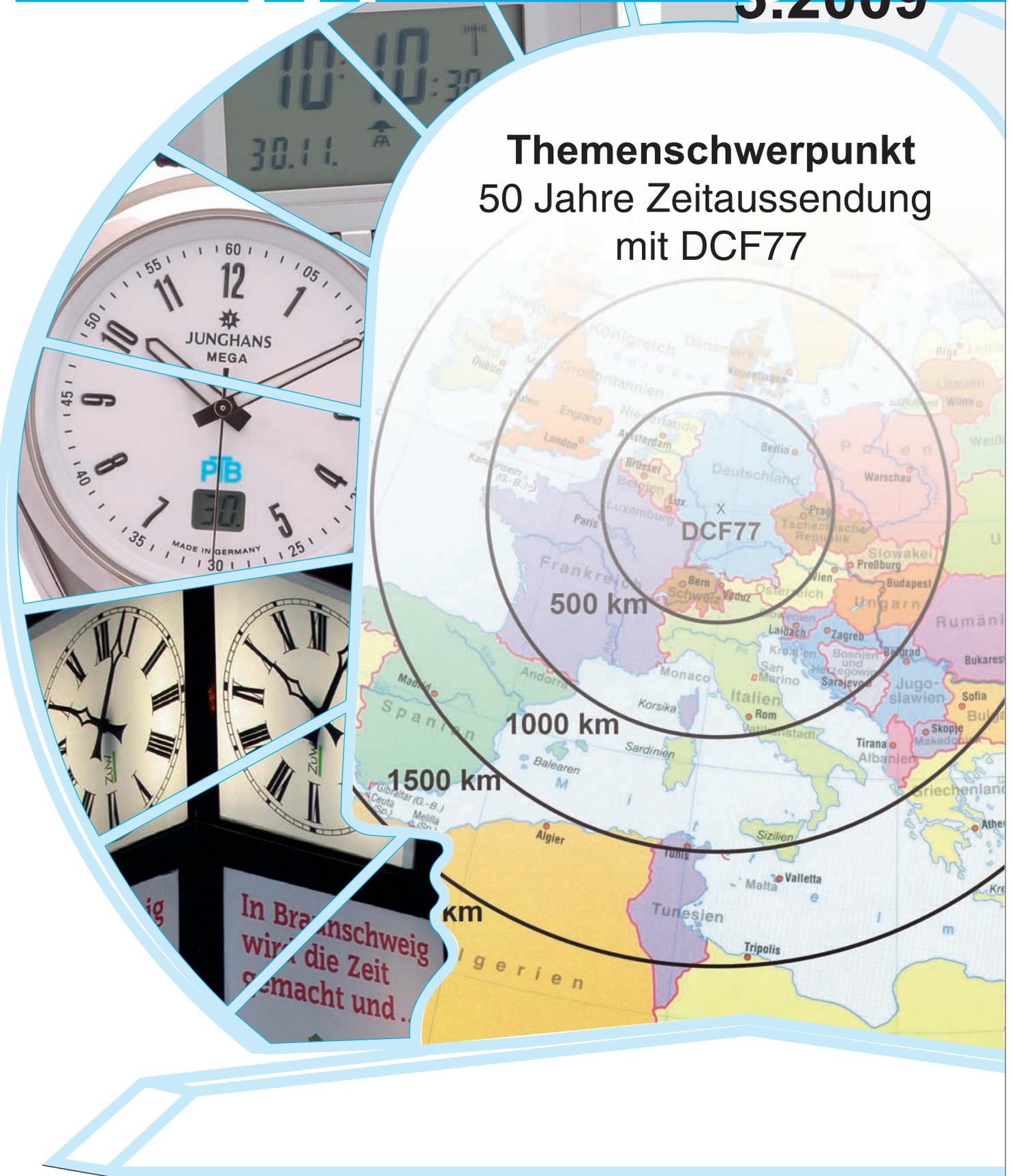


### Themenschwerpunkt 50 Jahre Zeitaussendung mit DCF77



Fachorgan für Wirtschaft und Wissenschaft

Amts- und Mitteilungsblatt der  
Physikalisch-Technischen Bundesanstalt  
Braunschweig und Berlin

119. Jahrgang, Heft 3, September 2009

## Inhalt

---

|                           |   |     |
|---------------------------|---|-----|
| Themenschwerpunkt         | 50 Jahre Zeitaussendung mit DCF77   |     |
|                           | • <i>Johannes Graf</i> : Wilhelm Foerster, Vater der Zeitverteilung im Deutschen Kaiserreich                                    | 209 |
|                           | • <i>Andreas Bauch, Peter Hetzel und Dirk Piester</i> : Zeit- und Frequenzverbreitung mit DCF77: 1959 – 2009 und darüber hinaus | 217 |
|                           | • <i>Klaus Katzmann</i> : Die Technik der Funkuhren   | 241 |
| Recht und Technik         | • Zusammenschaltung von Mengenumwertern und Gaszählern  | 253 |
| Amtliche Bekanntmachungen | (eigenes Inhaltsverzeichnis)  | 254 |

---

### Zum Titelbild:

„Am 1. Januar 1959 hat die Aussendung von Normalfrequenzen und Zeitmessmarken der PTB über den posteigenen Sender DCF77 begonnen“ ließ Dr. Udo Adelsberger in der Nachrichtentechnischen Zeitschrift verlautbaren. Mit diesem Schritt begann

eine bis heute andauernde Erfolgsgeschichte, die im März 2009 mit drei Vorträgen in einem PTB-Kolloquium reflektiert wurde. Diese Ausgabe der PTB-Mitteilungen enthält die Beiträge der Vortragenden.

## Impressum

Die **PTB-Mitteilungen** sind metrologisches Fachjournal und amtliches Mitteilungsblatt der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin. Als Fachjournal veröffentlichen die PTB-Mitteilungen wissenschaftliche Fachaufsätze zu metrologischen Themen aus den Arbeitsgebieten der PTB. Als amtliches Mitteilungsblatt steht die Zeitschrift in einer langen Tradition, die bis zu den Anfängen der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt (gegründet 1887) zurückreicht. Die PTB-Mitteilungen veröffentlichen in ihrer Rubrik „Amtliche Bekanntmachungen“ unter anderem die aktuellen Geräte-Prüfungen und -Zulassungen aus den Gebieten des Eich-, Prüfstellen- und Gesundheitswesens, des Strahlenschutzes und der Sicherheitstechnik.

### Verlag

Wirtschaftsverlag NW  
Verlag für neue Wissenschaft GmbH  
Bürgermeister-Smidt-Str. 74–76,  
27568 Bremerhaven  
Postfach 10 11 10, 27511 Bremerhaven  
Internet: [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de)  
E-Mail: [info@nw-verlag.de](mailto:info@nw-verlag.de)

### Herausgeber

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB),  
Braunschweig und Berlin  
Postanschrift:  
Postfach 33 45, 38023 Braunschweig  
Lieferanschrift:  
Bundesallee 100, 38116 Braunschweig

### Redaktion/Layout

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit, PTB  
Dr. Dr. Jens Simon (verantwortlich)  
Gisela Link  
Telefon: (05 31) 592-82 02  
Telefax: (05 31) 592-30 08  
E-Mail: [gisela.link@ptb.de](mailto:gisela.link@ptb.de)

### Leser- und Abonnement-Service

Marina Kornahrens  
Telefon: (04 71) 9 45 44-61  
Telefax: (04 71) 9 45 44-88  
E-Mail: [vertrieb@nw-verlag.de](mailto:vertrieb@nw-verlag.de)

### Anzeigenservice

Karin Drewes  
Telefon: (04 71) 9 45 44-21  
Telefax: (04 71) 9 45 44-77  
E-Mail: [info@nw-verlag.de](mailto:info@nw-verlag.de)

### Erscheinungsweise und Bezugspreise

Die PTB-Mitteilungen erscheinen viermal jährlich. Das Jahresabonnement kostet 55 Euro, das Einzelheft 16 Euro, jeweils zzgl. Versandkosten. Bezug über den Buchhandel oder den Verlag. Abbestellungen müssen spätestens drei Monate vor Ende eines Kalenderjahres schriftlich beim Verlag erfolgen.

© Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bremerhaven, 2009

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

## Wilhelm Foerster, Vater der Zeitverteilung im Deutschen Kaiserreich

Johannes Graf<sup>1</sup>



Bild 1:  
Wilhelm Julius Foerster (1832–1921)  
(Quelle: Privatbesitz)

### Einleitung

Genaue Zeit an jedem Ort – das ist heute für uns selbstverständlich geworden. Uhren als Taktgeber des täglichen Lebens finden sich in beinahe jedem Haushaltsgerät, im Handy, Auto oder Computer. Dafür sorgt die enorme Zahl von über einer Milliarde Quarzuhren, die weltweit jährlich die Fabriken verlassen. Ohne groß nachzudenken, stellen wir unsere Uhren nach der amtlichen Zeit, oder sie synchronisieren sich automatisch über Zeitsender oder Zeitserver.

Doch dieser Zustand der überall verfügbaren genauen Zeit ist noch sehr jung. Vor gerade einmal 150 Jahren begannen sich Wissenschaftler,

Ingenieure und Politiker zu fragen, wie man es schafft, dass Uhren an unterschiedlichen Orten die gleiche Zeit anzeigen. Bereits in den Jahrzehnten vor dem Ersten Weltkrieg war die Lösung dieses Problems eine wichtige Voraussetzung für den stark ansteigenden globalen Waren- und Datenaustausch. Treibende Kraft der Zeitsynchronisation im Wilhelminischen Kaiserreich war der Astronom Wilhelm Foerster.

Foerster, am 16. Dezember 1832 im schlesischen Grünberg geboren, war eine der schillerndsten Figuren in Technik und Wissenschaft seiner Zeit. Bedeutenden Einfluss hatte er gleichermaßen auf Wissenschaft und Forschung, Industrie und Volksbildung. Seine Funktionen in unterschiedlichen Gremien waren so vielfältig, dass eine vollständige Würdigung aller seiner Leistungen und Ämter eine eigenständige Veröffentlichung wert wäre.

Besonders am Herzen lag ihm das staatliche Mess- und Eichwesen, das er als Leiter der Normaleichungskommission ab 1869 maßgeblich prägte. Er gilt damit als Gründervater des staatlichen Mess- und Eichwesens. Unter anderem wirkte er als offizieller Vertreter Deutschlands am Zustandekommen der Pariser Meterkonvention mit. Überzeugt von der Notwendigkeit einer unabhängigen Institution für das Messwesen und die Präzisionsmechanik, gehörte Foerster zusammen mit seinem Freund Werner von Siemens sowie Hermann von Helmholtz zu den Mitbegründern der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt, der Vorgängerinstitution der heutigen Physikalisch-Technischen Bundesanstalt. Die Krönung seiner Bemühungen um die Normung schließlich war die Wahl zum Vorsitzenden des Internationalen Büros für Maße und Gewichte, das er von 1891 bis 1920 leitete.

Foersters unermüdliches Engagement für das Gemeinwohl fußte auf einer moralisch-humanistischen Grundhaltung, die er als Mitbegründer und langjähriger Vorsitzender der „Deutschen Gesellschaft für Ethische Kultur“ offen gezeigt hat. Sie führte ihn schließlich zu einer konse-

<sup>1</sup> Dr. Johannes Graf,  
Deutsches Uhrenmuseum,  
Furtwangen  
E-Mail:  
graf@deutsches-uhrenmuseum.de

quent pazifistischen Einstellung, durch die er sich – etwa in der von ihm begründeten „Deutschen Friedensgesellschaft“ – auf bemerkenswerte Weise gegen die allgemeine Meinung seiner Zeit gestellt hat.

Im Schnittpunkt seiner Bemühungen um die Genauigkeit in allen Bereichen menschlichen Lebens sowie um eine moralische Verbesserung des Menschen stand die Chronometrie. Foersters ganz eigener Antrieb zur Etablierung und Verbesserung des öffentlichen Zeitdienstes aus einem ethischen Impuls heraus zeigte sich bereits in den Überschriften seiner Aufsätze wie „Der Lebenswert zuverlässiger Zeit-Angaben“ (1889) oder „Zuverlässige Zeitangaben und ihr sozialer Wert“ (1906). Und in einem Vortrag im Jahr 1910 resümiert er, was Präzision für ihn bedeutet: „Genauigkeit ist die Quelle, die Grundlage alles Denkens und Wirkens des Menschen. Sie ist die Quelle der Gerechtigkeit und Wahrhaftigkeit.“

Zugespitzt formuliert, könnte man Foerster als den Vater der modernen Zeitmessung in Deutschland bezeichnen, der von den ersten praxistauglichen Systemen der örtlichen Zeitvernetzung bis zur Einführung des drahtlosen Zeitdienstes an vorderster Stelle mitgewirkt hat.

### Astronomie und Zeitmessung

„Die Maasseinheit und die letzte Controle auch für das genaueste Pendel und den genauesten Chronometer bildet immer nur die Umdrehungszeit der Erde, denn keine Bewegung auf der Erde ist so gleichförmig wie die Bewegung der Erde selbst. Diese Umdrehungszeit kann aber nur durch astronomische Beobachtungen und astronomische Theorie mit aller möglichen und nöthigen Feinheit ermittelt werden.“

Wilhelm Foerster begründet damit die Vorrangrolle der Astronomie für die Zeitmessung. Bis zur Erfindung der Caesium-Atomuhr war die Beobachtung wiederkehrender Sterne und Konstellationen die genaueste Methode der Zeitbestimmung. Deshalb waren Observatorien damit betraut, anhand von Sterndurchgängen die gültige Normalzeit zu ermitteln.

In Preußen wurde die Normalzeit von der Königlichen Sternwarte zu Berlin festgelegt, deren Direktor Foerster von 1865 bis 1904 war. Die Zeitbestimmung wurde von ihm nicht als lästige Pflicht angesehen. Vielmehr sah Foerster es als eine seiner wichtigsten Aufgaben an, – wie er sagte – aus dem rohen Erz der astronomischen Beobachtungen durch Operationen strenger Gedankenfolge das edle Metall eines Maßes von hoher Reinheit abzuleiten. Für ihn war es selbstverständlich, dass die so ermittelte Zeit kostenlos zum Wohle der Allgemeinheit zur Verfügung gestellt wurde. Insofern könne man laut Foerster von einer „Verwaltung der Zeitmaße durch die Astronomie“ sprechen.

### Öffentliche Uhren in Berlin

Bei den Vorgängern von Foerster an der Berliner Sternwarte war die Festlegung der Normalzeit nur als eine von vielen Aufgaben neben der eigentlichen astronomischen Forschung angesehen worden. Mitte des 19. Jahrhunderts jedoch waren, wie Wilhelm Foerster in seinen Lebenserinnerungen schreibt, die Anforderungen an die Genauigkeit so weit gestiegen, dass Uhrmacher immer häufiger bei der Sternwarte nach der exakten Zeit anfragten. Die dauernden Anfragen waren ausgesprochen zeitraubend, so dass Foerster auf Abhilfe sann. Die genaue Zeit sollte

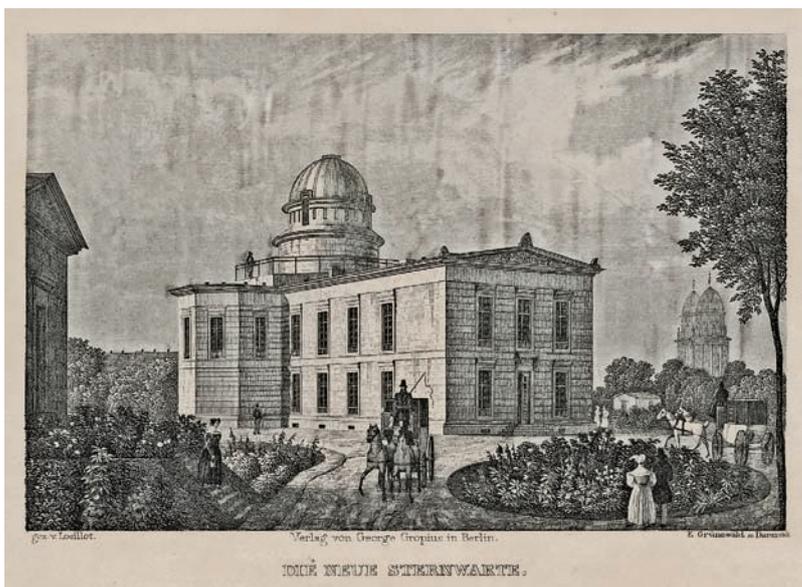


Bild 2:  
E. Grünwald: Die Berliner Sternwarte in der Lindenstraße (Deutsches Uhrenmuseum, Archiv)



Bild 3:  
Sekundengenaue Normaluhr der ersten Generation am Spittelmarkt, 1909 (Quelle: Privatbesitz)

nicht nur in der Sternwarte, sondern an verschiedenen öffentlichen Plätzen Berlins für jedermann zugänglich werden.

Vom Prinzip her war die Synchronisierung von Uhren über größere Distanzen seit den Anfängen der Telegraphie bekannt. Um 1840 hatten Pioniere wie Carl August Steinheil in München oder Alexander Bain in Schottland die Zeitübertragung als eine der ersten Anwendungsmöglichkeiten der neuen Technik erkannt und erprobt. Aber erst in den 1860er Jahren standen praxistaugliche Systeme wie die von Matthias Hipp aus Neuchatel zur Verfügung. Solche handelsüblichen Uhrenanlagen bestanden in der Regel aus einer Hauptuhr, die eine oder mehrere Nebenuhren steuerte. Eine Hauptuhr war meist eine präzise Pendeluhr, die über Elektrokabel mit Nebenuhren verbunden war. Die Nebenuhren hatten kein eigenständiges Uhrwerk mehr, sondern bestanden nur noch aus Zifferblättern mit einem Elektromagneten. Jede volle Minute wurde von der Hauptuhr der Stromkreis geschlossen, so dass sich auch die Zeiger der Nebenuhr um eine Minute weiterbewegten. Haupt- und Nebenuhr zeigten auf diese Weise die gleiche Zeit, minutengenau.

Foersters ehrgeiziges Ziel war es jedoch, auf den öffentlichen Uhren Berlins nicht nur die Minute, sondern auch die Sekunde exakt anzugeben, denn die Kunden der Sternwarte waren diese für damalige Begriffe hohe Genauigkeit gewohnt. Wenn er sich von den lästigen Anfragen entlasten wollte, musste er auch bei den öffentlichen Zeitanzeigen auf höchste Präzision setzen.

Für die sekundengenaue Anzeige auf den Berliner Normaluhren stand das System der elektrischen Zeitübertragung von Jones Pate, das Foerster bei zwei Aufenthalten in England 1851 und 1859 kennen gelernt hatte. Alle zwei Sekunden erhielt die Pendel der öffentlichen Uhren von der Präzisionsuhr in der Sternwarte einen elektrischen Impuls. Auf diese Weise sollten die Pendel der Nebenuhren synchron schwingen und die gleiche Zeit wie die Sternwartenuhr anzeigen. Foerster bezeichnet diese Form der Beeinflussung als „sympathische Regulierung“.

Am 20. Juli 1869 wurde die erste Normaluhr vor dem Kammergerichtsgebäude in der Lindenstraße gegenüber der Sternwarte in Betrieb genommen. In den kommenden Jahren wurden noch fünf weitere Uhren an verschiedenen Plätzen Berlins aufgestellt.

Doch entgegen der Erwartungen hatte sich der Astronom Förster mit den öffentlichen Zeitanzeigen nicht ein leidiges Problem vom Hals geschafft, sondern sich ein neues geschaffen. Die chronische Unzuverlässigkeit und die Kontrolle der überall im Stadtgebiet befindlichen Uhren sollten ihn über Jahrzehnte beschäftigen. Er-



Bild 4:  
Uraniasäule (Deutsche  
Uhrmacher-Zeitung  
1892)

schwerend kam hinzu, dass die bald notwendig gewordene Erweiterung der Zeitverteilung in der schnell wachsenden Metropole die öffentliche Hand nichts kosten sollte. Foerster plagte sich folglich nicht nur mit der Genauigkeit der Uhren, sondern auch mit deren Finanzierung.

Ende 1883 unterbreitete Foerster dem Berliner Magistrat konkrete Pläne für die Aufstellung neuer öffentlicher Uhren. Die Normalzeit sollte weiterhin kostenlos auf den neuen öffentlichen Uhren angezeigt werden. An private Interessenten und Unternehmen hingegen sollten von der neu gegründeten „Central-Uhren-Gesellschaft“ elektrische Uhren zur Anzeige der Normalzeit vermietet werden. Gegen eine jährliche Zahlung versprach die Aktiengesellschaft die Lieferung der korrekten Uhrzeit. Der Kunde hatte sich dabei um nichts zu kümmern. Der Servicevertrag umfasste das Anbringen der Leitungen und Uhren, das Aufziehen und die Richtigstellung der Uhren sowie alle weiteren Wartungs- und Reparaturarbeiten. Doch dieses neuartige Geschäftsmodell erschien den Zeitgenossen nicht vertrauenerweckend. So warnte die Deutsche Uhrmacher-Zeitschrift unverhohlen, dass sich das eingebrachte Aktienkapital wenn überhaupt, so über sehr lange Zeiträume verzinsen werde.

Bereits ein Jahr nach dem gescheiterten Versuch der Central-Uhren-Gesellschaft trat Förster mit einem neuen Vorschlag über „Die Zukunft der öffentlichen Zeit-Angaben und Wetter-Anzeigen“ an die Öffentlichkeit. Förster setzte sich nun für gemeinnützige „Urania-Säulen“ ein, kleine Uhrentürme mit Anzeige für Wettervorhersagen und den Mondstand sowie lehrreiche Informationen über Astronomie, Meteorologie, Hydrologie und Geologie. Zusätzlich boten die Säulen Platz für den Fahrplan der Eisenbahn oder Hinweise auf den Weg zur nächsten Feu-

ermeldestelle, Post oder „Sanitätswache“. In der Kombination von Information und Belehrung sollten sie wie der gleichnamige, von Foerster mitbegründete Verein Urania der Volksbildung dienen. Die ersten Urania-Säulen wurden 1891 aufgestellt.

Wie stark die Zeitanzeige Försters Streben nach höchster Genauigkeit verpflichtet war, zeigt ein kurioses Detail, das in der Uhrengeschichte seinesgleichen sucht. Wenn eine der Urania-Uhren um mehr als 10 Sekunden von der genauen Zeit abwich, gab die Uhr nicht nur automatisch ein Signal an die Zentraluhr, sondern das Zifferblatt verhüllte sich schamhaft mit einem Vorhang, bis die Störung beseitigt war. Durch diesen grotesken Mechanismus, der wohl nur im pruden wilhelminischen Zeitalter entwickelt werden konnte, sollten die zahlreichen Beschwerden über die Abweichung der öffentlichen Uhren von der amtlichen Zeit minimiert werden.

Wie die öffentlichen Uhren der Central-Uhren-Gesellschaft durften auch die Urania-Säulen den Magistrat nichts kosten. Deshalb appellierte man an Firmen, die sich dem idealistischen Gedanken der Volksbildung verpflichtet fühlten, durch die „Aufnahme künstlerisch ausgestatteter Anzeigen“ die Urania-Säulen zu finanzieren. Doch kaum jemand wollte die horrenden Preise für die Werbung bezahlen, so dass die Urania-Säulen-Gesellschaft im Dezember 1895 Konkurs anmelden musste.

### Normal-Zeit GmbH

Als sich die finanzielle Schieflage des Unternehmens abzeichnete, wurden diejenigen Betriebs-teile ausgegliedert, die für die Vermietung korrekt gehender Uhren zuständig waren. Das neue Unternehmen „Normal-Zeit GmbH“ unterschied sich im Prinzip nicht von den Vorgängerfirmen. Doch entwickelte sich die Normal-Zeit GmbH zu einem prosperierenden Unternehmen, das unter

dem späteren Firmennamen „Telefonbau und Normalzeit“ bzw. „Telenorma“ die öffentliche Zeitanzeige in Deutschland und vielen anderen europäischen Ländern bis ins ausgehende 20. Jahrhundert hinaus dominieren sollte.

Will man die marktbeherrschende Stellung im Bereich der Zeitverteilung verstehen, so muss man sich der Frühzeit des Unternehmens zuwenden. Dort wurden die entscheidenden Weichen für den späteren Erfolg gestellt.

Die Normal-Zeit GmbH spezialisierte sich von Anfang an auf Stadtuhranlagen nach Berliner Vorbild. Entscheidend für den späteren Erfolg war, dass die Normal-Zeit GmbH die Kontrolle der Nebenuhren nicht mehr manuell betrieb, sondern automatisiert hatte. Bei den weit auseinander liegenden öffentlichen Zeitanzeigen in einer Stadt stellte das einen enormen Vorteil dar.

Herz einer jeden Stadtuhr-Anlage war eine relaisgesteuerte Zentraluhr, die aus einem stabilen Turmuhrwerk bestand. Am Pendel war ein Elektromagnet befestigt, der über einen Magneten schwang. Durch diese Anordnung konnte das Pendel und damit letztlich der Gang der Uhr ferngesteuert werden. Über eine Standleitung mit der Hauptzentrale der Normalzeit in Berlin erhielt die Hauptuhr regelmäßig elektrische Impulse. Da die Uhr in der Berliner Hauptzentrale ihrerseits direkt mit dem Regulator der Sternwarte verbunden war, konnten die weit verstreuten Zentraluhren die Sternwartenzeit auf die Sekunde genau anzeigen. Die von den einzelnen Unterzentralen abhängigen Uhren waren weit autonomer. Nur alle vier Stunden wurden die sonst selbständigen mechanischen Werke auf ihre Genauigkeit überprüft und mit der Zentraluhr abgeglichen. Jeder Kontrollvorgang dauerte  $3\frac{3}{4}$  Minuten, so dass innerhalb eines Zyklus von vier Stunden 64 Uhren pro Leitung richtiggestellt werden konnten.

Die Zentraluhr sorgte aber nicht nur für die Regulierung der jeweils zugeschalteten Nebenuhr, sondern zeichnete gleichzeitig die Gangabweichung auf einem Kontrollstreifen auf. Über die Aufzeichnungen konnte auch ein Fehler innerhalb des Systems bemerkt und gezielt behoben werden. Selbst eine Störung der Zentraluhr sollte sich nicht auf die Nebenuhren auswirken, da sich der Regulierungsmechanismus automatisch ausschaltete.

Die Normal-Zeit GmbH garantierte die Richtigstellung aller öffentlichen Uhren in Berlin. Mit dem weitgehenden Monopol der Normal-Zeit GmbH hatte Foerster sichergestellt, dass die öffentlichen Uhren auch nach seinem Ausscheiden



Bild 5:  
Zentrale der Normalzeit in Berlin, Foto um 1910  
(Privatbesitz)

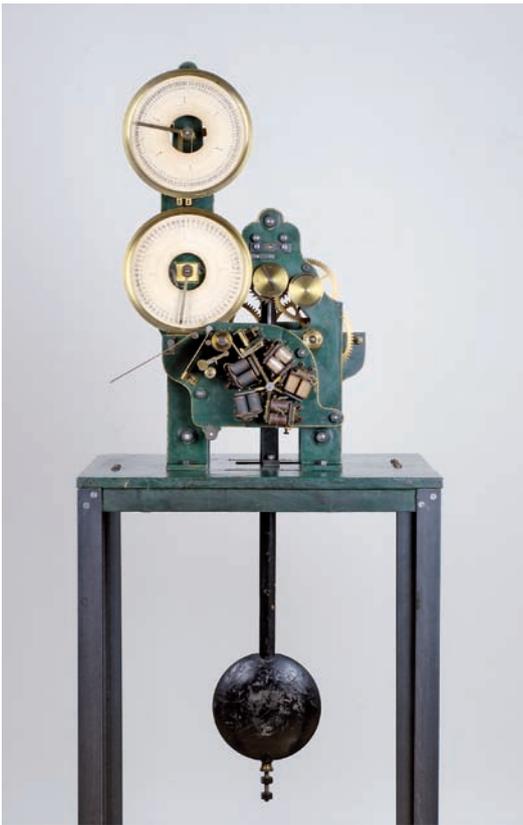


Bild 6:  
Zentraluhr der Normal-Zeit GmbH, um 1910  
(Deutsches Uhrenmuseum, Inv. 1995–647)

als Direktor der Königlichen Sternwarte dem Ideal höchster Genauigkeit verpflichtet blieben. Nach fast vierzig Jahren war er am Ziel angelangt. Endlich liefen die öffentlichen Uhren in Berlin im Gleichtakt. Referenz war und blieb die Standardzeit der Königlichen Sternwarte, die über eine direkte Kabelverbindung zur Zentrale der Normal-Zeit GmbH die Referenz für alle anderen Uhren bildete.

### Überregionale Zeitübertragung

Foerster kämpfte aber nicht nur für einen einheitlichen Gang aller öffentlichen Uhren in Berlin, sondern trieb auch die überregionale Verteilung der Mitteleuropäischen Zeit voran, die von der Sternwarte ermittelt worden war.

Denn die Normal-Zeit GmbH lieferte nicht nur innerhalb Berlins, sondern reichsweit überall dorthin die amtliche Zeit, wo es ein Telefon gab. Auch die Stadtuhranlagen in vielen anderen deutschen Städten wurden so indirekt vom Regulator in der Berliner Sternwarte gesteuert.

Zur Übermittlung der Zeit hatte das Unternehmen vom Reichs-Postamt die Erlaubnis zur Nutzung der Telefonleitungen erhalten und darüber hinaus von der Reichsbahnverwaltung das Recht zur Übertragung der Zeitsignale über die Telegraphenleitungen entlang der Eisenbahn. Ende des 19. Jahrhunderts kam an der Normal-

Zeit GmbH keiner vorbei, der die amtliche Zeit der Sternwarte brauchte. Das Unternehmen hatte eine Schlüsselposition erhalten, die ihr einen entscheidenden Vorteil gegenüber den Konkurrenten im Bereich Zeitverteilung verschaffte.

Im Gegenzug für die Bereitstellung der Telegrafienlinien entlang der Schienen übermittelte die Normal-Zeit GmbH jeden Morgen die korrekte Zeit an die Reichsbahn-Zentraluhr auf dem Schlesischen Bahnhof in Berlin. Die Hauptuhr im Schlesischen Bahnhof wiederum sendete täglich ein Zeitsignal, das mit einer durchschnittlichen Abweichung von einer Drittel Sekunde entlang der Telegraphenlinien empfangen wurde und zum Stellen der Bahnhofsuhrn diente. An allen Bahnhöfen in ganz Deutschland wurde so die von der Berliner Sternwarte ermittelte Mitteleuropäische Zeit angezeigt.

### Internationale Zeitübertragung

Die Hoffnungen auf ein weltumspannendes Zeitnetz richteten sich schon früh auf die Signalübertragung per Funk. Bereits kurz nach der Erfindung der drahtlosen Telegraphie durch Marconi wurde als eines der ersten konkreten Anwendungsgebiete die Zeitübermittlung genannt.

Die Vorteile einer Synchronisierung von Uhren über Radiosignale liegen auf der Hand: Das teure Leitungsnetz, das einer flächendeckenden Verbreitung der Normalzeit im Wege stand, fiel bei der Zeitübertragung per Funk weg. Ein einziger Funkmast mit starker Leistung konnte die Observatoriumszeit an beliebig viele Empfänger senden. Auch an bislang unzugänglichen Punkten wie auf See konnte die Zeit empfangen werden.

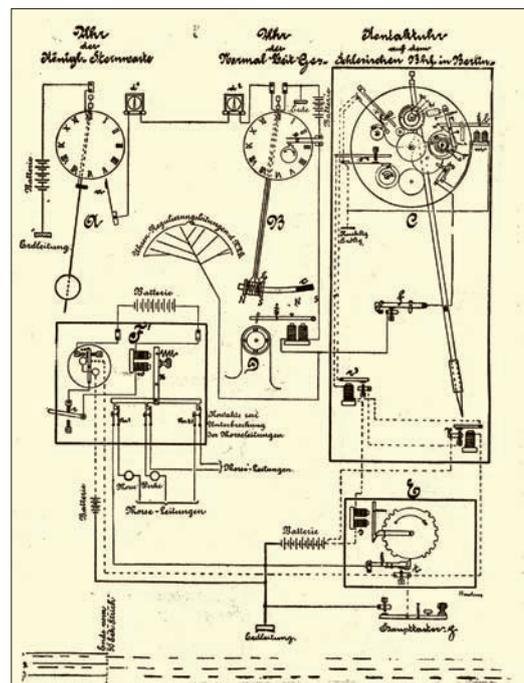


Bild 7:  
Überregionale Zeitverteilung durch die Normal-Zeit GmbH (Quelle: Deutsche Uhrmacher-Zeitung)

Angesichts dieser verlockenden Aussichten verwundert es nicht, dass nach ersten Zeitübertragungen per Funk 1903 die US Navy den ersten drahtlosen Zeitdienst einrichtete. 1904 wurde mit regelmäßigen Aussendungen begonnen. Ebenfalls 1904 berichtete die Deutsche Uhrmacher-Zeitung über konkrete Versuche auf dem Pariser Eiffelturm und im Folgejahr von einer Pilotanlage in Wien, wo Radiosender zur Zeitübertragung versuchsweise die Arbeit aufnahmen.

Die Nutzung des Eiffelturms als Funkmast rettete dieses Bauwerk vor dem Abriss. 1889 zur Pariser Weltausstellung erbaut, sollte das anfangs ungeliebte Wahrzeichen der industriellen Ära 20 Jahre später abgerissen werden. Doch einige Jahre vor der geplanten Demontage wurde er als Sender für die aufstrebende Funktechnik unverzichtbar. Schon 1904 konnten Zeitsignale vom Pariser Sender auf dem Eiffelturm (Bild 8, Nr. 2) auf der Wellenlänge 2000 m mit unterschiedlichen Empfangsapparaten (Bild 8, Nr. 3 und 4) empfangen werden. Entweder ertönte über einen Lautsprecher bzw. Hörer das Sekundenklöpfen zum Kontrollieren von Uhren (Bild 6, Nr. 3), oder der Sekundentakt wurde auf einem Schreibtelegraphen (Bild 8, Nr. 4) aufgezeichnet.

Den Wissenschaften eröffneten sich durch die hohe Präzision drahtloser Zeitübertragungen ganz neue Möglichkeiten. Bei ersten Versuchen in Preußen mit der Zeitübertragung durch Radiowellen 1904 bis 1906 bestimmte Prof. Albrecht vom Königlich Geodätischen Institut zu Potsdam

den Fehler in der Signalübertragung auf 2/1000 Sekunden. Er prognostizierte, dass die geographische Länge mithilfe der Funktechnik auf einen halben Meter genau bestimmt werden könne.

Foerster nahm diese neuen Erkenntnisse aufmerksam zur Kenntnis. 1907 veröffentlichte der inzwischen 75-jährige einen Aufsatz über „Die Telegraphie mit elektrischen Wellen in ihrer Bedeutung für astronomisch-geographische Längen-Bestimmungen und einheitliche Zeitangaben“. Foerster erkannte das enorme Potential einer drahtlosen Aussendung von Zeitsignalen für die Geowissenschaften und darüber hinaus für die Chronometrie. Um die Chancen der neuen Technologie effektiv zu nutzen, sollten sich die führenden Sternwarten laut Foerster zu einem „großen atmosphärisch-elektrischen Zeit-Regulierungssystem“ zusammenschließen. Eine internationale „Organisation der Vergleichung“ sollte damit beauftragt werden, „eine allgemeine europäische Normalzeit von einer bis auf die Bruchteile der Sekunde reichenden Genauigkeit“ zu ermitteln und auszusenden.

Zur Verwirklichung dieses visionären Plans schaltete sich Foerster noch einmal in die große Politik ein. In mehreren Denkschriften an den Staatsminister des Innern, Clemens Delbrück, stellt Foerster die Möglichkeiten der funkentelegraphischen gegenüber den bislang gebräuchlichen Methoden der Zeitübermittlung dar.

Die in Deutschland existierenden telegraphischen und telefonischen Zeitsignale beruhten damals auf der Normalzeit verschiedener Sternwarten. Dadurch wurden laut Foerster „zwischen dem Berliner Zentralsignal und den von anderen Sternwarten des Landes dargebotenen Zeitangaben nicht selten Unterschiede von mehreren Zeitsekunden beobachtet.“ Foerster sah nur einen Weg, dieses Problem zu lösen: durch die „über so weite Erdflächen hin wahrnehmbar zu machenden Zeitsignale der Funkentelegraphie“.

Doch, wie Foerster ebenfalls zugibt, bestanden erhebliche Differenzen zwischen der vom Eiffelturm ausgestrahlten Zeit der Pariser Sternwarte und dem für die Deutsche Marine bestimmten Zeitsignal vom Sender Norddeich. Um auf internationaler Ebene zu einem einheitlichen Signal zu gelangen, wollte er eine europäische Zentralstelle für Zeitbestimmung etablieren. Als Sitz schlug Foerster das in Potsdam beheimatete internationale Zentralbureau der Erdmessung vor.

Nach dem Empfang des Zeitsignals sollten die verschiedenen Sternwarten der Zentralstelle telefonisch den korrekten Empfang und den Vergleich des Signals mit den eigenen Beobachtungen melden. In der Zentralstelle könnten die Ergebnisse miteinander verglichen werden und in die Berechnung des nächsten Zeitsignals einfließen.

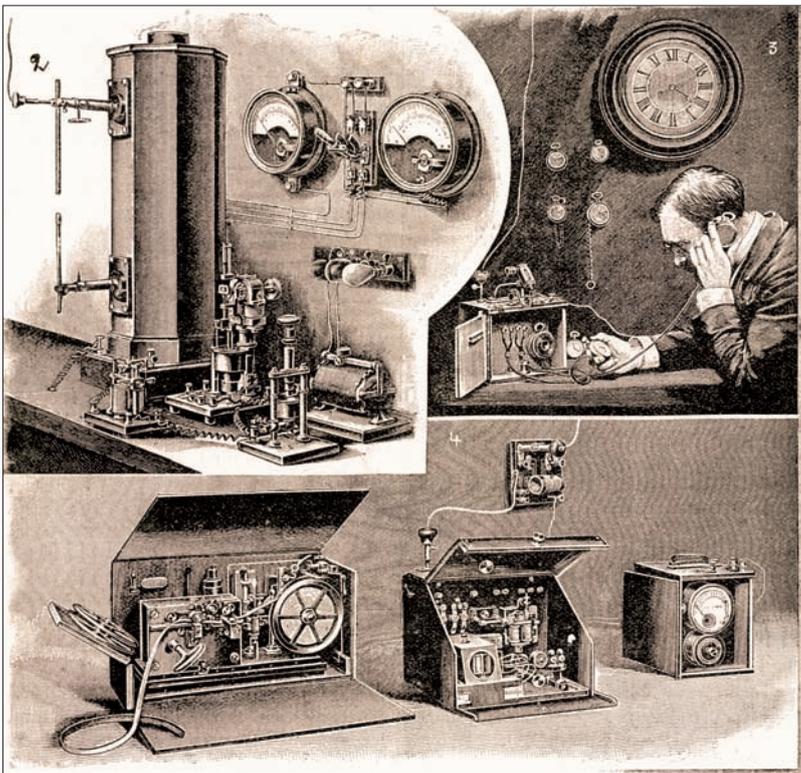


Bild 8:  
Der Zeitsender auf dem Eiffelturm (Quelle: Deutsche Uhrmacherzeitung 1904)

Dieser Vorschlag markiert eine entscheidende Wende in Foersters Bestrebungen zur Zeitvereinheitlichung. Bisher hatte er als Allheilmittel gegen das Chaos unterschiedlicher Zeiten die sklavische Abhängigkeit aller Uhren von der Präzisionsuhr in der Sternwarte propagiert. Nun wollte Foerster das Zeitsignal nicht mehr von nur einer Uhr gesteuert sehen, sondern von einem Netz hochpräziser Uhren, die aufgrund von Sternbeobachtungen in unterschiedlichen Observatorien reguliert wurden. Das Radiosignal sollte folglich nicht autoritär die Zeit vorgeben, sondern es selbst sollte von den astronomischen Zeitbestimmungen in zahlreichen Observatorien kontrolliert werden. Das Zeitsignal folgte nicht mehr einer einzigen Uhr, sondern entsprach einem Mittelwert der Normalzeiten unterschiedlicher Sternwarten.

Parallel zu Foerster entwickelte Frankreich, das zu einer internationalen Konferenz einlud, ähnliche Ideen um den Plan eines internationalen Zeitdienstes auszuarbeiten. Die Pariser Konferenz von 1912 schlug vor, eine internationale Kommission zu bilden, in der Foerster „mit der Führung beauftragt“ und zu einem der drei Vizepräsidenten ernannt wurde. Das internationale Zeitbureau mit Sitz in Paris sollte in Zukunft für die praktische Umsetzung der einheitlichen Weltzeit zuständig sein. Ein flächendeckendes Netz von Sendeanlagen sollte die Ausstrahlung der Weltzeit über den gesamten Erdball gewährleisten.

Als zentraler Funkmast wurde der Eiffelturm bestimmt. Da auch die Pariser Sternwarte das Zeitsignal empfing, konnte sie sofort an den Eiffelturm melden, welcher genauen Observatoriumszeit das Signal entsprach. Dieses Protokoll sollte direkt an die tägliche Ausstrahlung angehängt werden. Am 1. Juli 1913 sollte der neue Zeitdienst die Aussendung beginnen. Dann, so hofften die zeitgenössischen Berichterstatter, sollte die Weltzeit bis auf einige hundertstel Sekunden genau empfangen werden können.

Nach den Plänen der Pariser Konferenz sollte der Eiffelturm nicht nur das Wahrzeichen der modernen Ingenieurskunst sein, sondern auch der modernen Zeitmessung. Bezeichnenderweise war der ersten Langwellenaussendung der Zeitsignale 1908 die Installation einer überdimensionalen Digitaluhr vorausgegangen, die in der Nacht weithin sichtbar die Zeit anzeigte. Es verwundert deshalb nicht, dass der Eiffelturm den Ehrentitel „Leuchtturm der Zeit“ erhielt.

Die utopischen Hoffnungen, dass die universelle Verbreitung des Gedankens der Genauigkeit auch den Friedensgedanken fördern sollte, erfüllten sich nicht. Im Gegenteil: Die Pläne für ein weltweit einheitliches Zeitsignal gingen im Kanonendonner des Ersten Weltkriegs unter. Jeder Zeitsender benutzte noch lange einen ei-

genen Code. Erst in den 1920er Jahren kam die Idee einer einheitlichen, durch internationale Zusammenarbeit ermittelten Weltzeit voran. Das sollte Foerster jedoch nicht mehr erleben. Im gesegneten Alter von 88 Jahren starb er 1921 in Potsdam. Was Foerster vorangetrieben hatte und durch die Funktechnik möglich geworden war, ließ sich jedoch nicht aufhalten. Die Idee einer einzigen globalen Referenzzeit, gewonnen aus dem Vergleich zahlreicher hochpräziser Zeitmessinstrumente, setzte sich schließlich durch.

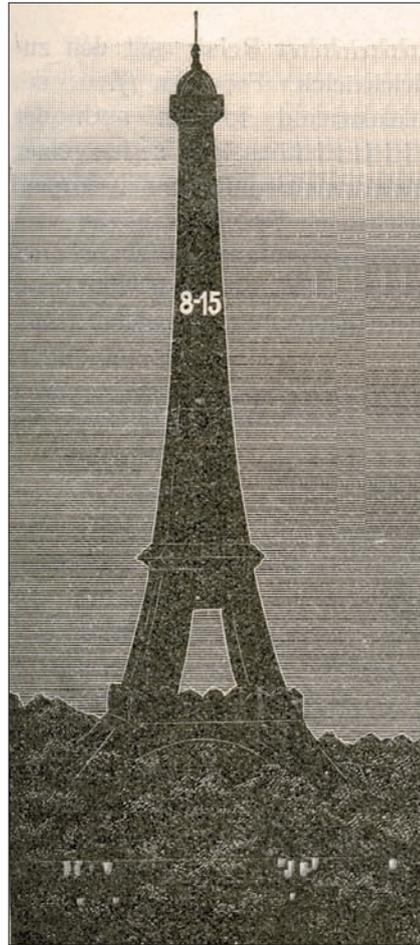


Bild 9:  
Eiffelturm – der „Leuchtturm der Zeit“, 1908  
(Quelle: Deutsche Uhrmacherzeitung 1908)



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

Andreas Bauch<sup>1</sup>, Peter Hetzel<sup>2</sup> und Dirk Piester<sup>3</sup>

## Zusammenfassung

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

## Summary

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

## 1 Anlass für diesen Beitrag

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

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

<sup>1</sup> Dr. Andreas Bauch, Arbeitsgruppe „Zeitübertragung“, E-Mail: andreas.bauch@ptb.de

<sup>2</sup> Dr. Peter Hetzel, bis 2002 Fachbereich „Zeit und Frequenz“

<sup>3</sup> Dr. Dirk Piester, Arbeitsgruppe „Zeitübertragung“, E-Mail: dirk.piester@ptb.de

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

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

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

## 2 Wie lange? Wie oft? Wann?

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

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

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

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

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

### 3 Die gesetzliche Zeit für Deutschland

#### 3.1 Gesetzliche Grundlagen

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

$$\begin{aligned} \text{MEZ(D)} &= \text{UTC(PTB)} + 1\text{h}, \\ \text{MESZ(D)} &= \text{UTC(PTB)} + 2\text{h}. \end{aligned}$$

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

#### 3.2 Koordinierte Weltzeit

Die Sektion Zeit und Schweremessung des Internationalen Büros für Maß und Gewicht BIPM (Bureau International des Poids et Mesures) ist mit der Berechnung und Verbreitung einer weltweit gültigen Zeitreferenz beauftragt.\* Das BIPM berechnet hierfür eine Zeitreferenz auf der Basis von etwa 300 Atomuhren, darunter etwa zehn so genannte primäre Uhren (s. u.), aus ca. 65 weltweit verteilten Zeitinstituten. Zunächst ermittelt das BIPM die Gang-Instabilitäten dieser Uhren und weist ihnen statistische Gewichte

zu, mit denen sie bei der Berechnung einer gemittelten Zeitskala berücksichtigt werden. Eine Uhr mit stabilem Gang erhält ein hohes statistisches Gewicht und eine mit instabilem Gang ein kleines. Das so gewonnene Mittel wird freie Atomzeitskala (EAL von Echelle Atomique Libre) genannt. Auf Grund der Eigenschaften der verwendeten Uhren weicht das Mittel der von ihnen realisierten Sekunden von der definitionsgemäßen Dauer der SI-Sekunde ab. „SI-Sekunde“ bezeichnet die Basiseinheit der Zeit im Internationalen Einheitensystem SI (System International) [12, 13]. Daher wird in einem zweiten Schritt die Internationale Atomzeit TAI (Temps Atomique International) mittels einer Gangkorrektur aus EAL gewonnen. Das Skalenmaß von TAI wird dabei so bemessen, dass es so gut wie möglich mit der SI-Sekunde übereinstimmt, wie sie auf Meereshöhe realisiert würde. Die Gangkorrektur wird gegenwärtig aus dem Vergleich von EAL mit den primären Uhren der Zeitinstitute in Frankreich, Großbritannien, Italien, Japan, Süd-Korea, USA und Deutschland abgeleitet. TAI hatte verschiedene Vorläufer [10], aber man hat den fiktiven Anfangspunkt von TAI so festgelegt, dass der 1. Januar 1958, 00:00 Uhr TAI, mit dem entsprechenden Zeitpunkt in der mittleren Sonnenzeit am Nullmeridian, UT1 (Universal Time) genannt, übereinstimmte. UT1 war die Grundlage der weltweiten Zeitbestimmung, solange diese auf astronomischen Beobachtungen beruhte (siehe Anhang 1).

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

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

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

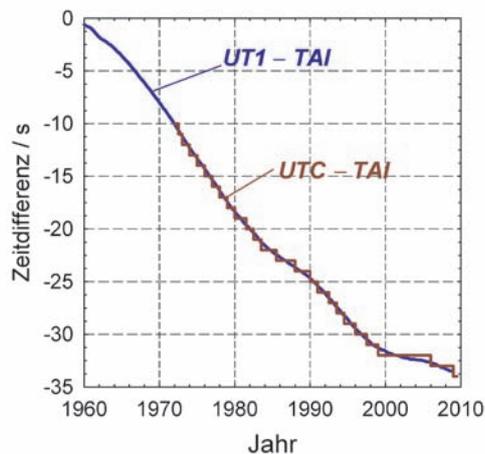
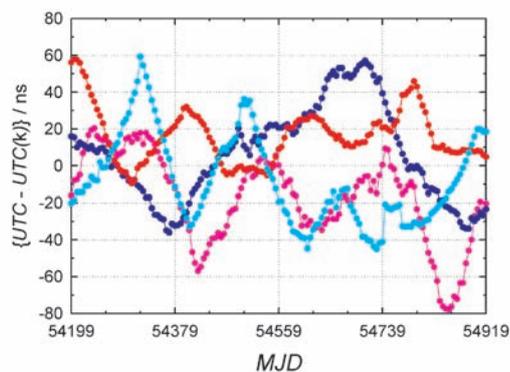


Bild 1:  
Vergleich von (astronomischer) Weltzeit UT1 und Koordinierter Weltzeit UTC mit der Internationalen Atomzeit TAI

Bild 2:  
Vergleich der Koordinierten Weltzeit UTC mit in vier europäischen Zeitinstituten (k) realisierten Atomzeitskalen UTC(k) über zwei Jahre bis einschließlich März 2009; MJD 54919 bezeichnet den 29. März 2009;

rot: Istituto Nazionale di Ricerca di Metrologia, INRiM, Turin;  
cyan: NPL, Teddington, UK;  
magenta: LNE SYRTE, Observatoire de Paris;  
blau: PTB.



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

Tageszählung, als Zeitachse verwendet. Der 29. März 2009 wird mit MJD 54919 bezeichnet.

### 3.3 Die Atomuhren der PTB

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

## 4 DCF77: Von den Anfängen bis heute

### 4.1 Eine kurze Geschichte der Zeitübertragung per Funk

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



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

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

#### 4.2 Sendefunkstelle Mainflingen

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

Im Jahr 1954 wurde bereits auf sechs Frequenzen, zwischen 46 kHz und 123 kHz, gesen-

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

#### 4.3 Senderbezeichnung

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

#### 4.4 Die Entwicklung der Nutzung von DCF77 für die Zeitaussendung

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

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

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

#### 4.5 Entwicklung des Sendeprogramms

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

\* Heute National Institute of Standards and Technology NIST

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

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

Seit Juni 1983 wird dem Träger von DCF77 zusätzlich zur Amplitudenmodulation (AM) noch eine pseudozufällige Phasenumtastung aufmoduliert. Die Ankunftszeitpunkte der so modulierten DCF77-Signale können unter Verwendung geeigneter Empfänger störsicherer bestimmt werden, als dies unter üblichen Empfangsbedingungen mit den AM-Zeitmarken möglich ist. Auch die Genauigkeit der Zeitübertragung mit DCF77 für ausgewählte Anwendungen wird damit erhöht. Zahlreiche Empfänger dieser Art sind im Einsatz und funktionieren sehr zufrieden stellend. Insgesamt wird aber von der Phasenmodulation weniger Gebrauch gemacht, als dies bei ihrer Einführung erwar-

tet wurde. Ein Grund dafür ist die weltweite Verfügbarkeit der Signale des Satellitennavigationssystems GPS (Global Positioning System). Aufgrund der GPS-Signalstruktur und der zur Verfügung stehenden größeren Bandbreite ist beim GPS-Empfang vom Prinzip her eine um mindestens eine Größenordnung geringere Unsicherheit der Zeitübertragung möglich als sie mit DCF77-Empfängern zu erreichen ist. Aus Platzgründen wird daher in diesem Aufsatz auf die Phasenmodulation nicht weiter eingegangen. Der auch heute noch aktuelle Stand wurde in [1] zuletzt beschrieben, und die grundlegenden Publikationen [22, 23] können von der PTB bezogen werden.

## 5. Das DCF77-Sendeprogramm heute

### 5.1 Trägerfrequenz

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

### 5.2 Amplitudenmodulation (AM)

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

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

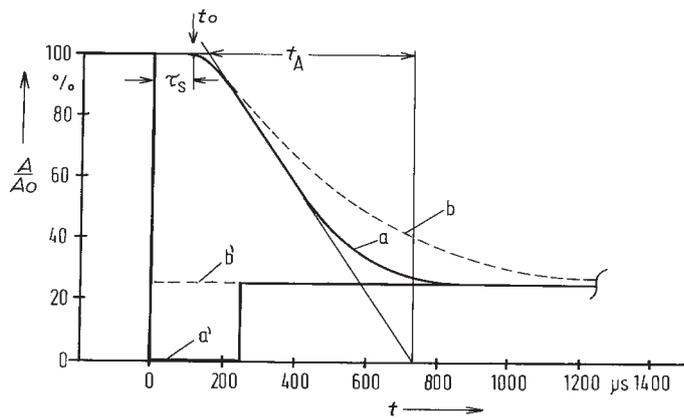


Bild 4:  
 Abfallende Flanke der von DCF77 abgestrahlten Trägereinhüllenden zu Beginn einer Sekundenmarke;  $A/A_0$ : relative Amplitude;  
 a': Steuersignal mit Austastlücke;  
 b': Steuersignal ohne Austastlücke;  
 a: abgestrahlte Flanke zu a';  
 b: abgestrahlte Flanke zu b';  
 $\tau_s$ : Laufzeit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

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

Die Stände des Steuersignals (a' in Bild 4) und der abgestrahlten Signale werden in größeren zeitlichen Abständen mittels einer aus Braunschweig zum Sendeort transportierten Atomuhr, die UTC(PTB) mit einer Unsicherheit von  $< 0,01 \mu\text{s}$  repräsentiert, kontrolliert und falls erforderlich korrigiert. Dazu werden die Zeitpunkte der abfallenden Flanke der DCF77-Zeitsignale am Steuergerät, an einer Messsonde zwischen Senderausgang und Sendeantenne sowie im Nahfeld der Sendeantenne mit Bezug auf das Signal der transportablen Atomuhr ermittelt und das Steuergerät so eingerichtet, dass die abgestrahlten Referenzzeitpunkte UTC(PTB) entsprechen. Bei

breitbandigem Empfang liegt die Unsicherheit, mit der vor Ort der als Sekundenbeginn definierte Beginn der fallenden Flanke aus dem Nahfeld bestimmt werden kann, bei ca.  $\pm 25 \mu\text{s}$  (etwa zwei Perioden der Trägerschwingung). Zum Ausgleich der Lauf- und Signalverarbeitungszeiten  $\tau_s$  in den Sendeeinrichtungen müssen die DCF77-Signale bezogen auf UTC(PTB) vom Steuergerät entsprechend früher an den Sender abgeschickt werden, damit sie im Nahfeld UTC(PTB) entsprechen. Bei wiederholten Uhrentransporten zur Sendefunkstelle wurden keine nennenswerten Änderungen von  $\tau_s$  festgestellt.

### 5.3 Zeitkode

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

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



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

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

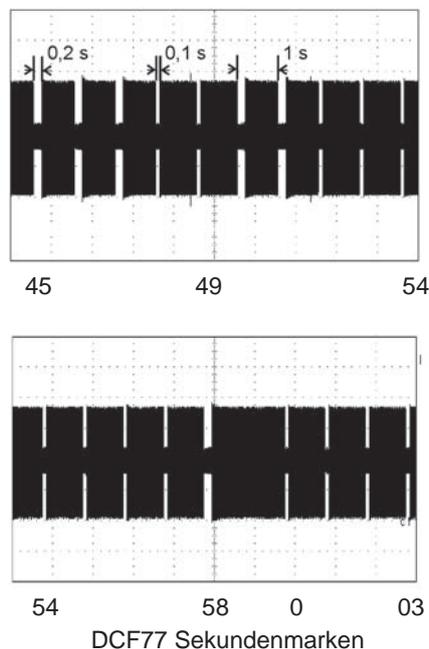


Bild 6:  
Beispiele für Registrierungen der DCF77-Trägereinhüllenden;  
oben:  
Sekundenmarken 45 bis 54, entsprechend Kalendermonat 7 (Juli), Kalenderjahr 03 (2003);  
unten:  
Sekundenmarken 54 bis 03 (Minutenwechsel).

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

#### 5.4 Neue Dateninhalte

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



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

## 6 Betriebstechnik: Steuer- und Sendeeinrichtungen des DCF77

### 6.1 Einrichtungen am Sendeort

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

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

Zur Vermeidung von falschen Aussendungen werden die erzeugten Steuersignale in zwei elektronischen Umschaltern miteinander verglichen. Ergibt sich dabei, dass die Signale des den

Sender steuernden Kanals im Widerspruch zu denen der beiden Reservekanäle stehen, wird automatisch auf einen der beiden Reservekanäle umgeschaltet. Nach Ausfall eines Kanals liefert jeder elektronische Umschalter nur noch so lange ein Ausgangssignal, wie der steuernde Kanal und der verbleibende Reservekanal in Übereinstimmung sind. Bei Widersprüchen zwischen allen drei Kanälen wird das Steuersignal automatisch unterbrochen. Wenn die Prüfergebnisse der beiden Umschalter einander widersprechen wird das Ausgangssignal ebenfalls abgeschaltet.



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

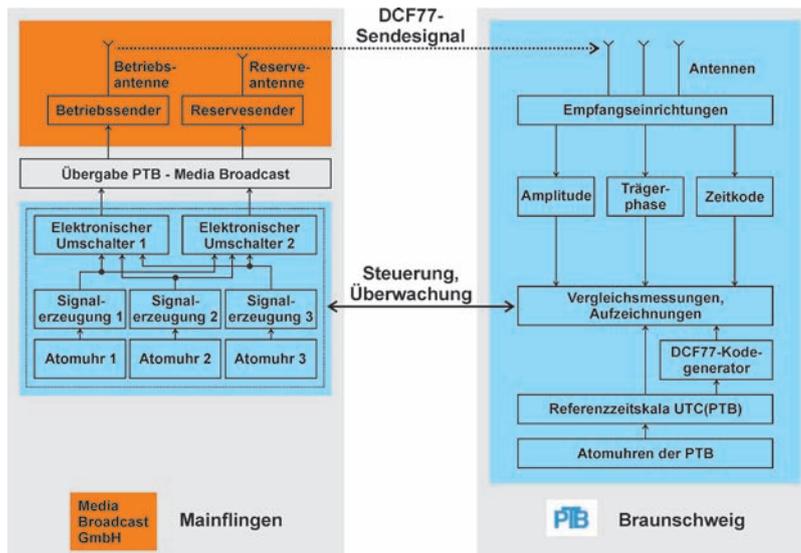


Bild 9: Blockschaltbild der Steuer- und Sendeeinrichtungen des Senders DCF77 und der Überwachungseinrichtungen in der PTB in Braunschweig.

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

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

## 6.2 Einrichtungen in Braunschweig

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

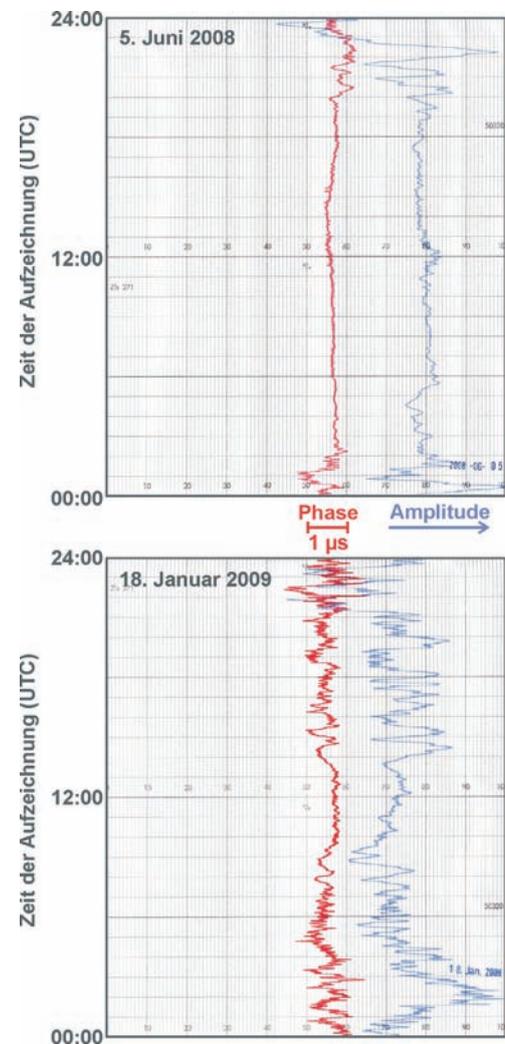


Bild 10: In der PTB Braunschweig registrierter Verlauf von Amplitude und Phase des empfangenen DCF77-Signals am 5. Juni 2008 (oben) und 18. Januar 2009 (unten); Amplitude: durch lineare Gleichrichtung mit einer Zeitkonstanten von ca. 600 s bestimmte Amplitude der Trägereinhüllenden, lineare Skala, unkalibriert,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

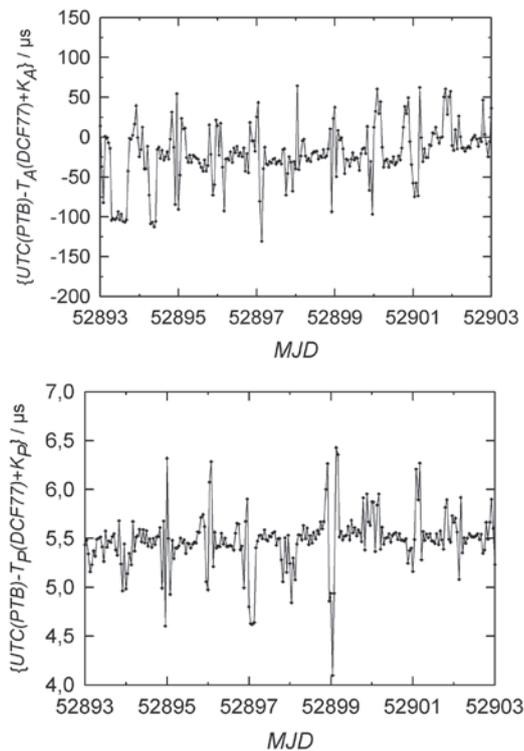


Bild 11.

In Braunschweig registrierte Zeitdifferenzen

$UTC(PTB) - T(DCF77) + K$ ;

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

unten: Differenz zwischen UTC(PTB) und der Phasenzeit  $T_P(DCF77)$  des empfangenen Trägers.  $T_P$  wird hierbei bestimmt durch Phasenzeitvergleich des empfangenen Trägers mit einer von UTC(PTB) abgeleiteten 77,5 kHz Impulsfolge;  $K_P$ : Laufzeitkonstante.

schen der lokalen Referenzzeitskala UTC(PTB) und der Ankunftszeit  $T_A(DCF77)$  der AM-Sekundenmarken und der empfangenen Phasenzeit  $T_P(DCF77)$  des Trägers in Bild 11 dargestellt. Die weitgehend konstanten Laufzeitanteile aus der Übertragungsstrecke (Laufzeit der Bodenwelle 0,91 ms über die Strecke 273 km vom Sendeort nach Braunschweig) sowie im Empfänger (Laufzeit ca. 1 ms wegen des schmalbandigen Filters) sind mit den Laufzeit-Konstanten  $K_A$  und  $K_P$  berücksichtigt, die durch den erwähnten Vergleich mit einer transportablen Atomuhr ermittelt werden. Die in der PTB kontinuierlich durchgeführten Zeitdifferenzmessungen werden dazu genutzt, den Stand der vom Sender abgestrahlten Sekundenmarken sowie die Phasenzeit des ausgesendeten Trägers zu kontrollieren und ggf. nachzuregulieren. 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 den Caesiumuhren und den Steuergeräten abgefragt werden. Verschiedene Fehlerquellen können so identifiziert und Störungsursachen in den Steuereinrichtungen ermittelt werden.

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

## 7 Ausbreitung des DCF77-Signals

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

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

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

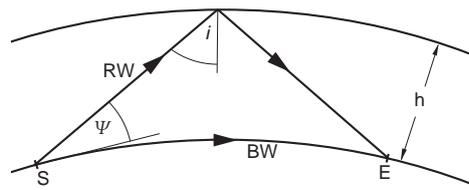
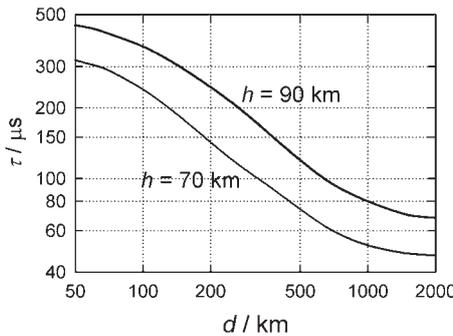


Bild 13: Laufzeitunterschiede  $\tau$  zwischen Boden- und Raumwelle für zwei verschiedene Höhen  $h$  der ionosphärischen D-Schicht als Funktion der Entfernung  $d$  vom Sender [26].



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

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

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

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

Wesentlich schwieriger ist die Ermittlung eines Erwartungswertes für die Feldstärke der Raumwelle. Unter der Annahme unendlich gut leitenden Bodens am Sendeort wird in Abhängig-

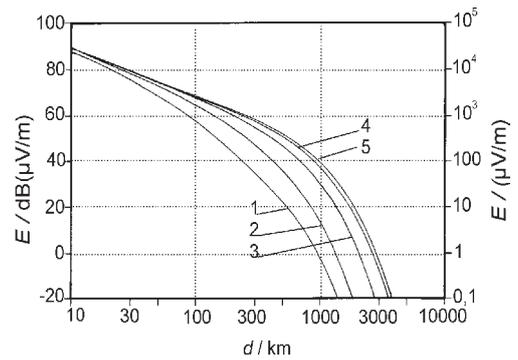


Bild 14: Abhängigkeit der Feldstärke  $E$  der Bodenwelle vom Abstand  $d$  vom Sender und der Bodenleitfähigkeit  $\sigma$  (Kurven 1 – 5), kombiniert aus den Bildern 1 – 11 in [25] und wie dort angegeben bezeichnet. Unter der Annahme einer abgestrahlten Leistung von 1 kW beträgt die Feldstärke bei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

keit vom Elevationswinkel  $\psi$  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.

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

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

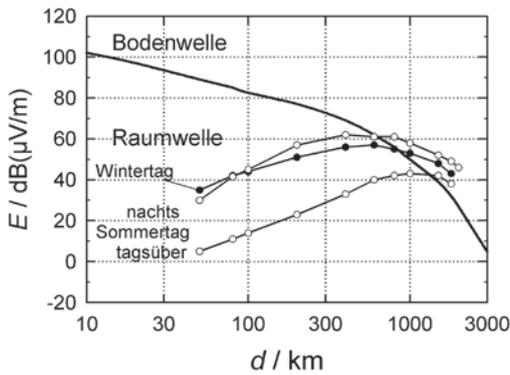


Bild 15: Feldstärken der Boden- und Raumwelle als Funktion der Entfernung  $d$  vom Sendeort, berechnet nach [25, 26] unter der Annahme einer mit DCF77 abgestrahlten Leistung von 30 kW. Für die Bodenleitfähigkeit wurden  $3 \cdot 10^{-3}$  S/m angenommen, es wird zwischen Ausbreitung im Sommer (offene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

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

## 8 Empfang des DCF77-Signals

### 8.1 Rechtliche Aspekte

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

- Schutz der Gesundheit und Sicherheit des Benutzers und anderer Personen,
  - Schutzanforderungen in Bezug auf die elektromagnetische Verträglichkeit
- sind von den Geräten zu erfüllen.

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

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

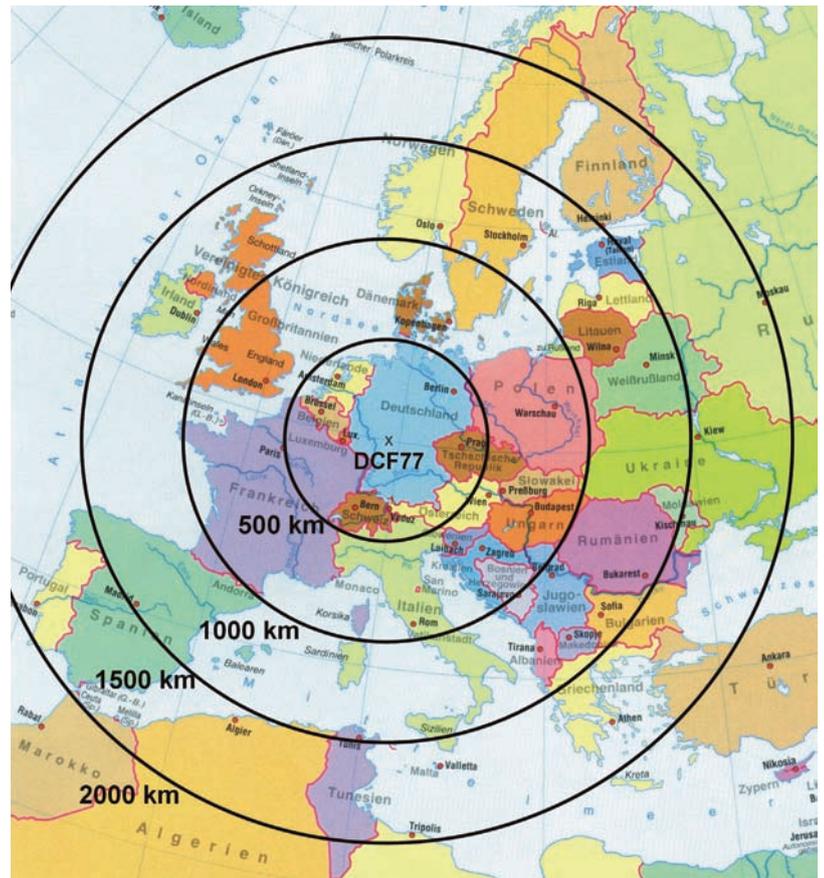


Bild 16: Schematische Darstellung der Reichweite der DCF77-Aussendung.

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

### 8.2 Zeitliche Verfügbarkeit der Aussendung

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

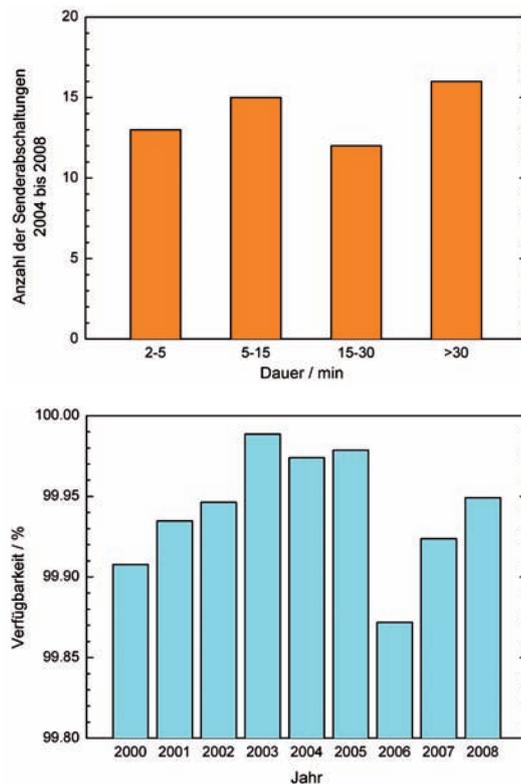


Bild 17:  
Oben:  
Häufigkeitsverteilung  
der Unterbrechungen  
von DCF77-Aussendung  
bestimmter Dauer in den  
Jahren 2004 bis 2008;

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

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

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

Maßnahmen zur Störungsbeseitigung einleiten können. Funkuhren, bei denen es auf hohe Sicherheit ankommt, sollten daher mit einer Gangreserve über mehrere Stunden in Form eines hochwertigen Quarzoszillators ausgestattet sein.

### 8.3 Eigenschaften der empfangenen Signale

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

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

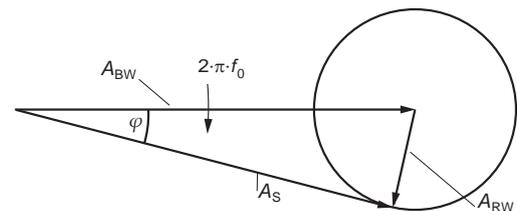


Bild 18:  
Zeigerdiagramm zur Veranschaulichung der vektoriellen Überlagerung von Boden- und Raumwelle am Empfangsort;

$A_{BW}$ ,  $A_{RW}$ ,  $A_S$ : Amplituden der Boden- und Raumwelle und des resultierenden Summensignals,  
 $\varphi$ : Resultierende Phasenwinkelverschiebung des Summensignals gegenüber der Bodenwelle. Im Kreisdiagramm rotieren alle Vektoren mit der Winkelgeschwindigkeit  $2 \cdot \pi \cdot f_0$ , wobei  $f_0$  die Trägerfrequenz ist und  $\varphi$  bei stationären Verhältnissen konstant bleibt.

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

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

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

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

### 8.3.1 Empfang der Normalfrequenz

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

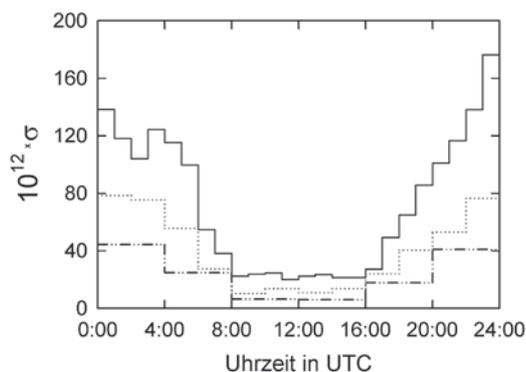


Bild 19: Standardabweichung  $\sigma$  der relativen Abweichung der in Braunschweig empfangenen DCF77-Trägerfrequenz vom Sollwert als Funktion der Tageszeit und der Mittelungszeit  $T$  (durchgezogen:  $T = 1$  h, gepunktet:  $T = 2$  h, strichpunktiert:  $T = 4$  h), basierend auf 50 Tagen im Spätsommer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

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

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

Von der Industrie werden DCF77-Normalfrequenzempfänger zum automatischen Nachregeln von Quarz- und Atomfrequenznormalen angeboten. In solchen Frequenzreglern wird das Ausgangssignal des nachzuregelnden 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 Temperaturkontrollierten Quarzoszillatoren oder Atomfrequenznormalen, können so große Regelzeitkonstanten gewählt werden, dass die ausbreitungsbedingten Phasenzeitschwankungen weitgehend ausgemit-

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

### 8.3.2 Empfang der amplitudenmodulierten Zeitsignale

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

Um geringere Unsicherheiten zu erreichen, muss mit steileren Flanken, d. h. größerer Bandbreite, aber auch zugleich größerer Störanfälligkeit gearbeitet werden. Geeignete Demodulations- und Mittelungsverfahren, um Störungen zu begegnen, sind z. B. die Synchrondemodulation, die Quadraturabtastung [28], Schrittregelung mit Einheitsschritten [29] (verwendet z. B. für

die in Bild 11a dargestellten Messwerte) oder die trägersynchrone, digitale Zeitsignalmittelung durch Abtasten der Amplituden der Trägerschwingung im Bereich der Flanke. Bei Anwendung dieser Techniken sind in der Praxis bei Entfernungen, in denen die Bodenwelle deutlich überwiegt, Unsicherheiten von 50  $\mu$ s bis 100  $\mu$ s erreicht worden. Verschiedene Beiträge in den Tagungsbänden der Funkuhrentagungen [6] befassen sich mit der Thematik. In [3] wird auf Empfangsstörungen beim Tragen von Funkarmbanduhren eingegangen.

## 9 DCF77-Funkuhren

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

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

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

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

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

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

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

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

## 10 Zeit- und Normalfrequenzdienste auf Langwelle

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

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

## 11 Schlussbetrachtung

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

Mit Hilfe der Trägerfrequenz von DCF77 werden Normalfrequenzgeneratoren kalibriert oder automatisch nachgeregelt. Im Verkehrswesen, z. B. bei Bahn und Flugsicherung, spielt DCF77 eine wichtige Rolle. Parkscheinautomaten und Ampelanlagen werden von DCF77 synchronisiert. In immer mehr Gebäuden werden Heizungs- und Lüftungsanlagen von DCF77 gesteuert und Rollläden von DCF77 geschlossen oder geöffnet. In der Telekommunikation und der Energiewirtschaft sind DCF77-Funkuhren eingesetzt, um zeitabhängige Tarife richtig abrechnen zu können. Zahlreiche NTP-Server

speisen die von DCF77 empfangene Zeit in Rechnernetze ein. Alle Rundfunk- und Fernsehanstalten erhalten die genaue Zeit von DCF77. Diese Anwendungsbeispiele sollen genügen. Sie machen deutlich, welche beachtliche Entwicklung in den vergangenen 50 Jahren auch bei der „alten“ Technik wie der Zeitverbreitung auf Langwelle erfolgt ist. Und in immer noch zunehmenden Maße werden Funkuhren eingesetzt. Über die richtige Zeit zu verfügen, ohne die Uhr stellen zu müssen, wird eben sehr geschätzt. Der Erfolg der Funkuhr hat insbesondere auch etwas mit den Eigenschaften der Langwelle zu tun. Gegenüber Zeitsignalen von Satelliten haben Langwellensignale einen entscheidenden Vorteil: Sie dringen in Gebäude ein und ihr Empfang wird durch Hindernisse wie Bäume oder Hochhausbebauung nicht nennenswert beeinträchtigt. Man kann sie ohne Außenantenne mit in Funkuhren eingebauten kleinen Ferritantennen empfangen. Aufgrund dieser Eigenschaft der Langwelle können preiswerte, kompakte, mit Batterie oder Solarzellen betriebene Funkuhren ohne Kabelanschluß an eine externe Antenne gebaut und betrieben werden. Demgegenüber erfordert der zuverlässige Empfang von Signalen des Navigationssystems GPS und in Zukunft des europäischen Pendants Galileo eine Antenne mit möglichst freier Sicht zum Himmel. Kann diese

Tabelle 1.

Langwellenstationen, die Normalfrequenz und kodierte Zeitinformation übertragen (Stand Oktober 2008 [35]).

Der jeweils verwendete Zeitcode ist unter der im Text Kapitel 9 angegebenen ITU Internet-Adresse oder den Betreibern zu finden.

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

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

## Literatur

- [1] D. Piester, P. Hetzel, A. Bauch: Zeit- und Normalfrequenzverbreitung mit DCF77, PTB-Mitteilungen **114**, (2004), S. 345–368
- [2] J. Graf: Wilhelm Foerster, Vater der Zeitverteilung im Deutschen Kaiserreich, in diesem Heft
- [3] K. Katzmann: Die Technik der Funkuhren, in diesem Heft
- [4] P. Hetzel: Zeitinformation und Normalfrequenz, telekom praxis **70**, (1993), S. 25–36
- [5] P. Hetzel: Der Langwellensender DCF77 auf 77,5 kHz: 40 Jahre Zeitsignale und Normalfrequenz, 25 Jahre kodierte Zeitinformation, PTB-Mitteilungen **109**, (1999), S. 11–18
- [6] W. Hilberg, Hrsg.:
  - a) *Funkuhren*, Oldenbourg Verlag GmbH, München, 1983, ISBN 3-486-27341-8;
  - b) *Funkuhrtechnik*, Oldenbourg Verlag GmbH, München, 1988, ISBN 3-486-20623-0;
  - c) *Funkuhren, Zeitsignale, Normalfrequenzen*, Verlag für Sprache und Technik, Groß-Bieberau, 1993, ISBN 3-928161-02-04
- [7] G. Becker: Die Sekunde, PTB-Mitteilungen **85**, (1975), S. 14–28
- [8] H. Enslin: Die Entwicklung der Bürgerlichen Zeit seit 1800. Alte Uhren und moderne Zeitmessung **1**, (1988), S. 60–75 und Seewart **44**, (1983), S. 264–280
- [9] T. Jones: Splitting the Second: The Story of Atomic Time, Bristol, IOP Publishing 2000
- [10] R. A. Nelson, D. D. McCarthy, S. Malys, J. Levine, B. Guinot, H. F. Fliegel, R. L. Beard, T. R. Bartholomew: The leap second: its history and possible future, Metrologia **38**, (2001), S. 509–529
- [11] J. Levine: Introduction to time and frequency metrology, Rev. Scientific Instr. **70**, (1999), S. 2567–2596
- [12] B. Siebert: Das Internationale Einheitensystem SI. PTB-Mitteilungen **117**, (2007), S. 145–182
- [13] A. Bauch, T. Heindorff: Zeit – Die SI-Basiseinheit Sekunde, PTB-Mitteilungen **112**, (2002), S. 291–298
- [14] A. Bauch: The PTB clocks CS1 and CS2, Metrologia **42**, (2005), S. S43–S54
- [15] R. Wynands, S. Weyers: Atomic fountain clocks, Metrologia **42**, (2005), S. S64–S79
- [16] A. Bauch: Caesium atomic clocks: function, performance and applications, Meas. Sci. Technol. **14**, (2003), S. 1159–1173
- [17] J. Levine: Time and frequency distribution using satellites, Rep. Prog. Phys. **65**, (2002), S. 1119–1164
- [18] Radio Regulations, Article 19, „Identification of stations“, ITU Radiocommunication Bureau, Geneva 2001
- [19] W. Markowitz, R. G. Hall, L. Essen, J. V. L. Parry: Frequency of cesium in terms of ephemeris time, Phys. Rev. Lett. **1**, (1958), S. 105–107
- [20] P. Forman: Atomichron: the atomic clock from concept to commercial product, Proc. IEEE **73**, (1984), S. 1181–1204
- [21] Natl. Inst. Stand. Technol. Spec. Publ. 250-67, 160 pages (January 2005), CODEN: NSPUE2
- [22] P. Hetzel: Zeitübertragung auf Langwelle durch amplitudenmodulierte Zeitsignale und pseudozufällige Umtastung der Trägerphase, Dissertation Universität Stuttgart, 1987
- [23] P. Hetzel: Time dissemination via the LF transmitter DCF77 using a pseudo-random phase-shift keying of the carrier, Proc. 2nd European Frequency and Time Forum, Neuchâtel, (1988), S. 351–64
- [24] Handbook „The ionosphere and its effects on radiowave propagation“, ITU, Radiocommunication Bureau, Geneva 1998
- [25] ITU-R Recommendation 368-6 „Ground Wave propagation curves for frequencies between 10 kHz and 30 MHz“, entnommen dem Band Recommendations des CCIR, 1990, Volume V, aktuelle Version siehe ITU Internet-Adresse in Kapitel 9
- [26] ITU-R Recommendation 684-3 „Prediction of field strength at frequencies below 150 kHz“, ITU, Geneva, 2002
- [27] www.bundesnetzagentur.de, Suchbegriffe FTEG und TKEE
- [28] Ref 6b, S. 29–59 und S. 107–124
- [29] G. Becker: Schrittregelung für die Mittelung von Zeitsignalen, PTB-Mitteilungen **85**, (1975), S. 448–457
- [30] M. A. Lombardi: Radio Controlled Clocks, Proc. of the 2003 National Conference of Standards Laboratories NCSL, auf CD-ROM
- [31] Sir H. Grubb: Proposal for the Utilization of the ‚Marconi‘ System of Wireless Telegraphy for the Control of Public and Other Clocks, Scientific Proceedings of the Royal Dublin Society, vol. X, part I(7), 1899, S. 121, zitiert in [30]
- [32] W. Hilberg: Drahtlos gesteuerte Uhren mit Normalzeit-Ziffernanzeige, Elektronik ,

16. Jahrg., Heft 11 (Nov. 1967) S. 325–328 und Heft 12 (Dez. 1967), S. 377–380
- [33] *W. Hilberg, K. Buck*: Eine integrierte digitale Empfängerschaltung für ein drahtloses elektronisches Zeitverteilungssystem, Nachrichtentechnische Zeitschrift (NTZ) 1971, Heft 11, S. 572–577
- [34] *P. Hetzel, L. Rohbeck*: Digitale Anzeige der vom Sender DCF77 verbreiteten Amtlichen Zeit, Funkschau 46, 1974, S. 727–730
- [35] Ref. [18], Section IV
- [36] [www.itu.int/ITU-R/index.asp?category=study-groups&rlink=rsg7&lang=en](http://www.itu.int/ITU-R/index.asp?category=study-groups&rlink=rsg7&lang=en), Related Information „TF583“ bzw. „TF768“
- [37] *C. Schlunegger*: Facelifting am Langwellensender HBG in Prangins, METinfo 15, (2008), S. 22–23
- [38] *Y. Wang*: Recent progress on time and frequency in NTSC, Proc. 2002ATF, publ. 2003, S. 30–33
- [39] *M. A. Lombardi*: NIST Time and Frequency Services“, NIST Spec. Publ. 432, 2002 Edition

## Anhang 1

— 93 —

# Reichs-Gesetzblatt.

---

N<sup>o</sup> 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 Insigne.

Gegeben Berlin Schloß, den 12. März 1893.

(L. S.)                      Wilhelm.  
Graf von Caprivi.

---

Herausgegeben im Reichsamt des Innern.  
Berlin, gedruckt in der Reichsdruckerei.

Reichs-Gesetzbl. 1893. 16

Ausgegeben zu Berlin den 16. März 1893.

## Anhang 2

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

Darin heißt es (in Auszügen):

### § 1 Anwendungsbereich

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

### § 4 Gesetzliche Zeit

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

### § 5 Ermächtigung zur Einführung der mitteleuropäischen Sommerzeit

- (1) Das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie wird ermächtigt, zur besseren

Ausnutzung der Tageshelligkeit und zur Angleichung der Zeitzählung an diejenige benachbarter Staaten durch Rechtsverordnung, die nicht der Zustimmung des Bundesrates bedarf, für einen Zeitraum zwischen dem 1. März und dem 31. Oktober die mitteleuropäische Sommerzeit einzuführen.

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

### § 6 Physikalisch-Technische Bundesanstalt

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

## Anhang 3

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

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

#### § 1

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

#### § 2

(1) Die mitteleuropäische Sommerzeit beginnt jeweils am letzten Sonntag im März um 2 Uhr mitteleuropäischer Zeit. Im Zeitpunkt des Beginns der Sommerzeit wird die Stunden-zählung 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 Stunden-zählung 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.

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

## Anhang 4

### Bekanntmachung gemäß § 3 der Sommerzeitverordnung

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

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

Berlin, März 2009

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie

# Die Technik der Funkuhren

Klaus Katzmann<sup>1</sup>

## 1 Einleitung

In diesem Beitrag sollen praktische Aspekte bei der Entwicklung und dem Gebrauch von Funkuhren dargestellt werden, die für den Empfang des Zeitzeichensenders DCF77 auf 77,5 kHz ausgelegt sind. Die prinzipiellen Aussagen gelten jedoch auch für Empfänger anderer Zeitdienste auf Langwelle. Die Eigenschaften und Signalinhalte des DCF77-Sendeprogramms werden in [1] dargestellt und daher hier nicht wiederholt. Der Beitrag analysiert die Hauptkomponenten einer Funkuhr aus der Sicht eines Elektronikentwicklers am Beispiel einer Armbanduhr des Typs „Kaliber 24“, wie sie derzeit von der Firma Gardé Uhren und Feinmechanik in Ruhla produziert wird. Die Elektronik dieser Uhr wurde durch die HKW-Elektronik GmbH entwickelt, wobei der Verfasser speziell für die Software des Mikrocontrollers verantwortlich war.

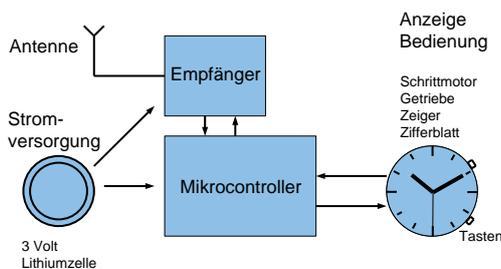


Bild 1:  
Systemaufbau einer Funkuhr, hier als Analoguhr in Minimalkonfiguration.

## 2 Systemaufbau einer Funkuhr

Das Bild 1 zeigt Funktionsblöcke einer Funkuhr, die so oder in ähnlicher Form bei allen autonomen Funkuhren zu finden sind.

Im Wesentlichen sind das Stromversorgung, Antenne, Empfänger, Mikrocontroller und eine Einrichtung zur Anzeige der Zeit, also hier Schrittmotor, Getriebe, Zeiger und Zifferblatt. Bild 2 zeigt die Elektronikleiterplatte der Funkarmbanduhr „Kaliber 24“. Die integrierten Schaltkreise, der Mikrocontroller und der Empfänger-IC sind direkt als Chip auf die

Leiterplatte geklebt und mit Bonddrähten kontaktiert. Zur Stabilisierung dient eine schwarze Vergussmasse. Diese Technik heißt „Chip-On-Board“-Technik. Am Rand der Leiterplatte befindet sich eine Kontaktfläche für eine von außen zu betätigende Taste. Die Hauptfunktion dieser Taste stellt gleichzeitig auch eine Besonderheit der Uhr dar. Über einen kurzen Tastendruck kann mit Hilfe des Sekundenzeigers das Datum dargestellt werden. Das geschieht in der Weise, dass der Sekundenzeiger sehr schnell vorwärts auf die dem Datum entsprechende Sekundenposition läuft. Nun verharrt der Sekundenzeiger einige Sekunden in dieser Position, und wenn die angezeigte Zeit wieder mit der Uhrzeit übereinstimmt, läuft er normal weiter [9]. Der Nutzen dieser Funktion besteht darin, dass bei einfachstem Systemaufbau trotzdem die Funktion der Datumsanzeige realisiert werden konnte.

Im Bild 3 sind Elektronik und Mechanik zum einbaufertigen Modul montiert.



Bild 2:  
Elektronikleiterplatte mit angelöteter Antenne.



Bild 3:  
Modul einer Funkarmbanduhr. Die elektronischen und mechanischen Komponenten sind in einem Kunststoffträger zu einem Modul zusammengebaut. Für einige Elektronikteile mit größerer Bauhöhe (Elektrolytkondensatoren) sind Durchbrüche notwendig, um Auswirkungen auf die Gesamtbauhöhe zu vermeiden. Links von der Mitte ist die Spule des Schrittmotors zu erkennen.

<sup>1</sup> Klaus Katzmann,  
HKW-Elektronik GmbH  
E-Mail:  
kkatzmann@  
hkw-elektronik.de

### 3 Die Antenne

#### 3.1 Die Abstrahlung vom Sender

Um eine technisch begründete Auslegung der Empfangsantenne einer Funkuhr abzuleiten, muss man zuerst die Art und Weise betrachten, wie die elektromagnetische Welle vom Sender erzeugt und abgestrahlt wird. Die DCF77-Sendeantenne auf der Sendefunkstelle Mainflingen ist als Vertikalstrahler mit Dachkapazität in T-Form aufgebaut (siehe Bild 7 in [1]) und ist in Bild 4 skizziert. Im Hauptelement dieser Antenne fließt der Strom senkrecht. Damit bilden sich magnetische Feldlinien als waagerechte Kreise um die Antenne aus [2]. Das elektrische Feld verläuft senkrecht. Die elektromagnetischen Wellen, die von der Antenne ausgehen, sind nun ein ständiges Wechselspiel von magnetischen und elektrischen Feldern, die sich abwechseln und immer wieder ihre Richtung umkehren.

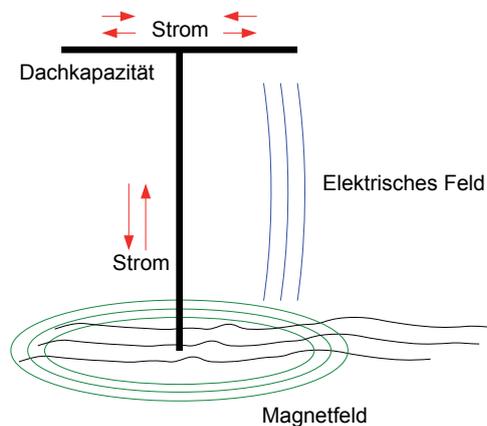


Bild 4:  
Prinzipieller Aufbau der DCF77-Sendeantenne [1]. Die Dachkapazität trägt selbst kaum zur Abstrahlung bei. Durch sie erhöht sich aber der Strom im vertikalen Teil der Antennenstruktur, was zu einer stärkeren Ausprägung des Magnetfelds führt.

Mit der hier gezeigten Orientierung der Feldlinien kommen die vom Sender erzeugten elektromagnetischen Wellen beim Anwender der Funkuhr an. Mit Blick zum Sender hat er vor sich waagrecht die magnetischen und senkrecht die elektrischen Feldlinien.

Man nennt eine derartige elektromagnetische Welle vertikal polarisiert [2].

#### 3.2 Anforderungen an die Empfangsantenne

In [10] werden unterschiedliche Antennenarten zur Aufnahme des DCF77-Signals angeführt. Als wenig praktikabel zum Einsatz in Funkuhren zeigen sich die sogenannten elektrischen Antennen. Diese nehmen vorzugsweise die elektrische Komponente der elektromagnetischen Welle auf. Sie sind wegen des hochohmigen und kapazitiven Verhaltens schwierig an eine Empfangsschaltung anzupassen und nehmen neben dem Nutzsignal auch elektrische Störfelder aus der häuslichen Umgebung auf [10].

Magnetische Antennen dagegen nehmen vorzugsweise die magnetische Komponente der elektromagnetischen Welle auf. Die einfachste

Form ist eine sogenannte Rahmenantenne, eine kurze offene Luftspule größeren Durchmessers, wie sie in Bild 5 skizziert ist. Nach [10] kann man an den Enden der Luftspule eine Spannung  $U_R$  entnehmen:

$$U_R = \frac{2\pi \cdot n \cdot A \cdot f}{c} \cdot |E| \quad (1)$$

Dabei ist  $n$  die Windungszahl der Spule,  $A$  die durch die Spule aufgespannte Fläche,  $f$  die Empfangsfrequenz,  $c$  die Lichtgeschwindigkeit und  $|E|$  der Betrag der äquivalenten elektrischen Feldstärke. Für eine ringförmige Antenne mit 10 cm Durchmesser und 20 Windungen erhielte man bei einer Feldstärke von  $100 \mu\text{V/m}$  (Abstand zum Sender ca. 1500 km) eine Spannung von etwa 25 nV. Diese Spannung wäre mit Sicherheit zur weiteren Verarbeitung zu klein. Gebräuchliche Empfänger benötigen etwa 20-fach höhere Eingangsspannungen. Der durch die HKW-Elektronik GmbH entwickelte Empfänger-IC UE6015 [6] benötigt beispielsweise eine minimale Eingangsspannung von 500 nV. Zwar stünde die Spannung der Rahmenantenne mit geringer Impedanz zur Verfügung und könnte hochtransformiert werden, doch steht dem der Aufwand eines zusätzlichen induktiven Bauelements entgegen.

Neben der Tatsache, dass die hier gerechnete Antenne zu groß ist, existiert noch der Nachteil der fehlenden Selektivität, wenn man von der Eigenresonanz absieht [10]. Da sich gebräuchliche Empfänger-ICs für Funkuhren wegen ihrer kleinen Betriebsspannung, ihrer kleinen Stromaufnahme [6] und damit zwangsweise auch kleinen Betriebsströmen im Vorverstärker nicht unbedingt durch Großsignal- und Störfestigkeit auszeichnen, sind selektive Antennen, die vor-

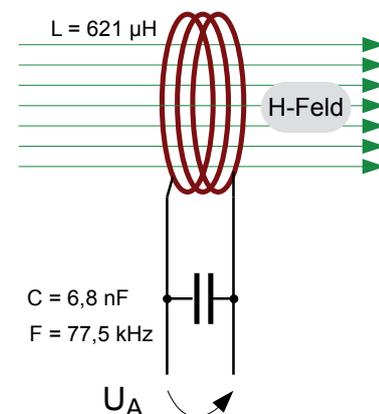


Bild 5:  
Schematischer Aufbau einer Rahmenantenne. Die Dimensionierung ist ein praktikables Beispiel. Um die angegebene Induktivität zu erreichen, benötigt man bei einem Drahtdurchmesser von 0,3 mm und einem Spulendurchmesser von 10 cm ca. 47 Windungen. Zur optimalen Ausrichtung muss eine Schmalseite zum Sender zeigen.

zugswise nur das Nutzsignal passieren lassen, von entscheidendem Vorteil.

Die Rahmenantenne kann man sehr einfach zu einer selektiven Antenne modifizieren, indem sie mit einem Kondensator zu einem Schwingkreis erweitert wird. Damit beseitigt man – abgesehen von der Größe – die oben dargestellten Nachteile. Auf der Resonanzfrequenz ergibt sich dann eine Spannungserhöhung um den Gütefaktor des Schwingkreises. Gütefaktoren größer als 100 sind problemlos zu erreichen, so dass man dann unter den oben genannten Bedingungen eine Spannung von  $2,5 \mu\text{V}$  erhält, die mit Sicherheit ausreichend ist. In [10] sind einige Berechnungen zu Rahmenantennen aufgeführt.

### 3.3 Die Ferritantenne

Die Ferritantenne ist im Prinzip eine abgewandelte Rahmenantenne, bei der im Innern der Spule ein Kern aus Ferritmaterial angeordnet ist. Mit diesem Kern sorgt man dafür, dass möglichst viele Feldlinien, was gleichbedeutend mit einem großen Anteil des Magnetflusses aus der Umgebung ist, durch die Antenne hindurch gehen, wie Bild 6 zeigt. Das kommt daher, dass sich der Magnetfluss den Weg des geringsten magnetischen Widerstandes sucht. Hierfür ist die bestimmende Materialkenngröße des Ferritmaterials die relative Permeabilität  $\mu_r$ . Beispiele sind in [3] zu finden, wobei ein für Funkuhrenantennen taugliches Material unter anderem auch das Material „F08“ ist. Nach [4] benötigt eine Ferritantenne bei gleicher Leistung nur noch etwa 1/20 des Raumbedarfs einer Rahmenantenne.

Das Bild 7 zeigt zwei gebräuchliche Bauformen. Mit der großen Antenne sind Empfindlichkeiten einer Funkuhr von etwa  $30 \text{ dB}\mu\text{V/m}$  und besser zu erreichen. Mit der kleinen Antenne zum Einbau in eine Armbanduhr erreicht man etwa  $44 \text{ dB}\mu\text{V/m}$ . Technische Daten sind beispielhaft in [5] zu finden.

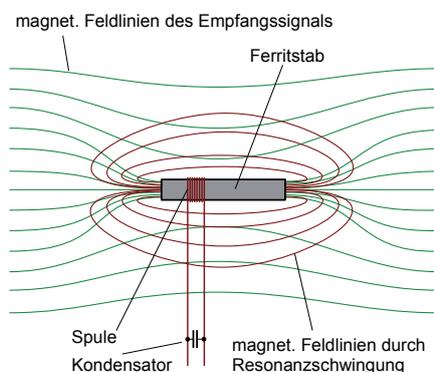


Bild 6: Die Ferritantenne im Empfangsfeld. Innerhalb eines Bereiches um die Antenne, durch die roten Feldlinien angedeutet, sollten sich keine großen Metallteile befinden. Sonst entstünde eine Bedämpfung durch Wirbelströme.



Bild 7: Oben: Ferritantenne für Großuhren, 10 mm x 60 mm. Unten: Ferritantenne für Armbanduhren, 3,5 mm x 17 mm. Die kleine Antenne für Armbanduhren wird erst bei Anschluss an die Leiterplatte zu einer funktionsfähigen Antenne, da sich dort der zugehörige Schwingkreiskondensator befindet. Der Ferritstab ist an den Enden angeschrägt, um sich besser ins Gehäuse einzupassen.

Im Bild 6 sind neben den grünen Feldlinien des Empfangsfeldes auch rote Feldlinien angedeutet, die von der Antenne ausgehen. Das soll zeigen, dass die Antenne in einer durch das Empfangssignal angeregten Resonanzschwingung ist. Nun sollte man möglichst vermeiden, in diesen Bereich hinein größere Metallteile zu konstruieren, denn dort würden Wirbelströme induziert werden, die zu Verlusten durch Umwandlung in Wärme führten. Die Antenne gäbe durch eine derartige Bedämpfung eine geringere Ausgangsspannung ab. In der Praxis sind aber Kompromisse einzugehen, da jede Funkuhr einige Metallteile enthält, als Beispiel sei nur die Batterie zur Energieversorgung genannt.

Ferritantennen verlangen nach einem Frequenzabgleich, weil wegen der Fertigungstoleranzen ihre Resonanzfrequenzen zu stark streuen. Wenn  $C$  die Kapazität des Antennenkondensators ist und  $L$  die Induktivität des Ferritstabes mit Spule, dann ergibt sich die Resonanzfrequenz  $f$  zu

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}} \tag{2}$$

Die Antennengütefaktor  $Q$  ist das Verhältnis von Resonanzfrequenz  $f$  zur Bandbreite  $B$ :

$$Q = \frac{f}{B} \tag{3}$$

In [5] werden Gütefaktoren besser als 100 genannt. Daraus resultiert eine Bandbreite  $B$  von 775 Hz (DCF77-Antenne). Die Verstimmung der Antennenresonanzfrequenz um die halbe Bandbreite ergibt bereits eine Dämpfung um 3 dB. Möchte man also in einem Korridor von 3 dB bleiben, dann muss die Resonanzfrequenz der Antenne auf knapp 400 Hz genau stimmen. Um das zu erreichen, müsste in (2) das Produkt aus  $L$  und  $C$  etwa 1 % genau sein.

Das Hauptproblem ist weniger die Toleranz des Kondensators, eng tolerierte Kondensatoren sind relativ gut beschaffbar. Eine Abweichung der Kapazität von 1 % würde in (2) zu einem Frequenzfehler von 0,5 % führen. Jedoch bleibt dann keine zulässige Toleranz für die Induktivität übrig, und die ist das eigentliche Problem, denn die relative Permeabilität des Ferritmaterials kann gemäß Herstellerangaben [3] um etwa 25 % streuen. Diese Streuung wirkt sich proportional auf die Induktivität aus.

Zum Abgleich der Resonanzfrequenz ist entweder die Kapazität des Kondensators oder die Induktivität des Antennenstabes zu verändern. Zu beiden Varianten gibt es unterschiedliche Möglichkeiten, wobei jeweils eine in den folgenden Ausführungen erläutert wird.

Der Kapazitätsabgleich ist günstig mit einem Zusatzkondensator zu bewerkstelligen, den man vor dem Einbau messtechnisch bestimmen muss. Hierzu kann beispielsweise ein Antennenabgleichgerät dienen, das die Resonanzfrequenz misst und die erforderliche Größe des Zusatzkondensators auf rechnerischem Weg bestimmt [14]. Im Arbeitsablauf wird zunächst die Resonanzfrequenz der Antenne ohne Zusatzkondensator bestimmt. Bei hinreichend eng toleriertem Hauptkondensator lässt sich so die Induktivität des Antennenstabes ermitteln. Sind nun Ist-Resonanzfrequenz, Hauptkondensator und Induktivität bekannt, ermittelt der Rechner im Antennenabgleichgerät denjenigen Zusatzkondensator, der zum Erreichen der Soll-Resonanzfrequenz nötig wäre. Nach Auflöten dieses Kondensators erfolgt abschließend noch eine Kontrollmessung.



Bild 8: Unterseite der Leiterplatte. Der Abgleichkondensator neben der Antenne ist auch nach dem Zusammenbau des Moduls zugänglich. Weiterhin sind auf der Unterseite der 32768-Hz-Oszillatorquarz und der 77500-Hz-Filterquarz angeordnet.

Beim Induktivitätsabgleich erreicht man die Veränderung der Induktivität beispielsweise durch einfaches Verschieben der Spule. Die mechanische Fixierung kann durch Kleben erfolgen, wobei der Klebstoff schnell aushärten muss und das Spulenmaterial, Kupferlackdraht, dauerhaft nicht angreifen darf. Eine Bedingung für dieses Verfahren ist natürlich, dass die Spule in ihrer Geometrie wesentlich kürzer als der Ferritstab ist. Diese Bedingung ist bei der oben gezeigten Antenne für Armbanduhren nicht gegeben, weshalb für diese Antenne von den gezeigten zwei Möglichkeiten nur der Abgleich durch Zusatzkapazitäten in Frage kommt.

#### 4 Der Empfänger

Im Bild 9 ist die Grundstruktur eines Empfängers für Funkuhren dargestellt, wie sie den meisten derzeit angebotenen Empfängern gemeinsam ist, als Beispiel sei der IC UE6015 [6] angeführt, eine Eigenentwicklung der HKW-Elektronik GmbH. Dieser IC arbeitet nach dem

Prinzip eines sogenannten Geradeausempfängers. Dessen kennzeichnendes Merkmal ist, dass keine Frequenzumsetzung stattfindet. Fast die gesamte Empfängerschaltung, mit Ausnahme des Quarzfilters und einiger Kondensatoren, befindet sich auf einem Chip.

Die Gesamtverstärkung ist auf zwei Verstärker aufgeteilt, den regelbaren Vorverstärker und den Nachverstärker. Diese Aufteilung ist geboten, um innerhalb des Signalweges Rauschanteile aus dem Signal vor der weiteren Verstärkung abzutrennen. Andernfalls würden diese ja mit verstärkt und vielleicht zur Übersteuerung führen, wenn sie größer als das Nutzsignal sind. Es geht hierbei nicht nur um das über die Antenne aufgenommene Rauschen, sondern auch um das Rauschen, das im Vorverstärker entsteht.

Die beiden Oszillogramme im Bild 9 stellen die Wirkung des Quarzfilters dar. Vor dem Quarzfilter ist das Rauschen gut zu erkennen, die Flanken der Amplitudenmodulation sind noch scharf. Hinter dem Quarzfilter ist das Rauschen stark reduziert, und die Flanken sind verschliffen. Auf die Konsequenzen der Flankensteilheit wird später noch eingegangen, wenn es um die Genauigkeit geht.

Das verstärkte und gefilterte Signal gelangt zum Demodulator, der daraus die Hüllkurve erzeugt. Der im Demodulator angedeutete Kondensator ist bei gebräuchlichen Empfängern in der Regel als peripheres Bauelement angelegt und damit von außen zugänglich. Die Spannung über diesem Kondensator entspricht der Hüllkurve des aufgenommenen HF-Signals. Wenn man diese Spannung mit einem Oszilloskop in langsamer Zeitablenkung (Rollmodus) beobachtet, hat man eine einfache Diagnosemöglichkeit, wenn es um die Aufklärung von Empfangsstörungen geht. Der Verfasser hat sich die Möglichkeit geschaffen, unter anderem auch diesen Spannungsverlauf mit einer einfachen Einrichtung aus A/D-Wandler, USB-Verbindung zum PC und dortiger Visualisierung des Signalverlaufs darzustellen. Wenn solche Signalverläufe in den folgenden Teilen dieses Beitrages gezeigt werden, dann sind sie mit dieser Einrichtung entstanden.

Der Mikrocontroller kann mit dem Spannungsverlauf der Hüllkurve über dem Demodulator-Kondensator noch nichts anfangen, weil die Spannungshöhe noch wesentlich zu klein ist. Deshalb befindet sich im Signalweg hinter dem Demodulator der Komparator, der aus der Hüllkurve digitale 0- und 1-Signale erzeugt, deren zeitlichen Verlauf dann der Mikrocontroller auszuwerten hat.

Die untere Funktionsgruppe im Bild 9 ist die automatische Verstärkungsregelung. Sie sorgt dafür, dass Demodulator und Komparator immer eine ähnlich hohe HF-Spannung

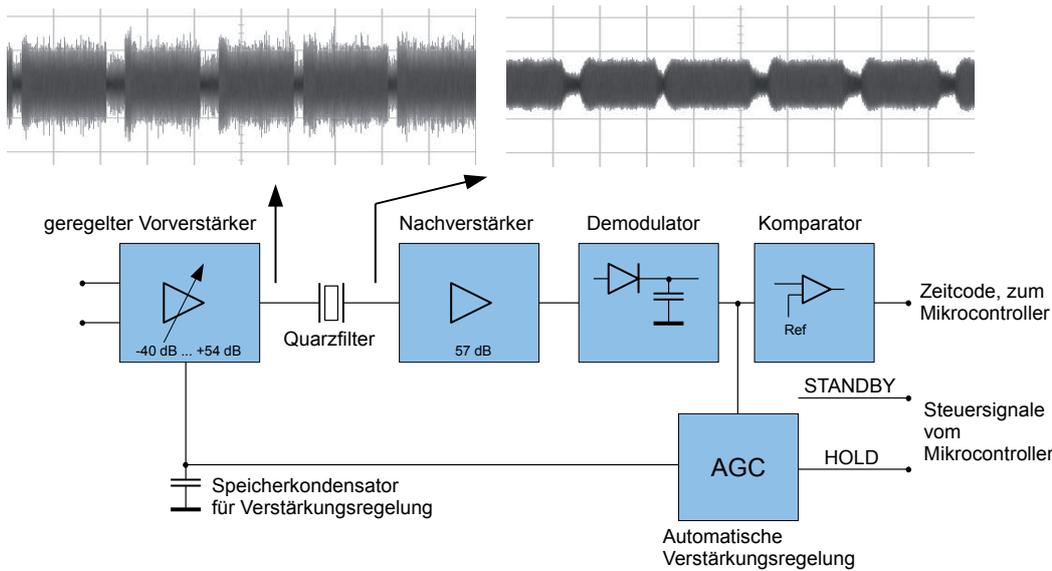


Bild 9: Vereinfachtes Blockschaltbild einer integrierten Empfängerschaltung für Funkuhren.

angeboten bekommen. Der Vorverstärker ist in der Lage, Änderungen der Signalamplitude am Eingang von 94 dB auszugleichen, das ist etwa ein Verhältnis von 1 : 50 000. Derartige Änderungen können unter anderem durch unterschiedliche Entfernung zum Sender [1] oder durch unterschiedliche Ausrichtung der Antenne relativ zum Sender entstehen. Weil aber die amplitudenmodulierte Zeitcodeinformation [1] ebenfalls Amplitudenänderungen im Signal verursacht, sind an die Verstärkungsregelung gewisse Anforderungen zu stellen. Einerseits darf die Regelung nicht so schnell arbeiten, dass die durch die Nutzinformation verursachte Amplitudenänderung schon ausgeglichen wird, andererseits soll jedoch auch ausreichend schnell nach dem Einschalten die Funktionsbereitschaft des Empfängers bestehen. In der Praxis hat es sich als günstig herausgestellt, wenn sich bei zu kleinem Signal die Verstärkung pro Sekunde um etwa 5 dB bis 10 dB erhöht. Die Verringerung der Verstärkung bei zu großem Signal, also beim Abregeln, ist in dieser Hinsicht unkritisch. Das Abregeln darf durchaus zehnmal schneller ablaufen als das Aufregeln.

Bild 10 zeigt die unterschiedlichen Regelgeschwindigkeiten anhand des Hüllkurvensignals über dem Kondensator am Demodulator, wie weiter oben schon beschrieben. Zuerst findet ein Sprung zu einem 15 dB stärkerem Signal statt, kaum erkennbar und in Sekundenbruchteilen ausgeglichen. Dann ein Sprung nach kleinerer Amplitude in gleicher Höhe, ebenfalls um 15 dB. Hier muss sich die Verstärkungsregelung viel Zeit lassen, um nicht schon in den regulären Impulsen zu stark einzugreifen.

Das unten im Bild 10 dargestellte Zeitcode-signal kann durch die Regelvorgänge gestört

werden, besonders während der langsamen Aufregelvorgänge. Weil dadurch unter Umständen der Empfang eines ganzen Zeitlegramms gefährdet ist, sollten die Empfangsbedingungen während eines Empfangsversuches möglichst konstant gehalten werden.

Besonders bei Armbanduhren hat die Möglichkeit des wahlweisen Empfangs mehrerer Zeitzeichendienste auf Langwelle [15] eine erhebliche Bedeutung erlangt. Da diese meist auf unterschiedlichen Frequenzen arbeiten, sind die frequenzbestimmenden Komponenten Ferritantenne und Quarzfilter mit entsprechenden Umschaltmöglichkeiten zu versehen. Der hier als Beispiel angeführte Empfänger-IC UE6015 von HKW-Elektronik [6] unterstützt dies durch die gleichzeitige Anschlussmöglichkeit von bis zu drei Filterquarzen und durch zwei FET-Schalter am Antenneneingang. Mit Hilfe dieser FET-Schalter können zwei weitere Kondensatoren zur Absenkung der Resonanzfrequenz unabhängig voneinander der Ferritantenne parallel

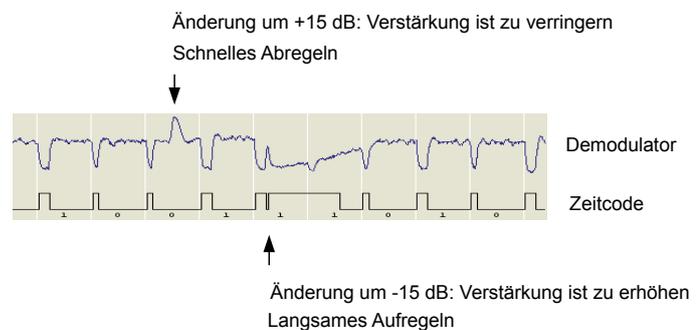


Bild 10: Verhalten der Verstärkungsregelung bei sprunghaften Amplitudenänderungen des Eingangssignals. Die Erhöhung der Verstärkung geht etwa zehnmal langsamer vonstatten als die Verringerung.

geschaltet werden. Der Frequenzabgleich muss für alle vorgesehenen Frequenzen separat, durch je einen Abgleichkondensator vorgenommen werden. Dabei ist der Einsatz einer speziell darauf abgestimmten Gerätetechnik sinnvoll. Die HKW-Elektronik GmbH hat hierzu ein Antennenabgleichgerät entwickelt, das in einem einzigen Arbeitsschritt die Werte aller notwendigen Abgleichkondensatoren bestimmt und das sich im Einsatz an verschiedenen Fertigungsstätten bereits bewährt hat [14].

## 5 Der Mikrocontroller

Der Mikrocontroller ist das zentrale Steuerelement in der Funkuhr. Er muss die Uhrzeit verwalten, auf Bedieneingaben reagieren, die Uhrzeit anzeigen und regelmäßig die Zeit mit dem Funksignal korrigieren. Oberstes Entscheidungskriterium für die Auswahl eines geeigneten Typs ist die Energieaufnahme. Als Beispiel für einen in einer Funkarmbanduhr verwendbaren Typ sei der Mikrocontroller in [8] angeführt, dessen Architektur in Bild 11 dargestellt ist. Die Stromaufnahme im Normalbetrieb beträgt nur 2,5 µA bis 5 µA bei einer Betriebsspannung von 3 Volt. Diese niedrigen Stromwerte werden vor allem durch eine geringe Systemtaktfrequenz des Prozessorkerns erreicht. Im Beispiel ist diese

Frequenz gleich der des Quarzoszillators, also 32 768 Hz. Auch der Quarzoszillator ist natürlich extrem energiearm ausgelegt.

Aber selbst die Stromaufnahme von 2,5 µA bis 5 µA allein durch den Mikrocontroller ist in einer Armbanduhr noch relativ hoch, wie im folgenden Abschnitt näher erläutert wird. Man muss zusätzlich von der Möglichkeit Gebrauch machen, den Prozessorkern vorübergehend stillzulegen. Das bedeutet, der Prozessor bleibt bei einem bestimmten Befehl, dem HALT-Befehl, stehen, die Peripherie arbeitet aber weiter. Die Stromaufnahme sinkt nun auf einen noch niedrigeren Wert von etwa 1 µA ab. Zur Peripherie des Mikrocontrollers gehören ein oder mehrere Timer. Mit Hilfe eines dieser Timer muss der Prozessor über eine Unterbrechungsanforderung (Interrupt) aus dem HALT-Zustand geweckt werden, um seine Aufgaben, wie das Weiterzählen der Uhrzeit und die Ansteuerung des Schrittmotors mit Impulsen zur Vorwärtsbewegung, wieder ausführen zu können. So muss der Mikrocontroller, solange kein Funkempfang stattfindet und keine Bedieneingabe vorliegt, nur zu den Sekundenwechseln kurz aktiv werden und kann die Zwischenzeit im HALT-Zustand verbringen. Die resultierende Stromaufnahme lässt sich sehr einfach berechnen. Wenn  $I_H$  die Stromaufnahme im HALT-Zustand,  $I_B$  der volle Betriebsstrom und  $V$  das Zeitverhältnis zwischen Betriebs- und HALT-Zustand sind, ergibt sich die resultierende Stromaufnahme  $I_{Ges}$  zu

$$I_{Ges} = I_H \cdot (1 - V) + I_B \cdot V \quad (4)$$

Für den realistischen Fall von  $V = 0,1$  und  $I_B = 2,5 \mu\text{A}$  ist  $I_{Ges} = 1,15 \mu\text{A}$ .

## 6 Die Energieversorgung

Als Energiequelle in Armbanduhren und auch in Funkarmbanduhren sind Lithium-Knopfzellen allgemein gebräuchlich. Die Systemspannung beträgt 3 Volt. Mit dieser relativ hohen Spannung ist die Technik auch gegen Ende der Lebensdauer, wenn die Spannung unter 2,5 Volt absinkt, noch nicht vor größere Probleme gestellt. Bei 2,5 Volt ist die Zelle zu mehr als 95 % entladen [11], und wenn dann die Funktion bei 2,4 Volt noch garantiert ist, kann die Zellenkapazität nahezu vollständig ausgenutzt werden.

Zur Absicherung der Funktion bei niedrigen Spannungen sind die Komponenten einzeln zu betrachten, hier wieder am Beispiel der Uhr „Kaliber 24“. Der Mikrocontroller ist bis herab zu 2,0 V funktionsfähig [8]. Der Empfänger funktioniert in der Beschaltung für ein 3-Volt-System ebenfalls bis herab zu 2,0 Volt [6]. Hinsichtlich der Funktionssicherheit des Schrittmotors wurde das Verhalten des Drehmomentes im Betriebsspannungsbereich untersucht. Als Ergebnis sinkt das Drehmoment bei 2,2 Volt etwa auf die Hälfte

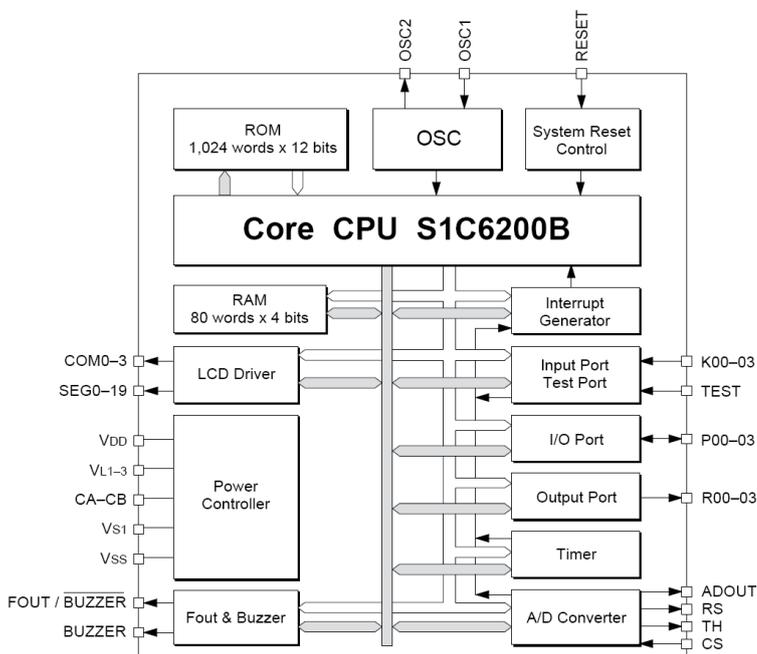


Bild 11:  
Blockschaltbild des Mikrocontrollers S1C60N01 von Seiko Epson (Quelle: Seiko Epson). Es gibt verschiedene Ausführungen, die immer die gleiche Core CPU aber unterschiedliche Peripherie enthalten. Zur Verwendung in einer Funkuhr könnte man beispielsweise folgende Beschaltung wählen:  
OSC1, OSC2 verbinden mit Uhrenquarz (32768 Hz)  
K00: Eingang für Taste  
K01: Eingang für Zeitcodesignal  
P00: Standby-Steuerung für Empfänger-IC  
R00, R01 zum Schrittmotor, zur Leistungssteigerung parallelgeschaltet  
R02, R03 zum Schrittmotor, ebenfalls parallelgeschaltet

des Vergleichswertes bei voller Zelle. Damit ist die Funktion gerade noch gegeben.

Die Unterspannungsüberwachung des Mikrocontrollers spricht bei ca. 2,4 Volt an. Die Uhr signalisiert die Unterschreitung dieses Wertes durch eine spezielle Bewegung des Sekundenzeigers in den ersten 5 Sekunden jeder Minute. Somit ist bis zum Signalisieren der Unterspannung die Gesamtfunktion der Uhr mit ausreichender Reserve gegeben, und die Zellenkapazität wird nahezu vollständig genutzt.

Hinsichtlich der einbaufähigen Größe der Lithiumzelle existieren erhebliche Einschränkungen, da sich einerseits die Höhe der Zelle direkt auf die Gesamtbauhöhe der Uhr auswirkt und andererseits ein zu großer Durchmesser keinen ausreichenden Abstand zur Ferritantenne zulässt, siehe hierzu Abschnitt 3.3. Bild 12 zeigt, dass sich die gewählte Zelle CR1620 mit einer Höhe von 2 mm und einem Durchmesser von 16 mm gut in das Modul integriert. Bei dem schon etwas kleinen Abstand zur Antenne ist eine leichte, aber noch tolerierbare Bedämpfung zu verzeichnen.



Bild 12:  
Ansicht des Moduls von unten.

Der gesamte Strom  $I_{\text{Ges}}$ , der aus der Zelle entnommen wird, setzt sich aus drei Komponenten zusammen: aus dem Strom  $I_{\text{C}}$  für den Mikrocontroller, dem Strom  $I_{\text{E}}$  für den Empfänger und dem Strom  $I_{\text{M}}$  für den Schrittmotor.

$$I_{\text{Ges}} = I_{\text{C}} + I_{\text{E}} + I_{\text{M}} \quad (5)$$

Die Stromaufnahme des Mikrocontrollers liegt unter Ausnutzung seiner Stromsparfunktionen (siehe Kapitel 5) bei  $1,1 \mu\text{A}$ . Die mittlere, durch den Schrittmotor verursachte Stromaufnahme von etwa  $1 \mu\text{A}$  wurde durch eine integrierende Messung bestimmt. Die Stromaufnahme des Empfängers ist zwar mit ca.  $130 \mu\text{A}$  während der Einschaltzeiten recht hoch, wenn man jedoch die mittlere Stromaufnahme unter Beachtung einer Einschaltzeit von 120 Sekunden pro Tag berechnet, erhält man

$$I_{\text{E}} = 130 \mu\text{A} \cdot \frac{120 \text{ s}}{86400 \text{ s}} = 180 \text{ nA} \quad (6)$$

Somit ist der Empfänger die Komponente, die am wenigsten Energie benötigt. Die Gesamtstromaufnahme ist dann entsprechend (5) etwa  $2,28 \mu\text{A}$ . Die Lithiumzelle CR1620 hat eine Kapazität von 68 mAh [11] und erreicht damit eine Lebensdauer  $t$  von

$$t = \frac{68 \text{ mAh}}{2,28 \mu\text{A}} \approx 29800 \text{ h} \quad (7)$$

Das entspricht rund dreieinhalb Jahren und garantiert somit das gesetzte Ziel von drei Jahren mit etwas Reserve.

## 7 Aspekte der Handhabung von Funkuhren

Die Ferritantenne soll vom Magnetfeld in Längsrichtung durchströmt werden. Das bedeutet, dass wegen der waagerechten kreisförmigen Ausbreitung der Magnetfeldlinien vom Sender her die Antenne bei Blickrichtung zum Sender quer und waagrecht liegen muss.

Das Bild 13 zeigt unten die Ausgangsspannung als Funktion des Drehwinkels während einer halben Antennendrehung. Bei einem exakt rechten Winkel zwischen Antenne und Feldlinien geht die Ausgangsspannung gegen Null.

Nun ist dieses Minimum aber glücklicherweise ziemlich scharf, und wenn man die Antenne nur geringfügig weiter dreht, ist die Spannung oft schon wieder ausreichend groß. Deshalb sind sehr selten Wanduhren oder Wecker zu finden, die wegen mangelhafter Ausrichtung DCF77 nicht empfangen können.

Die Verstärkungsregelung im Empfänger muss die durch Änderung der Antennenorientierung verursachten Signalschwankungen ausgleichen. Erfolgt diese Änderung jedoch zu schnell, dann kommt es zu Störungen im Aus-

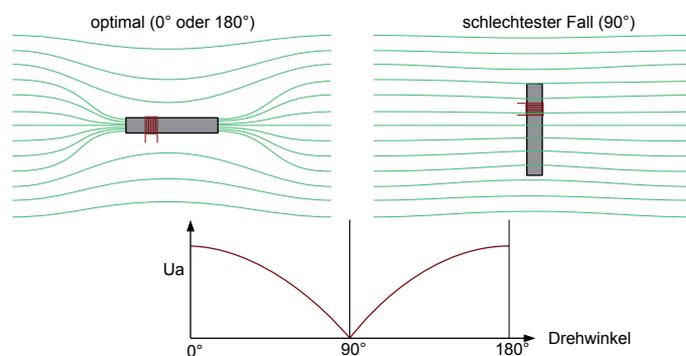


Bild 13:  
Abhängigkeit der Ausgangsspannung einer Ferritantenne von der Drehung im Empfangsfeld. Die Signalspannungen sind oft so hoch, dass sie unmittelbar neben dem Minimum schon wieder ausreichen.

gangssignal des Empfängers, Impulse werden verfälscht, gehen verloren oder neue kommen hinzu. Im Extremfall ist vom Zeitcode überhaupt nichts mehr zu erkennen.

Für stationäre Uhren wie Wecker oder Wanduhren spielt das kaum eine Rolle, weil diese ihre räumliche Orientierung in der Regel beibehalten. Bei Armbanduhren ist das anders, denn bei diesen hängt das Empfängersignal wegen der in Bild 13 gezeigten Abhängigkeit auch davon ab, welcher Tätigkeit der Anwender gerade nachgeht. Im Bild 14 sollen das vier unterschiedliche Beispiele demonstrieren.

Im ersten Fall ist der Anwender in Ruhe bzw. er hält mindestens gerade den Arm ruhig, an dem er die Uhr trägt. Im zweiten Fall führt er mit diesem Arm eine kurze Bewegung aus, wie sie zum Beispiel beim Umblättern einer Zeitung vorkommt. Das Bild 14 zeigt zu diesen Fällen den zeitlichen Verlauf der Demodulatorspannung und den des Ausgangssignals. Letzteres repräsentiert den Zeitcode. Man erkennt im ersten Fall ein ungestörtes Signal, denn die Antenne in der Uhr liefert im Zeitverlauf immer die gleiche Signalspannung.

Im zweiten Fall entsteht durch die kleine Bewegung eine vorübergehende Richtungsänderung der Antenne. Die Signalspannung ändert sich kurzzeitig und kehrt dann wieder zum Ausgangswert zurück. Gleichgültig, ob sich die Signalspannung während dieses Vorgangs erhöht oder verringert, es ist in jedem Fall entweder eine Folge aus Anstieg und anschließender Absenkung oder Absenkung und anschließendem Anstieg. Unmittelbar auf die Absenkung folgend, kommt es wegen der dann nur langsam eingreifenden Regelung zu einem Einbruch der Demodulatorspannung und so zu einer kurzen Empfangsstörung. Dadurch kann das Zeittele-

gramm betroffen sein, jedoch nicht zwingend, je nachdem ob die Störung in die ersten 15 Sekunden der Minute fällt, und ob das gestörte Bit trotz der Störung noch mit seinem richtigen Wert dekodiert wird.

Bei den im dritten und vierten Beispiel angeführten Tätigkeiten, die mit einer dauernden Bewegung der Uhr einhergehen, ist offensichtlich, dass der Mikrocontroller der Funkuhr das Ausgangssignal des Empfängers nicht mehr dekodieren kann.

Funkuhren müssen ihre Zeit regelmäßig mit dem Zeitzeichensender abgleichen, um den durch den Gangfehler verursachten Zeitfehler zu beseitigen. Das geschieht in der Regel durch den Empfang eines Zeittelegramms automatisch, ohne dass der Anwender es bemerkt, zu festen, in der Software des Mikrocontrollers hinterlegten Zeiten. Führten Armbanduhren diesen Zeitabgleich tagsüber durch, wäre das Ergebnis stets unsicher und vom momentanen Verhalten des Anwenders abhängig. Deshalb hat es sich bei Armbanduhren als sinnvoll erwiesen, den Zeitabgleich nur nachts durchzuführen.

## 8 Die Eigenstörungen

Der Schrittmotor in einer kleinen kompakten Funkuhr erzeugt beträchtliche Störungen im Empfangssignal, die ohne weitere Maßnahmen einen Funkempfang fast unmöglich machen.

Bei jedem Motorschritt koppelt das magnetische Streufeld des Schrittmotors als Störimpuls in die Antenne ein. Dieser Störimpuls gelangt über den Vorverstärker an das Quarzfilter und regt es ähnlich einer angeschlagenen Stimmgabel zu einer größeren Schwingung an. Dadurch entsteht am Ausgang des Quarzfilters eine höhere HF-Spannung, worauf die Verstärkungsregelung eingreift und die Verstärkung reduziert. Die Schwingung klingt nach 100 bis 200 ms wieder weitgehend ab. Durch den Eingriff der Verstärkungsregelung (siehe Abschnitt 4) ist danach jedoch die Verstärkung soweit reduziert, dass die Komparatorschwelle des Ausgangskomparators länger unterschritten bleibt und auf diese Weise ein Impuls am Empfängeranfang erscheint, der selbst produziert ist. Wenn sich dieser Vorgang bei einer Uhr mit laufendem Sekundenzeiger jede Sekunde wiederholt, kann DCF77 nur noch dort empfangen werden, wo dessen Feldstärke groß gegenüber der Feldstärke des Schrittmotorstreufeldes ist. Das ist natürlich unbefriedigend.

Das obere Signal im Bild 15 zeigt den Demodulator- und den Zeitcodeausgang des Empfängers mit dem gerade beschriebenen Effekt. Man erkennt im Demodulatorsignal die hohen, durch den Schrittmotor verursachten Störspitzen. Die Verstärkung ist soweit reduziert, dass die Zeitcodeimpulse nur noch ganz schwach zu erahnen

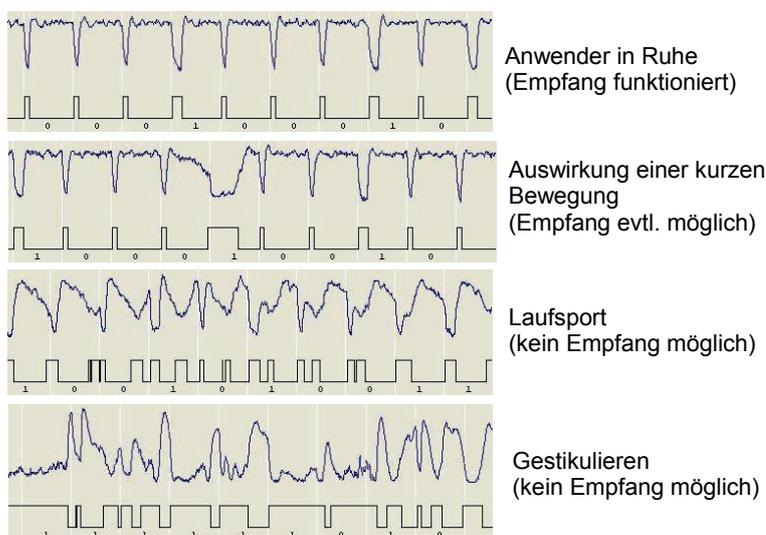
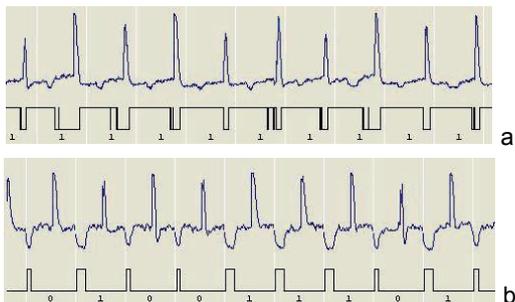


Bild 14: Vergleich der Auswirkungen verschiedener Verhaltensmuster auf die Empfangsmöglichkeit bei Armbanduhren.

sind. Sie sind so klein, dass sie den Komparator nicht mehr triggern und deshalb nicht zum Ausgang gelangen.

Um diese Eigenstörung zu beheben, haben sich drei Maßnahmen im Zusammenspiel von Hard- und Software als sinnvoll erwiesen:

- a) Der Mikrocontroller schaltet bei jedem Motorschritt für etwa 200 ms die Verstärkungsregelung aus. Dazu hat der Empfänger-IC einen speziellen Steuereingang mit der Bezeichnung HOLD [6]. So reagiert die Regelung nicht auf diese starken Störungen und behält den korrekten Verstärkungswert bei.
- b) Der Mikrocontroller verzögert die Motorschritte gegenüber dem Sekundenbeginn. Damit hat er zum Sekundenbeginn ein ungestörtes Signal vorliegen und die Gelegenheit, zwischen einem kurzen oder langen Zeitcode-Impuls zu unterscheiden, also den Zeitcode zu dekodieren. Später in der laufenden Sekunde, wenn das Zeitcodesignal für ihn uninteressant ist, erfolgt der Motorschritt.
- c) Der Mikrocontroller ignoriert bei jedem Motorschritt für etwa 200 ms das Zeitcodesignal und nimmt damit die selbst erzeugten Störungen nicht wahr.



**Bild 15:** Störung des Empfangssignals durch den Schrittmotor. Der Signalverlauf a zeigt ein nicht mehr lesbares Signal. Beim Signalverlauf b wurde die Verstärkungsregelung des Empfängers über den HOLD-Eingang während der Störung durch den Motorschrittimpuls angehalten. Damit wird das Signal unter der Voraussetzung, dass die Motorschritte gegenüber den Zeitcodeimpulsen zeitlich versetzt sind, wieder lesbar.

Der untere Signalverlauf im Bild 15 zeigt nun, dass durch die genannten drei Maßnahmen das Zeitcodesignal wieder lesbar wird. Die Motorschritte erfolgen hier genau in der Sekundenmitte, was nichts weiter als eine vornehme Umschreibung dafür ist, dass die Zeitanzeige der Uhr den Fehler einer halben Sekunde hat.

Wenn der Funkempfang jedoch nur nachts für etwa zwei Minuten stattfindet, bemerken Anwender diesen Vorgang in der Regel nicht. Zudem beträgt die Verzögerung des Motorschritts während dieses Vorgangs bei der Uhr „Kaliber 24“ nur etwa 200 ms, was selbst bei aufmerksamer Beobachtung schwierig zu erkennen ist.

### 9 Wie genau ist eine Funkuhr?

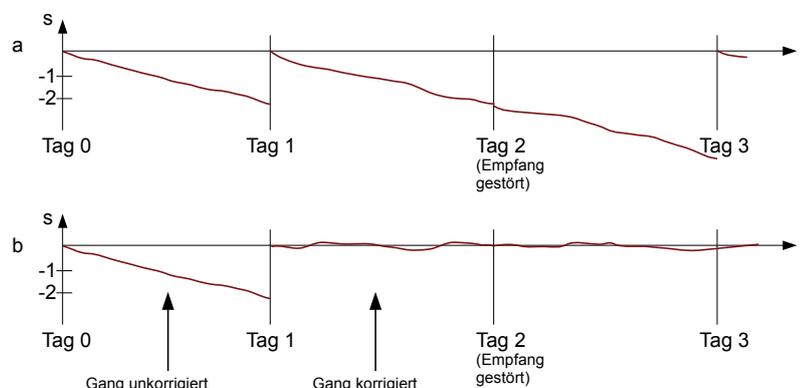
Gewöhnlich spielt die Zeitabweichung einer Funkuhr kaum eine Rolle, weil technisch immer eine höhere Genauigkeit geboten wird, als man im Alltag benötigt. Trotzdem sollen hier Aspekte zur Präzision betrachtet werden.

Durch zufällige Quarztoleranzen entsteht immer eine mehr oder weniger große Abweichung im Zeittakt. Diese Abweichung im Zeittakt, auch als Gangfehler bezeichnet, führt zu einem linear zunehmenden Zeitfehler der Uhr. Funkuhren können diesen Zeitfehler durch den regelmäßigen Zeitabgleich mit DCF77 immer wieder korrigieren. Soll der Zeitfehler nicht zu stark anwachsen, muss der Zeitabgleich häufiger durchgeführt werden. Im Abschnitt 7 wurde jedoch gezeigt, dass bei Armbanduhren der Empfang des DCF77-Signals tagsüber wegen möglicher Bewegungen der Uhr unsicher und deshalb nicht sinnvoll ist. Wird demgegenüber der Zeitabgleich nur alle 24 Stunden einmal durchgeführt, entsteht das in Bild 16 oben dargestellte Verhalten des Zeitfehlers.

Nach dem erfolgreichen Empfang des Zeitsignals ist der Zeitfehler zunächst nahe Null. Im Verlauf des folgenden Tages wächst der Zeitfehler an und erreicht kurz vor dem Empfangszeitpunkt den Maximalbetrag.

Nun könnte es durchaus passieren, dass gelegentlich der Empfang des Zeitsignals fehlschlägt, beispielsweise weil der Anwender die Uhr unter Nichtbeachtung der physikalischen Notwendigkeiten so auf dem Nachtschrank abgelegt hat, dass die Antenne einen exakt rechten Winkel zu den Feldlinien bildet. Dann kann die Uhr den Zeitfehler nicht korrigieren, und er erreicht bis zum nächsten erfolgreichen Empfang des Zeitsignals einen noch größeren Betrag.

Das Anwachsen des durch den Gangfehler verursachten Zeitfehlers lässt sich jedoch verhindern, wenn die Uhr beim Zeitabgleich nicht nur den Zeitfehler, sondern auch den Gangfehler



**Bild 16:** Verlauf des Zeitfehlers einer Funkuhr bei einem Gangfehler von  $-2 \text{ s/Tag}$  und einmaligem täglichem Zeitabgleich. Im Verlauf a nimmt der Zeitfehler nach einer Empfangsstörung weiter zu. Der Verlauf b zeigt die Wirkung der Gangkorrektur.

korrigiert. Für diese Korrektur hat der Verfasser eine Lösung entwickelt, die sich durch geringen Softwareaufwand auszeichnet und deshalb im ohnehin knappen Programmspeicher des kleinen Mikrocontrollers der Uhr „Kaliber 24“ noch unterzubringen war.

Mit der Gangfehlerkorrektur entsteht das in Bild 16 unten dargestellte Verhalten des Zeitfehlers, wo dessen Anwachsen nur noch kurz, nach der Inbetriebnahme zu verzeichnen ist. Ist die Gangfehlerkorrektur einmal ausgeführt, unterliegt der Zeitfehler nur noch zufälligen Schwankungen um die Nulllinie. Die hierzu notwendige Aufgabe des Mikrocontrollers besteht darin, vor der Korrektur des Zeitfehlers auch dessen Größe zu bestimmen und dazu proportional, gegenläufig und in feiner Auflösung seinen eigenen Zeittakt anzupassen.

In der Uhr „Kaliber 24“ bewirkt dieses Verfahren, dass spätestens zwei Tage nach der Inbetriebnahme subjektiv kein Zeitfehler mehr wahrnehmbar ist.

Objektiv ist die Erfassung des Zeitfehlers zur Gangkorrektur jedoch in geringem Maß unsicher, weil im Signalweg durch den Empfänger Ungenauigkeiten entstehen. Das Bild 9 zeigt Oszillogramme des Signals vor und hinter dem Quarzfilter. Vor dem Quarzfilter beträgt die Flankensteilheit der Amplitudenmodulation noch etwa eine Millisekunde, dahinter sind es über 50 ms. Der Verlust an Flankensteilheit ist genau der Preis, zu dem das Quarzfilter das Signal vom Rauschen befreit. Eine derartig flach verlaufende Flanke kann ein Komparator, bei dem die Schaltschwelle leicht streut, zeitlich nicht genau erfassen, die Unsicherheit beträgt etwa 20 ms. Dann kommt als Fehlerquelle die begrenzte Zeitauflösung des Mikrocontrollers in 10-ms-Schritten hinzu. So entsteht insgesamt eine Unsicherheit von 25 ms.

Wenn die Zeitabweichung zum Zweck der Gangkorrektur gemessen wird, ist diese Unsicherheit zweimal enthalten, nämlich aus dem vorhergehenden und dem aktuellen Zeitabgleich. Damit ist die gemessene Zeitabweichung um bis zu 50 ms ungenau. Im Beispiel der Armbanduhr mit 24-Stunden-Empfangsperioden verbleibt nach der Gangkorrektur ein durch diese Messunsicherheit verursachter Gangfehler von bis zu 50 ms pro Tag, also etwa eine Sekunde in drei Wochen.

## 10 Feldstärkebetrachtung zur Beeinflussung von Funkuhren

Abschließend soll zunächst gezeigt werden, wie sicher Funkuhren gegen Störung und gezielte Beeinflussung sind. Es wird also die Frage nach dem technischen Aufwand aufgeworfen, der zu realisieren ist, um Funkuhren erstens so zu stören, dass kein Empfang mehr möglich ist, oder zweitens, um eine andere Zeit zu imitieren. Daraus werden dann Schlussfolgerungen für die Bereitstellung von Simulationssignalen beispielsweise in Fertigungsstätten für Funkuhren gezogen.

Gesetzt den Fall, eine Funkuhr befinde sich in 200 km Entfernung von DCF77. Nach [1] beträgt die elektrische Feldstärke in dieser Entfernung etwa  $80 \text{ dB}\mu\text{V/m}$  bzw.  $10 \text{ mV/m}$ . Da fast alle Funkuhren nur die magnetische Komponente der elektromagnetischen Welle aufnehmen, muss man von der zugehörigen magnetischen Feldstärke ausgehen. Bei der Wellenausbreitung im freien Raum stehen elektrische Feldstärke  $E$  und magnetische Feldstärke  $H$  in einem festen Verhältnis, dem Wellenwiderstand  $Z$  des freien Raumes mit dem Wert von etwa  $377 \text{ Ohm}$  [7]. So kann man die zugehörige magnetische Feldstärke  $H$  nach (8) berechnen.

$$H = \frac{E}{Z} \quad (8)$$

Unter der Annahme einer elektrischen Feldstärke von  $10 \text{ mV/m}$  errechnet sich die zugehörige magnetische Feldstärke  $H$  nach (8) zu etwa  $26 \mu\text{A/m}$ .

Zum „sicheren“ Stören wird entsprechend den Erfahrungswerten des Verfassers ungefähr eine Feldstärke in der halben Höhe benötigt, also  $13 \mu\text{A/m}$ . Demgegenüber erreicht man eine gezielte Beeinflussung erst mit etwa der fünffachen Feldstärke,  $130 \mu\text{A/m}$ . Nun sei hier beispielhaft der technische Aufwand anhand der erforderlichen HF-Stromstärken betrachtet, der notwendig ist, um diese Feldstärken mit einer Rahmenantenne von  $1 \text{ m}$  Durchmesser und mit 10 Drahtwindungen in  $10 \text{ m}$  und in  $100 \text{ m}$  Entfernung zu erzeugen, wie in Bild 17 dargestellt.

Die Berechnung erfolgt mit Hilfe des Gesetzes von Biot und Savart [12], das in vektorieller Form durch folgende Gleichung beschrieben wird:

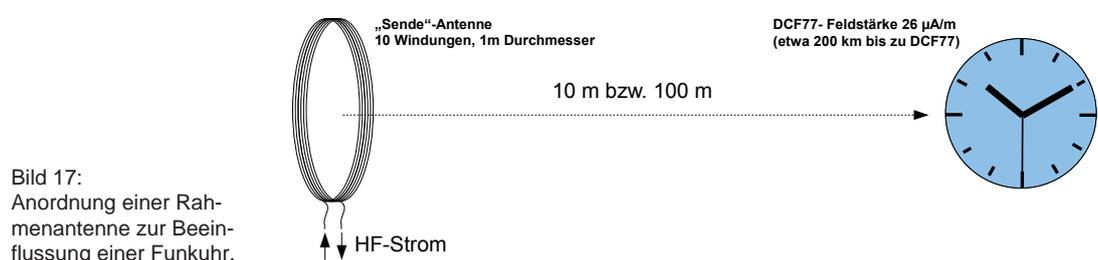


Bild 17:  
Anordnung einer Rahmenantenne zur Beeinflussung einer Funkuhr.

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 \mu_r}{4\pi} \cdot I \cdot \frac{d\vec{l} \times (\vec{r}_1 - \vec{r}_0)}{|\vec{r}_1 - \vec{r}_0|^3} \quad (9)$$

Es beschreibt den am Ort  $\vec{r}_1$  durch einen Strom  $I$  verursachten Magnetfluss  $d\vec{B}$ . Der Strom  $I$  fließt in einem Leiterstück  $d\vec{l}$  am Ort  $\vec{r}_0$ . Ausgehend von (9) ist dann die magnetische Feldstärke  $d\vec{H}$  in Luft ( $\mu_r \approx 1$ ):

$$d\vec{H} = \frac{1}{4\pi} \cdot I \cdot \frac{d\vec{l} \times (\vec{r}_1 - \vec{r}_0)}{|\vec{r}_1 - \vec{r}_0|^3} \quad (10)$$

Wenn man die Symmetrie der Anordnung nutzt und das Kreuzprodukt in (10) für zwei in der Rahmenantenne gegenüberliegende Teilströme entsprechend Bild 18 betrachtet, so erhält man für den oberen Teilstrom  $I_1$ :

$$(dl, 0, 0) \times (0, -R, d) = (0, -dl \cdot d, -dl \cdot R) \quad (11)$$

Für den unteren in entgegengesetzter Richtung fließenden Teilstrom  $I_2$  ergibt sich:

$$(-dl, 0, 0) \times (0, R, d) = (0, dl \cdot d, -dl \cdot R) \quad (12)$$

In der Addition beider Kreuzprodukte heben sich die Anteile in y-Richtung gegeneinander auf. Bei der gegebenen Symmetrie mit dem Punkt  $P$  auf der z-Achse ist zu erkennen, dass bei Addition der Wirkung aller Teilströme auf dem Kreisumfang nur noch eine z-Komponente übrig bleiben kann, so dass der resultierende Magnetfeldvektor im Punkt  $P$  keine x- und y-Anteile hat. Unter dieser Annahme und für  $d \gg R$  erhält man für die z-Komponente:

$$dH = \frac{I}{4\pi} \cdot \frac{dl \cdot R}{d^3} \quad (13)$$

Nach Integration über den Umfang des Kreises ergibt sich:

$$H = -\frac{I}{2} \cdot \frac{R^2}{d^3} \quad (14)$$

Bei gegebener Feldstärke ist der Betrag des notwendigen Stroms:

$$|I| = \left| \frac{2H \cdot d^3}{R^2} \right| \quad (15)$$

Es ist bemerkenswert, dass nach (10) die magnetische Feldstärke quadratisch mit der Entfernung abnimmt, nach (14) aber mit der dritten Potenz. Das ist jedoch nur ein scheinbarer Widerspruch, weil (14) nur für größere Entfernungen ( $d \gg R$ ) gilt und im speziellen Fall die Sendeantenne klein gegenüber der Entfernung zur Sendeantenne ist. Betrachtet man wieder zwei gegenüberliegende Teilströme in der Sendeantenne, so kann man – etwas vereinfachend – das resultierende Magnetfeld in größerer Entfernung als Differenz zweier fast gleich starker, quadratisch

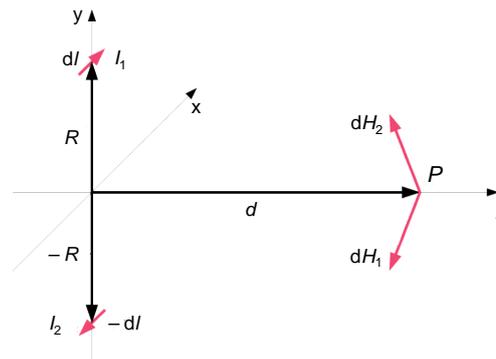


Bild 18: Darstellung der Wirkung zweier Teilströme, die in der Rahmenantenne in sich gegenüberliegenden Leiterstücken fließen.  $R$  ist der Radius der Rahmenantenne und  $d$  die Entfernung, in der die Wirkung zu berechnen ist. Der Strom  $I_1$  fließt am Ort  $(0, R, 0)$  in der Richtung  $(dl, 0, 0)$  und verursacht am Punkt  $P(0, 0, d)$  die magnetische Feldstärke  $dH_1$ . Der Strom  $I_2$  fließt am Ort  $(0, -R, 0)$  in der Richtung  $(-dl, 0, 0)$  und verursacht am gleichen Punkt  $P(0, 0, d)$  die magnetische Feldstärke  $dH_2$ . Beide Teilströme sind gleich groß.

mit der Entfernung abnehmender Felder betrachten. Diese Differenz muss mit der dritten Potenz der Entfernung abnehmen, denn es gilt beispielsweise

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \left( \frac{1}{x^2} - \frac{1}{(x-1)^2} \right) = \frac{2}{x^3} \quad (16)$$

Tabelle 1 zeigt die Stromstärken, mit denen man Funkuhren in 10 m bzw. 100 m Entfernung stören oder gezielt beeinflussen kann. Zur Beeinflussung bzw. Störung in 100 m Entfernung sind die erforderlichen HF-Ströme schon recht groß, so dass man in der Regel nicht auf vorhandene Labortechnik zurückgreifen kann, um diese Stromstärken zu erzeugen. Selbstverständlich benötigt man für eine gezielte Beeinflussung neben einem HF-Generator auch einen Generator für das Modulationssignal.

Für potentielle Anwender von Funkuhren in Gebieten, die nicht über Langwelle mit Zeitsignalen versorgt sind, ist es durchaus reizvoll, lokal z. B. auf einem Anwesen oder in einem Haus ein Zeitzeichensignal bereitzustellen und damit einige Funkuhren zu betreiben. Die hier durchgeführten Rechnungen zeigen, dass solche Vorhaben realisierbar sind. Auch im Fertigungsprozess von Funkuhren muss ein Zeitzeichensignal in definierter Stärke zur Verfügung stehen. Bei Fertigungsstätten in Deutschland besteht zudem die Gefahr von Überlagerungen mit dem originalen DCF77-Signal. Deshalb muss das Simulationssignal in seiner Feldstärke ausreichend stark gegenüber dem Originalsignal sein, wobei die hier angeführte 5-fache Feldstärke ein Mindestwert ist. Als Sendeantenne für einen ganzen Arbeitsraum ist eine große Antenne mit geringem Strom besser geeignet als eine kleine Antenne mit ho-

Tabelle 1:

Mit (15) berechnete Stromstärken des HF-Stromes. Da eine Rahmenantenne mit zehn Windungen angenommen wurde, ist die resultierende Stromstärke nur ein Zehntel des nach (15) berechneten Wertes.

| Entfernung | HF-Stromstärke für                        |  | Technischer Aufwand           |
|------------|---|--|-------------------------------|
|            | einfache Störung<br>(13 $\mu\text{A/m}$ ) | gezielte Beeinflussung<br>(130 $\mu\text{A/m}$ ) |                               |
| 10 m       | 10,4 mA                                   | 104 mA   | überschaubare<br>Labortechnik |
| 100 m      | 10,4 A                                    | 104 A  | anspruchsvoll                 |

hem Strom. Bei letzterer würde die magnetische Feldstärke schnell mit der dritten Potenz der Entfernung abnehmen, was eine inhomogene Feldstärkeverteilung zur Folge hätte. Demgegenüber kann eine große Antenne, bei der dann die Bedingung  $d \gg R$  nicht zutrifft und die beispielsweise als senkrechte Leiterschleife einen ganzen Arbeitsraum umfasst, an mehreren Arbeitsplätzen etwa gleich große Feldstärken bereitstellen. Die Zulässigkeit eines derartigen Vorgehens ist derzeit in Deutschland gegeben, wenn der Umfang der Leiterschleife 30 m nicht übersteigt und wenn die Feldstärke in 10 m Entfernung unter 42  $\text{dB}\mu\text{A/m}$ , also 125  $\mu\text{A/m}$  liegt [13].

Aus [13] ist auch eine Antwort auf die Frage nach der zulässigen Stromstärke in der Rahmenantenne gemäß Tabelle 1 abzuleiten. Weil in der berechneten Richtung die Feldstärke am größten ist, reicht es aus, die Betrachtung auf diese Richtung zu beschränken. Nach (15) und unter Beachtung der Windungszahl ergibt sich für die Maximalfeldstärke von 125  $\mu\text{A/m}$  in 10 m Entfernung eine HF-Stromstärke von 100 mA.

## 11 Ausblick

Funkuhren haben sich derzeit besonders als Großuhren (Wecker, Wanduhren) weitgehend durchgesetzt und sind zunehmend auch dort zu finden, wo die Uhr eine Nebenfunktion darstellt, z. B. in Heizungssteuerungen oder in Wetterstationen. In Rechnernetzen bietet die Funkuhr eine alternative Möglichkeit zur Zeitsynchronisation, wenn keine Internetverbindung zur Verfügung steht. Oft sind auch Vorgänge in voneinander entfernten Anlagen zeitlich zu synchronisieren, wie z. B. die Hindernisbefuerung in Windkraftanlagen oder die Schaltzyklen in Ampelanlagen. Das ist relativ preiswert durch die Nutzung des DCF77-Signals möglich und macht Datenverbindungen zur Übertragung von Zeitsignalen überflüssig. Gerade die Synchronisierung der Hindernisbefuerung ist ein gutes Beispiel dafür, wie einerseits durch die Nutzung des DCF77-Signals überraschend einfache Problemlösungen entstehen und wie sich andererseits dem DCF77-Signal ein neues Anwendungsgebiet erschließt.

## Literatur

- [1] A. Bauch, P. Hetzel, D. Piester: Zeit- und Frequenzverbreitung mit DCF77: 1959 – 2009 und darüber hinaus. In diesem Heft
- [2] Alois Krischke: Rothammels Antennenbuch, 12. Auflage, DARC Verlag, Baunatal, 2001, ISBN 3-88692-033-X, S. 35–38, S. 41
- [3] Neosid: Ferrites and Inductive Components (2009), NEOSID Pemetzrieder GmbH & Co KG, Langenscheid 26–30, D-58553 Halver, S. 1.04–1.27
- [4] Ref. [2], S. 678
- [5] HKW-Elektronik GmbH: Technisches Datenblatt Antenne AFET 77,5 kHz 10×60mm (2004), Bezugsquelle: HKW-Elektronik GmbH, Industriestraße 12, D-99846 Seebach
- [6] HKW-Elektronik GmbH: Technisches Datenblatt UE6015 Time-Code Receiver IC (2006), Bezugsquelle: HKW-Elektronik GmbH, Industriestraße 12, D-99846 Seebach
- [7] Ref. [2], S. 39
- [8] Seiko Epson Corporation: Micro MINI S1C60N01 Data Sheet (2001), SEIKO EPSON CORPORATION, ED International Marketing Department Europe & U.S.A., 421-8, Hino, Hino-shi, Tokyo, 191-8501, JAPAN
- [9] Patentschrift DE 196 15 215 C2 (1996)
- [10] M. Arnold: Zeitzeichen- und Normalfrequenzempfang, Franzis-Verlag GmbH, München, 1987, ISBN 3-7723-8171-5, S. 55-68
- [11] Renata SA: CR1620 3V Lithium Battery, Renata SA, CH-4452 Itingen/Switzerland, verfügbar über URL [www.renata.com](http://www.renata.com)
- [12] E. Kneller: Ferromagnetismus, Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg, 1962, S. 5
- [13] Bundesnetzagentur: Allgemeinzuteilung von Frequenzen im Frequenzbereich 9–30 000 kHz für die Nutzung durch die Allgemeinheit für induktive Funkanwendungen (2005), Bezugsquelle: Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, Tulpenfeld 4, 53113 Bonn oder URL [www.bundesnetzagentur.de](http://www.bundesnetzagentur.de)
- [14] HKW-Elektronik GmbH: AAG2 Antenna Tuning Station – Manual (2006), Bezugsquelle: HKW-Elektronik GmbH, Industriestraße 12, D-99846 Seebach
- [15] Ref. [10], S. 29–40