



Christof Linde

Aufbau und Technik des digitalen BOS-Funks

Technik der Funknetze
Aufbau digitaler Funkgeräte
Codierung und Entschlüsselung



Christof Linde

**Aufbau und Technik des
digitalen BOS-Funks**



FRANZIS

Christof Linde

Aufbau und Technik des digitalen BOS-Funks

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Hinweis

Alle Angaben in diesem Buch wurden vom Autor mit größter Sorgfalt erarbeitet bzw. zusammengestellt und unter Einschaltung wirksamer Kontrollmaßnahmen reproduziert. Trotzdem sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Der Verlag und der Autor sehen sich deshalb gezwungen, darauf hinzuweisen, dass sie weder eine Garantie noch die juristische Verantwortung oder irgendeine Haftung für Folgen, die auf fehlerhafte Angaben zurückgehen, übernehmen können. Für die Mitteilung etwaiger Fehler sind Verlag und Autor jederzeit dankbar. Internetadressen oder Versionsnummern stellen den bei Redaktionsschluss verfügbaren Informationsstand dar. Verlag und Autor übernehmen keinerlei Verantwortung oder Haftung für Veränderungen, die sich aus nicht von ihnen zu vertretenden Umständen ergeben. Evtl. beigefügte oder zum Download angebotene Dateien und Informationen dienen ausschließlich der nicht gewerblichen Nutzung. Eine gewerbliche Nutzung ist nur mit Zustimmung des Lizenzinhabers möglich.

© 2008 Franzis Verlag GmbH, 85586 Poing

Alle Rechte vorbehalten, auch die der fotomechanischen Wiedergabe und der Speicherung in elektronischen Medien. Das Erstellen und Verbreiten von Kopien auf Papier, auf Datenträgern oder im Internet, insbesondere als PDF, ist nur mit ausdrücklicher Genehmigung des Verlags gestattet und wird widrigenfalls strafrechtlich verfolgt.

Die meisten Produktbezeichnungen von Hard- und Software sowie Firmennamen und Firmenlogos, die in diesem Werk genannt werden, sind in der Regel gleichzeitig auch eingetragene Warenzeichen und sollten als solche betrachtet werden. Der Verlag folgt bei den Produktbezeichnungen im Wesentlichen den Schreibweisen der Hersteller.

Satz: Fotosatz Pfeifer, 82166 Gräfelfing

art & design: www.ideehoch2.de

Druck: Bercker, 47623 Kevelaer

Printed in Germany

ISBN 978-3-7723-4216-5

Inhalt

1	Aufgaben des BOS-Funks	11
2	Physikalische Grundlagen	12
2.1	Elektromagnetische Wellen und elektrische Felder	12
2.2	Dezibel	14
2.3	Frequenzabhängige Ausbreitungseigenschaften	14
3	Von analog zu digital	17
3.1	Zahlensysteme	17
3.2	Analoge Signale	18
3.3	Digitalisierung analoger Signale	19
3.4	Digitale Codiervverfahren	22
3.5	Abtastrate, Bandbreite und Datenmengen	23
4	Was ist digital am Digitalfunk?	25
4.1	Aufbau analoger Funknetze	25
4.2	Reichweite des analogen Sprechfunks	27
4.3	Relaisstellentechnik	28
4.4	Gleichwellenfunk	30
4.5	Übertragungssicherheit	32
4.6	Datenübertragung im analogen Netz	32
4.7	Übertragung digitaler Daten in BOS-Funk	33
4.8	Modulation	35
4.8.1	Phasenmodulation	36
4.9	Aufbau digitaler Funkgeräte	38
5	Multiplexverfahren	41
5.1	Grundlagen	41
5.2	Frequenzmultiplexverfahren	41
5.3	Zeitmultiplexverfahren	42
6	Verkehrsarten	44
6.1	Duplex oder Halb-Duplex	44

7	Warum Digitalfunk?	47
8	Übertragungsqualität	48
9	Sprachkompression	50
9.1	Grundlagen der Datenkompression	50
9.2	TETRA-Sprachcodec	51
9.3	Grundlagen der Sprachkompression	51
9.3.1	Verlustbehaftete Kompression	51
9.3.2	Sprachcodecs	52
9.4	ACELP-Funktionsprinzip	53
10	Bildung zellularer Netze	55
10.1	Grundlagen	55
10.2	Architektur von GSM-Netzwerken	56
10.3	Architektur von TETRA-Netzen	57
10.4	TETRA-Standard	60
10.5	Systembestandteile	64
10.5.1	Network Management Center (NMC)/Network Operation Center NOC	64
10.5.2	Base Transceiver Station (BTS)	64
10.5.3	Main Switching Center (MSC)	64
10.5.4	Home Data Base (HDB)	65
10.5.5	Visited Data Base (VDB)	65
10.6	Handover	66
11	Netzplanung	68
11.1	Funk-Leistungsbilanz (RF link budget)	68
11.2	Ausbreitungsverluste	69
11.3	Sonstige Dämpfungsfaktoren	69
11.3.1	Gebäudedämpfung	69
11.3.2	Fahrzeuge	69
11.3.3	Körperdämpfung	70
11.3.4	Fadingreserve	70
11.3.5	Antennengewinne	70
11.3.6	Berechnung der Leistungsbilanz	70
12	Adressierung der Endgeräte	71
12.1	TETRA Equipment Identity (TEI)	71
12.2	TETRA Subscriber Identity	71
12.2.1	Mobile Country Code (MCC)	72

12.2.2	Mobile Network Code (MNC)	73
12.3	Short Subscriber Identity (SSI)	73
13	TETRA-Leistungsmerkmale	74
13.1	Statische Gruppenbildung	74
13.2	Dynamische Gruppenbildung	74
13.3	Notruf	75
13.4	Prioritäten	75
14	Trunked Mode Operation (TMO)	76
14.1	TMO-Zielruf/-Einzelruf	77
14.2	TMO-Gruppenruf	77
14.3	Prioritätsruf (Pre-emptive Priority Call)	79
14.4	Einfacher Prioritätsruf	80
14.5	Notruf	80
14.6	Offener Kanal	81
14.7	TMO-Broadcast-Ruf	81
14.8	Ambient Listening	81
14.9	Late Entry	82
14.10	Area Selection	82
15	Direct Mode Operation (DMO)	83
15.1	DMO-Einzelruf	85
15.2	DMO-Gruppenruf	85
15.3	Dual Watch	86
15.4	Managed Direct Mode	86
15.5	DMO-Repeater	87
15.6	DMO-Gateway	89
16	Schnittstellen	90
16.1	TETRA-Luftschnittstelle	91
16.2	TETRA-Burst	95
16.3	Logische Kanäle	96
16.4	Steuerkanäle	97
16.4.1	Signalling Channel (SCH)	97
16.4.2	Access Assignment Channel (AACH)	97
16.4.3	Broadcast Control Channel (BCCH)	97
16.4.4	Stealing Channel (STCH)	98
16.4.5	Common Linearisation Channel (CLCH)	98
16.5	Peripherieschnittstelle/Peripheral Equipment Interface (PEI)	98

16.6	Netzwerk-Management-Schnittstelle	100
16.7	Line Interface	100
16.8	Aufbau des Inter-System-Interface (ISI)	100
17	Sicherheit	101
17.1	Grundlagen	101
17.2	Sicherheitsmechanismen	102
17.3	Grundlagen der Verschlüsselung	104
17.4	Schlüsselmanagement	104
17.5	Gegenseitige Authentifizierung	105
17.6	Authentifizierungsschlüssel	107
17.7	Authentifizierungsschlüssel-Management	108
17.8	Verschlüsselungsalgorithmen	109
17.9	Luftschnittstellenverschlüsselung	109
17.10	Luftschnittstellenverschlüsselung im TMO	110
17.10.1	Punkt-zu-Punkt-Kommunikation	111
17.10.2	Kryptoschlüssel in der Punkt-zu-Punkt-Kommunikation	111
17.11	Gruppenkommunikation	112
17.11.1	Kryptoschlüssel in der Gruppenkommunikation	113
17.12	Luftschnittstellenverschlüsselung im DMO	113
17.12.1	Kryptoschlüssel im DMO	114
17.13	Ende-zu-Ende-Verschlüsselung	114
17.13.1	Kryptoschlüssel in der Ende-zu-Ende-Verschlüsselung	119
17.14	Over The Air Re-Keying	119
17.15	Löschen von Geräten	119
17.16	Angriffsvarianten	121
17.16.1	Verkehrsanalyse	121
17.16.2	Wiedereinspielen von Daten	121
17.16.3	Denial of Service	122
17.16.4	Jamming	122
18	Datenübertragung	123
18.1	Short Data Service (SDS)	124
19	TETRA-Hardware	126
19.1	Aufbau einer TETRA-Mobilstation	126
19.2	Aufbau der Line Station	127
19.3	Aufbau einer TETRA-Basisstation	128
19.3.1	Aufbau einer TETRA-Basisstationsantenne	130
19.4	Aufbau einer mobilen TETRA-Basisstation	131

20	Das deutsche BOS-Netz	132
20.1	BOS-Netz	135
20.2	Alarmierung	138
20.2.1	Iststand	139
20.2.2	Paging	141
20.2.3	Paging im Digitalfunk	142
20.2.4	Anforderungen an ein zukünftiges Funkalarmierungssystem ..	144
20.2.5	Rahmenbedingungen eines Funkalarmierungssystems	145
20.3	BSI – Ende-zu-Ende-Verschlüsselung	146
20.3.1	Hardware der BSI-Verschlüsselung	148
20.4	Betriebskonzept des BOS-Netzes	152
21	Endgeräte	153
21.1	Handfunkgeräte (HRT)	153
21.1.1	EADS	153
21.1.2	Motorola	154
21.1.3	Sepura SRH3800 sGPS	155
21.1.4	Sepura STP8038	156
21.2	Mobilfunkgeräte (MRT)	157
21.2.1	EADS	157
21.2.2	Motorola	158
21.2.3	Sepura SRM(G)3500	159
21.3	Alarmempfänger	160
22	Abkürzungen und Begriffe	161
23	Literatur	176
	Sachverzeichnis	181

1 Aufgaben des BOS-Funks

Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS) betreiben seit den 60er-Jahren ein analoges Sprechfunknetz zur Erfüllung ihrer Aufgaben. Dieses einheitliche Netz gewährleistet eine sichere und schnelle Kommunikation innerhalb der Behörden sowie auch zwischen den einzelnen BOS-Organisationen.

Im Rahmen der europäischen Vereinheitlichung wurde auch das Kommunikationsnetz innerhalb und außerhalb der EU-Polizeibehörden standardisiert. Eine Projektgruppe der *ETSI* wurde ins Leben gerufen, um ein einheitliches Polizeifunknetz für die europäischen Sicherheitsbehörden zu definieren. Das Ergebnis dieser ETSI-Projektgruppe ist der dem europäischen Sicherheitsbehörden Digitalfunknetz zugrunde liegende Standard TETRA 25.

An ein derartiges digitales Funknetz werden besondere Anforderungen gestellt, z. B. in Bezug auf hohe Sicherheit und die Gesprächsaufbauzeiten. Darunter ist der Zeitraum zwischen der Anforderung an einen Kanal und dessen Zuteilung zu verstehen.

Ein besonderes Merkmal des BOS-Funks ist die Fähigkeit zur Gruppenbildung. Bei einem normalen Gespräch erfolgt eine Verbindung zwischen zwei Gesprächsteilnehmern. Funkgespräche erfolgen in der Regel bei BOS zwischen mehreren gleichberechtigten Gesprächsteilnehmern. Eine größere Anzahl gleichberechtigter Gesprächsteilnehmer nimmt also im Wechsel an dem Gespräch teil.

Darüber hinaus ist es erforderlich, dass ein zukünftiges Funknetz der BOS nicht nur in der Lage ist, eine Sprachkommunikation zu ermöglichen, sondern gleichzeitig auch größere Datenmengen übertragen kann. Mit zunehmender Verbreitung der Bürokommunikation auf der Basis von EDV-Systemen ist es auch erforderlich, diese Netze bis zu den mobilen Anwendern zu erweitern. Damit muss das geplante Funknetz auch derartige Kommunikation übertragen können.

2 Physikalische Grundlagen

2.1 Elektromagnetische Wellen und elektrische Felder

Die Begriffe der *elektromagnetischen Wellen* und des *elektrischen Feldes* hängen unmittelbar zusammen. Fließt durch einen elektrischen Leiter elektrischer Strom, baut dieser um den Leiter ein konzentrisches magnetisches Feld auf. Ändert sich im elektrischen Leiter der Strom oder die Spannung, ändern sich im gleichen Maß das magnetische und das elektrische Feld. Baut sich eines der Felder ab, kann die darin enthaltene Energie nur in die Form des jeweils anderen Feldes umgewandelt werden. Die Nähe eines zusammenbrechenden elektrischen Feldes erzeugt demnach ein magnetisches Feld und umgekehrt. Dieser physikalische Zusammenhang ist der Grund dafür, dass sich die geschlossenen Feldlinien wellenförmig in den Raum ausbreiten. Wenn sich ein solcher Vorgang in gleicher Weise immer wiederholt, bezeichnet man ihn als *periodischen Vorgang* beziehungsweise als *kompletten Ablauf einer Periode*.

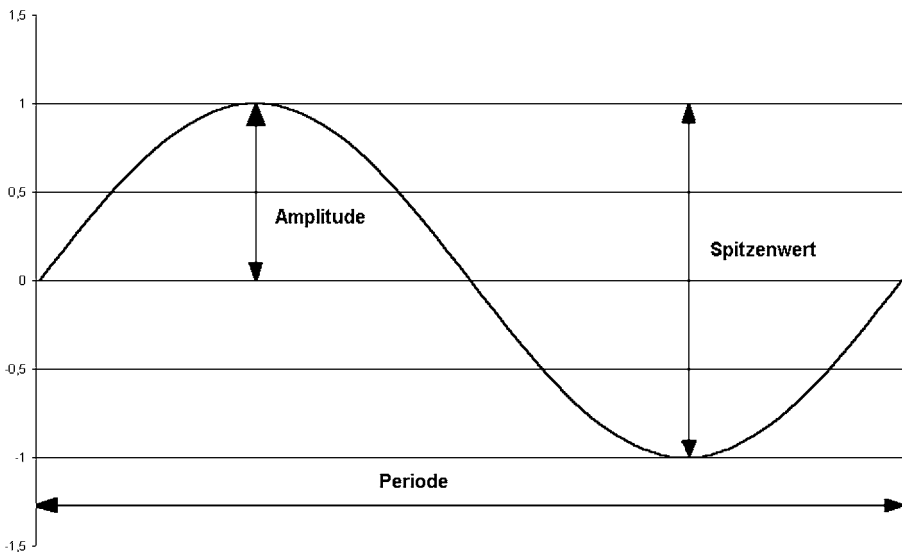


Abb. 2.1: Signalverlauf

Die Zeit, die zum Ablauf einer solchen Periode notwendig ist, bezeichnet man als *Periodendauer*. Die Zahl der Perioden in einer Sekunde nennt man *Frequenz*. Den gesamten Zyklus vom Aufbau eines Feldes sowie dem Wechsel der Feldrichtung in die entgegengesetzte Richtung bis zur Rückkehr in die Nulllage bezeichnet man als *Welle*. Der Maximalwert einer Schwingung, der Scheitelwert, ist eine *Amplitude*, der Abstand zwischen negativem und positivem Scheitelwert ein *Spitzenwert*. Der zeitliche Verlauf eines solchen Feldes kann unterschiedliche Formen annehmen. Unter den vielen möglichen Kurvenformen nimmt die Sinusform eine gewisse Sonderstellung ein. Viele Schwingungsvorgänge in der Natur verlaufen sinusförmig, z. B. Federschwingungen oder eben auch Schwingungen elektromagnetischer Wellen.

Dies war eine der wesentlichen Erkenntnisse von Heinrich Hertz. Nach ihm wurde daher auch die Maßeinheit für die Änderung des Feldes, die Frequenz, in *Hertz* benannt.

Die enge Verknüpfung von elektrischem Feld und elektromagnetischen Wellen wird umso deutlicher, je schneller die Feldänderung erfolgt, je höher also die Frequenz ist. Der Begriff der elektromagnetischen Wellen wird daher in der Regel im hochfrequenten Bereich verwendet. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen ist im Vakuum am größten und für alle Frequenzen gleich. Sie entspricht der Lichtgeschwindigkeit von 300.000 Kilometern pro Sekunde. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit in Materie ist kleiner und hängt von deren magnetischen und dielektrischen Eigenschaften ab.

Die elektromagnetischen Wellen transportieren Energie. Diese setzt sich aus Anteilen der elektrischen und der magnetischen Feldkomponente zusammen. Während in Niederfrequenzbereich im Wesentlichen die magnetische Induktion von Bedeutung ist, steht im hochfrequenten Bereich die magnetische Feldstärke im Vordergrund. Die Maßeinheit für die Feldstärke ist *Volt pro Meter* (V/m bzw. $\mu V/m$). Wird die Feldstärke in Form der Empfangsleistung betrachtet, wird der Wert in Dezibel (dBm bzw. $dB\mu V/m$) angegeben. Beim Durchgang elektromagnetischer Wellen durch Materie wird Strahlungsenergie absorbiert und dadurch die Stärke des Feldes vermindert. Die Amplitude der Welle nimmt also mit zunehmender Absorption kontinuierlich ab. Diese Abnahme wird als Dämpfung bezeichnet.

Das Abstrahlverhalten einer Strahlungsquelle ist im Wesentlichen vom Verhältnis der Antennenlänge zur Wellenlänge abhängig. Theoretisch strahlt eine ideale Antenne kugelförmig in den Raum ab. Ist die Antenne wesentlich kürzer als die Wellenlänge, bezeichnet man eine solche Antenne als *Dipolantenne*. Aufgrund dieser Ausbreitungseigenschaften nimmt die Feldstärke mit dem Quadrat der Entfernung ab. Diese Tatsache in Verbindung mit der Absorption der Energie der elektromagnetischen Wellen in Materie, wie z. B. Luft, bedingt die begrenzte Reichweite eines Senders.

2.2 Dezibel

Durch die Dämpfung des elektrischen oder magnetischen Feldes bei der Ausbreitung in Materie nimmt die Amplitude des Signals mit zunehmender Entfernung von der Quelle kontinuierlich ab. Über eine bestimmte Entfernung besteht ein von der Dämpfung abhängiges Verhältnis der Signalamplitude. Zur einfacheren Darstellung dieser Amplitudenverhältnisse verwendet man in der Elektrotechnik das Verhältnismaß *Dezibel*. Setzt man z. B. die Ausgangsspannung eines Systems zu seiner Eingangsspannung ins Verhältnis, bekommt man einen Zahlenwert, den sogenannten Verstärkungsfaktor. Eine Verstärkung liegt verständlicherweise nur vor, wenn das Ausgangssignal größer als das Eingangssignal ist. Im umgekehrten Fall spricht man von Dämpfungsfaktor.

Der Logarithmus der Faktoren für Verstärkung oder Dämpfung ergibt die Einheit *Bel*. Multipliziert man diesen Logarithmus mit der Zahl 10, erhält man das *Dezibel*.

Die Einheit Dezibel wird nicht nur für das Verhältnis von Spannungen, sondern auch von Strom, Leistungen oder Verstärkung eingesetzt. Diese zunächst scheinbar unsinnige Verhältniszahl erleichtert die Berechnung von mehreren hintereinandergeschalteten Übertragungsgliedern eines Systems erheblich. So müssen lediglich die Verstärkungen der einzelnen Glieder addiert beziehungsweise Dämpfungen subtrahiert werden, um die Gesamtverstärkung zu bestimmen.

2.3 Frequenzabhängige Ausbreitungseigenschaften

Die Ausbreitungseigenschaften elektromagnetischer Wellenstrahlung sind primär von der Frequenz abhängig.

Der Frequenzbereich elektromagnetischer Wellenstrahlung reicht von einigen Hertz bis in den Bereich der Röntgenstrahlung mit einer Frequenz im Gigahertzbereich und einer Wellenlänge von wenigen Nanometern. Praktisch das gesamte Frequenzspektrum findet technisch seine Anwendung. Für den Bereich der Funkübertragung beginnt der technisch nutzbare Bereich bei der Anwendung von Längswellen. Dieser Bereich beginnt etwa bei 10 kHz. Bei dieser Frequenz liegt die Wellenlänge bei mehreren Kilometern. Die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen wird bei dieser Frequenz durch die Leitfähigkeit des Erdbodens und der Ionosphäre bestimmt. Da die Wellen insgesamt nur einer relativ geringen Dämpfung unterliegen, erzielt man mit Längswellen große Reichweiten. Im Vergleich zu höheren Frequenzen dringen Längswellen sogar tief in das Seewasser ein und ermöglichen so Verbindungen zu getauchten Unterseebooten. Aufgrund der relativ hohen Dämpfung durch die Leit-

fähigkeit des Erdbodens sind für Verbindungen in diesen Bereich extrem leistungsfähige Sender notwendig. Gleichzeitig werden aufgrund der großen Wellenlänge riesige Antennenanlagen benötigt. Im Bereich der Langwellensender (bis 50 kHz) liegen Sender wie der Zeitzeichensender in Mainflingen. Der Langwellenbereich bis etwa 150 kHz wird für die Funknavigation eingesetzt. In dem darüberliegenden Frequenzband findet der Langwellen-Rundfunkdienst seine Sender. Daran schließen sich die Mittelwellensender an. Die Reichweite elektromagnetischer Wellen ist abhängig von der Frequenz. Bei gleichbleibender Sendeleistung gilt in Bodennähe für die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen: Mit höheren Frequenzen nimmt die Reichweite kontinuierlich ab. Dies liegt an der frequenzabhängigen Dämpfung. Da die Wellenlänge und damit auch die Antennenlänge mit zunehmender Frequenz abnimmt, erhöht sich damit zwangsläufig auch die Dämpfung.

Im Bereich bis ca. 150 MHz spielt die Reflexion an der Ionosphäre für die Ausbreitung eine erhebliche Rolle. Insbesondere für den Kurzwellenbereich ermöglicht diese Reflexion eine Ausbreitung der Funkwellen um den gesamten Globus.

In dem Frequenzbereich, der derzeit für den Behördenfunk eingesetzt wird (85 bis 160 MHz, Ultrakurzwellen), spielt die Reflexion an der Ionosphäre keine Rolle. In diesem Frequenzband spricht man von der *quasioptischen Ausbreitung*. Zudem findet bei diesen Frequenzen eine Absorption der elektromagnetischen Wellen durch den Erdboden statt. Für eine ausreichende Reichweite ist es daher erforderlich, die Sendeantennen entsprechend hoch über dem Erdboden anzubringen.

Neben der Sendeleistung ist auch die Höhe der Antenne über den Erdboden für die Reichweite entscheidend. So beträgt z. B. die Sichtweite (optischer Horizont) von einem 100 Meter hohen Sendemast wegen der Erdkrümmung nur etwa 40 Kilometer. Somit lässt sich auch durch Erhöhung der Sendeleistung keine größere Reichweite erzielen.

Elektromagnetische Wellen in diesem Frequenzbereich werden von Materie wie Bergen und Bauwerken so stark absorbiert, dass hinter solchen Hindernissen ein Funkempfang nicht mehr möglich ist. Man spricht vom sogenannten *Funkschatten*. Auch bei der Ausbreitung in Luft tritt eine Dämpfung ein. Sie wird *Freiraumdämpfung* genannt.

Wenn auch eine Reflexion an der Ionosphäre nicht stattfindet, kommt es im Bereich der Ultrakurzwellen ebenfalls zu Reflexion und zur Beugung. Unter *Beugung* versteht man die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen hinter abgeschatteten Objekten. Hierbei ist es möglich, Funkwellen auch hinter großen Gebäuden zu empfangen. Bedingt durch Beugung und Reflexion kann es zum *Mehrwegempfang* kommen. Dabei werden von der Antenne des Empfängers sowohl auf direktem als

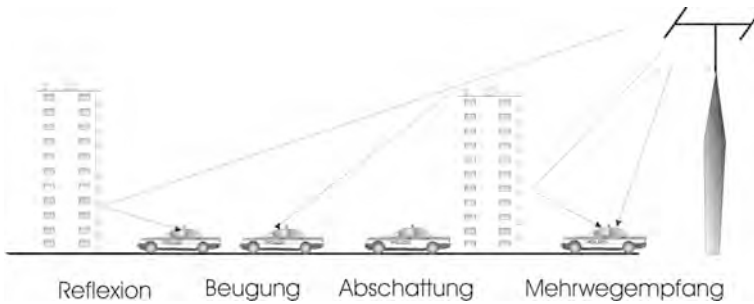


Abb. 2.2: Ausbreitungseigenschaften

auch auf indirektem Weg die Funkwellen empfangen. Die reflektierten oder gebeugten Funksignale treffen aufgrund des längeren Wegs etwas später am Empfänger ein. Somit wird ein Signal mit geringer Verzögerung zwei Mal empfangen. Dieser Effekt ist Fernsehzuschauern als „Geisterbilder“ bekannt. So wie beim Fernsehen führen diese Effekte auch im Sprechfunk zu Störungen.

9 Sprachkompression

9.1 Grundlagen der Datenkompression

Die Speicherung, Übermittlung und Bearbeitung von Daten benötigt Zeit und Speicherplatz. Eine Reduzierung der Datenmengen bedeutet somit eine Einsparung von Zeit und damit Kosten. Eine Verdichtung der Daten, eine *Kompression*, erscheint daher sinnvoll, wobei dabei kein Datenverlust auftreten soll.

Betrachtet man digitale Daten, sind sie letztlich eine Abfolge von 0 und 1, wobei die Abfolge beider Daten rein zufällig erscheint. Abhängig von der Art der codierten Daten ist diese Abfolge aber nicht zufällig. So ist z. B. der Datenstrom eines Faxdokuments eine Abfolge der schwarzen und weißen Pixel auf dem Originaldokument bei zeilenweiser Abtastung. Hier repräsentiert die 0 ein weißes Pixel und die 1 ein schwarzes. Betrachtet man nun ein normales Textblatt, ist offensichtlich der Anteil der weißen Pixel, die zur Übertragung dieses Textdokuments mittels Fax übermittelt werden müssen, erheblich größer als der der schwarzen. Folglich wird der Strom der Daten im Wesentlichen aus einer Abfolge von Nullen bestehen. Was liegt folglich näher, als lange Abfolgen weißer Pixel bzw. die sie repräsentierenden Nullen im Datenstrom zusammenzufassen? Wird nun diese Abfolge von Nullen entsprechend codiert (z. B. eine Abfolge von 10 aufeinanderfolgenden Nullen durch eine 10 dargestellt wird), ist es möglich, später die ursprünglichen Daten originalgetreu zu rekonstruieren. Bei dieser Art der Kompression spricht man von einer *verlustfreien Kompression*.

Je nach Art der Daten ist es unter Umständen nicht zwingend erforderlich, die ursprünglichen Daten zu 100 Prozent exakt zu rekonstruieren. Dies gilt z. B. für Bilddateien. Aufgrund der hohen Informationsdichte, die beispielsweise in einem Farbbild mit großer Auflösung steckt, geht der Informationsgehalt nicht verloren, wenn geringfügige Abweichungen vom Original bei der Rekonstruktion aus komprimierten Daten auftreten. So werden bei einem Farbbild bis zu mehrere Hunderttausend Farbstufen pro Bildpunkt abgespeichert. Infolge der hohen Auflösung können Flächen, die dem Auge als einheitliche Farbe erscheinen, bei der Digitalisierung geringe Farbstufenabweichungen ergeben. Würde diese Fläche mit dem oben beschriebenen verlustfreien Kompressionsverfahren bearbeitet, würde jedes Pixel einen eigenen Farbwert erhalten, der sich aber nur minimal von seinem benachbarten Farbwert unterscheidet. Eine Datenreduktion ist somit nicht möglich. Wird jedoch hingenommen, dass leichte Abweichungen zwischen Original und Repro-

duktion zugelassen sind, ließe sich, bei Angleichung ähnlicher, beieinanderliegender Farbwerte und entsprechend komprimierter Speicherung dieser dann gleichen Werte eine erhebliche Reduzierung der Datenmengen erreichen. Eine solche Datenkompression wird als *verlustbehaftete Kompression* bezeichnet.

Die Anwendung dieser einzelnen Verfahren setzt jedoch voraus, dass bekannt ist, welcher Art die zu komprimierenden Daten sind.

9.2 TETRA-Sprachcodec

Bei dem TETRA-System liegt die übertragene Sprache in digitalisierter Form vor. Das ist vergleichbar mit einer Musik-CD, die die darauf befindliche Musik ebenfalls in digitaler Form gespeichert hat. Das von der Musik-CD bekannte Verfahren der Digitalisierung ist als Grundlage für die Übertragung der Sprache im TETRA-Funk vollkommen ungeeignet.

Bei GSM werden die analogen Signale des Gesprächs digitalisiert und in Daten umgewandelt. Die Menge an Daten hängt von zwei Parametern ab: *Bandbreite* und *Abtastrate* (Samplingrate). Die Bandbreite ist der Tonhöhenumfang, der beim menschlichen Gehör von 16 Hz bis 20 kHz reicht. Die *Samplingrate* gibt an, wie oft pro Sekunde eine Probe genommen wird. Dabei können große Datenmengen zusammenkommen: Die Entwickler von Sprachcodierung unterscheiden drei Stufen der zu komprimierenden Signale: Telefonsignale mit einer Bandbreite von 0,3 bis 3,4 kHz und einer Samplingrate von 8 kHz führen zu einer Datenrate von 64 kbit/s; Breitbandsprache (auch als *Radioqualität* bezeichnet) hat eine Bandbreite von 0,05 bis 7 kHz und eine Samplingrate von 16 kHz, was zu einer Datenrate von 224 kbit/s führt; und schließlich allgemeine Audiosignale (auch als *CD-Qualität* bezeichnet) mit einer Bandbreite von 0 bis 20 kHz (also den gesamten hörbaren Tonumfang) und einer Samplingrate zwischen 32 und 48 kHz.

9.3 Grundlagen der Sprachkompression

9.3.1 Verlustbehaftete Kompression

Die meisten Algorithmen versuchen nicht, den mathematischen Fehler zu reduzieren, sondern die subjektive menschliche Wahrnehmung der Tonfolgen zu verbessern. Da das menschliche Ohr nicht alle Information eines ankommenden Tons analysieren kann, ist es möglich, eine Sounddatei stark zu verändern, ohne dass die subjektive Wahrnehmung des Hörers beeinträchtigt wird. So kann ein Codec z. B.

einen Teil der sehr hohen und sehr tiefen Frequenzen (die für Menschen fast unhörbar sind) weglassen. Auf ähnliche Weise werden Frequenzen, die durch andere Frequenzen überlagert sind, mit geringerer Genauigkeit wiedergegeben. Eine andere Art der Überlagerung ist, dass ein leiser Ton nicht erkennbar ist, wenn er unmittelbar vor oder nach einem lauten Ton kommt.

Aufgrund der Natur der verlustbehafteten Algorithmen verschlechtert sich die Qualität, wenn eine solche Datei komprimiert und anschließend wieder dekomprimiert wird (Generationsverluste). Dies macht verlustbehaftete Dateien ungeeignet für Anwendungen in professionellen Tonbearbeitungsbereichen. Im Bereich der Sprachdatenübertragung spielt die verlustbehaftete Kompression eine wichtige Rolle.

Eine Musik-CD enthält ca. 720 MB an Daten. Diese Daten entsprechen einer Musikwiedergabe von ca. 70 Minuten Stereo. Die Audiodaten werden mit einer Abtastrate von 44,1 kHz, 16-Bit-Samples (little endian) und 2 Kanälen (erst links, dann rechts) aufgezeichnet; die Datenrate einer Audio-CD liegt daher bei 1.411.200 bit/s oder ca. 1,5 Mbits/s. Die Brutto-Datenrate eines TETRA-Funkkanals reicht um ein Vielfaches nicht aus, den Datenstrom einer Musik-CD zu transportieren. Es ist ein Codierungsverfahren erforderlich, das die Datenrate deutlich unter 5 kBit/s reduziert.

9.3.2 Sprachcodecs

Die Aufgabe, eine entsprechend leistungsfähige Datenreduktion bei gleichzeitig akzeptabler Sprachqualität zu realisieren, übernehmen *Codecs*. Bei den Codecs unterscheidet man *Waveform-* sowie *Source-Codecs*. Während die Waveform-Codecs bis zu einer Datenreduktion auf bis zu 16 kBit/s eine gute Sprachqualität erzeugen, führt eine weitere Reduktion bei ihnen zu einer erheblichen Verschlechterung der Sprachqualität. Für die im TETRA-Funk erforderliche Datenreduktion sind diese Codecs daher nicht geeignet. Im Gegensatz dazu gelingt mit der Verwendung von Source-Codecs eine Datenreduktion auf bis zu 2,4 kBit/s und gegebenenfalls sogar darunter. Diese Codecs liefern aber eine äußerst schlechte Sprachqualität. Sie sind damit für eine Verwendung in Mobiltelefonen, die auch eine Sprachverständigung in rauer Umgebung erfordern, nicht geeignet. Daher verwendet man in diesen Geräten *Hybrid-Codecs*. Ein Hybrid-Codec ist eine Kombination aus den beiden oben genannten Codec-Typen. Er verbindet die hohe Datenreduktionsrate des Source-Codecs mit der relativ hohen Sprachqualität des Waveform-Codecs. Ein solcher Hybrid-Codec ist das im TETRA-Funk verwendete ACELP-Verfahren.

ACELP ist die Abkürzung von *Algebraic-Code-Excited Linear Prediction* (auf Deutsch etwa „Durch algebraische Regeln angeregte, lineare Vorhersage“). Bei

ACELP handelt es sich um ein von der kanadischen Firma VoiceAge entwickeltes Codierverfahren (Codec) für die digitale Sprachübermittlung mit einer Datenübertragungsgeschwindigkeit von 4 bis 16 kBit/s.

9.4 ACELP-Funktionsprinzip

Sprachkompression nutzt für die Datenreduktion der Sprache die Tatsache, dass zeitlich aufeinanderfolgende Signalabtwerte eine gewisse statische Abhängigkeit zueinander haben. Manche Vokale werden z. B. sehr lang gesprochen (der See). Es gibt auch Abhängigkeiten bezüglich des menschlichen Sprachkörpers, sodass aus einem Signalwert „Vorhersagen“ (lineare Prädiktion) gemacht werden können, welche Werte die nächsten Abtwerte höchstwahrscheinlich haben werden. Das Sprachsignal ist sozusagen mit einem Kurzzeit- und einem Langzeitgedächtnis behaftet, weshalb der Codierer auch eine Kurzzeit- und eine Langzeitanalyse des Sprachsignals vornimmt.

Sprachcodierverfahren arbeiten mit speziellen, für die Umsetzung von Sprache optimierten Codecs. Diese basieren in der Regel auf *Linear-Predictive-Coding*(LPC)-*Verfahren*, die den menschlichen Sprachkanal als ein System von Röhren mit unterschiedlichen Durchmessern modellieren. Man hat festgestellt, dass eine menschliche Stimme im Wesentlichen aus vier schmalen Frequenzbändern besteht (Langzeitgedächtnis), die mit vier verschiedenen Resonanzräumen des menschlichen Körpers korrespondieren. Man kann gewisse Spracheigenheiten (Kurzzeitgedächtnis), wie z. B. Zischlaute oder eine „Raucherstimme“, mit vier verschiedenen parametrisierten Rauschquellen synthetisch erzeugen. Welche Frequenzlage die vier Resonanzfrequenzen haben und wie die Parameter der vier Rauschquellen definiert sind, macht letztendlich den individuellen Klang der Stimme von Mensch zu Mensch aus.

All diese Untersuchungen bezüglich diverser Parameter der menschlichen Stimme wurden in einem *Codebuch* zusammengetragen, das für die synthetische Generierung eines Sprachsignals Verwendung findet. Darüber hinaus verwendet der Codierer auch ein adaptives Codebuch, dessen Parameter sich während des Codierens auf das Sprachsignal „einstellt“, um die Rauschteile des Sprachsignals perfekt darstellen zu können.

Die Sprachcodierung versucht nun, den menschlichen Stimmapparat durch mathematische Modelle zu emulieren. In diesen werden die akustischen Wellen von den Stimmbändern stimmhaft oder stimmlos generiert. Beim Durchlaufen durch das System kommt es an Übergängen von Röhren unterschiedlichen Durchmessers zu Reflexionen und Interferenzen. Die jeweilige Reflexionsrate repräsentieren dabei die

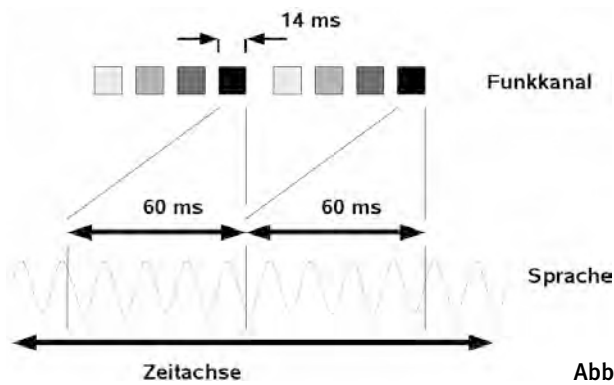


Abb. 9.1: Sprachkompression

Reflexionskoeffizienten. Auf diesem Weg lässt sich mit einer relativ kleinen Zahl von Parametern die sprecherabhängige Erzeugung des Sprachklangs beschreiben.

Für jeden Rahmen codiert und überträgt CELP dann den *Codebook-Index* sowie die *lpc-Parameter*. Man bezeichnet diese Vorgehensweise auch als *Analysis-by-Synthesis*, wobei das rekonstruierte Signal weitgehend dem Ursprungssignal gleicht. *Algebraische CELP-Varianten* (ACELP) ergänzen das Verfahren um erweiterte Kompressionsmethoden zur Bandbreitenreduzierung.