# DCF77

## Einleitung

„Zeitmessung“ ist heute aus dem privaten Alltag ebenso wenig weg zu denken wie aus vielen Bereichen von Wissenschaft und Technik. Der Begriff wird für die Messung der Dauer von Zeitintervallen (Stichwort: Stoppuhr), für die Registrierung der Häufigkeit von Ereignissen während eines Zeitintervalls (Stichwort: Frequenz) und für die Datierung von Ereignissen in einer Zeitskala (Stichwort: Uhrzeit) verwendet.

Die letzte Aufgabe ist wohl die im täglichen Leben bedeutendste. Kaum ein erwachsener Bürger in unserem europäischen Kulturraum wird nicht wenigstens einmal täglich auf eine Uhr sehen. Die Datierung von Ereignissen und die Koordinierung der vielfältigen Geschehnisse in einer modernen Gesellschaft werden als so wichtig erkannt, dass in vielen Staaten durch Gesetz geregelt ist, wie die gültige Uhrzeit anzugeben ist, so auch in Deutschland. Grenzüberschreitender Verkehr und Kommunikation verlangen, dass die so festgelegten Uhrzeiten der Länder aufeinander abgestimmt sind. Die Grundlage hierfür legte 1884 die Washingtoner Standardzeit-Konferenz, auf der die Lage des Nullmeridians und das System der 24 Zeitzonen zu je 15° geographischer Länge festgelegt wurden. Die Datierung von Ereignissen folgt weitgehend lange eingeführten Konventionen.

24 Stunden zu 60 Minuten zu 60 Sekunden bilden einen Tag. Der Beginn des Tages ist auf 0:00 Uhr festgelegt. Für die Zählung der Tage wird in Deutschland und vielen Ländern der Erde der Gregorianische Kalender verwendet.

Seit dem 1. April 1893 gilt in Deutschland (bzw. damals im Deutschen Reich) die mittlere Sonnenzeit am fünfzehnten Längengrad Ost als einheitliche Zeit, wie das Reichsgesetzblatt Nr. 7 vom 16. März 1893 besagt. Mit dem Zeitgesetz aus dem Jahr 1978 wurde diese Regelung in das „Atomzeitalter“ überführt und die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) mit der Darstellung und Verbreitung der gesetzlichen Zeit beauftragt.

Nützliche Festlegungen zu Zeit, Kalender, Wochennummerierung und Schreibweise von Tagesdatum und Uhrzeit findet man in der Norm ISO 8601 sowie der entsprechenden deutschen bzw. europäischen Norm DIN EN 28601.

Hier sollen nur drei Details angeführt werden, die immer wieder Grund zu Fragen geben. Die genannte Norm legt u. a. fest:

- Montag ist der erste Tag der Kalenderwoche;
- Die erste Kalenderwoche eines Jahres ist diejenige, in die mindestens vier Tage des neuen Jahres fallen, gleichbedeutend, dass in dieser Woche Eins der erste Donnerstag des Jahres liegt;
- Schaltjahre sind diejenigen Jahre, deren Jahreszahl ohne Rest durch vier teilbar ist. Ist die Jahreszahl jedoch durch 100, nicht aber durch 400 ohne Rest teilbar, so ist das Jahr kein Schaltjahr sondern ein Gemeinjahr, der Februar dieses Jahres hat dann 28 Tage. Das Jahr 2000 war also ein Schaltjahr, das Jahr 2100 wird keines sein.

Schon zu Beginn des letzten Jahrhunderts erkannte man in Funkwellen ein geeignetes Mittel zur Zeitübertragung. Die ersten Versuche zur drahtlosen Zeitübermittlung unternahmen 1903 das United States Naval Observatory, Washington, und 1904 das Geodätische Institut Potsdam. Bereits von 1910 bis 1916 sendete die Küstenfunkstelle Norddeich als erster deutscher Zeitdienst regelmäßig Zeitzeichen auf der Basis von Zeitbestimmungen des Marineobservatoriums Wilhelmshaven. Ab 1917 strahlte dann die Großsendestelle Nauen zweimal täglich ein Zeitzeichen auf Langwelle 3900 m aus. Nach diesen Anfängen der drahtlosen Zeitübertragung entstand im Laufe der Jahre ein erdumspannendes Netz von Zeitzeichenstationen. Zur Zeitverbreitung mit terrestrischen Sendern kam in den vergangenen zwei Jahrzehnten die Zeitübertragung über Satelliten hinzu und eröffnete völlig neue Möglichkeiten für interkontinentale Präzisionszeitvergleiche, Ortsbestimmung und globale Navigation.

Dieses Poster handelt von der Verbreitung der gesetzlichen Zeit mit dem Zeitzeichen- und Normalfrequenzsender DCF77 durch die PTB.

## Realisierung und Verbreitung der gesetzlichen Zeit für Deutschland

### *Gesetzliche Grundlagen*

Das Zeitgesetz von 1978 beauftragt die PTB, die für das öffentliche Leben in Deutschland maßgebende Uhrzeit darzustellen und zu verbreiten. Als gesetzliche Zeit wurden die Mitteleuropäische Zeit (MEZ) oder, im Falle ihrer Einführung, die Mitteleuropäische Sommerzeit (MESZ) festgelegt, wie sie von der PTB realisiert werden. Sie werden aus der Koordinierten Weltzeit UTC (Universal Coordinated Time) unter Hinzufügen von einer bzw. zwei Stunden abgeleitet:

MEZ(D) = UTC(PTB) + 1h
MESZ(D) = UTC(PTB) + 2h

Die Bundesregierung ist nach dem Zeitgesetz ermächtigt, durch Rechtsverordnung zwischen dem 1. März und dem 31. Oktober eines Jahres die Sommerzeit einzuführen. Die Termine für Beginn und Ende der MESZ werden von der Bundesregierung entsprechend der jeweils gültigen Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates der Europäischen Union festgelegt und im Bundesgesetzblatt bekannt gemacht. Auf Grund der letzten Sommerzeitverordnung vom 12. Juli 2001 gilt zukünftig – bis auf Widerruf – Sommerzeit vom letzten Sonntag des März bis zum letzten Sonntag des Oktobers eines Jahres.

### *Koordinierte Weltzeit*

Die Sektion Zeit des Internationalen Büros für Maß und Gewicht BIPM (Bureau International des Poids et Mesures) ist mit der Berechnung und Verbreitung einer weltweit gültigen Zeitreferenz beauftragt. Bis 1988 wurde diese Aufgabe vom Internationalen Büro für die Zeit BIH (Bureau International de l'Heure) wahrgenommen.

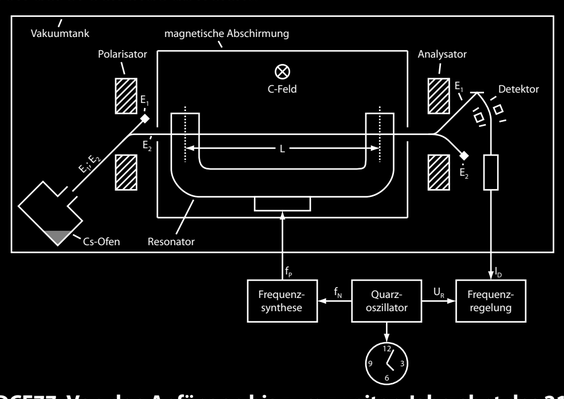
Im Prinzip würde eine hinreichend genaue, stabile und zuverlässige Uhr genügen, die Zeit anzugeben. Da eine solche Uhr jedoch nirgendwo zur Verfügung steht, berechnet das BIPM eine Zeitreferenz auf der Basis von etwa 250 Uhren, darunter etwa zehn sog. primären Uhren, aus ca. 50 weltweit verteilten Zeitinstituten. Zunächst ermittelt das BIPM die Gang-Instabilitäten dieser Uhren und weist ihnen statistische Gewichte zu, mit denen sie bei der Berechnung der gemittelten Zeitskala berücksichtigt werden. Eine stabile Uhr erhält ein hohes statistisches Gewicht und umgekehrt. Das so gewonnene Mittel wird EAL (Echelle Atomique Libre, freie Atomzeitskala) genannt. In einem zweiten Schritt wird die Internationale Atomzeit TAI (Temps Atomique International) mittels einer Frequenzkorrektur aus EAL gewonnen. Das Skalenmaß von TAI wird dabei so nachgeregelt, dass es so gut wie möglich mit der SI-Sekunde übereinstimmt, wie sie auf Meereshöhe realisiert würde. „SI-Sekunde“ bezeichnet die Basiseinheit der Zeit im Internationalen Einheitensystem SI (System International). Die Frequenzkorrektur wird gegenwärtig aus dem Vergleich von EAL mit den primären Uhren der Zeitinstitute in Frankreich, Italien, Japan, USA, und Deutschland abgeleitet. TAI hatte verschiedene Vorläufer, aber man hat den fiktiven Anfangspunkt von TAI so festgelegt, dass der 1. Januar 1958, 0 Uhr TAI, mit dem entsprechenden Zeitpunkt in der mittleren Sonnenzeit am Nullmeridian, UT1 (Universal Time) genannt, übereinstimmte. UT1 war die Grundlage der weltweiten Zeitbestimmung, solange diese auf astronomischen Beobachtungen beruhte.

Aus TAI wird UTC abgeleitet, die Basis unseres heutigen Weltzeitsystems mit 24 Zeitzonen. UTC geht auf Vorschläge des CCIR (Comité Consultatif International des Radiocommunications) der ITU (International Telecommunication Union) zurück, nach denen die Aussendung von Zeitzeichen „koordiniert“, d. h. bezogen auf eine gemeinsame Zeitskala erfolgen sollte, die mit UT1 näherungsweise in Übereinstimmung gehalten wird. UTC und TAI haben mit der SI-Sekunde das gleiche Skalenmaß, und die Differenz UTC minus UT1 wird durch Schaltsekunden in UTC auf unter 0,9 Sekunden begrenzt.

Die Entscheidung hierüber trifft der Internationale Dienst für Erdrotation und Referenzsysteme (International Earth Rotation and Reference Systems Service IERS) in Abhängigkeit von den kontinuierlich registrierten Parametern der Erdrotation (Lage der Drehachse, Periode). Die unregelmäßige Einführung von Schaltsekunden spiegelt die ungleichmäßige Drehgeschwindigkeit der Erde wider. Gegenwärtig dreht sich die Erde deutlich schneller als im Mittel der letzten Jahrzehnte.

### *Die Atomuhren der PTB*

Die PTB betreibt eine Gruppe von Atomuhren, um die Atomzeitskala UTC(PTB) mit großer Stabilität und Zuverlässigkeit zu realisieren. Zu der Gruppe gehören einige kommerziell gefertigte Caesiumatomuhren, Wasserstoffmaser und die sog. primären Uhren CS1, CS2 und CSF1, die in den letzen Jahrzehnten in der PTB entwickelt wurden. 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. Sie werden in den Bereichen Navigation, Geodäsie, Raumfahrt, Telekommunikation und in den Zeitinstituten (wie der PTB) eingesetzt. Mit den in der PTB entwickelten primären Cs-Uhren werden deutlich geringere Unsicherheiten erreicht. Der Begriff „primäre Uhr“ wird verwendet, weil jederzeit eine Abschätzung darüber vorliegt, mit welcher Wahrscheinlichkeit die realisierte Sekunde in welchem Ausmaß von der SI-Sekunde abweicht.




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

### *Verantwortlichkeiten, vertragliche Regelungen*

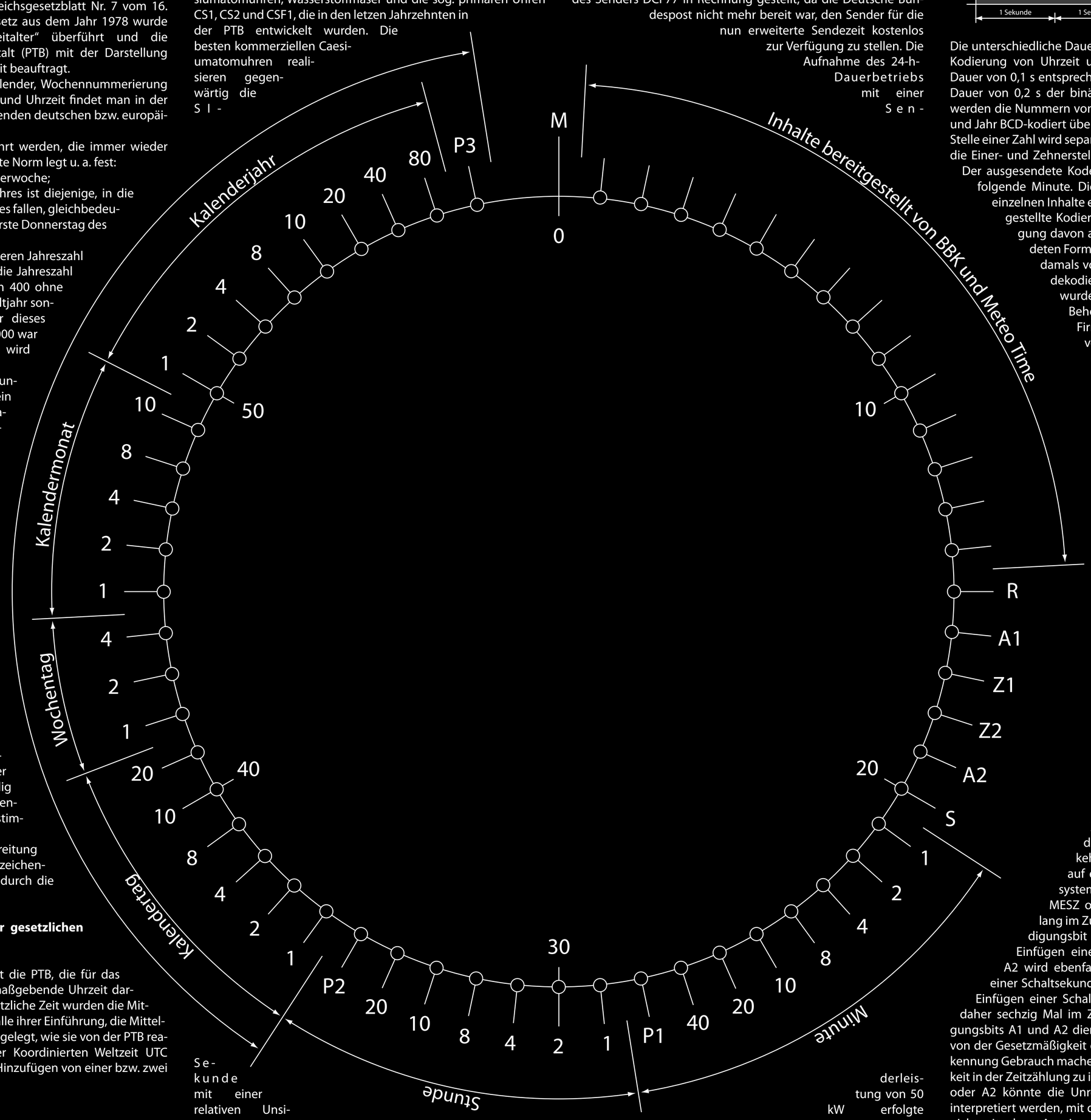
Mitte der fünfziger Jahre setzten sich Vertreter des Deutschen Hydrographischen Instituts (DHI), des Fernmeldetechnischen Zentralamtes (FTZ) und der PTB, zusammen, um „zur Erfüllung amtlicher Aufgaben“ gemeinsam eine Zeitsignal- und Normalfrequenzausendung einzurichten.

Die Institute gehörten zum Geschäftsbereich verschiedener Bundesministerien: für Verkehr, Post und Wirtschaft. Diese Zusammenarbeit spiegelt die Situation wider, in der die Zeit noch basierend auf astronomischen Beobachtungen realisiert wurde, in Deutschland vom DHI, die Zeiteinheit aber schon von metrologischen Instituten, wie der PTB, mit überlegener Genauigkeit realisiert wurde. Die Deutsche Bundespost bot für diesen Zweck den Sender mit der Bezeichnung DCF77 an. Die PTB stellte hochgenaue Quarzuhren zur Verfügung und entwickelte eine Steuereinrichtung, das DHI lieferte Zeitzeichen auf astronomischer Basis. Mit den ersten Sendeversuchen wurde 1956 begonnen.

Am 10. Oktober 1958 erhielt die PTB vom Bundespostministerium die Genehmigung, bis zum Jahresende 1958 regelmäßige Versuchssendungen durchzuführen. Als offizieller Beginn der Zeitsignal- und Normalfrequenzaussendungen über den Sender DCF77 wurde in diesem Genehmigungsschreiben der 1. Januar 1959 festgelegt.

Die Senderleistung für diesen neuen Dienst betrug anfangs 12,5 kW. Noch bis Ende 1969 wurden mit dem Sender DCF77 außer Zeitzeichen und Normalfrequenz intermittierend Sportnachrichten vom Deutschen Sportverlag (DSV) gesendet. Die Zeitsignal- und Normalfrequenzaussendungen erfolgten in einem werktäglichen Vormittags- und Nachtprogramm von jeweils etwa drei Stunden Dauer. Da von verschiedenen Organisationen und Nutzern dieses neuen Dienstes eine längere Sendedauer gewünscht wurde, stellte die PTB Anfang 1967 den Antrag auf Erweiterung der Sendezeit auf 24 Stunden. Dem DSV wurde daraufhin die neue Frequenz 46,25 kHz zugewiesen.

Am 1. Dezember 1969 wurde die Sendezeit für die Zeitzeichenaussendungen über DCF77 auf zunächst 16 Stunden erweitert, und die Zuständigkeit für DCF77 ging voll auf die PTB über. Ab diesem Datum wurden der PTB auch Gebühren für den Betrieb des Senders DCF77 in Rechnung gestellt, da die Deutsche Bundespost nicht mehr bereit war, den Sender für die nun erweiterte Sendezeit kostenlos zur Verfügung zu stellen. Die Aufnahme des 24-h-Dauerbetriebs mit einer Sendeleistung von 50 kW erfolgte schließlich am 1. September 1970.




### *Standort und Senderbezeichnung*

Standort des Senders DCF77 ist die Sendefunkstelle Mainflingen (Koordinaten: 50° 01′ Nord, 09° 00′ Ost) etwa 25 km südöstlich von Frankfurt am Main. Woher kommt das Rufzeichen DCF77? Nach den Regeln der ITU, speziell Artikel 19 der Radio Regulations, „Identification of Stations“, 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) bestimmt. Da die Sendefunkstelle Mainflingen mehrere Frequenzen im Langwellenbereich benutzt, werden zur Unterscheidung der verschiedenen Sender dieser Station an die drei Buchstaben DCF noch zwei Ziffern angehängt. Beim DCF77 wurden diese Ziffern entsprechend der verwendeten Trägerfrequenz gewählt, bei den anderen Anfang 2004 auf der Sendefunkstelle betriebenen Sendern DCF49 (auf 129,1 kHz) und DCF42 (auf 123,7 kHz) trifft dies nicht zu.

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

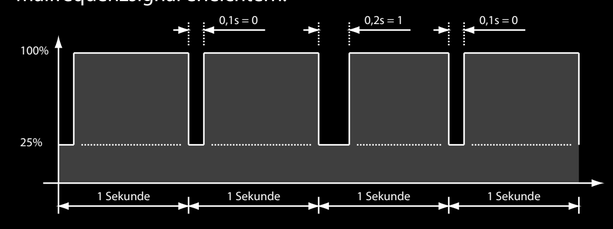
## Das DCF77 Sendeprogramm

### *Trägerfrequenz*

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

### *Amplitudenmodulation (AM) und Zeitkode*

Die Amplitude der Trägerschwingung wird mit Sekundenmarken moduliert: Zu Beginn jeder Sekunde, mit Ausnahme der letzten Sekunde jeder Minute als Kennung für den folgenden Minutenbeginn, wird die Amplitude für die Dauer von 0,1 s oder 0,2 s phasensynchron mit der Trägerschwingung auf etwa 25% abgesenkt. Die Restamplitude ermöglicht die Gewinnung einer kontinuierlichen Trägerschwingung und soll die Nutzung des DCF77-Trägers als Normalfrequenzsignal erleichtern.




Die unterschiedliche Dauer der Sekundenmarken dient zur binären Kodierung von Uhrzeit und Datum: Sekundenmarken mit einer Dauer von 0,1 s entsprechen der binären Null und solche mit einer Dauer von 0,2 s der binären Eins. Einmal während jeder Minute werden die Nummern von Minute, Stunde, Tag, Wochentag, Monat und Jahr BCD-kodiert übertragen (BCD: Binary Coded Decimal, jede Stelle einer Zahl wird separat kodiert). Vom Kalenderjahr werden nur die Einer- und Zehnerstelle übertragen, das Jahr 2004 also als 04.

Der ausgesendete Kode enthält jeweils die Information für die folgende Minute. Die zeitliche Abfolge der Aussendung der einzelnen Inhalte erläutert das im Zentrum des Plakates 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 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.

Einige Details zu den übertragenen Informationen:

Nach dem Ende der Ausstrahlung des DUT1-Kodes wurden viele Jahre lang mit den Sekundenmarken Nr. 1 bis 14 Betriebsinformationen über die DCF77-Steuereinrichtung übertragen.

Seit Mitte 2003 sind die Bits 1 bis 14 für andere Zwecke freigegeben. Das Bit 15 wird als „Rufbit“ verwendet, um Unregelmäßigkeiten in den Steuereinrichtungen zu signalisieren und die für DCF77 verantwortlichen Mitarbeiter der PTB in Braunschweig zu alarmieren.

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 Aussendung von MEZ hat Z1 den Zustand Null und Z2 den Zustand Eins. Bei der Aussendung von MESZ ist es umgekehrt. Das Ankündigungsbit A1 (Nr. 16) weist auf einen bevorstehenden Wechsel des Zeitsystems hin. Vor dem Übergang von MEZ nach MESZ oder zurück wird A1 jeweils eine Stunde lang im Zustand Eins ausgesendet. Mit dem Ankündigungsbit A2 (Nr. 19) wird auf das bevorstehende Einfügen einer Schaltsekunde aufmerksam gemacht. A2 wird ebenfalls eine Stunde lang vor dem Einfügen einer Schaltsekunde im Zustand Eins ausgestrahlt. Vor dem Einfügen einer Schaltsekunde am 1. Januar (1. Juli) wird A2 daher sechzig Mal im Zustand Eins ausgesendet. Die Ankündigungsbits A1 und A2 dienen dazu, Prozessoren in Funkuhren, die von der Gesetzmäßigkeit der Zeitzählung zum Zweck der Fehlererkennung Gebrauch machen, über die zu erwartende Unregelmäßigkeit in der Zeitzählung zu informieren. Ohne die Auswertung von A1 oder A2 könnte die Unregelmäßigkeit als fehlerhafter Empfang interpretiert werden, mit der Folge, dass die geänderte Zeitzählung nicht zeitnah zur Anzeige gebracht wird. Bit S deutet den Beginn der Zeitinformation an und ist immer 1.

Die Kodierung des Wochentages erfolgt gemäß der Norm ISO 8601 bzw. DIN EN 28601, wonach der Montag der Tag Eins der Woche ist. Die drei Prüfbits P1, P2 und P3 ergänzen jeweils die vorhergehenden Informationswörter (7 Bits für die Minute, 6 Bits für die Stunde und 22 Bits für das Datum einschließlich der Nummer des Wochentages) auf eine gerade Zahl von Einsen.

### *Einrichtungen am Sendeort*

Das Steuersignal wird nicht von Braunschweig aus über Leitungen zur Sendefunkstelle Mainflingen übertragen, sondern mit einer von der PTB konzipierten Steuereinrichtung am Sendeort erzeugt. Die Steuereinrichtung ist in einem eigens für die PTB bereitgestellten Raum der Sendefunkstelle untergebracht und wird von Braunschweig aus überwacht. Aus Gründen der Betriebssicherheit wird das Steuersignal in drei voneinander unabhängigen Steuerkanälen erzeugt. Das Trägersignal (77,5 kHz) und die aufmodulierten Sekundenmarken werden derzeit in allen drei Kanälen von je einer Caesium-Atomuhr abgeleitet, eine Rubidium-Atomuhr steht zusätzlich zur Verfügung. Jeder Steuerkanal verfügt über eine eigene batteriegestützte Stromversorgung.

Zur Vermeidung von falschen Aussendungen werden die erzeugten Steuersignale in zwei elektronischen Umschaltern miteinander verglichen. Ergibt sich bei diesem Vergleich, dass die Signale des den Sender steuernden Kanals im Widerspruch zu denen der beiden Reservekanäle stehen, wird automatisch auf einen der beiden Reservekanäle umgeschaltet. Nach Ausfall eines Kanals liefert jeder elektronische Umschalter nur noch so lange ein Ausgangssignal, wie der steuernde Kanal und der verbleibende Reservekanal in Übereinstimmung sind. Bei Widersprüchen zwischen allen drei Kanälen wird das Steuersignal automatisch unterbrochen. Außerdem schalten die beiden elektronischen Umschalter ihre Ausgangssignale gegenseitig ab, wenn zwischen diesen Widersprüche auftreten.

*(Text: PTB, Plakatdesign: Christian)*