Zeit- und Frequenzverbreitung mit DCF77: 1959 – 2009 und darüber hinaus

Andreas Bauch[1], Peter Hetzel[2] und Dirk Piester[3]

Zusammenfassung

Vor fünfzig Jahren, am 1. Januar 1959, begannen offiziell die Zeitsignal- und Normalfrequenzaussendungen mit dem Langwellensender DCF77– der Anlass für diesen Aufsatz. Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) war von Anfang an entscheidend in diese Aussendungen involviert. In ihrem Auftrag werden heute die Sendeeinrichtungen von der Media Broadcast GmbH betrieben, in der Nachfolge der Deutschen Bundespost und der Deutschen Telekom AG. Schwerpunkt dieses Beitrages ist die Beschreibung des aktuellen, im Laufe der Jahre mehrfach geänderten Sendeprogramms und der gegenwärtigen Eigenschaften der gesendeten Signale. Außerdem wird ein Überblick gegeben über die zur Zeit verwendeten technischen Einrichtungen zur Aussendung und Überwachung. Die Vorzüge von DCF77, große Reichweite und Empfang mit preiswerten Empfängern, haben dazu geführt, dass DCF77-Funkuhren für die Versorgung Deutschlands mit genauer Zeit millionenfach zum Einsatz kommen. So ist DCF77 inzwischen zu einem wichtigen Bestandteil der steuerfinanzierten Infrastruktur unseres Landes geworden.

Summary

50 years have passed since 1959 when the DCF77 transmitter was officially used for the first time for disseminating standard frequency and time signals according to German legal time. This jubilee was motivation to write this text. The Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) has been involved from the beginning.The operation of the transmitting facilities is nowadays in the hands of Media Broadcast GmbH, in sequence with German Bundespost and Deutsche Telekom AG. This text is primarily devoted to the documentation of the current signal contents, its supervision and its properties. The advantages of DCF77 reception have led to its large popularity so that it has become an important part of the state-funded infrastructure in Germany.

1 Anlass für diesen Beitrag

Im Heft 5 von 1959 der Nachrichtentechnischen Zeitschrift (NTZ) gab die PTB die offizielle Aufnahme der Aussendung von Zeitzeichen und Normalfrequenz über den Langwellensender DCF77 bekannt. Damit begann eine neue Ära der Aussendung derartiger Signale in Deutschland und Europa. In den sechziger Jahren erfolgten die DCF77-Zeitsignal- und Normalfrequenzaussendungen allerdings noch nicht ganztägig, sondern entsprechend einem jeweils etwa dreistündigen Tag- und Nachtprogramm. Die Erweiterung der Sendezeit auf 24-stündigen Dauerbetrieb ab dem 1. September 1970 ging einher mit einer Vereinfachung des Sendeprogramms für eine breitere Nutzung. Besonders aber die Aufnahme der kontinuierlichen Aussendung von kodierter Zeitinformation ab Juni 1973 führte zu der großen Akzeptanz der von DCF77 verbreiteten Zeitinformation und war die Voraussetzung für die Erfolgsgeschichte der Funkuhr in Deutschland und Europa. So wird die Zahl der in den Jahren 2000–2008 produzierten DCF77-Empfängern auf ca. 100 Millionen geschätzt, wobei der weitaus größte Anteil in die Kategorie „Funkuhr“ fällt.

Dieser Beitrag ist eine aktualisierte Version einer früheren, zusammenfassenden Darstellung [1] und erscheint aus gegebenem Anlass zusammen mit Aufsätzen von Dr. Johannes Graf [2] und Klaus Katzmann [3]. Er stützt sich auf frühere Arbeiten eines der Autoren [4, 5], und nicht jeder Entwicklungsschritt des DCF77 wird mit dem zum Zeitpunkt seiner Einführung aktuellen Literaturzitat belegt. Weiterführende Literatur wird nur dann angegeben, wenn sie wesentliche über die hier beschriebenen Eigenschaften der DCF77-Aussendung hinausgehende Informationen enthält. Die drei von W. Hilberg anlässlich der „Funkuhrentagungen“, die an der Technischen Universität Darmstadt und der PTB zwischen 1983 und 1993 stattfanden, herausgegebenen Tagungsbände [6] bieten eine reiche Auswahl an Originalarbeiten und Quellenangaben, an Hand derer insbesondere die Entwicklung der Funkuhr verfolgt werden kann. Auf von DCF77-Nutzern immer wieder gestellte Fragen zur Ausbreitung und zum Empfang der DCF77-Signale versuchen

[1] Dr. Andreas Bauch, Arbeitsgruppe „Zeitübertragung“, E-Mail: andreas.bauch@ptb.de

[2] Dr. Peter Hetzel, bis 2002 Fachbereich „Zeit und Frequenz“

[3] Dr. Dirk Piester, Arbeitsgruppe „Zeitübertragung“, E-Mail: dirk.piester@ptb.de

die Autoren durch einige Ergänzungen gegenüber [1] etwas ausführlicher einzugehen.

Die Aufgabe der Verbreitung der gesetzlichen Zeit wird heute von der Arbeitsgruppe Zeit- und Frequenzübertragung im Fachbereich Zeit und Frequenz der PTB wahrgenommen (Internet: http://www.ptb.de/zeit). Unter der angegebenen Internetadresse findet man u. a. neben den Informationen zum DCF77-Zeitdienst auch Hinweise auf die beiden anderen Zeitdienste der PTB, den Telefon-Zeitdienst mit Modem über das öffentliche Telefonnetz sowie den NTP-Zeitdienst über das Internet, auf die aber in diesem Beitrag nicht eingegangen werden soll.

Dieser Aufsatz ist wie folgt gegliedert: Zunächst werden in den Kapiteln 2 und 3 die wesentlichen Begriffe zur Zeitbestimmung und Zeitübertragung erklärt und die Grundlagen der gesetzlichen Zeit und des internationalen Zeitsystems dargestellt. Nach einem historischen Abriss über die Entwicklung des DCF77 in Kapitel 4 werden die aktuellen Eigenschaften des Senders DCF77 beschrieben (Kapitel 5 und 6). Auf einige grundlegende Fragen der Ausbreitung und des Empfanges von DCF77-Signalen wird in den Kapiteln 7 und 8 eingegangen. Dann wird knapp die Entwicklung der Funkuhr (Kapitel 9) nachgezeichnet, und die dem DCF77 ähnlichen Zeitdienste auf Langwelle in anderen Ländern der Erde werden vorgestellt (Kapitel 10). Zusammenfassend werden die Vorzüge des Empfangs von Langwellensignalen diskutiert.

2 Wie lange? Wie oft? Wann?

„Zeitmessung“ ist heute aus dem privaten Alltag ebenso wenig weg zu denken wie aus vielen Bereichen von Wissenschaft und Technik. Der Begriff wird für die Messung der Dauer von Zeitintervallen (Stichwort: Stoppuhr), für die Registrierung der Häufigkeit von Ereignissen während eines Zeitintervalls (Stichwort: Frequenz) und für die Datierung von Ereignissen auf einer Zeitskala (Stichwort: Uhrzeit) verwendet. Ein kleiner Einschub an dieser Stelle: Umgangssprachlich heißt es, die Uhr geht falsch oder geht richtig. Zeigen zwei Uhren verschiedene Uhrzeit an, so ist dies zunächst einmal kein Maß für ihren **Gang** sondern ihre **Standdifferenz**. Beträgt z. B. die Standdifferenz zweier Quarzuhren aktuell 10 s und 24 Stunden später 11 s, so unterscheiden sich diese Uhren im Gang um eine Sekunde pro Tag. Die besten Atomuhren unterscheiden sich in ihrem Gang um wenige milliardstel Sekunden pro Tag. Später wird von Ganginstabilität die Rede sein, ein Maß dafür, wie sich die Gänge von Uhren im Verlauf der Zeit ändern. Die gesamte Thematik, insbesondere auch der historische Wechsel von der astronomischen zur atomphysikalischen Zeitbestimmung, wurde mehrfach an anderer Stelle behandelt [7–11].

Die Datierung von Ereignissen und die Koordinierung der vielfältigen Geschehnisse in einer modernen Gesellschaft werden als so wichtig erkannt, dass in vielen Staaten durch Gesetz geregelt ist, wie die gültige Uhrzeit anzugeben ist, so auch in Deutschland. Grenzüberschreitender Verkehr und Kommunikation verlangen, dass die so festgelegten Uhrzeiten der Länder aufeinander abgestimmt sind. Die Grundlage hierfür legte einst die Washingtoner Standardzeit-Konferenz, auf der die Lage des Nullmeridians und das System der 24 Zeitzonen zu je 15° geographischer Länge festgelegt wurden. Dies geschah im Oktober 1884, also vor 125 Jahren, ein weiteres „Zeitjubiläum“ in 2009!

Seit dem 1. April 1893 gilt in Deutschland (bzw. damals im Deutschen Reich) die mittlere Sonnenzeit am fünfzehnten Längengrad Ost als einheitliche Zeit, wie das in Anhang 1 abgebildete Reichsgesetzblatt besagt. Mit dem Zeitgesetz aus dem Jahr 1978 wurde diese Regelung in das „Atomzeitalter“ überführt und im Jahr 2008 mit anderen zu dem Einheiten- und Zeitgesetz (EinhZeitG) zusammengefasst (Anhang 2).

Für die Zählung der Tage wird in Deutschland und vielen Ländern der Erde der Gregorianische Kalender verwendet. Nützliche Festlegungen zu Zeit, Kalender, Wochennummerierung und Schreibweise von Tagesdatum und Uhrzeit findet man in der Norm ISO 8601 sowie in der entsprechenden deutschen bzw. europäischen Norm DIN EN 28601. Hier sollen nur vier Details angeführt werden, die immer wieder Grund zu Fragen geben. Die genannte Norm legt u. a. fest:

- Ein Tag beginnt mit dem Zeitpunkt 00:00 Uhr und endet mit dem Zeitpunkt 24:00 Uhr. Die Zeitpunkte 00:00 Uhr eines beginnenden Tages und 24:00 Uhr des zu Ende gehenden vorherigen Tages sind identisch. Zur Protokollierung von exakt um Mitternacht stattfindenden Ereignissen wird für laufende oder beginnende Vorgänge die Zeit 00:00 Uhr und für zu Ende gehende Vorgänge 24:00 Uhr empfohlen.
- Der Montag ist der erste Tag der Kalenderwoche.
- Die erste Kalenderwoche eines Jahres ist diejenige, in die mindestens **vier** Tage des neuen Jahres fallen, gleichbedeutend, dass in dieser Woche Eins des Jahres der **erste Donnerstag** des Jahres liegt.
- Schaltjahre sind diejenigen Jahre, deren Jahreszahl ohne Rest durch vier teilbar ist. Ist die Jahreszahl jedoch durch 100, nicht aber durch 400 ohne Rest teilbar, so ist das Jahr kein Schaltjahr sondern ein Gemeinjahr, der Februar dieses Jahres hat dann 28 Tage. Das Jahr 2000 war also ein Schaltjahr, das Jahr 2100 wird keines sein.

3 Die gesetzliche Zeit für Deutschland

3.1 Gesetzliche Grundlagen

Nach der Neudefinition der Sekunde auf atomphysikalischer Basis im Jahr 1967 musste auch die Regelung für die in Deutschland gültige Zeit angepasst werden. Das geschah mit dem Zeitgesetz von 1978. Hierin wird die PTB, die schon mit der Darstellung und Verbreitung der Einheiten im Messwesen betraut war, beauftragt, die für das öffentliche Leben in Deutschland maßgebende Uhrzeit darzustellen und zu verbreiten. Als gesetzliche Zeit wurden die mitteleuropäische Zeit (MEZ) oder, im Falle ihrer Einführung, die mitteleuropäische Sommerzeit (MESZ) festgelegt. MEZ und MESZ werden von der in der PTB realisierten koordinierten Weltzeit UTC (Universal Coordinated Time, siehe nächster Abschnitt) unter Hinzufügen von einer bzw. zwei Stunden abgeleitet:

$$\mathrm{MEZ(D)} = \mathrm{UTC(PTB)} + 1\mathrm{h},$$
$$\mathrm{MESZ(D)} = \mathrm{UTC(PTB)} + 2\mathrm{h}.$$

Das Zeitgesetz erteilt der Bundesregierung daneben die Ermächtigung, durch Rechtsverordnung zwischen dem 1. März und dem 31. Oktober eines Jahres die Sommerzeit einzuführen. Die Termine für Beginn und Ende der MESZ werden von der Bundesregierung entsprechend der jeweils gültigen Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates der Europäischen Union festgelegt und im Bundesgesetzblatt bekannt gemacht. Auf Grund der letzten Sommerzeitverordnung vom 12. Juli 2001 (Anhang 3) gilt zukünftig – bis auf Widerruf – Sommerzeit vom letzten Sonntag des März bis zum letzten Sonntag des Oktobers eines Jahres. Das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie publiziert jeweils im Voraus die Sommerzeitdaten der folgenden Jahre (Anhang 4). Das Zeitgesetz von 1978 und das Gesetz über Einheiten im Messwesen von 1985 wurden in dem 2008 verabschiedeten neuen Einheiten- und Zeitgesetz (Anhang 2) zusammengefasst, wobei alle Regelungen zur Zeitbestimmung unverändert übernommen wurden.

3.2 Koordinierte Weltzeit

Die Sektion Zeit und Schweremessung des Internationalen Büros für Maß und Gewicht BIPM (Bureau International des Poids et Mesures) ist mit der Berechnung und Verbreitung einer weltweit gültigen Zeitreferenz beauftragt.* Das BIPM berechnet hierfür eine Zeitreferenz auf der Basis von etwa 300 Atomuhren, darunter etwa zehn so genannte primäre Uhren (s. u.), aus ca. 65 weltweit verteilten Zeitinstituten. Zunächst ermittelt das BIPM die Gang-Instabilitäten dieser Uhren und weist ihnen statistische Gewichte zu, mit denen sie bei der Berechnung einer gemittelten Zeitskala berücksichtigt werden. Eine Uhr mit stabilem Gang erhält ein hohes statistisches Gewicht und eine mit instabilem Gang ein kleines. Das so gewonnene Mittel wird freie Atomzeitskala (EAL von Echelle Atomique Libre) genannt. Auf Grund der Eigenschaften der verwendeten Uhren weicht das Mittel der von ihnen realisierten Sekunden von der definitionsgemäßen Dauer der SI-Sekunde ab. „SI-Sekunde“ bezeichnet die Basiseinheit der Zeit im Internationalen Einheitensystem SI (System International) [12, 13]. Daher wird in einem zweiten Schritt die Internationale Atomzeit TAI (Temps Atomique International) mittels einer Gangkorrektur aus EAL gewonnen. Das Skalenmaß von TAI wird dabei so bemessen, dass es so gut wie möglich mit der SI-Sekunde übereinstimmt, wie sie auf Meereshöhe realisiert würde. Die Gangkorrektur wird gegenwärtig aus dem Vergleich von EAL mit den primären Uhren der Zeitinstitute in Frankreich, Großbritannien, Italien, Japan, Süd-Korea, USA und Deutschland abgeleitet. TAI hatte verschiedene Vorläufer [10], aber man hat den fiktiven Anfangspunkt von TAI so festgelegt, dass der 1. Januar 1958, 00:00 Uhr TAI, mit dem entsprechenden Zeitpunkt in der mittleren Sonnenzeit am Nullmeridian, UT1 (Universal Time) genannt, übereinstimmte. UT1 war die Grundlage der weltweiten Zeitbestimmung, solange diese auf astronomischen Beobachtungen beruhte (siehe Anhang 1).

Aus TAI wird UTC abgeleitet. Hierbei folgt man einem Vorschlag der Internationalen Telekommunikationsunion (ITU), nach dem die Aussendung von Zeitzeichen „koordiniert“, d. h. bezogen auf eine gemeinsame Zeitskala mit der SI-Sekunde als Skalenmaß erfolgen sollte, die mit der zum Drehwinkel der Erde proportionalen Weltzeit UT1 näherungsweise in Übereinstimmung gehalten wird [9, 10]. Die Differenz UTC minus UT1 wird durch Schaltsekunden in UTC auf unter 0,9 Sekunden begrenzt. Der Beginn von UTC ist der 1. Januar 1972, damals betrug der Unterschied TAI – UT1 = 10,04 s und TAI – UTC wurde zu 10 s festgelegt. Auch bis zu diesem Datum wurden bereits von Atomuhren abgeleitete, gesendete Zeitzeichen an die astronomische Zeit angepasst, allerdings nicht überall auf die gleiche Weise und zudem durch Anpassung des Gangs der Atomuhren und zusätzlich durch Standsprünge. Darauf wird in Kapitel 4.5 näher eingegangen. Dem wurde mit der Einführung von UTC ein Ende gesetzt. UTC – TAI folgt als in Bild 1 gezeigte Treppenkurve der monotonen Änderung von UT1 – TAI. Die Einführung der Schaltsekunden geschieht als letzte Sekunde des 31. Dezembers bzw. des 30. Junis in UTC, d. h. in Deutschland am 1. Januar vor 01:00 MEZ bzw. am 1. Juli vor 02:00 MESZ. Die Entscheidung

* Bis 1988 wurde diese Aufgabe vom Internationalen Büro für die Zeit BIH (Bureau International de l‘Heure) wahrgenommen.

hierüber trifft der Internationale Dienst für Erdrotation und Referenzsysteme (IERS, International Earth Rotation and Reference Systems Service, Internet: http: //hpiers.obspm.fr oder www.iers.org). Diese Einrichtung sammelt und bewertet die Beobachtungen eines Netzwerks von erdgebundenen Beobachtungsstationen, deren Position relativ zu Quasaren und zu den Satelliten des amerikanischen Satellitennavigationssystems GPS ermittelt wird. Hieraus erhält man die Parameter der Erdrotation, die Lage der Drehachse und die Rotationsperiode. Die unregelmäßige Einführung von Schaltsekunden (Bild 1) spiegelt die ungleichmäßige Drehgeschwindigkeit der Erde wider.

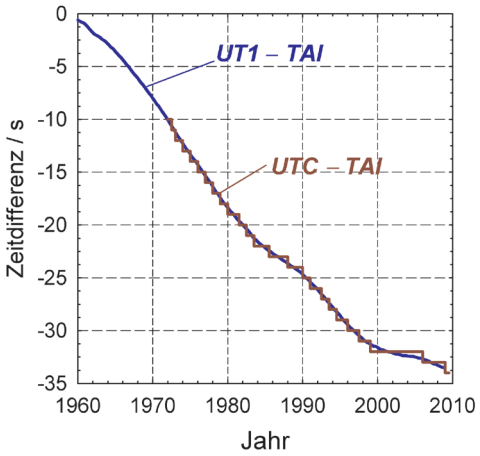

Bild 1: Vergleich von (astronomischer) Weltzeit UT1 und Koordinierter Weltzeit UTC mit der Internationalen Atomzeit TAI

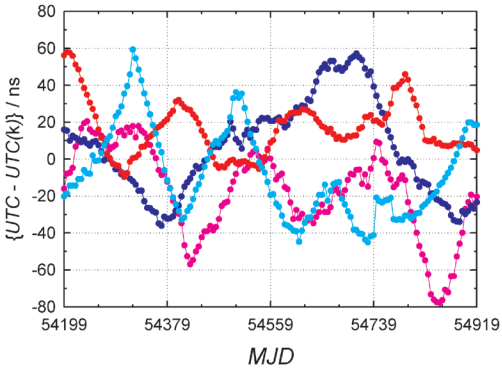

Bild 2: Vergleich der Koordinierten Weltzeit UTC mit in vier europäischen Zeitinstituten (k) realisierten Atomzeitskalen UTC(k) über zwei Jahre bis einschließlich März 2009; MJD 54919 bezeichnet den 29. März 2009;
rot: Istituto Nazionale di Richerca di Metrologia, INRiM, Turin;
cyan: NPL, Teddington, UK;
magenta: LNE SYRTE, Observatoire de Paris;
blau: PTB.

Den Empfehlungen verschiedener Gremien folgend wurde UTC praktisch in allen Ländern die Grundlage für die in der jeweiligen Zeitzone verwendete „bürgerliche“, „amtliche“ oder „gesetzliche“ Zeit. UTC wird in Form von errechneten Standdifferenzen mit Bezug auf die in den einzelnen Zeitinstituten (k) realisierten Zeitskalen UTC(k) publiziert. Die Skalen UTC(k) sollen möglichst gut mit UTC – und damit auch untereinander – übereinstimmen. Mitte 2009 gibt es weltweit 45 Zeitskalen mit einer Abweichung UTC – UTC(k) von weniger als 100 ns, darunter die der PTB. Bild 2 zeigt die Differenz zwischen UTC und den Realisierungen in vier europäischen Zeitinstituten während einer Zeitspanne von 2 Jahren bis einschließlich März 2009. Hier, wie in anderen Abbildungen, wird das Modifizierte Julianische Datum MJD, eine fortlaufende Tageszählung, als Zeitachse verwendet. Der 29. März 2009 wird mit MJD 54919 bezeichnet.

3.3 Die Atomuhren der PTB

Die PTB betreibt eine Gruppe von Atomuhren, um die Atomzeitskala UTC(PTB) mit großer Stabilität und Zuverlässigkeit zu realisieren. Zu dieser Gruppe gehören einige kommerziell gefertigte Caesiumatomuhren, Wasserstoffmaser und die sog. primären Uhren CS1, CS2, CSF1 und CSF2, die in den letzen Jahrzehnten in der PTB entwickelt wurden [14, 15]. Die Zeitskala UTC(PTB) wird gegenwärtig von CS2 abgeleitet. Die besten kommerziellen Caesiumatomuhren realisieren gegenwärtig die SI-Sekunde mit einer relativen Unsicherheit von wenigen 10^{-13} und einer relativen Frequenzinstabilität von wenigen 10^{-14} bei einer Mittelungszeit von einem Tag [16]. Sie werden in den Bereichen Navigation, Geodäsie, Raumfahrt, Telekommunikation und in den Zeitinstituten (wie der PTB) eingesetzt. Mit den in der PTB entwickelten primären Cs-Uhren werden deutlich geringere Unsicherheiten erreicht. Der Begriff „primäre Uhr“ wird verwendet, weil jederzeit eine Abschätzung darüber vorliegt, in welchem Ausmaß und mit welcher Wahrscheinlichkeit die realisierte Sekunde von der SI-Sekunde abweicht. Bild 3 zeigt die beiden primären Atomuhren CS1 und CS2 der PTB, deren relative Unsicherheit nur $0{,}7 \cdot 10^{-14}$ bzw. $1{,}2 \cdot 10^{-14}$ [14] beträgt (67% Wahrscheinlichkeit). Relative Frequenzabweichung und Gang sind einander entsprechende Größen: Eine konstante relative Frequenzabweichung von $1 \cdot 10^{-14}$ entspricht einem Gang von etwa einer Milliardstel Sekunde pro Tag.

4 DCF77: Von den Anfängen bis heute

4.1 Eine kurze Geschichte der Zeitübertragung per Funk

Schon zu Beginn des letzten Jahrhunderts erkannte man in Funkwellen ein geeignetes Mittel zur Zeitübertragung, was auch der Gegenstand des Artikels von Dr. Johannes Graf ist [2]. Die ersten Versuche zur drahtlosen Zeitübermittlung unternahmen 1903 das United States Naval Observatory in Washington und 1904 das Geodätische Institut Potsdam. Bereits von 1910 bis 1916 sendete die Küstenfunkstelle Norddeich als erster deutscher Zeitdienst regelmäßig Zeitzeichen auf der Basis von Zeitbestimmungen des Kaiserlichen Marine-Observatoriums Wilhelmshaven. Ab 1917 strahlte dann die Großsendestelle Nauen zweimal täglich ein Zeitzeichen auf Langwelle 3 900 m (≅ 77 kHz) aus. Nach diesen Anfängen der drahtlosen Zeitübertragung entstand im Laufe der Jahre ein weltweites Netz von Zeitzeichenstationen in verschiedenen Wellenlängenbereichen, überwiegend auf Längst-, Lang- und Kurzwelle. Zur Zeitverbreitung mit terrestrischen Sendern kam in

Bild 3:
Ansicht der primären Uhren CS1 und CS2 der PTB.

den vergangenen drei Jahrzehnten die Zeitübertragung über Satelliten hinzu und eröffnete völlig neue Möglichkeiten für interkontinentale Präzisionszeitvergleiche, die Ortsbestimmung und globale Navigation. Eine Bestandsaufnahme des gesamten Gebietes der Präzisionszeitübertragung findet man beispielsweise in [17].

4.2 Sendefunkstelle Mainflingen

Standort des Senders DCF77 ist die Sendefunkstelle Mainflingen (Koordinaten: 50° 01′ Nord, 09° 00′ Ost) etwa 25 km südöstlich von Frankfurt am Main. Von dort wurden auf Betreiben der Deutschen Bundespost erstmals 1949 mittels eines transportablen, ehemals militärischen Senders Nachrichten auf Langwelle gesendet. Wegen ihrer Lage in der sowjetischen Besatzungszone stand die Großsendestelle Nauen für die neu gegründete Bundesrepublik Deutschland zur Errichtung von neuen Langwellen-Funkdiensten nach dem Krieg nicht mehr zur Verfügung, und die Funkstelle Norddeich war aufgrund ihrer geographischen Lage am Rande der Bundesrepublik für neue Langwellen-Sendeanlagen nicht geeignet. Deshalb wurde Anfang der fünfziger Jahre mit dem Aufbau der Sendefunkstelle Mainflingen auf dem Gelände eines ehemaligen Kleinflugplatzes begonnen. In den Folgejahren wurden dort die beiden heute noch existierenden Senderhäuser, etliche bis zu 200 m hohe Antennenmasten und die dazugehörenden Antennenhäuser errichtet. In ca. 25 cm Tiefe ist im Erdreich ein viele Kilometer umfassendes Erdungsnetz verlegt, das zusammen mit dem hohen Grundwasserspiegel, der durch die Lage des Geländes in der Mainebene gegeben ist, zu einer hohen Bodenleitfähigkeit und somit günstigen Abstrahlungsbedingungen führt.

Im Jahr 1954 wurde bereits auf sechs Frequenzen, zwischen 46 kHz und 123 kHz, gesendet. Aus dieser Zeit stammt auch die Registrierung des Senders DCF77 in der Internationalen Frequenzliste der ITU als *fixed service,* mit den Angaben: Trägerfrequenz 77,5 kHz, Bandbreite 2,4 kHz, Rufzeichen DCF77, den Koordinaten der Sendefunkstelle wie oben angegeben, erstmalige Nutzung 15. August 1953 und als in der Verantwortung Deutschlands stehend. In Kapitel 10 wird im Zusammenhang mit ähnlichen Funkdiensten in anderen Ländern auf Regelungen und Schutzbestimmungen der ITU eingegangen.

4.3 Senderbezeichnung

Woher kommt das Rufzeichen DCF77? Nach den Regeln der ITU, speziell Artikel 19 der *Radio Regulations*, „*Identification of Stations*“ [18], müssen alle Sender, deren Reichweiten über die jeweiligen Landesgrenzen hinausgehen, mit einem Rufzeichen entsprechend der jedem Land zugewiesenen Rufzeichenreihe gekennzeichnet und in der Internationalen Frequenzliste eingetragen sein. Die der Bundesrepublik Deutschland zugewiesene Rufzeichenreihe beginnt mit DAA und endet mit DRZ. Für den Sender DCF77 wurde das Rufzeichen wie folgt festgelegt: Entsprechend der zugewiesenen Rufzeichenreihe steht D für Deutschland. Der Buchstabe C wurde zur Kennzeichnung von Langwellensendern gewählt. Als dritter Buchstabe wurde für die auf dem Gelände der Sendefunkstelle Mainflingen stehenden Langwellensender der Buchstabe F (wegen der Nähe zu Frankfurt am Main) bestimmt. Zur Unterscheidung der verschiedenen Sender dieser Station wurden an die drei Buchstaben DCF noch zwei Ziffern angehängt, beim DCF77 in Anlehnung an die verwendete Trägerfrequenz. Bei dem auf der Sendefunkstelle betriebenen Sender DCF49 der Europäischen Funkrundsteuerung auf 129,1 kHz trifft dies nicht zu.

4.4 Die Entwicklung der Nutzung von DCF77 für die Zeitaussendung

Mitte der fünfziger Jahre setzten sich Vertreter des Deutschen Hydrographischen Instituts (DHI), des Fernmeldetechnischen Zentralamtes (FTZ) und der PTB zusammen, um „zur Erfüllung amtlicher Aufgaben" gemeinsam eine Zeitsignal- und Normalfrequenzausendung einzurichten. Die Institute gehörten zum Geschäftsbereich verschiedener Bundesministerien, nämlich für Verkehr, Post und Wirtschaft. Diese Zusammenarbeit spiegelt die damalige Situation in der Bundesrepublik Deutschland wider, in der die gesetzliche Zeit noch basierend auf astronomischen Beobachtungen vom DHI bestimmt wurde, die Zeiteinheit Sekunde aber schon von der PTB als metrologischem Staatsinstitut mit überlegener Genauigkeit realisiert wurde und die Deutsche Bundespost das Monopol des Betriebs von Sendeanlagen besaß. Sie bot zur Aussendung von Normalfrequenzen und Zeitinformation den Sender DCF77 mit einer Senderleistung von anfangs 12,5 kW an. Die PTB stellte im Keller des Senderhauses 1 hochgenaue Quarzuhren und die Steuereinrichtung auf und das DHI lieferte Zeitzeichen auf astronomischer Basis (siehe unten). Mit den ersten Sendeversuchen wurde 1956 begonnen. Am 10. Oktober 1958 erhielt die PTB vom Bundespostministerium die Genehmigung, bis zum Jahresende 1958 regelmäßige Versuchssendungen durchzuführen. Auch wurde als offizieller Beginn der Zeitsignal- und Normalfrequenzaussendungen über den Sender DCF77 in diesem Genehmigungsschreiben der 1. Januar 1959 festgelegt.

Noch bis Ende 1969 wurden mit DCF77 außer Zeitzeichen und Normalfrequenz intermittierend Sportnachrichten vom Deutschen Sportverlag (DSV) gesendet. Die Zeitsignal- und Normalfrequenzaussendungen erfolgten in einem werktäglichen Vormittags- und Nachtprogramm von jeweils etwa drei Stunden Dauer. Da von verschiedenen Organisationen und Nutzern dieses neuen Dienstes der Wunsch nach einer längeren Sendezeit an die PTB herangetragen wurde, stellte die PTB Anfang 1967 den Antrag auf Erweiterung der Sendezeit auf 24 Stunden. Dem DSV wurde daraufhin die neue Frequenz 46,25 kHz zugewiesen und ab dem 1. Dezember 1969 wurde die Sendezeit für die Zeitzeichenaussendungen auf zunächst 16 Stunden erweitert. Dabei ging die Zuständigkeit voll auf die PTB über, der nun aber auch Gebühren für den Betrieb des Senders DCF77 in Rechnung gestellt wurden. Die Aufnahme des 24-Stunden Dauerbetriebs mit einer Senderleistung von 50 kW erfolgte schließlich am 1. September 1970. Die hiermit verbundenen Änderungen des Sendeprogramms sind im nächsten Abschnitt dargestellt.

Bis zur Privatisierung der Deutschen Bundespost Telekom erfolgte die Aussendung über DCF77 auf der Grundlage einer formlosen Übereinkunft zwischen Wirtschafts- und Postministerium. Danach wurde im April 1996 eine vertragliche Regelung des Betriebes der DCF77-Sendeeinrichtungen zwischen der PTB und der Deutschen Telekom AG getroffen. Der Vertrag enthält Vereinbarungen über den vom Senderbetreiber zu erbringenden Leistungsumfang und die von der PTB dafür zu zahlenden Entgelte. Inzwischen wurden einige Bestimmungen des Vertrages neu gefasst und die Laufzeit bis zum Ende des Jahres 2013 verlängert. Vertragspartner der PTB war zwischenzeitlich die T-Systems Media Broadcast und ist nun die Media Broadcast GmbH.

4.5 Entwicklung des Sendeprogramms

Das bis 1970 verwendete Sendeprogramm war recht unübersichtlich und enthielt u. a. zwei Arten von Zeitmarken, so genannte „Zeitmessmarken", für die die PTB verantwortlich war, und „koordinierte" Zeitsignale in der Verantwortung des DHI. Daneben sah das Programmschema die Aussendung mehrerer Normalfrequenzen vor, der Trägerfrequenz 77,5 kHz sowie der aufmodulierten Frequenzen 200 Hz und 440 Hz (Kammerton *a*). Was unterschied die diversen Zeitmarken? Bereits seit 1962 regelte die PTB den Abstand aufeinander folgender Zeitmessmarken und die Trägerfrequenz entsprechend der (erst im Jahr 1967 erfolgten) atomaren Definition der Zeiteinheit auf der Basis des für die Hyperfeinstruktur-Übergangsfrequenz im ^{133}Cs festgelegten Wertes von 9 192 631 770 Hz [19]. Hierzu betrieb die PTB in Braunschweig ein „Atomichron" [20], nach dessen Ausgangssignalen die Frequenzen der Quarzuhren in der PTB und in Mainflingen geregelt wurden. Seit 1967 erfolgten auch regelmäßige Vergleiche der Uhren der PTB mit denen des National Bureau of Standards (NBS)* in den USA durch regelmäßige Transporte von Atomuhren mit dem Flugzeug und durch Längstwellen-Phasenzeitvergleiche. Wie beim Sender WWVB, für den das NBS zuständig war [21], wurden auch die von DCF77 ausgesendeten Zeitmessmarken der PTB als „stepped atomic time" in Schritten von zunächst 0,05 s, dann 0,1 s, später 0,2 s mit der Weltzeit UT1 in Übereinstimmung gehalten. Die Zeitzeichen des DHI repräsentierten die Zeitskala UTC in ihrer damals gültigen Form. Ihr Skalenmaß wurde jährlich im Voraus neu festgelegt, und zwar so, dass UTC und UT1 näherungsweise übereinstimmen sollten. Der Abstand der Zeitmessmarken entsprach damit nicht der gültigen Zeiteinheit. Wenn es sich am Ende eines Jahres herausstellte, dass die Vorhersage der Periode der Erdrotation nicht genügend gut zugetroffen hatte, so wurde

* Heute National Institute of Standards and Technology NIST

der entstandene Zeitunterschied zwischen UTC und UT1 durch einen Standsprung in UTC ausgeglichen. Diese Realisierung von UTC wurde von vielen Seiten als obsolet empfunden. Daher wurde am 1. April 1970 die Zeitzeichenaussendung des DHI beendet und das Sendeprogramm vereinfacht. Ab diesem Zeitpunkt wurden nur noch die Trägerfrequenz 77,5 kHz als Normalfrequenz sowie amplitudenmodulierte Sekundenmarken abgestrahlt. Sie entsprachen bis 1972 der seinerzeitigen „Amtlichen Atomzeitskala" der PTB und seit 1972 dem neuen UTC-Zeitsystem mit Schaltsekunden, wie es bis heute verwendet wird und in Kapitel 3.2 vorgestellt wurde. Die Dauer der Sekundenmarken wurde von 50 ms auf 100 ms verlängert. Wegen der Anwender, die DCF77 als Normalfrequenzsender nutzten, wurde von nun an der Träger für die Dauer der Sekundenmarken nicht mehr auf Null getastet sondern nur auf eine Restamplitude von 25 % abgesenkt. Die Minutenmarkenkennzeichnung wurde wie ursprünglich eingeführt beibehalten: Durch Weglassen der 59. Sekundenmarke wird angekündigt, dass die nächstfolgende Marke die Minutenmarke ist.

Mit der kontinuierlichen Aussendung von Normalfrequenz und Zeitmarken ab dem 1. September 1970 war die Möglichkeit vorhanden, automatisch nachgeregelte Normalfrequenzoszillatoren zu betreiben und Uhren im Gleichlauf zu halten. Funkgeführte Uhren mussten aber wegen der Vieldeutigkeit der Minutenmarken noch von Hand minutengenau eingestellt werden. Was zur Einführung sich selbst stellender Funkuhren noch fehlte, war die Aussendung vollständiger Zeitinformation in kodierter Form. Dies erfolgte erstmals am 5. Juni 1973, womit der entscheidende Schritt zur Entwicklung des Sendeprogramms auf den heutigen Stand getan wurde. Abgesehen von den Ergänzungen als Reaktion auf die Einführung der Sommerzeit 1980 sowie der Ankündigung der Schaltsekunden wird der damals eingeführte Zeitkode bis heute unverändert verwendet. Er wird in Kapitel 5.2 separat dargestellt.

Seit Juni 1983 wird dem Träger von DCF77 zusätzlich zur Amplitudenmodulation (AM) noch eine pseudozufällige Phasenumtastung aufmoduliert. Die Ankunftszeitpunkte der so modulierten DCF77-Signale können unter Verwendung geeigneter Empfänger störsicherer bestimmt werden, als dies unter üblichen Empfangsbedingungen mit den AM-Zeitmarken möglich ist. Auch die Genauigkeit der Zeitübertragung mit DCF77 für ausgewählte Anwendungen wird damit erhöht. Zahlreiche Empfänger dieser Art sind im Einsatz und funktionieren sehr zufrieden stellend. Insgesamt wird aber von der Phasenmodulation weniger Gebrauch gemacht, als dies bei ihrer Einführung erwartet wurde. Ein Grund dafür ist die weltweite Verfügbarkeit der Signale des Satellitennavigationssystems GPS (Global Positioning System). Aufgrund der GPS-Signalstruktur und der zur Verfügung stehenden größeren Bandbreite ist beim GPS-Empfang vom Prinzip her eine um mindestens eine Größenordnung geringere Unsicherheit der Zeitübertragung möglich als sie mit DCF77-Empfängern zu erreichen ist. Aus Platzgründen wird daher in diesem Aufsatz auf die Phasenmodulation nicht weiter eingegangen. Der auch heute noch aktuelle Stand wurde in [1] zuletzt beschrieben, und die grundlegenden Publikationen [22, 23] können von der PTB bezogen werden.

5. Das DCF77-Sendeprogramm heute

5.1 Trägerfrequenz

Die Trägerfrequenz von DCF77 beträgt, wie bereits erwähnt, 77,5 kHz. Sie wird von einer Atomuhr der PTB abgeleitet, deren Ausgangsfrequenz (10 MHz) innerhalb von $\pm 2 \cdot 10^{-13}$ mit dem Sollwert übereinstimmt und deren tägliche relative Frequenzschwankungen bei $5 \cdot 10^{-14}$ liegen. Bei der Nutzung der empfangenen Trägerfrequenz über kurze Messzeiten, z. B. bei fester Anbindung eines nachgesteuerten Oszillators mit einer Zeitkonstante von wenigen Sekunden, sind die Phasenzeitabweichungen vom Mittelwert zu beachten, die durch die pseudozufällige Phasenumtastung und durch Ein- und Ausschwingvorgänge der Sendeantenne im Rhythmus der Zeitsignale verursacht werden. Über lange Messzeiten mitteln sich diese Phasenzeitschwankungen jedoch heraus und können außer acht gelassen werden. Demgegenüber langsam sind die durch Temperaturschwankungen und geringfügige Verstimmungen der Antennenanpassung hervorgerufenen Phasenzeitschwankungen des abgestrahlten Trägers und der phasenkohärent aufmodulierten Zeitsignale am Sendeort. Diese können bis zu etwa ± 0.1 µs betragen, bezogen auf die Atomuhr-Ausgangssignale, von denen sie abgeleitet werden. Im Mittel über einen Tag ergibt sich somit für die abgestrahlte Trägerfrequenz am Sendeort eine relative Unsicherheit* von $2 \cdot 10^{-12}$. Durch Regelung der Frequenz und der Phasenzeit der DCF77-Trägers lässt sich die Unsicherheit für Frequenzvergleiche über sehr lange Messzeiten weiter reduzieren. So sind im Mittel über 100 Tage Frequenzvergleiche auf deutlich unter relativ $2 \cdot 10^{-13}$ möglich. Wie diese Regelung erfolgt, wird in Abschnitt 6.2 beschrieben.

5.2 Amplitudenmodulation (AM)

Der Träger von DCF77 wird mit Sekundenmarken amplitudenmoduliert. Zu Beginn jeder Sekunde, mit Ausnahme der letzten Sekunde

* Angegebene Unsicherheiten entsprechen hier und im ganzen Aufsatz der erweiterten Unsicherheit (k = 2), entsprechend einem 95 %-Vertrauensintervall.

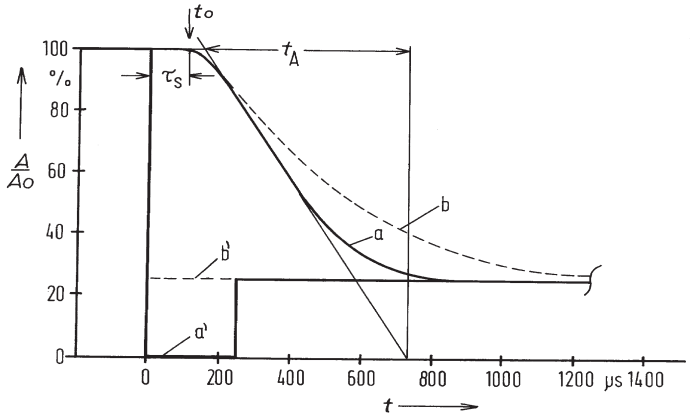

Bild 4:
Abfallende Flanke der von DCF77 abgestrahlten Trägereinhüllenden zu Beginn einer Sekundenmarke; A/A_0: relative Amplitude;
a': Steuersignal mit Austastlücke;
b': Steuersignal ohne Austastlücke;
a: abgestrahlte Flanke zu a';
b: abgestrahlte Flanke zu b';
τ_S: Laufzeit durch Sender und Antenne;
t_0: definierter Sekundenbeginn in MEZ oder MESZ;
t_A: Ausschwingzeit.

jeder Minute als Kennung für den folgenden Minutenbeginn, wird die Amplitude für die Dauer von 0,1 s oder 0,2 s phasensynchron mit der Trägerschwingung abgesenkt. Bild 4 zeigt die abfallende Flanke der von DCF77 abgestrahlten Einhüllenden der Trägerschwingung (Kurve a) zu Beginn einer Sekundenmarke und das dazugehörende Steuersignal (Kurve a'). Die Austastlücke von 250 µs im Steuersignal bewirkt ein schnelleres Ausschwingen des Antennenkreises, so dass sich praktisch die gleiche Flankensteilheit ergibt wie sie sich bei einem Steuersignal ganz ohne Restamplitude ergeben würde. Zum Vergleich zeigt noch die gestrichelte Kurve b welche Flankensteilheit sich einstellen würde, wenn das Steuersignal ohne Austastlücke direkt auf die Restamplitude abgesenkt würde (Kurve b'). Je steiler die abfallende Flanke ist, umso genauer lässt sich der Beginn der Trägerabsenkung bestimmen, der als Sekundenbeginn definiert ist. Zwecks weiterer Verbesserung des Signal-zu-Rauschabstandes der AM-Sekundenmarken wurde inzwischen die Restamplitude auf etwa 15 % abgesenkt.

Die Stände des Steuersignals (a' in Bild 4) und der abgestrahlten Signale werden in größeren zeitlichen Abständen mittels einer aus Braunschweig zum Sendeort transportierten Atomuhr, die UTC(PTB) mit einer Unsicherheit von < 0,01 µs repräsentiert, kontrolliert und falls erforderlich korrigiert. Dazu werden die Zeitpunkte der abfallenden Flanke der DCF77-Zeitsignale am Steuergerät, an einer Messsonde zwischen Senderausgang und Sendeantenne sowie im Nahfeld der Sendeantenne mit Bezug auf das Signal der transportablen Atomuhr ermittelt und das Steuergerät so eingerichtet, dass die abgestrahlten Referenzzeitpunkte UTC(PTB) entsprechen. Bei breitbandigem Empfang liegt die Unsicherheit, mit der vor Ort der als Sekundenbeginn definierte Beginn der fallenden Flanke aus dem Nahfeld bestimmt werden kann, bei ca. ± 25 µs (etwa zwei Perioden der Trägerschwingung). Zum Ausgleich der Lauf- und Signalverarbeitungszeiten τ_S in den Sendeeinrichtungen müssen die DCF77-Signale bezogen auf UTC(PTB) vom Steuergerät entsprechend früher an den Sender abgeschickt werden, damit sie im Nahfeld UTC(PTB) entsprechen. Bei wiederholten Uhrentransporten zur Sendefunkstelle wurden keine nennenswerten Änderungen von τ_S festgestellt.

5.3 Zeitkode

Die unterschiedliche Dauer der Sekundenmarken dient zur binären Kodierung von Uhrzeit und Datum: Sekundenmarken mit einer Dauer von 0,1 s entsprechen der binären Null und solche mit einer Dauer von 0,2 s der binären Eins. Einmal während jeder Minute werden die Nummern von Minute, Stunde, Tag, Wochentag, Monat und Jahr BCD-kodiert übertragen (BCD: Binary Coded Decimal, jede Stelle einer Zahl wird separat kodiert). Vom Kalenderjahr werden nur die Einer- und Zehnerstelle übertragen, das Jahr 2009 also als 09. Der ausgesendete Kode enthält jeweils die Information für die folgende Minute. Die zeitliche Abfolge der Aussendung der einzelnen Inhalte erläutert das in Bild 5 dargestellte Kodierschema. Die PTB ging bei dessen Festlegung davon aus, dass der Kode mit der zuvor verwendeten Form der Aussendung kompatibel und mit den damals vorhandenen elektronischen Mitteln leicht dekodierbar sein sollte. Vor seiner Einführung wurde das Kodierverfahren auch noch mit verschiedenen Behörden, wissenschaftlichen Instituten und Firmen diskutiert. Verschiedene Kodierungsvorschläge, welche Information ausgesendet und welche Kodierungsart (binär oder BCD) verwendet werden sollen, wurden zur Diskussion gestellt. So wurde z. B. der Wunsch der Uhrenindustrie berücksichtigt, neben Uhrzeit und Datum auch die Nummer des Wochentages auszusenden. Um DCF77-Nutzern und Funkuhrherstellern Planungssicherheit zu geben, wurde bei allen späteren Änderungen und Ergänzungen der kodierten Zeitinformation oder der Signalstruktur immer darauf geachtet, dass die Funktion bereits eingesetzter DCF77-Zeitdienstgeräte nicht beeinträchtigt wird. An dem 1973 für die Sekundenmarken 20–58 festgelegten Kode wurden nach seiner Einführung keine Änderungen mehr vorgenommen. Das Kodierschema wurde lediglich um die Ankündigungs- und Zonenzeitbits ergänzt:

Die Zonenzeitbits Z1 und Z2 (Sekundenmarken Nr. 17 und 18) zeigen an, auf welches Zeitsystem sich die ab der Sekundenmarke 20 übertragene Zeitinformation bezieht. Bei der

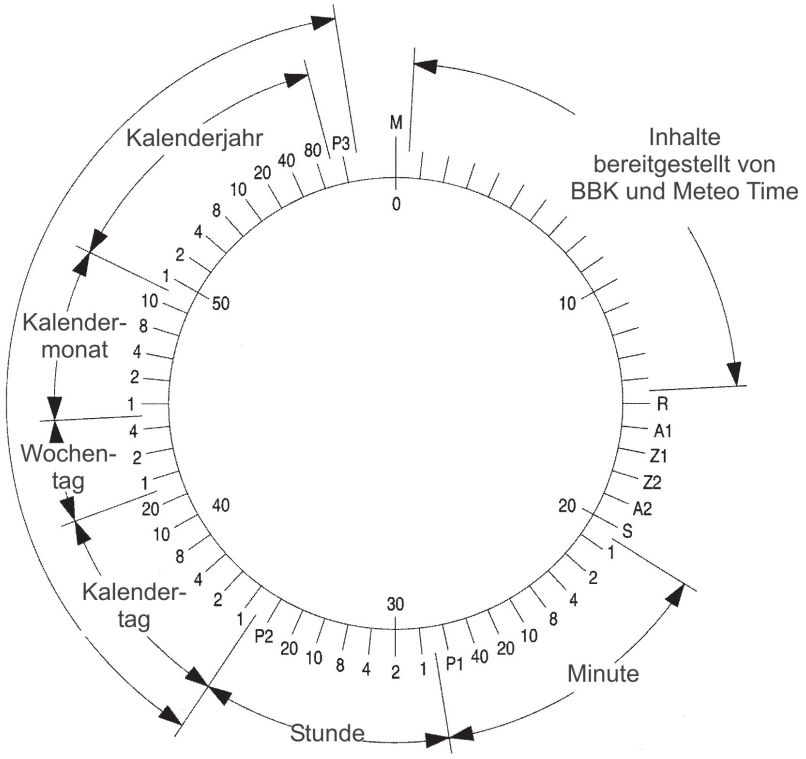

Bild 5:
Schema der Kodierung der mit DCF77 übertragenen Zeitinformation;
M: Minutenmarke (0,1 s);
R: Rufbit;
A1: Ankündigungsbit eines bevorstehenden Wechsels von MEZ auf MESZ oder umgekehrt;
Z1 (Z2): Zonenzeitbits;
A2: Ankündigung einer Schaltsekunde;
S: Startbit der kodierten Zeitinformation (0,2 s);
P1, P2, P3: Prüfbits.
Details sind im Text erklärt.

Aussendung von MEZ hat Z1 den Zustand Null und Z2 den Zustand Eins. Bei der Aussendung von MESZ ist es umgekehrt. Der Empfang der Zonenzeitbits erlaubt jederzeit auch die Angabe der koordinierten Weltzeit und ist daher für die Nutzung von DCF77-Empfängern als Zeitgeber für Internetzeitdienste und für sog. *Time Stamping Authorities* nützlich.

Das Ankündigungsbit A1 (Nr. 16) weist auf einen bevorstehenden Wechsel des Zeitsystems hin. Vor dem Übergang von MEZ nach MESZ oder zurück wird A1 jeweils eine Stunde lang im Zustand Eins ausgesendet: vor dem Übergang von MEZ nach MESZ (MESZ nach MEZ) von 01:00:16 Uhr MEZ (02:00:16 Uhr MESZ) bis 01:59:16 Uhr MEZ (02:59:16 Uhr MESZ).

Mit dem Ankündigungsbit A2 (Nr. 19) wird auf das bevorstehende Einfügen einer Schaltsekunde aufmerksam gemacht. A2 wird ebenfalls eine Stunde lang vor dem Einfügen einer Schaltsekunde im Zustand Eins ausgestrahlt. Vor dem Einfügen einer Schaltsekunde am 1. Januar (1. Juli) wird A2 daher sechzig Mal von 00:00:19 Uhr MEZ (01:00:19 Uhr MESZ) bis 00:59:19 Uhr MEZ (01:59:19 Uhr MESZ) im Zustand Eins ausgesendet.

Die Ankündigungsbits A1 und A2 dienen dazu, Prozessoren in Funkuhren, die von der Gesetzmäßigkeit der Zeitzählung zum Zweck der Fehlererkennung Gebrauch machen, über die zu erwartende Unregelmäßigkeit in der Zeitzählung zu informieren. Ohne die Auswertung von A1 oder A2 könnte die Unregelmäßigkeit als fehlerhafter Empfang interpretiert werden, mit der Folge, dass die geänderte Zeitzählung nicht unverzüglich genutzt wird.

Die Kodierung des Wochentages erfolgt gemäß der Norm ISO 8601 bzw. DIN EN 28601, wonach der Montag der Tag Eins der Woche ist. Die drei Prüfbits P1, P2 und P3 ergänzen jeweils die vorhergehenden Informationswörter (7 Bits für die Minute, 6 Bits für die Stunde und 22 Bits für das Datum einschließlich der Nummer des Wochentages) auf eine gerade Zahl von Einsen. Auf eine über die drei Paritätsbits hinausgehende Absicherung des Kodes wurde wegen der Gesetzmäßigkeit der übertragenen Zeitinformation verzichtet. Die bekannte Zeitzählung erlaubt jederzeit das Erkennen von Übertragungsfehlern durch Vergleich aufeinander folgender Zeittelegramme.

Bei der Einführung des UTC-Systems mit Schaltsekunden wurde von verschiedenen Seiten gefordert, dass Zeitsender den DUT1-Kode entsprechend einer CCIR- Empfehlung (Comité Consultatif International des Radiocommunications) aussenden sollten. DUT1 ist die jeweilige auf 0,1 s gerundete Differenz zwischen der aus der Erdrotation abgeleiteten Weltzeit UT1 und UTC. Dieser Kode wurde seit dem 1. Januar 1972 auch von DCF77 mit den Sekundenmarken 1 bis 14 ausgesendet. Dies war der Grund dafür, dass der Zeitkode in den Bereich der Sekundenmarken 20 bis 58 gelegt wurde. Wie sich aber bald zeigte, war das Interesse am DUT1-Kode doch nicht sehr groß, so dass die PTB die Aussendung des DUT1-Kodes nach einer Umfrageaktion im Mai 1977 wieder einstellte.

Viele Jahre lang wurden dann mit den frei gewordenen Sekundenmarken 1 bis 14 Betriebsinformationen über die DCF77-Steuereinrichtung übertragen. Verlängerte Sekundenmarken in diesem Bereich bedeuteten zwar im Allgemeinen eine Störung in den Steuer- oder Sendeeinrichtungen, nicht jedoch dass die ausgestrahlte Zeitinformation fehlerhaft war. Nur außerordentlich selten wurden (glücklicherweise) derartige Störungsmeldungen übertragen, so dass einige Entwickler von DCF77-Dekodierungssoftware fälschlicherweise davon ausgingen, dass in diesen Bits niemals Information übertragen wird. Dies ist seit Mitte 2003 nicht mehr der Fall, worauf im nächsten Abschnitt eingegangen wird. Die Sekundenmarke 15 wird gegenwärtig noch als „Rufbit" verwendet, um Unregelmäßigkeiten in den Steuereinrichtungen zu signalisieren. Die Richtigkeit der gesendeten Zeitinformation ist aber auch bei verlängertem Bit 15 gewährleistet. Bei Bedarf kann dieses Bit in Zukunft auch anderweitig verwendet werden.

Bild 6 zeigt Beispiele des in Braunschweig empfangenen Signals, oben die Übertragung von Monat und Jahr, unten ein Minutenwechsel, aufgezeichnet im Juli 2003. Hier sind für die Kodierung des Monats Juli (07) die BCD-Bits der Einer-Stelle 1, 2 und 4 mit binären Einsen, das BCD-Bit 8 sowie die der Zehner-Stelle mit binären Nullen belegt.

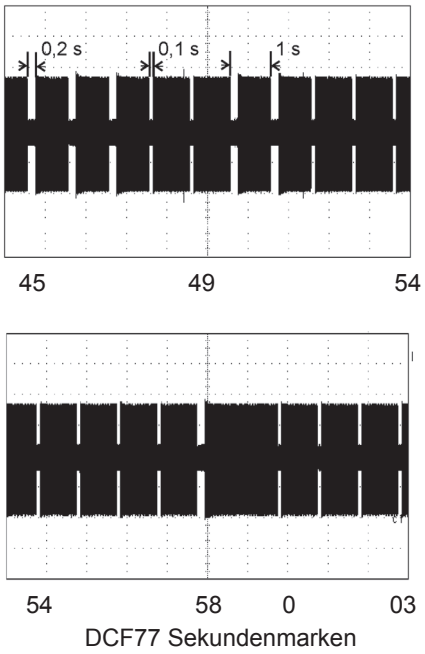

Bild 6:
Beispiele für Registrierungen der DCF77-Trägereinhüllenden; oben: Sekundenmarken 45 bis 54, entsprechend Kalendermonat 7 (Juli), Kalenderjahr 03 (2003); unten: Sekundenmarken 54 bis 03 (Minutenwechsel).

Das Einfügen einer Schaltsekunde geschieht bei den AM-Sekundenmarken in folgender Weise: Die der Marke 01:00:00 Uhr MEZ bzw. 02:00:00 Uhr MESZ vorhergehende 59. Sekundenmarke wird anders als sonst mit einer Dauer von 0,1 s ausgesendet. Danach wird die eingefügte 60. Sekundenmarke ohne Trägerabsenkung ausgestrahlt.

5.4 Neue Dateninhalte

Auf Anregung der Zentralstelle für Zivilschutz (ZfZ) beim Bundesverwaltungsamt, Bad Godesberg, wurde in der zweiten Hälfte des Jahres 2003 untersucht, ob sich die Aussendung von „Zeitzeichen" mit DCF77 auch zur Übertragung von Warninformation nutzen lässt und DCF77 ein Element in einem Warnsystem des Bundes darstellen könnte, das die in den Lagezentren der Länder und den Warnzentralen des Bundes erstellten Warninformationen über ein satellitengestütztes und terrestrisches Kommunikationssystem auf verschiedenen Wegen (Hörfunk, Fernsehen, Internet, DCF77 und GSM/UMTS) an die Bevölkerung weiterleitet. Die Firma HKW-Elektronik GmbH wurde mit Durchführung und Auswertung eines Feldversuchs beauftragt, in dem fiktive Warninformationen mit den Sekundenmarken 1 bis 14, die für die Zeitübertragung keine unmittelbare Bedeutung haben, ausgesendet wurden. Die DCF77-Steuereinrichtungen wurden so erweitert, dass die mit einem Satellitenterminal in der Sendestation empfangenen, fiktiven Warninformationen in das Sendeprogramm integriert werden konnten. Mit etwa 900 in Kleinserien modifizierten Funk-Alarmuhren wurden in verschiedenen Entfernungen vom Sender und unter unterschiedlichen Empfangsbedingungen die empfangenen Warnmeldungen protokolliert. In ihrem Abschlussbericht zeigte HKW, dass Alarmierungszeit und Erreichbarkeit der verschiedenen Funkalarm-Empfänger in unserem Land gleichmäßig gut waren. Umgebung (Land, Ballungsraum, Empfänger innen oder außen) und Entfernung zum Sender hatten nur geringen Einfluss auf die Empfangswahrscheinlichkeit. Dagegen zeigte sich, dass im Detail die Wahl der Aufstellung bei stationären Uhren, bzw. das Trageverhalten bei Armbanduhren erheblichen Einfluss haben. Die Zahl der Fehlalarme war insgesamt vernachlässigbar klein. Auch wenn die technische Eignung des DCF77-Signals für den angestrebten Zweck damit nachgewiesen wurde, gibt es bislang keine Entscheidung darüber, von dieser Möglichkeit auch Gebrauch zu machen. Zur Zeit werden mit den Sekundenmarken 1–14 stattdessen Wetterinformationen der Schweizer Firma MeteoTime GmbH übermittelt, was aber die zukünftige Nutzung für die Bevölkerungswarnung nicht ausschließt. Die Wetterinformationen werden in identischer Kodierung gegenwärtig auch über den Schweizer Langwellenzeitdienst HBG (75 kHz) übermittelt (siehe Abschnitt 10). Informationen zu dieser neuartigen Dienstleistung findet man unter www.meteotime.ch. Die Bereitstellung der Wetterdaten liegt nicht im Zuständigkeitsbereich der PTB, sondern ist zwischen MeteoTime GmbH und Media Broadcast GmbH vertraglich geregelt. Bisher hergestellte und betriebene Funkuhren sind von der Erweiterung des Sendeumfangs nicht beeinträchtigt, können diese Informationen aber auch nicht nutzen.

Bild 7:
Sendefunkstelle Mainflingen der Media Broadcast GmbH, im Vordergrund Antennenhaus 4 mit DCF77-Betriebsantenne, im Hintergrund Senderhaus 2 (helle Fassade).

6 Betriebstechnik: Steuer- und Sendeeinrichtungen des DCF77

6.1 Einrichtungen am Sendeort

Das Steuersignal wird nicht – wie oft angenommen – von Braunschweig aus über Leitungen zur Sendefunkstelle Mainflingen übertragen, sondern mit einer von der PTB konzipierten Steuereinrichtung am Sendeort erzeugtundvon Braunschweig aus überwacht. Bild 7 zeigt ein aktuelles Foto: In einem klimatisierten Raum im Erdgeschoss des Senderhauses 2 sind seit Oktober 2006 die Steuereinrichtungen der PTB (siehe Bild 8) untergebracht. Im Vordergrund von Bild 7 sieht man das Antennenhaus 4 und die DCF77-Betriebsantenne.

Aus Gründen der Betriebssicherheit wird das Steuersignal in drei voneinander unabhängigen Steuerkanälen erzeugt. Das Trägersignal (77,5 kHz) und die aufmodulierten Sekundenmarken werden gegenwärtig in allen drei Kanälen von je einer Caesium-Atomuhr abgeleitet, eine Rubidium-Atomuhr steht zusätzlich zur Verfügung. Jeder Steuerkanal verfügt über eine eigene, batteriegestützte Stromversorgung. Bild 9 zeigt das Blockschaltbild der DCF77-Steuereinrichtung und der Überwachungseinrichtungen in Braunschweig (siehe Kapitel 6.2).

Zur Vermeidung von falschen Aussendungen werden die erzeugten Steuersignale in zwei elektronischen Umschaltern miteinander verglichen. Ergibt sich dabei, dass die Signale des den Sender steuernden Kanals im Widerspruch zu denen der beiden Reservekanäle stehen, wird automatisch auf einen der beiden Reservekanäle umgeschaltet. Nach Ausfall eines Kanals liefert jeder elektronische Umschalter nur noch so lange ein Ausgangssignal, wie der steuernde Kanal und der verbleibende Reservekanal in Übereinstimmung sind. Bei Widersprüchen zwischen allen drei Kanälen wird das Steuersignal automatisch unterbrochen. Wenn die Prüfergebnisse der beiden Umschalter einander widersprechen wird das Ausgangssignal ebenfalls abgeschaltet.

Bild 8:
DCF77-Steuereinrichtungen der PTB.
In den Racks 1–3 sind die Atomuhren, Signalgeber und elektronischen Umschalter eingebaut. Rack 4 enthält die lokalen Messeinrichtungen und die Schnittstelle für die Kommunikation zwischen Mainflingen und Braunschweig. Rack 5 enthält die Schnittstelle für die Einspeisung von Alarm- bzw. Wetterinformation.

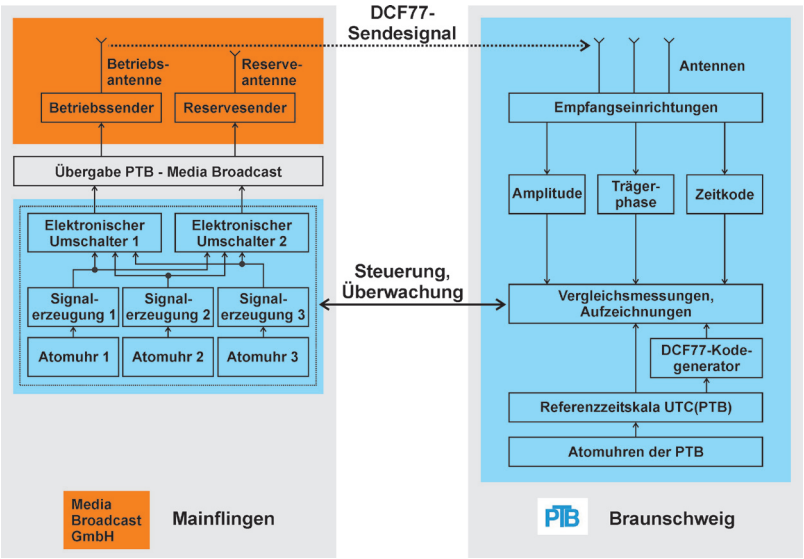

Bild 9:
Blockschaltbild der Steuer- und Sendeeinrichtungen des Senders DCF77 und der Überwachungseinrichtungen in der PTB in Braunschweig.

Nach der Übergabe des mit den Einrichtungen der PTB erzeugten DCF77-Steuersignals an die Media Broadcast beginnt deren Zuständigkeit für die weitere Aussendung. Seit Januar 1998 steht als Betriebssender ein moderner, luftgekühlter 50-kW-Halbleitersender zur Verfügung. Sein Endverstärker ist mit 48 Verstärkermodulen gleicher Bauart von etwas mehr als 1 kW Ausgangsleistung bestückt und die einzelnen Ausgangsspannungen der 48 Verstärkermodule werden addiert. Der bis dahin verwendete 50-kW-Röhrensender steht auch weiterhin als Ersatzsender bereit. Er ist mit einer Ersatzantenne verbunden, auf die im Störfall oder falls Wartungsarbeiten an Betriebssender oder -antenne notwendig werden, umgeschaltet werden kann.

Beide Sendeantennen sind vertikale Rundstrahlungsantennen mit Dachkapazität. Die Ersatzantenne ist 200 m hoch. Die Betriebsantenne hat nur eine Höhe von 150 m, verfügt zum Ausgleich aber über eine größere Dachkapazität. Vor einigen Jahren gemessene Strahlungscharakteristiken der Sendeantennen haben ergeben, dass die Abweichungen von der Charakteristik eines idealen Rundstrahlers in keiner Richtung größer sind als 2 dB. Beide Sendeantennen strahlen etwa die gleiche Leistung ab und befinden sich benachbart auf dem gleichen Antennenfeld der Sendefunkstelle. Es wird geschätzt, dass die abgestrahlte Leistung EIRP (Equivalent Isotropic Radiated Power) bei etwa 30 bis 35 kW liegt.

6.2 Einrichtungen in Braunschweig

Die empfangene Trägerphasenzeit und die Stände der Sekundenmarken (ermittelt aus der Amplitudenmodulation wie auch der Phasenmodulation) werden mit den durch UTC(PTB) vorgegebenen Sollwerten verglichen. In Bild 10 sind als Beispiele die kontinuierliche Aufzeichnung von Signalamplitude und Trägerphase an je einem Tag im Juni 2008 und Januar 2009 dargestellt. Die ausgeprägten Schwankungen der Phase des empfangenen DCF77-Signals in den Nachtstunden werden im folgenden Kapitel diskutiert. An dem ausgewählten Wintertag gab es fast gar keinen Zeitabschnitt mit einem ruhigen Phasenverlauf. Im Sommer dagegen sind die Tag-Nacht Unterschiede sehr deutlich. Als weitere Beispiele sind die Zeitdifferenzen zwi-

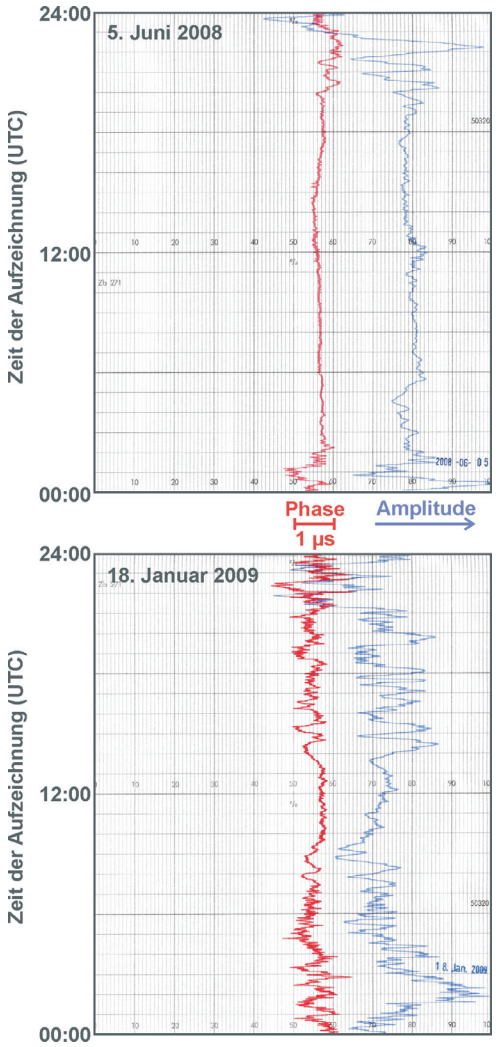

Bild 10:
In der PTB Braunschweig registrierter Verlauf von Amplitude und Phase des empfangenen DCF77-Signals am 5. Juni 2008 (oben) und 18. Januar 2009 (unten); Amplitude: durch lineare Gleichrichtung mit einer Zeitkonstanten von ca. 600 s bestimmte Amplitude der Trägereinhüllenden, lineare Skala, unkalibriert, Nullpunkt am linken Bildrand, Phase: Die volle Darstellungsweite entspricht 10 µs, d. h. 0,1 µs pro kleinem Teilstrich, Sollwert bei 55 Teilstrichen.

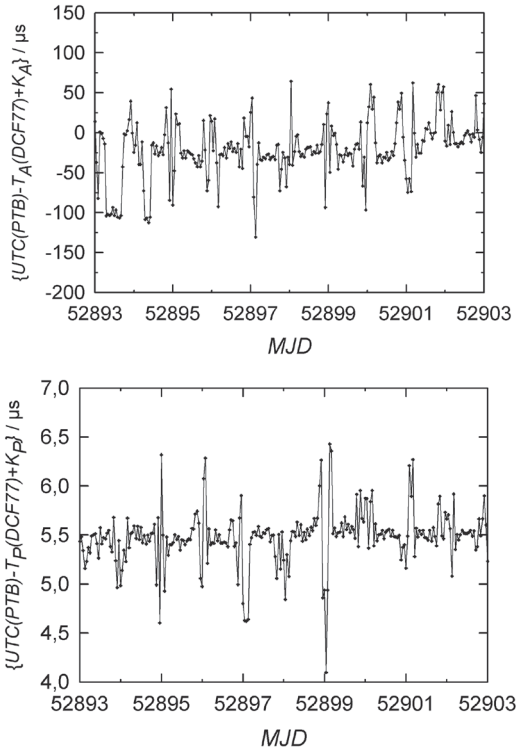

Bild 11.
In Braunschweig registrierte Zeitdifferenzen *UTC(PTB) – T(DCF77) + K*;
oben: Zeitdifferenz zwischen UTC(PTB) und der Ankunftszeit T_A(DCF77) der empfangenen Sekundenmarken, *K*: Laufzeitkonstante; Detektion von T_A(DCF77) aus der abfallenden Flanke (Triggerpunkt 60 %) der mit einer Bandbreite von 440 Hz empfangenen AM-Sekundenmarken; Glättung von T_A(DCF77) mit einem Schrittregler, indem nach jeweils 4 Sekunden eine lokal erzeugte 1 PPS-Folge den empfangenen Signalen in Schritten von |1 µs| nachgeführt wird;
unten: Differenz zwischen UTC(PTB) und der Phasenzeit T_P(DCF77) des empfangenen Trägers. T_P wird hierbei bestimmt durch Phasenzeitvergleich des empfangenen Trägers mit einer von UTC(PTB) abgeleiteten 77,5 kHz Impulsfolge; K_P: Laufzeitkonstante.

schen der lokalen Referenzzeitskala UTC(PTB) und der Ankunftszeit T_A(DCF77) der AM-Sekundenmarken und der empfangenen Phasenzeit T_P(DCF77) des Trägers in Bild 11 dargestellt. Die weitgehend konstanten Laufzeitanteile aus der Übertragungsstrecke (Laufzeit der Bodenwelle 0,91 ms über die Strecke 273 km vom Sendeort nach Braunschweig) sowie im Empfänger (Laufzeit ca. 1 ms wegen des schmalbandigen Filters) sind mit den Laufzeit-Konstanten K_A und K_P berücksichtigt, die durch den erwähnten Vergleich mit einer transportablen Atomuhr ermittelt werden. Die in der PTB kontinuierlich durchgeführten Zeitdifferenzmessungen werden dazu genutzt, den Stand der vom Sender abgestrahlten Sekundenmarken sowie die Phasenzeit des ausgesendeten Trägers zu kontrollieren und ggf. nachzuregeln. Falls sich Abweichungen ergeben, die signifikant größer als die typischen Schwankungen sind, werden über eine Fernwirkanlage von Braunschweig aus die notwendigen Korrekturen vorgenommen. Hierzu ist es möglich, in jedem der Steuerkanäle die Phase des erzeugten DCF77-Trägers und der phasenkohärent aufmodulierten Zeitinformation in Schritten von ± 0,1 µs zu schieben. Mit Hilfe der Fernwirkanlage können des weiteren Betriebsdaten von den Caesiumuhren und den Steuergeräten abgefragt werden. Verschiedene Fehlerquellen können so identifiziert und Störungsursachen in den Steuereinrichtungen ermittelt werden.

Nicht zuletzt wird in Braunschweig auch die Übereinstimmung zwischen dem empfangenen Zeitkode und einem mit unabhängigen Geräten erzeugten nominell identischen Zeitkode verglichen und dokumentiert. Dabei ist es ganz normal, dass einzelne empfangene Zeitzeichen gestört sind und daher als „nicht korrekt“ (z. B. 0 statt 1) erkannt werden. Eine Fehleralarmierung erfolgt, wenn in mehreren aufeinanderfolgenden Minuten der gleiche logische Fehler erkannt wird. Dies ist bislang niemals der Fall gewesen. Eine Fehleralarmierung erfolgt auch, wenn das empfangene Signal dauerhaft zu klein ist, oder die Phase der empfangenen Trägerschwingung vom Sollwert um mehr als einen festgelegten Betrag abweicht. Über die zeitliche Verfügbarkeit und die Eigenschaften der empfangenen Signale wird in den folgenden Kapiteln berichtet.

7 Ausbreitung des DCF77-Signals

Das von der Sendeantenne abgestrahlte DCF77-Signal erreicht den Empfangsort auf zwei Wegen: Zum einen breitet es sich als Bodenwelle entlang der Erdoberfläche aus, und zum anderen gelangt es als Raumwelle nach Reflexion an der ionosphärischen D-Schicht zum Empfangsort. Zur Beschreibung der Raumwellenausbreitung sind zwei Modelle entwickelt worden: das Reflexions- und das Wellenleitermodell [24]. Bei dem Reflexionsmodell („wave hop“ method) geht man von einer Spiegelung der Langwelle an der Unterkante der D-Schicht aus, deren Höhe am Tag mit 70 km und in der Nacht mit 90 km angenommen wird. Nach dem Wellenleitermodell („waveguide mode“ method) erfolgt dagegen die Raumwellenausbreitung analog zur Fortpflanzung elektromagnetischer Wellen zwischen zwei Grenzflächen längs eines Wellenleiters. Dabei werden die Erdoberfläche und die D-Schicht als zwei konzentrische, leitende Kugelflächen betrachtet, zwischen denen sich eine Reihe von Wellentypen (Moden) ausbreiten.

Für die Frequenz 77,5 kHz sowie für Entfernungen $d < 2000$ km hat sich das Reflexionsmodell als das zweckmäßigere erwiesen. Bild 12 veranschaulicht die Ausbreitung von Boden- und Raumwelle nach diesem Modell, und Bild 13 verdeutlicht, welche Laufzeitunterschiede die

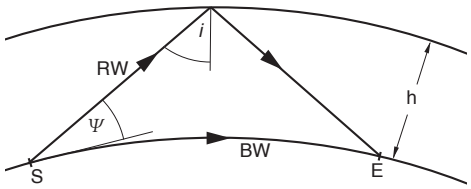

Bild 12:
Schematische Darstellung der Ausbreitung von Bodenwelle (BW) und Raumwelle (RW) zwischen Sender und Empfänger;
h: Höhe der ionosphärischen D-Schicht,
ψ: Elevationswinkel,
i: Einfallswinkel auf die D-Schicht.

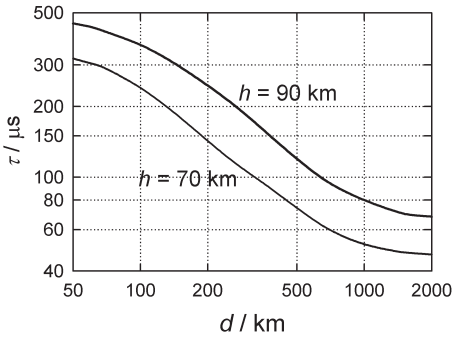

Bild 13:
Laufzeitunterschiede τ zwischen Boden- und Raumwelle für zwei verschiedene Höhen *h* der ionosphärischen D-Schicht als Funktion der Entfernung *d* vom Sender [26].

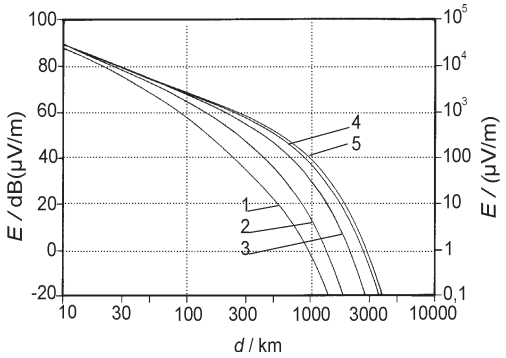

Bild 14:
Abhängigkeit der Feldstärke *E* der Bodenwelle vom Abstand *d* vom Sender und der Bodenleitfähigkeit σ (Kurven 1 – 5), kombiniert aus den Bildern 1 – 11 in [25] und wie dort angegeben bezeichnet. Unter der Annahme einer abgestrahlten Leistung von 1 kW beträgt die Feldstärke bei *d* = 10 km 30 mV/m, entsprechend $E(\text{dB}(\mu\text{V/m})) = 20 \log_{10}\{3 \cdot 10^4\} = 89{,}5$;
1: $\sigma = 10^{-4}$ S/m (sehr trockener Boden),
2: $\sigma = 3 \cdot 10^{-4}$ S/m (trockener Boden),
3: $\sigma = 10^{-3}$ S/m (mitteltrockener Boden),
4: $\sigma = 3 \cdot 10^{-3}$ S/m (Land),
5: $\sigma = 5$ S/m (Seewasser mittleren Salzgehalts).
Umgerechnet auf die von DCF77 abgestrahlte Leistung von etwa 30 kW würden die Kurven um ca. 15 dB höher liegen.

verschieden langen Ausbreitungswege zur Folge haben. Bei geradliniger Ausbreitung und *einer* Reflexion (one hop) ergibt sich die maximale Reichweite der DCF77-Raumwelle, wenn sie den Sendeort tangential ($\psi = 0$) zur Erdoberfläche verlässt und am Empfangsort auch wieder tangential einfällt. Unter diesen Annahmen beträgt die Reichweite am Tag etwa 1900 km und etwa 2100 km in der Nacht. Zu weiter entfernten Empfangsorten gelangt das DCF77-Signal in diesem Modell nur nach mehrfachen Reflexionen (z. B. zwei Reflexionen an der D-Schicht, eine Reflexion an der Erdoberfläche), was aber mit einer starken Abnahme der Feldstärke verbunden ist.

Über unendlich gut leitendem Boden lässt sich die Feldstärke der Bodenwelle E_{BW} des Fernfeldes (d. h. $d >> 0$) in Abhängigkeit von der Entfernung *d* vom Sender und der abgestrahlten Leistung *P* über die Beziehung

$$E_{BW} = 300\sqrt{P/d} \qquad (1)$$

berechnen [25], wo sich E_{BW} in mV/m ergibt wenn *P* in kW und *d* in km eingesetzt werden. Die nach dieser Formel ermittelten Feldstärkewerte müssen mit einem Dämpfungsfaktor multipliziert werden, der die endliche Bodenleitfähigkeit berücksichtigt. Es lässt sich für verschiedene Werte der Bodenleitfähigkeit die Abnahme der Bodenwellen-Feldstärke mit dem zunehmendem Abstand *d* ableiten, die für die Frequenz 75 kHz in Bild 14 dargestellt ist. Für die DCF77-Frequenz gelten praktisch die gleichen Beziehungen.

Wesentlich schwieriger ist die Ermittlung eines Erwartungswertes für die Feldstärke der Raumwelle. Unter der Annahme unendlich gut leitenden Bodens am Sendeort wird in Abhängigkeit vom Elevationswinkel ψ eine Raumwelle mit der Feldstärke E_{RW} zur Ionosphäre abgestrahlt,

$$E_{RW} = E_{BW} \cdot \cos\psi. \qquad (2)$$

Welcher Bruchteil R (Reflexionskoeffizient) von dieser zur Ionosphäre abgestrahlten Welle zum Empfangsort reflektiert wird, hängt von mehreren Einflüssen ab:

- von der Tages- und Jahreszeit,
- von der Sonnenaktivität sowie
- vom Einfallswinkel *i* der Raumwelle auf die D-Schicht.

Eine einfache Beziehung für die Abhängigkeit von R von diesen Einflüssen lässt sich nicht angeben. In [26] sind Diagramme und Rechenbeispiele angegeben, aus denen sich die zu erwartenden Werte für die Raumwellen-Feldstärke ermitteln lassen. Hieraus und aus (1) und (2) wurden die für das DCF77-Signal zu erwartenden Feldstärkewerte ermittelt und die Ergebnisse in Bild 15 dargestellt. Sie basieren auf der Annahme einer abgestrahlten Leistung von 30 kW. Die Raumwellenfeldstärke ist in Abhängigkeit von den Tages- und Jahreszeiten angegeben. Sie gilt im Falle eines Sonnenfleckenminimums. Bei einem Sonnenfleckenmaximum kann die Raumwellenfeldstärke bei Entfernungen bis etwa 800 km vom Sender größer sein, und zwar besonders tagsüber im Winter um etwa 5 bis 10 dB und nachts um etwa 3 dB.

Anschaulich wird das DCF77-Empfangsgebiet in Bild 16 dargestellt. Die Darstellung von Linien

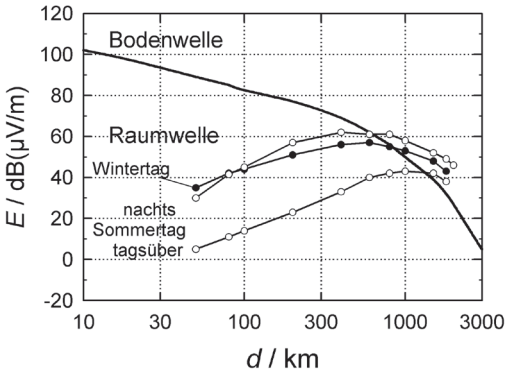

Bild 15:
Feldstärken der Boden- und Raumwelle als Funktion der Entfernung *d* vom Sendeort, berechnet nach [25, 26] unter der Annahme einer mit DCF77 abgestrahlten Leistung von 30 kW. Für die Bodenleitfähigkeit wurden $3 \cdot 10^{-3}$ S/m angenommen, es wird zwischen Ausbreitung im Sommer (offene Symbole) und Winter (volle Symbole) unterschieden.

gleicher Feldstärke als Kreise ist sicher vereinfacht, erlaubt aber zusammen mit Bild 15 eine Orientierung an welchen Orten mit DCF77-Empfang zu rechnen ist und wo wahrscheinlich nicht.

8 Empfang des DCF77-Signals

8.1 Rechtliche Aspekte

Die rechtliche Grundlage für das Inverkehrbringen von Normalfrequenzempfängern und Funkuhren bildet in der Bundesrepublik Deutschland des Gesetz über Funkanlagen und Telekommunikationsendeinrichtungen (FTEG). Dieses Gesetz ist die nationale Umsetzung der EU-Richtlinie 1999/5/EG (RTTE-Richtlinie). Daraus ergeben sich Rechte und Pflichten für Hersteller bzw. Inverkehrbringer, Importeure oder Wiederverkäufer. Die im § 3 FTEG genannten grundlegenden Anforderungen

- Schutz der Gesundheit und Sicherheit des Benutzers und anderer Personen,
- Schutzanforderungen in Bezug auf die elektromagnetische Verträglichkeit

sind von den Geräten zu erfüllen.

Neben der Bereitstellung einer technischen Dokumentation, aus der die bestimmungsgemäße Nutzung des Gerätes eindeutig hervorgeht (für das jeweilige Land in der EU/EWR in der Landessprache), sowie der Konformitätserklärung (KE) des Herstellers oder Inverkehrbringers für den Nutzer, muss die CE-Kennzeichnung [Art.12 (1–4) RL 1999/5/EG] dieser Geräte vorgenommen sein. Mit der KE bestätigt der Hersteller, dass diese Geräte die grundlegenden Anforderungen der Richtlinie bzw. des Gesetzes erfüllen. Wenn harmonisierte Normen zur Grundlage der KE gemacht wurden, kann davon ausgegangen werden, dass die grundlegenden Anforderungen eingehalten wurden.

Funkanlagen der Klasse 1 (dazu gehören DCF77-Empfangseinrichtungen) können ohne

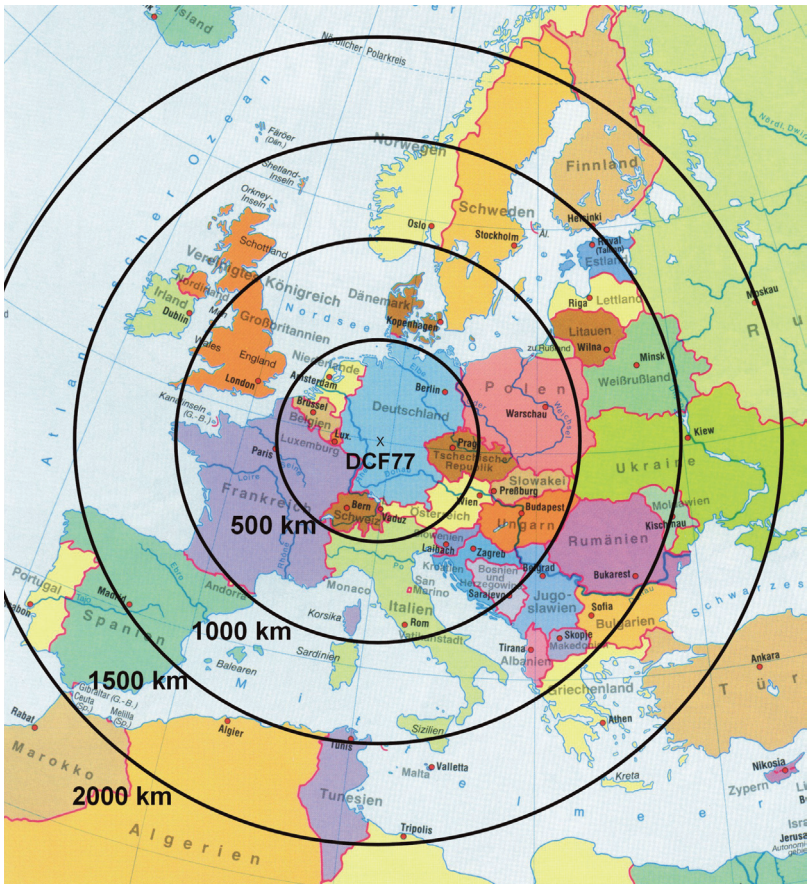

Bild 16:
Schematische Darstellung der Reichweite der DCF77-Aussendung.

Einschränkungen in Verkehr gebracht werden. Es ist keine Anzeige des Inverkehrbringens dieser Geräte auf dem EU/EWR-Markt bei den Regulierungsbehörden der Einzelstaaten notwendig. Weiterführende Hinweise geben die Internetseiten der Bundesnetzagentur zu diesem Thema [27].

8.2 Zeitliche Verfügbarkeit der Aussendung

DCF77 sendet im 24-h-Dauerbetrieb. Mit der Media Broadcast ist eine zeitliche Verfügbarkeit der DCF77-Aussendung von jährlich mindestens 99,7% vereinbart. Da ein Ersatzsender und eine Reserveantenne verfügbar sind, gibt es keine regelmäßigen Abschaltungen für Wartungsarbeiten. Mit kurzen Unterbrechungen bis zu wenigen Minuten muss dagegen gerechnet werden, wenn bei unerwarteten Störungen oder fälligen Wartungsarbeiten auf den Ersatzsender und die Reserveantenne umgeschaltet werden muss. Seit Sommer 1997 muss die DCF77-Aussendung selbst bei Gewittern am Sendeort nicht mehr für längere Zeit unterbrochen werden. Die Antennenzuführungen wurden in den Antennenhäusern mit Kugelfunkenstrecken und UV-Sensoren ausgerüstet. Kommt es nach einem Blitzeinschlag an einer Kugelfunkenstrecke zu einem Durchbruch mit Entstehung eines Lichtbogens, wird dieser vom UV-Sensor erkannt

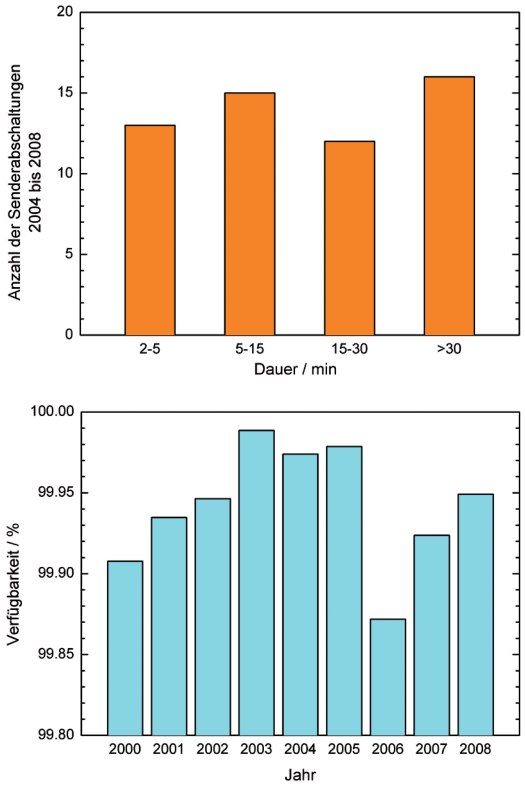

Bild 17:
Oben:
Häufigkeitsverteilung der Unterbrechungen von DCF77-Aussendung bestimmter Dauer in den Jahren 2004 bis 2008;

unten:
Jährliche Verfügbarkeit unter Vernachlässigung von Abschaltungen mit einer Dauer von weniger als zwei Minuten Dauer.

und einer Überwachungselektronik gemeldet. Da wegen der hohen Spannung des vom Sender gelieferten Signals der Lichtbogen nicht wieder von allein erlöschen würde, unterbricht die Überwachungselektronik automatisch für kurze Zeit das Senderausgangssignal, womit der normale Zustand wieder hergestellt wird. Bei Gewittern am Sendeort muss daher mit kurzzeitigen Unterbrechungen der DCF77-Aussendung gerechnet werden, so dass der Empfang einiger aufeinanderfolgender Sekundenmarken gestört sein kann.

In den letzten Jahren wurden Abschaltungen mit einer Dauer von größer als 2 Minuten gemäß der in Bild 17 oben dargestellten Verteilung beobachtet. Die zeitliche Verfügbarkeit über mehrere Jahre ist in Bild 17 unten gezeigt. Die häufigste Ursache für länger andauernde Unterbrechungen waren die elektrische Verstimmung des Antennenresonanzkreises durch Auslenkung der Antenne in starkem Sturm und bei Eisregen. Bei zu großer Fehlanpassung wird die Aussendung unterbrochen. Die Sendefunkstelle ist seit Juli 1999 außerhalb der regulären Arbeitszeit nicht mehr besetzt. Der Sender wird dann von Frankfurt am Main aus überwacht. In der PTB ist außerhalb der regulären Dienstzeit Wachpersonal anwesend. Bei größeren Störungen an den Steuer- und Sendeeinrichtungen, z. B. wenn die automatischen Überwachungseinrichtungen das Steuersignal oder den Sender abschalten, kann es also außerhalb der Dienstzeit längere Zeit dauern, bevor Mitarbeiter der Media Broadcast oder der PTB erreicht werden, die Maßnahmen zur Störungsbeseitigung einleiten können. Funkuhren, bei denen es auf hohe Sicherheit ankommt, sollten daher mit einer Gangreserve über mehrere Stunden in Form eines hochwertigen Quarzoszillators ausgestattet sein.

8.3 Eigenschaften der empfangenen Signale

Die sehr stabile Bodenwelle hat eine große Reichweite. Bis zu Entfernungen von einigen hundert Kilometern ist ihre Empfangsfeldstärke deutlich größer als die der Raumwelle. Unter 500 km Entfernung vom Sender kann man mit Feldstärken der Bodenwelle über 1 mV/m rechnen.

Im Entfernungsbereich zwischen etwa 600 km bis 1100 km können Boden- und Raumwelle gelegentlich gleich groß sein. Wie das Zeigerdiagramm in Bild 18 veranschaulicht, hängt es dabei vom Verhältnis der Amplituden von Boden- und Raumwelle und dem Phasenwinkel zwischen den beiden Feldkomponenten ab, welche Phasenwinkelverschiebung das resultierende Gesamtsignal, bezogen auf die Phase der Bodenwelle, erfährt und welche Gesamtamplitude sich einstellt. Werden am Empfangsort Amplituden- und Phasenschwankungen des Trägers

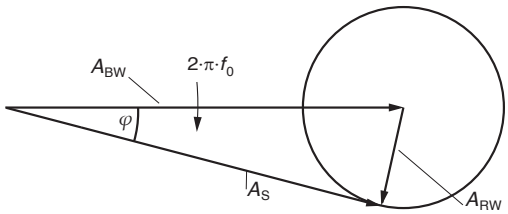

Bild 18:
Zeigerdiagramm zur Verdeutlichung der vektoriellen Überlagerung von Boden- und Raumwelle am Empfangsort;
A_{BW}, A_{RW}, A_S: Amplituden der Boden- und Raumwelle und des resultierenden Summensignals,
φ: Resultierende Phasenwinkelverschiebung des Summensignals gegenüber der Bodenwelle. Im Kreisdiagramm rotieren alle Vektoren mit der Winkelgeschwindigkeit $2\cdot\pi\cdot f_0$, wobei f_0 die Trägerfrequenz ist und φ bei stationären Verhältnissen konstant bleibt.

sowie (periodisch-) zeitliche Verschiebungen der Zeitsignale beobachtet, so haben diese ihre Ursache in dem schwankenden Anteil der Raumwelle als Folge von Änderungen des Reflexionskoeffizienten sowie in Laufzeitänderungen der Raumwelle, wenn sich in der Dämmerung die Höhe der D-Schicht von ca. 70 km auf ca. 90 km bzw. umgekehrt ändert. Welche Unsicherheiten beim Empfang der DCF77-Normalfrequenz und -Zeitsignale erreichbar sind, hängt daher wesentlich von der Entfernung des Empfangsortes vom Sender sowie von der Tages- und Jahreszeit ab.

Andererseits ist bei gleicher Phasenlage aber auch ein vorübergehender starker Feldstärkeanstieg möglich. Beide Phänomene werden auch schon in Braunschweig (d = 273 km) beobachtet,

wie Bild 10 belegt. In diesem Zusammenhang ist es wichtig zu wissen, dass diese „Schwebung" zwischen Boden- und Raumwelle langsam abläuft (eine Viertelstunde und länger) und somit für eine Funkuhr genügend Zeit zur Aufnahme der DCF77-Zeitinformation zur Verfügung steht. Bild 15 legt insbesondere nahe, dass Empfangsstörungen in den Wintermonaten gehäuft auftreten. Das deckt sich mit der größeren Anzahl von in dieser Jahreszeit an die PTB gerichteten Anfragen wegen beobachteter Empfangsschwierigkeiten.

In Entfernungen über 1100 km tritt der Bodenwellenanteil immer mehr zurück, und es überwiegt dann die Raumwelle, deren Ausbreitung in großen Entfernungen besonders am Tage recht konstant ist. Zwischen 1100 km und 2000 km Entfernung sind Feldstärken der Raumwelle zwischen einigen hundert und etwa 100 µV/m zu erwarten. Nach Bild 15 sind große Reichweiten besonders im Winter wahrscheinlich. Quasi als Bestätigung hierfür wurde im Januar 2009 zuverlässig vom DCF77-Empfang zweier handelsüblicher Funkwecker in Montreal, Kanada berichtet.

8.3.1 Empfang der Normalfrequenz

Wird der Träger von DCF77 zur Überwachung oder automatischen Nachsteuerung von Normalfrequenzgeneratoren genutzt, werden die dazu erforderlichen Frequenz- bzw. Phasenzeitvergleiche zwischen dem lokalen Oszillatorsignal und dem empfangenen DCF77-Trägersignal durch die ausbreitungsbedingten sowie die durch den PRN-Kode verursachten Phasenzeitschwankungen beeinträchtigt. Welche Phasenzeit- bzw. Frequenzschwankungen in Braunschweig, 273 km vom Sendeort entfernt, auftreten, wurde in der PTB wiederholt untersucht, das hier vorgestellte Beispiel datiert vom Herbst 2003. Die Registrierung der Phasenzeit

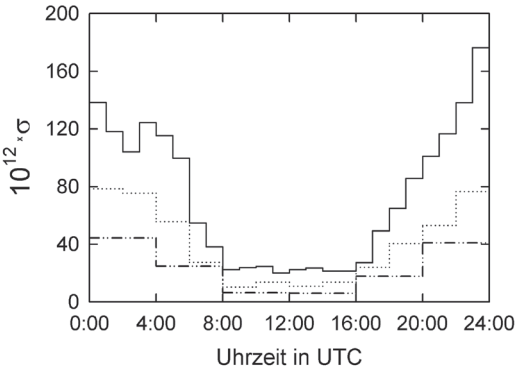

Bild 19:
Standardabweichung σ der relativen Abweichung der in Braunschweig empfangen DCF77-Trägerfrequenz vom Sollwert als Funktion der Tageszeit und der Mittelungszeit T (durchgezogen: T = 1 h, gepunktet: T = 2 h, strichpunktiert: T = 4 h), basierend auf 50 Tagen im Spätsommer 2003.

zwischen dem 1. September und dem 21. Oktober (50 Tage) ergab eine gemittelte relative Frequenzabweichung zwischen der DCF77-Trägerfrequenz und UTC(PTB) von $< 1 \cdot 10^{-14}$. Die relative Standardabweichung der Tagesmittelwerte betrug $1{,}5 \cdot 10^{-12}$ für das Messinterval jeweils von 12:00 UTC bis 12:00 UTC. Bestimmt man die Instabilität der registrierten Trägerfrequenz als Funktion der Uhrzeit der Messung, so ergibt sich die in Bild 19 dargestellte Abhängigkeit. Als Funktion der Tageszeit der Messung und der ausgewählten Mittelungszeit ergaben sich die gezeigten Schwankungen σ der Einzelmessungen bezogen auf den durch UTC(PTB) vorgegebenen Sollwert. Bei kurzen Mittelungszeiten können danach am Tage geringere Unsicherheiten erreicht werden als in der Nacht. Andererseits mitteln sich die durch Raumwelleneinfluss verursachten Frequenzschwankungen weitgehend heraus, wenn mit genügend langen Mittelungszeiten gemessen wird. Die Situation ist im Sommer typischerweise günstiger als im Winter.

Die für Braunschweig ermittelten Frequenzschwankungen können als Anhaltswerte für alle Empfangsorte dienen, an denen die Bodenwelle noch eine überwiegend größere Amplitude als die Raumwelle hat. Im Entfernungsbereich, in dem Boden- und Raumwelle gleich groß werden können, sind dagegen Frequenzvergleiche durch mögliches „Phasengleiten" („cycle slipping") erschwert. In sehr großen Entfernungen, wenn die Raumwelle die Oberhand gewinnt, liegen wieder konstante Verhältnisse vor. Hier sollten Frequenzvergleiche möglichst nur am Tage oder nur in der Nacht, d. h. bei stabiler Raumwellenausbreitung, vorgenommen werden, damit die Laufzeitänderungen durch das Wandern der D-Schicht in der Dämmerung nicht als Änderungen des lokalen Frequenzgenerators interpretiert werden.

Von der Industrie werden DCF77-Normalfrequenzempfänger zum automatischen Nachregeln von Quarz- und Atomfrequenznormalen angeboten. In solchen Frequenzreglern wird das Ausgangssignal des nachzuregelnden Normals auf die DCF77-Trägerfrequenz oder eine Subharmonische davon umgesetzt, und die Phasenzeiten des empfangenen DCF77-Signals und des umgesetzten Signals werden miteinander verglichen. Aus der zeitlichen Änderung der Phasendifferenz zwischen beiden Signalen wird ein Regelsignal zur automatischen Nachregelung des Frequenznormals hergeleitet. Kombiniert man derartige Frequenzregler mit Frequenznormalen hoher Eigenstabilität, wie Temperatur-kontrollierten Quarzoszillatoren oder Atomfrequenznormalen, können so große Regelzeitkonstanten gewählt werden, dass die ausbreitungsbedingten Phasenzeitschwankungen weitgehend ausgemit-

telt werden. Wie Messungen in verschiedenen Kalibrierlaboratorien bestätigt haben, lassen sie sich auf diese Weise Frequenznormale im langzeitigen Mittel mit Unsicherheiten von $1 \cdot 10^{-11}$ und auch noch darunter an die PTB-Atomfrequenznormale anschließen, ohne dabei die ihnen eigene Kurzzeitstabilität zu verlieren. Rubidium-Atomfrequenznormale in temperaturstabilisierten Messräumen werden zweckmäßigerweise mit Zeitkonstanten zwischen mindestens einem und mehreren Tagen geregelt.

8.3.2 Empfang der amplitudenmodulierten Zeitsignale

Der Zeitzeichenempfang wird häufig durch Störungen verschiedener Ursachen erschwert. Als besonders störend haben sich z. B. die 5. Oberwelle der Zeilenfrequenz (625 Hz oberhalb der DCF77-Trägerfrequenz) von Fernsehgeräten oder Pulsstörungen von Schaltnetzteilen und elektrischen Maschinen erwiesen. Auch atmosphärische Störungen, die z. B. durch Entladungen bei Gewittern hervorgerufen werden, können zu einer starken Beeinträchtigung des Zeitsignal-Empfangs führen. Um den Einfluss der verschiedenen Störungen auf die Zeitsignale gering zu halten, werden in vielen Funkuhren sehr schmalbandige Empfangsschaltungen eingesetzt. Dadurch gelingt es zwar, die Störanteile im Nutzsignal weitgehend zu reduzieren, andererseits bewirkt aber die Einschränkung des Übertragungsfrequenzbereiches eine Abflachung und Verrundung der Signalflanken. Am Sendeort durchgeführte Messungen des Frequenzspektrums sowie eine Abschätzung der Übertragungsbandbreite Δf aus der Ausschwingzeit t_0 der in Bild 4 dargestellten abfallenden Flanke der Trägereinhüllenden nach der Beziehung $\Delta f = 1/t_0$ haben ergeben, dass Δf in der Größenordnung von 850 Hz liegt. Je mehr von diesem Frequenzbereich empfangsseitig abgeschnitten wird, umso größer ist die statistische Unsicherheit, mit der die Ankunftszeit des DCF77-Signals angegeben werden kann. Der konstante Laufzeitanteil (Übertragungsstrecke und Empfänger intern) kann, falls erforderlich, mit einem überlegenen Übertragungsverfahren kalibriert und berücksichtigt werden. Um störsicheren Empfang zu garantieren, arbeiten viele der auf dem Markt befindlichen Funkuhren mit Bandbreiten um 10 Hz und begnügen sich mit Unsicherheiten von etwa 0,1 s.

Um geringere Unsicherheiten zu erreichen, muss mit steileren Flanken, d. h. größerer Bandbreite, aber auch zugleich größerer Störanfälligkeit gearbeitet werden. Geeignete Demodulations- und Mittelungsverfahren, um Störungen zu begegnen, sind z. B. die Synchrondemodulation, die Quadraturabtastung [28], Schrittregelung mit Einheitsschritten [29] (verwendet z. B. für die in Bild 11a dargestellten Messwerte) oder die trägersynchrone, digitale Zeitsignalmittelung durch Abtasten der Amplituden der Trägerschwingung im Bereich der Flanke. Bei Anwendung dieser Techniken sind in der Praxis bei Entfernungen, in denen die Bodenwelle deutlich überwiegt, Unsicherheiten von 50 µs bis 100 µs erreicht worden. Verschiedene Beiträge in den Tagungsbänden der Funkuhrentagungen [6] befassen sich mit der Thematik. In [3] wird auf Empfangsstörungen beim Tragen von Funkarmbanduhren eingegangen.

9 DCF77-Funkuhren

Die Idee, Zeitinformation über Radiowellen zu übertragen, ist fast so alt wie die Technik des „Radios“ selbst. Michael A. Lombardi vom National Institute of Standards and Technology (NIST), USA, hat in einer an Anekdoten reichen Zusammenstellung die Geschichte der Funkuhr in den USA nachgezeichnet [30]. Hieraus Folgendes:

Guglielmo Marconi experimentierte Ende des 19. bzw. Anfang des 20. Jahrhunderts mit Radiowellen und konnte 1899 die Kommunikation über den Ärmelkanal hinweg und 1901 über den Atlantik realisieren. Auf die „Marconi-Wellen“ nimmt der Ingenieur und Hersteller optischer Geräte Sir Howard Grubb Bezug, als er 1898 in einem Vortrag vor der Royal Dublin Society die Entwicklung tragbarer Funkuhren vorhersagte:

“There is something very beautiful in this action of the Marconi waves. In a city supplied with this apparatus we should be conscious as we hear each hour strike that above us and around us, swiftly and silently, this electrical wave is passing, conscientiously doing its work, and setting each clock in each establishment absolutely right, without any physical connection whatsoever between the central distributing clock, and those which it keeps correct by means of this mysterious electrical wave.

We might go even still further, and although I do not put it forward as a proposition likely to be carried out in any way, except as an experiment, yet it undoubtedly would be perfectly possible to carry an apparatus in one‘s pocket, and have our watches automatically set by this electrical wave as we walk about streets.” [31]

In Deutschland gehört Professor Dr.-Ing. Wolfgang Hilberg zu den Pionieren der Entwicklung der Funkuhren. Im Jahr 1967 – damals Ingenieur im Forschungsinstitut der Firma AEG-Telefunken in Ulm – beschrieb er unter dem Titel „Drahtlos gesteuerte Uhren mit Normalzeit-Ziffernanzeige“ das Prinzip eines Zeitverteilungssystems für Jedermann mit Hilfe eines Senders und digital arbeitender Funkuhren [32]. Im Jahr 1971 zeigte er, dass die für die Zeitübertragung benötigten Bandbreiten so gering

sind, dass die Aussendung von Zeitinformation z. B. an den Rändern von UKW-Kanälen erfolgen könnte [33]. Als mögliche Funkuhr für die Zeitübertragung mit Rundfunksendern stellte er den Versuchsaufbau eines handelsüblichen modifizierten Rundfunkgerätes vor, dem eine einfach zu realisierende Empfängerschaltung mit Nixie-Anzeigeröhren zur Zeitanzeige hinzugefügt worden war. Obwohl technisch möglich, ist es zu einer direkten Zeitverbreitung durch Rundfunk- oder Fernsehsender jedoch nie gekommen – abgesehen von der Aussendung von Zeitzeichen zur vollen Stunde oder der Einblendung von Uhren vor den Nachrichtensendungen.

Nach der Aufnahme des 24-Stunden Dauerbetriebs von DCF77 im Jahr 1970 begannen auch in der PTB die Überlegungen zur Aussendung kodierter Zeitinformation. Neben den Arbeiten von Hilberg verfolgte man die Entwicklung der Zeitsender WWV und WWVB in den USA, die 1960 bzw.1965 damit begonnen hatten, kodierte Zeitinformation auszusenden [21]. Zeitgleich mit dem Beginn der Aussendung des Zeitkodes über DCF77 stellte die PTB Prototypen von Funkuhren vor, die heute im Deutschen Museum, München und Bonn, sowie in der PTB ausgestellt bzw. noch in Betrieb sind. Die Schaltung dieser ersten DCF77-Funkuhren wurde 1974 veröffentlicht [34]. Sie stieß auf großes Interesse und zahlreiche Leser dieses Artikels bauten die Schaltung nach.

Wissenschaftliche Unterstützung bei der Weiterentwicklung der Funkuhr kam in den folgenden Jahren außer von der PTB von den Technischen Universitäten Darmstadt und Stuttgart. Besonders an der Technischen Universität Darmstadt, an der Prof. Hilberg 1972 einen Lehrstuhl für digitale Schaltungen erhalten hatte, wurden mit dem Ziel der Massenproduktion zu niedrigen Herstellungskosten neue Empfangsverfahren untersucht und kleine effiziente Funkuhren entwickelt. Anfang 1980 konnten die Darmstädter Forscher einem Ausschuss der deutschen Industrie im Institut für Uhren- und Feinwerktechnik der Universität Stuttgart einen voll funktionsfähigen Funkuhrempfänger mit innen liegender, kleiner Antenne und digitalem Display in der Größe heutiger Funkwecker vorführen. Mitte der achtziger Jahre brachten die Firmen KUNDO und Junghans ihre ersten Funkuhren, KUNDO SPACE TIMER und Junghans RC-1 auf den Markt. 1987 stellte die TU-Darmstadt den Prototyp einer Funkarmbanduhr mit eingebauter Antenne vor. Die Markteinführung der ersten kommerziellen Funkarmbanduhr erfolgte 1990 durch Junghans, deren MEGA 1 in Lombardis Aufsatz [30] als „*one of the most momentuous horlogical events ever*“ bezeichnet wurde. Die MEGA 1 ist heute bereits Ausstellungsstück in Uhren- und Technikmuseen.

10 Zeit- und Normalfrequenzdienste auf Langwelle

In den *Radio Regulations* der ITU sind die Frequenzbereiche 20,05 kHz – 70 kHz und 72 kHz – 84 kHz in Region1 (Europa und Afrika) sogenannten *primary fixed services* zugewiesen [35]. In Artikel 5.56 heißt es ergänzend, dass die Funkdienste, denen diese o. g. Frequenzbereiche zugewiesen sind, Normalfrequenz und Zeitzeichen aussenden können. Diese Dienste genießen Schutzrechte gegenüber störenden Interferenzen durch Aussendungen von *secondary services*. Dagegen sind andere Frequenzbänder ausschließlich für die Aussendung von Normalfrequenz reserviert und besonders geschützt (z. B. um 2,5 MHz, 5 MHz, 10 MHz). Wir beschränken uns nachfolgend auf die Darstellung der Dienste im Langwellenbereich. In der ITU-Empfehlung ITU-R TF768-5 *Standard Frequencies and Time Signals* sind die verschiedenen Dienste im Anhang aufgelistet. Im Anhang der ITU-Empfehlung ITU-R TF583-6 findet man die zur Zeit verwendeten Kodierschemata zur Übertragung der Zeitinformation. Während die Texte der Recommendations selbst nur kostenpflichtig bei der ITU zu erhalten sind (www.itu.int/rec/R-REC-TF/e), sind die o. g. im jährlichen Turnus aktualisierten Anhänge kostenlos verfügbar [36]. Basierend auf den mit Stand Oktober 2008 publizierten Informationen sind in Tabelle 1 die Eigenschaften der Zeitdienste auf Langwelle zusammengefasst.

Der vom Schweizer Sender HBG ausgesandte Zeitkode ist mit dem DCF77-Kode nahezu identisch, abgesehen von der Kennung der Minute. In den Sekundenmarken wird die Amplitude auf Null getastet – nicht auf 15 % wie beim DCF77. Allerdings steht wegen notwendiger umfassender Sanierungsarbeiten an den Antennenanlagen des HBG dessen dauerhafter Betrieb gegenwärtig in Frage [37]. Alle anderen Dienste verwenden andere Zeitkodes. In der ersten Reihe der Tabelle 1 sind die gegenwärtig publizierten Parameter des neuen chinesischen Zeitdienstes BPC enthalten [38], der vom National Time Service Centre, Lintong, Provinz Shanxii, Volksrepublik China, betrieben wird und für den mittlerweile auch kommerzielle Funkuhren erhältlich sind. Insgesamt sollen im Land 3 Stationen für die Aussendung von Zeitzeichen und Normalfrequenz entstehen. Auch die Taiwanesische Regierung hat den Aufbau eines Langwellenzeitdienstes beschlossen. Im letzten Jahrzehnt wurden erhebliche Aufwendungen in den Aufbau der beiden japanischen Stationen JJY sowie die Modernisierung des WWVB des NIST gesteckt [39]. Es besteht allem Anschein nach in vielen Ländern ein starkes öffentliches Interesse an der Verfügbarkeit der genauen Zeit, und die Aussendung über Langwelle wird als adäquates Medium hierfür angesehen.

11 Schlussbetrachtung

Mit dem von der PTB gesteuerten Langwellensender DCF77 auf 77,5 kHz steht seit vielen Jahren ein zuverlässiger Zeitsignal- und Normalfrequenzsender zur Verfügung, der in weiten Teilen Europas empfangen werden kann. DCF77-Funkuhren lassen sich preiswert herstellen und sind millionenfach im Einsatz. Heute sind im privaten Bereich etwa die Hälfte aller in Deutschland verkauften „elektrischen Großuhren“ (Tisch-, Gestell-, Wanduhren und Wecker) Funkuhren. Daneben sind mehr als eine halbe Million Industrie-Funkuhren im Einsatz, darunter solche, die von der pseudozufälligen Umtastung der Trägerphase Gebrauch machen.

Mit Hilfe der Trägerfrequenz von DCF77 werden Normalfrequenzgeneratoren kalibriert oder automatisch nachgeregelt. Im Verkehrswesen, z. B. bei Bahn und Flugsicherung, spielt DCF77 eine wichtige Rolle. Parkscheinautomaten und Ampelanlagen werden von DCF77 synchronisiert. In immer mehr Gebäuden werden Heizungs- und Lüftungsanlagen von DCF77 gesteuert und Rollläden von DCF77 geschlossen oder geöffnet. In der Telekommunikation und der Energiewirtschaft sind DCF77-Funkuhren eingesetzt, um zeitabhängige Tarife richtig abrechnen zu können. Zahlreiche NTP-Server speisen die von DCF77 empfangene Zeit in Rechnernetze ein. Alle Rundfunk- und Fernsehanstalten erhalten die genaue Zeit von DCF77. Diese Anwendungsbeispiele sollen genügen. Sie machen deutlich, welche beachtliche Entwicklung in den vergangenen 50 Jahren auch bei der „alten“ Technik wie der Zeitverbreitung auf Langwelle erfolgt ist. Und in immer noch zunehmenden Maße werden Funkuhren eingesetzt. Über die richtige Zeit zu verfügen, ohne die Uhr stellen zu müssen, wird eben sehr geschätzt. Der Erfolg der Funkuhr hat insbesondere auch etwas mit den Eigenschaften der Langwelle zu tun. Gegenüber Zeitsignalen von Satelliten haben Langwellensignale einen entscheidenden Vorteil: Sie dringen in Gebäude ein und ihr Empfang wird durch Hindernisse wie Bäume oder Hochhausbebauung nicht nennenswert beeinträchtigt. Man kann sie ohne Außenantenne mit in Funkuhren eingebauten kleinen Ferritantennen empfangen. Aufgrund dieser Eigenschaft der Langwelle können preiswerte, kompakte, mit Batterie oder Solarzellen betriebene Funkuhren ohne Kabelanschluß an eine externe Antenne gebaut und betrieben werden. Demgegenüber erfordert der zuverlässige Empfang von Signalen des Navigationssystems GPS und in Zukunft des europäischen Pendants Galileo eine Antenne mit möglichst freier Sicht zum Himmel. Kann diese

Tabelle 1.
Langwellenstationen, die Normalfrequenz und kodierte Zeitinformation übertragen (Stand Oktober 2008 [35]).
Der jeweils verwendete Zeitkode ist unter der im Text Kapitel 9 angegeben ITU Internet-Adresse oder den Betreibern zu finden.

Ruf-zeichen	**Land**	**Standort**	**Träger-frequenz** (kHz)	**Rel. Unsicherheit der Träger-frequenz** (1 σ, über 1 Tag)	**Senderleistung** (tatsächlich abgestrahlte Leistung (kW))	**Betriebsart**	**Internet-Adresse** http://+
BPC	**China**	**Pucheng** 34° 56,9' Nord 109° 33,1' Ost	**68,5**		**20**		**www.ntsc.ac.cn**
DCF77	**Deutschland**	**Mainflingen** 50° 01' Nord 09° 00' Ost	**77,5**	**$1 \cdot 10^{-12}$**	**30**	**kontinuierlich**	**www.ptb.de**
HBG	**Schweiz**	**Prangins** 46° 24' Nord 6° 15' Ost	**75**	**$2 \cdot 10^{-12}$**	**25**	**kontinuierlich**	**www.official-time.ch** oder **www.metas.ch**
JJY	**Japan**	**Ohtakadoyayama** 37° 22' Nord 140° 51' Ost	**40**	**$1 \cdot 10^{-12}$**	**12,5**	**kontinuierlich**	**jjy.nict.go.jp**
JJY	**Japan**	**Haganeyama** 33° 28' Nord 130° 11' Ost	**60**	**$1 \cdot 10^{-12}$**	**22,5**	**kontinuierlich**	**jjy.nict.go.jp**
MSF	**UK**	**Anthorn** 54° 55' Nord 03° 15' West	**60**	**$2 \cdot 10^{-12}$**	**17**	**kontinuierlich** außer während angekündigen Service-Abschaltungen	**npl.co.uk**
WWVB	**USA**	**Colorado Springs** 40° 40' Nord 105° 02' West	**60**	**$1 \cdot 10^{-11}$**	**65**	**kontinuierlich**	**tf.nist.gov**

aufgebaut werden, so werden unbestreitbar kleinere Unsicherheiten in der Zeitübertragung erreicht [17]. Die Zeitübertragung über Satelliten und die Zeitverbreitung auf Langwelle werden sich daher auch in Zukunft nicht gegenseitig ersetzen sondern ergänzen. So bleibt DCF77 weiterhin das bedeutendste Medium zur Verbreitung der gesetzlichen Zeit in Deutschland durch die PTB.

Literatur

[1] *D. Piester, P. Hetzel, A. Bauch:* Zeit- und Normalfrequenzverbreitung mit DCF77, PTB-Mitteilungen **114**, (2004), S. 345–368

[2] *J. Graf:* Wilhelm Foerster, Vater der Zeitverteilung im Deutschen Kaiserreich, in diesem Heft

[3] *K. Katzmann:* Die Technik der Funkuhren, in diesem Heft

[4] *P. Hetzel:* Zeitinformation und Normalfrequenz, telekom praxis **70**, (1993), S. 25–36

[5] *P. Hetzel:* Der Langwellensender DCF77 auf 77,5 kHz: 40 Jahre Zeitsignale und Normalfrequenz, 25 Jahre kodierte Zeitinformation, PTB-Mitteilungen **109,** (1999), S. 11–18

[6] *W. Hilberg,* Hrsg.:
a) *Funkuhren*, Oldenbourg Verlag GmbH, München, 1983, ISBN 3-486-27341-8;
b) Funkuhrtechnik, Oldenbourg Verlag GmbH, München, 1988, ISBN 3-486-20623-0;
c) *Funkuhren, Zeitsignale, Normalfrequenzen*, Verlag für Sprache und Technik, Groß-Bieberau, 1993, ISBN 3-928161-02-04

[7] *G. Becker:* Die Sekunde, PTB-Mitteilungen **85,** (1975), S. 14–28

[8] *H. Enslin:* Die Entwicklung der Bürgerlichen Zeit seit 1800. Alte Uhren und moderne Zeitmessung **1**, (1988), S. 60–75 und Seewart **44**, (1983), S. 264–280

[9] *T. Jones:* Splitting the Second: The Story of Atomic Time, Bristol, IOP Publishing 2000

[10] *R. A. Nelson, D. D. McCarthy, S. Malys, J. Levine, B. Guinot, H. F. Fliegel, R. L. Beard, T. R. Bartholomew:* The leap second: its history and possible future, Metrologia **38**, (2001), S. 509–529

[11] *J. Levine:* Introduction to time and frequency metrology, Rev. Scientific Instr. **70**, (1999), S. 2567–2596

[12] *B. Siebert:* Das Internationale Einheitensystem SI. PTB-Mitteilungen **117**, (2007), S. 145–182

[13] *A. Bauch, T. Heindorff:* Zeit – Die SI-Basiseinheit Sekunde, PTB-Mitteilungen **112**, (2002), S. 291–298

[14] *A. Bauch:* The PTB clocks CS1 and CS2, Metrologia **42**, (2005), S. S43–S54

[15] *R. Wynands, S. Weyers:* Atomic fountain clocks, Metrologia **42**, (2005), S. S64–S79

[16] *A. Bauch:* Caesium atomic clocks: function, performance and applications, Meas. Sci. Technol. **14,** (2003), S. 1159–1173

[17] *J. Levine:* Time and frequency distribution using satellites, Rep. Prog. Phys. **65**, (2002), S. 1119–1164

[18] Radio Regulations, Article 19, „Identification of stations“, ITU Radiocommunication Bureau, Geneva 2001

[19] *W. Markowitz, R. G. Hall, L. Essen, J. V. L. Parry:* Frequency of cesium in terms of ephemeris time, Phys. Rev. Lett. **1**, (1958), S. 105–107

[20] *P. Forman:* Atomichron: the atomic clock from concept to commercial product, Proc. IEEE **73,** (1984), S. 1181–1204

[21] Natl. Inst. Stand. Technol. Spec. Publ. 250-67, 160 pages (January 2005), CODEN: NSPUE2

[22] *P. Hetzel:* Zeitübertragung auf Langwelle durch amplitudenmodulierte Zeitsignale und pseudozufällige Umtastung der Trägerphase, Dissertation Universität Stuttgart, 1987

[23] *P. Hetzel:* Time dissemination via the LF transmitter DCF77 using a pseudo-random phase-shift keying of the carrier, Proc. 2nd European Frequency and Time Forum, Neuchâtel, (1988), S. 351– 64

[24] Handbook „The ionosphere and its effects on radiowave propagation“, ITU, Radiocommunication Bureau, Geneva 1998

[25] ITU-R Recommendation 368-6 „Ground Wave propagation curves for frequencies between 10 kHz and 30 MHz“, entnommen dem Band Recommendations des CCIR, 1990, Volume V, aktuelle Version siehe ITU Internet-Adresse in Kapitel 9

[26] ITU-R Recommendation 684-3 „Prediction of field strength at frequencies below 150 kHz“, ITU, Geneva, 2002

[27] www.bundesnetzagentur.de, Suchbegriffe FTEG und TKEE

[28] Ref 6b, S. 29–59 und S. 107–124

[29] *G. Becker:* Schrittregelung für die Mittelung von Zeitsignalen, PTB-Mitteilungen **85**, (1975), S. 448–457

[30] *M. A. Lombardi:* Radio Controlled Clocks, Proc. of the 2003 National Conference of Standards Laboratories NCSL, auf CD-ROM

[31] *Sir H. Grubb:* Proposal for the Utilization of the ‚Marconi' System of Wireless Telegraphy for the Control of Public and Other Clocks, Scientific Proceedings of the Royal Dublin Society, vol. X, part I(7), 1899, S. 121, zitiert in [30]

[32] *W. Hilberg:* Drahtlos gesteuerte Uhren mit Normalzeit-Ziffernanzeige, Elektronik ,

16. Jahrg., Heft 11 (Nov. 1967) S. 325–328 und Heft 12 (Dez. 1967), S. 377–380

[33] *W. Hilberg, K. Buck:* Eine integrierte digitale Empfängerschaltung für ein drahtloses elektronisches Zeitverteilungssystem, Nachrichtentechnische Zeitschrift (NTZ) 1971, Heft 11, S. 572–577

[34] *P. Hetzel, L. Rohbeck:* Digitale Anzeige der vom Sender DCF77 verbreiteten Amtlichen Zeit, Funkschau **46**, 1974, S. 727–730

[35] Ref. [18], Section IV

[36] www.itu.int/ITU-R/index.asp?category=study-groups&rlink=rsg7&lang=en, Related Information „TF583“ bzw. „TF768“

[37] *C. Schlunegger:* Facelifting am Langwellensender HBG in Prangins, METinfo **15**, (2008), S. 22–23

[38] *Y. Wang:* Recent progress on time and frequency in NTSC, Proc. 2002ATF, publ. 2003, S. 30–33

[39] *M. A. Lombardi:* NIST Time and Frequency Services“, NIST Spec. Publ. **432**, 2002 Edition

Anhang 1

— 93 —

Reichs-Gesetzblatt.

№ 7.

Inhalt: Gesetz, betreffend die Einführung einer einheitlichen Zeitbestimmung. S. 93.

(Nr. 2075.) Gesetz, betreffend die Einführung einer einheitlichen Zeitbestimmung. Vom 12. März 1893.

Wir Wilhelm, von Gottes Gnaden Deutscher Kaiser, König von Preußen ꝛc.

verordnen im Namen des Reichs, nach erfolgter Zustimmung des Bundesraths und des Reichstags, was folgt:

Die gesetzliche Zeit in Deutschland ist die mittlere Sonnenzeit des fünfzehnten Längengrades östlich von Greenwich.

Dieses Gesetz tritt mit dem Zeitpunkt in Kraft, in welchem nach der im vorhergehenden Absatz festgesetzten Zeitbestimmung der 1. April 1893 beginnt.

Urkundlich unter Unserer Höchsteigenhändigen Unterschrift und beigedrucktem Kaiserlichen Insiegel.

Gegeben Berlin Schloß, den 12. März 1893.

(L. S.) Wilhelm.

Graf von Caprivi.

Herausgegeben im Reichsamt des Innern.

Berlin, gedruckt in der Reichsdruckerei.

Reichs-Gesetzbl. 1893. 16

Ausgegeben zu Berlin den 16. März 1893.

Anhang 2

Die aktuelle Festlegung der gesetzlichen Zeit und der Rolle der PTB ist Teil des im Jahr 2008 neu gefassten Einheiten- und Zeitgesetzes (EinhZeitG), Bundesgesetzblatt Jahrgang 2008, Teil I, Nr. 28, 11. Juli 2008.

Darin heißt es (in Auszügen):

§ 1 Anwendungsbereich

(1) Im amtlichen und geschäftlichen Verkehr sind Größen in gesetzlichen Einheiten anzugeben, wenn für sie Einheiten in einer Rechtsverordnung nach diesem Gesetz festgesetzt sind. Für die gesetzlichen Einheiten sind die festgelegten Namen und Einheitenzeichen zu verwenden.

(2) Im amtlichen und geschäftlichen Verkehr sind Datum und Uhrzeit nach der gesetzlichen Zeit zu verwenden.

§ 4 Gesetzliche Zeit

(1) Die gesetzliche Zeit ist die mitteleuropäische Zeit. Diese ist bestimmt durch die koordinierte Weltzeit unter Hinzufügung einer Stunde.

(2) Für den Zeitraum ihrer Einführung ist die mitteleuropäische Sommerzeit die gesetzliche Zeit. Die mitteleuropäische Sommerzeit ist bestimmt durch die koordinierte Weltzeit unter Hinzufügung zweier Stunden.

§ 5 Ermächtigung zur Einführung der mitteleuropäischen Sommerzeit

(1) Das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie wird ermächtigt, zur besseren Ausnutzung der Tageshelligkeit und zur Angleichung der Zeitzählung an diejenige benachbarter Staaten durch Rechtsverordnung, die nicht der Zustimmung des Bundesrates bedarf, für einen Zeitraum zwischen dem 1. März und dem 31. Oktober die mitteleuropäische Sommerzeit einzuführen.

(2) Die mitteleuropäische Sommerzeit soll jeweils an einem Sonntag beginnen und enden. Das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie bestimmt in der Rechtsverordnung nach Absatz 1 den Tag und die Uhrzeit, zu der die mitteleuropäische Sommerzeit beginnt und endet, sowie die Bezeichnung der am Ende der mitteleuropäischen Sommerzeit doppelt erscheinenden Stunde.

§ 6 Physikalisch-Technische Bundesanstalt

(2) Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt hat
1. die gesetzlichen Einheiten darzustellen, weiterzugeben und die dafür benötigten Verfahren weiterzuentwickeln,
2. die gesetzliche Zeit darzustellen und zu verbreiten,
5. die Verfahren bekannt zu machen, nach denen nicht verkörperte Einheiten, einschließlich der Zeiteinheit und der Zeitskalen sowie der Temperatureinheit und Temperaturskalen, dargestellt werden.

Anhang 3

Verordnung über die Einführung der mitteleuropäischen Sommerzeit ab dem Jahr 2002* (Sommerzeitverordnung-SoZV) vom 12. Juli 2001

Auf Grund des § 3 des Zeitgesetzes vom 25. Juli 1978 (BGBl. I s. 1110, 1262), der durch das Gesetz vom 13. September 1994 (BGBl. I S. 2322) geändert worden ist, verordnet die Bundesregierung:

§ 1

Ab dem Jahr 2002 wird die mitteleuropäische Sommerzeit (§ 1 Abs. 4 des Zeitgesetzes) auf unbestimmte Zeit eingeführt.

§ 2

(1) Die mitteleuropäische Sommerzeit beginnt jeweils am letzten Sonntag im März um 2 Uhr mitteleuropäischer Zeit. Im Zeitpunkt des Beginns der Sommerzeit wird die Stundenzählung um eine Stunde von 2 Uhr auf 3 Uhr vorgestellt.

(2) Die mitteleuropäische Sommerzeit endet jeweils am letzten Sonntag im Oktober um 3 Uhr mitteleuropäischer Sommerzeit. Im Zeitpunkt des Endes der Sommerzeit wird die Stundenzählung um eine Stunde von 3 Uhr auf 2 Uhr zurückgestellt. Die Stunde von 2 Uhr bis 3 Uhr erscheint dabei zweimal. Die erste Stunde (von 2 Uhr bis 3 Uhr mitteleuropäischer Sommerzeit) wird mit 2A und die zweite Stunde (von 2 Uhr bis 3 Uhr mitteleuropäischer ZeitI mit 2B bezeichnet.

§ 3

Das Bundesministerium des Innern gibt im Bundesanzeiger, beginnend mit dem Jahr 2002, für jeweils fünf aufeinander folgende Jahre Beginn und Ende der Sommerzeit bekannt.

* Diese Bekanntmachung dient auch der Umsetzung der Mitteilung der Kommission 2006/C61/02 gemäß Art. 4 der Richtlinie 2000/84/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. Januar 2001 zur Regelung der Sommerzeit (ABl. EG 2006 Nr. C 61 S. 2).

Anhang 4

Bekanntmachung gemäß § 3 der Sommerzeitverordnung

Gemäß § 3 der Sommerzeitverordnung vom 12. Juli 2001 (BGBl. I S. 1591), geändert durch Art. 4 des Gesetzes vom 3. Juli 2008 (BGBl. I S. 1185) gibt das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie für die Jahre 2010 bis einschließlich 2014 Beginn und Ende der Sommerzeit bekannt:

- 2010: Beginn: Sonntag, 28. März; Ende: Sonntag, 31. Oktober,
- 2011: Beginn: Sonntag, 27. März; Ende: Sonntag, 30. Oktober,
- 2012: Beginn: Sonntag, 25. März; Ende: Sonntag, 28. Oktober,
- 2013: Beginn: Sonntag, 31. März; Ende: Sonntag, 27. Oktober,
- 2014: Beginn: Sonntag, 30. März; Ende: Sonntag, 26. Oktober.

Berlin, März 2009
Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie