

# Mobilfunk – Innovationsmotor für die digitale Informationsübertragung

2013 wird es auf der Erde wohl mehr Mobilfunkgeräte als Menschen geben. Das große Interesse hat in den letzten 30 Jahren nicht nur die Entwicklung neuer Technologien zur Nachrichtenübertragung wesentlich beschleunigt, sondern auch viele theoretische Erkenntnisse bewirkt, die wiederum enorme Fortschritte in der digitalen Kommunikation nach sich zogen.

VON JOACHIM HAGENAUER UND JOHANNES HUBER

## 30 Jahre digitaler Mobilfunk – eine Erfolgsgeschichte

Die mobile Telefonie war in Europa vor 1990 recht uneinheitlich organisiert: Es existierten fünf verschiedene, inkompatible Systeme nebeneinander. Die Nutzung in Deutschland war im Wesentlichen auf Geschäftsleute beschränkt, da die Investitions- und Betriebskosten sehr hoch waren. Bei einer Reise von Stockholm nach Neapel hätte man damals vier verschiedene Handys mit sich führen müssen, um überall mobil telefonieren zu können. Die Vereinigung der europäischen Postverwaltungen hatte, die weitere Entwicklung voraussehend, bereits 1982 die „Groupe Spéciale Mobile“ (GSM) gegründet, mit der Aufgabe, ein neues, digitales Mobilfunksystem für Europa zu konzipieren. 1991 wurden die ersten Testgeräte auf der Ausstellung „Telecom 91“ in Genf vorgeführt: unförmige Kästen, die im Auto den halben Kofferraum ausfüllten.

Der beispiellose Erfolg von GSM beruht wesentlich darauf, dass der aktuelle Stand der Wissenschaft in der Informations- und Kommunikationstechnik ohne große Rücksicht auf die damaligen Implementierungsmöglichkeiten von der Theorie in die Praxis umgesetzt wurde. Niemand sah zu dem Zeitpunkt voraus, dass diese Geräte einst weltweit benutzt werden und sich zu dem heute üblichen Kleinformat entwickeln würden (Abb. 1). Der Standard GSM, mittlerweile umbenannt in „Global System for Mobile Communications“,

wird heute von etwa 5 Milliarden Teilnehmern in über 800 GSM-Mobilfunknetzen in rund 200 Ländern der Welt genutzt; dies entspricht einem Anteil von etwa 80 Prozent aller Mobilfunkkunden. Neben dem europäischen GSM-Standard und seinen Nachfolgern UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) und LTE (Long Term Evolution [of UMTS]) gibt es weitere Standards, die in den USA und Japan entwickelt wurden, jedoch weniger erfolgreich sind.

## Innovationen in der Sprach-, Bild- und Datenkompression

Das GSM-Mobilfunk-System wurde ursprünglich hauptsächlich für die Sprachübertragung konzipiert. Um die auf 4 kHz beschränkte analoge Telefonsprache im digitalen Mobilfunk zu übertragen, wird diese abgetastet und quantisiert, also digitalisiert. Die digitalisierte Sprache hat eine Datenrate von 104 kbit/s und muss anschließend für eine effiziente Übertragung auf 13 kbit/s bzw. sogar auf 6,5 kbit/s komprimiert werden. Man entwickelte dazu das Verfahren der „Analyse durch Synthese“, bei dem Signalabschnitte von jeweils 20 Millisekunden Dauer basierend auf Modellen der menschlichen Stimmbildung synthetisiert werden. Die Parameter der Synthese werden dabei so optimiert, dass der aktuelle Ausschnitt aus dem Sprachsignal möglichst gut





angenähert wird. Ein Standardverfahren hierfür ist das „Codebook excited linear prediction (CELP)“-Verfahren, bei dem die Sprachformung im Kehlkopf durch typische Anregungsformen und Filterparameter nachgebildet wird. Nur diese Form- und Filterparameter werden dann digital codiert übertragen. Auf der Empfangsseite wird aus den übertragenen Parametern die Sprache wieder synthetisiert. Die Entwicklung dieses Verfahrens gelang nur durch die enge Zusammenarbeit von Akustikern, Sprachpsychologen und Digitalexperten sowie mit Hilfe umfangreicher Hörversuche.

Beim neueren „Adaptive Multirate (AMR)“-Sprachcodec geht man sogar noch einen Schritt weiter: Da sowohl die Sprache als auch der Mobilfunkübertragungskanal hochdynamische Prozesse sind, verändert man die Sprachdatenrate für 20 Millisekunden-Abschnitte zwischen 5,15 kbit/s und 12,2 kbit/s.

Weil die Datenübertragungsraten im Mobilfunk eingeschränkt sind, wurden in der Forschung auch die Kompressionstechniken für Bilder und

Videos erheblich vorangetrieben. So werden bei der Übertragung von Bildern im JPEG- und MPEG-Verfahren nur für das menschliche Auge wichtige Komponenten verwendet, die Quantisierung wird nach Bedarf angepasst. Bei Bewegtbildern werden statische Anteile nur einmal übertragen und nachfolgend nur noch die veränderlichen Anteile. Diese Techniken, die ursprünglich für den Mobilfunk entwickelt wurden, sind inzwischen auch in der Festnetzübertragung und in der Speichertechnik eingeführt. Die von C. E. Shannon entwickelte Informationstheorie erlaubt es, absolute Grenzen für solche Kompressionsverfahren anzugeben, an denen praktische Verfahren gemessen werden.

#### Herausforderung Mobilfunkkanal

Der Mobilfunkkanal ist durch rasche zeitliche Änderungen sowie durch Mehrwegeausbreitung gekennzeichnet: Das Funksignal breitet sich einerseits auf direktem Weg zwischen Sender und Empfänger aus und andererseits über Umwege infolge von Reflexionen und Streuungen, etwa an Gebäuden, Bewuchs, gebirgigen Erhebungen etc. Bestehen z. B. für relevante Ausbreitungspfade Längendifferenzen von 4 km, was typischerweise in gebirgigen Regionen auftritt, so beträgt die

**Abb. 1: Rasante Entwicklung: Vom „mobilen Fernsprechapparat“ (1991) zum Preis von mehr als 3.000 D-Mark zu den kleinen, kostengünstigen Geräten für die Hosentasche.**

**DIE AUTOREN**

**Prof. Dr.-Ing. Joachim Hagenauer** ist ehem. Ordinarius für Nachrichtentechnik an der TU München. Mit seinen Forschungen hat er maßgeblich zur Entwicklung leistungsfähiger Verfahren zur Codierung und Decodierung von Signalen in Übertragungssystemen beigetragen. Er ist Vorsitzender der Kommission BAdW Forum Technologie.

**Prof. Dr.-Ing. Johannes Huber** hat den Lehrstuhl für Informationsübertragung an der Universität Erlangen-Nürnberg inne und ist Mitglied der Kommission BAdW Forum Technologie. Er forscht zu vielfältigen Aspekten der modernen digitalen Nachrichtenübertragung, im Mittelpunkt seiner Arbeit stehen informations- und signaltheoretische Grundlagen zur Entwicklung hocheffizienter Kommunikationssysteme.

Beide Autoren sind Mitglieder der Bayerischen Akademie der Wissenschaften.

hierdurch hervorgerufene zeitliche Dispersion des Signals ca. 14 Millisekunden. Dies entspricht aber bereits einem Vielfachen der Dauer eines Informationssymbols. Durch Mehrwegeausbreitung entstehen zudem örtliche Interferenzmuster, die bereits bei einer Ortsveränderung eines Mobiltelefons von wenigen Zentimetern zu starken Änderungen der Übertragungseigenschaften führen. Bewegt sich z. B. ein Fahrzeug mit einer Geschwindigkeit von 180 km/h, so bedeutet dies, dass die empfangsseitige Schätzung der Übertragungseigenschaften mehr als 10.000 Mal pro Sekunde aktualisiert werden muss.

### Innovationen in der Übertragungstechnik: das Beispiel Signalentwurf

Beim Mobilfunk der zweiten Generation (2G) nach dem GSM-Standard wurde neben dem üblichen Frequenzmultiplex zusätzlich der Zeitmultiplex eingeführt. Dabei werden die Daten von acht Nutzern ineinander verschachtelt übertragen. Dies führt zusammen mit einer Redundanz der Kanalcodierung und Kontrolldaten zu einer Datengeschwindigkeit von 272 kbit/s bei einer Signalbandbreite von 200 kHz. Hierdurch wird eine hinreichende Bandbreite des Signals erreicht, so dass infolge Mehrwegeausbreitung keine Totalauslöschung erfolgen kann, sondern das Signal entzerrbar bleibt.

Bei der dritten Generation (3G) nach dem UMTS-Standard wurde die ursprünglich aus der militärischen Nachrichtentechnik stammende Bandspreiztechnik zusammen mit Codemultiplex (Code Division Multiple Access, CDMA) auf den Mobilfunk übertragen. Die einzelnen Datensymbole werden hierbei durch breitbandige, nutzerspezifische Signatursequenzen repräsentiert. Dadurch ist es möglich, die Signale vieler Nutzer zeitgleich im gleichen Frequenzband zu überlagern. Da trotz unterschiedlicher Signaldämpfungen für eine empfangsseitige Trennung die Einzelsignale mit annähernd gleicher Leistung empfangen werden müssen, wird die Sendeleistung der Mobiltelefone dynamisch sehr schnell auf den jeweils

minimal erforderlichen Betrag geregelt. Das hat positive Auswirkungen auf die Akku-Laufzeit und die Strahlungsbelastung.

Derzeit befindet sich das digitale Mobilkommunikationssystem der vierten Generation (4G) LTE in der Einführungsphase. Hierbei kommt ein Vielträger-Übertragungsverfahren zum Einsatz, d. h. es werden sehr viele, längs der Frequenzachse eng benachbarte Einzelsignale (Orthogonal Frequency Division Multiplex: OFDM) für jeden einzelnen Nutzer verwendet. Mit LTE erreicht der Mobilfunk ähnliche Datengeschwindigkeiten wie leitergebundene Netze, etwa DSL. Mobilfunkkommunikation kann damit maßgeblich zur Versorgung des ländlichen Raumes mit schnellem Internetzugang beitragen.

### Innovationen in der Übertragungstechnik: das Beispiel Entzerrungsverfahren

Die Mehrwegeausbreitung bewirkt eine Überlagerung zeitlich verschobener Kopien des Sendesignals. So entsteht beispielsweise beim GSM-Signal bei Laufzeitdifferenzen von 16 Mikrosekunden eine Überlagerung von Signalen für fünf aufeinanderfolgende binäre Datensymbole. Zur Entzerrung wird die Mehrwegeausbreitung als Codierungsvorgang interpretiert, die Daten werden mittels eines Decodieralgorithmus aus dem verzerrten Signal extrahiert. Zusätzlich wurden Methoden entwickelt, die die Zuverlässigkeit der einzelnen Symbole schätzen. Diese Information wird als sog. „soft-input“ an die Kanaldecodierung weitergegeben. Für das GSM-System konnte zudem Anfang

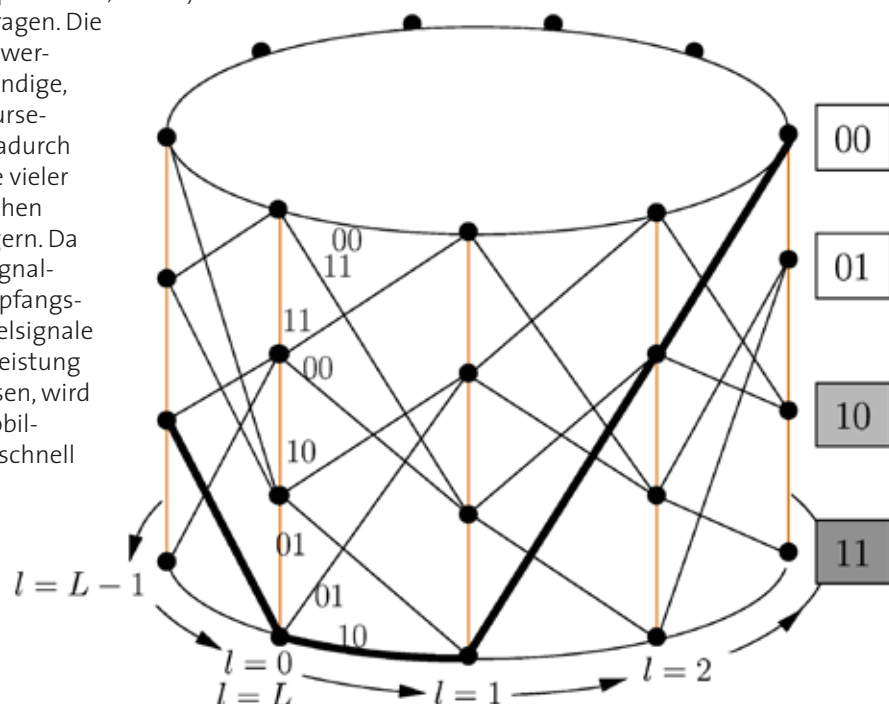
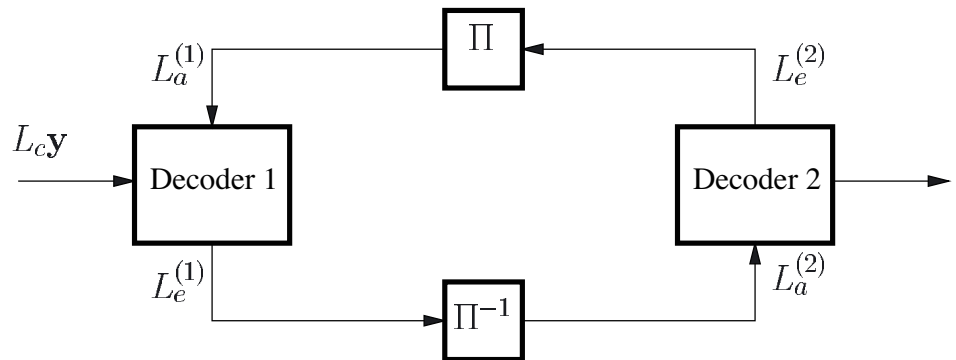


Abb. 2: Spalierdiagramm eines zirkularen Faltungscodes.



des Jahres 2000 unter Nutzung spezieller Eigenschaften des Sendesignals ein Verfahren entwickelt werden, das es durch Software-Update erlaubt, ein weiteres GSM-Signal im gleichen Frequenzband zu unterdrücken (Single Antenna Interference Cancellation, SAIC). So ist es möglich, die Kapazität von GSM-Netzen drastisch zu steigern, da gleiche Frequenzbänder in eng benachbarten Funkzellen wiederverwendet werden können.



**Abb. 3:** Prinzip der Turbo-Decodierung. Beide iterativ arbeitenden Decoder tauschen Zuverlässigkeitsinformationen aus.

### Innovationen in der Fehlersicherungstechnik

Um Übertragungsfehler zu vermeiden, fügt man den komprimierten digitalen Signalen vor der Funkabstrahlung gezielt wieder Redundanz hinzu. So kann man auf der Empfangsseite nicht nur Übertragungsfehler erkennen, sondern auch gleich automatisch korrigieren. Im Mobilfunk ist das unbedingt notwendig, da infolge der schwankenden Funksignaldämpfung und der Interferenzstörungen Fehler häufig und sogar gebündelt auftreten.

Zunächst verwendete man dazu die aus der Satellitenübertragungstechnik bekannten, durch ein Spalierdiagramm darstellbaren Faltungscodes (Abb. 2). Für die Kanaldecodierung gibt Shannons Informationstheorie jedoch prinzipielle Grenzen des Erreichbaren an. An diese Grenzen heranzukommen, war seit 1948 das Ziel vieler Nachrichtentechniker. Da der Mobilfunk nach kleinen Fehlerraten auch bei niedriger Sendeleistung verlangt, wurde die Annäherung an diese Shannon-Grenzen immer dringender. 1993 gelang dann der Durchbruch mit der sog. Turbo-Decodierung, bei welcher der Empfänger zwei Teilcodes in iterativer Weise decodiert (Abb. 3). Für große Blocklängen kann man so die durch Shannon vorgegebenen Grenzen bezüglich der minimal notwendigen Empfangssignalleistung bis auf etwa ein Dezibel erreichen. Ähnliche Erfolge erzielte man durch sog. „Low Density Parity Check“ (LDPC)-Codes. Beide Codierverfahren fanden sogleich Eingang in die Standardisierung.

### Innovationen in der Antennen- und Netztechnik

Seit Mitte der 1990er Jahre wurden Konzepte entwickelt, um bei der Funkkommunikation

durch mehrere Antennen an Sendern und Empfängern den Raum als zusätzliche Ressource zu erschließen, und zwar mit Hilfe des sog. „Multiple-Input-Multiple-Output (MIMO)“-Kanals. Mittels sehr schneller (optischer) Datenverbindungen können so auch Basisstationen, die bis zu mehrere Kilometer voneinander entfernt sind, zu einer großen MIMO-Sende- bzw. Empfangsstation zusammengefasst werden. Hierbei sind allerdings sich sehr rasch ändernde Phasenbeziehungen zwischen Signalen mit einer Genauigkeit von ca. 0,1 Pikosekunden sicherzustellen („Coordinated MIMO“).

### Aktuelle Forschungsthemen: Kooperative Kommunikation und Kooperation von Basisstationen

In der kooperativen Kommunikation, einem der aktuellen Forschungsfelder, wird das Paradigma eines innerhalb einer Funkzelle sternförmigen Mobilfunknetzes aufgegeben, bei dem die Mobiltelefone ausschließlich mit einer oder mehreren Basisstationen verbunden sind, welche der vollen Kontrolle des Netzbetreibers unterliegen. Stattdessen helfen Mobiltelefone bei geringem eigenen Datenaufkommen anderen, fremden Nutzern, die Verbindung zum Hintergrundnetz aufrechtzuerhalten, indem sie zusätzlich Relaisfunktionen übernehmen. Es werden also Daten von Mobiltelefon zu Mobiltelefon weitergereicht, ehe diese zum Zielgerät gelangen. So lassen sich Datensicherheit und -geschwindigkeit verbessern.

Viele praktische Probleme der Koordination von Sendebzw. Empfangssignalen mehrerer Basisstationen zur Erzeugung bzw. Verarbeitung phasenkohärenter Signale an getrennten Orten sind derzeit noch nicht gelöst. Insbesondere die hinreichend schnelle und genaue Schätzung der Übertragungseigenschaften aller aktiven Übertragungswege und der Austausch dieser Daten zwischen allen beteiligten Netzknoten stehen im Mittelpunkt aktueller Arbeiten. ■