



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Justiz- und Polizeidepartement EJPD
Bundesamt für Metrologie METAS

METinfo

Zeitschrift für Metrologie

Sonderdruck/Januar 2012



**Das METAS kalibriert
hydrometrische Messgeräte**

Das METAS kalibriert hydrometrische Messgeräte

Das Bundesamt für Metrologie (METAS) betreibt im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (Bafu) in Ittigen die Kalibrierstelle für hydrometrische Messgeräte. Sie ist nach ISO/IEC 17025/2005 akkreditiert. Hier werden Messinstrumente, die zur Bestimmung der Fließgeschwindigkeiten von Gewässern verwendet werden, kalibriert. Weiter werden Schleppversuche durchgeführt, um Messmittel-Prototypen und andere Geräte für die unterschiedlichsten Zwecke zu testen.

THOMAS SCHOTT, BEAT WÜTHRICH
REDAKTION: CHRISTIAN ANTENER

Fließgewässer lassen sich nur überwachen und steuern, wenn die jeweiligen Fließgeschwindigkeiten des Wassers bekannt sind. Diese Geschwindigkeiten werden mit hydrometrischen Messgeräten regelmässig vor Ort bestimmt. Hersteller und Betreiber dieser Messgeräte im In- und Ausland schätzen die Mess-, Kalibrier- und Prüfmöglichkeiten, die ihnen die Kalibrierstelle für hydrometrische Messgeräte des METAS bietet.

Hydrometrische Daten von grosser Bedeutung

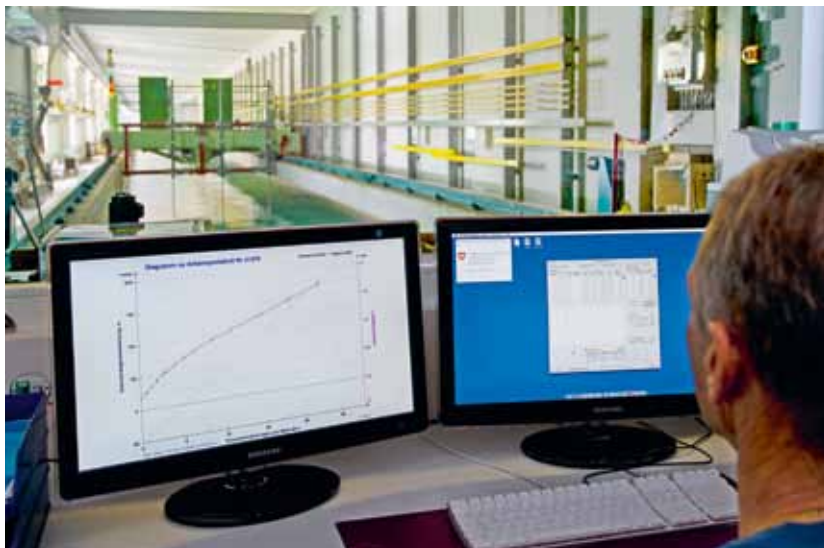
Abflussmessungen über lange Zeitperioden geben Auskunft über maximale und minimale Wasserführungen in den Flüssen. Die aus diesen Messungen gewonnenen Datenreihen sind für den Schutz vor Hochwassern unabdingbar; sie dienen aber auch dazu, die Gewässer vor Übernutzung zu schützen. Dank kontinuierlicher Abflussmessungen kann überprüft werden, ob Kraftwerke die vorgeschriebenen Pflichtwassermengen einhalten. Die Abflussdaten dienen aber auch dazu, die Wasserzinsen zu bestimmen, die Kraftwerke für die Nutzung des Wassers an die öffentliche Hand abgeben müssen.

Für die Bestimmung des Wirkungsgrades von Wasserkraftwerken ist es nötig, den Durchfluss und somit die Geschwindigkeiten des Wassers vor den Turbinen genau zu kennen. Kalibrierte hydrometrische Messgeräte sind also für die Energie- und Wasserwirtschaft, für die Turbinen-, Pumpen- und Wasserbauindustrie als auch für die Pflege, die Kontrolle und den Unterhalt der Gewässer von zentraler Bedeutung.

Hydrometrische Messmittel

Messflügel

Hydrometrische Flügel sind die am meisten verbreiteten Messgeräte. Sie stammen aus den Anfängen der Messung von Fließgeschwindigkeiten, sind aber heute noch sehr beliebte, robuste und genaue Messgeräte. Diese Instrumente werden im Kalibrierkanal des METAS unter realen und genau kontrollierten Bedingungen kalibriert. Einflüsse wie Stau, Reibungen und andere Phänomene, die auf die Schaufeln dieser Messflügel einwirken, sind im Kalibrierkanal gleich wie beim Einsatz im Feld. Hydrometrische Messflügel werden je nach Flussgrösse und Wassergeschwindigkeit an Stangen (Bild 2) oder an Gewichten (Bild 3) verwendet.



1 Die hydrometrische Kalibrieranlage des METAS wird von einem Leitcomputer aus gesteuert.



2 Messflügel an Stange.



3 Messflügel an Gewicht.



4 Magnetisch-induktives Messgerät.



5 Acoustic Doppler Current Meter (ADC).

Magnetisch-induktive Messgeräte

Magnetisch-induktive Messgeräte (Bild 4) arbeiten nach dem Faraday'schen Induktionsgesetz. Das Besondere an diesen Geräten für den Einsatz in der Hydrologie ist, dass das Wasser nicht – wie bei diesem Prinzip üblich – durch ein Rohr fließt, das von einem Magnetfeld durchdrungen wird, sondern dass das Magnetfeld um einen Körper aufgebaut wird und das Wasser aussen um diesen Körper herum fließt.

Diese Geräte eignen sich besonders für den Einsatz in Kläranlagen und in Gewässern, die stark verkrautet sind. Da sie jedoch von externen Magnetfeldern gestört werden können, ist darauf zu achten, dass sie beim Messen nicht durch Magnetfelder wie beispielsweise von Starkstromleitungen beeinflusst werden.

Acoustic Doppler Current Meter (ADC)

In den 1990er-Jahren wurden vor allem in den USA neue Messgerätetypen entwickelt, um Strömungen und deren Schichtungen in Ozeanen erfassen und untersuchen zu können. Diese Geräte verwenden Ultraschallsignale und arbeiten nach dem Dopplerprinzip. Sie werden *Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP)* genannt, weil sie nicht nur eine Geschwindigkeit an einem Punkt messen, sondern ganze Geschwindigkeitsprofile im Wasser erfassen können.

Aus diesen Messgeräten für die Ozeanographie wurden später Messinstrumente entwickelt, die sich für Abflussmessungen in Flüssen eignen, die *Acoustic Doppler Current Meter (ADC)*, (Bild 5), auch *Acoustic Doppler Velocity Meter (ADV)* genannt. Diese Geräte werden als Alternative zu den herkömmlichen hydrometrischen Flügeln eingesetzt: Sie messen – gleich wie die Messflügel – an einem Punkt die Fließgeschwindigkeit und werden auch auf die gleiche Weise eingesetzt.

Die Kalibrierung hydrometrischer Messmittel

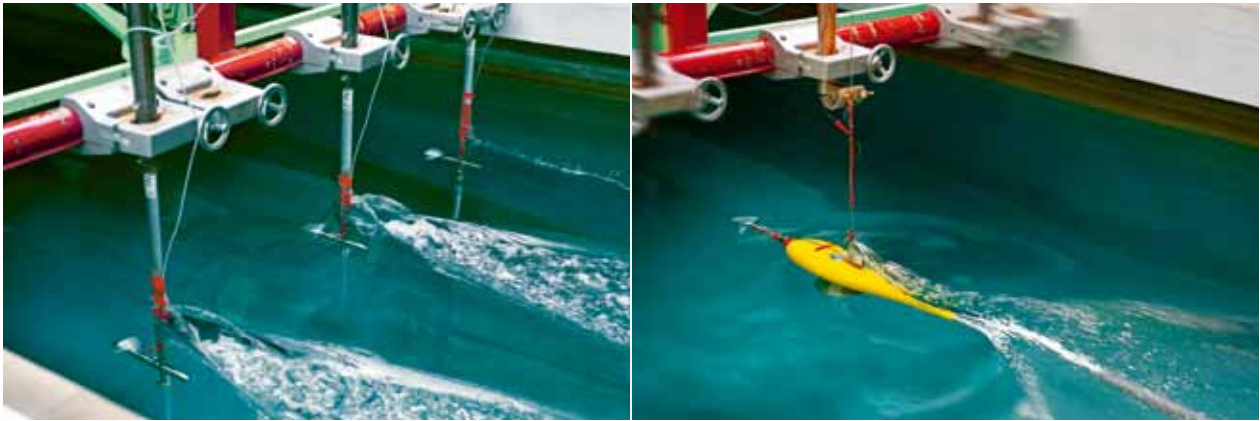
Messmethode

Hydrometrische Messmittel werden kalibriert, indem sie mit konstanter Geschwindigkeit durch das stehende Wasser des Kalibrierkanals gezogen werden. Mit dieser Methode wird «fliessendes Wasser» simuliert. Dabei werden die bei der Messung zurückgelegte Strecke und die dafür benötigte Zeit erfasst. Aus diesen beiden Werten wird die Geschwindigkeit berechnet.

Messablauf

Die zu kalibrierenden Messgeräte werden an der Haltevorrichtung befestigt, die sich an der Rückseite des Schleppwagens befindet (Bild 6). Anschliessend wird der Wagen auf die gewünschte Messgeschwindigkeit beschleunigt und diese danach konstant gehalten. Ein Messpaket von zehn Teilmessungen wird bei dieser Geschwindigkeit ausgelöst.

Der Widerstand des Wassers setzt – um beim Beispiel der Messflügel zu bleiben – deren Schaufeln in Bewegung. Je nach



6 Hydrometrische Messflügel – auf dem linken Bild an Stangen, auf dem rechten Bild an einem Gewicht (gelb) montiert – werden im METAS-Kalibrierkanal unter realen Bedingungen kalibriert

Ausführung geben die Flügel pro Umdrehung eine bestimmte Anzahl Impulse ab. Nach einer für jeden Flügel individuell wählbaren Anzahl gezählter Impulse werden der vom Schleppwagen zurückgelegte Weg in hundertstel mm und die Zeit in ms festgehalten. Daraus wird die effektiv gefahrene Geschwindigkeit des Schleppwagens ermittelt.

Um die ISO-Vorschriften einhalten zu können, werden bei hydro-metrischen Flügeln die Anzahl Schaufelumdrehungen so gewählt, dass die Messstrecke mindestens 20 Meter beträgt. Bei Instrumenten mit anderen Messprinzipien (beispielsweise magnetisch-induktive Geräte oder Akustik-Doppler-Instrumente) ist die Messstrecke durch die vorgegebene Messzeit gegeben.

Anschließend an das erste Messpaket wird der Schleppwagen auf eine neue Geschwindigkeit hochgefahren und dort ein weiteres Paket von zehn Teilmessungen durchgeführt. Nach dem letzten Paket wird der Wagen an den Ausgangspunkt zurückgefahren. Eine weitere Messfahrt wird erst dann gestartet, wenn sich das Wasser im Kalibrierkanal beruhigt hat.

Vom Leitcomputer im Kommandoraum aus (Bild 1) werden alle Messfahrten und -abläufe vorprogrammiert. Nach dem Startkommando durch das Bedienungspersonal laufen die Fahrten vollautomatisch ab. Dabei können die Geschwindigkeit des Schleppwagens und die Flügelimpulse auf dem Bildschirm im Kommandoraum mitverfolgt werden.

Erfassung der Messwerte

Die hinten am Schleppwagen befestigten Messgeräte werden bei den Fahrten durch das Wasser gezogen. Hier ist entscheidend, dass während der vorgewählten Anzahl Umdrehungen die Impulse der Messflügel genau gezählt werden. Zu diesem Zweck wurde eine genaue Weg-Zeit-Elektronik entwickelt. Der zurückgelegte Weg des Schleppwagens wird über ein Messrad auf 0.01 mm genau erfasst. Ein Quarz mit einer Frequenz von 10 MHz bildet die Zeitbasis. Diese weist eine relative Messunsicherheit von 1 ppm auf.

Das Erfassungssystem ist in der Lage, Impulse, elektrische Spannungen oder Stromstärken, aber auch digitale Anzeigen zu verarbeiten. Die auf dem Schleppwagen erfassten Messwerte und Parameter werden drahtlos an den Leitcomputer übertragen. Die angezeigten Messwerte von Messinstrumenten mit Digital- oder Analoganzeige werden von einer Videokamera aufgenommen und über eine separate Richtstrahlverbindung an den Leitcomputer übermittelt.

Die Kalibrierung eines Messgerätes erfordert mehrere Messfahrten, da die Charakteristik der Geräte nur mit mehreren Kalibrierpunkten seriös beschrieben werden kann. In der Norm ISO 3455 ist festgelegt, wie viele Kalibrierpunkte bzw. Geschwindigkeiten gefahren werden müssen.

Messgerätetyp	Geschwindigkeits-Messbereich (m/s)	Relative Messunsicherheit
Hydrometrische Flügel	0.02 ... 10	für Impulse bzw. Kontakte: $4.0 \cdot 10^{-4}$ für analoge Signale: $7.0 \cdot 10^{-4}$
Hydrometrische Flügel mit Gewicht	0.02 ... 7	
Magnetisch-induktive Messgeräte	0.02 ... 5	für Digitalanzeigen: $4.0 \cdot 10^{-4}$ für Analogsignale: $7.0 \cdot 10^{-4}$
Doppler-Ultraschall-Messgeräte	0.02 ... 5	

7 Mit der hydrometrischen Kalibrieranlage des METAS werden Messgeräte zur Bestimmung der Fließgeschwindigkeiten von Wasser kalibriert, die Streubereiche dieser Geräte ermittelt, die Messinstrumente auf einwandfreie Funktion getestet sowie neu entwickelte Messmittel für die Hydrometrie und Prototypen für die unterschiedlichsten Anwendungen mittels Schleppversuchen getestet.

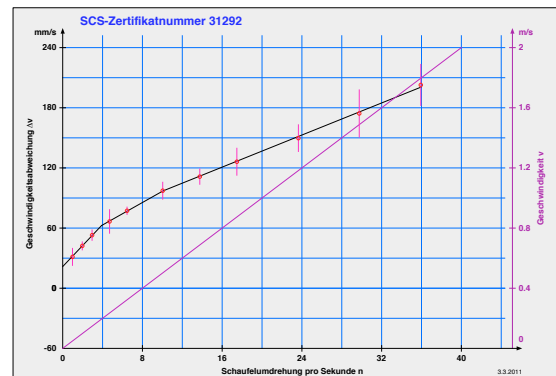
Anhang zu SCS-Zertifikat Nr. 31292

Anhang A

Kalibriergeraden	> n	<= n	Geschwindigkeit v =
Gerade A	0.0000	3.8980	$0.0216 + 0.0605 n$
Gerade B	3.8980	10.0625	$0.0407 + 0.0556 n$
Gerade C	10.0625	35.9479	$0.0568 + 0.0540 n$

n = Anzahl Schaufelumdrehungen pro Sekunde v = Geschwindigkeit in Meter pro Sekunde

Diagramm



Beschreibung zu Diagramm

In der Grafik wird zu jedem Messpunkt ein Streuband dargestellt, welches aus den Teilmessungen ermittelt wird. Dieses Streuband stellt die gesamte Messunsicherheit dar, verursacht durch das zu kalibrierende Messgerät, Befestigungsart und Kalibrieranlage. Im Geschwindigkeitsbereich von $v = 3.0$ m/s bis 4.5 m/s kann der sogenannte „Eppereffekt“ auftreten. Messpunkte, die mit dem Eppereffekt belastet sind, werden beim Einlegen der Regressionsgleichungen weniger stark gewichtet als Messpunkte unterhalb und oberhalb des erwähnten Geschwindigkeitsbereiches.

8 Auswertung der Kalibrierung eines Messflügels mit Angabe der Formeln für die drei Kalibriergeraden.



Bundesamt für Metrologie METAS
Labor für Hydrometrie
Papiermühlestrasse 172
CH-3063 Ittigen
Schweiz

Auswertung der Messwerte

Die erfassten Messwerte werden in die Datenbank des Leitcomputers übernommen und von dort aus weiterverarbeitet. Damit für jeden Messpunkt eine Messunsicherheit angegeben werden kann, werden die Messpakete mit jeweils zehn Teilmessungen ausgeführt, so dass aus diesen Teilmessungen der Mittelwert mit der zugehörigen Standardabweichung bestimmt werden kann.

Die Messpunkte werden in einem Diagramm zusammengefasst. Diese Messpunkte werden mit einer ein- bis vierteiligen Geraden verbunden. Wird diese sogenannte «Kalibriergerade» als Formel dargestellt, erlaubt dies dem Anwender, für jede im Gewässer gemessene Tourenzahl des Flügels die entsprechende Wassergeschwindigkeit anzugeben.

Das Diagramm 8 ist eine graphische Darstellung der Ergebnisse der Kalibrierung eines Messflügels: Es zeigt die «Kalibriergeraden» für einen Messflügel, das heisst die Abweichung des Messgerätes vom Sollwert bezogen auf die Anzahl Schaufelumdrehungen pro Sekunde.

SCS-Kalibrierzertifikate

Als Endprodukt erhält der Kunde ein SCS-Kalibrierzertifikat (SCS = Schweizerischer Kalibrierdienst). Dieses Zertifikat enthält alle erfassten Daten mit den entsprechenden Messunsicherheiten und, als Beilage, die ermittelten Kalibriergeraden und deren Gleichungen. Mit Hilfe dieser Daten kann nun mit jedem der kalibrierten Messmittel in einem Fließgewässer die Wassergeschwindigkeit und daraus die Abflussmenge berechnet werden.



9 Versuchsfahrt mit einem Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP).

Die Kalibrieranlage

Das Herzstück der Anlage sind der mit Wasser gefüllte Kanal, der Schleppwagen sowie die elektrischen, hydraulischen und mechanischen Steuer-, Mess-, Übertragungs-, Auswertungs- und Sicherheitseinrichtungen.

Der Kalibrierkanal

Der in ein stabiles Kiesbett betonierte Kanal ist 140 m lang, 4 m breit und 2.4 m tief. Er ist in einer Halle untergebracht. Sein Pegelstand beträgt normalerweise 1.8 m; so bietet der Kanal einer Million Litern Wasser Platz. Die Lufttemperatur in der Halle liegt – je nach Jahreszeit – zwischen 15 °C und 25 °C, die Wassertemperatur zwischen 10 °C und 20 °C und die relative Feuchtigkeit der Luft zwischen 45 % und 60 %.

Der Schleppwagen

Der Schleppwagen fährt auf genau ausgerichteten Schienen. Er kann im Bereich von 0.02 m/s bis 10 m/s auf eine beliebige konstante Geschwindigkeit eingestellt werden. Er ist so konzipiert, dass er sowohl die zu kalibrierenden Messgeräte als auch die dafür benötigten Mess-, Prüf- und Überwachungseinrichtungen aufnehmen kann. Bei Bedarf, etwa für Videoaufnahmen, können auch Personen mitfahren.

Drei Gleichstrommotoren, die über mikroprozessorgesteuerte Vierquadranten-Stromrichter gespeist werden, treiben den Schleppwagen an. Er wird über Stromschienen, die entlang des Kanals seitlich an der Wand angebracht sind, mit Energie versorgt. Drei unabhängige Bremssysteme – mechanisch, elektrisch und pneumatisch betrieben – sorgen für einen sicheren Betrieb.

Internationale Messbasis für hydrometrische Kalibrierungen

Die Kalibrieranlage in Ittigen ist eine der ältesten der Welt und gilt seit langem als wichtige internationale Messbasis für die Kalibrierung hydrometrischer Messgeräte. Pro Jahr werden rund 500 solche Geschwindigkeitsmessmittel kalibriert. Die Aufträge stammen von einer Kundschaft, die so vielseitig wie international ist: Hydrologische Dienste aus dem In- und Ausland, Gewässerschutzstellen von Bund, Kantonen und Gemeinden sind darunter ebenso zu finden wie Kraftwerkbetreiber, Forschungsinstitute technischer Hochschulen, Ingenieur- und Umweltbüros sowie Industriebetriebe (Hersteller hydrometrischer Messgeräte, Firmen für Turbinen-, Pumpen- und Wasserbau). Grösster Kunde ist das Bundesamt für Umwelt (Bafu).

Die METAS-Fachleute stehen in engem Kontakt mit der *International Group for Hydraulic Efficiency Measurements (IGHem, www.ighem.org)*.

Referenz

Thomas Schott, Christian Antener: Das METAS übernimmt neue Aufgaben im Bereich der Hydrometrie, METinfo, Vol. 18, Nr. 1, pp. 26–27, 2011.

Labor für Hydrometrie

Beat Wüthrich, Betreiber des Labors für Hydrometrie, Direktwahl +41 31 921 37 48, hydro-kalibrierstelle@metas.ch; Dr. Marc de Huu, Laborchef Durchfluss und Hydrometrie, Direktwahl +41 31 32 33 267, marc.dehoo@metas.ch.

¹⁰ Ansprechpartner des Labors für Hydrometrie.



1896 wird in Ittigen die «Eichstätte für hydrometrische Flügel» in Betrieb genommen. Professor Josef Epper, der erste Direktor (auf dem Bild vorne mit Bart), gilt als einer der Begründer der Messung von Fließgeschwindigkeiten von Gewässern mit hydrometrischen Flügeln.

Bemerkenswert ist der pragmatische Ansatz, mit dem Professor Epper die Messflügel «eichte»: Ein Messgehilfe brachte den Messwagen auf eine konstante Geschwindigkeit. Sobald nun der Messflügel einen Impuls erzeugte, startete Epper mit der einen Hand eine Stoppuhr und löste gleichzeitig mit der anderen einen Gewehrusschuss aus. Damit wurde ein Bolzen in eine Holzlatte geschossen, die entlang des Geleises angebracht war. Nach einer bestimmten Anzahl Impulse stoppte Epper die Stoppuhr und setzte gleichzeitig mit einem zweiten Schuss aus dem Gewehr die Stoppsmarke in die Holzlatte. Mit einem Messband konnte er anschliessend den zurückgelegten Weg auf den Millimeter genau messen. Die Zeit lieferte ihm die Stoppuhr auf die Zehntelsekunde genau. Die grösste Messunsicherheit war dabei Professor Eppers Reaktionszeit. 1914 löst ein elektrisch angetriebener Messwagen den bisherigen «Handbetrieb» ab.

Die Idee, eine grössere Anlage zu bauen, kann wegen schwieriger wirtschaftlicher Umstände erst 1951 verwirklicht werden: Unmittelbar neben der Freiluftanlage wird eine neue Halle gebaut, die den bis heute bestehenden Kalibrierkanal überdeckt. Mit einer Länge von 140 m, einer Breite von 4 m und einer Tiefe von 2.4 m finden in diesem Kanal rund eine Million Liter Wasser Platz.

Dem Know-how und der Erfahrung der Betreiber ist es zu verdanken, dass immer mehr Aufträge erteilt werden, auch

aus dem Ausland. Kommt hinzu, dass die Kunden verlangen, ihre hydrometrischen Messgeräte auch bei höheren als den bisher gefahrenen Geschwindigkeiten kalibrieren zu lassen; eine Totalerneuerung wird unabdingbar: 1968 baut die Firma Kempf & Remmers, Hamburg, nach modernsten Gesichtspunkten einen neuen Messwagen, der 4.6 t schwer ist. Neue Schienen werden verlegt.

Weil die Steuerungselektronik veraltet war und keine Ersatzteile mehr erhältlich waren, konzipieren 1992 die Gebrüder Meier AG, elektrische Maschinen und Anlagen, Regensdorf, und die A. P. Kern AG, Software Engineering, Bern, ein halbautomatisches Messsystem, das auf den bestehenden Messwagen aufgebaut wird. Gleichzeitig werden auch die Strom- und Signalübertragungsschienen ersetzt. Im gleichen Jahr stellt die Schweizerische Akkreditierungsstelle (SAS) der Kalibrierstelle für hydrometrische Messgeräte die erste Akkreditierung aus (SCS 003).

1999 wird die Anlage so erweitert, dass zusätzlich Differenzdruck- und magnetisch-induktive Messgeräte kalibriert werden können. Diese Kalibrierungen sind in der Wiederakkreditierung vom 2. Dezember 1999 eingeschlossen.

Der weitere Ausbau der Anlage im Jahr 2009 für Doppler-Ultraschall-Messgeräte wird ebenfalls in den Gültigkeitsbereich der Wiederakkreditierung vom 20. November 2009 aufgenommen, die auf der Grundlage von ISO/IEC 17025/2005 durchgeführt wird.

Am 1. Januar 2011 übernimmt das Bundesamt für Metrologie (METAS) vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) den Betrieb der Anlage, die in Ittigen stationiert bleibt.

11 Die hydrometrische Kalibrierstelle des METAS hat eine bewegte Geschichte hinter sich.

Sonderdruck aus METinfo 2/2011, Januar 2012

Bundesamt für Metrologie METAS
Lindenweg 50, CH-3003 Bern-Wabern, Telefon +41 31 32 33 111, www.metas.ch