Messunsicherheit können die Messergebnisse weder untereinander noch mit einer Spezifikation verglichen werden. Wie man die Messunsicherheit ermittelt, ist in der Norm „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“, kurz GUM, beschrieben [7].



<sup>1</sup> Ohne Messunsicherheit können die Messergebnisse weder untereinander noch mit einem Referenzwert verglichen werden. Um sicherzustellen, dass Schrauben und Schraubenmutter von verschiedenen Herstellern kompatibel sind, müssen die Toleranzen eingehalten und somit mit einer kleinen Messunsicherheit gemessen werden.

## Konzept der Messunsicherheit

Wie ist die Messunsicherheit zu interpretieren? Die Messunsicherheit drückt gemäss GUM die Streuung der Werte aus, die vernünftigerweise der Messgrösse zugeordnet werden könnte. Diese Definition impliziert die Durchführung mehrerer Messungen sowie die Evaluation der Verteilung der sich daraus ergebenden Werte. Führt man eine einzige Messung durch, muss man eine Schätzung der Verteilung ermitteln, die man bei Durchführung mehrerer Messungen erhielte. Dafür sind gewissermassen auch „Gedanken-Messungen“ nötig. Die Messunsicherheit ist somit eng an die statistische Verteilung der gemessenen Werte gebunden. Bei diesem Ansatz geht man davon aus, dass nie zwei Mal genau derselbe Wert gemessen wird: denn entweder haben sich die gemessene Grösse (das gemessene Objekt) oder die Messeinrichtung oder die äusseren Einflussgrössen (Temperaturen, Vibrationen usw.) verändert. Alle diese Faktoren beeinflussen die Messung. Bei der Verwendung digitaler Geräte, die stabil den gleichen Wert anzeigen, entsteht der Eindruck, dass immer derselbe Wert gemessen wird. Doch man kann sich vorstellen, was geschehen würde, wenn das Gerät eine höhere Auflösung hätte.



2 Obenstehende Grafik stellt als Beispiel das Histogramm (Verteilung) der während einer Stunde in einem Raum durchgeführten Messungen dar.

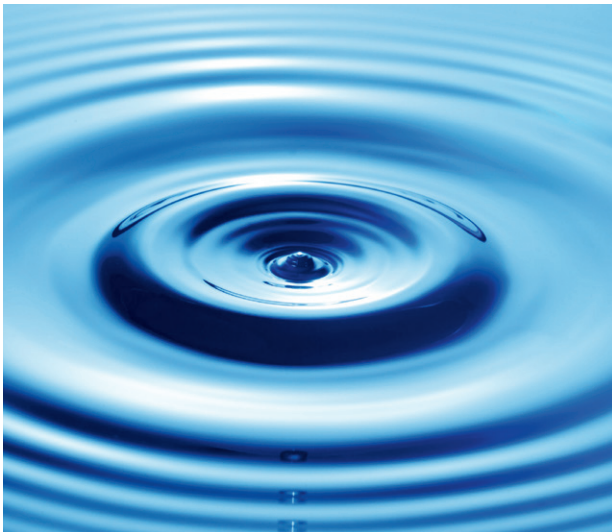
### Beispiel

Stellen wir uns vor, ein Kalibrierlabor würde ein Gewichtstück von 200 g bestimmen. Als Resultat wird ein Wert von 200,0021 g erhalten, mit einer Standardmessunsicherheit von typischerweise 0,7 mg. Diese Messunsicherheit ergibt sich durch die Bestimmung und Addition der Unsicherheitsbeiträge gemäss GUM [7]. Unter der Annahme, dass die Messunsicherheit normalverteilt ist, bezeichnet das Intervall  $(200,0021 \pm 0,0007)$  g einen Bereich, in welchem rund 68% der Messwerte liegen. Da diese Vertrauenswahrscheinlichkeit oft als unzureichend angesehen wird, verwendet man meistens eine um den Faktor 2 erweiterte Unsicherheit, in unserem Beispiel also 1,4 mg. Das Intervall  $(200,0021 \pm 0,0014)$  g kennzeichnet somit ein Vertrauensintervall von rund 95%. Daraus wird verständlich, dass die Messunsicherheit nicht nur von der Messmethode sowie der Qualität der verwendeten Geräte abhängt, sondern auch von der Messgrösse. Betrachten wir das Beispiel eines Urmeters aus Platin-Iridium: Es ist naheliegend, dass man seine Länge bei einer gegebenen Temperatur (20°C) mit einer Genauigkeit der Grössenordnung von einigen Dutzend Nanometer angeben kann. Hingegen können die Länge eines Schreibtischs oder die Breite einer Tür nicht mit einer solchen Genauigkeit angegeben werden, selbst dann nicht, wenn man über äusserst präzise Geräte verfügt. Folgende Tabelle zeigt einige Grössenordnungen der besten Messunsicherheiten, die man heute erreichen kann. Das Ergebnis hängt vom Bereich und der Messgrösse ab.

Bereich	Grösse	Beste Unsicherheit
Zeit	Zeitintervall oder Frequenz	$1/10^{15}$
Elektrizität	Elektrische Spannung DC	$1/10^{10}$
Länge	Länge eines festen Gegenstands	$1/10^8$
Masse	Masse einer Kopie des Urkilogramms	$1/10^8$

Interessanterweise lässt sich die Zeit mit der höchsten Genauigkeit messen, die Grösse, die am wenigsten greifbar ist. Jeder kann täglich Erfahrungen mit Länge oder Masse machen: Einen physischen Gegenstand berühren oder ihn aufheben, um sein Gewicht zu schätzen. Wie sieht es jedoch mit der Zeit aus, bei der jedes Zeitintervall einzigartig ist? Sobald ein Zeitabschnitt vorüber ist, existiert er schon nicht mehr!

Das METAS als nationales Labor für Metrologie verfügt über Labors, Geräte sowie qualifizierte Mitarbeitende, mit denen Messungen mit kleinstmöglichen Unsicherheiten erreicht werden können. Allerdings werden die oben genannten Genauigkeiten ausschliesslich unter sehr kontrollierten Bedingungen erzielt. Im Allgemeinen liegen die Unsicherheiten bei Kalibrierungen, die wir für unsere Kunden durchführen, höher. Sie hängen weitgehend von den Messbereichen sowie von den Geräten bzw. zu kalibrierenden Messnormalen ab.



3 Zwei unterschiedliche Phänomene: Links die von einem Wassertropfen ausgelösten Wellen, rechts eine vom Wind bewegte Wasseroberfläche, auf der die Wellen aus verschiedenen Richtungen interferieren.

#### Die Wellennatur elektromagnetischer Wellen

Elektromagnetische Felder werden von elektrischen Strömen erzeugt. Genutzt werden sie beispielsweise für die Übertragung von Informationen (Mobiltelefonie, Radio). Sie breiten sich wellenförmig aus, ähnlich wie Wellen an der Wasseroberfläche. Diese Wellen können sehr regelmässig sein, wie dies im Beispiel links (Bild oben) der Fall ist, oder etwas unregelmässiger, wie im Beispiel rechts.

Im linken Bild ist die Ursache der Wellen leicht auszumachen: Die Wellen wurden durch die Einwirkung eines Wassertropfens auf die Oberfläche ausgelöst. Im rechten Bild hingegen ist nicht sichtbar, wodurch die Wellen entstanden: Vermutlich durch Wind, der die Wasseroberfläche bewegt. Die dadurch erzeugten Wellen reflektieren sich am Rand der Wasseroberfläche; kehren zurück und überlagern sich mit den entgegenlaufenden Wellen. Dieses Phänomen wird Interferenz genannt.

Die nichtionisierende Strahlung einer Mobilfunkantenne verhält sich ähnlich: Die von aussen in ein Gebäude eindringenden Wellen verteilen sich im Allgemeinen nicht gleichmässig in den Räumen. Verschiedene physikalische Phänomene spielen dabei eine Rolle: die Reflektion der Strahlung (z.B. an Einrichtungsgegenständen), die Interferenzen und die unterschiedliche Absorption durch Wände und Fenster. Die Strahlung einer Mobilfunkantenne erzeugt in einem Raum Strukturen wie auf dem rechten Bild. Dabei ist die Intensität vor einem Fenster höher als im hinteren Teil des Raums.

« Es ist derzeit nicht möglich, das elektrische Feld aus der Distanz zu messen. »

#### Messung des Feldes durch Immersion

Die elektromagnetischen Felder können als Eigenschaft des Raums definiert werden: Die Eigenschaft, mechanische Kräfte auf elektrische Ladungen auszuüben. Wird eine Antenne in einem elektromagnetischen Feld platziert, werden die elektrischen Ladungen des Metalls der Antenne in Bewegung gesetzt. Sie erzeugen so eine elektrische Spannung, die gemessen werden kann. Das Prinzip dieser Messung wurde bereits früher einmal vorgestellt [8] [9]. Wichtig zu verstehen ist, dass man vor Ort mit einem Sensor (Sonde, Antenne) messen muss, um das elektrische Feld zu bestimmen. Anders ausgedrückt: Es ist zurzeit nicht möglich, das elektrische Feld aus der Distanz zu messen, so wie man die Länge eines Gebäudes aus mehreren hundert Meter Entfernung schätzen kann, indem man beispielsweise einen Theodolit oder einen Laser verwendet.



4 Soll ein Feld an einer bestimmten Stelle gemessen werden, so gibt es derzeit keine andere Lösung, als an dieser Stelle einen Sensor (z.B. Feldsonde auf einem Stativ) anzubringen. Es ist vergleichbar mit einem kleinen Schwimmer, der die Bewegung der Wasseroberfläche quantifiziert.

### Messempfehlungen

Bisher wurden Messempfehlungen und technische Berichte für Mobilfunkbasisstationen folgender Standards veröffentlicht:

- GSM (Global System for Mobile Communications, Mobiltelefonie der 2. Generation) [3],
- UMTS (Universal Mobile Telecommunications System, Mobiltelefonie der 3. Generation) [4]
- sowie LTE (Long Term Evolution, Mobiltelefonie der 4. Generation) [5].

Diese Empfehlungen und Berichte beschreiben das Vorgehen und die Anforderungen, die bei Abnahmemessungen an Mobilfunkbasisstationen einzuhalten sind. Es wird kontrolliert, ob eine Mobilfunkbasisstation den Anlagegrenzwert an «Orten mit empfindlicher Nutzung» (im Folgenden «OMEN») gemäss der Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV) einhält [2]. OMEN bezeichnen vornehmlich Räume, in denen sich Personen während längerer Zeit aufhalten.

Was die Abnahmemessungen einer Mobilfunkbasisstation betrifft, so wird gemäss den Messempfehlungen die maximale Intensität des elektromagnetischen Felds als Beurteilungswert betrachtet. Diese maximale Intensität wird definiert als Intensität der nichtionisierenden Strahlung, die als lokaler Höchstwert gemessen würde, wenn die Anlage im massgebenden Betriebszustand betrieben würde. Gemäss Anhang 1 Ziffer 63 NISV [2], gilt als massgebender Betriebszustand der maximale Gesprächs- und Datenverkehr bei maximaler Sendeleistung. Wenn eine begrenzte Anzahl Nutzer die Mobilfunkantenne verwenden, passt sich die Sendeleistung entsprechend an.

### Die Praxis

Bei einer Empfangsmessung wird der lokale Höchstwert der nichtionisierenden Strahlung an einem OMEN aufgenommen. Dabei wird nicht das ganze Feld gemessen, sondern nur das Feld eines Kontrollkanals. Das hat den Vorteil, dass die so gemessene Intensität nicht von der Nutzerzahl abhängt. Dieses Prinzip blieb seit der Veröffentlichung der Messempfehlungen unverändert bestehen. Anschliessend wird die gemessene Feldstärke des Kontrollkanals extrapoliert, so dass man die Feldstärke bei maximaler Leistung der Anlage bestimmen kann. Für diese Hochrechnung (Extrapolation) sind in den Messempfehlungen die Formeln enthalten.

Für die direkte experimentelle Bestimmung des lokalen Höchstwerts der nichtionisierenden Strahlung an einer bestimmten Stelle wird die sogenannte «Schwenkmethode» angewendet. Diese besteht darin, dass der OMEN mit einer Messantenne nach dem oben beschriebenen Immersionsprinzip gescannt wird. Ziel ist es, den Raum des OMEN experimentell zu sondieren. Je nach Art der Messantenne ist es wichtig, dass gleichzeitig deren Ausrichtung und Polarisation variiert werden. Dank ihrer einfachen Anwendung hat sich die Schwenkmethode sehr gut etabliert. Sie ermöglicht eine einfache und effektive Messung der nichtionisierenden Strahlung dieser Zonen. Abschliessend werden die experimentell erhaltenen Werte gemäss NISV [2] auf die maximale Sendeleistung der Mobilfunkbasisstation hochgerechnet.



5 Die Messung des Felds an einem OMEN kann mit der Messung der grössten Welle in einem Hafen (hier Murten) verglichen werden.

### Die Messunsicherheit

Die mit der Messung der Mobilfunkbasisstationen gemäss den Messempfehlungen des BAFU und des METAS verbundene Messunsicherheit umfasst zwei Beiträge: Die Unsicherheit der Messeinrichtung sowie die Unsicherheit der Probenahme.

Ausgehend von den gemachten Erfahrungen steht fest, dass die Standardunsicherheit der Messeinrichtung zwischen 10% und 16% schwankt. Sie bezieht folgende Quellen der Unsicherheit mit ein: Messantenne/Sonde, Verbindungskabel, Linearität und das Messgerät selbst. Die Messunsicherheit beruht grundsätzlich auf der Messantenne/Sonde; die anderen Quellen, wie das Messgerät, sind alle geringer zu werten und haben lediglich minimale Auswirkung auf die gesamte Unsicherheit. Jedes Messlabor muss die Unsicherheit der Messeinrichtung auf der Basis der Spezifikationen und der Kalibrierdaten der verwendeten Geräte bestimmen und sie im Messbericht angeben.

Die Unsicherheit der Probenahme ist mit der Natur elektromagnetischer Felder und dem Vorgehen verbunden. Dies führt zu einer Streuung der Messresultate, selbst bei identischer Messeinrichtung und Kalibrierung. Die Standardunsicherheit der Probenahme bei der Messung der GSM-Strahlung wurde 2002 experimentell in einem Ringvergleich festgelegt [10]. Sie beträgt rund 15%. Dieser Wert wurde in weiteren für UMTS (2006) [11], für die Rundfunkstrahlung (2007) [12] sowie kürzlich auf für LTE [13] durchgeführten Ringvergleichen bestätigt. Gemäss den Messempfehlungen muss sie bei der Bestimmung der kombinierten Standardunsicherheit als fixe Komponente von 15% ver-

wendet werden. Ausgehend von diesen beiden Beiträgen zur Standardunsicherheit der Messeinrichtung und der Probenahme erhält man, gemäss den Regeln der quadratischen Addition nach GUM, eine kombinierte Standardunsicherheit von typischerweise zwischen 18% und 22%. Die erweiterte Unsicherheit beträgt somit typischerweise zwischen 36% et 44%.

Dies bedeutet nicht, dass ein Messergebnis in jedem Fall um diesen Betrag vom wahren Wert abweicht. Wie gross die Abweichung im konkreten Einzelfall ist, lässt sich grundsätzlich nicht angeben. Kleine Abweichungen sind häufiger, grosse seltener. Die maximale zulässige erweiterte Messunsicherheit nach den Messempfehlungen wurde mit  $\pm 45\%$  definiert.

« Es ist also etwa so, wie wenn die Amplitude der Wellen in einem Hafen mittels Stichprobennahme bestimmt würde. »

## Diskussion

Dieser Artikel zeigt warum die Messung elektromagnetischer Felder von Mobilfunkbasisstationen mit Messunsicherheiten in der Höhe von mehreren Dutzend Prozent verbunden ist.

Die Entwicklungen der Messgeräte kennzeichnen sich hauptsächlich dadurch aus, dass sie mit den neuen Mobilfunktechnologien und entsprechenden Modulationen (GSM, UMTS, und LTE) Schritt halten und in der Lage sein müssen, das gewünschte Signal aus einer Vielzahl von Signalen dekodieren zu können. Das Prinzip der Schwenkmethode hat sich wegen ihrer guten Praxistauglichkeit sehr gut etabliert. Sie erlaubt rasche und unkomplizierte Messungen von nichtionisierender Strahlung in Innenräumen.

### **Die Messunsicherheit beim Messen der Strahlung von Mobilfunk-Basisstationen (Amtsbericht)**

Dieser Bericht ist in den Amtssprachen allgemein zugänglich auf [www.metas.ch/nisv](http://www.metas.ch/nisv).

### **L'incertitude de mesure inhérente à la mesure du rayonnement de stations de base pour téléphonie mobile (Rapport officiel)**

Ce rapport est publié dans les trois langues officielles sur [www.metas.ch/nisv](http://www.metas.ch/nisv).

### **L'incertezza di misura della radiazione delle stazioni di base di telefonia mobile (rapporto ufficiale)**

Questo rapporto ufficiale è accessibile a tutti in tutte le lingue ufficiali su [www.metas.ch/nisv](http://www.metas.ch/nisv).

## Referenzen

- [1] Tribunal fédéral: Arrêt 1C\_661/2012 du 5 septembre 2013.
- [2] Ordonnance du 23 décembre 1999: Ordonnance sur la protection contre le rayonnement non ionisant (ORNI ; RS 814.701).
- [3] OFEV/METAS 2002: Stations de base de téléphonie mobile (GSM) –Recommandation sur les mesures (VU-5800-D) Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage Berne. [www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/00685/index.html?lang=fr](http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/00685/index.html?lang=fr)
- [4] OFEV/METAS 2003: Stations de base pour téléphonie mobile (UMTS-FDD) – Recommandation sur les mesures, projet. [www.bafu.admin.ch/elektrosmog/01100/01108/01110/index.html?lang=fr](http://www.bafu.admin.ch/elektrosmog/01100/01108/01110/index.html?lang=fr)
- [5] METAS 2012: Technical report: Measurement Method for LTE Base Stations. Version allemande 2014 [www.metas.ch/2012-218-808](http://www.metas.ch/2012-218-808)
- [6] METAS 2013: L'incertitude de mesure inhérente à la mesure du rayonnement de stations de base pour téléphonie mobile (Rapport officiel). [www.metas.ch/nisv](http://www.metas.ch/nisv)
- [7] JCGM 100:2008 : Évaluation des données de mesure – Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement). <http://www.bipm.org/fr/publications/guides/gum.html>
- [8] METAS 2005 : Invisibles et pourtant on les mesure. MetInfo Vol. 12 No. 1/2005.
- [9] METAS 2009 : L'homme et les champs électromagnétiques. METinfo Vol. 16 No. 1/2009
- [10] METAS 2002: Nichtionisierende Strahlung: Vergleichsmessungen an Mobilfunk-Basisstationen. [www.metas.ch/nisv](http://www.metas.ch/nisv)
- [11] METAS 2006: UMTS Vergleichsmessungen, Sommer 2006. [www.metas.ch/nisv](http://www.metas.ch/nisv)
- [12] METAS 2007: An Inter-laboratory Comparison, Autumn 2007. [www.metas.ch/nisv](http://www.metas.ch/nisv)
- [13] METAS 2014 : Measurement of non-ionizing radiation from a LTE base station: Inter-laboratory comparison – November 2013. [www.metas.ch/nisv](http://www.metas.ch/nisv)



Dr. Frederic Pythoud, Leiter EMV-Labor  
E-Mail: [frederic.pythoud@metas.ch](mailto:frederic.pythoud@metas.ch)  
Telefon: +41 58 387 03 35

