

CCEM-Richtlinien für die Umsetzung des "revidierten SI"

Zur Vorbereitung der Einführung des "revidierten SI" hat das *Beratende Komitee für Elektrizität und Magnetismus* (Consultative Committee for Electricity and Magnetism (CCEM)) der Meterkonvention allgemeine Richtlinien erarbeitet. Das hier vorliegende Dokument ist eine von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt erstellte deutsche Fassung dieser Richtlinien. Das englische Original ist unter https://www.bipm.org/utils/common/pdf/CC/CCEM/ccem_guidelines_revisedSI.pdf erhältlich.

Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Dokuments ist davon auszugehen, dass das "revidierte SI" auf der Sitzung der Generalkonferenz für Maß und Gewicht (CGPM) im November 2018 beschlossen und das "revidierte SI" am *Welttag der Metrologie* am 20. Mai 2019 weltweit eingeführt wird. Im Folgenden wird der 20. Mai 2019 daher der Einfachheit halber durchgängig als "Tag der Einführung" bezeichnet.

Die Richtlinien sind für die Nationalen Metrologieinstitute (NMI) und deren Kunden bestimmt und befassen sich mit den Auswirkungen, die das "revidierte SI" auf die elektrische Messtechnik haben wird. Sinn und Zweck dieser Richtlinien ist es, den Anwendern elektrischer Messtechnik ein Minimum an Maßnahmen und Begründungen an die Hand zu geben, damit der Übergang zum "revidierten SI" reibungslos erfolgen kann und gleichzeitig die Rückführung von Messungen problemlos und ohne unnötigen Aufwand aufrechterhalten wird.

1. Einleitung

Das "revidierte SI" ist in vielen Quellen dokumentiert. In Zweifelsfällen sollte die neueste Version der SI-Broschüre [1] herangezogen werden, zusammen mit den dazugehörigen Dokumenten des CIPM, CCU, CCM, CCEM und anderer beratender Komitees [2]. Im Wesentlichen stellt der Wechsel zum neuen SI eine Abkehr von den bisherigen Definitionen der Basiseinheiten und die Festlegung von genauen, definierenden Werten von sieben Bezugskonstanten dar. Diese sieben Referenzwerte können verwendet werden, um die SI-Einheiten darzustellen – sowohl Basiseinheiten als auch abgeleitete Einheiten. Es gibt keine fundamentale Unterscheidung mehr zwischen Basiseinheiten und abgeleiteten Einheiten. Eine solche Unterscheidung wird aber aus Gründen der historischen Kontinuität sowie der besseren Verständlichkeit wegen beibehalten. Einzelheiten zu den Techniken, die typischerweise für die Rückführung auf das "revidierte SI" verwendet werden, sind in den *"Mises en pratique"* dargestellt, die von verschiedenen *Beratenden Komitees* [2] erarbeitet wurden.

Die Veränderungen, die sich durch die Einführung des "revidierten SI" ergeben, können allgemein wie folgt unterteilt werden:

- **Texte**
Die Texte der verschiedenen Dokumente – und insbesondere die Definitionen der Basiseinheiten in der SI-Broschüre – werden sich ändern und nun Bezug zu den sieben definierenden Konstanten nehmen.
- **Konzepte**
Die physikalischen Konzepte hinter den Definitionen werden sich für das Ampere, das Kilogramm, das Kelvin und das Mol ändern. Diese Konzepte werden Thema eines langfristigen öffentlichen Informationsprozesses sein.

- **Werte und Unsicherheiten**

Die numerischen Werte und die Unsicherheiten von verschiedenen Bezugskonstanten, einigen Naturkonstanten und die Werte von hochpräzisen Referenzen werden sich am Tag der Einführung ändern. In sämtlichen Fällen, außer bei den elektrischen Einheiten, werden diese Änderungen gering oder gleich Null sein und von der Allgemeinheit nicht wahrgenommen werden.

- **Rückführungspfade**

Der Übergang zum "revidierten SI" wird neue SI-Rückführungspfade zu den sieben Bezugskonstanten ermöglichen, die in der Vergangenheit nicht gültig waren. Diese neuen Rückführungspfade werden ihre eigenen Messunsicherheitsbudgets haben.

Obwohl der Übergang zum "revidierten SI" alle diese verschiedenen Änderungen mit sich bringt, befasst das vorliegende Dokument sich hauptsächlich mit den Auswirkungen auf die Werte und Unsicherheiten der elektrischen Größen am Tag der Einführung und direkt danach.

2. Auswirkungen auf die elektrische Messtechnik

Für die Anwender elektrischer Messtechnik besteht die Änderung des SI hauptsächlich aus der Festlegung der Werte der Planck-Konstanten, h , und der Elementarladung, e . Vorteilhafterweise wird das Konzept der Festlegung von Werten für h und e im Bereich der elektrischen Messtechnik seit 1990 verwendet, als die konventionellen Werte $K_{J-90} \cong 2e/h$ und $R_{K-90} \cong h/e^2$ eingeführt wurden. Allerdings unterscheiden sich die neuen Werte h und e leicht von den Werten, die für die Festsetzung von K_{J-90} und R_{K-90} verwendet wurden. Die Abschaffung der "konventionellen" Werte, dargestellt durch K_{J-90} und R_{K-90} , bedeutet, dass die weitergegebenen elektrischen Einheiten vollständig kohärent mit dem SI werden. Dies wird zwar zu einer kleinen Änderung am Tag der Einführung des "revidierten SI" führen, danach werden jedoch keine Änderungen mehr notwendig sein.

In anderen Bereichen, wie Masse, Temperatur, Länge, Zeit etc., werden die Änderungen im "revidierten SI" nicht zu einer wahrnehmbaren Diskontinuität bei den Werten führen. Daher sind insbesondere für den elektrischen Bereich Hinweise zu zwei konkreten Fragen notwendig:

1. Was ist zur Vorbereitung auf das "revidierte SI" zu tun?
2. Was ist am Tag der Einführung oder direkt danach zu tun?

Was ist zur Vorbereitung auf das "revidierte SI" zu tun?

Rechtzeitig vor dem Tag der Einführung sollte wie folgt vorgegangen werden:

- i. Machen Sie sich, Ihre Mitarbeiter und Ihre von der Änderung betroffenen Kunden als erstes mit dem "revidierten SI", den sich daraus ergebenden Konsequenzen und seiner Umsetzung vertraut. Informationen sind von der CIPM-Arbeitsgruppe für Öffentlichkeitsarbeit und den nationalen Metrologieinstituten erhältlich bzw. werden in Veröffentlichungen publik gemacht [3-9].
- ii. Betrachten Sie Ihre Rückführbarkeitsanforderungen, indem Sie ermitteln, welche Normale, Artefakte/Maßverkörperungen, Messgeräte, Steuerungs- und Auswertesoftware und spezielle Messungen von der Änderung betroffen sein könnten. Besondere Aufmerksamkeit sollte den höchsten Genauigkeitsklassen (niedrigsten Unsicherheitsklassen) gelten. Anleitungen dazu finden Sie im nächsten Abschnitt.

- iii. Betrachten Sie ihre Qualitätsmanagement-Dokumente sowie Mess- und Kalibrierverfahren, um Verweise auf die konventionellen Werte K_{J-90} und R_{K-90} zu ermitteln, beispielsweise in der Auswertesoftware. Diese Verweise müssen aktualisiert werden.

Was ist am Tag der Einführung oder direkt danach zu tun?

Diese Frage bezieht sich insbesondere darauf, welche metrologischen Anpassungen am Tag der Einführung erforderlich sind. Am Tag der Einführung sollten die Software, die Qualitätssicherungsverfahren und die zugehörige Dokumentation so aktualisiert werden, dass die neu definierten Werte für h und e inklusive sämtlicher revidierter Rückführungspfade berücksichtigt werden. Zu diesem Zeitpunkt erfahren die Kalibrierwerte sämtlicher elektrischer Geräte eine kleine Änderung. Natürlich ist es akzeptabel, sämtliche betroffenen Geräte und Normale numerisch zu korrigieren oder sogar zu rekalibrieren. Allerdings ist es oft unpraktisch, und in vielen Fällen auch gar nicht notwendig, die vorherigen Kalibrierwerte zu verändern, damit eine akzeptable Rückführung zum SI beibehalten wird.

Die relative Änderung, d , beträgt ca. $+1,067 \times 10^{-7}$ für Spannungsgrößen und ca. $+1,779 \times 10^{-8}$ für Widerstandsgrößen. Von der Größenordnung dieser Änderungen lassen sich allgemeine Kriterien ableiten, aufgrund derer entschieden werden kann, welche Maßnahmen am Tag der Einführung durchgeführt werden sollten. Wenn die erweiterte relative Messunsicherheit (für $k = 2$), U , eines bestimmten Normals, eines Messgeräts oder einer Messung so beschaffen ist, dass

$2,5 d \leq U$ ist, dann ist bis zur nächsten Rekalisierung (oder Messung) keine Maßnahme erforderlich. Die bisherigen Kalibrierdaten sind immer noch metrologisch gültig und die Verwendung dieser Daten zwischen dem Tag der Einführung und der nächsten Rekalisierung hat keine wesentlichen Auswirkungen (nur die Wahrscheinlichkeit des Vertrauensintervalls, das vor der Neudefinition gültig war, ändert sich von 95 % auf 87 %). Dies zeigt, dass Spannungsmessgrößen mit relativen Unsicherheiten von mehr als $2,5 \times 10^{-7}$ keine Maßnahme erforderlich machen. Ebenso erfordern Widerstands- (und Impedanz-) Messgrößen mit Unsicherheiten größer als 5×10^{-8} keine Maßnahmen. Die Kriterien lassen sich auch auf daraus zusammengesetzte Größen wie elektrische Leistung etc. erweitern. Der Fall **$2,5 d \leq U$** liegt für die Mehrzahl der elektrischen Messeinrichtungen vor.

$U < 2,5 d$ ist, dann muss numerisch korrigiert oder rekaliert werden, um die Rückführung aufrecht zu erhalten. Der Fall **$U < 2,5 d$** betrifft alle Quantennormale sowie einige andere hochwertige Normale, wie beispielsweise Zener-Spannungsnormale sowie Widerstandsnormale und Kapazitätznormale höchster Qualität. Beachten Sie bitte, dass auch die Software zur Steuerung der Messungen und die Auswertesoftware betrachtet werden muss.

Die Referenzwerte für $2e/h$ und h/e^2 von Quantennormalen wie Josephson-Spannungsnormalen und Quanten-Hall-Widerstandsnormalen sollten aktualisiert werden, d.h.

$$2e/h = 483\,597,848\,416\,984 \text{ GHz/V}$$

$$h/e^2 = 25\,812,807\,459\,3045 \, \Omega,$$

und die Messunsicherheitsbudgets der Quantennormale sollten überprüft werden, bevor sie zum ersten Mal nach dem Tag der Einführung verwendet werden. Bei der Rundung der Werte $2e/h$ und h/e^2 sollte die *Mise en pratique* des CCEM [4] beachtet werden, so dass die Ergebnisse nicht nachteilig beeinflusst werden. Auf diese Weise werden während des Übergangs äußerste Präzision und anschließende Rückführung gewahrt.

Beachten Sie bitte auch, dass die elektrische und die magnetische Konstante, ϵ_0 und μ_0 , nach der Neudefinition ungefähr die gleichen Werte wie vorher haben, dann jedoch mit denselben relativen Unsicherheiten wie die der Feinstrukturkonstanten $\approx 2,3 \times 10^{-10}$.

Weitere Informationen oder Beratung können Sie von ihrem nationalen Metrologieinstitut, ihrer regionalen Metrologieorganisation oder vom BIPM erhalten.

Referenzen

- [1] <http://www.bipm.org/en/measurement-units/new-si/#communication>
- [2] <http://www.bipm.org/en/committees/cc/>
- [3] <http://www.bipm.org/en/committees/cc/wg/cipm-tgsi.html>
- [4] <http://www.bipm.org/en/committees/cc/wg/wgsi.html>
- [5] David B. Newell, "A more fundamental International System of Units", *Physics Today* 67(7), 35 (2014)
- [6] <http://www.npl.co.uk/news/special-journal-edition-on-the-new-si>
- [7] <http://www.npl.co.uk/reference/measurement-units/proposed-si-changes/>
- [8] <https://www.ptb.de/cms/de/forschung-entwicklung/forschung-zum-neuen-si.html>
- [9] Nick Fletcher, Gert Rietveld, James Olthoff, Ilya Budovsky, and Martin Milton, "Electrical Units in the New SI: Saying Goodbye to the 1990 Values", *NCSLI Measure*, Vol. 9, Iss. 3, 2014