Die 4. Generation

Von Armin Dammann und Stefan Kaiser

Mobilkommunikation ist in der Infrastruktur heutiger Gesellschaften nicht mehr wegzudenken. In vielerlei Hinsicht hat sie sich schon zu einem Grundbedürfnis entwickelt. Seit den ersten Anfängen und insbesondere nach dem explosionsartigen Wachstum und Erfolg des derzeit weltweit am weitesten verbreiteten Mobilfunkstandards „Global System for Mobile Communication" (GSM) haben sich Ingenieure zum Ziel gesetzt, mobile Kommunikationssysteme effizienter und für den Endnutzer transparenter zu gestalten. Auch das Institut für Kommunikation und Navigation des DLR in Oberpfaffenhofen ist an Forschung und Entwicklung zukünftiger Mobilfunksysteme beteiligt.

Historie – Von 1G nach 4G

Die Geschichte des Mobilfunks in Deutschland reicht nun schon weit über ein halbes Jahrhundert zurück. In den 20er-Jahren des letzten Jahrhunderts bot die Deutsche Reichsbahn bereits ein öffentliches Zugtelefon an. Anlässlich der Münchner Verkehrsausstellung wurde am 20. Juni 1953 das erste Mobilfunktelefonat von einem VW-Käfer aus geführt. Das mobile Endgerät allein kostete ca. 8.000 DM, eine sehr große Summe im Vergleich zum VW-Käfer, der damals für etwa 5.000 DM zu haben war. Auch hinsichtlich Handhabung, Gewicht und Akkulaufzeit war man zu dieser Zeit weit von dem entfernt, was heute mit dem Begriff „mobil" assoziiert wird. Um gleichzeitig hohe Flächendeckung und Nutzerkapazität zu erreichen, besitzen Mobilfunksysteme (damals und heute) eine zellulare Struktur. Dies bedeutet, dass eine geografische Region von einer so genannten Basisstation abgedeckt wird. Die Kommunikation von Nutzer zu Nutzer geschieht nicht durch eine direkte Funkverbindung zwischen den Mobilteilen. Vielmehr steht jedes dieser mobilen Endgeräte mit der zuständigen Basisstation in Verbindung. Ein Backbone-Netzwerk verbindet diese Basisstationen. Verglichen mit dem 1958 in Betrieb genommenen A-Netz führten bereits

des Mobilfunks

die nachfolgenden B- und C-Netze wichtige Systemeigenschaften wie automatische Gesprächsvermittlung, Routing und Handover, also die automatische Weiterleitung eines Gesprächs beim Wechsel in eine andere Mobilfunkzelle, ein. Alle diese Systeme basierten auf analoger Signalverarbeitungstechnik, was diese erste Mobilfunkgeneration (1G) nicht über ein teures Nischendasein hinauskommen ließ.

Den Durchbruch zur Massenanwendung schaffte der Mobilfunk mit der Einführung des digitalen GSM-Standards, welcher heute als 2. Mobilfunkgeneration (2G) betrachtet wird. 1991 wurde in Deutschland das D1-Netz eingeführt. 1992 folgte mit dem D2-Netz der damaligen Mannesmann Mobilfunk GmbH (heute Vodafone) das erste Mobilfunknetz eines privaten Anbieters. Bereits 1993 war GSM in 30 Staaten weltweit eingeführt. Kurze Zeit später erfolgte die Lizenzvergabe für die so genannten E-Netze (E-Plus, O_2), die den GSM-Standard im 1.800-MHz-Bereich (DCS 1.800) realisieren. Der für die Sprachkommunikation ausgelegte GSM-Standard bietet für die Datenkommunikation eine Datenrate von 9,6 kBit/s, was den Anforderungen in kürzester Zeit nicht mehr gerecht wurde. Standarderweiterungen wie EDGE (Enhanced Data Rates for GSM Evolution), HSCSD (High Speed Circuit Switched Data) oder GPRS (General Packet Radio Service) führen zu einer Erhöhung der Effizienz und der Datenrate.
Um die Datenrate zu erhöhen, werden modifizierte Codierungs- und Modulationsverfahren eingesetzt. Dadurch können Datenraten von bis zu 14,4 kBit/s (HSCSD) bzw. 59,2 kBit/s (EDGE) erreicht werden. Alle diese Datenraten beziehen sich auf einen so genannten Zeitschlitz. Die Übertragung von Sprache und Daten in GSM geschieht im Zeitmultiplexverfahren, das heißt Daten werden in acht periodisch wiederkehrenden Zeitintervallen übertragen. Für ein Gespräch und zur ursprünglich in GSM vorgesehenen Datenübertragung wird genau ein Zeitschlitz verwendet. Die oben genannten Verfahren ermöglichen es, mehrere Zeitschlitze zusammenzufassen.

Die erreichbare Datenrate für den einzelnen Nutzer vervielfacht sich, vorausgesetzt genügend Zeitschlitze stehen zur Verfügung. Damit wird deutlich, dass die Standarderweiterungen den explosionsartig steigenden Datenratenhunger multimedialer Kommunikationsdienste längerfristig nicht stillen können.

Beflügelt durch den Erfolg von GSM startete die Entwicklung einer 3. Mobilfunkgeneration, das Universal Mobile Telecommunications System besser bekannt unter dem Kürzel UMTS. Es ermöglicht Datenraten bis zu 2 MBit/s, zumindest theoretisch. Aber auch dafür müssen die Bedingungen ideal sein, das heißt sehr kleine Mobilfunkzellen und sehr geringe Geschwindigkeit des Mobilteils bzw. des Nutzers. Als realistisch wird eine Datenrate von maximal 384 kBit/s angesehen. Die positiven Erwartungen an ein neues System schlugen sich in Deutschland auch auf die Lizenzkosten nieder. National ist die Bundesnetzagentur – bis 2005 noch Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post – für die Vergabe dieser Lizenzen zuständig. Auf internationaler Ebene entscheidet die World Radio Conference (WRC), die im 2-3-jährigen Rhythmus tagt, über die Zuweisung von Frequenzbändern an die verschiedenen Funkdienste. Veranstalter der WRC ist die International Telecommunication Union (ITU), eine Unterorganisation der Vereinten Nationen.

In einer spektakulären Auktion ersteigerten sechs Mobilfunkbetreiber im August 2000 je eine UMTS-Lizenz, was insgesamt ca. 50 Mrd.€

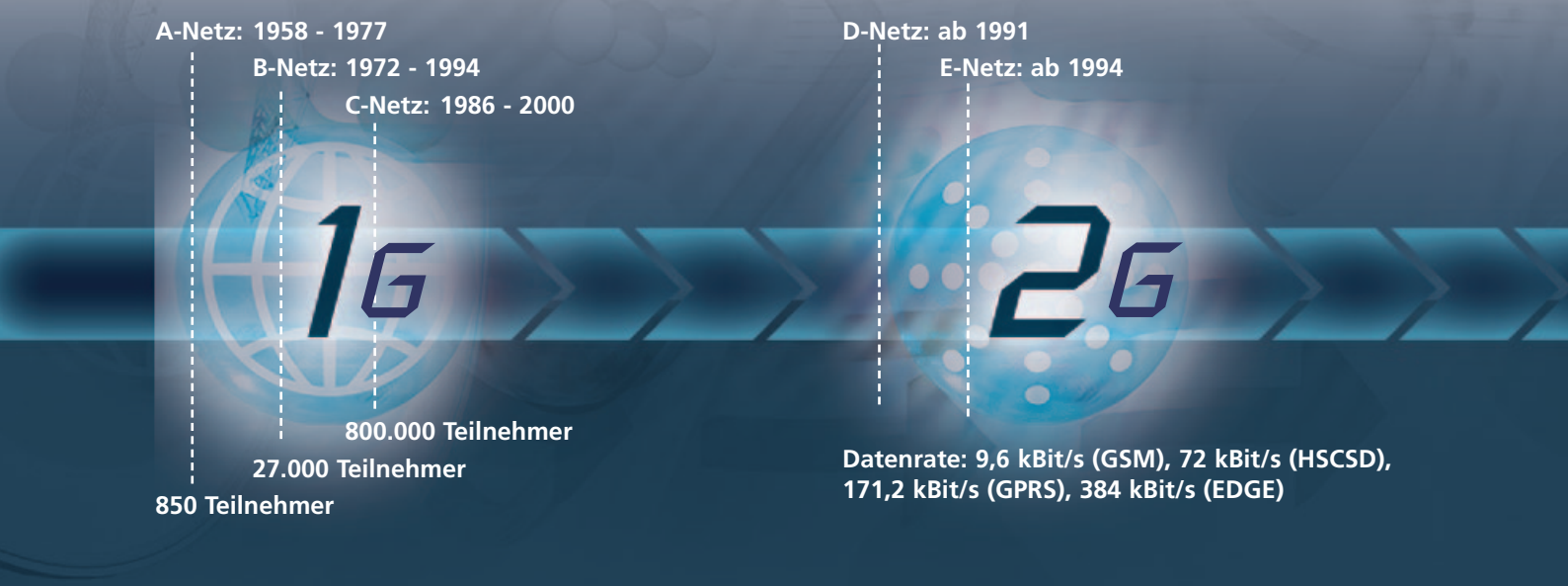
in die Staatskasse spülte. Eine UMTS-Lizenz beinhaltet zwei gepaarte 5-MHz-Frequenzbänder für den Frequency Division Duplex Mode (FDD), in dem die Übertragung der Daten von und zur Basisstation in verschiedenen Frequenzbändern erfolgt. Im Frühjahr 2004 wurden in Deutschland die ersten UMTS-Netze in Betrieb genommen. Bisher jedoch fehlt für UMTS – zumindest in Deutschland – eine sich im Massenmarkt durchsetzende „Killerapplikation", also eine Anwendung, die dieser neuen Technologie zum Durchbruch verhilft. Die Einführung von UMTS schreitet deswegen nur sehr langsam voran. Ende 2005 wurde UMTS von gerade einmal einem Prozent der 74 Millionen Mobilfunkkunden in Deutschland genutzt. Kaum ist UMTS in Betrieb, machen sich Experten aus Industrie, Forschungseinrichtungen und Universitäten auf, eine Nachfolgegeneration zu definieren. Hinter Kürzeln wie „Beyond 3G", „Super 3G", „Long-Term-Evolution" und „4G" verbergen sich weltweite Forschungsaktivitäten zur Weiterentwicklung der Komponenten heutiger Mobilfunksysteme. Eine dieser Komponenten ist die so genannte physikalische Schicht oder Luftschnittstelle, an deren Design und Optimierung das Institut für Kommunikation und Navigation forscht. Ziel der Untersuchungen in diesem Bereich ist die Definition einer Luftschnittstelle, die pro Mobilfunkzelle 100 Mbit/s zur Verfügung stellt, in Hot-Spots – örtlich begrenzte Gebiete mit potenziell hohem Nutzer- bzw. Datenaufkommen – sogar bis zu 1 GBit/s ermöglicht. Die zur Verfügung stehende

4G und die Anforderungen

Bandbreite wird mit maximal 100 MHz angenommen. In welchen Frequenzbändern ein 4-G-Mobilfunksystem betrieben wird, ist ungewiss. Die regulatorischen Randbedingungen unterscheiden sich von Region zu Region so sehr, dass es nahezu unmöglich ist, die gleichen 100 MHz breiten Frequenzbänder weltweit zu identifizieren. Da die Ausbreitungsbedingungen elektromagnetischer Wellen erheblich von der Frequenz abhängen, muss ein 4-G-Systementwurf daher die Flexibilität beinhalten, die geforderten Datenraten bei Trägerfrequenzen von ca. 1 GHz bis 5 GHz bereitzustellen.
Ein wesentlicher Teil der Luftschnittstelle eines Mobilfunksystems ist das Vielfachzugriffsverfahren, das die Art und Weise der Ressourcenaufteilung zwischen den einzelnen Mobilfunkteilnehmern regelt. Bereits 1993 entwickelten Mitarbeiter des Instituts für Kommunikation und Navigation das Vielfachzugriffsverfahren „Multi-Carrier Code Division Multiple Access" (MC-CDMA). Dieses Verfahren verknüpft das Mehrträgermodulationsverfahren OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) mit dem bereits in UMTS verwendeten Codemultiplexverfahren CDMA und vereinigt die Vorteile beider.

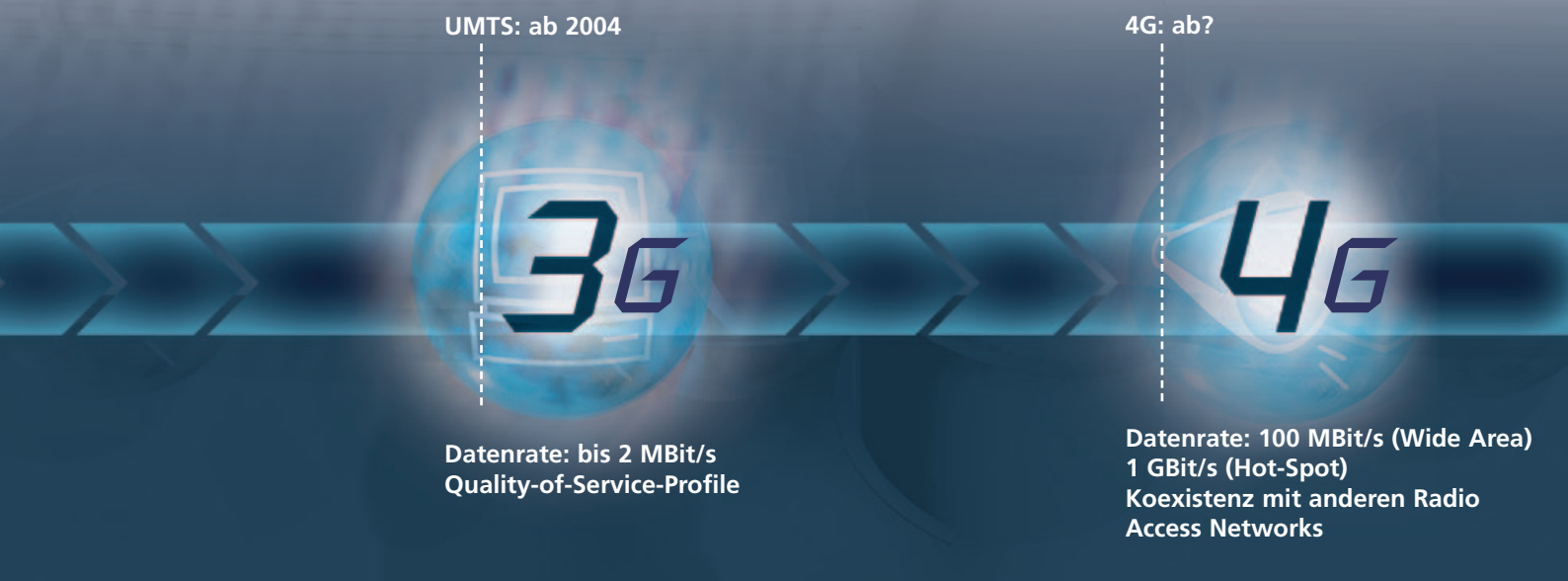
4-G-Forschungsaktivitaeten des Instituts

OFDM ermöglicht eine einfache Kompensation von Mehrwegeausbreitungseffekten. In den seltensten Fällen wird ein Nutzer direkte Sichtverbindung zu einer Basisstation haben; d. h. die elektromagnetischen Wellen erreichen das Mobilteil durch Effekte wie Reflexion, Brechung oder Beugung über mehrere Wege. Diese so genannte Mehrwegeausbreitung führt zu frequenzselektivem Fading (Schwund), da sich durch Laufzeitdifferenzen verschiedene Wellen im Spektrum teils konstruktiv und teils destruktiv überlagern. Dies führt zu Signalverzerrungen, die am Empfänger wieder kompensiert werden müssen, um die im Signal enthaltene Information (Daten) wieder zu extrahieren, d. h. zu demodulieren. Dazu teilt OFDM die zur Verfügung stehende Bandbreite in viele – je nach Systementwurf bis zu einige tausend – Subkanäle, die für sich gesehen, keinem frequenzselektiven



Fading unterliegen und somit eine einfache Demodulation erlauben. OFDM kann auch als Vielfachzugriffsverfahren verwendet werden, indem man den verschiedenen Nutzern verschiedene Subkanäle zuweist. Man spricht hier von Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA). Ein einzelner Nutzer belegt damit aber nur einen Teil der zur Verfügung stehenden Bandbreite. Dies bedeutet eine erhöhte Anfälligkeit gegenüber schmalbandigen Störungen wie z. B. frequenzselektivem Fading. Die gesamte Bandbreite kann durch eine spektrale Spreizung der Daten mittels CDMA und Zuweisung der gespreizten Daten (so genannte Chips) zu den OFDM-Subkanälen ausgenutzt werden. Da die über die einzelnen Subkanäle übertragenen Chips keinem frequenzselektiven Fading unterliegen, können am Empfänger wiederum Algorithmen mit geringer Komplexität verwendet werden. Mit dieser Kombination – MC-CDMA – existiert ein Vielfachzugriffsverfahren, das in der Lage ist, die zur Verfügung stehende Bandbreite flexibel und effizient auszunutzen und deshalb als viel versprechend für den Einsatz in 4G gilt.

Aufbauend auf dem MC-CDMA-Prinzip wird am Institut für Kommunikation und Navigation weiter an Erweiterungen und Verbesserungen gearbeitet. Auf der Empfängerseite werden leistungsfähige Detektions- und Decodieralgorithmen entwickelt, deren Aufgabe es ist, die im Empfangssignal enthaltene Information möglichst fehlerfrei zu extrahieren. Diese Algorithmen basieren auf dem Turbo-Prinzip und generieren neben den Schätzungen für die gesendeten Daten bzw. den aktuellen Kanalzustand auch Zuverlässigkeitsinformation über diese. Die Informationen werden in iterativen Prozessen, d. h. in wiederholten, rückgekoppelten Detektions-/Decodierzyklen ähnlich der rückgekoppelten Nutzung der Abgasenergie in Turbomotoren (daher der Begriff „Turbo“) – weiterverarbeitet. Die Kombination von neuartigen Modulations- und Spreizverfahren mit dafür geeigneten Detektionsprinzipien führt zu weiteren Systemverbesserungen hinsichtlich der erreichbaren Fehlerraten. Dies konnte am Institut z. B. durch die Kombination einer modifizierten Walsh-Hadamard-Spreizung („Rotated Spreading“) mit Multi-User-Detektionsalgorithmen gezeigt werden. Mehrwege-Empfang und Doppler-Effekte haben jedoch nicht nur negative Auswirkungen wie die bereits erwähnte Signalverzerrung,



	Netz	Zeitraum	Frequenzband	Merkmale
1 G	A-Netz	1958 – 1977	156 – 174 MHz	137 Funkzellen, Frequenzmodulation (FM), Handvermittlung, kein Routing, Roaming, Handover, 850 Teilnehmer, max. 10.500 Teilnehmer möglich
	B-Netz	1972 – 1994	146 – 156 MHz	158 Funkstationen, FM, automatische Vermittlung, kein Routing, Roaming, Handover, max. 27.000 Teilnehmer (1986 erreicht)
	C-Netz	1986 – 2000	451,3 bis 455,74 MHz (UL) 461,3 – 465,74 MHz (DL)	175 Funkstationen, Routing, Handover, kein Roaming, max. 850.000 Teilnehmer, Höchststand 1993 ca. 800.000 Teilnehmer.
2 G	D-Netz	Seit 1991	890 – 915 MHz (UL) 935 – 960 MHz (DL)	Routing, Handover, Roaming, Kryptographie zum Abhörschutz, digitale Modulationsverfahren, Sprachkommunikation, Datenraten: 9,6 kBit/s (GSM) bis 57,6 kBit/s (HSCSD) bis 171,2 kBit/s (GPRS) bis 473,6 kBit/s (EDGE)
	E-Netz	Seit 1994	1710 – 1785 MHz (UL) 1805 – 1880 MHz (DL)	Routing, Handover, Roaming, Kryptographie zum Abhörschutz, digitale Modulationsverfahren, Sprachkommunikation, Datenraten: 9,6 kBit/s (GSM) bis 57,6 kBit/s (HSCSD) bis 171,2 kBit/s (GPRS) bis 473,6 kBit/s (EDGE) höhere Granularität (flexible Datenrate nach Bedarf und Netzwerkkapazität), Quality-of-Service Profile
3 G	UMTS	Seit 2004	1920 – 1980 MHz (UL) 2110 – 2170 MHz (DL)	flexible hierarchische Zellstruktur, Datenraten bis 2 MBit/s, höhere Granularität (flexible Datenrate nach Bedarf und Netzwerkkapazität), Quality-of-Service Profile
4 G	–	–	Im Bereich 1 bis 5 GHz Bandbreiten bis zu 100 MHz	hybrides Systemkonzept, Koexistenz mit anderen drahtlosen Netzwerken (Radio Access Networks, RANs), Datenraten: 100 MBit/s (Wide-Area), 1 GBit/s (Hot-Spot)

Die Entwicklung der Mobilfunkkommunikation in Deutschland am Beispiel der implementierten Mobilfunknetze. Die 4. Generation (4G) befindet sich in der Entwicklungsphase. DL: „Downlink"= Übertragung von der Basisstation zur Mobilstation. UL: „Uplink"= Übertragung von der Mobilstation zur Basisstation.

sondern sorgen auch für eine erwünschte Diversität. Um diese Diversität zu erhöhen und auszunutzen, wurden am Institut neuartige Antennendiversitätstechniken wie „Cyclic Delay Diversity" bzw. „Discontinuous Doppler Diversity" entwickelt und für die praktische Anwendung ausgelegt. Diese Verfahren sind standardkompatibel, d. h. sie können auch in bereits standardisierten und in Betrieb befindlichen Systemen

nachträglich implementiert werden. Für das 4-G-Systemdesign werden am Institut wichtige Fragestellungen behandelt wie z. B. die Auswirkungen interzellularer Interferenzen, d. h. Störungen, die von Signalen aus benachbarten Mobilfunkzellen verursacht werden. Mittels aufwändiger Computersimulationen werden die Auswirkungen dieser Störungen ermittelt, um schließlich gezielt Algorithmen zu entwickeln, die diese Interferenzen unterdrücken können. Ein weiteres wichtiges Thema, an dem das Institut arbeitet, ist die Ortung mithilfe von Mobilfunksignalen, eine interessante Alternative zur Satellitennavigation, vor allem in Umgebungen, in denen die Satellitennavigation nicht oder nur sehr eingeschränkt nutzbar ist (z. B. in Gebäuden). Die Kenntnis der Position des Mobilfunkteilnehmers kann auch zur Steigerung der Systemeffizienz – z. B. durch ortsabhängige Zuweisung von Mobilfunkressourcen – genutzt werden.

Das Institut für Kommunikation und Navigation entwickelt die oben genannten Verfahren und Konzepte zumeist im Rahmen von Drittmittelprojekten, die teilweise durch die Europäische Kommission gefördert werden. Diese Projekte bieten eine Plattform zur internationalen Zusammenarbeit von Industrie, Universitäten und Forschungseinrichtungen. Beispielsweise wird im Projekt 4MORE, basierend auf dem MC-CDMA-Verfahren, ein Demonstrator zusammen mit zehn weiteren Partnern entwickelt und gebaut, der die Durchführbarkeit dieser für 4G vorgeschlagenen Technologie demonstrieren wird. Das Projekt WINNER, in dem das DLR einer von 44 Partnern ist, hat sich zum Ziel gesetzt, ein umfassendes und flexibles Luftschnittstellenkonzept für ein 4-G-Mobilfunksystem zu entwickeln und Beiträge zur Standardisierung zu leisten. Das WINNER-Systemkonzept beinhaltet das vom Institut entwickelte Verfahren MC-CDMA.

Die langjährige Erfahrung des Instituts auf dem Gebiet der Mehrträgermodulation und des Vielfachzugriffs stieß auch auf das Interesse von NTT DoCoMo. Japans erfolgreichster und weltweit einer der innovativsten Mobilfunkbetreiber hat 2005 in seinem 4-G-Testbed erstmals eine Datenübertragung von mehr als 1 GBit/s demonstrieren können. In diesem 4-G-Testbed kommt das am Institut für Kommunikation und Navigation entwickelte Multi-Carrier-Spread-Spectrum-Verfahren (MC-CDMA) zum Einsatz.

Derzeit gibt es noch keine eigenen Frequenzbänder für die 4. Mobilfunkgeneration. Es wird erwartet, dass auf der World-Radio-Conference (WRC) 2007 über Frequenzbänder für 4G entschieden wird. Sobald Klarheit darüber besteht, welche Frequenzbänder für 4G verfügbar sein werden, ist mit dem Beginn der 4-G-Standardisierungsaktivitäten zu rechnen. Die Fertigstellung der Spezifikation eines „Super 3G"-Standards, der Datenraten bis zu 100 MBit/s in den Frequenzbändern von 3G ermöglichen soll, ist bis Mitte 2007 geplant. Dabei wird das vom Institut für Kommunikation und Navigation vorgeschlagene „Cyclic Delay Diversity"-Verfahren als geeigneter Kandidat für die Übernahme in den Standard gesehen. Künftige Kommunikationssysteme werden von Positionsinformationen profitieren. Diese Informationen können durch Navigationssystemkomponenten in den Basisstationen und

Die naechsten Jahre

in den Endgeräten zur Verfügung gestellt werden. Dabei sind Technologien wie z. B. mobilfunkbasierte Navigation, satellitengestützte Positionierung – z. B. durch Galileo oder GPS – oder aber auch Kombinationen dieser Komponenten denkbar. Durch die Einbeziehung von Positionsinformationen sind nicht nur systeminhärente Verbesserungen, wie z. B. ortsbasierte Handoversteuerung oder ein effizientes Radio Ressource Management, möglich. Auch das Angebot neuer ortsabhängiger und kontextbewusster Dienste wird hierdurch möglich.

Autoren:
Armin Dammann ist wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Nachrichtensysteme am DLR-Institut für Navigation und Kommunikation.
Stefan Kaiser ist Leiter des Wireless Solution Labors DoCoMo Euro-Labs, München.