

# MIMO – der Datenturbo für die mobile drahtlose Zukunft

Thomas Kaiser • Andreas Wilzeck

**Der Markt für die mobile Funktechnik hat sich seit den 90er-Jahren rasant entwickelt. Mit der steigenden Verbreitung mobiler Kommunikationsgeräte und der wachsenden Popularität eines mobilen Internet ist eine Vielzahl von Anwendungen entstanden, die immer höhere Anforderungen an die Dienstgüte und Datenraten stellen.**

Während mit dem GSM-Netz noch die reine Sprachtelefonie im Vordergrund stand, gilt der Fokus heute diskutierter Mobilfunkstandards der hochrätigen Datenkommunikation für multimediale Inhalte. Dabei bleibt der Bedarf an Musikdiensten auch in den nächsten Jahren weiterhin führend, Tabelle. Spiele leiden heute und auch in Zukunft an der noch großen Latenzzeit von Mobilfunksystemen; und für Videostreaming fehlen die erforderlichen Datenraten.

Behält das seit mehr als 20 Jahren bewährte „Edholms law of data rates“ [1] auch in den nächsten Jahren seine Gültigkeit, so sind im Jahr 2010 Spitzendatenraten von bis zu 100 Mbit/s im zellularen Mobilfunk zu erwarten, Bild 1. Da jedoch „Bandbreite“ ein sehr begrenztes Gut ist, wird gemäß derzeitiger Regulierungsbemühungen pro Mobilfunkkanal kaum mehr als 20 MHz zur Verfügung stehen. Ein Vergleich mit den Leistungsdaten heutiger WLAN (20 MHz Bandbreite, 54 Mbit/s, etwa 100 m Radius) lässt vermuten, dass nicht nur die

Mobilfunkzellen (heute typisch 1 km bis 5 km Radius) in Zukunft zu verkleinern sind, sondern weitere Datenbeschleuniger notwendig werden.

Grundsätzlich lässt sich eine Datenbeschleunigung durch höherstufige Modulationsverfahren erzielen, jedoch wird im Jahr 2010 die analoge Hochfrequenzeinheit eines zellularen Mobilfunkgeräts voraussichtlich auf „64-QAM“ – also 6 bit/Symbol – technisch beschränkt sein. Im direkten Vergleich zu heutigen Mobilfunksystemen (HSDPA, 16-QAM mit 4 bit/Symbol) kann dann die Datenrate um lediglich 50 % gesteigert werden – und damit lassen sich Spitzendatenraten von nur etwa 30 Mbit/s erzielen.

Die einzige verbleibende Möglichkeit zur weiteren Datenbeschleunigung besteht in der Verwendung mehrerer Antennen – sowohl auf der Sende- als auch auf der Empfängerseite. Zur Erläuterung: Herkömmliche Mobilfunksysteme haben eine Sende- und eine Empfangsantenne, Bild 2. Durch mehrere Sende- und mehrere Empfangsantennen lassen sich grund-

sätzlich verschiedene räumlich voneinander getrennte Funkkanäle schaffen und vorteilhaft nutzen, Bild 3 und 4. Voraussetzung hierfür sind zahlreiche Reflexionen bei der Funkwellenausbreitung – beispielsweise an Gebäuden, Bäumen usw. Dann erhalten die verschiedenen Sendesignale einen unterschiedlichen „räumlichen Fingerabdruck“ beim Eintreffen auf der Empfängerseite. Dies ist die Schlüsseleigenschaft von Mehrantennensystemen und erlaubt einen parallelen Funkverkehr auf der gleichen Frequenz, mit dem gleichen Code und im gleichen Zeitschlitz. Mit nur zwei Sende- und zwei Empfangsantennen

## Auf einen Blick

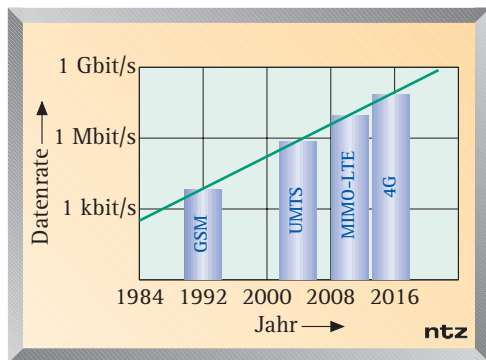
**Nach nunmehr 20-jähriger Forschung beginnt jetzt endlich die praktische und erfolgversprechende geräte-technische Umsetzung der MIMO-Idee. Mit den Mehrantennensystemen sind deutlich höhere Übertragungsraten möglich – bei gleichbleibender Kanalbreite der Funkkanäle.**

lässt sich dann die Datenrate beispielsweise verdoppeln. Mehrantennensysteme werden „MIMO“-Systeme (Multiple Input Multiple Output) genannt. Offenbar erfordern solche Systeme eine reichhaltige Reflexionsumgebung, wie es innerhalb von Gebäuden immer der Fall ist.

MIMO-Systeme sind in der „Long Term Evolution“ (LTE) – der direkten Nachfolgeneration zu UMTS – mittlerweile eine beschlossene Technik. LTE wird ca. 2010 UMTS ablösen und befindet sich zurzeit in der Standardisierung. Mit „MIMO-LTE“, Bild 1, werden die prognostizierten Spitzendatenraten von 100 Mbit/s und mittlere Datenraten von einigen Mbit/s möglich.

Umsätze	2005	2006	2007	2008	2009	2010
<b>Musik</b>	5,5 Mio. \$	6,8 Mio. \$	8,3 Mio. \$	9,6 Mio.	10,5 Mio. \$	11,3 Mio. \$
<b>Spiele</b>	2,4 Mio. \$	4,0 Mio. \$	5,7 Mio. \$	7,3 Mio. \$	8,9 Mio. \$	10,1 Mio. \$
<b>Wetten</b>	1,2 Mio. \$	2,1 Mio. \$	3,4 Mio. \$	5,0 Mio. \$	6,4 Mio. \$	7,6 Mio. \$
<b>Video</b>	1,4 Mio. \$	2,5 Mio. \$	3,8 Mio. \$	5,0 Mio. \$	6,1 Mio. \$	6,9 Mio. \$

**Tabelle.** Prognostizierte Umsätze für verschiedene Marktsegmente im Mobilfunk



**Bild 1.** Edholms Gesetz der Datenraten für die mobile Kommunikation

Neben der möglichen Steigerung der Datenraten (sog. Multiplexgewinn) weisen MIMO-Systeme weitere Vorteile auf [2] wie

- höhere Empfangsleistung (sog. Gruppengewinn);
- zusätzliche Störerunterdrückung (sog. Interferenzunterdrückungsgewinn);
- bessere Verbindungsqualität (sog. Diversitätsgewinn).

### Gruppengewinn

Der Gruppengewinn ist einleuchtend: Mehrere Empfangsantennen bilden eine Antennengruppe – ein sog. SIM-System (Single Input Multiple Output) – und sammeln somit mehr Empfangsleistung ein; jede Verdoppelung der Antennenanzahl führt zu einem zusätzlichen Gruppengewinn von bis zu 3 dB. Um diesen Leistungsgewinn zu erzielen, müssen die Antennenausgangssignale geeignet miteinander verknüpft werden. Dies geschieht üblicherweise durch eine lineare Wellenüberlagerung – also mittels Addierer, Multiplizierer und Verzögerungselemente. Zur Einstellung dieser Bauelemente ist zunächst die Einfallswinkelrichtung – oder allgemeiner der „Übertragungskanal“ – im Empfänger zu identifizieren. Hierzu wird eine Trainingsfolge ausgesendet, die dem Empfänger bekannt ist. Anschließend folgt dann die eigentliche Nutzdatenübertragung. Bewegt sich nun ein Sender, so ändert sich der Einfallswinkel, und die Multiplizierer sind entsprechend nachzuführen. Zur ständigen Aktualisierung der Einfallswinkelrichtung bei einem sich ändernden Übertragungskanal wird die Trainingsfolge periodisch in den Nutzdatenstrom eingebettet.

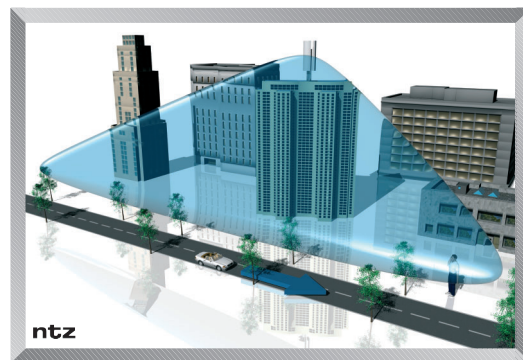
Das zugrunde liegende Prinzip der konstruktiven Wellenüberlagerung – also die Strahlformung (engl. beamforming) – kann aufgrund der Antennen-Reziprozität nicht nur auf der Empfangsseite, sondern auch auf der Sendeseite genutzt werden: die Sendeleistung wird dann in eine Hauptrichtung auf den ge-

wünschten Nutzer hin abgestrahlt. Vorteilhaft ist dabei nicht nur der Gruppengewinn, sondern auch die verringerte Störung anderer Nutzer. Zur Einhaltung von Regulierungsvorschriften ist die zulässige Sendeleistung dabei unter den Sendantennen aufzuteilen; sie wird also nicht vergrößert, sondern durch Fokussierung auf den Nutzer lediglich effizienter genutzt. Dies bedeutet, dass im Vergleich zu einem Ein-Antennen-System (SISO-System, Single Input Single Output) eine um den Gruppengewinn reduzierte Sendeleistung genügt, so dass bei mobilen Geräten die Betriebszeit verlängert und gleichzeitig die elektromagnetische Emission verringert werden kann. Die sendeseitige Strahlformung ist in die Kategorie der MISO-Systeme (Multiple Input Single Output) einzuordnen und erfordert die Kenntnis zumindest über die Winkelrichtung zum Nutzer oder allgemeine Kenntnisse des Übertragungskanals (engl. Channel State Information, CSI); dies ist nur durch eine vorherige Signalausendung des Nutzers zu gewährleisten.

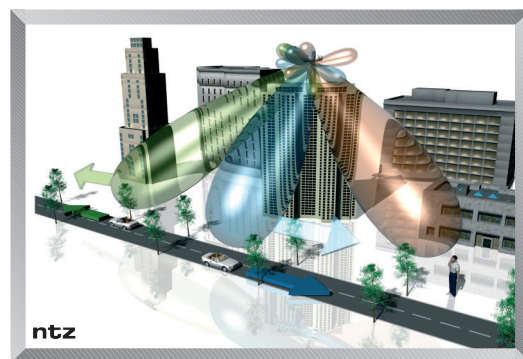
### Interferenzunterdrückungsgewinn

Neben dem Gruppengewinn besteht eine weitere technische Möglichkeit, Mehrantennensysteme vorteilhaft zu nutzen: Bei SIMO-Systemen können ausgewählte Einfallswinkelrichtungen durch destruktive Interferenz nahezu ausgelöscht werden. Anders gesprochen können einfallende Signale anderer Nutzer – also störende Interferenzen – unterdrückt werden. Auch bei MISO-Systemen kann die Aussendung eines Nutzersignals in Richtung eines anderen Nutzers vermieden werden. Die Interferenzunterdrückung verwendet in beiden Fällen ausschließlich die unterschiedlichen räumlichen Positionen der Nutzer. Dem Prinzip sind jedoch Grenzen gesetzt: Stehen die Nutzer nahe beieinander, so gelingt keine räumliche Trennung. Nahe beieinander heißt hier Abstände in der Größenordnung der Hauptkeulenbreite, die sich im Wesentlichen durch die Wellenlänge dividiert durch die Abmessungen der Antennengruppe ergibt. Gelingt keine räumliche Trennung, so sind wieder alternative Mehrnutzertechniken wie z. B. die Zuweisung von verschiedenen Trägerfrequenzen, Zeitschlitzen oder Codes zu verwenden.

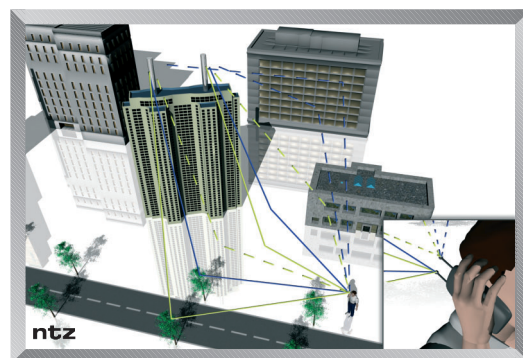
Sowohl beim Interferenzunterdrückungsgewinn als auch beim Gruppen-



**Bild 2.** Herkömmliches Ein-Antennen-Mobilfunksystem (Grafik: mimoOn GmbH)



**Bild 3.** Mehrere Antennen auf der Basisstationsseite (Grafik: mimoOn GmbH)



**Bild 4.** Die MIMO-Technik mit zwei räumlich getrennten Funkkanälen (durchgezogene und gestrichelte Linien) zwischen zwei Send- und Empfangsantennen (Grafik: mimoOn GmbH)

gewinn ist der Abstand zwischen den Antennen von besonderer Bedeutung. Um auch bei einem kleinen Nutzerabstand noch genügend Gewinn zu erzielen, ist der Antennenabstand auf den ersten Blick möglichst groß zu wählen. Überschreitet der Abstand jedoch die halbe Wellenlänge, so entstehen unerwünschte Mehrdeutigkeiten in der Richtcharakteristik; beispielsweise kann bei einem Antennenabstand von einer Wellenlänge nicht zwischen einer von  $+90^\circ$ ,  $0^\circ$  oder  $-90^\circ$  einfallenden Wellenfront unterschieden werden. Das hat zur Folge, dass störende Interferenzen nicht mehr unterdrückt werden, sondern sich sogar

konstruktiv addieren können. Liegt also eine dominante Sichtverbindung vor, so ist der Antennenabstand entsprechend der halben Wellenlänge zu wählen, damit mittels Strahlformung die Reichweite erhöht und Störer optimal unterdrückt werden können.

Im zellularen Mobilfunk sowie in lokalen drahtlosen Netzen kann aufgrund von Abschattungen und zahlreicher Reflexionen an Gebäuden, Wänden usw. nicht von einer ständigen dominanten Sichtverbindung ausgegangen werden; wegen dieser ausgeprägten Mehrwegeausbreitung finden hier alternative Mehrantennentechniken ihre Anwendung. Dabei betragen die Antennenabstände sowohl an der Basisstation als auch an der Mobilstation häufig mehrere Wellenlängen – dies führt zu dem sogenannten Diversitätsgewinn.

## Diversitätsgewinn

Die durch die Mehrwegeausbreitung zusätzlich einfallenden Wellenfronten können zwar mittels Strahlformung je nach Antennenanzahl mehr oder weniger gut unterdrückt werden. Es ist jedoch einsichtig, die zusätzlich einfallende Signalenergie – wenn möglich – konstruktiv zu nutzen. Hierzu ein Beispiel: Die Mehrwegeausbreitung verursacht u. U. erhebliche Signaleinbrüche – die weit hin bekannten Funklöcher – durch destruktive Auslöschung sinusförmiger Trägersignale. Dabei ändert sich der Ort von Funklöchern bei einem zeitvarianten Mobilfunkkanal ständig: Heutige WLAN-Zugangspunkte (und auch Laptops) enthalten daher üblicherweise zwei Empfangsantennen. Befindet sich eine Antenne in einem Funkloch, so empfängt bei einem hinreichend großen Antennenabstand (in der Größenordnung einer oder mehrerer Wellenlängen – 2 GHz entsprechen  $\lambda = 15$  cm) die andere Antenne wahrscheinlich eine deutlich größere Leistung.

Prof. Dr.-Ing. Thomas Kaiser ist Gründer und Geschäftsführer der mimoOn GmbH in Duisburg und leitet das Fachgebiet Nachrichtenübertragungssysteme an der Universität Hannover.

Dipl.-Ing. Andreas Wilzeck leitet die MIMO- und UWB-Labore des Fachgebiets Nachrichtenübertragungssysteme an der Universität Hannover.

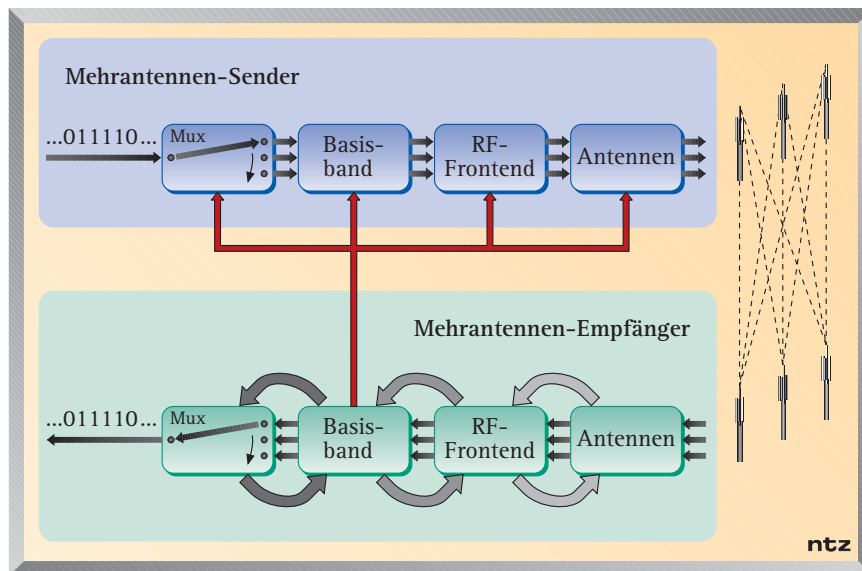


Bild 5. Rückgekoppeltes MIMO-System für den räumlichen Multiplex

Ein erster Ansatz zur Reduzierung von Funklöchern ist daher die Auswahl der empfangsstärksten Antenne. Ein optimaler Ansatz besteht hingegen in der Maximierung des Signal-zu-Rauschleistungs-Verhältnisses durch geeignete Gewichtung beider Antennenausgangssignale mit nachfolgender Addition. Der dabei erzielte Gewinn wird als Diversitätsgewinn bezeichnet. Für WLAN ist ein Diversitätsgewinn von mehreren dB selbst bei zwei Antennen realistisch, so dass Funklöcher weitestgehend vermieden werden. Zu bemerken ist, dass durch die zahlreichen Streuer in der unmittelbaren Umgebung eines Mobilgeräts (Handy, Laptop) selbst ein Antennenabstand von nur einem Viertel der Wellenlänge noch zu einem merklichen Diversitätsgewinn führen kann.

Analog zu dieser SIMO-Empfangsdiversität sind auch MISO-Sendeverfahren bekannt, die sogar ohne Kanalkenntnisse – dann jedoch bei reduzierter Datenrate – auskommen. Ist eine Basisstation bzw. WLAN-Zugangspunkt mit mehreren Antennen ausgestattet, so kann nicht nur die Übertragungsqualität vom Mobilfunkgerät zur Basisstation bzw. WLAN-Zugangspunkt (SIMO), sondern auch von dort zum Mobilgerät (MISO) verbessert werden.

Die Kombination von SIMO und MISO – das MIMO-System – ermöglicht nicht nur einen noch höheren Diversitätsgewinn, sondern auch eine deutlich größere Datenrate durch den sogenannten Multiplexgewinn.

## Multiplexgewinn

Beim räumlichen Multiplex wird der Sendedatenstrom auf  $N$  Sendeantennen gleichmäßig verteilt, so dass jede Sendeantenne nur die  $1/N$ -fache Datenrate

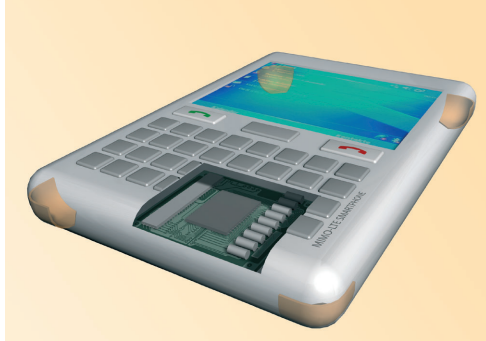
abstrahlt. Sind die räumlichen Fingerabdrücke der  $N$  Sendesignale beim Eintreffen auf einen Empfänger mit mindestens  $N$  Empfangsantennen hinreichend verschieden, so kann die Datenrate mit einem MIMO-System im Vergleich zu einem SISO-System auf das  $N$ -fache gesteigert werden. Unter dem Multiplexgewinn wird nun die mögliche Erhöhung der Datenrate verstanden; hier ist er also gleich  $N$ .

Offenbar hängt der Multiplexgewinn von der „Verschiedenheit“ der räumlichen Fingerabdrücke ab. Liegt beispielsweise eine dominante Sichtverbindung vor, so werden sich die räumlichen Fingerabdrücke nur geringfügig unterscheiden, und der Multiplexgewinn ist gering; liegt hingegen eine ausgeprägte Streuenumgebung vor – wie sie typisch ist innerhalb von Gebäuden –, so ist der Multiplexgewinn nahe bei  $N$ . Umfangreiche Messungen innerhalb von Gebäuden haben ergeben [3], dass der Multiplexgewinn im statistischen Mittel bei etwa  $0,7 N$  liegt. Eine Verdreifachung der Antennenanzahl sowohl auf der Senders- als auch auf der Empfangsseite führt also in guter Näherung zu einer Verdoppelung der Datenrate.

## Technische Herausforderung

Informationen über den augenblicklichen Kanalzustand am Sender lassen sich also vorteilhaft nutzen. Diese kann der Empfänger dem Sender über einen entsprechenden niederratigen Rückkanal mitteilen – z. B. kann er den Sender darüber informieren, ob der Kanal zur Erhöhung der Datenrate mittels räumlichem Multiplex geeignet ist oder ob die Verbindungsqualität durch einen Diversitätsgewinn zu verbessern ist. Diese Entscheidung kann umgehend nach Aus-





**Bild 6.** Smartphone-Studie mit vier Antennen in den Gehäuseecken

sendung der Trainingsfolge und abgeschlossener Kanalschätzung getroffen werden. Generell ist für eine optimale Sendestrategie jedoch die komplette Kanalimpulsantwort erforderlich, was bei einem niederratigen Rückkanal insbesondere bei hoher Geschwindigkeit des Mobilfunkteilnehmers technisch nicht möglich ist. Hier sind Qualitätseinbußen die Folge. Auch besteht zwischen dem Multiplexgewinn und dem Diversitätsgewinn immer ein Kompromiss: Liegt kein Multiplexgewinn vor, so ist der Diversitätsgewinn maximal und umgekehrt. Die obigen fehlenden 0,3 N sind daher keineswegs verschenkt, sondern können den Diversitätsgewinn vergrößern.

Bei einem rückgekoppelten MIMO-System für den räumlichen Multiplex, Bild 5, wird beispielsweise die Eingangsbitrate gleichmäßig auf die drei Sendantennen verteilt; auf der Empfangsseite werden die drei Datenströme dann wieder entsprechend zusammengesetzt. Ist der Übertragungskanal für eine dreifache Datenrate nicht geeignet (z. B. zu wenige Reflexionen oder Abschattung einer Sendeanterie), so kann alternativ nur über zwei Antennen gesendet werden.

Aus diesen Betrachtungen ergibt sich die generelle Erkenntnis, dass alle vier Gewinntypen nicht gleichzeitig maximiert werden können; je nach Zustand des Übertragungskanals kann also entweder die Datenrate (in einer reflexionsreichen Umgebung) oder die Verbindungsqualität (bei starken Signalfuktuationen) oder schließlich die Reichweite (bei einer dominanten Sichtverbindung) maximiert werden.

Die Suche nach einem technisch effizient umsetzbaren Kompromiss zwischen den vier Gewinntypen, verbunden mit der niederratigen Rückkoppelung vom Empfänger zum Sender und unter Berücksichtigung der durch verschiedene Mobilfunkstandards gesetzten Rahmenbedingungen, ist eines der weltweit aktuellsten Forschungsthemen im Bereich der drahtlosen Kommunikation. Allein in Europa sind mehr als 100 Forschungs-

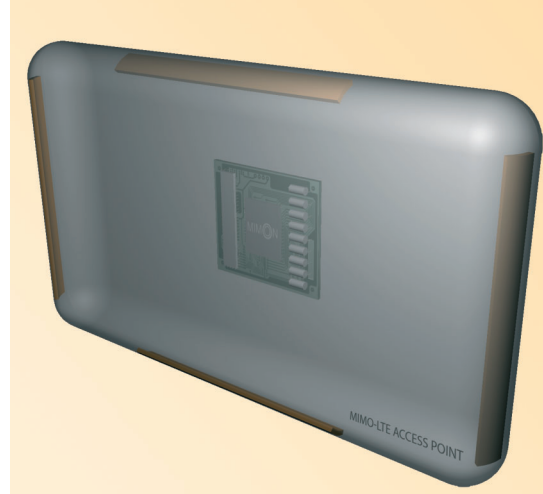
einrichtungen (Universitäten, Forschungsinstitute, Industrie) bekannt, die sich mit MIMO von der Theorie bis hin zur Praxis auseinandersetzen [4]. Neben diesen mehr signalverarbeitungs- und hardwareorientierten Problemstellungen besteht eine weitere technische Herausforderung in dem Design geeigneter Antennen und deren optimaler Platzierung bei vorgegebenem Gehäuse. Beispielsweise können im ungünstigen Fall die Antennen derart stark miteinander verkoppelt sein, dass aufgrund der dann stark korrelierten Antennenausgangssignale ein räumlicher Multiplexgewinn unmöglich ist.

### Standardisierung und Produkte

Obwohl in der MIMO-Forschung der vergangenen 20 Jahre beeindruckende Fortschritte erzielt wurden, haben MIMO-Systeme den Massenmarkt bis heute noch nicht erreicht. Die möglichen Gründe hierfür sind zahlreich: z. B. höhere Fertigungskosten, mangelnder Antennenplatz bei kleinen Mobilgeräten, fehlende optimale Protokollstrukturen, fehlende Signalverarbeitung mit geringer Komplexität, fehlende weltweite Standards, und – vor allem – mangelnder Kundenbedarf an höheren Datenraten oder robusteren Funkverbindungen.

Als erster Funkstandard wird der bisher noch nicht ratifizierte WLAN-Standard IEEE 802.11n auf die zukunftsweisende MIMO-Technik setzen. Erste „pre-11n“-MIMO-Geräte sind seit etwa einem Jahr erhältlich – ein Marktdurchbruch steht aber aufgrund der langsamen Fortschritte in der Standardisierung noch aus. Angestrebt sind beim 802.11n-Standard unter idealen Übertragungsbedingungen bis zu 600 Mbit/s bei einer maximalen Bandbreite von 40 MHz. Und auch bei WiMAX (IEEE 802.16) – dem größeren WLAN-Bruder – sind bereits jetzt MIMO-Techniken zur Datenratensteigerung und zur Verbesserung der Verbindungsstabilität sowie der Reichweite zu finden und auch standardisiert.

In zellularen Mobilfunksystemen konnte kürzlich durch adaptive Modulations- und Codiervverfahren, z. B. High Speed Downlink/Uplink Packet Access (HSDPA, HSUPA) die Datenrate auch ohne Mehrfachantennen auf mehr als 10 Mbit/s erhöht werden. MIMO wurde schon sehr frühzeitig in der 3GPP-Standardisierung (Release 4, TR 25848, V 4.0.0) diskutiert, jedoch ist bis heute kein Durchbruch von MIMO bei UMTS erkennbar. Zahl-



**Bild 7.** Miniaturisierte LTE-Basisstation mit vier Antennen an den Gehäusekanten

reiche Vorschläge zur Anwendung von MIMO-Techniken sind im Rahmen des 3GPP TR 25.876 erarbeitet worden, jedoch noch ohne Konsequenz.

So ist es naheliegend, dass die MIMO-Technik fester Bestandteil von LTE sein wird. Bei der UMTS-Nachfolgeneration sollen Datenraten von bis zu 100 Mbit/s im Downlink und 50 Mbit/s im Uplink erreicht werden [5]. Mit einem Ende der Standardisierung ist gegen Ende 2008 zu rechnen; der Netzaufbau wird voraussichtlich im Jahr 2010 beginnen. Neben Mehrantennen-Basisstationen und -Notebooks werden auch Smartphones, Bild 6, und miniaturisierte LTE-Zugangspunkte, Bild 7, mit mehreren Antennen versehen. Dabei dienen die LTE-Zugangspunkte der Funkversorgung in extrem kleinen Zellen (z. B. zur Inhaus-Versorgung), in denen die avisierte Spitzendatenrate von 100 Mbit/s tatsächlich erzielt werden kann. Ähnlich vielversprechend sind die Aussichten für die Integration von MIMO in andere weltweit genutzte zellulare Mobilfunk-Standards wie z. B. CDMA2000, 1xEV-DO und TD-SCDMA, da hier vergleichbare Techniken wie bei den 3GPP-Standards verwendet werden sollen [6].

### Literatur

- [1] Edholm's law of bandwidth. IEEE Spectrum, Juli 2004
- [2] Paulraj, A.; Nabar, R.; Gore, D.: Introduction to Space-Time Wireless Communications. Cambridge Univ. Press, 2003
- [3] Molisch, A. u. a.: Capacity of MIMO Systems Based on Measured Wireless Channels. IEEE J. on Sel. Areas in Commun. 20 (April 2002) H. 3
- [4] Kaiser, T. u. a.: Prototyping for MIMO-Systems: An Overview. Proc. EUSIPCO 2004, Wien, 7. – 10. Sept. 2004
- [5] Ekström, H. u. a.: Technical Solutions for the 3G Long-Term Evolution. IEEE Commun. Mag. 44 (März 2006) H. 3, S. 38 – 45
- [6] Liu, G.; Zhang, J.; Zhang, P.: Evolution from TD-SCDMA to Future B3G/TDD. Proc. IEEE VTC-2005-Fall, Dallas, 25. – 28. Sept. 2005, Bd. 2, S. 766 – 770