

Aus der metrologischen Welt 2019

- Ein kleiner Beitrag zur Uhr-Geschichte
- PTB-Zeit in HTML5
- Aktuelles aus der OIML
- PTB-Innovationen





**Fachorgan für Wirtschaft und Wissenschaft, Amts- und
Mitteilungsblatt der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin**

129. Jahrgang, Heft 4, Dezember 2019

Aus der metrologischen Welt 2019

Inhalt

Aus der metrologischen Welt 2019

- Ein kleiner Beitrag zur Uhr-Geschichte 03
Andreas Bauch
- PTB-Zeit in HTML5 11
Martin Gutbrod, Andreas Bauch, Dieter Sibold, Tobias Klein, Dirk Piester

Aktuelles aus der OIML

- Bericht über die 54. Sitzung des CIML in Bratislava 25
Roman Schwartz, Peter Ulbig

PTB-Innovationen

- Ausgesuchte Technologieangebote und Erfolgsgeschichten 29

Ein kleiner Beitrag zur Uhr-Geschichte

Andreas Bauch*

Einleitung

„Quantentechnologien“, „Quantensprung“ sind Vokabeln, die aktuell *en vogue* sind und die Webseiten sowohl politischer wie wissenschaftlicher Organisationen schmücken. Daher erscheint es gerade jetzt richtig daran zu erinnern, dass quantenmechanische Effekte die Grundlage der Zeitmessung seit nunmehr 65 Jahren sind, und in der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt

(PTB) seit nunmehr 50 Jahren mit der Atomuhr CS1 ein bedeutendes, im engen Sinne des Wortes, Maß-gebendes Quantennormal tickt. Bild 1 zeigt CS1 im Jahr 1969 in der Atomuhrenhalle des Kopfermann-Baus der PTB. In den PTB-Mitteilungen haben die damalig Verantwortlichen ihr Werk im selben Jahr vorgestellt [1] und auch die ersten „offiziellen“ Messwerte sind nachgewiesen. Was sich dahinter verbirgt wird später erklärt. Auf der 5. Sitzung des Beratenden Komitees für

* Dr. Andreas Bauch, Fachbereich „Zeit und Frequenz“, PTB, E-Mail: andreas.bauch@ptb.de



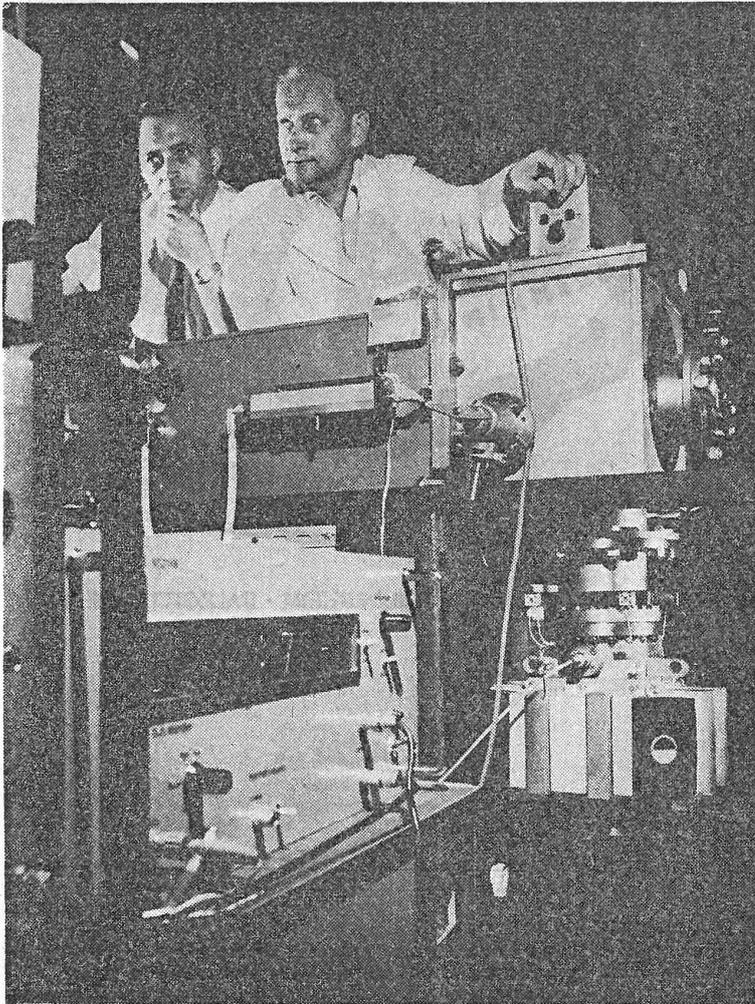
Bild 1:
Die primäre
Atomuhr CS1 in der
Atomuhrenhalle der
PTB (1969)

die Definition der Sekunde (CCDS) vom Juni 1970 berichtete Dr. Gerhard Becker von der PTB (übersetzt aus dem Französischen) „In der PTB ist seit Frühjahr 1969 ein Caesiumatomstrahl-Resonator, genannt CS1, als primäres Normal von Zeit und Frequenz in Betrieb. Seine relative innere Unsicherheit (*l'incertitude relative intrinsèque*) wurde mit $4,5 \cdot 10^{-13}$ abgeschätzt.“ In den Archiven der Stadt Braunschweig und der Braunschweiger Zeitung (BZ) findet man erstaunlicherweise erst im Jahr 1970 den ersten Hinweis auf CS1, der hier reproduziert wird (Bild 2). Dr. Engel-

Bild 2:
Beitrag aus der
Braunschweiger
Zeitung, 25.9.1970

In 100 000 Jahren nur um eine Sekunde „falsch“ 25.9.70

Genaueste Uhr der Welt steht in Braunschweig



In 100 000 Jahren wird diese gegenwärtig genaueste Uhr der Welt nur um eine Sekunde „falsch“ gehen. Es handelt sich um eine sogenannte Atomuhr, in der die Schwingungen von Cäsium-Atomen als Maß für den Ablauf der Zeit dienen. Die extreme Genauigkeit solcher Apparaturen war eine wichtige Voraussetzung dafür, daß die Sekunde als Zeiteinheit auf der Basis atomarer Schwingungen neu definiert werden konnte. Da die herkömmliche nach periodischen Vorgängen in der Astronomie festgelegte Sekunde nicht so exakt gemessen werden kann, legte man die Sekunde als jene Zeitspanne fest, in der 9 192 631 770 Cäsiumschwingungen ablaufen. — Unser Bild entstand im „Atomuhrenhaus“ der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig.

bert Müller (links) verfolgt die Handgriffe des Feinmechanikers Herbert Schneider. Die würfelförmige Vakuumkammer (rechter Bildrand, Mitte) beherbergt den Detektor für die Caesiumatome – und das tut sie heute noch. Im Folgenden versuche ich Antworten auf einige Fragen zu geben: In welchem Umfeld entstand diese Atomuhr CS1? Was war das Besondere an CS1? Welche Rolle spiel(t)en CS1 und andere sogenannte primäre Uhren bei der Realisierung der Internationalen Atomzeit? Ich fasse die Entwicklung bis zum heutigen Tag zusammen und schließe mit einem Ausblick.

Die Grundlagen der Atomuhr

Die Atomuhr ist keine Erfindung der PTB. Schon zwei Jahre vor der Inbetriebnahme von CS1 wurde 1967 die Sekunde im internationalen Einheitensystem mit Bezug auf die Hyperfeinstruktur-Übergangsfrequenz im Nuklid Caesium-133 definiert, basierend vornehmlich auf den Arbeiten des *National Physical Laboratory* (NPL, UK) und des *National Bureau of Standards* (NBS, US), die ausführlich im Heft 2/2017 der PTB-Mitteilungen in Beiträgen aus den genannten Instituten und des Autors dargestellt wurden. Hier folgt nun nur eine Kurzfassung.

Die Entwicklung der Caesiumatomuhr setzte zwingend die Erzeugung von Atomstrahlen im Vakuum und das Verständnis der Richtungsquantisierung, also der Ausrichtung magnetischer Momente von Atomen im Raum und die gezielte Veränderung dieser Ausrichtung voraus. Pionier in diesem Feld war Otto Stern, Professor an den Universitäten von Frankfurt und Hamburg (ab 1923) [2]. Das zusammen mit Walter Gerlach durchgeführte „Stern-Gerlach-Experiment“ begegnet praktisch jedem Physiker in der „Einführung in die Atomphysik“ [2]. Die Interpretation dieses Experiments ist noch heute nicht abgeschlossen, denn sie berührt die Grundfragen des physikalischen Messprozesses [3, 4]. Übereinstimmend wird aus dem Ergebnis des Experiments abgeleitet, dass das magnetische Moment μ eines Atoms in einem äußeren Magnetfeld nicht beliebige Orientierungen, sondern nur bestimmte Werte einnimmt. Die Kraft auf ein Atom mit magnetischem Moment μ in einem inhomogenen Magnetfeld nimmt dann ebenfalls diskrete Werte an. Im historischen Experiment beobachteten Stern und Gerlach die räumliche Aufspaltung eines Silber-Atomstrahls in zwei Teilstrahlen, nachdem dieser ein inhomogenes Magnetfeld zur Zustandsselektion durchquert hatte. Isidor Isaac Rabi, im heutigen Sprachgebrauch „Post-Doc“ in Sterns Institut in Hamburg, erweiterte den Messaufbau um einen Wechselwirkungsbereich, in dem eine elektromagnetische Welle auf die Atome eingestrahlt werden kann, und um einen zweiten Bereich der magne-

tischen Zustandsselektion, in dem der Einfluss dieser Strahlung auf die Atome nachgewiesen wird. Bereits im Jahr 1938 stimulierte er – zurück an der Columbia Universität – Quanten-Übergänge in diesem Wechselwirkungsbereich durch Radiofrequenzeinstrahlung, was erfordert, dass zwischen der Anregungsfrequenz f_p und den Energiewerten E_1 und E_2 der beteiligten Zustände die Beziehung $f_p = f_0 := (E_2 - E_1) / h$ gilt. Mit h wird die Planck-Konstante bezeichnet. Aus dem Jahr 1944 ist Rabis Idee dokumentiert, auf diese Weise eine hochgenaue Uhr zu bauen, und zwar unter Verwendung des Übergangs zwischen den Hyperfeinstruktur-niveaus des Grundzustands von Caesium-133 [5]. Eine Dekade später, 1955, tickte die erste Caesiumatomuhr am NPL. Die englischen Kollegen hatten sofort eine bahnbrechende Idee Norman Ramseys aufgegriffen, die ich später noch erläutere, die Methode der *separated oscillatory fields* [6, 7]: Sie ermöglicht erst die hochauflösende Resonanzspektroskopie im Atomstrahl.

Durch einen Vergleich der Atomuhr des NPL mit der astronomisch bestimmten Zeiteinheit, der Ephemeridensekunde, zwischen 1956 und 1958 wurde der Wert der atomaren Übergangsfrequenz bestimmt, der dann 1967 in den Text der Sekundendefinition übernommen wurde: „Die Sekunde ist das 9 192 631 770-fache der Periodendauer der dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstruktur-niveaus des Grundzustandes von Atomen des Nuklids ^{133}Cs entsprechenden Strahlung“. Die Arbeiten am NPL erfolgten gleichzeitig mit denen der Kollegen am NBS, die zwar früher begonnen hatten, ihre Uhr NBS-I aber erst 1958 in Betrieb nehmen konnten [5]. Schon im Jahr 1958 kam auch die erste kommerzielle Caesiumatomuhr, das Atomichron® [8], auf dem Markt. Die PTB kaufte Anfang der 1960er-Jahre eines, um die Gänge der Quarzuhren in Braunschweig und am Sender DCF77 in Mainflingen zu kontrollieren [9]. Sein „Innenleben“ hängt zur Anschauung in einem Flur des Kopfermann-Baus der PTB und ist in Bild 3 zu sehen. Bis heute werden Uhren mit im Prinzip unverändertem Konstruktionsprinzip, allerdings wesentlich kompakter, hergestellt. Mitte der 1960er-Jahre übernahm die Firma Hewlett-Packard (HP) die führende Rolle in der Atomuhrenproduktion [10]. Anfang der 1970 Jahre wurde beispielsweise an der PTB mit einem Ensemble von 3 HP-Uhren eine Atomzeitskala TA(PTB) generiert. Warum sollte die PTB also selbst in die Entwicklung von Atomuhren einsteigen?

Primäre Atomuhren und das Besondere an CS1

An dieser Stelle erscheint es zunächst notwendig, den Begriff „primäres Frequenznormal“ bzw. „primäre Uhr“ zu erklären. Die Definition der

Sekunde (s. o.) bezieht sich auf die ungestörte Hyperfeinstruktur-Übergangsfrequenz des ^{133}Cs . Eine Darstellung unter solch idealisierten Bedingungen kann in der Realität nur mit einiger Unsicherheit erreicht werden. Nach den Pionierarbeiten von NPL und NBS haben einige wenige andere Nationale Metrologieinstitute (NMIs) sogenannte Primärfrequenznormale entwickelt und gebaut, um die Störungen der Atome und die mit dem Design und dem Betrieb verbundenen Frequenzverschiebungen zu verstehen, zu minimieren und quantitativ zu charakterisieren.



Bild 3:
Strahlrohr des Atomichrons der PTB. Einige Elemente sind farbig markiert, so die magnetische Abschirmung (gelb), der Detektor (blau) und die Ablenkmagnete (grün). Die Abschirmung ist aufgeschnitten und so sieht man die beiden Endstücke des Ramsey-Resonators (hell-grün). Der Atomstrahl verläuft teilweise in einem dünnen Metallrohr (rosa).

Korrekturen werden danach so vorgenommen, dass die Ausgangsfrequenz (1 Hz und Normalfrequenzen) mit dem Sollwert mit der kleinstmöglichen Unsicherheit übereinstimmt. Die relative Unsicherheit wurde für die erste Uhr vom NPL im Jahr 1955 zu etwa 10^{-10} abgeschätzt, sie lag, wie oben bereits erwähnt, für CS1 im Jahr 1970 bei $4,5 \cdot 10^{-13}$ und liegt 2019 für die besten primären Uhren etwas höher als $1 \cdot 10^{-16}$. „Primär“ heißt hier also: mit vollständiger Unsicherheitsabschätzung, wohingegen für kommerzielle Geräte nur eine summarische Angabe zu einer spezifizierten Genauigkeit ohne nähere Begründung angegeben wird.

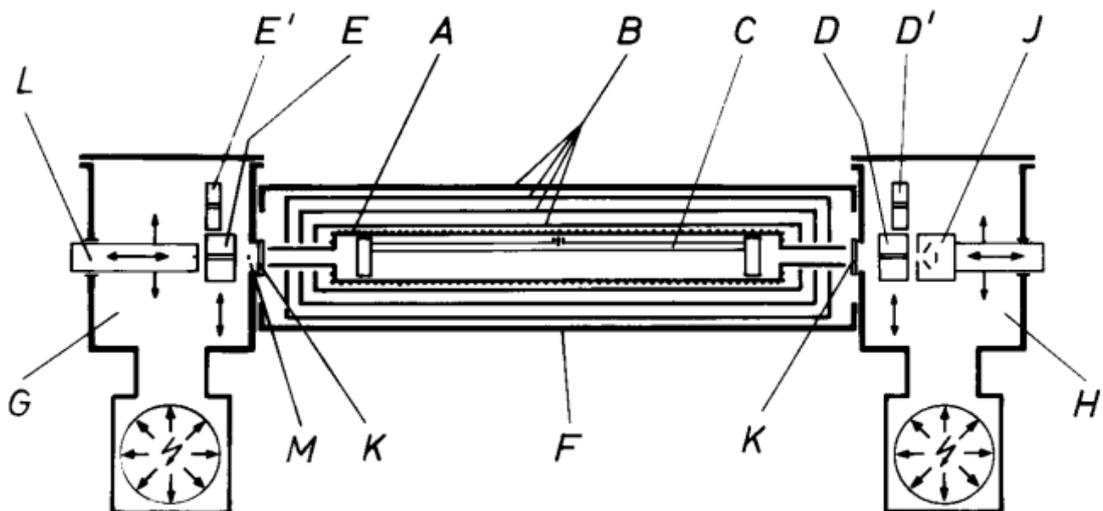
Mitte der 1960er-Jahre begann in der PTB die Entwicklung einer eigenen Caesiumatomuhr, vermutlich auch motiviert durch die früheren Pionierarbeiten auf dem Gebiet der Quarzuhren in der Reichsanstalt in den 1930er Jahren [9]. Im „Bericht über die Tätigkeiten der PTB im Jahr 1958“ berichteten zwei Kollegen, W. Schaffeld und H. Bayer, über den „Aufbau eines Cs-Resonators für genaue Zeitmessung“. Danach bestand das Vakuumgefäß, in dem der Atomstrahl fliegen sollte, aus einer 4 m langen Glasröhre mit 11 mm Innendurchmesser, die Magnete A und B zur Zustandsselektion waren Elektromagnete, und der Ramsey-Resonator hatte eine Ausdehnung von 1,1 m. Damit erwartete man eine Linienbreite von ca. 120 Hz. Leider verlieren sich damit alle weiteren Spuren dieses Projekts. Unter der Leitung von Gerhard Becker entstand nachfolgend die Uhr CS1, in der man neue Ideen von Holloway und Lacey von der Firma Varian umsetzte [11]. Im Vergleich zu den damals existierenden Primärnormalen und auch den kommerziellen Uhren ergab sich eine signifikant andere Konstruktion, die in Bild 4 dargestellt ist. Als wesentliche Vorteile wurden erachtet:

- eine Erhöhung des atomaren Flusses (und damit reduzierte Frequenzinstabilität) durch zweidimensionale Fokussierung der Atome mit magnetischen Linsen (anstelle der bisher verwendeten Dipolmagnete);
- die axialsymmetrische Geometrie des Atomstrahls mit geringer radialer Ausdehnung und
- die verbesserte Homogenität des Magnetfeldes im Wechselwirkungsbereich, C-Feld genannt, durch die Verwendung einer langen zylindrischen Spule und einer zylindrischen Abschirmung – anstelle eines Magnetfeldes quer zur Strahlrichtung.

In Bild 4 ist auch der oben erwähnte „Ramsey-Resonator“ bezeichnet, in dem das Hochfrequenzfeld zu zwei Bestrahlungsstrecken an den beiden Enden geführt wird. Die Atome (Geschwindigkeit v) werden dann durch eine Bestrahlung über die Länge von ca. 2 cm im ersten Arm des Resonators in einen kohärenten Superpositionszustand gebracht und nach der freien Driftstrecke der Länge L im zweiten Resonator-Arm erneut mit dem Hochfrequenzfeld bestrahlt. Die beobachtete Resonanz der Übergangswahrscheinlichkeit hat dann die spektrale Breite $W \approx v / (2 L)$.

Zwei Paare von Magneten, „kurz“ und „lang“ zur Zustandsselektion sind in Bild 4 angedeutet. Alternierender Betrieb mit kurzen bzw. langen Magneten und den daraus resultierenden verschiedenen mittleren Geschwindigkeiten der Atome war viele Jahre Praxis, um auf „ungestörte“ Atome mit der Geschwindigkeit Null zu extrapolieren. Warum das? Es ist unmöglich, einen Mikrowellenresonator zu fertigen, in dem die Bestrahlungsfelder an den beiden Enden exakt in Phase sind. Eine Phasendif-

Bild 4:
Konstruktionsprinzip von CS1 [1];
A: C-Feld Spule,
B: magnetische Abschirmung,
C: Ramsey-Resonator,
D, D' und E, E': kurze bzw. lange Magnete zur Zustandsselektion,
F: äußere Hülle aus Weicheisen,
G und H: Vakuumkammern,
J: Detektor,
K: Ventile zur Trennung des Mittelteils von den beiden Sektionen G und H,
L: Caesiumofen,
M: Zentralscheibe. Die Pfeile zeigen die Freiheitsgrade der Justierung der verschiedenen Elemente des Atomstrahlensystems an.



ferenz führt zu einer Abweichung der realisierten Mitte der Resonanzlinie, die zur Geschwindigkeit v proportional ist und die man korrigieren muss. Gegen Ende der 1970er-Jahre wurden in CS1 neue Magnete eingebaut und die Praxis des „Strahlwechsels“ eingeführt: Zwei- bis dreimal jährlich wird seitdem die Lage von Ofen- und Detektorkammer getauscht, sodass die Atome eine Zeit lang die Geschwindigkeit v , anschließend $-v$ haben, und so auf das Ergebnis bei $v = 0$ geschlossen werden kann. Vor einigen Jahren habe ich die als Bild 5 gezeigten Resonanzkurven aufgezeichnet, und ich hoffe der Leser findet sie so ästhetisch wie ich. Hierzu wird die Anregungsfrequenz f_p um die Frequenz des Uhrenübergangs f_0 herum variiert. Nach der ersten Zustandsselektion enthält der Atomstrahl Atome mit dem Gesamtdrehimpuls $F = 4$, und den Werten der magnetischen Quantenzahl $m_F = -3, -2, \dots +4$. Die Anregung erfolgt in die Zustände $F = 3, m_F = -3, -2, \dots +3$ mit der Auswahlregel $\Delta F = 1, \Delta m_F = 0$. Man beobachtet also 7 Resonanzlinien, von denen die mittlere ($m_F = 0$, ohne linearen Zeemaneffekt) unten mit höherer Auflösung dargestellt ist. Der Frequenzabstand benachbarter Linien ist proportional zum mittleren Magnetfeld längs des Resonators. Beträgt, wie bei CS1, dieser Abstand ca. 58 kHz, so ist die Resonanzmitte des $m_F = 0$ -Übergangs (Linienbreite 65 Hz) durch den quadratischen Zeemaneffekt um ca. 2,92 Hz höher als der ungestörte Wert von 9 192 631 770 Hz. Eine entsprechende Korrektur muss also bestimmt und angebracht werden, um die SI-Sekunde zu realisieren.

Primäre Uhren und die Realisierung der Internationalen Atomzeit

Die ersten Atomuhren entstanden in einer Zeit, als die Festlegung und Realisierung der Einheit im Beratenden Komitee für die Definition der Sekunde (CCDS) diskutiert wurde, die Organisation von Zeitvergleichen und die Realisierung der Internationalen Atomzeit aber in den Händen der Astronomen lag. So finden wir alle Messwerte aus der Frühzeit von CS1 in den *Rapports Annuel* des *Bureau International de l'Heure*, i. F. abgekürzt als BIH-RA [12]. Mit dem 1. Januar 1988 wurde das BIH aufgelöst, und die Sektion „Zeit“ am *Bureau International des Poids et Mesures* (BIPM) begann ihre Arbeit. Erst weitere 10 Jahre später wurde auch der Name des beratenden Komitees in „... *du temps et fréquence*“ (CCTF) geändert. Etwa um 1970 realisierten sechs Institute Atomzeitskalen, darunter die PTB, die damals über zunächst drei, später sechs kommerzielle (HP-)Caesiumatomuhren verfügte. Die Gesamtzahl der damals beitragenden Atomuhren lag bei 50. Die Atomzeit der PTB, TA(PTB), entstand durch Mittelung über die

verfügbaren kommerziellen Uhren, und als man CS1 in Betrieb nahm stellte man fest: Die Sekunden von CS1 sind ca. 10^{-12} s länger als die von TA(PTB). Vergleiche zwischen den Zeitskalen der weltweit verteilten Institute über Längstwellen erforderten sehr lange Mittelungszeiten, aber man konnte dennoch bald nachweisen und im Jahresbericht der PTB für 1972 publizieren: Gegenüber allen Zeitskalen, die auf kommerziellen Uhren beruhen, gibt es eine Abweichung in dieser Größenordnung und zu allem Überfluss ändert sie sich auch noch signifikant. Besser war die Lage im Bezug auf die Skalen des *National Bureau of Standard* (NBS) und des kanadischen *National Research Council* (NRC), die ihre Zeitskalen bereits mittels ihrer Primärnormale steuerten. Die Erbauer aller Primärnormale waren sich aber darin einig, dass ihre Uhren im Rahmen der jeweils angegebenen Unsicherheit richtig gehen, folglich den kommerziellen Uhren ein Makel anhaftet. Es ist legendär, mit welcher Hartnäckigkeit Gerhard Becker in dieser Sache seinen Standpunkt vertrat.

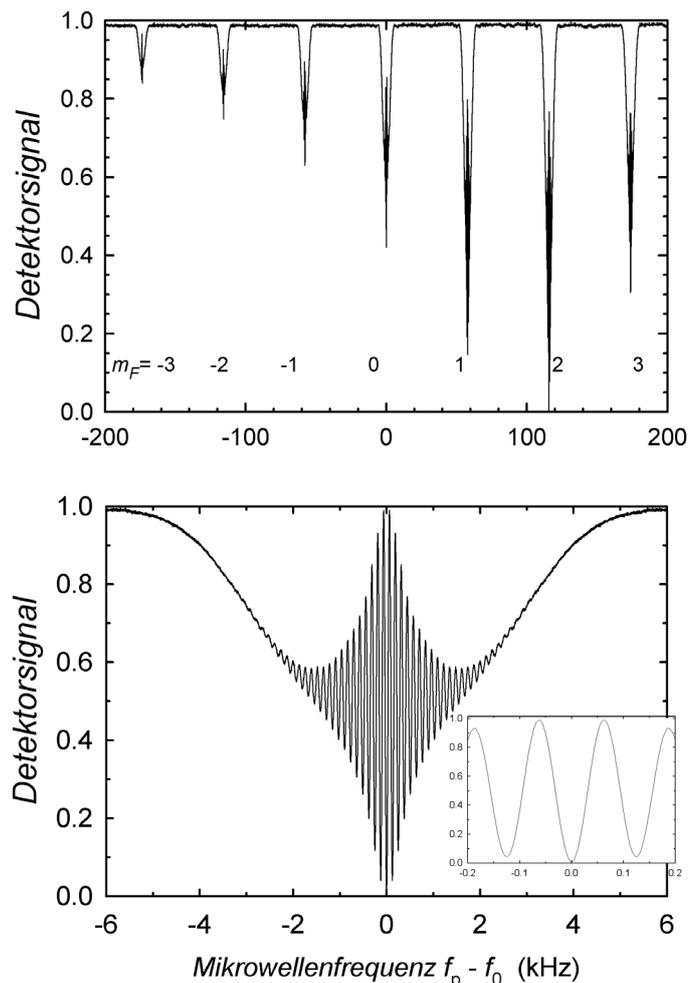


Bild 5:
Resonanzkurven CS1: Detektorsignal (rel. Einheiten) als Funktion der Verstimmung der anregenden Mikrowellenfrequenz f_p von der Resonanzmitte des $m_F = 0$ -Übergangs.

Das BIH gewann zunächst durch das gewichtete Mittel der TA(k) Skalen die Internationale Atomzeit TAI, ab 1973 dann durch Mittelung über Messwerte individueller Uhren in den beitragenden Instituten. Diese Praxis gilt bis heute. Im BIH-RA 1975 findet man erstmals die Messwerte der individuellen primären Uhren mit Bezug auf TAI. CS1 betreffend findet man in aufeinanderfolgenden Berichten aus mir nicht verständlichen Gründen nur bedingt übereinstimmende Eintragungen. Im BIH-RA 1978 finden wir den Beginn des ersten Intervalls, für das CS1-Werte gemeldet wurden, als den Tag mit dem modifizierten Julianischen Datum 40283, entsprechend dem 03. März 1969. In PTB-Publikationen und einem internen Laborbericht werden diese frühen Messkampagnen nicht erwähnt, hier beginnt die Zeitrechnung nach CS1 erst im Oktober des Jahres [13]. In den Folgejahren wurde CS1 während sogenannter Messkampagnen für einige Wochen oder auch Monate betrieben, unterbrochen von Perioden für Umbauten, Experimente, und wiederholte Abschätzung der Unsicherheit. Erst seit September 1978 wird CS1 praktisch kontinuierlich betrieben und realisiert eine eigene Zeitskala, ist also erst im eigentlichen Sinn eine „Uhr“. Im BIH-RA 1978 findet man den ersten sechzig-tägigen Mittelwert des Gangs von CS1 mit Bezug auf TAI, mit der bis heute geläufigen Kennung „PTB 92 1“ (92 = Primärnormal, 1 = CS1) beginnend mit dem 29.08.1978.

Zum 1. Januar 1977 wurde das Skalenmaß von TAI um eben diese 10^{-12} s verlängert, angepasst an die vorliegenden Ergebnisse von Primärnormalen. Ab April dieses Jahres begann dann in zwei-Monats Schritten die „Steuerung“ von TAI gemäß den mehr oder weniger regelmäßig eingehenden Messwerten primärer Uhren. Bis zum heutigen Tag war deren Zahl während eines Jahres nie größer als zehn, meist geringer als fünf, gegen Ende 1996 war sie eins. CS2 der PTB war übrig geblieben während CS1 etliche Monate stillstand und modernisiert wurde. Inzwischen hat sich die Situation verbessert, etliche Institute sind in den Wettlauf um die genaueste Fontänenuhr eingetreten (s. u.).

Bleibe noch das Rätsel zu lösen, warum eine große Gruppe kommerzieller Atomuhren im Mittel mit gleichem Vorzeichen „falsch geht“. In metrologisch korrekter Sprache lautet die Frage: Welcher systematisch Frequenz-verschiebende Effekt in der Caesiumatomuhr war zu dem Zeitpunkt nicht bekannt oder verstanden? Die Antwort soll mit Hilfe von Bild 5 gegeben werden. Praktisch alle kommerziellen Uhren stammten von einem Hersteller und hatten sehr ähnliche Konstruktionsmerkmale und Betriebsparameter. Das mittlere Magnetfeld war so klein gewählt, dass die Ausläufer der beiden dem $m_F = 0$ -Übergang benachbarten Übergänge zu einem schiefen Untergrund führten, der zu einer „winzigen“ Verschiebung der registrierten $m_F = 0$ -Linienmitte führte, um ca. 0.01 Hz, im Vergleich zu den ca. 300 Hz breiten Resonanzlinien in kommerziellen Uhren – und eben für die meisten Exemplare mit gleichem Vorzeichen. Aufgeklärt wurde dieser Sachverhalt erst 1984 [14]. An der PTB haben wir danach entsprechende Experimente gemacht und nachgewiesen, dass der Effekt in CS1 und CS2 gegenüber anderen systematischen Effekten vernachlässigbar ist [15].

Wie ging es weiter bis heute?

Wie ging es weiter bis heute?

Bis 1992 waren die Sekunden von CS1 die Grundlage der gesetzlichen Zeit für Deutschland, dann wurde CS1 durch die modernere, stabilere und genauere Uhr CS2 – nach gleichem Funktionsprinzip gebaut – abgelöst. Allerdings sind bei CS2 an beiden Enden des Vakuumsystems sowohl je ein Atomstrahlrohr und ein Detektor auf Verschiebebühnen installiert, sodass der Strahlwechsel ohne Öffnung des Vakuumsystems durchgeführt werden kann. Eine grundlegende Renovierung des Vakuumsystems von CS1, verbunden mit einer 15-monatigen Unterbrechung des Betriebs, erfolgte nach Mai 1995. Aktuell werden CS1 und CS2 dauerhaft betrieben [16]. Von Anfang bis Ende des Jahres 2018 änderte sich die Standdifferenz zwischen beiden Uhren um 120,5 ns, was einer mittleren relativen Frequenzdifferenz von $4 \cdot 10^{-15}$ entspricht. Dabei tickte CS1 etwas schneller. Noch immer kann man kein Frequenznormal kaufen, welches in der Genauigkeit mit diesen beiden Alten konkurrieren kann. Genauere Primärnormale gibt es inzwischen allerdings in etlichen NMIs, und so sind CS1 und CS2 die letzten Vertreter dieser Uhrgeneration, die weltweit noch in Betrieb sind. Denn ein wirklicher Quantensprung in der Atomuhren-Entwicklung geschah mit der Nutzung der Laser-Kühlung in den sog. Caesium-Fontänenuhren [17]. Statt eines Atomstrahls mit einer mittleren Geschwindigkeit von 100 m/s und einer thermischen Geschwindigkeitsverteilung der Atome nutzt man auf 1–2 μ K gekühlte Atomwolken mit wohldefinierter kleiner Geschwindigkeit, erreicht eine Wechselwirkungszeit von ca. 0,5 s, damit 1 Hz Linienbreite und unterdrückt alle Geschwindigkeits-abhängigen Frequenzverschiebungen. Die Unsicherheit der ersten PTB-Fontäne, CSF1, wurde im Jahr 2000 mit $2 \cdot 10^{-15}$ abgeschätzt, aktuell gehört CSF2 mit einem Wert von $1,7 \cdot 10^{-16}$ zu den genauesten Primärnormalen der Welt [18]. Seit 2010 wird die Zeitskala der PTB von CSF1 und CSF2 abgeleitet. Als „Rückfalloption“ erzeugen wir allerdings immer noch eine (wenn auch nicht wirklich konkurrenzfähig stabile) Zeitskala, die auf den Gängen der alten Uhren beruht.

An dieser Stelle möchte ich betonen, dass die jeweils erreichte Genauigkeit der Primärfrequenznormale einen unmittelbaren Nutzen für die Wissenschaft (Zeit- und Frequenzcommunity und

die Gesellschaft im Allgemeinen brachte und noch immer bringt. TAI ist als eine kontinuierliche Zeitskala definiert, die vom BIPM auf der Grundlage der besten Realisierungen der SI-Sekunde erstellt wird. Darauf aufbauend ist die *Coordinated Universal Time* (UTC) eine vom BIPM publizierte Zeitskala mit der gleichen Zeiteinheit wie TAI, die sich nur im Stand um eine ganze Anzahl von Sekunden von TAI unterscheidet [19, 20]. Zweierlei lässt sich diesen Referenzen entnehmen: Das Skalenmaß von TAI wird sanft auf die SI-Sekunde geregelt, wie sie durch Primärfrequenznormale realisiert wird. Deren Ergebnisse sind korrigiert, als ob jedes auf Meereshöhe, genauer auf einer Oberfläche mit gleichem Gravitationspotential, betrieben würde, früher bekannt als das rotierende Geoid. Andererseits wurde UTC als Zeitbezug in der Wissenschaft und für zivile Anwendungen empfohlen. Der Vergleich von lokalen Zeitskalen mit UTC ermöglicht den Zugang zur extremen Genauigkeit der UTC-Skaleneinheit für weltweit etwa 80 NMIs und wissenschaftliche Institute, die mit dem BIPM zusammenarbeiten. Ein solches Institut „k“ wiederum realisiert eine lokale Zeitskala UTC(k), die dann als Grundlage für die Verbreitung der gesetzlichen Zeit und der Standardfrequenz in seinem jeweiligen Land dient.

Ausblick

Es ist nur eine Frage der Zeit, wann CS1 demonstriert wird und hoffentlich einen angemessenen Platz in einem renommierten Museum findet. Aktuell ist die Atomuhrenhalle der PTB jedoch ein inspirierender Ort: Es ticken hier die älteste funktionsfähige Atomuhr der Welt, die genaueste primäre Uhr Deutschlands und – vielleicht in 2020 – die genaueste mobile optische Uhr, die OptiClock [21]. Hoffentlich kommt bei dieser Vielfalt keine aus dem Takt.

Danksagung

Eine Vielzahl von Kollegen hat mit CS1 im Laufe der 50 Jahre Freud und Leid geteilt. Nach der ersten Generation der Wissenschaftler, Gerhard Becker, Bernd Fischer, Günter Kramer und Engelbert Müller, folgten viele, die ich hier nicht aufzählen kann. Die aktuell betriebene Generation Elektronik zur Erzeugung des Mikrowellensignals und der Signalverarbeitung stammt von Roland Schröder, mit dem wir weiterhin in gutem Kontakt stehen. Der große Umbau Mitte der 1990er-Jahre erfolgte unter der Leitung von Thomas Heindorff und war die letzte große Arbeit des Mechanikers Harald Brand vor dessen Eintritt in den Ruhestand. Er verfolgt weiterhin begeistert, dass CS1 und CS2 heute noch ticken. Den genannten und ungenannten Kollegen verdankt die PTB viel.

Literatur

- [1] G. Becker, B. Fischer, G. Kramer, E. K. Müller, „Neuentwicklung einer Cesiumstrahlapparatur als primäres Zeit- und Frequenznormal an der PTB“, PTB-Mitteilungen 69 (1969), S. 77–80.
- [2] H. Schmidt-Böcking, K. Reich, „Otto Stern, Physiker, Querdenker, Nobelpreisträger“, Biographienreihe der Goethe-Universität Frankfurt, Societäts-Verlag, 2011.
- [3] H. Schmidt-Böcking, L. Schmidt, H. J. Lüdde, W. Trageser, A. Templeton, T. Sauer, „The Stern Gerlach experiment revisited“, *The European Physical Journal H* 41 (2016), S. 327–364.
- [4] T. Sauer, „Multiple perspectives on the Stern-Gerlach experiment“, in: T. Sauer und R. Scholl, Ed., „The Philosophy of historical case studies“, S. 251–263, Springer-Verlag 2016.
- [5] R. E. Beehler, „A historical review of atomic frequency standards“, NBS Monograph 140 Chapter 4, Boulder (1974).
- [6] N. F. Ramsey, „A molecular beam resonance method with separated oscillatory fields“, *Phys. Rev.* 73 (1950), S. 695–698.
- [7] N. F. Ramsey, „Molecular Beams“, London, New York, Oxford University Press (1956)
- [8] P. Forman, „Atomichron®: the atomic clock from concept to commercial product“, *Proc. IEEE* 73, S. 1181–1204 (1985).
- [9] A. Bauch, „Zeitmessung in der PTB“, PTB-Mitteilungen 122 (2012), Heft 1, S. 23–36.
- [10] L. Cutler, „Fifty years of commercial caesium clocks“, *Metrologia* 42 (2005), S. 90–99.
- [11] J. H. Holloway, R. F. Lacey, „Factors which limit the accuracy of cesium atomic beam frequency standards“, *Proc. Intern. Conf. Chronometry (CIC 64)* (1964), S. 317–331.
- [12] B. Guinot, „History of the Bureau International de l’Heure“, in *Polar Motion: Historical and Scientific Problems*, ASP Conference Series, Vol. 208, 2000, S. Dick, D. McCarthy and B. Luzum, Hrsg., S. 175–184.
- [13] G. Becker, „Frequenzvergleiche mit dem primären Zeit- und Frequenznormal CS1 der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt zwischen 1969 und 1973“, PTB-Mitteilungen 5 (1973), S. 319–326.
- [14] A. De Marchi, G. D. Rovera, A. Premoli, „Pulling by neighbouring transitions and its effects on the performance of caesium-beam frequency standards“, *Metrologia* 20 (1984), S. 37–47.
- [15] A. Bauch, K. Dorenwendt, T. Heindorff, „The PTB’s atomic frequency standards CS2 and CSX: frequency shifts by pulling due to neighbouring transitions“, *Metrologia* 24 (1987), S. 199–203.
- [16] A. Bauch, „The PTB primary clocks CS1 and CS2“, *Metrologia* 42 (2005), S. 43–54.
- [17] R. Wynands and S. Weyers, „Atomic fountain clocks“, *Metrologia* 42 (2005), S. 64–79.

- [18] S. Weyers, V. Gerginov, M. Kazda, J. Rahm, B. Lipphardt, G. Dobrev, K. Gibble, „Advances in the accuracy, stability, and reliability of the PTB primary fountain clocks“, Metrologia 55 (2018), S. 789–805.
- [19] Resolution Nr. 2 der 26. Conference General de Poids et Mesures, Versailles, Nov. 2018, URL : <https://www.bipm.org/en/cgpm-2018/download=ct.2019>.
- [20] G. Panfilo, F. Arias, „The coordinated Universal Time (UTC)“, Metrologia 56 (2019) 042001
- [21] URL: www.opticlock.de.

PTB-Zeit in HTML5

Martin Gutbrod¹, Andreas Bauch², Dieter Sibold³,
Tobias Klein⁴, Dirk Piester⁵

I. Einleitung

Der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) wurde mit dem Zeitgesetz von 1978 die Aufgabe übertragen, die für das öffentliche Leben in Deutschland maßgebende Uhrzeit darzustellen und zu verbreiten (siehe die aktuelle Version von 2008 [1]). Dies sind die mitteleuropäische Zeit oder die mitteleuropäische Sommerzeit (MEZ oder MESZ), welche durch Addition von einer bzw. zwei Stunden zur Realisierung der koordinierten Weltzeit UTC (engl. *Coordinated Universal Time*) in der PTB, genannt UTC(PTB) generiert wird. Die Eigenschaften von UTC(PTB) wurden zuletzt in [2] diskutiert.

Seit vielen Jahren nimmt die Bedeutung des Internets bzw. des *World Wide Web* (WWW, Web) stetig zu. Damit geht die Erwartung vieler Menschen einher, alle für sie relevanten Informationen im Web zu finden. Der Browser und seine unterstützenden Technologien entwickeln sich zum universellen Instrument auf dem Weg in die Wissensgesellschaft. Daher liegt es nahe, die Fähigkeiten aktueller Browser zu nutzen, um eine genaue Uhr auf nahezu jedem internetfähigen Endgerät darstellen zu können.

Nach der Einleitung werden in Kapitel II die Anforderungen definiert, in Kapitel III die Funktionsweise erklärt, danach in Kapitel IV Vergleichsmessungen dargestellt und anschließend in Kapitel V Einschränkungen der PTB-Lösung beschrieben. Der Aufsatz schließt ab mit einer Zusammenfassung in Kapitel VI.

Im folgenden Abschnitt wird zuerst auf die aktuellen, nicht webbasierten Verfahren zur Verbreitung der Zeit eingegangen. Anschließend werden bestehende, webbasierte Verfahren vorgestellt.

A. Etablierte Arten der Zeitverbreitung

1. DCF77

In Mainflingen bei Frankfurt am Main werden im Auftrag der PTB über einen Langwellensender der Media Broadcast GmbH Zeit- und Datuminformationen ausgesendet. Der Sender hat den Namen DCF77. Pro Sekunde wird damit eine digitale Informationseinheit übertragen. Nach einer Minute liegt die gesamte Datenmenge mit Informationen über die Folgeminute beim Empfänger vor und die Übertragung beginnt von neuem.

Entsprechende Funkuhren können damit innerhalb eines Umkreises von 1000 km bis 2000 km je nach Bauart und Umgebung mit der aktuellen, in Deutschland geltenden gesetzlichen Uhrzeit versorgt werden. Steht ein Sommerzeitwechsel oder eine Schaltsekunde an, wird dies eine Stunde zuvor einmal pro Minute in der Übertragung angekündigt. Wie im Namen des Senders angedeutet, hat das Trägersignal eine Frequenz von 77,5 kHz. Die Phase der Trägerschwingung wird kontinuierlich im Bereich $\pm 0,3 \mu\text{s}$ in Übereinstimmung zu UTC(PTB) gebracht, wodurch das Trägersignal zusätzlich als Referenzfrequenz in Mess- und Kalibrierungseinrichtungen benutzt werden kann. Dieser Dienst wurde vor ca. 60 Jahren geschaffen, um DCF77 nutzen zu können. Die kodierte Zeitinformation wird seit circa 1975 übertragen [3].

2. Telefonmodem

Die funkbasierte Zeitverteilung setzt keine Kommunikation vom Nutzer zum Sender voraus. Dies unterscheidet sie von anderen gängigen Verfahren. Bei der Zeitverteilung über das öffentliche Telefonnetz erfolgt ein Verbindungsaufbau über ein Modem nach dem Standard CCITT V.22. Ausgesendet wird der Europäische Telefonzeitcode [4].

¹ Dr. Martin Gutbrod, Gruppe Q.4 „Informationstechnologie“, PTB, E-Mail: martin.gutbrod@ptb.de

² Dr. Andreas Bauch, Arbeitsgruppe 4.42 „Zeitübertragung“, PTB, E-Mail: andreas.bauch@ptb.de

³ Dr. Dieter Sibold, Referat Q.42 „Zeitverteilung mittels IP“, PTB, E-Mail: dieter.sibold@ptb.de

⁴ Dr. Tobias Klein, Arbeitsgruppe 5.24 „Elektronenmikroskopie“, PTB, E-Mail: tobias.klein@ptb.de

⁵ Dr. Dirk Piester, Arbeitsgruppe 4.42 „Zeitübertragung“, PTB, E-Mail: dirk.piester@ptb.de

Dieser besteht aus einer Folge von 80 ASCII-Zeichen, die Zeit, Datum sowie Ankündigungen von Sommerzeitwechsel und Schaltsekunden kodieren. Die letzten zwei Zeichen der Folge sind die ASCII-Zeichen 13 und 10 (*Carriage Return* und *Line Feed*). Werden diese empfangen, kann durch Übergang vom Stopp- zum Startbit der beiden Zeichen der genaue Sekundenwechsel bestimmt werden. Zum Ausgleich der Laufzeit kann der Empfänger die Zeichenfolge an den Sender zurücksenden. Geschieht das, so misst dieser die Schleifenlaufzeit und sendet das nächste Sekundensignal um die Hälfte der Laufzeit früher los. So sind 79 Zeichen mit der Information zur laufenden Sekunde beim Empfänger vorhanden, bevor die Sekunde durch Empfang des ASCII-Zeichen 10 tatsächlich anbricht. Mit dieser Technik ist eine Genauigkeit von wenigen Millisekunden erreichbar, sie wird allerdings nur in wenigen Fällen genutzt. Die PTB passt ihren Telefonzeitdienst gegenwärtig an die IP-basierte Telefonie an.

3. NTP

NTP (*Network Time Protocol*) [5] ist ein Protokoll und Verfahren zur Zeitsynchronisation zwischen zwei IT-Systemen und hat keine unmittelbare Visualisierungsfunktion. Als Grundlage der Kommunikation wird das verbindungslose Internet-Transportprotokoll UDP (*User Datagram Protocol*) verwendet. Hierbei wird der UDP-Port 123 genutzt, welcher in etwaigen Firewalls freigeschaltet werden muss. NTP ist ein hierarchisch aufgebautes Protokoll. Ein Zeitserver auf Schicht N (NTP spricht von Stratum N) gibt seine Zeit an einen Zeitserver auf Stratum N+1 weiter, wobei $1 \leq N < 16$ gilt. Ein Zeitserver mit dem Stratum-Wert 1 wird häufig primärer Zeitserver genannt; er bezieht seine Zeitinformation von einer Referenzuhr z. B. einer Atomuhr. NTP-Server, die wiederum davon die Zeit beziehen, werden als Stratum 2 bezeichnet und so weiter. NTP wird von allen modernen Betriebssystemen unterstützt und als Standardprotokoll zum Stellen der Betriebssystemzeit verwendet. Für eine möglichst genaue und sichere Systemzeit sollten mehrere NTP-Server verwendet werden [6]. Um die Uhr über längere Zeitintervalle ohne Serverabfragen so genau wie möglich zu halten, passen NTP-Implementierungen die Phase und Frequenz des lokalen Zeitgebers an.

Als Beispiel einer durchdachten Implementierung sei das Programm `ntpd` unter Linux genannt: Dieses nutzt ein oder mehrere Zeitsignale, um die Abweichung der Systemzeit zu berechnen. Wenn diese nicht zu groß ist, wird der interne Zeitgeber langsam angeglichen, um Zeitsprünge zu vermeiden. NTP verfügt über keine dem Stand der Technik entsprechenden Maßnahmen zur adäqua-

ten Sicherstellung der Integrität und Authentizität der erhaltenen Zeitinformationen [7]. Abhilfe soll ein neues Verfahren schaffen, das aktuell unter dem Namen *Network Time Security* (NTS) unter Mitwirkung der PTB standardisiert wird [8]. Werden die komplexen Verfahren von NTP zur Zeitkorrektur auf dem Client nicht benötigt, kann das *Simple Network Time Protocol* (SNTP) verwendet werden. Es dient nur der einfachen Zeitabfrage und soll nur auf Systemen verwendet werden, die nicht gleichzeitig SNTP-Client und -Server sind.

4. Weitere Verfahren:

Daneben existieren noch weitere Verfahren und Protokolle zur Zeitverbreitung und Zeitsynchronisation wie das in IEEE 1588 spezifizierte *Precision Time Protocol* (PTP), *White Rabbit* [9] oder IRIG-B, die hier aus Platzgründen nicht diskutiert werden. Ausführlich wird in [10] über die Zeitdienste der PTB berichtet.

B. Webbasierte Verfahren

Die drei gängigsten webbasierten Verfahren beruhen auf Java, Flash oder reinem HTML und werden nachfolgend kurz vorgestellt.

1. Java-Applet

Bisher kamen zur Web-Darstellung der offiziellen Uhrzeit im Browser überwiegend Java-basierte Applets zum Einsatz [11, 12]. Diese implementierten entweder direkt das NTP-Protokoll oder kommunizierten über spezielle IP-Ports per TCP (*Transmission Control Protocol*) oder UDP mit einem speziellen Server, der nahe an einem Stratum-1-Zeitserver angesiedelt ist. In heute stark zerklüfteten Netzumgebungen mit Subnetzen hinter NAT-Gateways, Firewalls oder Proxies können Kommunikationsverbindungen, die jenseits der TCP-Standardports (80 für unverschlüsselten beziehungsweise 433 für verschlüsselten Web-Verkehr) liegen [13], jedoch oft nicht aufgebaut werden. Falls Applets spezielle sicherheitskritische Einstellungen nutzen wollen, etwa spezielle Ports, ist eine aufwendige digitale Signierung der Applets nötig. In den letzten Jahren werden Applets im Browser immer häufiger aus Sicherheitsgründen komplett deaktiviert und können in solchen Fällen nicht mehr zur Zeitdarstellung genutzt werden. Mittlerweile hat der Hersteller Oracle ein Ende der Technologie angekündigt [14].

2. Flash

Bei Flash-basierten Verfahren bestehen grundsätzlich die gleichen Unzulänglichkeiten wie bei Java-Applets. Zwar wird Flash in deutlich mehr

Browsern unterstützt, unter mobilen Apple-Betriebssystemen ist Flash jedoch deaktiviert und Anwendungen sind nicht aufrufbar. Nicht zuletzt deshalb wird auch Flash mehr und mehr durch Programme auf HTML5-Basis ersetzt. Genau wie Oracle bei Java-Applets, hat Adobe das Ende des Supports dieser Technologie im Jahre 2020 bereits bestätigt [15].

3. Bestehende auf HTML basierende Verfahren

Die unter `time.gov` [13, 16] im Browser angezeigte Digitaluhr wird vom *National Institute of Standards and Technology* und dem *U.S. Naval Observatory* betrieben. Die Webseite wurde mithilfe der Programmierumgebung *OpenLaszlo* [17] erstellt. Die Uhr wird sowohl für Flash als auch für HTML automatisch erzeugt. Der Abruf der Uhrzeit erfolgt über eine einzelne `https-GET`-Abfrage am Server und wird alle 10 Minuten wiederholt, solange die Uhr im Browser angezeigt wird. Die genutzte, generische Script-Erzeugung ist wenig effizient. Zudem wurde die Arbeit an *OpenLaszlo* eingestellt.

C. Web-Technologien zur Zeitverteilung

Die in diesem Aufsatz vorgestellte Uhr zur Verbreitung der Zeit der PTB basiert auf verschiedenen Web-Technologien, in die nachfolgend kurz eingeführt wird. Dabei ist der Server, auf dem die Uhr-Applikation läuft, Teil der IT-Infrastruktur, die auf dem Campus der PTB verteilt ist und über verschiedene Verfahren mit der gesetzlichen Zeit bzw. UTC(PTB) versorgt wird.

1. HTML5

HTML steht für *Hypertext Markup Language* und bezeichnet die Art und Weise, wie Inhalte im Browser dargestellt und strukturiert werden. Eine HTML-Datei besteht im Wesentlichen aus Texten, Grafiken, Formatierungsanweisungen und Script-Programmen. Die einzelnen Bereiche sind ineinander geschachtelt. Es ergibt sich ein Baum von Inhalten mit der Möglichkeit, weitere Inhalte einzuhängen oder vorhandene Inhalte zu verändern. Man spricht von einem „*Document Object Model*“ (DOM) beziehungsweise dem DOM-Baum. Jedes Element dieses Baumes kann eindeutig identifiziert und von eingebetteten Script-Programmen verändert werden. Die Version 5 von HTML [18] wurde von Ballast vorheriger HTML-Versionen befreit und konsequent zum Entwickeln sicherer Web-Anwendungen ausgebaut.

```
1 <!DOCTYPE html>
2 <html>
3   <head>
```

```
4     <title>PTB Clock</title>
5   </head>
6   <body>
7     <h1>Überschrift</h1>
8     <svg width="10cm" height="3cm"
9       view Box="0 0 1000 300">
10      <circle cx="300" cy="100"
11        r="100" id="kreis1"/>
12    </svg>
13  </body>
14  <script src="/script.js"></script>
15</html>
```

Listing 1:
Beispiel einer
HTML5 Datei
mit grafischem
Element

Listing 1 zeigt ein einfaches HTML-Beispiel. In Zeile 8–10 wird ein Kreis im Browser gezeichnet. In Zeile 12 wird ein Script-Programm geladen. Scripte können über das eindeutige Identifizierungszeichen `kreis1` auf genau diesen Kreis zugreifen, um beispielsweise den Wert des Radius `r` zu verändern. Die Kreisanweisung ist Teil eines umfangreichen grafischen Befehlsatzes, der unter der Bezeichnung *Scalable Vector Graphics* (SVG) vom *World Wide Web Consortium* (W3C) standardisiert ist [19] und im Browser innerhalb des `<svg>`-Elements verwendet werden kann – beispielsweise, um eine analoge Uhr im Browser darzustellen.

2. ECMAScript

Bereits die ersten Browser von Netscape (Navigator 2.0) und Microsoft (Internet Explorer 3.0) nutzten Script-Programme, um Webseiten im Browser dynamisch anpassen und verändern zu können. Bekannt wurden diese unter den Bezeichnungen *JavaScript*, *JScript* oder *ActionScript*. Diese waren jedoch so instabil, dass deren Verwendung lange Jahre vermieden wurde. Basierend auf diesen frühen Technologien begann im November 1996 unter der Aufsicht des internationalen Industrieverbandes ECMA (*European Computer Manufacturers Association*) in Genf die Standardisierung von ECMA-262 [20]. Diese Arbeit mündete im April 1998 in dem internationalen Standard ISO/IEC 16262, der die Programmiersprache beschreibt. Spätestens mit der Einführung der kontextsensitiven Ad-Words-Werbung von Google, die auf ECMAScript basierte, und den kontinuierlichen Qualitäts- und Geschwindigkeitsverbesserungen der neuen Browser-Implementierungen wurde diese Script-Sprache zur universellen clientseitigen Programmiersprache im Web. Mittlerweile setzen auch große Web-Frameworks auf JavaScript und benutzen diese nicht nur im Browser. In den letzten Jahren hat sich die Sprache auch mehr und mehr im Server-Umfeld etabliert, nicht zuletzt durch den *node.js-Interpreter* [21], der ereignisgesteuerte ECMAScript-Programme ohne Browser ausführen kann und sich unter Program-

mierern einer wachsenden Beliebtheit erfreut. Im Allgemeinen ist ECMAScript gemeint, wenn umgangssprachlich von JavaScript gesprochen wird – auch in dieser Arbeit.

3. WebSocket

WebSocket (WS) [22] ist eine von der IETF (*Internet Engineering Taskforce*) spezifizierte Ergänzung zum etablierten *Hypertext Transfer Protocol* (HTTP)[23]. Die Vorteile sind ein deutlich geringerer Verarbeitungsaufwand auf Server- und Client-Seite gegenüber den im Browser ansonsten üblichen HTTP-Abfragen, sowie eine effiziente bidirektionale Kommunikationsmöglichkeit zwischen Server und Client [24]. Eine vom W3C definierte JavaScript-Unterstützung des Browsers (JavaScript-API) [25] ermöglicht einen leichtgewichtigen Informationsaustausch von Zeichenketten in UTF-8-Kodierung oder Binärdaten zwischen Web-Anwendung und Server mit einem Protokollüberhang von nur wenigen Bytes. Teilweise kommt es zu Problemen mit WS-Clients, die über einen Proxy mit einem Server kommunizieren. Einige Proxy-Hersteller unterstützen WS noch nicht korrekt, ebenso wie einige sogenannte *Next Generation Firewalls* (NGFW), die Verbindungsdaten analysieren. In diesen Fällen ist es hilfreich, dass WS mittels *Transport Layer Security* (TLS) verschlüsselt werden kann (WSS).

4. Web Speech API

Diese JavaScript-API [26] ermöglicht die Nutzung von Sprachsynthese (Text-zu-Sprache) und Spracherkennung (Sprache-zu-Text) im Browser. Obwohl es sich noch nicht um einen offiziellen W3C-Standard handelt, wird die Technologie bereits in vielen aktuellen und weit verbreiteten Browsern unterstützt. Allerdings ist die Qualität der Spracherkennung und -ausgabe nicht bei allen Browsern und Betriebssystemen gleich gut, ebenso erfolgt keine komplett indentische Ausgabe bei ansonsten gleicher Parametrisierung. So ist beispielsweise die Sprechgeschwindigkeit oder Betonung unterschiedlich. Trotzdem kann die *Web Speech API* effektiv eingesetzt werden und die Möglichkeit der Informationsausgabe im Browser um ein weiteres Medium ergänzen.

5. Bibliotheken zur Programmiererleichterung

Die hier vorgestellte Web-Uhr lässt sich als HTML-Applikation (umgangssprachlich „Web-App“) bezeichnen. Wie bei Web-Apps typisch, interagiert das ECMAScript direkt mit den HTML- und SVG-Elementen im DOM-Baum. In der Web-Uhr wird lediglich *jQuery.js* [27] zur Effizienzsteigerung der Programmierung verwendet.

Weitere Programmbibliotheken sind nicht nötig, da alle weiteren Funktionen durch native Funktionen aktueller Browser abgedeckt werden, wie beispielsweise die WebSocket- und Sprachausgabe-Funktionen. Damit ist die Anwendung äußerst ressourcenschonend entwickelt, ist einfach zu aktualisieren und kann ohne großen Aufwand in weiteren Anwendungen genutzt werden. Außerdem werden etwaige Konflikte durch weitere JavaScript-Bibliotheken vermieden.

II. Anforderungen

Uhren gibt es viele im Web. Dieses Kapitel beschreibt die Anforderungen, die die Autoren für eine PTB-Uhr im Browser als sinnvoll ansahen.

A. Genauigkeit

Die Flimmerverschmelzungsfrequenz bei Menschen ist abhängig von der Intensität der Lichtreizung. Geht man bei einem Zeigerwechsel einer Uhr von einer geringen Lichtintensität aus, so liegt die Unterscheidungsmöglichkeit des Auges bei zirka 25 Hertz. Damit nimmt ein Mensch auch die genaueste Uhr erst mit etwa 40 ms Verspätung wahr. Eine Abweichung des dargestellten Sekundenwechsels von der gesetzlichen Zeit in dieser Größenordnung wurde daher als tolerabel angenommen. Jedes Gerät, auf dem ein Browser läuft und das die Web-Uhr darstellen kann, besitzt eine lokale Zeit. Diese Zeit kann von der PTB-Zeit abweichen. Die Web-Uhr soll die Möglichkeit bieten, diese Abweichung darzustellen, inklusive einer Fehlerabschätzung der Vergleichsmessung zwischen lokaler und übertragener Zeit.

B. Gestaltung

Das Hauptaugenmerk bei der grafischen Gestaltung der Uhr liegt auf einer genauen Zeitdarstellung. Daher soll die Sekundenanzeige besonders hervorgehoben werden. Um einen offiziellen Charakter auf den ersten Blick erkennbar werden zu lassen, soll die Gestaltung in Anlehnung an DIN 41091-4 [28] erfolgen. Zur Unterscheidung von erster und zweiter Tageshälfte soll eine Digitalanzeige im 24-Stundenformat auf dem Ziffernblatt mitlaufen. Außerhalb des Ziffernblatts sollen keine Darstellungen gemacht werden. Damit ist eine einfache Integration der Uhr in bestehende Webseiten möglich. Aus gleichem Grund sind Farben und Design schlicht zu halten.

C. Integrität und Authentizität

Die Uhr soll ausschließlich über TLS verschlüsselte Verbindungen (HTTPS, WSS) abrufbar sein. Das dazu genutzte Server-Zertifikat soll die PTB ein-

deutig als Betreiber der Uhr identifizieren. Zusätzlich zur Anbieter-Authentifizierung kann die TLS-basierte Verschlüsselung – neben einer eher unwichtigen Vertraulichkeit der Zeitübertragung – die Integrität der übertragenen Zeitinformation sicherstellen. Die Nutzenden können darauf vertrauen, dass die Uhr von der PTB stammt und die übertragene Zeitinformation nicht manipuliert wurde. Dies lässt sich bestmöglich durch den Einsatz sogenannter *Extended-Validation-Zertifikate* erreichen, die strengen Vergaberichtlinien unterliegen [29]. Dabei wird nicht nur die Webserver-Adresse validiert, sondern auch der oder die Betreiber/in der Webseite.

D. Zeitzone und Schaltsekunde

Der Beginn und das Ende der Sommerzeit sollen unabhängig von Einstellungen und Programm-routinen des Browsers oder des Betriebssystems bestimmt werden können. Daher kommen PTB-eigene Verfahren zum Einsatz. Auch die Anzeige von angekündigten Schaltsekunden soll durch eigene Routinen sichergestellt werden.

E. Hörausgabe

Ergänzend zur visuellen Darstellung soll die Zeit auch akustisch ausgegeben werden. Nachdem ein Zeitpunkt per Sprachausgabe angesagt wurde, soll dieser durch ein akustisches Signal exakt signalisiert werden. Da die Uhr die in Deutschland maßgebende Uhrzeit darstellt, soll die Ausgabe in deutscher Sprache erfolgen. Die akustische Ausgabe soll für Browser möglich sein, die dies per *Web Speech API* nach I-C4 unterstützen.

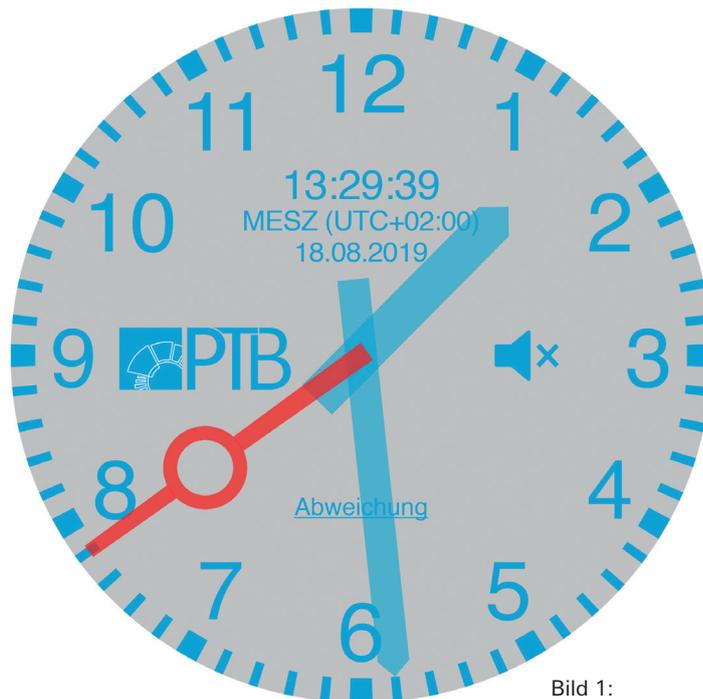


Bild 1: Darstellung der Uhr im Browser

III. Funktionsweise

In diesem Kapitel wird die technische Umsetzung der Zeitdarstellung im Browser beschrieben. Bild 1 zeigt die Uhr.

Grundsätzlich tauschen Server und Client die koordinierte Weltzeit UTC aus und arbeiten auch mit dieser. Erst kurz vor der Ausgabe erfolgt die Umwandlung in die lokale deutsche Zeit (siehe Abschnitt III-B). Die folgenden Funktionsbeschreibungen beziehen sich daher immer auf UTC, soweit nicht explizit anders vermerkt.

A. Zeitweitergabe Server-Client

1. Abgrenzung

Ein sehr genaues Verfahren zur netzwerkgestützten Zeitsynchronisation ist in der NTP-Spezifikation [5] beschrieben. Im Unterschied dazu geht es in dieser Arbeit um die reine Darstellung der Zeit mit vergleichsweise geringen Anforderun-

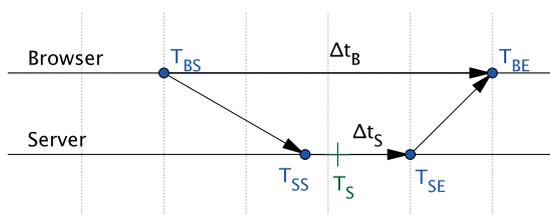


Bild 2: Verlauf einer Zeitabfrage am Server

gen (siehe II-A). Die hier verwendeten Methoden sind daher vereinfacht. Im Gegensatz zum NTP werden Verarbeitungszeiten auf Server und Client nicht einzeln gemessen. Dem liegt die Annahme zugrunde, dass die kurzen Verarbeitungszeiten moderner Betriebssysteme im Vergleich zu den Laufzeiten im Internet für Korrekturrechnungen kaum relevant sind.

2. Laufzeitkorrektur

Der Browser fordert am Server einen Zeitwert an. Dieser überträgt den Wert zurück an den Browser, der die Uhrzeit darstellt. Beim Transport dieses Zeitwerts muss die dafür benötigte Zeitspanne zu der am Server abgegriffenen Uhrzeit hinzu addiert werden. Erst dann darf die Anzeige erfolgen. Diese Laufzeit kann allerdings nicht gemessen werden. Daher werden die Laufzeiten vom Browser zum Server und wieder zurück gemessen (vgl. Bild 2, Δt_B) und die Laufzeit näherungsweise aus dem Mittelwert gebildet. Dabei wird von der Annahme ausgegangen, dass die Zeitabnahme auf dem Server (T_S) genau in der Mitte zwischen Abfragestart (T_{BS}) und Erhalt (T_{BE}) erfolgt.

3. Unsicherheit der Laufzeit

Im optimalen Fall einer symmetrischen Verarbeitung lässt sich die aktuelle Zeit sehr genau errechnen. Hierzu wird die Hälfte der Laufzeit $\Delta t_B/2$ zur vom Server übertragenen Abnahmezeit T_S addiert. In der Realität kann aber keine Aussage zur Symmetrie getätigt werden. Daher muss bezüglich einer Aussage über die Genauigkeit der so berechneten Zeit von einer maximalen Asymmetrie ausgegangen werden. Die berechnete Zeit kann maximal um Beträge im Bereich $\pm \Delta t_B/2$ vom tatsächlichen Wert abweichen.

4. Zeitmessungen im Client

Problematisch, aber wichtig bezüglich einer Aussage zur Genauigkeit ist also die Qualität der Bestimmung von T_{BS} und T_{BE} . Anders als beispielsweise beim betriebssystemnahen NTP kann die Zeit nur über die JavaScript-Funktionen des Browser ermittelt werden. Da Web-App-Spiele oder Audio- und Video-Anwendungen häufig einen sehr genauen und gleichmäßigen Taktgeber benötigen, wurde vom W3C die „High Resolution Time“ [30] standardisiert. Aktuelle Versionen der Browser *Chrome*, *Edge*, *Firefox*, *IE*, *Opera* und *Safari* können mit der Funktion `performance.now()` Zeitdifferenzen in Millisekunden mit einer Auflösung von bis zu fünf Mikrosekunden verarbeiten. Dieser „Zeitstrahl“ ist von der Systemzeit unabhängig, frei von Taktversatz oder anderweitig verursachten Änderungen der Systemzeit und damit sehr gut als Uhrwerk für eine Uhr im Browser geeignet.

5. Uhrzeitabnahme auf dem Server

Serverseitig erfolgt die Abnahme der Uhrzeit T_S über die in POSIX.1-2001 von der IEEE standardisierten Betriebssystemschnittstelle `gettimeofday` [31]. Die Rückgabe des Systemaufrufs erfolgt in Sekunden und Mikrosekunden seit 1. Januar 1970, 0 Uhr UTC ohne Zeitzoneninformation. Dieser Wert wird vor der Übertragung an den Browser in Millisekunden umgerechnet. Die Weitergabe erfolgt so mit um den Faktor 1000 geringerer Auflösung als von `gettimeofday` geliefert, was eine gewisse Fehlertoleranz beispielsweise bei erhöhter Serverlast erwarten lässt. Es ist theoretisch möglich, dass die mit `gettimeofday` ermittelte Serverzeit einen relevanten Zeitunterschied zu den Stratum-1-Zeitservern der PTB aufweist, weshalb dieser `offset` ermittelt und vor Übertragung an den Browser im Zeitwert berücksichtigt wird (vgl. Listing 2).

Die Verarbeitungsdauer Δt_S auf dem Server ist so kurz wie irgendwie möglich zu halten (vgl. III-A3). Daher wird neben der Zeitabnahme nur

Programmcode ausgeführt, der mit dem Empfang der Abfrage und dem Versenden der Zeit zusammenhängt. Dank WebSocket erfolgt dies mit minimalem Protokollüberhang (im Vergleich zu HTTP). Listing 2 in Zeile 2 zeigt den serverseitigen Programmcode, der während Δt_S ausgeführt wird. Messungen ergaben für diese Programmausführung Werte von deutlich unter einer Millisekunde. Bei hoher Systemlast kann sich der Wert erhöhen, was sich auf die Unsicherheitsabschätzung der Zeitabweichung zum lokalen System auf dem Ziffernblatt auswirkt.

```
1 socket.on('message', function(req) {
2   socket.send({c: req.c, s: Math.round(
      microtime.nowDouble()*1000)+offset,
      l: leapInfo, e: rootDelay/2});});
```

Listing 2:

Empfang der Browser-Anfrage (*message*) und Emittieren der Rückgabe (*send*) inklusive PTB-Zeit, Schaltsekundeninformation (*leapInfo*) und Unsicherheitsabschätzung

6. WebSocket-Abfrageprotokoll

Zur Abfrage der Zeit wurde das WebSocket-Subprotocol *time* (WST) entwickelt [32]. Nach Aufbau der TLS-verschlüsselten Verbindung sendet das anfragende Programm per WebSocket unter Angabe des Subprotocols eine Anfrage (*Request*) an den Server. Der Request beinhaltet einen Zeitstempel. Der Wert wird in der Antwort des Servers (*Response*) ohne Änderung zurückgesendet. Aus Sicherheits- und Performancegründen darf der gesamte Request maximal 1024 Byte betragen. Die Response beinhaltet zusätzlich den Zeitstempel des Servers T_S sowie die Fehlerabschätzung dieses Wertes auf dem Server. Damit lassen sich die in den vorherigen Abschnitten beschriebenen Korrekturrechnungen durchführen. Falls eine Schaltsekunde für das Ende des Tages angekündigt wurde, wird zusätzlich eine entsprechende Information im Response zurückgegeben (vgl. III-C).

Die WebSocket-Zeitabfrage kann unabhängig von der Darstellung der Uhr verwendet werden. Sendet der Client dabei länger als 200 Sekunden keine Daten auf einem geöffneten WebSocket, terminiert der Server den WebSocket. Als zulässige Daten kommen eine reguläre Zeitabfrage in Betracht oder ein WebSocket-Ping (vgl. [22]). Es wird unbedingt empfohlen, die Verbindung nicht mit einem WebSocket-Ping geöffnet zu halten, sondern bei länger auseinanderliegenden Zeitabfragen dafür dediziert aufgebaute WebSocket-Verbindungen zu verwenden und nach der Zeitabfrage wieder zu schließen. Das Aufrechterhalten des Websockets per Ping ist nur für Ausnahmen gedacht, in denen der erneute Verbindungsauf-

bau einen unverhältnismäßig hohen Aufwand auf Client-Seite bedeuten würde.

7. Umgang mit Laufzeitschwankungen

Wie in Abschnitt III-A3 beschrieben wurde, beeinflusst die Laufzeit der Datenpakete zwischen Browser und Server wesentlich die Verlässlichkeit der angezeigten Zeit. Um die Unsicherheit durch die Datenverbindung gering zu halten, erfolgt die Laufzeitmessung durch eine Folge von fünf direkt aufeinander folgenden Abfragen. Dabei muss allerdings aufgrund vieler nicht beeinflussbarer Faktoren von fehlerhaften Messungen ausgegangen werden. Um trotzdem möglichst nahe an der genauen Zeit zu liegen, soll nur der genaueste Messwert für die Korrekturberechnungen der Zeitanzeige herangezogen werden. Um diesen auszuwählen, werden einige Annahmen getroffen: Da jede Laufzeitverlängerung wahrscheinlich auch mit einer Vergrößerung der Asymmetrie einhergeht und davon ausgegangen wird, dass Probleme nahezu ausschließlich zu Laufzeitverlängerungen (und nicht zu Laufzeitverkürzungen) führen, wird die schnellste Abfrage (kleinster Wert Δt_B in Bild 2) zur Zeitberechnung verwendet. Durch das in Abschnitt III-A4 beschriebene Verfahren ist nahezu ausgeschlossen, dass für Δt_B zu kleine Werte ermittelt werden.

B. Umstellung Sommer-/Winterzeit

Mit §1 der „Verordnung über die Einführung der mitteleuropäischen Sommerzeit ab dem Jahr 2002“ wurde die Sommerzeit in Deutschland „auf unbestimmte Zeit“ eingeführt. §2 legt weiter fest, dass die mitteleuropäische Sommerzeit nicht das ganze Jahr über gilt, sondern am letzten Sonntag im März um 2 Uhr mitteleuropäischer Zeit beginnt und am letzten Sonntag im Oktober um 3 Uhr mitteleuropäischer Sommerzeit endet. Während der Sommerzeit ist die Uhr um eine Stunde vorgestellt. Die Differenz zu UTC beträgt dann +2 Stunden, ansonsten +1 Stunde. Wie in Kapitel II-D gefordert, erfolgt die Sommerzeitberechnung mit eigenen Routinen entsprechend der gegenwärtig (2019) gültigen Verordnung. Kommt es hier zu Änderungen, wie sie im Jahr 2018 auf europäischer

Ebene diskutiert wurden, so wird die Routine entsprechend angepasst. Jede Uhrzeit durchläuft im Browser vor der Darstellung die in Listing 3 aufgeführte Routine. Zeile 1 bis 4 zerlegt die Zeit in Monat (0–11), Tag (1–31), Wochentag (0–6) und Stunde (0–23). Ist der Ausdruck zwischen Zeile 6 und 14 wahr, existiert Sommerzeit: In den Monaten April bis September ist immer Sommerzeit (Zeile 6). Im März ist dann Sommerzeit, wenn es nach dem 24sten Tag des Monats Sonntag und mindestens 1 Uhr ist (Zeile 9) oder es sich um den Rest der Woche ab diesem Sonntag handelt (Zeile 10). Im Oktober ist es genau anders herum (Zeilen 12–14), also jederzeit vor dem letzten Sonntag um 1 Uhr UTC.

```

1 var mth=zeit.getUTCMonth(),
2     dt=zeit.getUTCDate(),
3     dy=zeit.getUTCDay(),
4     hr=zeit.getUTCHours(),
5     utc2ptb=1; // CET: UTC+01
6 if ((mth>2 && mth<9) || // Apr-Sep
7     (mth===2 && // Maerz
8     (dt>24) && //letzte Woche
9     ((dy==0 && hr>=1) || // Sonntag nach
10    1 Uhr UTC
11    (dy>0 && (dt-dy)>24))) ||
12    (mth===9 && // Oktober
13    !(dt>24) && //letzte Woche
14    ((dy==0 && hr>=1) || //Sonntag nach
15    1 Uhr UTC
16    (dy>0 && (dt-dy)>24)))) { //Tage
17    nach dem letzten Sonntag
18    utc2ptb=2;} // CEST: UTC+02

```

Listing 3:
Algorithmus zur Bestimmung der Sommerzeit

C. Darstellung der Schaltsekunde

Spätestens zwei Minuten, nachdem der Server von einer neuen Schaltsekunde erfährt, übergibt der Server bei der nächsten Zeitabfrage dem Browser die Schaltsekundeninformation. Dieser stellt die Schaltsekunde in der Uhr grafisch dar. Die beiden Abbildungen in Bild 3 zeigen die Uhr in den beiden möglichen Zuständen, von denen allerdings de facto nur a) relevant ist, da mit einer negativen

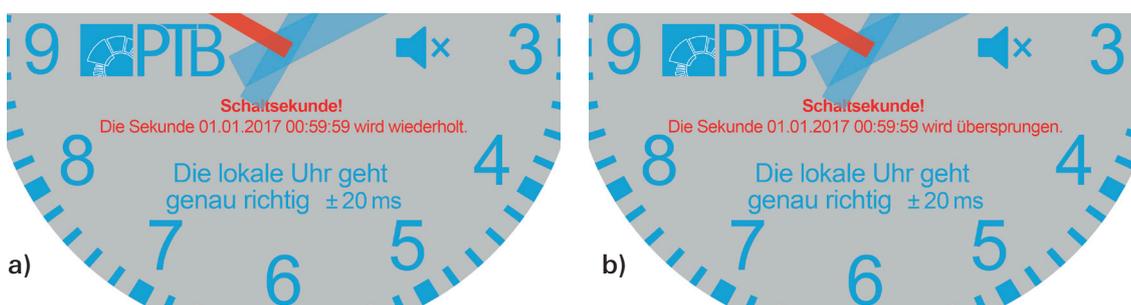


Bild 3:
Ankündigung einer Schaltsekunde zum Ende des Monats

a) Minute mit 61 Sekunden steht an

b) Minute mit 59 Sekunden steht an

Schaltsekunde nicht zu rechnen ist. Übergeben wird vom Server der Wert 1, wenn eine Sekunde eingefügt wird, und der Wert 2, wenn eine Sekunde entfernt wird. In Listing 4 ist der Wert in der Variablen `leap` abgelegt.

Rechnerisch ist die Berücksichtigung der Schaltsekunde nichts anderes als eine Zeitemstellung um eine Sekunde ohne festen Rhythmus. Schaltsekunden werden bevorzugt auf die letzte Sekunde (UTC) von Juni oder Dezember gelegt. Nach gesetzlicher Zeit entspricht dies in Deutschland der letzten Sekunde der Minute 00:59 Uhr des 1. Januar oder der letzten Sekunde der Minute 01:59 Uhr des 1. Juli. Listing 4 zeigt die Routine, die vor jeder Darstellung der Uhrzeit durchlaufen wird. Wenn der Server eine Schaltsekunde ankündigt (`leap` ungleich 0) und die 59. Sekunde angebrochen ist, erfolgt das Setzen der Zeitkorrektur in der globalen Variablen `leapDelta`. Dieser Zeitkorrekturwert bleibt bis zur nächsten Zeitanfrage beim Server bestehen. Da dieser die Schaltsekundenkorrektur ebenfalls vornahm, wird der Korrekturwert im Browser dann wieder auf 0 gesetzt.

Listing 4:
Feststellen der Schaltsekunde

```
1 var mdys=[0,0,0,0,0,30,0,0,0,0,0,31];
2   if (leap!==0 &&
3       dt===mdys[mth] &&
4       hr===23 &&
5       zeit.getUTCMinutes()===59 &&
6       zeit.getUTCSeconds()===59) {
7   leapDelta=(leap==1 ? -1000 :
8               (leap==2 ? 1000 : 0));}
```

Die Berechnung der letztendlich darzustellenden Zeit zeigt Listing 5.

Listing 5:
Berechnung der dazustellenden PTB-Zeit unter Berücksichtigung von Schaltsekunde und Zeitzoneinstellung

```
1 var ptbtime=new Date(zeit.valueOf()+
2                     leapDelta+(utc2ptb*60*60*1000));
```

D. Darstellung der lokalen Zeitabweichung

Wie in Abschnitt III-A4 beschrieben, ist die in der Uhr dargestellte Zeit unabhängig von der lokalen Systemzeit des Rechnersystems beziehungsweise des Browsers. Daher ist es möglich, die Differenz dieser lokalen Uhrzeit und der übertragenen PTB-Zeit zu berechnen und anzuzeigen. Auf dem Ziffernblatt der Uhr befindet sich hierzu eine

Schaltfläche mit der Bezeichnung „Abweichung“ (vgl. Bild 1). Durch einen Klick darauf erhält man Informationen, wie die Beispiele in Bild 4 zeigen. Die Differenz in Zeiteinheiten wird dabei bei jedem Sekundentick neu berechnet und dargestellt.

Rechts daneben erfolgt die Anzeige der Unsicherheitsabschätzung der dargestellten Abweichung. Da nur einmal pro Minute eine Zeitabfrage durch die Uhr-App beim Server erfolgt, wird diese Unsicherheitsabschätzung auch nur einmal pro Minute neu berechnet. Dies ist nicht öfter nötig, da wie in Abschnitt III-A2 erklärt, der Wert der Unsicherheitsabschätzung auf die mögliche Asymmetrie der Kommunikationsverbindung zurückzuführen ist. Zusätzlich wird die bei der Abfrage mitgelieferte Unsicherheitsabschätzung der Serverzeit dem der Asymmetrie geschuldeten Wert hinzu addiert.

Die Anzeige der Abweichung ermöglicht Aussagen zur Qualität der lokalen Zeiteinstellung und kann z. B. die korrekte Konfiguration eines lokalen NTP oder eines anderen Zeitsynchronisierungsverfahrens im Rahmen der Unsicherheit überprüfen.

E. Sekundentick

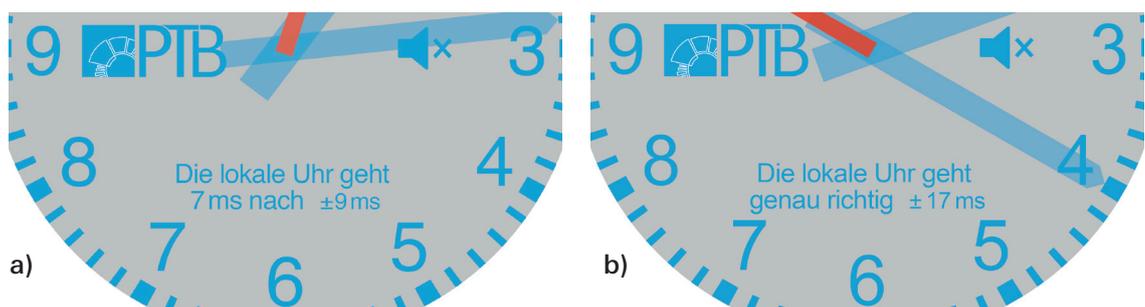
In JavaScript gibt es zwei Möglichkeiten, zeitgesteuert Aktionen auszuführen. Zum einen durch die Methode `setInterval()`, die im festen Intervall eine Funktion ausführt. Hier kann das einmalig in Millisekunden festgelegte Intervall kaum noch beeinflusst werden. Besser eignet sich daher die zweite Methode `setTimeout()`. Am Ende eines jeden Darstellungsvorgangs wird die verbleibende Zeit bis zum nächsten Sekundenimpuls berechnet und der Tick mit dieser Methode terminiert. Listing 6 zeigt den JavaScript-Code

```
1 function uhrTicker() {
2   /*
3   ... Zeitkorrektur berechnen und
4   Zeiger bewegen...
5   */
6   var tickTimeout=setTimeout
7   (uhrTicker, 1000-ptbtime.
8   getMilliseconds());}
```

Listing 6:
Ticker Generator

Bild 4:
Abweichung der lokalen Browser-Zeit von der PTB-Zeit

- a) Anzeige der Abweichung
- b) Abweichung kleiner als eine Millisekunde



Am Ende der Ticker-Funktion (Zeile 5) wird der nächste Aufruf der Ticker-Funktion `uhrTicker()` auf die nächste volle Sekunde gelegt. Besser wäre hier, den Aufruf etwas vor die volle Sekunde zu legen, um die Rechenzeit zum Aufruf des Sekundenwechsels und tatsächliche Darstellung des Sekundenzeigers auszugleichen. Da der Vorgang in der Zukunft liegt, müsste der Wert aus einer Messung eines vorherigen Sekundenticks hergeleitet werden.

Dieser Aufwand erfolgt nicht. Die Begründung liefert Bild 5. Darin wird die Präzision des Sekundenticks bei verschiedenen Browsern über einen Zeitraum von jeweils drei Minuten dargestellt. Die Messung erfolgt unmittelbar vor dem Programmcode zur Zeigerbewegung. Es ist zu erkennen, dass relevante Abweichungen vorkommen und nicht vorhersehbar sind. Die normale Laufzeit zur Berechnung des Sekundenzeigersprungs befindet sich im Bereich von maximal wenigen Millisekunden. Kommt es zu einer Verzögerung in der JavaScript-Ausführung, wird dies beim nächsten anstehenden Sekundentick ausgeglichen. Was ebenso nicht bestimmt werden kann, ist die Dauer zwischen der Übergabe des Befehls zur Darstellung des Zeigerwechsels an das Betriebssystem und dem tatsächlichen Anzeigzeitpunkt. Diese Verzögerung ist ausschließlich abhängig von der Qualität der verwendeten Hardware und kann nicht über eine Korrekturrechnung berücksichtigt werden.

F. Grafische Darstellung

Die grafische Darstellung ist komplett als SVG-Grafik realisiert, die in die HTML-Seite eingebettet ist. Das Logo der PTB ist direkt in den DOM-Baum der SVG-Uhr eingehängt. Dies sorgt für eine gute Skalierbarkeit der Uhr. Zeiger sind grafische Elemente, die um den Uhrmittelpunkt herum

rotiert werden. Listing 7 zeigt die Umrechnung des Zeitwerts in Drehwinkel der jeweiligen Zeiger.

```

1 var hours=ptbtime.getUTCHours(),
2 minutes=ptbtime.getUTCMinutes(),
3 seconds=ptbtime.getUTCSeconds();
4 hourHandAngle
    (hours * 30 + minutes * 0.5);
5 minuteHandAngle(minutes * 6);
6 secondHandAngle(seconds * 6);
    
```

Listing 7:
Umrechnung des Zeitwerts in Zeigerstellung der analogen Uhr

G. Auditive Ausgabe

Moderne Browser bieten von Haus aus die Möglichkeit, Text in Sprache umzuwandeln und Töne per Oszillator zu erzeugen (vgl. Abschnitt I-C4). Soweit der verwendete Browser diese Funktionen unterstützt, kann nach Aufruf der Webseite durch wiederholtes Betätigen der Tabulatortaste die Hörausgabe aktiviert werden. Alternativ kann die Ausgabe durch Klicken auf das Lautsprechersymbol im Ziffernblatt aktiviert oder deaktiviert werden. Steht die Hörausgabe im Browser nicht zur Verfügung, wird kein Lautsprechersymbol angezeigt und die Tabulatortaste bleibt diesbezüglich ohne Funktion. Die Überprüfung, ob es mit dem genutzten Browser möglich ist, deutsche Sprache auszugeben, findet sich in Listing 8.

Nach aktivierter Ausgabe wird jeweils zu vollen 10 Sekunden für 50 Millisekunden eine Sinus-schwingung mit 2093 Hz (Ton c der viergestrichelten Oktave) erzeugt.

Mit der Ansage des Zeitwerts dieses Pieps wird immer 6,5 Sekunden vor dem Piep begonnen. Dies hat sich in Versuchen als sinnvoller Wert ergeben. Die Ansage wird nicht zur vollen Sekunde

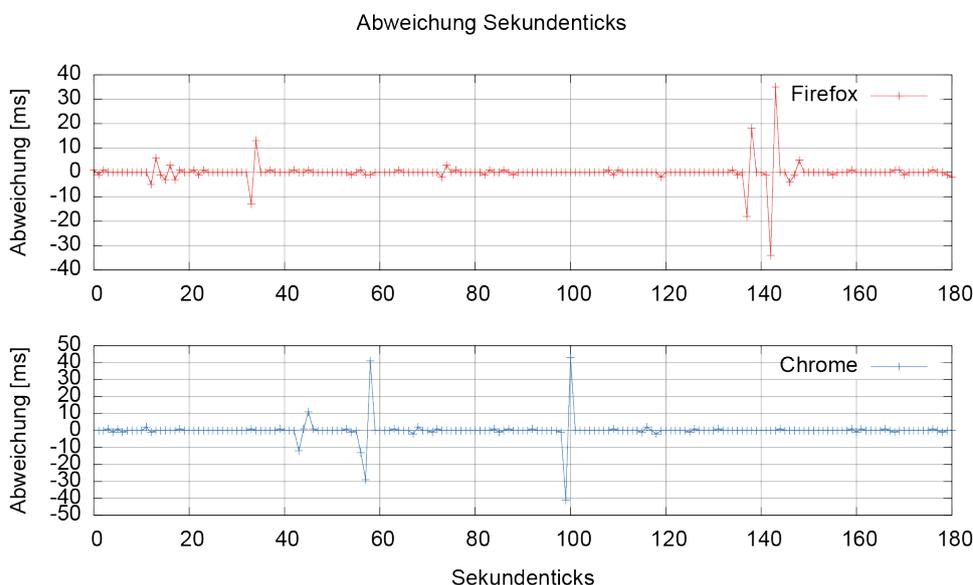


Bild 5:
Abweichungen der Sekundenticks verschiedener Browser

begonnen, da die Berechnung der Ansage für den Browser aufwendig ist und eine sichtbare Verzögerung des Sekundezeigerwechsels dabei entstehen kann. Die Funktion zum Vorlesen des Zeittextes finden sich in Listing 9.

Die Weiterentwicklung der verwendeten *Web Speech API* ist von den Browser-Herstellern noch nicht abgeschlossen und die Sprachausgabe browser- und betriebssystemabhängig unterschiedlich. Verschiedene Browser sprechen gleiche Sätze unterschiedlich aus und interpretieren oder artikulieren Texte anders – so wird beispielsweise „1 Uhr“ zu „eins Uhr“ oder auch korrekt zu „ein Uhr“. Schutzmechanismen vor ungewollter Lärmbelästigung auf Geräten – wie beispielsweise bei Apple Smartphones – führen dazu, dass Töne nur dann ausgegeben werden, wenn sie durch eine konkrete Benutzerinteraktion „anklicken“ auf dem Gerät angestoßen und gewollt werden. Da der Piepton per JavaScript alle 10 Sekunden automatisch erfolgen soll, muss mit der Aktivierung der Sprachausgabe der erste Piep erfolgen. Da ein Ton hier aber nicht gewünscht ist, wird ein Ton mit 0 Sekunden Dauer ausgegeben, der nicht zu hören ist. Anschließend ist die intervallgesteuerte Hörausgabe mit 50 Millisekunden Dauer zu hören.

```
1 var u=new SpeechSynthesisUtterance();
2 u.lang="de-DE"; //Sprache
3 u.rate=1.15; //Sprechgeschwindigkeit
4 u.text="Beim n"achsten Ton ...";
5 window.speechSynthesis.speak(u);
```

Listing 9:
Funktion zur Sprachausgabe

H. Fehlerbehandlung

Falls das Initiieren des JavaScript-Programms fehlschlägt, beispielsweise da das WebSocket-Protokoll im Browser nicht verfügbar ist oder der Uhr-Server z. B. aufgrund einer Firewall nicht erreicht werden kann, bleibt die Uhr auf 0 Uhr stehen und in der Anzeige erscheint „Inkompatibler Zustand“ (Bild 6).

Bei jeder Sekundenweilerschaltung (Tick, vgl. Abschnitt III-E) erfolgt eine Fehlerbehandlungsroutine. Diese überprüft den Zeitabstand zum letzten ausgeführten Tick und startet eine erneute Zeitabfrage nach Kapitel III-A, falls dieser mehr als 3 Sekunden beträgt. Dieser Fall kann beispielsweise nach dem Aufwachen aus dem Ruhemodus oder nach dem erneuten Aufrufen eines zwischenzeitlich ausgeblendeten Browserfensters eintreten. Scheitert die erneute Zeitabfrage, etwa weil keine Verbindung existiert, stellt sich die Uhr in den Grundzustand, der in Bild 7a dargestellt ist.

Sobald die Uhr die Verbindung zum Server verliert und die Zeit nicht mehr synchronisieren kann, ändert sich die Farbe des Ziffernblatts zu hellrot und die Informationen zur Zeitweitergabe zwischen Server und Client werden ausgeblendet. Stattdessen erscheint der Hinweis „Verbindung unterbrochen“. Auf diese Weise wird der problematische Zustand der Uhr trotz weiter erfolgreicher Sekundenweilerschaltung deutlich signalisiert, siehe Bild 7b.

Listing 8:
Web Speech API
Kompatibilitätsprüfung.
Zeile 1 =
Browser-Unterstützung;
ab Zeile 2 =
Sprachunterstützung Deutsch

```
1 var OK=("AudioContext" in window || "
   webkitAudioContext" in window) && "
   SpeechSynthesisUtterance"
   in window && " speechSynthesis"
   in window;
2 if (OK) {
3   var voices=window.speechSynthesis.
   getVoices();
4   voices.some(function(v,i) {
5     if (v.lang==="de-DE" || v.lang==="de") {
6       console.log("Sprachausgabe Deutsch OK!");
       ;}});}
```

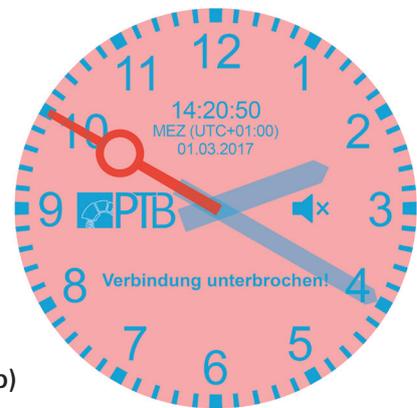


Bild 6:
Uhr mit nicht aktivierbarem Uhrwerk



a)

Bild 7:
Verbindungsunterbrechung zum Zeitserver färbt Ziffernblatt hellrot



b)

a) Rücksetzen nach unstemem Ticken b) Uhr tickt ohne Stellmöglichkeit

IV. Vergleichsmessungen

A. Vergleich mit NTP-Systemzeit

Nach Klick auf das Feld „Abweichung“ im Ziffernblatt der Uhr erscheint die Abweichung zwischen der lokalen Zeit des Rechners und der vom PTB-Server bezogenen Zeit, inklusive des Zeitintervalls innerhalb dessen die wahre Abweichung liegt. Bei Untersuchungen an verschiedenen Betriebssystemen stimmten diese Werte im Millisekunden Bereich mit mittels NTP bestimmten Werten überein.

B. Abweichung des Sekundenzeigers von der gesetzlichen Zeit

Die Verifizierung des dargestellten Sekundenwechsels im Ziffernblatt in verschiedenen Browsern und Geräten erfolgt im Uhrenlabor der PTB durch Vergleichsmessungen gegen den Sekundenimpuls (PPS), der die Zeitskala UTC(PTB) repräsentiert. Mit dem Wechsel von L zu H beginnt eine neue Sekunde, wie in Bild 8 dargestellt ist. Die Leuchtdiode, die diesen Sekundenimpuls darstellt, erhebt nur wenige Mikrosekunden nach dem elektrischen Impuls. Dieses Dioden-Signal eignet sich daher gut für einen visuellen Vergleich mit dem Sekundenzeiger der Web-Uhr.

Dafür wird das Anzeigegerät (PC-Monitor, Notebook oder Smartphone) neben der Leuchtdiode aufgebaut und die Uhr im Browser aufgerufen. Anschließend wird der Messaufbau mit einer Videokamera abgefilmt, die 240 Bilder pro Sekunde aufzeichnet und damit Zeitlupenauswertungen mit einer Auflösung von 4,2 ms ermöglicht. Bild 9 zeigt ein Video-Einzelbild. Pro Video werden zirka 10 Sekunden erfasst, um Anomalien beim Sekundentick, wie unter Bild 5 dargestellt, abzumildern. Die Auswertung erfolgt durch Zählen der Einzelbilder, die zwischen dem Erhehlen der Leuchtdiode und dem Beginn des Sekundenzeigerwechsels liegen. Multipliziert mit 4,2 ms ergibt sich die Sekundenzeigerabweichung von der gesetzlichen Zeit. Die Werte dienen einerseits der Bestätigung der Funktionsweise der Web-Uhr und geben andererseits einen Anhaltspunkt für die tatsächliche Verzögerung der Uhrzeitanzeige bei einigen Anzeige-Systemen.

Die Tabelle 1 zeigt exemplarisch die Verzögerung der Darstellung des Sekundenzeigers gegenüber dem Sekundenimpuls von UTC(PTB) bei verschiedenen Geräten, Monitoren und Browsern. Die Werte liegen zwischen 25 ms und 123 ms. Der beste Wert konnte mit einem speziell für Computerspiele entwickelten Monitor erzielt werden, der mit 144-Hertz-Bildwiederholfrequenz angesprochen wurde und nach Herstellerangaben eine Anzeigeverzögerung von 1 ms aufweist. Gute

Werte konnten auch mit einem Apple-Smartphone erzielt werden. Da bei Smartphones das Wischen auf dem Display möglichst verzögerungsfrei wirken sollte, wird hier offensichtlich viel Wert auf schnelle Verarbeitung und Darstellung gelegt. Rechnet man dieser technischen Anzeigeverzögerung noch die Trägheit des menschlichen Auges hinzu (vgl. Kapitel II-A), so hinkt der wahrnehmbare Sekundentick der Web-Uhr der gesetzlichen Zeit um etwa 100 ms hinterher. Aufgrund der großen Schwankungen wird von einer theoretisch möglichen Korrekturrechnung bei der Anzeige der Uhrzeit abgesehen.

Die Spalte Unsicherheitsabschätzung zeigt den in Kapitel III-D beschriebenen und in Bild 4 angezeigten Wert.

V. Einschränkungen

Browser sind nicht dazu gemacht, eine stetig tickende Uhr darzustellen. Es muss jederzeit damit gerechnet werden, dass nicht beeinflussbare Faktoren die Genauigkeit beeinträchtigen. Auch wenn die Uhr in der Lage ist, Unstetigkeiten auszugleichen, wie Kapitel III-E zeigt, und Fehler zu behandeln, wie Kapitel III-H zeigt, kann es vorkommen,

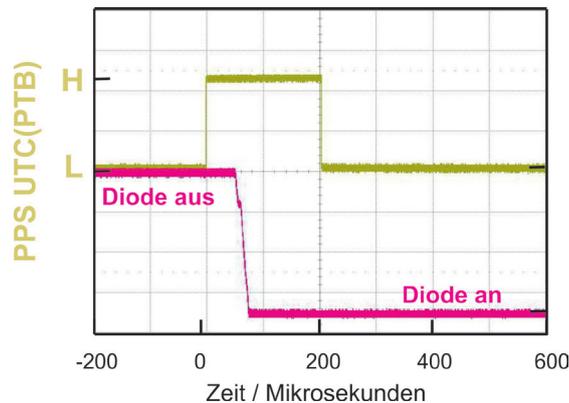


Bild 8: Lichtimpuls (rot) vs. Sekundenimpuls (grün)



Bild 9: Einzelbild des Messaufbaus zum Sekundenimpulsvergleich

dass Systeme überlastet sind oder Verbindungen abgebrochen werden und keine zuverlässige Uhrzeit mehr dargestellt werden kann.

Je höher die Laufzeit der IP-Pakete zwischen Server und Browser und je höher die Asymmetrie der Laufzeit, desto ungenauer ist die dargestellte Zeit. Solange die Laufzeiten unter etwa 30 ms liegen und der Browser nicht überlastet ist, ist die Anzeigegenauigkeit sehr gut. Besteht jedoch eine sehr schlechte Verbindung oder der Server reagiert wegen Überlastung stark verzögert, kann es zu sichtbaren Abweichungen kommen. Die Beurteilung obliegt dem Betrachter, die nötigen Informationen werden in der Uhr dargestellt.

Wenn JavaScript im Browser deaktiviert wurde, kann keine Uhrzeit angezeigt werden. Problematisch sind auch Browser mit Einschränkungen bei der Ausführung von JavaScript. So werden beispielsweise Scripte im älteren BlackBerry-Browser nur 10 s lang ausgeführt und dann abgebrochen.

Browser halten teilweise eine grafische Repräsentation der letzten Darstellung einer Web-Seite im Speicher, um beispielsweise Tab-Wechsel oder Scroll-Bewegungen bei Smartphones zu beschleunigen. Daraus können, beim Anzeigen der darzustellenden Sekunde einer bereits geladenen Uhr, Zeigersprünge entstehen.

Erfolgt die akustische Zeitausgabe über ein Browser-Fenster, welches sich nicht direkt in der Anzeige befindet, beispielweise weil mehrere Fenster geöffnet sind oder der Browser durch ein anderes Programm verdeckt ist, kann es zu einer Verzögerung des Tonsignals kommen, da Browser teilweise ausgeblendete Umgebungen mit geringerer Priorität ausführen. Bei langsamen Systemen kann es außerdem durch die aufwendige Berechnung der Sprachausgabe in der Sekunde vor Beginn der Sprachausgabe zu minimalen Verzögerungen des Sekundenzeigers kommen.

Die Zeit zwischen dem Befehl zur Darstellung und der tatsächlichen grafischen Darstellung kann nicht gemessen werden. Sie ist jedoch bei einigen älteren Smartphones oder Laptops so lang, dass sie im direkten Vergleich mit einer genaueren dargestellten Uhr mit bloßem Auge zu erkennen ist. Aufgrund des rasanten Fortschritts und der begrenzten Lebensdauer von Endgeräten ist es jedoch nur eine Frage der Zeit, bis dieser Effekt nicht mehr relevant ist.

Die unter Kapitel II-C geforderte Integrität und Authentizität kann nur gewährleistet werden, wenn die Zertifikatsprüfung der verschlüsselten `https`-Verbindung sicher ist. Dies setzt eine Systemzeit voraus, die sich innerhalb des Gültigkeitszeitraums des Zertifikats bewegt. Angriffe auf die Systemzeit könnten daher die Integrität gefährden, ebenso wie Angriffe auf den Zertifikatsspeicher oder die Zertifikatsprüfroutinen im Browser.

VI. Zusammenfassung

Die unter <https://uhr.ptb.de> aufzurufende Uhr zeigt in Web-Browsern unmittelbar die gesetzliche deutsche Zeit an und berücksichtigt dabei sowohl die Sommerzeit als auch unregelmäßig anstehende Schaltsekunden. Anstehende Schaltsekunden werden visuell angezeigt, sobald sie vom Stratum-1-Zeitserver der PTB angekündigt werden.

Web-Browser sind in der Lage, mit Bordmitteln von HTML5 – also ohne Plugins, Erweiterungen, Flash oder Java – Uhren darzustellen, die eine gute Genauigkeit aufweisen. Wird die vorgestellte Uhr auf nicht überlasteten Anzeigegegeräten mit schneller Grafikausgabe und guter Internetanbindung aufgerufen, ist es möglich, die Zeit genauer darzustellen, als das menschliche Auge zu unterscheiden vermag. Dies gilt auch für viele mobile Kleingeräte, wobei allerdings einige Geräte dies wegen einer Anzeigeverzögerung nicht schaffen.

Zusätzlich wird die Zeitabweichung der lokalen Computer-Systemzeit zur offiziellen deutschen Zeit im Ziffernblatt dargestellt. Damit existiert eine einfache Möglichkeit, die Systemzeit des eigenen Computers zu kontrollieren.

Tabelle 1: Ergebnis der Vergleichsmessungen

Nr.	Gerät	Betriebssystem	Monitor	Browser	Unsicherheitsabschätzung +/- [ms]	Anzeigeverzögerung [ms]	
1	iPhone 6	iOS 12.4	Smartphone Display	Chrome	37	54	
2				Safari	43	41	
3	MacBook Pro Modell 2018	OS X 10.14.6	Retina 15", 2880 x 1800 Pixel, (Radeon Pro 560X)	Chrome	1	47	
4				Safari	1	48	
5				Firefox	1	63	
6			AGON 144Hz/1ms	Safari	2	25	
7				Chrome	2	30	
8				Firefox	2	48	
9				Firefox	1	64	
10	Lenovo ThinkPad X1 Gen3 Tablet	Windows 10	Tablet interner Monitor	Chrome	1	54	
11				Edge	1	71	
12			Gespiegelt auf HP ProDisplay P221	Firefox	1	56	
13				Chrome	1	55	
14				Edge	1	84	
15			AGON 240Hz/1ms	Edge	1	123	
16				Chrome	2	69	
17				Firefox	2	67	
18			LifeBook E-Serie DSEP046674	AGON 120Hz/1ms	Chrome	1	40
19					Chrome	n/a	57
20					Interner Monitor	Edge	3
21	Firefox	1				68	

Literatur

- [1] „Gesetz über die Einheiten im Messwesen und die Zeitbestimmung (Einheiten- und Zeitgesetz – EinZeitG)“, 2008. [Online]. Available: http://www.gesetze-im-internet.de/me_einhg/index.html
- [2] A. Bauch, S. Weyers, and E. Peik, „Wie tickt eine Atomuhr? – Realisierung der Sekunde von 1955 bis heute“, in *PTB-Mitteilungen*, PTB, 2006, vol. 126, no. 2, S. 17–34. [Online]. Available: https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/fachabteilungen/abteilung_4/4.4_zeit_und_frequenz/pdf/2016_PTB-Mitteilungen_Heft_2_Sekunde.pdf
- [3] D. Piester, P. Hetzel, and A. Bauch, „Zeit- und Normalfrequenzverbreitung mit DCF77“, in *PTB-Mitteilungen*. PTB, 2004, vol. 114, no. 4, S. 348. [Online]. Available: ftp://ftp.ptb.de/pub/time/DCF77Lit/PTBM_DCF77_version%20corr.pdf
- [4] P. Hetzel, T. Polewka, A. Söring, and R. Metzger, „Zeitübertragung europäischer Zeitinstitute über Telefonmodem und das öffentliche Telefonnetz“, in *Kleinheubacher Berichte*, 1997, vol. 40, S. 343–350.
- [5] D. Mills, U. Delaware, J. Martin, J. Burbank, and W. Kasch, „Network Time Protocol Version 4: Protocol and Algorithms Specification“, Internet Engineering Task Force (IETF), RFC 5905, 2010. [Online]. Available: <http://tools.ietf.org/html/rfc5905>
- [6] D. Reilly, H. Stenn, and D. Sibold, „Network Time Protocol Best Current Practices“, Internet Engineering Task Force (IETF), RFC 8633, 2019. [Online]. Available: <http://tools.ietf.org/html/rfc8633>
- [7] B. Haberman, D. Mills, and U. Delaware, „Network Time Protocol Version 4: Autokey Specification“, Internet Engineering Task Force (IETF), RFC 5906, 2010. [Online]. Available: <http://tools.ietf.org/html/rfc5906>
- [8] K. O’Donoghue, D. Sibold, and S. Fries, „New security mechanisms for network time synchronization protocols“, International IEEE Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement, Control, and Communication (ISPCS 2017), 2017. [Online]. Available: <https://www.internetsociety.org/wp-content/uploads/2017/10/ispcs-2017-time-security-final-copyright.pdf>
- [9] White Rabbit. [Online]. Available: <https://ohwr.org/projects/white-rabbit>
- [10] D. Piester, A. Bauch, J. Becker, T. Polewka, F. Riedel, D. Sibold, E. Staliuniene, K. Teichel, and W. Vajen, „PTB’s Time and Frequency Services 2017“, in 2018 Precise Time and Time Interval Meeting, Reston, Virginia, USA, 2018, S. 1–10.
- [11] „Uhrzeit“, Embedded in HTML, Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Dec. 2013, Uhr als Java-Plugin. [Online]. Available: <https://web.archive.org/web/20131214102816/http://www.ptb.de/cms/presseaktuelles/uhrzeitapplikation.html>
- [12] „The official U.S. time-clock“, Embedded in HTML, The National Institute of Standards and Technology (NIST), Nov. 2013, Uhr als Java-Plugin. [Online]. Available: <https://web.archive.org/web/20130726032934/https://time.gov/timezone.cgi?Mountain/d/-7/java>
- [13] A. N. Novick, P. R. Franchois, and M. A. Lombardi, „Time distribution using the world wide web“, National Institute of Standards and Technology (NIST), Boulder, Tech. Rep., 2005.
- [14] „Updates to ‚Moving to a Plugin-Free Web‘“, HTML Website, Oracle Corporation, Aug. 2016, Blog-Post regarding Java-Applet. [Online]. Available: <https://blogs.oracle.com/java-platform-group/updates-to-moving-to-a-plugin-free-web>
- [15] (2017, 7) Flash & the future of interactive content. [Online]. Available: <https://blogs.adobe.com/conversations/2017/07/adobe-flash-update.html>
- [16] „The Official NIST US Time Widget“, HTML Website, The National Institute of Standards and Technology (NIST), Nov. 2013, HTML5 for cross-platform devices. [Online]. Available: <http://time.gov/widget.html>
- [17] (2017, 08) Openlaszlo. [Online]. Available: <https://www.openlaszlo.org/>
- [18] R. Berjon, S. Faulkner, T. Leithead, E. D. Navara, E. O’Connor, S. Pfeiffer, and I. Hickson, „HTML5 – A vocabulary and associated APIs for HTML and XHTML“, W3C, Candidate Recommendation, Aug. 2013. [Online]. Available: <http://www.w3.org/TR/html5/>
- [19] E. Dahlström, P. Dengler, A. Grasso, C. Lilley, C. McCormack, D. Schepers, J. Watt, J. Ferraiolo, F. Jun, and D. Jackson, „Scalable Vector Graphics (SVG)“, W3C, Recommendation, Aug. 2011. [Online]. Available: <http://www.w3.org/TR/SVG11/>
- [20] Standard ECMA-262, 5th ed., Ecma International, Geneva, Jun. 2011, ISO/IEC 16262:2011.
- [21] „Node.js“, Joyent, Inc, Sep. 2017, v6.11.2 LTS. [Online]. Available: <http://nodejs.org/>
- [22] I. Fette and A. Melnikov, „The WebSocket Protocol“, Internet Engineering Task Force (IETF), RFC 6455, 2011. [Online]. Available: <http://tools.ietf.org/html/rfc6455>
- [23] R. Fielding, J. Gettys, J. Mogul, H. Frystyk, L. Masinter, P. Leach, and T. Berners-Lee, „Hypertext Transfer Protocol – HTTP“, Internet Engineering Task Force (IETF), RFC 2616, 1999. [Online]. Available: <http://tools.ietf.org/html/rfc2616>

- [24] P. Lubbers and F. Greco, „HTML5 Web Sockets: A Quantum Leap in Scalability for the Web,“ online, Kaazing Corporation, Tech. Rep., 2013. [Online]. Available: <http://www.websocket.org/quantum.html>
- [25] „HTML Living Standard,“ Apple, Google, Mozilla, Microsoft, Tech. Rep., Feb. 2019. [Online]. Available: <https://html.spec.whatwg.org/multipage/web-sockets.html#network>
- [26] G. Shires and H. Wennborg, „Web Speech API Specification,“ W3C, Unofficial Draft, Jun. 2014. [Online]. Available: <https://dvcs.w3.org/hg/speech-api/raw-file/tip/webspeechapi.html>
- [27] (2013, 12) jquery.js. JQuery JavaScript library. [Online]. Available: <http://jquery.com/>
- [28] „Zifferblätter für elektrische Uhren; Zahlen-Zifferblätter,“ Norm, Beuth, Berlin, Feb. 1974, DIN 41091-4.
- [29] The CA / Browser Forum, „Guidelines for the issuance and management of extended validation certificates,“ Tech. Rep., 2007. [Online]. Available: <https://cabforum.org/extended-validation/>
- [30] J. Mann, „High Resolution Time,“ W3C, Recommendation, Dec. 2012. [Online]. Available: <http://www.w3.org/TR/hr-time/>
- [31] IEEE Standard 1003.1-2001, The Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE), 2001, POSIX.1-2001.
- [32] M. Gutbrod, T. Klein, and D. Sibold, „WebSocket Subprotocol ‚Time‘“ Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Tech. Rep., 2017. [Online]. Available: <https://uhr.ptb.de/wst/paper>

Aktuelles aus der OIML (Internationale Organisation für das Gesetzliche Messwesen)

Bericht über die 54. Sitzung des CIML in Bratislava, Slowakei

Roman Schwartz¹, Peter Ulbig²

Oberstes Ziel der 1955 gegründeten *Organisation Internationale de Métrologie Légale* (OIML) mit 122 Mitgliedstaaten ist es, die Vielzahl der nationalstaatlichen Rechtsvorschriften und messtechnischen Prüfungen von Messgeräten international zu harmonisieren, für die gegenseitige Anerkennung von Prüfergebnissen in den Mitgliedsländern zu sorgen und damit technische Handelshemmnisse im Sinne der WTO (*World Trade Organization*) abzubauen. Betroffen sind viele eichpflichtige Messgeräte, wie zum Beispiel Waagen, Zapfsäulen, Gas-, Wasser- und Elektrizitätszähler aber auch Längenmessgeräte, Geschwindigkeitsmessgeräte zur Verkehrsüberwachung und Taxameter. Die OIML hat zurzeit 61 Mitgliedstaaten und 61 korrespondierende Mitgliedstaaten.

Die Kirgisische Republik ist seit diesem Jahr neues Korrespondierendes Mitglied.

Die 54. Sitzung des Internationalen Komitees für das gesetzliche Messwesen (CIML) fand vom 22. bis 25. Oktober in Bratislava statt. Gastgeber war das *Slovak Office of Standards, Metrology and Testing* (UNMS).

Das CIML tagt jährlich, wählt den Präsidenten und die beiden Vizepräsidenten, genehmigt den Strategie-, Prioritäten- und Aktionsplan, überwacht die technischen Arbeiten und das Internationale Büro für das gesetzliche Messwesen (BIML).

Es nahmen 172 Teilnehmer aus 52 Mitgliedstaaten, 11 korrespondierenden Mitgliedstaaten und internationalen Partnerorganisationen (Liaisons) teil. Zur deutschen Delegation gehörten neben den o. g. Autoren auch Herr Johann Fischer, Direktor des Landesamts für Mess- und Eichwesen Berlin-Brandenburg, und Frau Katharina Gierschke, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Darüber hinaus nahm Prof. Manfred Kochsiek als OIML-Ehrenmitglied und ehemaliger CIML-Präsident an den Sitzungen teil. Die wichtigsten Ergebnisse der Sitzung liefert der

diesjährig zum ersten Mal vom Büro der OIML erstellte zusammenfassende Bericht [2].

Alle Beschlüsse der 54. CIML-Sitzung können auf den Internetseiten der OIML aufgerufen werden [3].

Die wichtigsten Entscheidungen und Entwicklungen werden nachfolgend vorgestellt.

1. Zusammenarbeit mit internationalen Partnerorganisationen (Liaisons)

Gute Kontakte bestehen zwischen der OIML und anderen internationalen Organisationen wie dem europäischen Herstellerverband für Waagen CECIP und dem Internationalen Büro für Maß und Gewicht (BIPM). Besondere Erwähnung fand die erfolgreich durchgeführte grundlegende Revision des Internationalen Einheitensystems SI im Bericht des BIPM-Direktors, Dr. Milton.

Am Roundtable der regionalen Organisationen für gesetzliches Messwesen (RLMO) nahmen u. a. auch Vertreter von IAF (*International Accreditation Forum*), ILAC (*International Laboratory Accreditation Cooperation*), GSO (*Gulf Cooperation Council Standardization Organization*) und GULFMET (*Gulf Association for Metrology*) teil.

2. CEEMS -Workshop zum Thema „E-Learning“

Die 142 Teilnehmer des im Vorfeld der CIML-Sitzung stattfindenden Workshops kamen aus den OIML-Mitgliedstaaten, den korrespondierenden Mitgliedstaaten und den Regionalen Organisationen für gesetzliches Messwesen (RLMO). Vertreten waren auch *OIML Issuing Authorities*, *OIML-CS Utilizers*, Hersteller und internationale Partnerorganisationen (Liaisons).

In vier Sitzungen diskutierten die Teilnehmer über die Festlegung gemeinsamer Prioritäten für

¹ Hon.-Prof. Dr. Roman Schwartz, Vizepräsident der PTB, Präsident des „Internationalen Komitees für Gesetzliches Messwesen (CIML)“

² Dr. Peter Ulbig, Abteilungsleiter „Gesetzliche und Internationale Metrologie“, PTB



Bild1:
Diskussion unter
den Teilnehmern
CEEMS-Workshop
zum Thema
„E-Learning“

relevante OIML-Empfehlungen und -Dokumente.

In einem nächsten Schritt wird ein E-Learning-Konzept durch die *CEEMS Advisory Group* entwickelt, Expertenwissen soll gebündelt, die Zusammenarbeit mit anderen Organisationen ausgebaut und Finanzierungsquellen erschlossen werden.

3. OIML-Publikationen

Folgende überarbeitete OIML-Publikationen wurden verabschiedet:

- D 31 *General requirements for software-controlled measuring instruments*
- Revision B 6 *Directives for OIML technical work*
- R 117 *Dynamic measuring instruments for liquids other than water*

Folgende neue OIML-Publikationen wurden verabschiedet:

- D 33 *Reference standard liquids (Newtonian viscosity standard for the calibration and verification of viscometers)*
- D 34 *Conformity to Type (CTT) – Pre-market conformity assessment of measuring instruments*
- B 20 *Rules for the use of OIML logos*
- B 21 *Framework for OIML Training Centers and OIML Training Events*

Folgende neue Projekte wurden auf den Weg gebracht:

- Revision D 31 *General requirements for software controlled measuring instruments*
- Revision R 142 *Automated refractometers: Methods and means of verification*
- Revision B 11 *Rules governing the translation, copyright and distribution of OIML Publications*
- Neue Publikation R 87 *Prepackage template*
- Neue Publikation *Rotary viscometers – Determination of dynamic viscosity – Verification method*



Alle aktuellen Fassungen der OIML-Publikationen stehen auf den OIML-Webseiten zum Download zur Verfügung [4].

4. Strategisches Treffen „Task Group 2023“

Das Komitee stimmte wichtigen Entscheidungen zu, die bei der Sitzung der „Task Group 2023“ (März 2019, Paris) getroffen wurden. Ziel der Diskussionen der „Task Group 2023“ war die Klärung strategisch wichtiger Fragen; als Grundlage hierfür dienten die OIML-Convention und die Basispublikation B 15 *OIML Strategy*.

Folgendes wurde beschlossen:

- Kriterienkatalog zur Identifizierung von bis zu 10 Projekten und Publikationen mit hoher Priorität, die zukünftig stärker vom BIPM unterstützt werden
- Vorläufige Liste der „Top-10-Projekte und -Publikationen“
- Bessere Nutzung des OIML-Bulletins als Plattform zum Informationsaustausch über aktuelle Themen des gesetzlichen Messwesens; hierzu Ermittlung von Mentoren für bestimmte Ausgaben des OIML-Bulletins
- Organisation von *Convener Trainings* (u. a. stattgefunden im Juli, PTB-Berlin) zur Schulung der *Convener* im Bereich der Projektgruppenarbeit in der OIML
- Stärkere Zusammenarbeit mit dem BIPM; eine *Joint task group* soll die Möglichkeiten hierfür prüfen.

5. OIML-Zertifizierungssystem (OIML-CS)

Cornelis Oosterman, Vorsitzender des *OIML-CS Management Committee* (MC) berichtete über die Aktivitäten im OIML-Zertifizierungssystem und über die MC-Sitzung, die im März 2019 stattgefunden hat. Er betonte die Wichtigkeit einer verstärkten Teilnahme am OIML-Zertifizierungssystem und berichtete über Maßnahmen, die das System zukünftig noch bekannter machen sollen.

6. *Countries and Economies with Emerging Metrology Systems* (CEEMS)

Das CIML sprach sich für eine angemessene Überarbeitung der für die Arbeit der *Advisory Group* geltenden *Terms of Reference* aus (B 19 *Terms of Reference for the Advisory Group on matters concerning Countries and Economies with Emerging Metrology Systems*).

7. Personalia und Ehrungen

Dr. Bob Joseph Mathew (Schweiz) wurde mit sofortiger Wirkung für eine Amtszeit von sechs Jahren zum (zweiten) Vizepräsidenten des CIML gewählt. Dr. Peter Ulbig wurde mit sofortiger Wirkung für drei Jahre zum stellvertretenden Vorsitzenden der *CEEMS Advisory Group* ernannt.

OIML-Medaillen für besondere Verdienste um das internationale gesetzliche Messwesen wurden an Corinne Lagauterie (Frankreich), Dr. Jerzy Borzyminski (Polen) und Dr. Yukinobu Miki (Japan) verliehen. Einen *Letter of appreciation* für wichtige Beiträge zum internationalen gesetzlichen Messwesen erhielt Cornelis Oosterman in Anerkennung seiner Verdienste als Vorsitzender des OIML-CS Management Committee.

Bild 2:
Die Teilnehmer der 54. Sitzung des Internationalen Komitees für Gesetzliches Messwesen (CIML)



8. Termine

Die 55. CIML-Sitzung und 16. Internationale Konferenz werden im Oktober 2020 in Suzhou, China stattfinden. Gastgeberland für die 56. CIML-Sitzung wird Russland sein.

Weitere OIML-Veranstaltungen und Termine finden sich auf der OIML-Webseite unter [5].

9. Referenzen

- [1] <https://www.oiml.org/en>
(letzter Aufruf: 12.11.2019)
- [2] <https://www.oiml.org/en/structure/ciml/pdf/54-ciml-summary-report.pdf> (letzter Aufruf: 12.11.2019)
- [3] <https://www.oiml.org/en/structure/ciml/pdf/54-ciml-resolutions-english.pdf>
(letzter Aufruf: 12.11.2019)
- [4] <https://www.oiml.org/en/publications/introduction>
(letzter Aufruf: 12.11.2019)
- [5] <https://www.oiml.org/en/events/calendar>
(letzter Aufruf: 12.11.2019)

Empfangssystem für glasfasergeführtes ultrapräzises Frequenzsignal

Eine PTB-Erfindung ermöglicht die Übertragung des Signals eines ultrastabilen Single-Frequency-Lasers über große Entfernungen in normalen Telekommunikationsglasfasern. Die Erfindung löst das Problem des Anschlusses einer großen Anzahl von Kunden an eine einzige Faserstrecke. Die Erfindung stellt zugleich einen bedeutenden Schritt zur Übertragung des Zeitsignals einer optischen Uhr dar (Atomuhr aus der Steckdose).

Technische Beschreibung

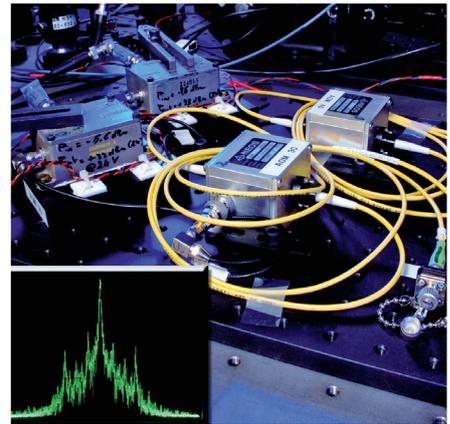
Eine optische Frequenz wird über eine lange Glasfaserleitung übertragen und kann jetzt – trotz der zu erwartenden Störungen in Phase, Mittelfrequenz und Polarisation – an jedem Ort der Leitung abgetastet und auf die Ursprungsfrequenz ν_0 des PTB-Normals rückgeführt werden. Dies gelingt, indem beide Signale, sowohl das vorwärtslaufende als auch das rückwärtslaufende, zu einem Schwebungssignal vereinigt werden. Ein nachfolgender einfacher, analoger Algorithmus erzeugt eine Korrekturfrequenz $\Delta\nu$. Ein akustooptischer Modulator (AOM) überlagert nun das gestörte Signal mit dieser Korrekturfrequenz und regeneriert das gewünschte PTB-Frequenzsignal ν_0 in hoher Präzision. Im Empfänger werden einfache Standardkomponenten der Telekommunikationstechnik eingesetzt. Nachfolgende Empfangsstationen werden durch die Auskopplung am Faserkoppler einer einzelnen Station nicht gestört. In Punkt-zu-Punkt-Experimenten ist die Übertragungstechnik über Wegstrecken von mehr als 100 km Länge nachgewiesen worden.

Wirtschaftliche Bedeutung

Empfänger dieser Art werden im Bereich der Lasertechnik bei der Kalibrierung von höchstauflösenden Spektrometern und der Feinabstimmung von lokalen Referenzlasern auf Empfängerseite benötigt. Kombiniert mit einem lokalen Frequenzkammgenerator können weitere präzise Frequenzen, auch im Mikrowellenbereich, erzeugt werden. Im Bereich der chemischen Analytik mit Höchstpräzisionslasern kann das System mittelbar zur Verifikation der Nachweisempfindlichkeit und Qualitätssicherung dienen.

Entwicklungsstand

Unter DE 10 2008 062 139 B4 wurde ein Patent erteilt. Das Verfahren ist seit mehreren Jahren zuverlässig im Einsatz. Das optische Signal läuft dazu über eine 146 km lange Glasfaserstrecke PTB-Hannover-PTB.



Die Erfindung ermöglicht den Anschluss vieler Empfänger an eine einzige Glasfaserstrecke. Jeder Empfänger ist in der Lage, trotz Übertragungsstörungen das ursprüngliche hochpräzise Frequenzsignal zu regenerieren.

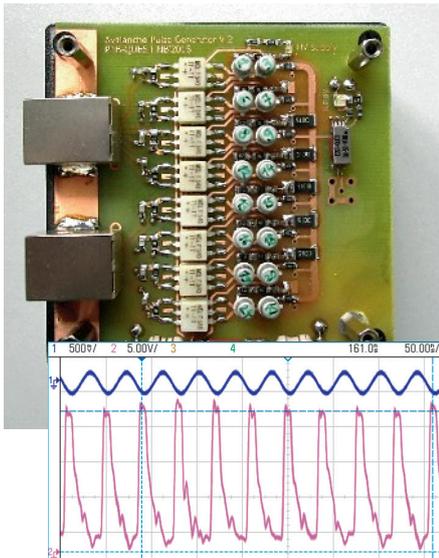
Vorteile:

- Bereitstellung des Frequenzsignals mit einer Bandbreite um 1 Hz in einem normalen Glasfaserkabel über große Entfernungen
- Auf Normal rückführbar
- Mehrfache Abtastung an einem beliebigen Ort
- Verteilung des Frequenzsignals in lokalen Netzen über einige hundert Meter mit geringen Qualitätseinbußen

Ansprechpartner:

Dr. Bernhard Smandek
Beauftragter für Technologietransfer
Telefon: +49 531 592-8303
Telefax: +49 531 592-69-8303
E-Mail: bernhard.smandek@ptb.de

Dr. Gesine Grosche
Arbeitsgruppe
Frequenzübertragung mit Glasfasern



Oben: Foto der Pulsgeneratorplatine.
Unten: Ausgangsspannung des Pulsge-
nerators in 50 Ω (rosa) und 25 MHz RF-Ein-
gangssignal (blau).

Vorteile:

- Hohe Pulswiederholrate bei Spannungen im Bereich von mehr als 10 Volt
- Synchronisierbar auf HF-Signal
- Schaltungslösung beliebig skalierbar

Ansprechpartner:

Andreas Barthel
Innovationsmanager
und Patentreferent
Telefon: +49 531 592-8307
Telefax: +49 531 592-69-8307
E-Mail: andreas.barthel@ptb.de

PD Dr. Tanja E. Mehlstäubler
QUEST-Institut

Impulsgeneratorschaltung mit hoher Pulswiederholrate und Synchronisation auf ein externes HF-Signal

Für vielfältige Anwendungen in der Ansteuerung von z. B. elektrooptischen Geräten, wie Diodenlasern oder Pockelszellen, werden heutzutage Pulsgeneratoren benutzt, die sehr kurze Pulse (z. B. 10 ns) und Spannungen von mehreren 10–100 Volt erzeugen. Deren Wiederholrate ist derzeit auf einige MHz begrenzt. Die neue PTB-Erfindung erhöht durch einen speziellen Schaltungsaufbau die Pulswiederholrate erheblich: Mehrere identische Pulsgeneratoren werden in einer festen Abfolge periodisch eingesetzt und durch eine separate Einheit angesteuert. Außerdem ist eine Synchronisation auf ein externes Hochfrequenz-Signal möglich, das beliebig wählbar ist und auf die Phasenlage abgestimmt werden kann.

Technische Beschreibung

Für den neuen Schaltungsaufbau der PTB werden mehrere Bipolartransistoren kontrolliert im Lawinendurchbruchregime betrieben. Die dabei erzeugte Wärme (bzw. Verlustleistung) verteilt sich auf einzelne Impulsgeneratoren. Die durchschnittlich verbrauchte Leistung jedes Generators kann so auf einem sicheren Pegel gehalten werden, um eine hohe Gesamtpulswiederholrate zu erreichen. Auf diese Weise können Stromimpulse im Nanosekunden-Bereich bei höheren Spannungen von über 10 Volt erzeugt werden (s. Bild). Diese Schaltungslösung ist beliebig durch das Ergänzen von neuen Generatoren erweiterbar, um die gewünschte Pulswiederholrate zu erhalten.

Außerdem generiert die Schaltung Impulssequenzen, die mit einem externen Hochfrequenzsignal (HF-Signal) synchronisierbar sind. Das ermöglicht die Wahl von spezifischen FPGAs und einer internen zweiten Uhr.

Wirtschaftliche Bedeutung

Hohe Pulswiederholraten werden für vielfältige Anwendungen in der Ansteuerung von z. B. elektrooptischen Geräten, wie Diodenlasern, Pockelszellen, elektrooptischen Modulatoren oder aber auch Bildverstärkern, genutzt.

Entwicklungsstand

Das Verfahren wurde ausführlich getestet. Ein Funktionsmuster ist vorhanden. Ein deutsches Patent unter der Nummer DE10 2017 125 386.6 wurde erteilt. Bei Interesse bieten wir Ihnen an, dieses Funktionsmuster in gemeinsamen Projekten weiterzuentwickeln oder direkt zu lizenzieren.

Herstellung von mehrlagigen Atom- und Ionenfallen

Mikrostrukturierte Neutralatom- und Ionenfallen stellen eine Plattform für Quantensensoren dar und eignen sich zur Implementierung zukünftiger Quantencomputer. Sie speichern neutrale und geladene Atome (Ionen) über ihrer Oberfläche durch inhomogene magnetische oder elektrische Felder. Forscher der PTB haben mehrere Verfahren für die Herstellung von Schicht-Strukturen entwickelt, die den hohen Anforderungen von Mehrlagen-Atomfallen gerecht werden. Auf Grundlage dieser Verfahren ist die Vielfalt in Form, Funktionalität und Einsatzszenario dieser Mikrostrukturen sehr groß.

Technische Beschreibung

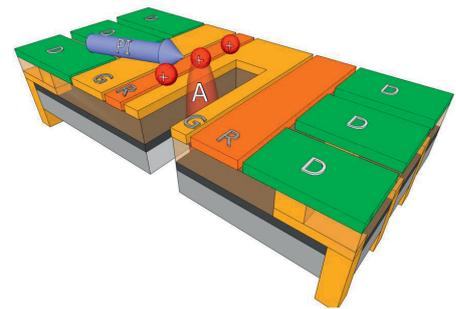
Eine wesentliche Voraussetzung, um die Anzahl der kontrollierten Atome und Qubits zu erhöhen, ist eine Mikrostruktur, welche das Anlegen einer entsprechenden Menge an Signalen ermöglicht, z.B. durch Integrierung von Mikrowellen-Leitungen. Dies erfolgt durch überlagerte Strukturen, ähnlich wie bei einer mehrlagigen Leiterplatte. Der PTB-Aufbau besteht aus einem Satz von dicken metallischen Leiter-schichten, die durch ein Dielektrikum voneinander getrennt sind und selektiv durch Durchkontaktierungen miteinander verbunden werden. Die Anzahl an metallischen Schichten ist im Prinzip unbegrenzt, da jede dieser Lagen eine hochgenaue globale Planarisierung aufweist. Der Prozess verwendet nur Materialien, die mit den strengen Anforderungen von Atom- und Ionenfallen durch das umgebende Ultrahochvakuum sowie mit Tieftemperatur-Betrieb kompatibel sind; weiterhin sind die Hochfrequenzeigenschaften der Strukturen hervorragend.

Wirtschaftliche Bedeutung

Das Verfahren ist auf den Gebieten der mikrostrukturierten Ionen- und Atomfallen, der Quanteninformationsverarbeitung und der Quantensensorik einsetzbar. Es eignet sich sowohl für die Herstellung großer Zahlen von Proben als auch für anwendungsspezifische Muster in Zusammenarbeit mit Dritten.

Entwicklungsstand

Das Verfahren wurde ausführlich in der PTB getestet. Erste Ionenfallen wurden auf Basis des Herstellungsverfahrens in der PTB produziert. Eine deutsche Patentanmeldung ist anhängig. Bei Interesse bieten wir Ihnen an, in gemeinsamen Projekten diese Erfindung zu einem individuellen Funktionsmuster weiterzuentwickeln oder direkt zu lizenzieren.



Mehrlagen (Atom) Ionenfalle mit integrierten Durchkontaktierungen und „Ladeloch“, durch das ein Atomstrahl (A) transmittiert wird. Aus diesem können einzelne Ionen von der Rückseite des Chips erzeugt werden.

Vorteile:

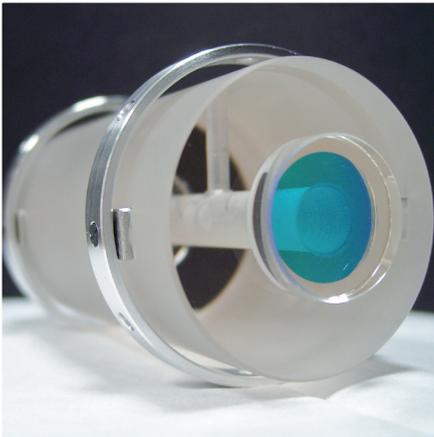
- Skalierbarer Aufbau für vielseitigen Einsatz
- Fangen von neutralen wie geladenen Atomen & Molekülen
- Robust im Ultrahochvakuum, Temperaturbereich von 4 K bis mehr als +250 °C

Ansprechpartner:

Andreas Barthel
Innovationsmanager
und Patentreferent
Telefon: +49 531 592-8307
Telefax: +49 531 592-69-8307
E-Mail: andreas.barthel@ptb.de

Dr. Amado Bautista-Salvador
Institut for
Experimental Quantum Metrology
(Quest)

PTB-Nummer 0460



Ultrastabiler optischer Resonator mit einem Längenausdehnungskoeffizienten von Null bei ca. 20 °C

Vorteile:

- Einsatz von Spiegelmaterialien mit geringerem thermischen Rauschen
- Kompensation der durch Temperaturschwankungen verursachten Spiegeldeformation
- Relative Längenstabilität von 10^{-16} möglich
- Kostengünstige Temperaturstabilisierung auf 20 °C

Spiegelbauteil für ultrastabile Resonatoren

Ein neuartiges Spiegel-Konzept für Fabry-Perot-Resonatoren führt durch eine entscheidende Verringerung des thermischen Rauschens zu einer höheren Frequenzstabilität des Resonators bei geringerem Aufwand für die Temperaturstabilisierung. Die Kombination aus Design und Materialauswahl führt zu einer relativen Frequenzstabilität im Bereich von 10^{-16} . Dabei lässt sich das Spiegelbauteil einfach und kostengünstig fertigen.

Technische Beschreibung

Das neue Spiegelement der PTB kombiniert eine extrem hohe Längenstabilität bei ca. 20 °C mit geringem thermischen Rauschen. Bisher bestanden sowohl die Spiegel als auch der Abstandshalter von ultrastabilen Fabry-Perot-Resonatoren aus Ultra-Low-Expansion-Glas (ULE), das bei ca. 20 °C einen Nulldurchgang in seiner Längenausdehnung aufweist. Bei der PTB-Lösung wird an der Rückseite eines Quarzglasspiegels ein Ring aus ULE-Glas angebracht. Dieser wirkt der Deformation des Spiegels entgegen, und der Nulldurchgang der Längenausdehnung des Resonators befindet sich wieder bei 20 °C. Damit sind Fabry-Perot-Resonatoren möglich, die bei Zimmertemperatur betrieben werden können und dennoch ein deutlich kleineres thermisches Rauschen aufweisen.

Wirtschaftliche Bedeutung

Der neuartige Spiegel kann in Fabry-Perot-Resonatoren eingesetzt werden, die zur Stabilisierung von Lasersystemen dienen. Solche Lasersysteme erreichen eine relative Frequenzstabilität von bis zu 10^{-16} . Frequenzstabile Laser werden zur Realisierung optischer Uhren, in der Nachrichtentechnik zum Übermitteln von ultrastabilen Frequenzen und im Bereich der Ultrapräzisions-Spektroskopie benutzt.

Entwicklungsstand

Für das Spiegelbauteil wurde unter DE 10 2008 049 367 B3 ein Patent erteilt.

Ansprechpartner:

Dr. Bernhard Smandek
 Beauftragter für Technologietransfer
 Telefon: +49 531 592-8303
 Telefax: +49 531 592-69-8303
 E-Mail: bernhard.smandek@ptb.de

Dr. Thomas Legero
 Fachbereich
 Quantenoptik und Längeneinheit

Effiziente Optik eines Faser-Brillouin-Verstärkers mit erleichterter Automatisierbarkeit

Für die Übertragung von ultrastabilen optischen Frequenzen über lange Glasfaserstrecken werden bidirektionale Verstärker benötigt, um optische Verluste von etwa 20 dB pro 100 Kilometer zu kompensieren. Der neue PTB-Aufbau eines Faser-Brillouin-Amplifier-Moduls (FBA) verbessert die Einkopplung des Pumpasers und reduziert die Signalverluste innerhalb des Aufbaus. Mithilfe eines zusätzlichen Monitorports kann jetzt die Polarisation zwischen Signal und Pumpaser präzise justiert und permanent überwacht werden.

Technische Beschreibung

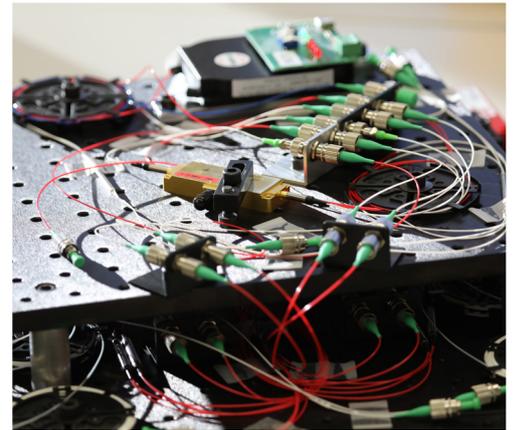
Faser Brillouin Verstärker (FBA) ermöglichen hohe Verstärkungen von mehr als 45 dB, benötigen dabei jedoch eine genaue Justage des Pumpasers zum Signal bezüglich Frequenz und Polarisation. In den bisherigen FBAs kann die Polarisation des Pumpasers nur grob durch Maximierung des Signals durch manuelle Justage eingestellt werden. Der neue PTB-Aufbau ermöglicht die Detektion einer Fehlanpassung der Polarisation durch einen zusätzlichen Monitorport. Einer Minimierung des Monitorportsignals entspricht hierbei die Optimierung der Polarisations-einstellung was eine verbesserte Automatisierbarkeit ermöglicht, und damit eine verbesserte Ausfallsicherheit im Langzeitbetrieb. Gleichzeitig werden die internen optischen Verluste für das Signal um 2 dB und für die Einkopplung des Pumpasers um 3 dB reduziert. Der Aufbau kommt außerdem mit einem einzigen Polsteller je Glasfaser aus, was dem Verstärker zu einem robusteren Dauerbetrieb verhilft.

Wirtschaftliche Bedeutung

Die Technik ist im Bereich optische Frequenzübertragung mittels Glasfasern europaweit von großer Relevanz und dient hier insbesondere der Verbesserung der Ausfallsicherheit bei der Frequenzübertragung und der Erhöhung der übertragenen Signalleistung. Die Technologie unterstützt Anwendungen mit Bedarf an Übertragung hochpräziser Frequenzen, wie z. B. dem Vergleich optischer Uhren über große Entfernungen.

Entwicklungsstand

Das System wurde ausführlich getestet. Ein Funktionsmuster ist vorhanden. Bei Interesse bieten wir Ihnen an, in gemeinsamen Projekten diese Erfindung weiterzuentwickeln oder direkt zu lizenzieren. Ein deutsches Patent ist unter DE 10 2017 128 596 B3 erteilt.



Vorteile:

- Auffinden der korrekten Polarisation
- Robuste und automatisierbare Polarisationskontrolle
- Besseres SNR für kaskadierte Verstärkersysteme

Ansprechpartner:

Dr. Bernhard Smandek
Beauftragter für Technologietransfer
Telefon: +49 531 592-8303
Telefax: +49 531 592-69-8303
E-Mail: bernhard.smandek@ptb.de

Dr. Alexander Kuhl
Arbeitsgruppe
Frequenzübertragung mit Glasfasern

PTB-Nummer 0466

Impressum

Die PTB-Mitteilungen sind metrologisches Fachjournal der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin. Als Fachjournal veröffentlichen die PTB-Mitteilungen wissenschaftliche Fachaufsätze zu metrologischen Themen aus den Arbeitsgebieten der PTB. Die PTB-Mitteilungen stehen in einer langen Tradition, die bis zu den Anfängen der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt (gegründet 1887) zurückreicht.

Herausgeber

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)

ISNI: 0000 0001 2186 1887

Postanschrift:

Postfach 33 45,
38023 Braunschweig

Lieferanschrift:

Bundesallee 100,
38116 Braunschweig

Redaktion/Layout

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit, PTB

Sabine Siems (Satz, Lektorat)

Dr. Dr. Jens Simon (verantwortlich)

Telefon: (05 31) 592-82 02

Telefax: (05 31) 592-30 08

E-Mail: sabine.siems@ptb.de

Erscheinungsweise und Copyright

Die PTB-Mitteilungen erscheinen viermal jährlich. Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil dieser Zeitschrift darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages vervielfältigt oder verbreitet werden. Unter dieses Verbot fällt insbesondere die gewerbliche Vervielfältigung per Kopie, die Aufnahme in elektronische Datenbanken und die Vervielfältigung auf CD-ROM und in allen anderen elektronischen Datenträgern.

Printed in Germany ISSN 0030-834X

Die fachlichen Aufsätze aus dieser Ausgabe der PTB-Mitteilungen sind auch online verfügbar unter:
doi: 10.7795/310.20190499



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt, das nationale Metrologieinstitut, ist eine wissenschaftlich-technische Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie.



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt, das nationale Metrologieinstitut, ist eine wissenschaftlich-technische Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie.



Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin
Nationales Metrologieinstitut

Bundesallee 100
38116 Braunschweig

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit

Telefon: 0531 592-3006
Fax: 0531 592-3008
E-Mail: presse@ptb.de
www.ptb.de