

Zeit- und Normalfrequenzverbreitung mit DCF77

Dirk Piester¹, Peter Hetzel² und Andreas Bauch³

Zusammenfassung

Seit mehr als dreißig Jahren werden in der Verantwortung der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) mit dem Langwellensender DCF77 rund um die Uhr Normalfrequenz und Zeitsignale sowie kodierte Zeitinformation gemäß der gesetzlichen Zeit für Deutschland ausgesendet. Die Sendeeinrichtungen werden heute von der T-Systems Media Broadcast betrieben, einer Tochter der Deutschen Telekom AG, in der Nachfolge der Deutschen Bundespost. DCF77 mit seinem millionenfach genutzten Zeitkode ist ein wichtiger Bestandteil der steuerfinanzierten Infrastruktur unseres Landes geworden.

Wir stellen zunächst die Grundlagen der gesetzlichen Zeit und des internationalen Zeitsystems vor. Nach einem historischen Abriss über die Entwicklung des DCF77 werden die aktuellen Eigenschaften des Senders beschrieben. Wir diskutieren Ausbreitung und Empfang von DCF77 und auch kursorisch die Entwicklung der Funkuhr sowie die dem DCF77 ähnlichen Zeitdienste auf Langwelle in anderen Ländern der Erde. Abschließend geht es um die mögliche Nutzung des DCF77 zur Bevölkerungswarnung vor Katastrophen mittels Funk-Alarmuhren.

Summary

Since more than thirty years, the Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) disseminates standard frequency and time signals around the clock by means of the LF-transmitter DCF77, operated formerly by Deutsche Bundespost and, in these days, by T-Systems Media Broadcast, a subsidiary of the Deutsche Telekom AG. Since 1973 coded time information according to German legal time has been broadcast, and this particular service has become very popular in Germany and in Europe. DCF77 has developed to become an important part of the state-funded infrastructure of Germany.

We describe how legal time in Germany is defined and how the underlying Coordinated

Universal Time is realised. Having given a cursory survey of the history of the development of the DCF77 service, we present in some detail the current properties of the service. Further subjects are the propagation of long waves, DCF77 reception, and, very briefly, the development of radio-controlled clocks. Finally we give some information on other time services using long wave world-wide, and the potential use of DCF77 for alarming the public regarding catastrophic events through newly developed radio controlled clocks including an alarming function.

1 Einleitung

„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 in einer Zeitskala (Stichwort: Uhrzeit) verwendet. Die letzte Aufgabe ist wohl die im täglichen Leben bedeutendste. Kaum ein (erwachsener) Bürger in unserem europäischen Kulturraum wird nicht wenigstens einmal täglich auf eine Uhr sehen. 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 1884 die Washingtoner Standardzeit-Konferenz, auf der die Lage des Nullmeridians und das System der 24 Zeitzonen zu je 15° geographischer Länge festgelegt wurden. Die Datierung von Ereignissen folgt weitgehend lange eingeführten Konventionen. 24 Stunden zu 60 Minuten zu 60 Sekunden bil-

- 1 Dr.-Ing. Dirk Piester, Mitarbeiter der PTB-Arbeitsgruppe „Zeitübertragung“
E-Mail: dirk.piester@ptb.de
- 2 Dr.-Ing. Peter Hetzel, bis 2002 Leiter des PTB-Fachlaboratoriums „Zeit- und Frequenzübertragung“
- 3 Dr. Andreas Bauch, Leiter der PTB-Arbeitsgruppe „Zeitübertragung“
E-Mail: andreas.bauch@ptb.de

den einen Tag. Der Beginn des Tages ist auf 0:00 Uhr festgelegt. Für die Zählung der Tage wird in Deutschland und vielen Ländern der Erde der Gregorianische Kalender verwendet.

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 (Anhang 2) wurde diese Regelung in das „Atomzeitalter“ überführt und die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) mit der Darstellung und Verbreitung der gesetzlichen Zeit beauftragt.

Nützliche Festlegungen zu Zeit, Kalender, Wochennummerierung und Schreibweise von Tagesdatum und Uhrzeit findet man in der Norm ISO 8601 sowie der entsprechenden deutschen bzw. europäischen Norm DIN EN 28601. Hier sollen nur drei Details angeführt werden, die immer wieder Grund zu Fragen geben. Die genannte Norm legt u. a. fest:

- 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 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.

Die gesamte Thematik, insbesondere auch der historische Wechsel von der astronomischen zur atomphysikalischen Zeitbestimmung, wird in verschiedenen Publikationen in größerer Tiefe behandelt [1–4]. Wir verweisen Interessenten an Kalender und Chronologie auf [5], an der soziologischen Bedeutung der Zeitmessung auf [6].

Schon zu Beginn des letzten Jahrhunderts erkannte man in Funkwellen ein geeignetes Mittel zur Zeitübertragung. Die ersten Versuche zur drahtlosen Zeitübermittlung unternahm 1903 das United States Naval Observatory, 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 Marineobservatoriums Wilhelmshaven. Ab 1917 strahlte dann die Großsendestelle Nauen zweimal täglich ein Zeitzeichen auf Langwelle 3 900 m aus. Nach diesen Anfängen der drahtlosen Zeitübertragung entstand im Laufe der Jahre ein erdumspannendes Netz von Zeitzeichenstationen. Zur Zeitverbreitung mit terrestrischen Sendern kam

in den vergangenen zwei Jahrzehnten die Zeitübertragung über Satelliten hinzu und eröffnete völlig neue Möglichkeiten für interkontinentale Präzisionszeitvergleiche, Ortsbestimmung und globale Navigation. Aktuelle Bestandsaufnahmen des gesamten Gebietes der Zeitübertragung findet man beispielsweise in [7, 8].

Dieser Aufsatz handelt von der Verbreitung der gesetzlichen Zeit mit dem Zeitzeichen- und Normalfrequenzsender DCF77 durch die PTB. Diese Aufgabe wird heute von der Arbeitsgruppe Zeitübertragung im Fachbereich Zeit und Frequenz der PTB wahrgenommen (Internet: <http://www.ptb.de/Zeit>). Unter der angegebenen Internetadresse gibt es u. a. Hinweise auf die anderen Zeitdienste der PTB, nämlich über das öffentliche Telefonnetz und das Internet, die hier nicht behandelt werden.

Der Aufsatz ist wie folgt gegliedert: Zunächst werden im Kapitel 2 die Grundlagen der gesetzlichen Zeit und des internationalen Zeitsystems dargestellt. Nach einem historischen Abriss über die Entwicklung des DCF77 in Kapitel 3 werden die aktuellen Eigenschaften des Senders beschrieben (Kapitel 4 bis 6). Auf einige grundlegende Fragen der Ausbreitung und des Empfanges von DCF77-Signalen wird in den Kapiteln 6 und 7 eingegangen, bevor in knapper Form die Entwicklung der Funkuhr (Kapitel 8) nachgezeichnet wird und die dem DCF77 ähnlichen Zeitdienste auf Langwelle in anderen Ländern der Erde vorgestellt werden (Kapitel 9). Zusammenfassend werden die Vorzüge des Empfanges von Langwellensignalen diskutiert. Dabei wird auch kurz auf eine erweiterte Nutzung des DCF77 zum Zweck der Bevölkerungswarnung vor Katastrophen eingegangen.

Nach mehr als 30 Jahren der Aussendung von kodierter Zeitinformation durch amplitudenmodulierte Zeitsignale, dazu seit etwa 20 Jahren auch durch pseudozufällige Umtastung der Trägerphase, ist DCF77 ein etablierter Dienst, und zahlreiche Veröffentlichungen sind im Laufe der Jahre entstanden. In dieser Arbeit wird versucht, ausgehend von früheren Arbeiten unseres Co-Autors Dr.-Ing. Peter Hetzel [9, 10], eine weitgehend vollständige Darstellung des heutigen Standes zu geben. Nicht jeder Entwicklungsschritt wird mit dem zum damaligen Zeitpunkt aktuellen Literaturzitat belegt. Weiterführende Literatur wird nur dann angegeben, wenn sie über das hier angegebene Material hinaus wesentliche Informationen enthält.

Neben den erwähnten Arbeiten [9, 10] bieten die drei von W. Hilberg anlässlich der „Funkuhrentagungen“, die an der Technischen Universität Darmstadt und der PTB zwischen 1983 und 1993 stattfanden, herausgegebenen Tagungsbände [11] eine reiche Auswahl an Originalarbeiten und Literaturzitaten.

2 Realisierung und Verbreitung der gesetzlichen Zeit für Deutschland

2.1 Gesetzliche Grundlagen

Das Zeitgesetz von 1978 (siehe Anhang 2) beauftragt die PTB, 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, wie sie von der PTB realisiert werden. Sie werden aus der Koordinierten Weltzeit UTC (Universal Coordinated Time, siehe nächster Abschnitt) unter Hinzufügen von einer bzw. zwei Stunden abgeleitet:

$$\text{MEZ(D)} = \text{UTC(PTB)} + 1\text{h},$$

$$\text{MESZ(D)} = \text{UTC(PTB)} + 2\text{h}.$$

Die Bundesregierung ist nach dem Zeitgesetz ermächtigt, 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.

2.2 Koordinierte Weltzeit

Die Sektion Zeit 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. Bis 1988 wurde diese Aufgabe vom Internationalen Büro für die Zeit BIH (Bureau International de l'Heure) wahrgenommen. Im Prinzip würde eine hinreichend genaue, stabile und zuverlässige Uhr genügen, die Zeit anzugeben. Da eine solche Uhr jedoch nirgendwo zur Verfügung steht, berechnet das BIPM eine Zeitreferenz auf der Basis von etwa 250 Uhren, darunter etwa zehn sog. primären Uhren (s. u.), aus ca. 50 weltweit verteilten Zeitinstituten. Zunächst ermittelt das BIPM die Gang-Instabilitäten dieser Uhren und weist ihnen statistische Gewichte zu, mit denen sie bei der Berechnung der gemittelten Zeitskala berücksichtigt werden. Eine stabile Uhr erhält ein hohes statistisches Gewicht und umgekehrt. Das so gewonnene Mittel wird EAL (Echelle Atomique Libre, freie Atomzeitskala) genannt. In einem zweiten Schritt wird die Internationale Atomzeit TAI (Temps Atomique International) mittels einer Frequenzkorrektur aus EAL gewonnen. Das Skalenmaß von TAI wird dabei so nachgeregelt, dass es so gut wie möglich mit der SI-Sekunde übereinstimmt, wie sie auf Meereshöhe reali-

siert würde. „SI-Sekunde“ bezeichnet die Basiseinheit der Zeit im Internationalen Einheitensystem SI (System International) [12]. Die Frequenzkorrektur wird gegenwärtig aus dem Vergleich von EAL mit den primären Uhren der Zeitinstitute in Frankreich, Italien, Japan, USA, und Deutschland abgeleitet. TAI hatte verschiedene Vorläufer [4], aber man hat den fiktiven Anfangspunkt von TAI so festgelegt, dass der 1. Januar 1958, 0 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 z. B. Reichsgesetzblatt von 1893, Anhang 1).

Aus TAI wird UTC abgeleitet, die Basis unseres heutigen Weltzeitsystems mit 24 Zeitzonen. UTC geht auf Vorschläge des CCIR (Comité Consultatif International des Radiocommunications) der ITU (International Telecommunication Union) zurück, nach denen die Aussendung von Zeitzeichen „koordiniert“, d. h. bezogen auf eine gemeinsame Zeitskala erfolgen sollte, die mit UT1 näherungsweise in Übereinstimmung gehalten wird [7, 13]. UTC und TAI haben mit der SI-Sekunde das gleiche Skalenmaß, und die Differenz UTC minus UT1 wird durch Schaltsekunden in UTC auf unter 0,9 Sekunden begrenzt. Für UTC-TAI folgt die in Bild 1 gezeigte Treppenkurve, die der monotonen Änderung von UT1-TAI folgt. Die Einführung der Schaltsekunden geschieht zum Jahreswechsel oder auch in der Mitte des Jahres 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 hierüber trifft der Internationale Dienst für Erdrotation und Referenzsysteme (International Earth Rotation and Reference Systems Service IERS (Internet: <http://hpiers.obspm.fr> oder <http://www.iers.org>) in Abhängigkeit von den kontinuierlich registrierten Parametern der Erdrotation (Lage der Drehachse, Periode). Die unre-

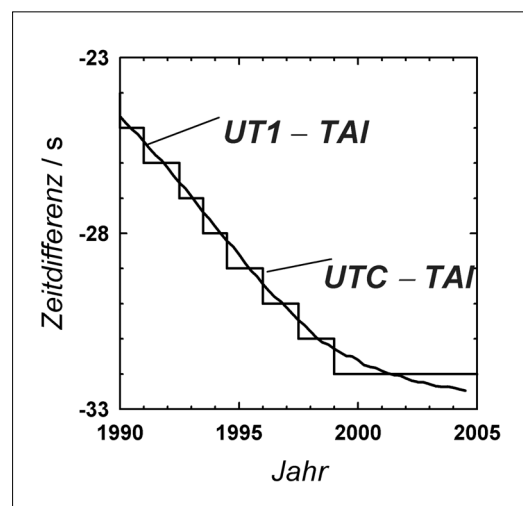


Bild 1:
Vergleich von (astronomischer) Weltzeit UT1 und Koordinierter Weltzeit UTC mit der Internationalen Atomzeit TAI.

gelmäßige Einführung von Schaltsekunden (Bild 1) spiegelt die ungleichmäßige Drehgeschwindigkeit der Erde wider. Gegenwärtig dreht sich die Erde deutlich schneller als im Mittel der letzten Jahrzehnte.

Nach der Einführung des UTC-Zeitsystems mit Schaltsekunden am 01.01.1972 wurden die DCF77 Sekundenmarken 1 bis 15 zur Aussendung des von der ITU empfohlenen DUT1-Kodes verwendet, mit dem Betrag und Vorzeichen der auf 0,1 Sekunde gerundete Differenz UT1-UTC mitgeteilt wurde. Mangels Interesse wurde dies am 10.05.1977 nach einer Umfrageaktion bei DCF77-Nutzern wieder eingestellt.

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. Ähnlich wie TAI wird UTC allerdings nur in Form von errechneten Standarddifferenzen mit Bezug auf die in den einzelnen Zeitinstituten (i) realisierten Zeitskalen UTC(i) publiziert. Daraus erklärt sich die Forderung, dass die Skalen UTC(i) möglichst gut mit UTC – und damit auch untereinander – übereinstimmen sollen. Ende 2004 gab es weltweit 25 Zeitskalen mit einer Abweichung UTC-UTC(i) von weniger als 100 ns, darunter die der PTB. Bild 2 zeigt die Differenz zwischen UTC und UTC(PTB) während einer Zeitspanne von zwei Jahren bis einschließlich September 2004. Hier, wie in anderen Abbildungen, wird das Modifizierte Julianische Datum MJD, eine fortlaufende Tageszählung, verwendet. Der Tag MJD 53279 entspricht dem Tag 2004-10-01.

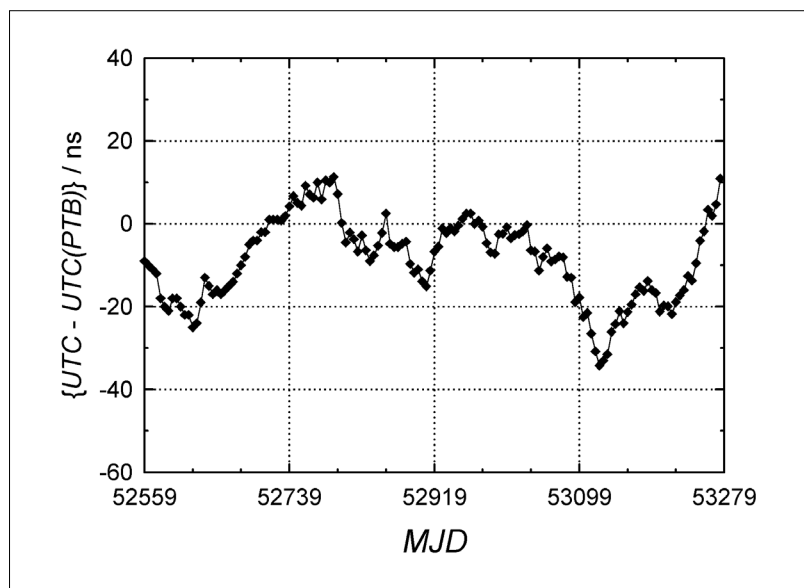


Bild 2:

Vergleich der Koordinierten Weltzeit UTC mit der in der PTB realisierten Atomzeitskala UTC(PTB) über zwei Jahre bis einschließlich September 2004. MJD bezeichnet das Modifizierte Julianische Datum, eine fortlaufende Tageszählung. MJD 53279 entspricht dem Tag 2004-10-01.

2.3 Die Atomuhren der PTB

Die PTB betreibt eine Gruppe von Atomuhren, um die Atomzeitskala UTC(PTB) mit großer Stabilität und Zuverlässigkeit zu realisieren. Zu der Gruppe gehören einige kommerziell gefertigte Cäsiumatomuhren, Wasserstoffmaser und die sog. primären Uhren CS1, CS2 und CSF1, die in den letzten Jahrzehnten in der PTB entwickelt wurden [12]. Die besten kommerziellen Cäsiumatomuhren 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 [14]. 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, mit welcher Wahrscheinlichkeit die realisierte Sekunde in welchem Ausmaß 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. $1,2 \cdot 10^{-14}$ [12, 14] beträgt ($1-\sigma$ Wert, d. h. 67% Wahrscheinlichkeit). Eine konstante relative Abweichung von $1 \cdot 10^{-14}$ entspricht einem Gangfehler von etwa einer Milliardstel Sekunde pro Tag. Die Zeitskala UTC(PTB) wird gegenwärtig von CS2 abgeleitet. Eine Frequenzkorrektur von typisch relativ $1 \cdot 10^{-14}$ sorgt dafür, dass die Differenz UTC-UTC(PTB) so klein bleibt, wie es in Bild 2 zu sehen ist.

3 DCF77: Von den Anfängen bis zum zweiten Jahrzehnt des 21. Jahrhunderts

3.1 Verantwortlichkeiten, vertragliche Regelungen

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: für Verkehr, Post und Wirtschaft. Diese Zusammenarbeit spiegelt die Situation wider, in der die Zeit noch basierend auf astronomischen Beobachtungen realisiert wurde, in Deutschland vom DHI, die Zeiteinheit aber schon von metrologischen Instituten, wie der PTB, mit überlegener Genauigkeit realisiert wurde. Die Deutsche Bundespost bot für diesen Zweck den Sender mit der Bezeichnung DCF77 an. Die PTB stellte hochgenaue Quarzuhren zur Verfügung und entwickelte eine Steuereinrichtung, das DHI lieferte Zeitzeichen auf astronomischer Basis. Mit



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

den ersten Sendeversuchen wurde 1956 begonnen. Am 10. Oktober 1958 erhielt die PTB vom Bundespostministerium die Genehmigung, bis zum Jahresende 1958 regelmäßige Versuchssendungen durchzuführen. Als offizieller Beginn der Zeitsignal- und Normalfrequenzaussendungen über den Sender DCF77 wurde in diesem Genehmigungsschreiben der 1. Januar 1959 festgelegt. Die Senderleistung für diesen neuen Dienst betrug anfangs 12,5 kW.

Noch bis Ende 1969 wurden mit dem Sender 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 eine längere Sendedauer gewünscht 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. Am 01.12.1969 wurde die Sendezeit für die Zeitzeichenaussendungen über DCF77 auf zunächst 16 Stunden erweitert, und die Zuständigkeit für DCF77 ging voll auf die PTB über. Ab diesem Datum wurden der PTB auch Gebühren für den Betrieb des Senders DCF77 in Rechnung gestellt, da die Deutsche Bundespost nicht mehr bereit war, den Sender für die nun erweiterte Sendezeit kostenlos zur Verfügung zu stellen. Die Aufnahme des 24-h-Dauerbetriebs mit einer Senderleistung von 50 kW erfolgte schließlich am 01.09.1970. Die hiermit verbundenen Änderungen des Sendeprogramms sind in Kapitel 3.3 dargestellt.

Bis zur Privatisierung der Deutschen Bundespost Telekom (DBP/Telekom) erfolgte die

Aussendung über DCF77 auf der Grundlage einer formlosen Übereinkunft zwischen den vorgesetzten Ministerien der PTB und der DBP/Telekom. Der PTB wurden für die Bereitstellung von DCF77 die jeweils gültigen Gebühren entsprechend der Gebührenverordnungen für „Funknachrichten an einen oder mehrere Empfänger“ in Rechnung gestellt. Nach der Privatisierung der DBP/Telekom musste eine vertragliche Regelung zwischen der PTB und der Deutschen Telekom AG (DTAG) geschaffen werden. Dies erfolgte im April 1996. Der Vertrag enthält Vereinbarungen über den von der DTAG zu erbringenden Leistungsumfang, die von der PTB dafür zu zahlenden Entgelte und regelt Fragen des Betriebes der Sendeeinrichtungen. Die Laufzeit des Vertrages betrug zunächst zehn Jahre, bis zum Ende des Jahres 2006. Inzwischen wurden einige Bestimmungen des Vertrages neu gefasst und die Laufzeit bis zum Ende des Jahres 2013 verlängert. Vertragspartner der PTB ist nun die T-Systems Media Broadcast, eine Tochter der DTAG.

3.2 Standort und Senderbezeichnung

Standort des Senders DCF77 ist die Sendefunkstelle Mainflingen (Koordinaten: 50°01' Nord, 09°00' Ost) etwa 25 km südöstlich von Frankfurt am Main. Das auf dem Gelände der Sendefunkstelle verlegte Erdungsnetz sowie der hohe Grundwasserspiegel, der durch die Lage des Geländes in der Mainebene gegeben ist, haben eine hohe Bodenleitfähigkeit und somit günstige Abstrahlungsbedingungen zur Folge.

Woher kommt das Rufzeichen DCF77?

Nach den Regeln der ITU, speziell Artikel 19 der *Radio Regulations*, „Identification of Stations“ [15], müssen alle Sender, deren Reichweiten über die jeweiligen Landesgrenzen hinausge-

hen, 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) bestimmt. Da die Sendefunkstelle Mainflingen mehrere Frequenzen im Langwellenbereich benutzt, werden zur Unterscheidung der verschiedenen Sender dieser Station an die drei Buchstaben DCF noch zwei Ziffern angehängt. Beim DCF77 wurden diese Ziffern entsprechend der verwendeten Trägerfrequenz gewählt, bei den anderen Anfang 2004 auf der Sendefunkstelle betriebenen Sendern DCF49 (auf 129,1 kHz) und DCF42 (auf 123,7 kHz) trifft dies nicht zu.

DCF77 ist in der Internationalen Frequenzliste der ITU als *fixed service* eingetragen, mit den Angaben: Trägerfrequenz 77,5 kHz, Bandbreite 2,4 kHz, Rufzeichen DCF77, den Koordinaten der Sendefunkstelle wie oben angegeben, erstmalige Nutzung 15.08.1953, als in der Verantwortung Deutschlands stehend. In Kapitel 9 gehen wir in Zusammenhang mit ähnlichen Funkdiensten in anderen Ländern auf Regelungen und Schutzbestimmungen der ITU ein.

Vom Sender DCF77 wurde bisher dreimal stündlich, jeweils zweimal hintereinander, in den Minuten 19, 39, 59 (während der Sekunden 20 bis 32) das Rufzeichen DCF77 in Morsezeichen ausgesendet. Je ein Buchstabe oder eine Ziffer wurde zwischen zwei Sekundenmarken ausgestrahlt, wobei die Morsezeichen in Form von 250-Hz-Rechteck-Trägerabsenkungen von 100 % auf etwa 85 % gegeben werden. Obwohl die Rufzeichenerzeugung ohne Unterbrechung der Zeitmarkenfolge erfolgte, bewirkte ihre Aussendung eine Verschlechterung des Signal-zu-Rausch-Abstands der entsprechenden Sekundenmarken. Da aber auf Grund der speziellen Signalform der DCF77-Signale eine eindeutige Zuordnung dieser Signale zum Sender DCF77 möglich ist, wird in Übereinstimmung mit den Bestimmungen der Radio Regulations in Zukunft auf die Aussendung des Rufzeichens verzichtet.

3.3 Entwicklung des Sendeprogramms

Das bis 1970 verwendete Sendeprogramm war recht kompliziert. Es wurden zwei Arten von Zeitmarken ausgesendet: sogenannte „Zeitmessmarken“ zur Bestimmung von Zeitinter-

vallen, für die die PTB verantwortlich war und Zeitsignale auf astronomischer Basis 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*).

Ende der sechziger Jahre, nach der Neudefinition der Sekunde auf atomphysikalischer Basis und dem Übergang von der astronomischen Zeit auf die Atomzeit, wurden die Zeitmessmarken der PTB als „stepped atomic time“ in Schritten von 0,2 s mit UT1 koordiniert. Diese waren quasi die Vorläufer der Schaltsekunden. Die Zeitzeichen des DHI waren zwar weiterhin als Zeitzeichen auf astronomischer Basis definiert, wurden aber in der Praxis ebenfalls bereits von Atomuhren abgeleitet, so dass zwischen den Zeitmarken des DHI und den Zeitmessmarken der PTB praktisch keine Unterschiede mehr bestanden. Als Konsequenz dieser Entwicklung wurde am 01.04.1970 die Zeitzeichenausendung des DHI beendet und das Sendeprogramm vereinfacht. Ab diesem Zeitpunkt wurden nur noch die Trägerfrequenz 77,5 kHz als Normalfrequenz sowie amplitudenmodulierte Sekundenmarken abgestrahlt – bis 1972 nach der seinerzeitigen „Amtlichen Atomzeitskala“ der PTB und seit 1972 entsprechend dem neuen UTC-Zeitsystem mit Schaltsekunden, das dann 1978 im Zeitgesetz als Basis für die Gesetzliche Zeit festgelegt wurde (s. o.). 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 01.09.1970 war die Möglichkeit vorhanden, automatisch nachgeregelter Normalfrequenzoszillatoren zu betreiben und Uhren im Gleichlauf zu halten. Funkgeführte Uhren mussten aber wegen der Vieldeutigkeit der Minutenmarken noch von Hand eingestellt werden. Was zur Einführung sich selbst stellender Funkuhren noch fehlte, war die Aussendung vollständiger Zeitinformation in kodierter Form. Dies erfolgte erstmals am 05.06.1973, womit der entscheidende Schritt zur Entwicklung des Sendeprogramms auf den heutigen Stand getan wurde. Abgesehen von der Ergänzung der zwei Zeitzonebits und zweier Ankündigungsbits wird der damals eingeführte Zeitkode bis heute unverändert verwendet. Er wird in Kapitel 4.2 separat dargestellt.

Seit Juni 1983 wird dem Träger von DCF77 zusätzlich zur Amplitudenmodulation (AM) noch eine pseudozufällige Phasenumtastung aufmoduliert, die in Kapitel 4.3 gesondert beschrieben wird. Empfangsseitig lässt sich die bekannte Pseudozufallsfolge als Suchsignal reproduzieren und mit dem empfangenen pseudozufälligen Phasenrauschen des Trägers kreuzkorrelieren, wie in Abschnitt 7.3.3 erläutert wird. Die Ankunftszeitpunkte der DCF77-Rauschsignale können dadurch störsicherer bestimmt werden, als dies unter üblichen Empfangsbedingungen mit den AM-Zeitmarken möglich ist, auch die Genauigkeit der Zeitübertragung mit DCF77 für ausgewählte Anwendungen wurde damit erhöht. Der Einsatz von Empfängern der Signale des Navigationssystems GPS (Global Positioning System) erlaubt aufgrund der verwendeten Signalstruktur vom Prinzip her eine um mindestens eine Größenordnung geringere Unsicherheit der Zeitübertragung als sie mit DCF77-Empfängern zu erreichen ist. Daher wurde von der Phasenmodulation weniger Gebrauch gemacht, als dies bei ihrer Einführung erwartet wurde. Allerdings gibt es wichtige Anwendungen mit hohen Genauigkeits- und Störsicherheitsanforderungen, in denen diese Modulationsart im DCF77-Signal genutzt wird.

4 Das DCF77 Sendeprogramm heute

4.1 Trägerfrequenz

Die Trägerfrequenz von DCF77 beträgt, wie bereits erwähnt, 77,5 kHz. Sie wird von Atomuhren der PTB abgeleitet und weicht am Sendeort im Mittel über einen Tag weniger als relativ $2 \cdot 10^{-12}$, im Mittel über 100 Tage um weniger als relativ $2 \cdot 10^{-13}$ von dem durch die primären Atomuhren der PTB vorgegebenen Sollwert ab.

Die Phasenzeit des Trägers – anders ausgedrückt: der dem Sekundenbeginn nach UTC(PTB) folgende, in der PTB empfangene Nulldurchgang der 77,5 kHz Trägerschwingung mit der Periodendauer 12,9 μs – wird innerhalb einer Phasenzeitabweichung von $(5,5 \pm 0,3) \mu\text{s}$ in Übereinstimmung mit UTC(PTB) gehalten. Der Zahlenwert wurde im Verlauf eines Uhrentransports zwischen Braunschweig und Mainflingen festgelegt. Hierzu wird in Braunschweig mit zwei speziellen DCF77-Empfängern die Phasenlage des empfangenen Signals mit den Sekundenimpulsen nach UTC(PTB) sowie einer von UTC(PTB) abgeleiteten 77,5 kHz Impulsfolge verglichen (Kapitel 5.2). Die beobachteten Phasen- bzw. Frequenzschwankungen sind durch die Ausbreitung bedingt größer als ursprünglich mit den Atomuhren am Sendeort realisiert (siehe Kapitel 6.2).

4.2 Amplitudenmodulation (AM) und Zeitkode

Die Amplitude der Trägerschwingung wird mit Sekundenmarken moduliert: Zu Beginn jeder Sekunde, mit Ausnahme der letzten Sekunde 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 auf etwa 25 % abgesenkt. Die Restamplitude ermöglicht die Gewinnung einer kontinuierlichen Trägerschwingung und soll die Nutzung des DCF77-Trägers als Normalfrequenzsignal erleichtern. Bild 4 zeigt die abfallende Flanke der von DCF77 abgestrahlten Einhüllenden der Trägerschwingung zu Beginn einer Sekundenmarke. Die Kurven a und a' zeigen den realisierten Zustand: Durch eine Austastlücke von 250 μs im Steuersignal a wird eine steilere Flanke des abgestrahlten Signals a' erreicht, als wenn das Steuersignal unmittelbar auf 25 % abgesenkt würde (Steuersignal b', Verlauf der Einhüllenden b). Die Austastung bewirkt ein schnelleres Ausschwingen des Antennenkreises, so dass sich die gleiche Flankensteilheit ergibt wie bei einem Steuersignal ganz ohne Restamplitude. Diese Modulationstechnik ist vorteilhaft, um aus der abfallenden Flanke jeweils auf den „genauen“ Sekundenbeginn zu schließen. Es wird erwogen, zwecks Verbesserung des Signal-zu-Rauschabstands der AM-Sekundenmarken die Restamplitude auf bis zu 15 % abzusenken.

Die fallende Flanke des Steuersignals (a' in Bild 4) wird gelegentlich durch Vergleich mit einer aus Braunschweig zum Sendeort transportierten Atomuhr, die UTC(PTB) mit einer Unsicherheit von $< 0,01 \mu\text{s}$ mit sich führt, verglichen.

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

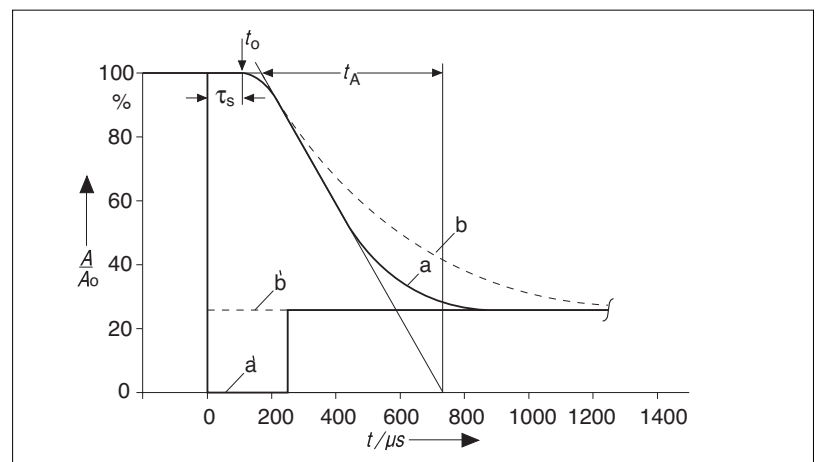


Bild 4:

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', t_s : Laufzeit durch Sender und Antenne, t_0 : definierter Sekundenbeginn, t_A : Ausschwingzeit

Am Sendeort selbst wird das gesendete Signal mit einer breitbandigen Antenne empfangen, die registrierte Flanke mit dem Steuersignal verglichen und die Laufzeit durch die Sendeeinrichtungen τ_s (s. Bild 4) ausgeglichen. Die Unsicherheit, mit der vor Ort der als Sekundenbeginn definierte Beginn der fallenden Flanke aus dem Nahfeld bestimmt werden kann, liegt bei ca. $\pm 25 \mu\text{s}$ (etwa vier Perioden der Trägerschwingung). Ein Beispiel für die in Braunschweig registrierte Ankunftszeit der AM ist in Bild 11a gezeigt.

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 2004 also als 04. Der ausgesendete Code 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 Code mit der zuvor verwendeten Form der Aussendung kompatibel und mit den damals vorhandenen elektronischen Mitteln leicht de-

kodierbar sein sollte. Vor seiner Einführung wurde das Kodierverfahren 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. Auch heute sieht sich die PTB in der Pflicht, Änderungen am Kodierschema nur mit größter Vorsicht vorzunehmen und die Interessen der Nutzer und Funkuhrenhersteller zu achten.

Es folgen Details zu den übertragenen Informationen.

Nach dem Ende der Ausstrahlung des DUT1-Kodes wurden viele Jahre lang mit den Sekundenmarken Nr. 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 derartige Störungsmeldungen übertragen, so dass einige Entwickler von DCF77-Dekodierungssoftware fahrlässig davon ausgingen, dass in diesen Bits niemals Information übertragen würde. Seit Mitte 2003 sind die Bits 1 bis 14 für andere Zwecke freigegeben (siehe Kapitel 10). Das Bit 15 wird nun als „Rufbit“ verwendet, um Unregelmäßigkeiten in den Steuereinrichtungen zu signalisieren und die für DCF77 verantwortlichen Mitarbeiter der PTB in Braunschweig zu alarmieren.

In der Vergangenheit ließ sich am Zustand dieses früher Antennenbit genannten Bits R (Nr. 15) erkennen, ob die Aussendung über die Betriebsantenne (Zustand Null) oder die Reserveantenne (Zustand Eins) erfolgt. Der Zweck des Antennenbits war es, auf Phasenzeitsprünge (bis zu $\pm 4 \mu\text{s}$) des DCF77-Trägers hinzuweisen, die beim Wechsel zwischen den mehr als einen Kilometer voneinander entfernten Sendeanennen auftraten und zu einer Störung nachgesteuerter Normalfrequenzgeneratoren führen konnten. Die Aussendung derartiger Information wird nicht mehr als notwendig angesehen, seit die Reserveantenne und die Betriebsantenne benachbart auf dem gleichen Feld der Sendefunkstelle stehen (siehe Kapitel 5.1), die beim Umschalten auftretenden Phasenänderungen daher kaum größer sind als die normalen Schwankungen der empfangenen Trägerphase und so auch nicht mehr sehr störend sind.

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

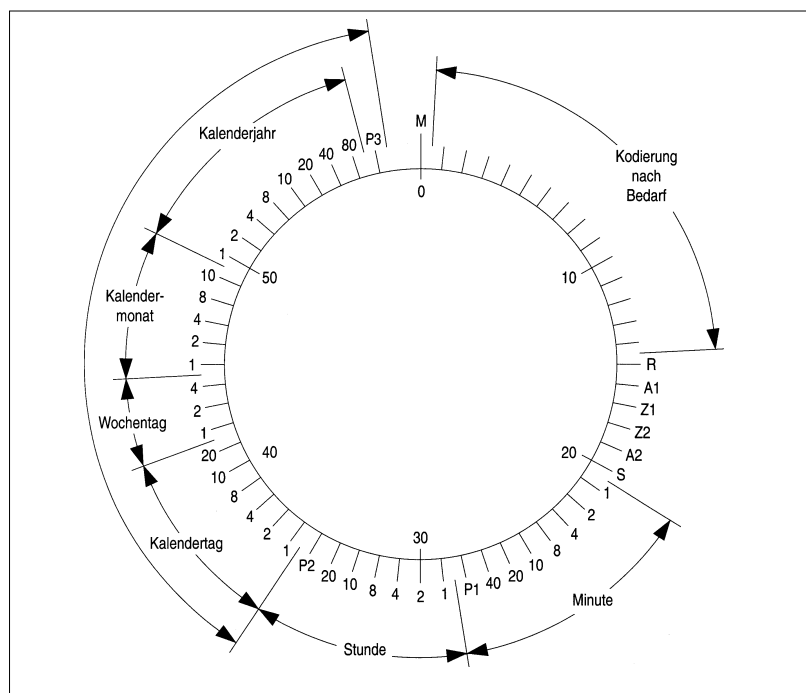


Bild 5:

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.

tragene Zeitinformation bezieht. Bei der Aussendung von MEZ hat Z1 den Zustand Null und Z2 den Zustand Eins. Bei der Aussendung von MESZ ist es umgekehrt.

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 Zeitählung zum Zweck der Fehlererkennung Gebrauch machen, über die zu erwartende Unregelmäßigkeit in der Zeitählung zu informieren. Ohne die Auswertung von A1 oder A2 könnte die Unregelmäßigkeit als fehlerhafter Empfang interpretiert werden, mit der Folge, dass die geänderte Zeitählung nicht zeitnah zur Anzeige gebracht 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.

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.

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. Die Wahrscheinlichkeit dafür, Schaltsekunden auslassen zu müssen, ist sehr gering [4] (siehe auch Bild 1), die technischen Einrichtungen am Sender lassen es jedoch zu.

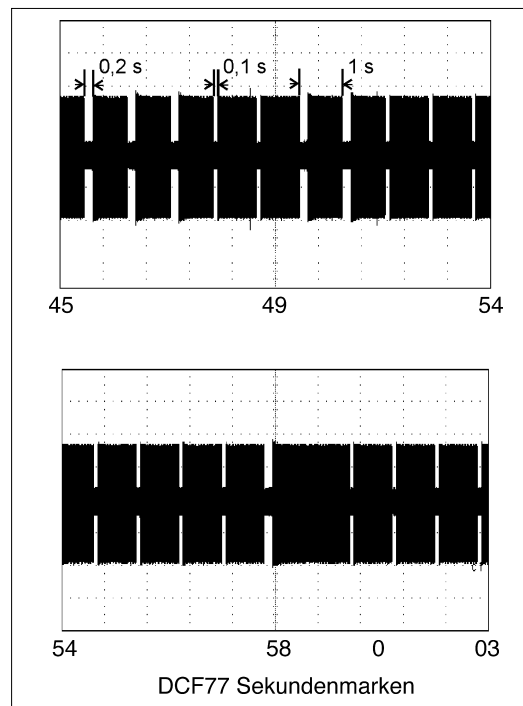


Bild 6:

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

4.3 Phasenmodulation

Zur Modulation mit einem Phasen-„Rauschen“ (PM) wird die Trägerphase entsprechend eines PRN-Kodes (Pseudo-Random Noise Kode) mit einem Phasenhub $\Delta\varphi$ von $\pm 13^\circ$ um ihren Mittelwert φ_m umgetastet [16]. Als PRN-Kode wird eine binäre Zufallsfolge $p(t)$ maximaler Zykluslänge mit N Zeichen ($N = 2^9 = 512$) verwendet, so dass die Phasenzustände $\varphi_m + \Delta\varphi$ und $\varphi_m - \Delta\varphi$ gleich häufig (je 256 mal) auftreten. Dadurch bleibt der Mittelwert der Trägerphase unverändert, und die Verwendung der Trägerfrequenz als Normalfrequenz wird durch das Phasenrauschen nicht nennenswert beeinträchtigt. Bild 7 zeigt den Verlauf der Amplituden und der

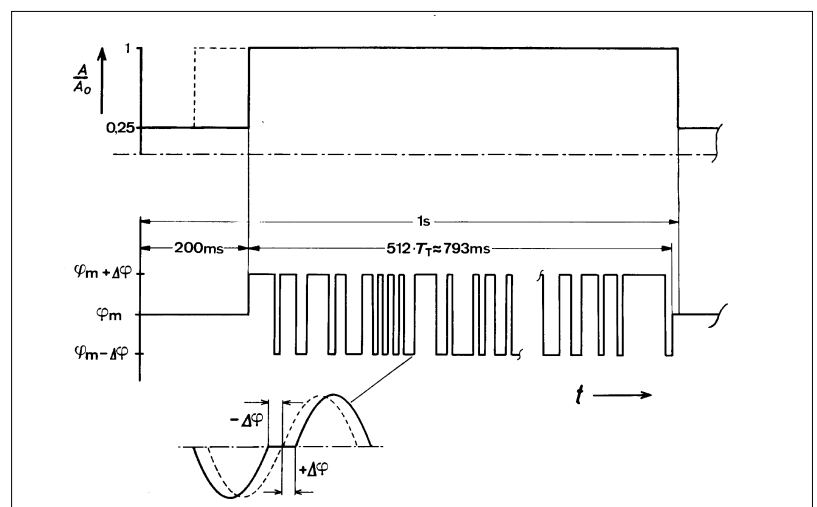


Bild 7:

Amplituden- und Phasenverlauf des DCF77-Signals während einer Sekunde; A/A_0 : relative Amplitude (AM), φ_m mittlerer Phasenwert, $\Delta\varphi$ Phasenhub der PM

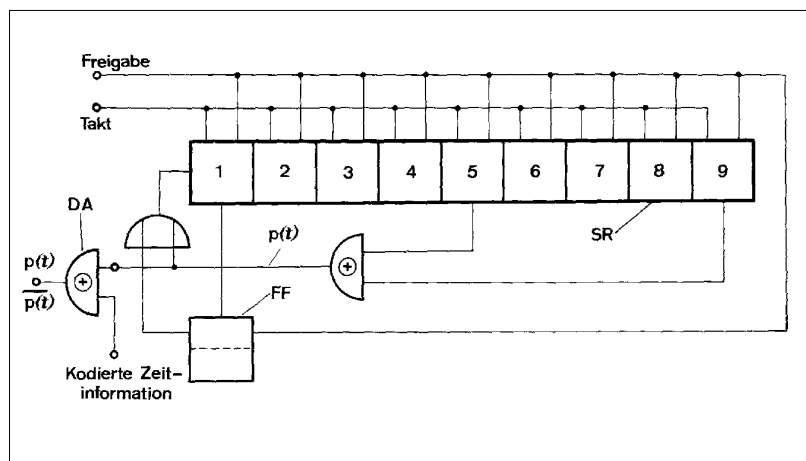


Bild 8:

Erzeugung der Pseudozufallsfolge $p(t)$ mit einem neunstufigen rückgekoppelten Schieberegister SR. FF: Flip-Flop für Anlauf des SR aus dem Zustand Null, DA: Exklusiv-Oder-Verknüpfung der kodierten Zeitinformation mit $p(t)$ zur Umsetzung der binären Zustände „0“ und „1“ in entsprechende Phasenzustände des Modulationssignals $p(t)$ bzw. $\bar{p}(t)$ für die Phasenumtastung.

Phase der DCF77-Trägerschwingung während einer Sekunde. Der Träger, die AM-Sekundenmarken und die Phasenumtastung sind zueinander phasensynchron. Die Erzeugung von $p(t)$ erfolgt mit dem in Bild 8 gezeigten Schieberegister, dessen Ausgänge 5 und 9 über ein Exklusiv-Oder-Gatter auf den Schieberegistreeingang rückgekoppelt sind. Jeweils 0,2 s nach Sekundenbeginn wird das Schieberegister aus dem Zustand Null neu gestartet und nach Ablauf eines vollständigen Zyklus, etwa 7 ms vor der nächsten Sekundenmarke, wieder angehalten. Die Taktfrequenz f_T des Schieberegisters beträgt 645,83 Hz und ist eine Subharmonische ($77\,500/120$) der Trägerfrequenz 77,5 kHz. Damit beträgt die Dauer T_T eines Zeichens 1,55 ms und die Dauer eines vollständigen Rauschzyklus 793 ms.

Im PRN-modulierten Signal dienen zehn invertierte Pseudozufallsfolgen in den Sekunden 0 bis 9 als Minutenkennung. Andere Informationen werden in den Bits 1 bis 14 nicht übertragen. Generell erfolgt die Übertragung von Binärdaten mit der PRN durch Invertieren der Pseudozufallsfolge $p(t)$ (siehe Bild 8). Mit jedem Rauschzyklus wird ein Bit übertragen, wobei nicht invertierte Pseudozufallsfolgen $p(t)$ der binären Null und invertierte Pseudozufallsfolgen $\bar{p}(t)$ der binären Eins entsprechen. Wenn eine Schaltsekunde eingeführt wird, erscheinen bei der PRN die 10 invertierten Rauschfolgen $\bar{p}(t)$ zur Minutenmarkenidentifizierung um 1 s später. Ab der 15. Sekundenmarke ist die durch PM und AM übertragene Binärinformation identisch, so wie sie zuvor dargestellt wurde.

5 Betriebstechnik: Steuer- und Sendeeinrichtungen des DCF77

5.1 Einrichtungen am Sendort

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 Sendort erzeugt. Die Steuereinrichtung ist in einem eigens für die PTB bereitgestellten Raum der Sendefunkstelle untergebracht und wird von Braunschweig aus überwacht. Aus Gründen der Betriebssicherheit wird das Steuersignal in drei voneinander unabhängigen Steuerkanälen erzeugt. Das Träger-signal (77,5 kHz) und die aufmodulierten Sekundenmarken werden derzeit 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.

Zur Vermeidung von falschen Aussendungen werden die erzeugten Steuersignale in zwei elektronischen Umschaltern miteinander verglichen. Ergibt sich bei diesem Vergleich, 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

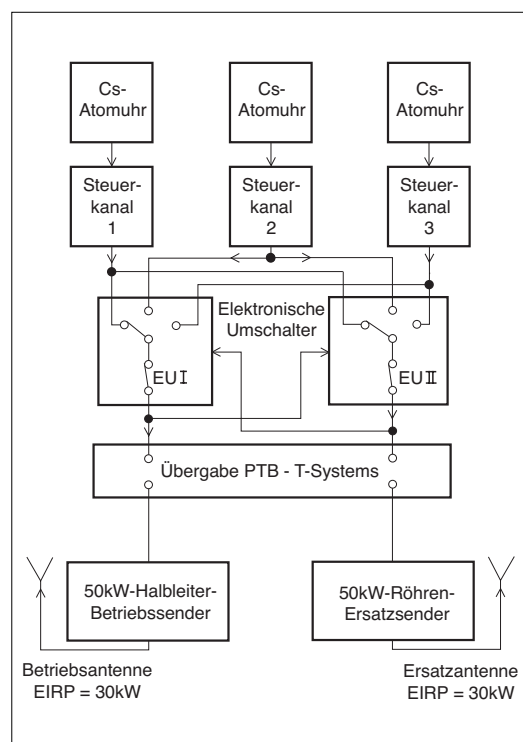


Bild 9:

Blockschaltbild der Steuer- und Sendeeinrichtungen des Senders DCF77; EU: Elektronischer Umschalter, EIRP: Equivalent Isotropic Radiated Power

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. Außerdem schalten die beiden elektronischen Umschalter ihre Ausgangssignale gegenseitig ab, wenn zwischen diesen Widersprüche auftreten.

Nach der Übergabe des mit den Einrichtungen der PTB erzeugten DCF77-Steuersignals an die T-Systems beginnt deren Zuständigkeit für die weitere Aussendung über die von ihr betriebene Sende- und Antennenanlage. Seit Januar 1998 steht als Betriebssender ein moderner, luftgekühlter 50-kW-Halbleitersender zur Verfügung. Sein Endverstärker ist mit 48 Verstärkermodule gleicher Bauart von etwas mehr als 1 kW-Ausgangsleistung bestückt und die einzelnen Ausgangsspannungen der 48 Verstärkermodule werden addiert. Der bisher 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.

5.2 Einrichtungen in Braunschweig

Die empfangene Trägerphasenzeit und die Stände der Sekundenmarken (AM und PM) werden mit den durch die primären Uhren der PTB vorgegebenen Sollwerten verglichen. In Bild 10 sind als Beispiele die kontinuierliche Aufzeichnung von Signalamplitude und Trägerphase an je einem Tag im Sommer und Winter 2003 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 zwischen der lokalen Referenzzeitskala UTC(PTB) und der Ankunftszeit T_A (DCF77) der AM-Sekunden-

marken (Bild 11a) und der empfangenen Phasenzeit T_P (DCF77) des Trägers (Bild 11b) 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

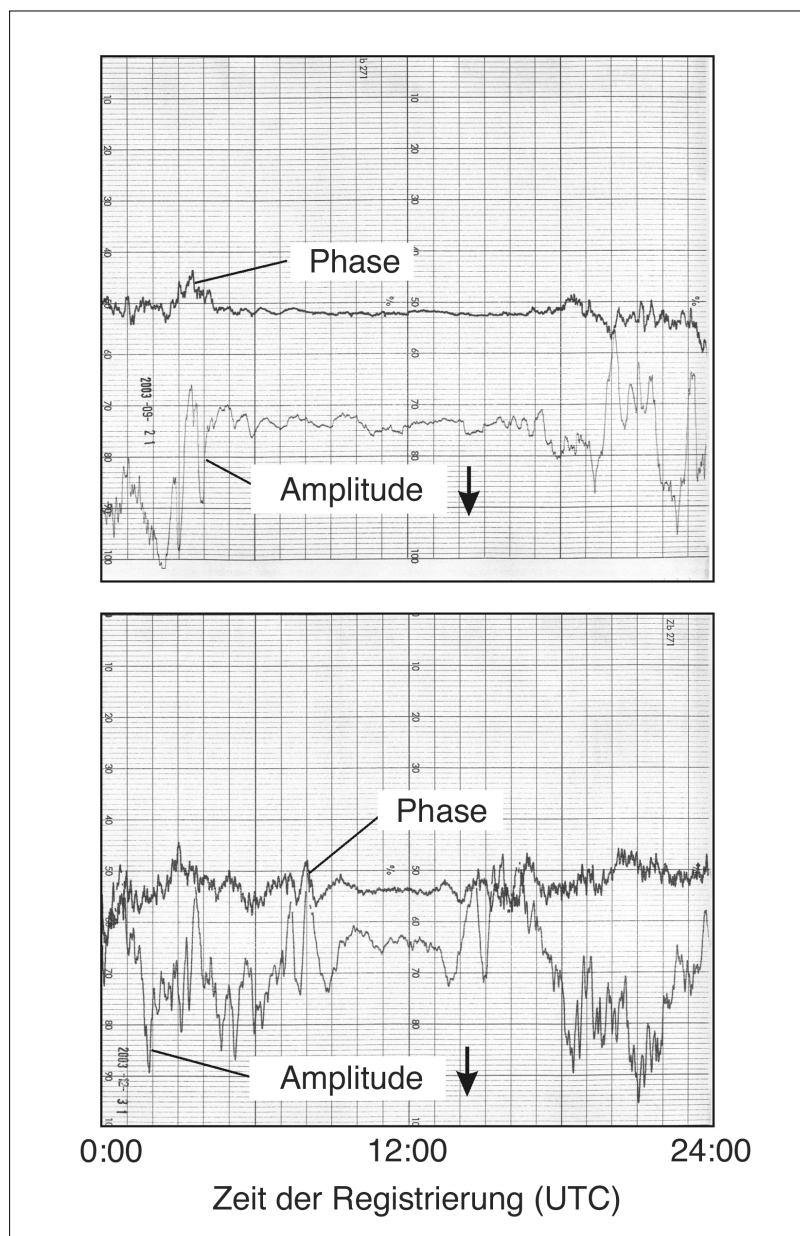


Bild 10:

In der PTB Braunschweig registrierter Verlauf von Amplitude und Phase des empfangenen DCF77-Signals an den Tagen 2003-09-21 (oben) und 2003-12-31 (unten); Amplitude: durch lineare Gleichrichtung mit einer Zeitkonstanten von ca. 600 s bestimmte Amplitude der Trägereinhüllenden, lineare Skala, unkalibriert, Nullpunkt jeweils am oberen Bildrand, Phase: Die volle Darstellungsweite entspricht 10 µs, d. h. 0,1 µs pro kleinem Teilstrich, Sollwert bei 55 Teilstrichen

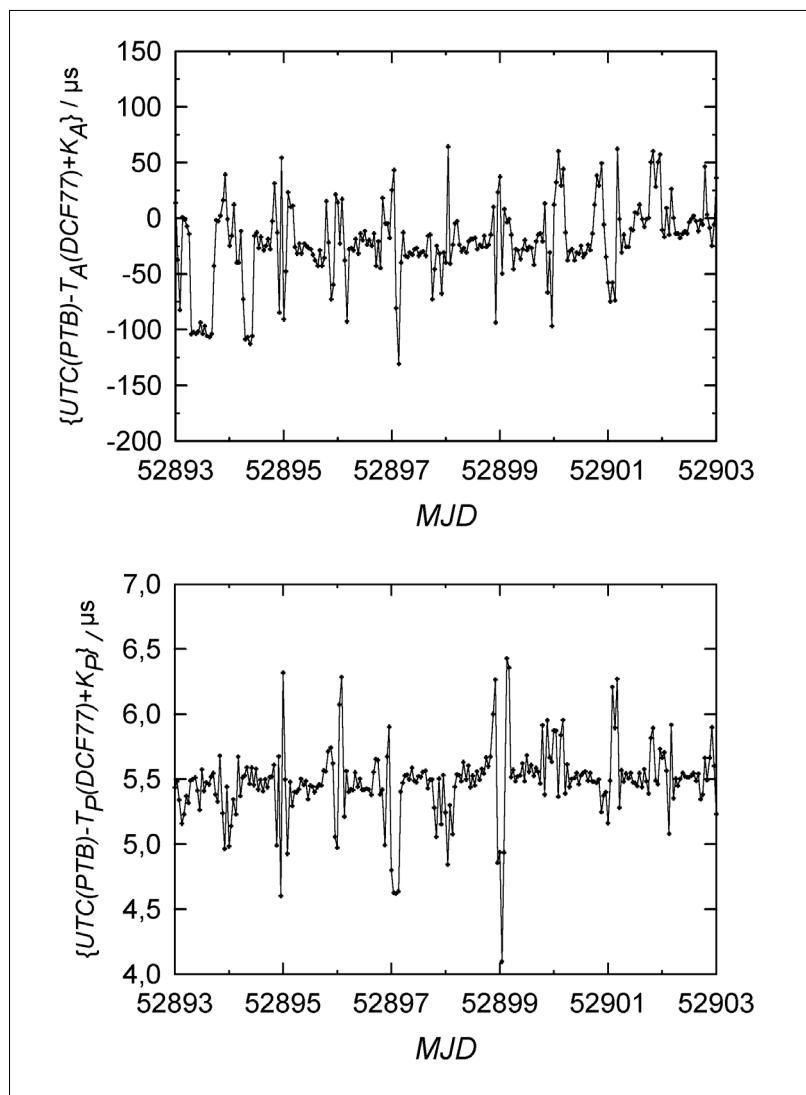


Bild 11:

In Braunschweig registrierte Zeitdifferenzen $UTC(PTB) - T(DCF77) + K$, eine Messung pro Stunde;

a): Zeitdifferenz zwischen $UTC(PTB)$ und der Ankunftszeit $T_A(DCF77)$ der empfangenen Sekundenmarken, K_A : Laufzeitkonstante; Detektion von $T_A(PTB)$ aus der abfallenden Flanke (Triggerpunkt 60 %) der mit einer Bandbreite von 440 Hz empfangenen AM-Sekundenmarken; Glättung von $T_A(PTB)$ mit einem Schrittreger, indem nach jeweils 4 Sekunden eine lokal erzeugte 1 PPS-Folge den empfangenen Signalen in Schritten von 1 μs nachgeführt wird.

b) 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.

schmalbandigen Filters) sind mit dem Laufzeitkonstanten K_A und K_P berücksichtigt. Da K_A und K_P durch die erwähnten Vergleiche mit einer transportablen Atomuhr ermittelt wurden, werden die entsprechend den Bildern 11a und 11b in der PTB kontinuierlich durchgeführten Zeitdifferenzmessungen 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 $\pm 0,1 \mu s$ zu schieben. Mit Hilfe der Fernwirkanlage können des weiteren Betriebsdaten von der Steuereinrichtung abgefragt werden, und es ist möglich, verschiedene Fehlerquellen zu identifizieren und so Störungsursachen in den Steuereinrichtungen aufzuspüren.

Nicht zuletzt wird in Braunschweig auch die Übereinstimmung zwischen dem empfangenen Zeitkode und einem in 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 dann, wenn in mehreren aufeinanderfolgenden Minuten identische logische Fehler erkannt würden. 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.

6 Frequenzspektrum und Ausbreitung des DCF77-Signals

6.1 Gemessene Frequenzspektren

Die Bilder 12 und 13 zeigen die am Sendeort gemessene spektrale Verteilung folgender Signale: a) des mit einem Phasenhub von $\Delta\phi = \pm 13^\circ$ umgetasteten Signals und b) des unmodulierten Trägersignals. Die Aufzeichnungen von Steuerungssignal und abgestrahltem Signal mit größerer Bandbreite (Bild 13) zeigen, dass das abgestrahlte Signal auf Grund der Bandbreite des Antennenkreises bei Frequenzen im Abstand von einigen hundert Hertz vom Träger bereits erheblich bedämpft wird und dass die Übertragungsfunktion nicht völlig symmetrisch ist. Die Einhüllende des Frequenzspektrums des Steuerungssignals folgt aus der aufmodulierten Pseudozufallsfolge, wie in [16] gezeigt wurde. Obwohl die Nebenzipfel von den Sendeeinrichtungen nicht mehr ganz symmetrisch und nur teilweise übertragen werden, wird nach unserer Kenntnis die Funktion von PRN-Empfängern dadurch nicht nennenswert beeinträchtigt. Im weitgehend symmetrisch übertragenen Hauptzipfel ist ohnehin mehr als 90 % der PRN-Information enthalten.

6.2 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 [17]. 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 Wellenfortpflanzung von Mikrowellen zwischen zwei Grenzflächen - längs eines Wellenleiters. Dabei werden die Erdoberfläche und die D-Schicht als zwei parallele, leitende Flächen 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 14 veranschaulicht die Ausbreitung von Boden- und Raumwelle nach dem Reflexionsmodell, und Bild 15 verdeutlicht, welche Laufzeitunterschiede die verschiedenen langen Ausbreitungswege nach diesem Modell 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 nur nach mehrfachen Reflexionen (z. B. zwei Reflexionen an der D-Schicht, eine Reflexion an der Erdoberfläche), die aber mit einer starken Abnahme der Feldstärke verbunden sind.

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

$$E_{BW} / (\text{mV/m}) = 300 \sqrt{(P / \text{kW}) / (d / \text{km})} \quad (1)$$

berechnen [18]. 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 16 dargestellt

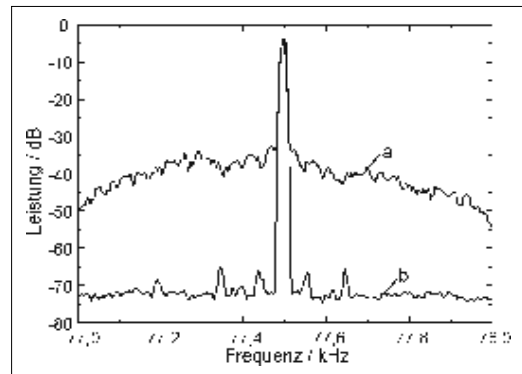


Bild 12:

Mit einer Bandbreite von 10 Hz am Sendeort gemessene spektrale Amplitudenverteilung des in der Phase mit einem Hub von $\Delta\phi = 13^\circ$ umgetasteten und von der Betriebsantenne abgestrahlten Signals (a), und des unmodulierten, von der Betriebsantenne abgestrahlten Trägers (b).

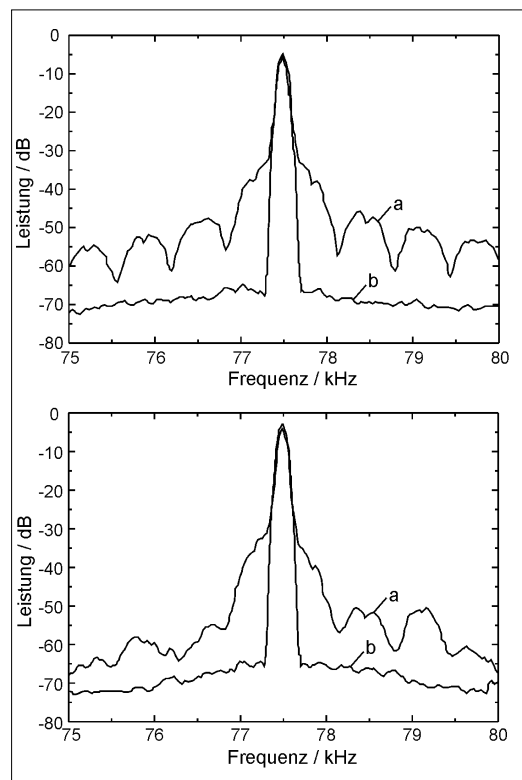


Bild 13:

Mit der Bandbreite 100 Hz aufgezeichnete Spektren; oben: Steuersignal, unten: am Sendeort empfangenes Signal, weitere Erläuterungen siehe Bild 12

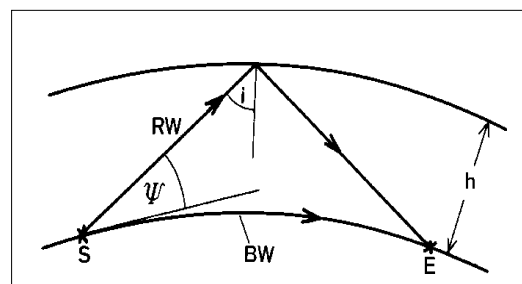


Bild 14:

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

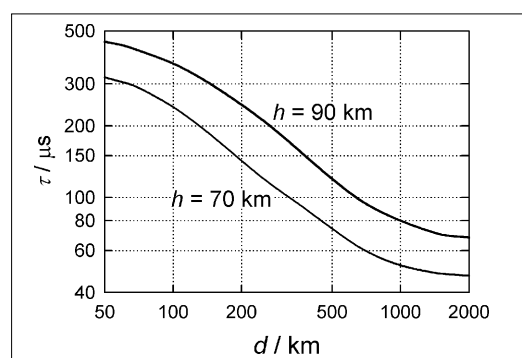


Bild 15:

Laufzeitunterschiede τ zwischen Boden- und Raumwelle für zwei verschiedene Höhen h der ionosphärischen D-Schicht als Funktion der Entfernung d vom Sender [19]

ist. Für die DCF77-Frequenz gelten praktisch die gleichen Beziehungen.

Wesentlich schwieriger als die Abschätzung der Feldstärke der Bodenwelle 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,

$$E_{RW} = E_{BW} \cdot \cos \Psi. \quad (2)$$

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 (siehe Bild 14).

Eine einfache Beziehung für die Abhängigkeit von R von diesen Einflüssen lässt sich nicht angeben. In [19] 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 17 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 Sonnenfleckensminimums. Bei einem Sonnenfleckensmaximum 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. Der PTB liegen Messergebnisse über tatsächlich in verschiedenen Entfernungen gemessene Feldstärkewerte vor, die mit den abgeschätzten Werten übereinstimmen.

Zusammengefasst ergeben sich für die Boden- und Raumwelle folgende Eigenschaften:

1. 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.
2. Im Entfernungsbereich zwischen etwa 600 km bis 1100 km können Boden- und Raumwelle gelegentlich gleich groß sein, was bei Gegenphase zur gegenseitigen Auslöschung (Fading) führen kann. Andererseits ist bei gleicher Phase aber auch ein vorübergehender starker Feldstärkeanstieg möglich. Beide Phänomene werden auch schon in Braunschweig ($d = 273$ km) beobachtet, siehe Bild 10, und werden in Kapitel 7.3 weiter diskutiert. 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.
3. In Entfernungen über 1100 km tritt der Bodenwellenanteil immer mehr zurück, und es überwiegt dann die Raumwelle, deren Ausbreitung in großen Entfernungen besonders

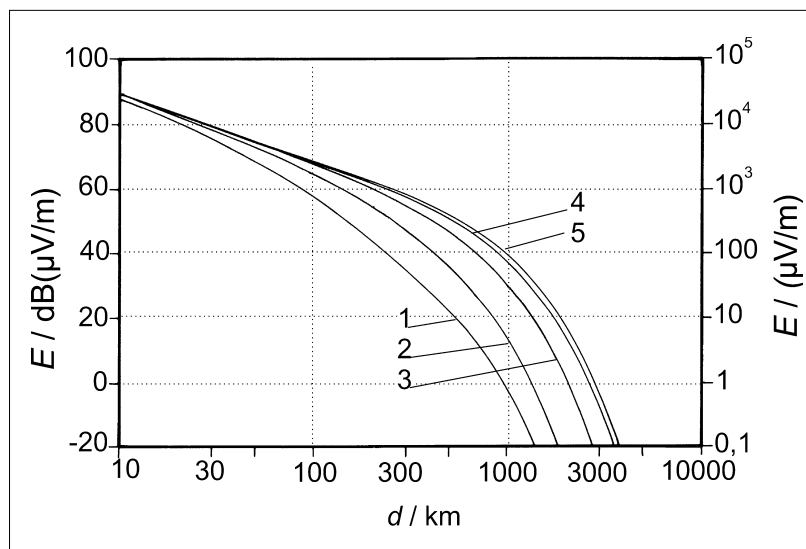


Bild 16:

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 [18] und wie dort angegeben bezeichnet.

Unter der Annahme einer abgestrahlten Leistung von 1 kW beträgt die Feldstärke 30 mV/m bei $d = 10$ km, entsprechend $E(\text{dB}(\mu\text{V/m})) = 20 \cdot \log_{10}(3 \cdot 10^4) = 89,5$;

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.

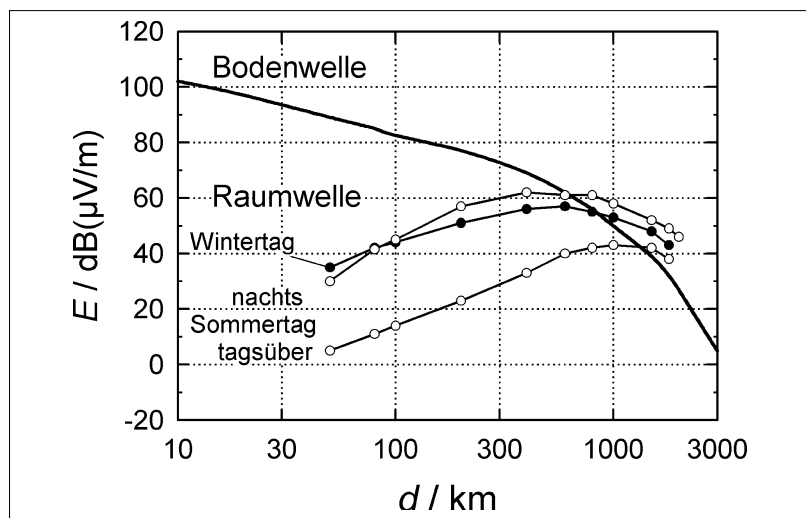


Bild 17:

Feldstärken der DCF77 Boden- und Raumwelle als Funktion der Entfernung d vom Sendeort, berechnet nach [18, 19] unter der Annahme einer 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.

am Tage recht konstant ist. Zwischen 1100 km und 2000 km Entfernung sind Feldstärken der Raumwelle zwischen einigen hundert und etwa 100 $\mu\text{V}/\text{m}$ zu erwarten.

7 Empfang des DCF77 Signals

7.1 Rechtliche Aspekte

Entsprechend der im Amtsblatt 20/95 des Bundesministeriums für Post und Telekommunikation veröffentlichten Verfügung 207/1995 sind Normalfrequenzempfänger und Funkuhren (Empfangsfunkanlagen für den Empfang von Normalfrequenz- und Zeitzeichensendungen) von der Zulassungspflicht befreit. Voraussetzung für das Inverkehrbringen von Normalfrequenzempfängern und Funkuhren ist aber, dass sie die Vorschriften des Gesetzes über die elektromagnetische Verträglichkeit (EMVG) einhalten und entsprechend gekennzeichnet werden. Die Anforderungen des EMVG gelten als erfüllt, wenn die Empfänger den harmonisierten europäischen Normen entsprechen, den EMV-Fachgrundnormen EN 61000-6-1 (Störfestigkeit) und EN 61000-6-3 (Störaussendung) für Wohn-, Geschäfts- und Gewerbebereich.

7.2 Zeitliche Verfügbarkeit der Aussendung

DCF77 sendet im 24-h-Dauerbetrieb. Mit der T-Systems wurde eine zeitliche Verfügbarkeit der DCF77-Aussendung von jährlich 99,7 % vertraglich vereinbart. Da ein Ersatzsender und eine Reserveantenne verfügbar sind, gibt es regelmäßige Abschaltungen für Wartungsarbeiten schon seit 1977 nicht mehr. 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 Kugelfunkstrecken und UV-Sensoren ausgerüstet. Kommt es nach einem Blitzeinschlag an einer Kugelfunkstrecke zu einem Durchbruch mit Entstehung eines Lichtbogens, wird dieser vom UV-Sensor erkannt 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.

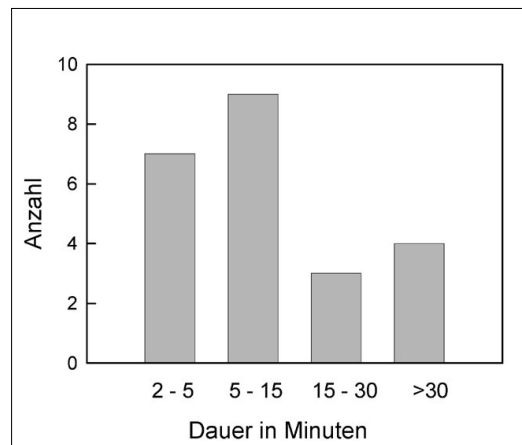


Bild 18:
Häufigkeitsverteilung der Unterbrechungen von DCF77-Aussendung bestimmter Dauer in den Jahren 2002 und 2003.

In den Jahren 2002 und 2003 wurden Abschaltungen mit einer Dauer von länger als zwei Minuten gemäß der in Bild 18 dargestellten Verteilung beobachtet. Die zeitliche Verfügbarkeit im Jahr 2003 war ungewöhnlich hoch: 99,98 %. Nicht gezählt sind allerdings die Abschaltungen von weniger als zwei Minuten Dauer. Die häufigste Ursache für die länger andauernden 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 aus fernüberwacht. Auch im Fachlabor Zeit- und Frequenzübertragung der PTB ist außerhalb der regulären Dienstzeit niemand anwesend. Bei größeren Störungen an den Steuer- und Sendeeinrichtungen, z. B. wenn die automatischen Überwachungseinrichtungen das Steuersignal oder den Sender abschalten, kann es außerhalb der Dienstzeit daher längere Zeit dauern, bevor Mitarbeiter der T-Systems oder der PTB erreicht werden und Maßnahmen zur Störungsbeseitigung einleiten können. Funkuhren, bei denen es auf hohe Sicherheit ankommt, sollten also nach wie vor mit einer Gangreserve über mehrere Stunden in Form eines hochwertigen Quarzoszillators ausgestattet werden.

7.3 Eigenschaften der empfangenen Signale

Beim Empfang von DCF77 in größeren Entfernungen vom Sender ist zu beachten, dass sich das Gesamtsignal aus Boden- und Raumwellenanteil zusammensetzt. Wie das Zeigerdiagramm in Bild 19 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 Amplitu-

den- und Phasenschwankungen des Trägers sowie (periodisch)-zeitliche Verschiebungen der Zeitsignale beobachtet, wie sie z. B. in Bild 10 gezeigt sind, so haben diese ihre Ursache in dem schwankenden Einfluß der Raumwelle als Folge von Änderungen des Reflexionskoeffizienten sowie in Laufzeitänderungen der Raumwelle, wenn sich in der Dämmerung die Höhe der D-Schicht von 70 auf 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.

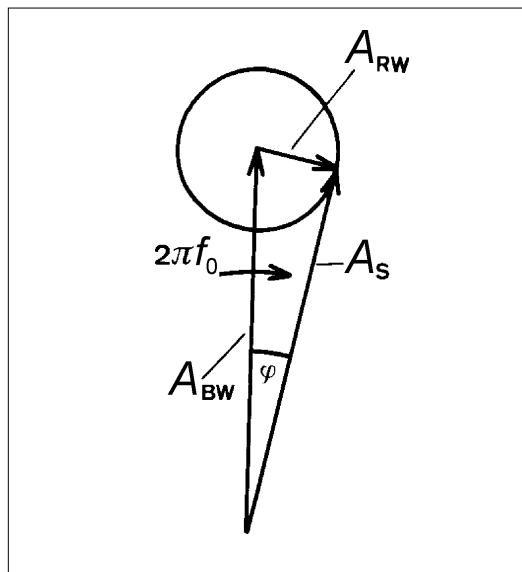


Bild 19:

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 $2\pi f_0$, wobei f_0 die Trägerfrequenz ist und φ bei stationären Verhältnissen konstant bleibt.

7.3.1 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 Phasenzeit-schwankungen beeinträchtigt. Welche Phasenzeit- bzw. Frequenzschwankungen in Braunschweig, 273 km vom Sendeort entfernt, auftreten, wurde in der PTB wiederholt untersucht, ein aktuelles Beispiel datiert vom Herbst 2003. Die Registrierung der Phasenzeit zwischen dem 1. September und dem 21. Oktober (50 Tage) er-

gab eine relative Frequenzabweichung zwischen der DCF77-Trägerfrequenz und UTC(PTB) von $< 1 \cdot 10^{-14}$. Die relative Standardabweichung der Tagesmittelwerte beträgt $1,5 \cdot 10^{-12}$ für das Messintervall 12 UTC – 12 UTC. Bestimmt man die Instabilität der registrierten Trägerfrequenz als Funktion der Uhrzeit der Messung, so ergibt sich die in Bild 20 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 der Referenzfrequenz interpretiert werden.

Von der Industrie werden DCF77-Normalfrequenzempfänger zum automatischen Nachregeln von Quarz- und Atomfrequenznormalen angeboten. In solchen Frequenzreglern wird das Ausgangssignal des nachzuregelnden Normalen 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 Frequenznormalen hergeleitet. Kombiniert man derartige Frequenzregler mit Frequenznormalen hoher Eigenstabilität, wie thermostatisierten Quarzoszillatoren oder Atomfrequenznormalen, können so große Regelzeitkonstanten gewählt werden, dass die ausbreitungsbedingten Phasenzeitschwankungen weitgehend ausgemittelt werden. Wie Messungen in verschiedenen Kalibrierlaboratorien bestätigt haben, lassen sie sich auf diese Weise im langzeitigen Mit-

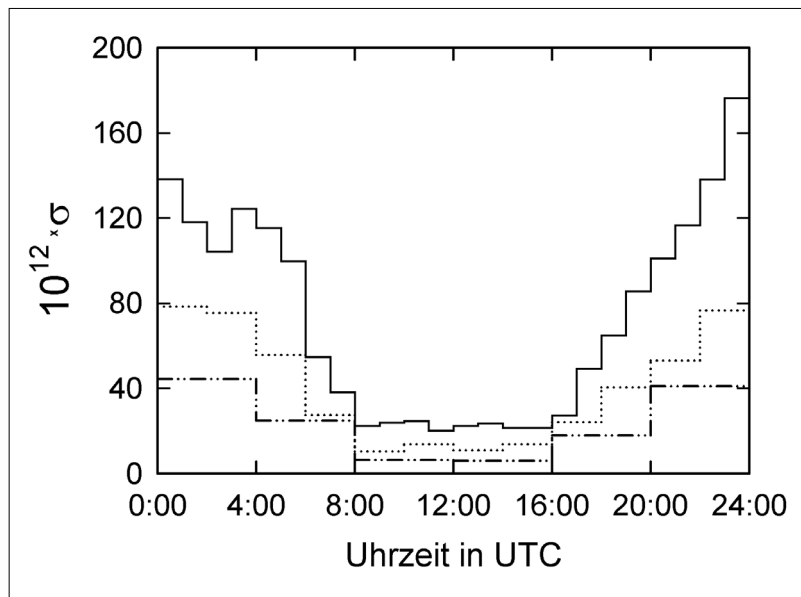


Bild 20:

Standardabweichung σ der relativen Abweichung der in Braunschweig empfangenen DCF77-Trägerfrequenz vom Sollwert als Funktion der Tageszeit und der Mittelungszeit T (durchgezogen: $T = 1$ h, gepunktet: $T = 2$ h, strichpunktet: $T = 4$ h), basierend auf 50 Tagen im Spätsommer 2003 (2003-09-01 bis 2003-10-21).

tel 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.

7.3.2 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 Signalfanken. Am Sendeort durchgeführte Messungen des Frequenzspektrums (siehe Bilder 12 und 13) sowie eine Abschätzung der Übertragungsbandbreite Δf aus der Ausschwingzeit t_A der in Bild 4 dargestellten abfallenden Flanke der Trägereinhüllenden nach der Beziehung $\Delta f = 1/t_A$ haben ergeben, dass Δf in der Größenordnung von 850 Hz liegt. Je mehr von diesem Frequenzbereich empfangsseitig abgeschnitten wird, umso mehr nimmt die statistische Unsicherheit zu, die Ab-

weichungen der aufgenommenen DCF77-Signale von UTC(PTB) zu bestimmen. 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 [20], Schrittregelung mit Einheitsschritten [21] (verwendet z. B. für die in Bild 11a dargestellten Messwerte) oder die trägersynchrone, digitale Zeitsignalmittelung durch Abtasten der Amplitude 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 μ s bis 100 μ s erreicht worden. Verschiedene Beiträge in den Tagungsbänden der Funkuhrentagungen [11] befassen sich mit dieser Thematik.

7.3.3 Empfang des PRN Signals

Herkömmliche Empfangstechniken für AM-Zeitsignale erlauben nicht die Selektion von Nutz- und Störsignalen, die im gleichen spektralen Frequenzbereich auftreten. Dagegen können mit der Methode der Kreuzkorrelation Nutz- und Störsignale auch dann voneinander getrennt werden, wenn diese im gleichen Frequenzbereich liegen. Bild 21 zeigt das Schema einer Kreuzkorrelations-Anordnung zur Zeitübertragung. Wesentliche Elemente dieser An-

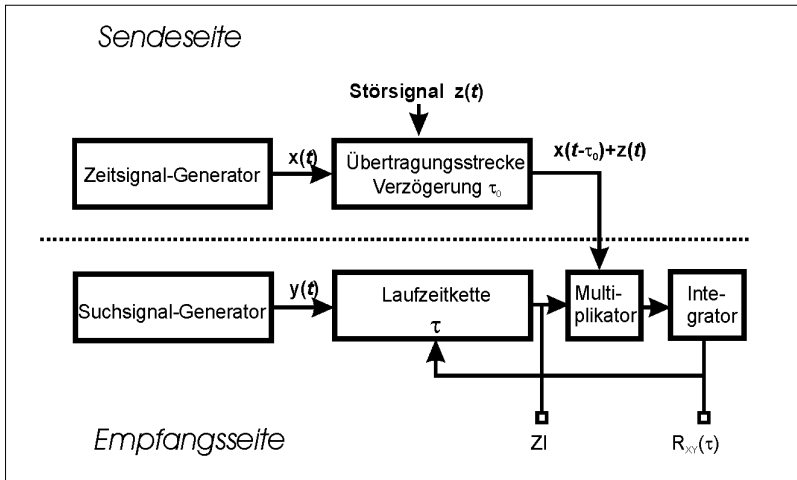


Bild 21:

Prinzip der Übertragung von Zeitinformation ZI mit Hilfe der Kreuzkorrelation. Bei Verwendung eines PN-Kodes für $x(t)$ und $y(t)$ hat die Kreuzkorrelationsfunktion $R_{xy}(\tau)$ einen dreieckförmigen Verlauf mit einer Korrelationsdauer von zwei Zeichen. $x(t)$ und $y(t)$ sind a priori gleich, $x(t)$ weicht wegen der Übertragungseigenschaften der Sendeeinrichtungen von $y(t)$ ab.

ordnung sind die Laufzeitkette mit der Verzögerung t sowie der Multiplikator mit nachgeschaltetem Integrator. Mathematisch lässt sich die Messoperation, die von dieser Kreuzkorrelations-Anordnung ausgeführt wird, durch

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} [x(t - \tau_0) + z(t)] \cdot y(t - \tau) dt \quad (3)$$

beschreiben, oder vereinfacht, durch

$$R_{xy}(\tau) = \overline{x(t - \tau_0) \cdot y(t - \tau)} + \overline{z(t) \cdot y(t - \tau)} \quad (4)$$

Dem vom Zeitsignalsender ausgestrahlten Zeit signal $x(t)$ überlagert sich auf der Übertragungsstrecke ein Störsignal $z(t)$. Gleichzeitig erfährt es eine Verzögerung τ_0 , bevor es empfangsseitig auf einen Eingang des Multiplikators gelangt. Dem zweiten Eingang des Multiplikators wird über eine Laufzeitkette das Suchsignal $y(t)$ zugeführt, das im Empfänger erzeugt wird und a priori gleiche Eigenschaften hat wie $x(t)$, jedoch nicht durch die Sendeeinrichtungen (geringe Bandbreite) beeinflusst wird. Bei der anschließenden Produkt-Mittelwertbildung über eine hinreichend lange Integrationszeit verschwindet der 2. Summand in Gleichung (3), wenn $y(t)$ und $z(t)$ für alle Werte von τ inkohärent und statistisch nicht verwandt sind. Somit liefert der Korrelator nur noch eine von $x(t)$ und $y(t)$ abhängige Kreuzkorrelationsfunktion $R_{xy}(\tau)$, die frei von überlagerten Störungen ist. Ist die Zeitverschiebung τ durch die Laufzeitkette gleich der Verzögerung τ_0 auf der Übertragungsstrecke, wird $R_{xy}(\tau)$ maximal, und das durch die Laufzeitkette nachgezogene Suchsignal $y(t)$ repräsentiert die vom Sender ankommende Zeitinformation ZI, die von Störungen weitgehend befreit ist. Der bei DCF77 für $x(t)$

verwendete PRN-Kode $p(t)$ (siehe Abschnitt 4.3) liefert aufgrund seiner Signalstruktur eine dreieckförmige Korrelationsfunktion mit einer Korrelationsdauer von 2 Zeichen (chips). Die Synchronisation des im Empfänger erzeugten Kodes $p_E(t)$ auf den empfangenen Code $p_S(t)$ kann z. B. über eine Verzögerungsregelschleife (DLL = delay – lock loop) erfolgen. Dazu werden im Kodegenerator $p_E(t + T_T/2)$ und der entsprechend verzögerte Code $p_E(t - T_T/2)$ erzeugt. Nach Multiplikation der zeitlich versetzten Kodes mit dem empfangenen Code und anschließender Filterung ergeben sich jeweils Signale, die ein Maß sind für die zeitliche Verschiebung zwischen dem empfangenen Code und dem im Empfänger erzeugten voreilenden bzw. verzögerten Code. Die Differenz dieser Signale kann als Regelsignal für die Laufzeitkette benutzt werden, um den im Empfänger erzeugten Code auf den empfangenen Code zu synchronisieren.

Das Frequenzspektrum der verwendeten PRN Modulation ist ein Linienspektrum mit einer $\sin(x)/x$ -Einhüllenden. Der Frequenzabstand f_T/N der einzelnen Spektrallinien beträgt 1,26 Hz ($f_T = 645,83$ Hz, $N = 512$) und wird bei der Aufzeichnung des Spektrums nicht aufgelöst (Bilder 12 und 13). Der Hauptzipfel des Spektrums erstreckt sich von 77,5 kHz $- f_T$ bis 77,5 kHz $+ f_T$, d. h. die Bandbreite beim Empfang der PRN sollte mindestens $2f_T = 1292$ Hz betragen. Messungen in der PTB Braunschweig haben ergeben, dass sich die Ankunftszeitpunkte der PRN-Signale mit Hilfe der Kreuzkorrelation störsicherer und mit geringerer Unsicherheit aufnehmen lassen, als es mit AM-Zeitsignalen bei üblichen Empfangsbedingungen möglich ist. So ergaben sich am Tage bei geringem Raumwelleneinfluss Streuungen der aufgenommenen Zeitpunkte der PRN-Signale von weniger als einer halben Periode des Trägers ($< 6,5 \mu s$). Dies bedeutet, dass es zeitweise möglich ist, einen bestimmten Nulldurchgang des Trägers zu identifizieren. In den Wintermonaten, bei starkem Raumwelleneinfluss, sind dagegen Streuungen bis zu etwa 25 μs gemessen worden [16].

Vom Prinzip her lassen sich mit der Korrelationstechnik zwar Raum- und Bodenwelle trennen. Eine sichere Trennung beider Signalkomponenten ist aber nur möglich, wenn ihr Laufzeitunterschied (s. Bild 15) größer ist als die Zeichendauer des PRN-Kodes (1,55 ms). Diese Bedingung ist aber bei DCF77 nicht erfüllt, da die zur Verfügung stehende Bandbreite der Sendeanenne zu gering ist, um die Taktrate f_T des PRN-Kodes genügend groß, d. h. die Zeichendauer genügend klein wählen zu können.

8 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 [22]. Einige Details aus dieser Zusammenstellung werden im Folgenden wiedergegeben:

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.“ [23]

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 [24]. 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 [25]. Als mögliche Funkuhr für die Zeitübertragung mit RundfunktSendern 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 vierten Quartal 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.

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 [26]. 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 [22] als *„one of the most momentuous horological events ever“* bezeichnet wurde. Die MEGA 1 ist heute bereits Ausstellungsstück in Uhrenmuseen, so im Schweizer Museum in La Chaux-de-Fonds und im Deutschen Uhrenmuseum in Furtwangen. 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.

9 Zeit- und Normalfrequenzdienste auf Langwelle

In den Radio Regulations der ITU sind die Frequenzbereiche 20,05 – 70 kHz und 72 – 84 kHz in Region 1 (Europa und Afrika) sogenannten *primary fixed services* zugewiesen [27]. 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), deren Möglichkeiten und Anwendungen in der ITU-Literatur [7] diskutiert werden. 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 verwendeten Kodierschemata zur Übertragung der Zeitinformation. Während die Texte der Recommendations selbst nur kostenpflichtig bei der ITU zu erhalten sind (<http://www.itu.int/ITU-R/Study-Groups/rsg7/index.asp>, „Recommendations“), sind die o. g. Anhänge von dieser Web-Seite als WORD-

Dokument zu laden („Related Information „TF583“ bzw. „TF768“). Diese Anhänge werden im jährlichen Turnus aktualisiert. Basierend auf den mit Stand Oktober 2002 publizierten Informationen sind in Tabelle 1 die Eigenschaften der Zeitdienste auf Langwelle zusammengefasst.

Der vom Schweizer Sender HBG ausgesandte Zeitcode ist mit dem DCF77-Kode nahezu identisch, abgesehen von der Kennung der Minute und den Sekundenmarken 1 – 15, die ja für die Übertragung von Zeitinformation keine Rolle spielen. Des weiteren wird in den Sekundenmarken die Amplitude auf Null getastet – nicht auf 20 % wie beim DCF77, was die Verwendung für die Normalfrequenzübermittlung beeinträchtigt. Alle anderen Dienste verwenden andere Zeitcodes. In der ersten Reihe der Tabelle 1 sind die gegenwärtig publizierten Parameter des neuen chinesischen Zeitdienstes BPC enthalten, der vom National Time Service Centre, Shanxii, Volksrepublik China, aufgebaut wird [28]. Insgesamt sollen im Land drei Stationen für die Aussendung von Zeitzeichen und Normalfrequenz entstehen. In den letzten Jahren wurden erhebliche Aufwendungen in den Aufbau der beiden japanischen Stationen sowie die Modernisierung des WWVB des NIST gesteckt [29]. Ferner wurden die Einrichtungen des HBG nach der Übertragung der Verantwortung an das schweizerische Bundesamt für Metrologie

Tabelle 1:

Langwellenstationen, die Normalfrequenz und kodierte Zeitinformation übertragen (Stand Oktober 2003 [13]). Der jeweils verwendete Zeitcode ist unter der im Text Kapitel 9 angegeben ITU Internet-Adresse einzusehen, oder von den Betreibern zu erhalten.

Rufzeichen	Land	Standort	Trägerfrequenz (kHz)	Rel. Unsicherheit der Trägerfrequenz (1σ, über Tag)	Senderleistung (tatsächlich abgestrahlte Leistung (kW))	Betriebsart	Internet_Adresse http://www.+
BPC	China	Pucheng 34° 56,9' Nord 109° 33,1' Ost	68,6	$1 \cdot 10^{-12}$	20	zeitweise, in 2003 08:00–12:00 Uhr und 22:00–23:00 Uhr	sxso.ac.cn
DCF77	Deutschland	Mainflingen 30° 01' Nord 09° 00' Ost	77,5	$1 \cdot 10^{-12}$	30	kontinuierlich	ptb.de
HBG	Schweiz	Prangins 46° 24' Nord 6° 15' Ost	75	$1 \cdot 10^{-12}$	20	kontinuierlich	official-time.ch
JJY	Japan	Oktahadoyayama 37° 22' Nord 140° 51' Ost	40	$1 \cdot 10^{-12}$	12,5	kontinuierlich	nict.go.jp
JJY	Japan	Haganeyama 33° 28' Nord 130° 11' Ost	60	$1 \cdot 10^{-12}$	15	kontinuierlich	nict.go.jp
MSF	UK	Rugby 52° 22' Nord 01° 11' Ost	60	$2 \cdot 10^{-12}$	15	kontinuierlich mit angekündigten Service-Abschaltungen	npl.co.uk
WWVB	USA	Colorado Springs 40° 40' Nord 105° 02' Ost	60	$1 \cdot 10^{-11}$	65	kontinuierlich	boulder.nist.gov/timefreq

und Akkreditierung (METAS) weitgehend modernisiert. Es besteht allem Anschein nach in vielen Ländern ein öffentliches Interesse an der Verfügbarkeit der genauen Zeit, und die Aussendung über Langwelle wird als adäquates Medium hierfür angesehen.

10 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. Mit Hilfe der Trägerfrequenz von DCF77 werden Normalfrequenzgeneratoren kalibriert oder automatisch nachgeregelt. Zeitdienstsysteme bei der Bahn, im Bereich der Telekommunikation und der Informationstechnologie, bei Rundfunk- und Fernsehanstalten werden z. B. ebenso von DCF77 funkgesteuert wie Tarifschaltuhren bei Energieversorgungsunternehmen und Uhren in Ampelanlagen. Die nach absoluten Zahlen häufigsten Nutzer sind inzwischen Privatpersonen: Mit noch immer zunehmendem Maße werden Funkuhren (als Armbanduhren, Wecker, Stand- und Wanduhren) eingesetzt. Über die richtige Zeit zu verfügen, ob auf die Sekunde oder die Millisekunde genau, wird eben sehr geschätzt. Der Erfolg der Funkuhr hat aber insbesondere etwas mit den Eigenschaften der Aussendung über Langwelle zu tun. Gegenüber Zeitübertragungsverfahren mit 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 kompakte, mit Batterie oder Solarzellen betriebene Funkuhren ohne Kabelanschluß an eine externe Antenne gebaut und betrieben werden. Demgegenüber erfordert der Empfang von Signalen des Navigationssystems GPS und in Zukunft des europäischen Pendants Galileo eine Außenantenne mit möglichst freier Sicht zum Himmel. Kann diese aufgebaut werden, so können unbestreitbar kleinere Unsicherheiten in der Zeitübertragung erreicht werden [30]. Die Zeitübertragung über Satelliten und die Zeitverbreitung auf Langwelle werden sich daher nicht gegenseitig ersetzen sondern ergänzen.

Ganz aktuell hat sich für die Aussendung von DCF77 eine mögliche neue Anwendung ergeben. Auf Anregung der Zentralstelle für Zivilschutz (ZfZ) beim Bundesverwaltungsamt, Bad Godesberg, dem heutigen Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, wurde im dritten und vierten Quartal des Jahres 2003

untersucht, ob sich die Aussendung von „Zeitzeichen“ mit DCF77 auch zur Übertragung von Warninformation nutzen lässt. Hierzu wurden die Sekundenmarken 1 bis 14 jeder Minute der DCF77 Aussendung verwendet, die, wie oben ausgeführt, für die Zeitübertragung keine unmittelbare Bedeutung mehr haben. In Zusammenarbeit mit den vom ZfZ beauftragten Firmen unter Federführung von HKW-Elektronik, Seebach, wurden die DCF77 Steuereinrichtungen so erweitert, dass mit einem Satellitenterminal in Mainflingen empfangene fiktive Warnmeldungen in das Sendeprogramm integriert werden konnten.

Zwischen dem 13.10 und 10.12.2003 wurden insgesamt 39 scharfe Testalarme gesendet, die mit 1000 landesweit verteilten Empfängern registriert werden sollten. Es kamen modifizierte, handelsübliche Funkuhren (Armbanduhren, Wecker, Wanduhren, PC-Funkuhren) die zusätzlich zu ihrer Standardfunktion optisch und akustisch alarmieren konnten, zum Einsatz. Die Teilnehmer am Feldversuch hatten sich verpflichtet, die Alarmer, auch Fehlalarmer, über das Internet zu melden.

In dem inzwischen vorliegenden Abschlussbericht zeigte HKW, dass die Alarmierungszeit und die Empfangswahrscheinlichkeit des Funkalarms in unserem Land gleichmäßig gut ist. Die Umgebung (Land, Ballungsraum, innen, außen) und Entfernung zum Sender hatten nur geringen Einfluss. Dagegen zeigte sich, dass im Detail die Wahl der Aufstellung bei stationären Uhren, bzw. das Trageverhalten bei Armbanduhren erheblichen Einfluss haben. Die Zahl der Fehlalarmer war vernachlässigbar klein. Das Bundesinnenministerium muss nun aufgrund des Abschlussberichts entscheiden, ob DCF77 langfristig ein Teil des Gesamtsystems zur Warnung der Bevölkerung wird.

Davon unabhängig bleibt DCF77 weiterhin das bedeutendste Medium zur Verbreitung der gesetzlichen Zeit in Deutschland durch die PTB.

Literatur

- [1] G. Becker: Die Sekunde. PTB-Mitteilungen 85, (1975), S. 14–28.
- [2] 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.
- [3] T. Jones: Splitting the Second: The Story of Atomic Time. Bristol, IOP Publishing 2000.
- [4] R. A. Nelson, D. D. McCarthy, S. Malys, J. Levine, B. Guinot, H. F. Fliegel, R. L. Beard, und T. R. Bartholomew: The leap second: its history and possible future. Metrologia 38, (2001), S. 509–529.

- [5] *H. Zemanek*: Kalender und Chronologie. 5., verbesserte Auflage, München, Wien: Oldenbourg Verlag, 1990, zz. vergriffen; auch *F. K. Ginzel*: Handbuch der mathematischen und technischen Chronologie. J. C. Hinrich'sche Buchhandlung Leipzig, 1914.
- [6] *R. Wendorff*: Zeit und Kultur. 3. Auflage, Opladen, Westdeutscher Verlag, 1985; *G. Dohrn-van Rossum*: Die Geschichte der Stunde. München, Wien, Carl Hanser Verlag 1992; *N. Elias*: Über die Zeit. Suhrkamp Taschenbuch 756, erste Auflage, 1988.
- [7] Handbook on the Selection and Use of Precise Frequency and Time Systems. International Telecommunication Union, Geneva 1997.
- [8] *J. Levine*: Introduction to time and frequency metrology. Rev. Scientific Instr. **70**, (1999), S. 2567–2596.
- [9] *P. Hetzel*: Zeitinformation und Normalfrequenz. telekom praxis **70**, (1993), S. 25–36.
- [10] *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.
- [11] *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.
- [12] *A. Bauch* und *T. Heindorff*: Zeit – Die SI-Basiseinheit Sekunde. PTB-Mitteilungen **112**, (2002), S. 291–298.
- [13] ITU-R Recommendations: TF.374-5 „Precise Frequency and Time-Signal Transmissions“, TF.460-6 „Standard-frequency and time-signal emissions“, TF.486-2 „Use of UTC frequency as reference in standard frequency and time signal emissions“. ITU, Geneva, im Internet: <http://www.itu.int/ITU-R/Study-Groups/rsg7/index.asp>, dort: Recommendations TF series für die aktuelle Version.
- [14] *A. Bauch*: Caesium atomic clocks: function, performance and applications. Meas. Sci. Technol. **14**, (2003), S. 1159–1173.
- [15] Radio Regulations, Article 19: Identification of stations. ITU Radiocommunication Bureau, Geneva 2001.
- [16] *P. Hetzel*: Zeitübertragung auf Langwelle durch amplitudenmodulierte Zeitsignale und pseudozufällige Umtastung der Trägerphase. Dissertation, Universität Stuttgart, 1987 (unveröffentlicht).
- [17] Handbook „The ionosphere and its effects on radiowave propagation“. ITU, Radiocommunication Bureau, Geneva, 1998.
- [18] 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.
- [19] ITU-R Recommendation 684-3 „Prediction of field strength at frequencies below 150 kHz. ITU, Geneva, 2002.
- [20] Ref. 11b, S. 29-59 und S. 107–124.
- [21] *G. Becker*: Schrittmittelung für die Mittelung von Zeitsignalen. PTB-Mitteilungen **85**, (1975), S. 448–457.
- [22] *M. A. Lombardi*: Radio Controlled Clocks. Proc. of the 2003 National Conference of Standards Laboratories NCSL, auf CD-ROM.
- [23] *H. Grubb, Sir*: 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 [22].
- [24] *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.
- [25] *W. Hilberg* und *K. Buck*: Eine integrierte digitale Empfängerschaltung für ein drahtloses elektronisches Zeitverteilungssystem. Nachrichtentechnische Zeitschrift (NTZ), (1971), Heft 11, S. 572–577.
- [26] *P. Hetzel* und *L. Rohbeck*: Digitale Anzeige der vom Sender DCF77 verbreiteten Amtlichen Zeit. Funkschau **46**, (1974), S. 727–730.
- [27] Ref. [15], Section IV.
- [28] *Y. Wang*: Recent progress on time and frequency in NTSC. Proc. 2002ATF, publ. (2003), S. 30–33.
- [29] *M. A. Lombardi*: NIST Time and Frequency Services. NIST Spec. Publ. 432, 2002 Edition.
- [30] *A. Bauch*, *P. Hetzel* und *T. Polewka*: Die Rolle von GPS bei der Realisierung der Internationalen Atomzeit. Kleinheubacher Berichte **43**, (2000), S. 278–288.

Anhang 1

— 93 —

Reichs-Gesetzblatt.

N^o 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 u.

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

Gesetz über die Zeitbestimmung (Zeitgesetz – ZeitG) vom 25. Juli 1978

Der Bundestag hat das folgende Gesetz beschlossen:

§ 1 – Gesetzliche Zeit

- (1) Im amtlichen und geschäftlichen Verkehr werden Datum und Uhrzeit nach der gesetzlichen Zeit verwendet.
- (2) Die gesetzliche Zeit ist die mitteleuropäische Zeit. Diese ist bestimmt durch die koordinierte Weltzeit unter Hinzufügung einer Stunde.
- (3) Die koordinierte Weltzeit ist bestimmt durch eine Zeitskala mit folgenden Eigenschaften:
 1. Sie hat am 1. Januar 1972, 0 Uhr, dem Zeitpunkt 31. Dezember 1971, 23 Uhr 59 Minuten 59,96 Sekunden, der mittleren Sonnenzeit des Nullmeridians entsprochen.
 2. Das Skalenmaß ist die Basiseinheit Sekunde nach § 3 Abs. 4 des Gesetzes über Einheiten im Meßwesen vom 2. Juli 1969 (BGBl. I S. 709), zuletzt geändert durch Artikel 287 Nr. 48 des Gesetzes vom 2. März 1974 (BGBl. I S. 469), in Meereshöhe.
 3. Die Zeitskala der koordinierten Weltzeit wird entweder durch Einfügen einer zusätzlichen Sekunde oder durch Auslassen einer Sekunde mit einer Abweichung von höchstens einer Sekunde in Übereinstimmung mit der mittleren Sonnenzeit des Nullmeridians gehalten.
- (4) 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.

§ 2 – Darstellung und Verbreitung der gesetzlichen Zeit

Die gesetzliche Zeit wird von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt dargestellt und verbreitet.

§ 3 – Ermächtigung zur Einführung der mitteleuropäischen Sommerzeit

- (1) Die Bundesregierung wird ermächtigt, zur besseren Ausnutzung der Tageshelligkeit und zur Angleichung der Zeitzählung an diejenige benachbarter Staaten durch Rechtsverordnung für einen Zeitraum zwischen dem 1. März und dem 31. Oktober⁽¹⁾ die mitteleuropäische Sommerzeit einzuführen.

- (2) Die mitteleuropäische Sommerzeit soll jeweils an einem Sonntag beginnen und enden. Die Bundesregierung 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.

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 Zeit) 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.

⁽¹⁾ gem. Gesetz zur Änderung des Zeitgesetzes vom 13. September 1994 (BGBl. I S. 2322)