

Adaptive Antennen und MIMO-Systeme

Höhere Datenraten im Mobilfunk durch „intelligente Antennen“

MIMO (Multiple Input, Multiple Output) wird voraussichtlich zu einer der wichtigsten Technologien in diesem Jahrzehnt werden, um die Leistungsfähigkeit von Mobilfunksystemen weiter zu steigern. Zunächst wird MIMO im WLAN-Bereich zum Einsatz kommen. Künftig könnten 4G-Systeme in Form von drahtlosen „Wireless Metropolitan Area Networks“ (WMAN) ebenfalls stark von MIMO profitieren.

Von Prof. Dr. Dieter Brückmann

Ein vielversprechender Ansatz, den hohen Anforderungen von zukünftigen Mobilfunksystemen hinsichtlich Datendurchsatz und Performance gerecht zu werden, ist der Einsatz von intelligenten Antennen. Ein System mit intelligenten Antennen – die englische Bezeichnung hierfür ist „Smart Antenna System“ – besteht aus mehreren Antennenelementen, die über einen Signalverarbeitungs-Algorithmus angesteuert werden. Die Abstrahlung der Antenne auf der Sendeseite wird hierdurch optimiert. Zusätzlich oder alternativ kann auch der Empfänger mit intelligenten Antennen ausgerüstet werden, um das Empfangssignal unter Berücksichtigung der Übertragungsbedingungen in Empfangsrichtung zu optimieren.

Eine Variante von Systemen mit intelligenten Antennen stellt die so genannte MIMO-Technik (Multiple Input, Multiple Output) dar. Dieses Konzept beruht darauf, dass simultan mehrere räumlich getrennte Kanäle zwischen Sender und Empfänger ausgenutzt werden. MIMO-Systeme verwenden intelligente Antennen sowohl auf der Sende- als auch auf der Emp-

fangsseite. In MIMO-Systemen werden neue Ressourcen dadurch erschlossen, dass den konventionellen Zugriffsverfahren FDMA, TDMA und CDMA der Raum als weitere Dimension hinzugefügt wird; hierbei spricht man auch von SDMA (Space Division Multiple Access). Diese Technik stellt einen vielversprechenden Ansatz für Mobilfunk-

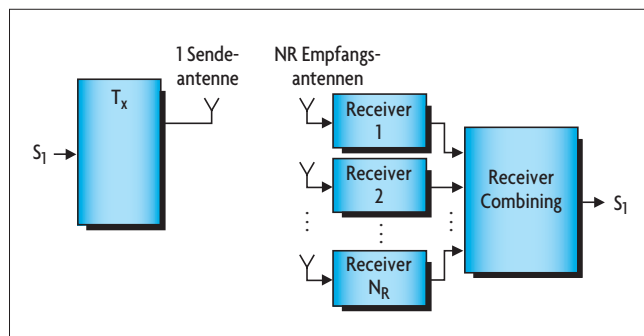


Bild 1. Blockschaltung eines SIMO-Systems mit „Receiver Combining“.

systeme der vierten Generation dar; sie ist unter anderem zur Erhöhung des Datendurchsatzes bei zukünftigen WLANs gedacht.

► Systeme mit intelligenten Antennen

Mehrantennen-Konfigurationen, entweder auf der Sende- oder der Empfangsseite, sind bereits heute Bestandteil verschiedener Spezifikationen für

standardisierte Mobilfunksysteme. Bei mehreren Antennen auf der Sendeseite spricht man auch von einem MISO-System (Multiple Input/Single Output), während eine Konfiguration mit mehreren Empfangsantennen entsprechend als SIMO-System (Single Input/Multiple Output) bezeichnet wird [1, 2]. Mit Hilfe beider Anordnungen lassen sich unter der Randbedingung, dass die unterschiedlichen Übertragungspfade nicht vollständig miteinander korreliert sind, Diversitätsgewinne erzielen.

Fast alle heutigen WLAN-Systeme setzen „Switched Antenna Diversity“ im Empfänger ein. Diese sehr einfache Technik verwendet zwei Antennen, die in geringem Abstand voneinander angeordnet werden. Ist das Signal an einer der Antennen durch Schwunderscheinungen stark gedämpft, so empfängt die zweite Antenne mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit ein deutlich stärkeres Signal. Der Empfänger wird an die Antenne angeschaltet, die das stärkere Signal empfängt. Bild 1 zeigt die Blockschaltung eines SIMO-Systems mit mehreren Antennen auf der Empfangsseite. Der räumliche Abstand zwischen den Antennen sollte so gewählt werden, dass die entsprechenden Ausgangssignale statistisch unabhängig voneinander sind. Dieses lässt sich zum Beispiel durch einen Antennenabstand von wenigen Wellenlängen des HF-Signals erreichen [1]. Die Ausgangssignale müssen dann auf geeignete Art und Weise miteinander verknüpft werden, um einen entsprechenden Performancegewinn zu erzielen. Hierfür stehen unterschiedliche Verfahren zur Verfügung,

die sich durch den Implementierungsaufwand und durch den erreichbaren Performancegewinn unterscheiden.

Die einfachste Form eines räumlichen Multiplex auf der Empfangsseite stellt das so genannte „Selection Combining“ dar, bei dem aus den N_R -Empfangssignalen, die durch das gleiche Sendesignal erzeugt wurden, dasjenige mit dem größten Signal/Rausch-Verhältnis ausgewählt wird. Der „Selection Combiner“ ist relativ einfach zu

implementieren. Hinsichtlich des Diversitätsgewinns stellt er allerdings nicht die optimale Lösung dar, da er nur die Information des Empfangszweiges mit dem besten SNR ausnutzt. Die Systemleistung kann verbessert werden, indem die Empfangssignale al-

tensymbole d werden jeweils als Paare verarbeitet, wobei zwei zeitlich aufeinanderfolgende Datensymbole jeweils in zwei Signale umgesetzt werden, die über die Antennen 1 und 2 abgestrahlt werden. Die Symbolrate ändert sich daher gegenüber dem System mit nur

Detektion der gesendeten Datenbits mit Hilfe einer einfachen Matrix-Multiplikation realisiert werden kann, wie im Folgenden gezeigt wird.

Der Übertragungspfad von den beiden Sendeantennen zur Empfangsantenne kann einschließlich der Alamouti-Abbildung durch die komplexwertigen Kanalkoeffizienten h_1 und h_2 beschrieben werden. Diese werden jeweils für zwei aufeinanderfolgende Symbol-dauern k und $k+1$ als konstant angenommen. Fassen wir die Symbole $y[k]$ und $y[k+1]$ auf der Empfangsseite zu einem Vektor $y[k]$ zusammen, so kann das

Übertragungsverhalten durch die Beziehung nach *Formel 2* beschrieben werden.

Der Vektor $d[k]$ setzt sich aus den zeitlich aufeinanderfolgenden Symbolen $d[k]$ und $d[k+1]$ zusammen, während der Vektor $n[k]$ aus den Abtastwerten $n[k]$ und $n[k+1]$ des Rauschens gebildet wird, das im Empfänger zum Nutzsignal hinzuaddiert wird. H_{eq} stellt die 2×2 -Matrix zur Beschreibung des Übertragungsverhaltens dar und ist gegeben durch *Formel 3*.

Auf Grund der speziellen Struktur der Alamouti-Matrix A stellt das Produkt $H_{eq}^H \cdot H_{eq}$ eine Diagonalmatrix dar. Hierbei bezeichnet man die Ma-

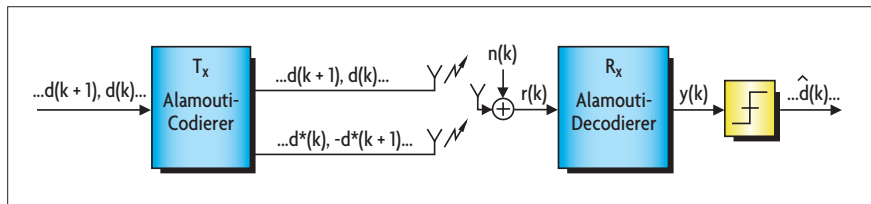


Bild 2. Blockschaltung eines MISO-Systems mit „Space Time“-Codierung nach Alamouti.

ler Zweige auf geeignete Weise miteinander linear kombiniert werden. Die entsprechenden Koeffizienten, mit denen die einzelnen Signale gewichtet werden, sind hierbei komplex. Der Implementierungsaufwand für dieses Konzept ist allerdings deutlich größer als für den „Selection Combiner“.

Systeme mit mehreren Sendeantennen und einer Empfangsantenne sind in *Bild 2* dargestellt. Wenn in einem solchen MISO-System die Übertragungspfade von den Sendeantennen zum Empfänger durch Schwunderscheinungen (Fading) unterschiedlich gedämpft werden, so kann dieses ausgenutzt werden, um gegenüber einem System mit nur einer Sendeantenne einen entsprechenden Gewinn zu erzielen. Das ergibt sich aus der einfachen Überlegung, dass die Wahrscheinlichkeit, dass alle Pfade gleichzeitig stark gedämpft werden, deutlich geringer ist, als dass sich nur ein Pfad in einem „Fading-Loch“ mit starker Dämpfung befindet. Mit Hilfe des so genannten „Space Time Codings“ lässt sich daher die Bitfehlerrate reduzieren. Dieses kann alternativ auch zur Erhöhung der Datenrate ausgenutzt werden, wenn ein adaptives Modulations- bzw. Kanalcodierungsverfahren eingesetzt wird, wie dies in den meisten heutigen Systemen üblich ist.

Ein Beispiel ist das 1998 von S.M. Alamouti vorgeschlagene, einfache Verfahren eines „Space Time“-Codes für Systeme mit zwei Sendeantennen [3], das im Folgenden vorgestellt wird. Die entsprechende Anordnung auf der Sende- und Empfangsseite ist als Blockschaltung in *Bild 2* dargestellt. Die Da-

einer Antenne nicht. Die Abbildung der Datensymbole $d[k]$ und $d[k+1]$ erfolgt mit Hilfe der „Alamouti-Matrix“ A , für die *Formel 1* gilt (siehe *Formelkasten*).

Gemäß dieser Abbildung überträgt die Antenne 1 zum Zeitpunkt k das Symbol $d[k]$ und die Antenne 2 das Symbol $-d^*[k+1]$. Hierbei gibt der Stern an, dass der konjugiert komplexe Wert von $d[k+1]$ gebildet wird. Zum Zeitpunkt $k+1$ werden dann entsprechend $d[k+1]$ und $d^*[k]$ von den Antennen 1 und 2 übertragen. Auf der Empfängerseite wird gemäß *Bild 2* nur eine Antenne eingesetzt. Der Vorteil des Alamouti-Verfahrens liegt darin, dass die

■ Im Text erwähnte Formeln

$$A = \begin{bmatrix} d[k] & -d^*[k+1] \\ d[k+1] & d^*[k] \end{bmatrix} \tag{1}$$

$$y(k) = H_{eq} \cdot d[k] + n[k] \tag{2}$$

$$H_{eq} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 \\ h_2^* & -h_1^* \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$H_{eq}^H H_{eq} = \begin{bmatrix} h_1^* & h_2 \\ h_2^* & -h_1^* \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} h_1 & h_2 \\ h_2^* & -h_1^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |h_1|^2 + |h_2|^2 & 0 \\ 0 & |h_1|^2 + |h_2|^2 \end{bmatrix} \tag{4}$$

$$H_{eq}^H \cdot y[k] = \left(|h_1|^2 + |h_2|^2 \right) \cdot x[k] + H_{eq} \cdot n[k] \tag{5}$$

$$M(\varphi, \Delta\psi) = \frac{\sin\left[\frac{N}{2} \left(\frac{2\pi d}{\lambda} \sin\varphi - \Delta\psi \right)\right]}{\frac{N}{2} \sin\left(\frac{2\pi d}{\lambda} \sin\varphi - \Delta\psi\right)} \tag{6}$$

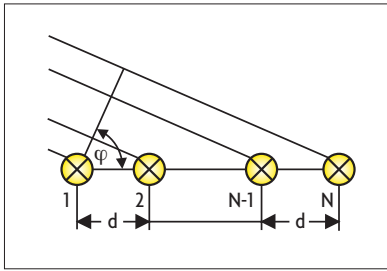


Bild 3. Gruppenantenne aus N Dipolen.

trix H_{eq}^H auch als die hermitesche Konjugierte von H_{eq} ; es gilt der Zusammenhang nach *Formel 4*.

Die übertragenen Symbole können daher durch eine Matrix-Vektor-Multiplikation $H_{eq}^H \cdot y[k]$ zurückgewonnen werden. Voraussetzung hierfür ist, dass die Kanalkoeffizienten am Empfänger bekannt sind. Es ergibt sich *Formel 5*.

Der Signalvektor $x[k]$ wird also mit einer Konstanten multipliziert, die sich aus den Beträgen der Kanalkoeffizienten ergibt. Da die Beträge der Kanalkoeffizienten in obiger Beziehung addiert werden, erfolgt die Verknüpfung der Symbole auf konstruktive Weise. Das Rauschen wird inkohärent verknüpft und dadurch deutlich weniger verstärkt als das Nutzsignal. Untersuchungen haben gezeigt, dass sich mit dieser sehr einfachen Anordnung ein deutlicher Diversitätsgewinn von mehreren Dezibel erzielen lässt [2, 3, 4]. Dieser Gewinn lässt sich noch vergrößern, indem das Alamouti-Schema auf Systeme mit mehr als zwei Sendeantennen erweitert wird. Außerdem lässt sich eine weitere Verbesserung durch mehrere Empfangsantennen erreichen.

Mehrere Antennen auf der Sendeseite können auch dazu genutzt wer-

den, um eine gerichtete Übertragung zu realisieren. Die englische Bezeichnung hierfür ist „Beamforming“. Gerichtete Antennen werden zum Beispiel im zellularen Mobilfunk dazu eingesetzt, Störungen einer Verbindung zwischen einer Basis- und Mobilstation durch benachbarte Basisstationen zu reduzieren. Damit kann die Kapazität eines Netzes erhöht werden. Der Raum wird als weitere Dimension für den Mehrfachzugriff genutzt. In diesem Zusammenhang spricht man auch von SDMA (Space-Division Multiple Access). Mit Hilfe von adaptiven Antennen ist es sogar möglich, die Abstrahlcharakteristik dynamisch so einzustellen, dass die Auswirkungen von Rauschen, Interferenzen und Mehrwegeausbreitung minimiert werden. Außerdem weisen gerichtete Antennen bei gleicher Sendeleistung eine größere Signalstärke als bei einer omnidirektionalen Strahlungscharakteristik auf, sodass die Reichweite entsprechend größer ist.

Gerichtete Antennen lassen sich mit Hilfe eines Antennenarrays aus einfachen Dipolantennen im Abstand d realisieren (*Bild 3*). Das resultierende Gesamtfeld der Antenne ergibt sich aus der Multiplikation der Felder E_0 der Einzeldipole mit dem Gruppenfaktor M . Werden die Einzeldipole um den Phasenwinkel $\Delta\Psi$ versetzt angesteuert, so lässt sich die Richtung der An-

tennenkeule variieren. Für M gilt als Funktion des Winkels φ und der Phasendifferenz $\Delta\Psi$ zwischen benachbarten Dipolen *Formel 6*.

Hierbei stellt N die Anzahl der Dipolantennen dar und d ist der Antennenabstand. Außerdem geht die Wellenlänge λ des HF-Signals in die Beziehung ein.

Bild 4 zeigt die Richtcharakteristik einer Gruppenantenne, die sich aus obiger Beziehung für den Gruppenfaktor M ergibt. Die Anzahl der Dipole beträgt in diesem Beispiel $N = 8$, wobei der Abstand der Dipole zu $d = \lambda/4$ gewählt wurde. Die Abstrahlcharakteris-

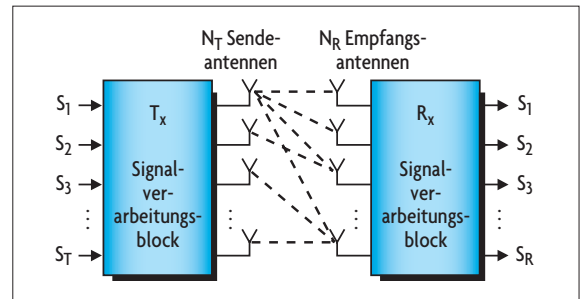


Bild 5. Blockschaltung eines MIMO-Systems.

tik ist für die beiden Werte $\Delta\psi = 0^\circ$ und $\Delta\psi = 45^\circ$ der Phasendifferenz zwischen den benachbarten Dipolen aufgetragen. Es wird deutlich, dass die Abstrahlrichtung über die Phasendifferenz sehr gut eingestellt werden kann. Ein Nachteil dieser Antennenarrays liegt allerdings darin, dass für eine gute Richtwirkung relativ viele Antennen benötigt werden, sodass die Abmessungen der Anordnung entsprechend groß sind. Außerdem sind diese Gruppenantennen teuer. Ein Einsatz kommt daher aus heutiger Sicht nur für die Basisstation in Frage.

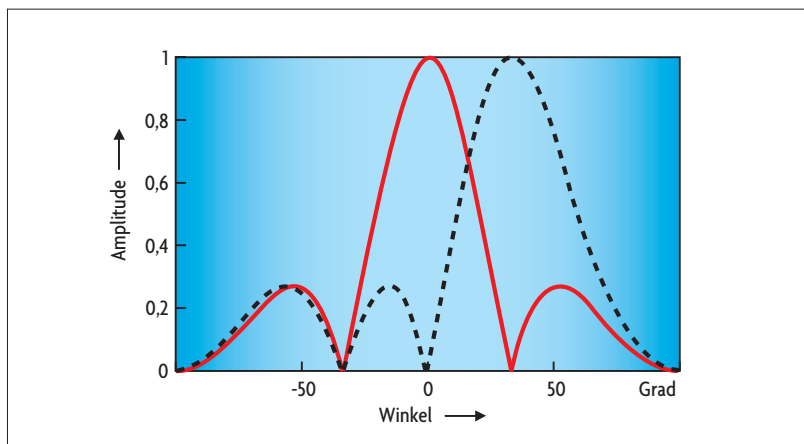


Bild 4. Richtcharakteristik einer Gruppenantenne mit acht Dipolelementen für $\Delta\psi = 0^\circ$ (durchgezogene Linie) und $\Delta\psi = 45^\circ$ (unterbrochene Linie).

► MIMO-Systeme

In einem MIMO-System sind sowohl der Sender als auch der Empfänger mit intelligenten Antennen ausgestattet. *Bild 5* zeigt eine allgemeine Blockschaltung eines solchen Systems. Die Signale, die von den N_T Sendeantennen übertragen werden, nutzen alle das selbe Frequenzband. Selbstverständlich werden die gesendeten Signale durch den Übertragungskanal auf unterschiedliche Art und Weise gestreut. Durch diese mehrfache Signal-

Mit MIMO bis 500 Mbit/s

■ *In welchen Applikationen wird die MIMO-Technik eher Einzug halten, in welche später? Nur in WLANs?*

■ **Brückmann:** Die MIMO-Technik wird sicherlich zunächst im Bereich der drahtlosen LANs zum Einsatz kommen, um die gewünschte weitere Steigerung des Datendurchsatzes realisieren zu können. Mit Hilfe dieser Technik werden Datenraten von über 100 Mbit/s möglich. Darüber hinaus ist zu erwarten, dass MIMO auch in eine Reihe weiterer Produkte Einzug findet. 4G-Systeme in Form von drahtlosen „Wireless Metropolitan Area Networks“ (WMAN) könnten zum Beispiel auch stark von dieser Technik profitieren. In den nächsten Jahren wird eine Fülle von unterschiedlichen Produkten auf dem Markt erscheinen, die alle MIMO einsetzen.

■ *Welche grundlegenden Vorteile ergeben sich durch MIMO in Bezug auf Geschwindigkeit, Reichweite, Störsicherheit?*

■ **Brückmann:** Alle drei angesprochenen Punkte sprechen für MIMO. Durch die räumliche Fokussierung des Übertragungskanals wird zunächst die Störanfälligkeit verringert und damit die Störsicherheit verbessert. Dadurch können höherwertige Modulationsverfahren eingesetzt werden, die höhere Datenraten erlauben. Darüber hinaus lassen sich mit Hilfe von MIMO mehrere, räumlich getrennte Übertragungskanäle realisieren, sodass der Datendurchsatz um ein Mehrfaches gesteigert werden kann. Schließlich verbessert sich auch die Reichweite durch die geringere Störanfälligkeit.

■ *Ist MIMO auch für portable Geräte (PDAs) einsetzbar, wenn man den Antennenauflauf betrachtet?*

■ **Brückmann:** Die mehrfachen Antennen, die für MIMO benötigt werden, können problemlos in die Gehäuse von Laptops oder PDAs eingebaut werden. Weit aus schwieriger ist es sicherlich, mehrere Antennen in kleinen, mobilen Geräten unterzubringen. Aber auch hier gibt es bereits innovative Lösungsansätze. Es gibt zum Beispiel Überlegungen, die Antennen direkt im Substrat der ICs unterzubringen.

■ *Können durch MIMO Sendeleistungen reduziert werden, im Hinblick auf die EMVU-Diskussion?*

■ **Brückmann:** Wie zuvor schon angesprochen: Durch die MIMO-Technik wird

die Störanfälligkeit des Systems geringer. Damit lässt sich ein bestimmter Datendurchsatz mit einer geringeren Sendeleistung realisieren. Daher kann MIMO auch einen Beitrag zur Reduzierung der elektromagnetischen Strahlung leisten, die durch ein Funksystem abgegeben wird. Darüber hinaus erlaubt MIMO auch eine gerichtete Abstrahlung, sodass eine Fokussierung weg von biologischen Systemen möglich ist.

■ *Verteuert MIMO die Übertragungssysteme, in denen es eingesetzt wird?*

■ **Brückmann:** Es steht außer Frage, dass MIMO mit zusätzlichem Aufwand verbunden ist und damit auch die Kosten erhöht. Es müssen auf der Send- und der Empfangsseite mehrere parallele HF-Pfade einschließlich der Antennen realisiert werden. Darüber hinaus muss die zusätzliche digitale Signalverarbeitung im Basisband implementiert werden. Auf der anderen Seite erreicht man durch diesen Zusatzaufwand aber eine enorme Leistungssteigerung der Systeme. Außerdem werden sich in den nächsten Jahren die erforderlichen Zusatzkosten für die MIMO-Technik durch die weiteren Fortschritte in der IC-Technologie deutlich reduzieren.

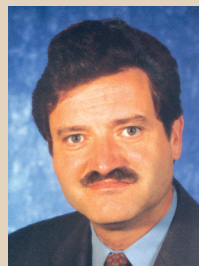
■ *Wann wird voraussichtlich die entsprechende Standardisierung fertig sein?*

■ **Brückmann:** MIMO wird zumindest als Option in die meisten Standards für zukünftige mobile und drahtlose Systeme aufgenommen werden. Am weitesten fortgeschritten sind sicherlich die Arbeiten für den zukünftigen WLAN-Standard 802.11n, der Datenraten von 108 Mbit/s und optional von bis zu 500 Mbit/s ermöglicht. Dieses soll insbesondere durch MIMO erreicht werden. Im Moment stehen sich hier noch zwei Vorschläge von mächtigen Industriekonsortien gegenüber. Eine endgültige Fixierung des Standards wird nicht vor 2007 erwartet.

■ *Welcher Standard ist dies?*

■ **Brückmann:** Der zukünftige WLAN-

Interview



**Prof. Dr.-Ing.
Dieter Brückmann**

ist seit 1995 Professor im Fachbereich Elektrotechnik, Informationstechnik und Medientechnik an der Bergischen Universität Wuppertal. Er beschäftigt sich insbesondere mit der Konzeption neuer Komponenten und Systeme für die mobile Kommunikation. Einer seiner Forschungsschwerpunkte sind flexible und hochoptimierte Empfängerarchitekturen für zukünftige mobile Kommunikationssysteme.

► E-Mail:
brueckm@uni-wuppertal.de

Standard 802.11n wird sicherlich die erste weltweit gültige Spezifikation sein, die MIMO als zentrales Element zur Steigerung der Datenrate und zur Performance-Verbesserung enthält. Aber auch der UMTS-Standard wird für höhere Datenraten weiterentwickelt (UMTS-HSDPA). Hierbei wird MIMO bei zukünftigen Erweiterungen zumindest als

Option enthalten sein. Auch die Spezifikation 802.16 für WMANs (Wireless Metropolitan Area Networks) wird MIMO-Optionen enthalten.

■ *Ist für MIMO ein ähnliches Zertifizierungssystem sinnvoll wie bei Bluetooth oder WiFi?*

■ **Brückmann:** Zertifizierungsverfahren, wie sie zum Beispiel bei den WLANs mit WiFi zum Einsatz kommen, haben sich durchaus bewährt. Es ist daher davon auszugehen, dass ähnliche Verfahren auch bei den zukünftigen Standards für mobile und drahtlose Systeme eine Rolle spielen werden. Im Rahmen der Tests können dann natürlich auch die MIMO-Funktionen hinsichtlich ihres spezifikations-

konformen Verhaltens überprüft werden.

■ *Wer hat derzeit in Bezug auf Chip-technologie die Nase vorn?*

■ **Brückmann:** Der kalifornische IC-Hersteller Airgo Networks hat sich schon sehr frühzeitig mit der Implementierung von MIMO in integrierte Schaltungen für WLANs beschäftigt. Seine ICs werden daher von einer Reihe von Systemhäusern eingesetzt, um so genannte 802.11-Pre-N-Lösungen zu realisieren, die Datenraten von bis zu 100 Mbit/s ermöglichen. Darüber hinaus gibt es weitere IC-Hersteller, die integrierte MIMO-Lösungen anbieten. Hierzu gehören zum Beispiel Athlon Communications und Athena Semiconductor. Wenn das Thema MIMO richtig heiß wird, so werden sicherlich alle IC-Hersteller, die heute im WLAN-Bereich führend sind, entsprechende IC-Lösungen anbieten.

übertragung erfährt das System eine räumliche Form von signalabhängiger Interferenz, die auch als „Co-Antenna Interference“ (CAI) bezeichnet wird [1]. Während Mehrwegeausbreitung in konventionellen Systemen als Problem betrachtet wurde, das möglicherweise die Übertragungsqualität verschlechtert, wird in MIMO-Systemen gezielt die Mehrwegeausbreitung ausgenutzt, um die Kanalkapazität zu erhöhen. Die Anzahl der Empfangsantennen ist in einem MIMO-System in der Regel größer als die Anzahl der Sendeantennen, da sich die Systemleistung bis zu einem gewissen Grad durch zusätzliche Antennen auf der Empfängerseite verbessert.

Das den MIMO-Systemen zugrunde liegende Konzept lässt sich auch so beschreiben, dass zusätzlich die räum-

ein solches MIMO-System ist das in der Literatur häufig zitierte BLAST-Konzept (Bell Labs Layered Space-Time Architecture) von Bell Labs [5]. Bei dem BLAST-Prototypen, der 1998 vorgestellt wurde, kamen auf der Sendeseite acht und auf der Empfangsseite 12 Antennen zum Einsatz. Hierdurch ließ sich eine Effizienz von erstaunlichen 20 bis 40 bit/s/Hz erreichen, heutige WLAN-Systeme gemäß 802.11a/g weisen mit 54 Mbit/s und einer Kanalbandbreite von 20 MHz einen Wert von nur 2,7 bit/s/Hz auf. Es ist daher verständlich, dass dieser BLAST-Ansatz sehr viel Aufsehen erregt hat und dass sich seitdem viele Ingenieure an Universitäten und in der Industrie mit MIMO beschäftigen.

MIMO-Systeme weisen eine hohe spektrale Effizienz auf, selbst wenn auf

Anforderungen zukünftiger Mobilfunksysteme hinsichtlich der Verbesserung der spektralen Effizienz gerecht zu werden. Diese Verbesserung ist notwendig, um die geforderten hohen Datenraten realisieren zu können. Mit Hilfe der MIMO-Technik kann die Kanalkapazität durch einen aufwendigeren Signalverarbeitungs-Algorithmus erhöht werden. Damit ist zwar eine höhere Rechenleistung erforderlich, die primären Ressourcen des Kommunikationssystems, wie Sendeleistung oder Bandbreite, bleiben aber unverändert.

Feldversuche haben gezeigt, dass solche Systeme den Datendurchsatz um mehr als eine Größenordnung im Vergleich zu einkanaligen Systemen steigern können, wenn sie mit adaptiver Codierung und Modulation sowie Verfahren zur Optimierung der Abstrahlcharakteristik des Senders kombiniert werden. Neben der Erhöhung der Datenrate durch diese so genannte mehrlagige Übertragung lässt sich mit Hilfe der MIMO-Technik auch die Zuverlässigkeit der Übertragung erhöhen. Dadurch kann die Sendeleistung bei vorgegebener Bitfehlerrate herabgesetzt oder ein höherwertiges Modulationsverfahren zur Steigerung der Datenrate eingesetzt werden.

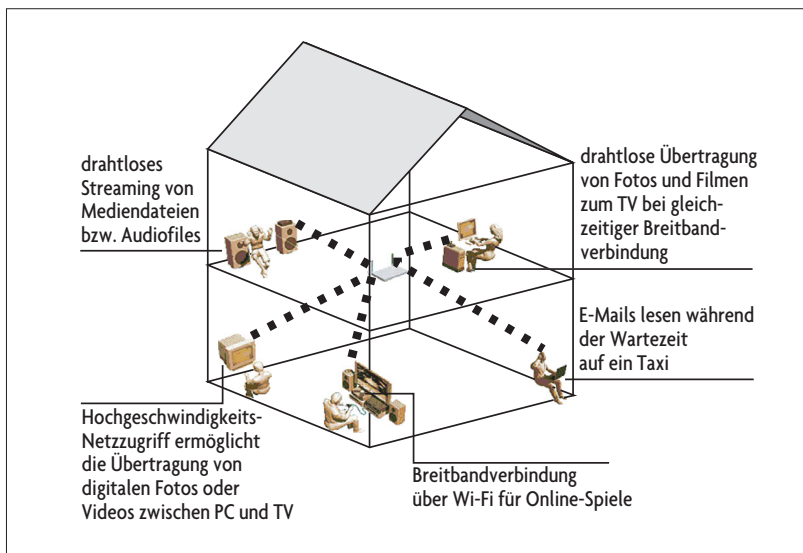


Bild 6. Anwendungen für WLAN-Systeme mit hohen Datenraten.

liche Komponente für das Multiplexen von Datenströmen genutzt wird, um dadurch die Datenrate zu erhöhen. Die informationstragenden Signale werden durch N_T Sendeantennen auf L räumlich getrennte Kanäle gemultiplexed und mit Hilfe von N_R Antennen empfangen. Die Anzahl der getrennten Kanäle ist gegeben durch $L \leq \min(N_T, N_R)$. Im Empfänger müssen mit Hilfe digitaler Signalverarbeitung die Datenströme der einzelnen Kanäle von den Interferenzen der Nachbarkanäle befreit werden. Die Anzahl der Empfangsantennen sollte daher keinesfalls kleiner sein als die Anzahl der Sendeantennen. Ein bekanntes Beispiel für

dem Übertragungskanal starke Störeffekte wie Mehrwegeausbreitung oder Reflexionen auftreten. Die Forschungsarbeiten von Forschini und Telatar [6, 7] auf diesem Gebiet haben gezeigt, dass die maximale Datenrate in einem drahtlosen System, bei der auf einer gestörten Übertragungsstrecke eine fehlerfreie Übertragung gewährleistet werden kann, proportional zum Minimum von N_T und N_R ist. Bedenkt man, dass laut dem Shannon-Theorem sich die Kanalkapazität nur logarithmisch mit einer Verbesserung des Signal/Rausch-Verhältnisses erhöht, so stellt die MIMO-Technik vermutlich die einzige realistische Lösung dar, um den hohen

Ein neuer WLAN-Standard für höchste Datenraten

Zur Zeit wird der Standard 802.11n spezifiziert, der Datenraten über 500 Mbit/s ermöglichen soll. Diese hohen Datenraten werden durch ein leistungsfähiges MIMO-Konzept erreicht, bei dem mehrere unabhängige Signale parallel über den selben HF-Kanal übertragen werden. Für diese sehr leistungsstarken WLANs gibt das Anwenderszenario in *Bild 6* einen Überblick. So soll mit diesen Funkssystemen eine drahtlose HDTV-Übertragung möglich werden. Die anvisierten Anwendungen können grob in zwei Gruppen eingeteilt werden:

- Applikationen mit hohen Datenraten, die gleichzeitig eine gewisse Dienstgüte sicherstellen (QoS – Quality of Service),
- Anwendungen mit vielen Nutzern, wobei die Systemleistung eines drahtgebundenen Netzes erreicht werden soll.

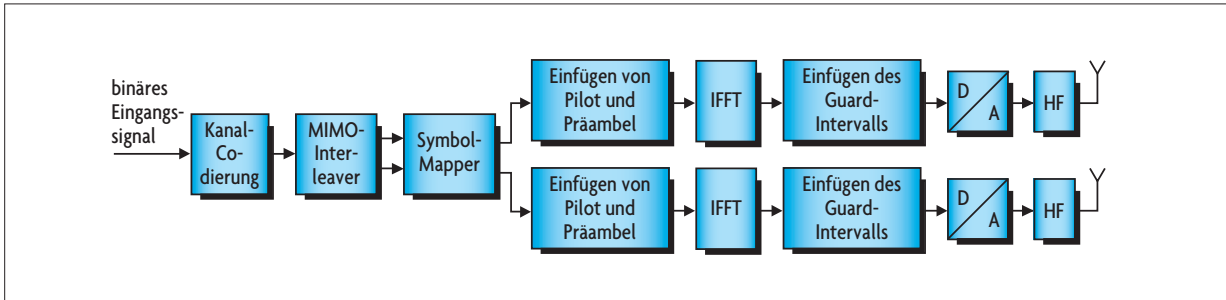


Bild 7. Blockdiagramm des Transmit-Pfades mit räumlichen Multiplex.

Darüber hinaus wird die Spezifikation so ausgelegt, dass auf jeden Fall eine Interoperabilität zu existierenden WiFi-Systemen und zu allen bedeutenden PC-, Konsumer-Elektronik- und Mobilfunkplattformen sichergestellt ist. Zur Zeit stehen sich in dem Spezifikationsgremium noch zwei Entwürfe gegenüber, die jeweils von mächtigen Konsortien unterstützt werden. Einer der Vorschläge wurde von der Gruppe „WWiSE“ (World-Wide Spectrum Efficiency, www.wwise.org) eingebracht, das von dem amerikanischen Chiphersteller Airgo Networks angeführt und unter anderem von Texas Instruments, STMicroelectronic und Broadcom unterstützt wird. Das andere Verfahren basiert auf dem Vorschlag der Gruppe „TGnSync“ (www.tgnsync.org), die unter anderem von Agere, Atheros, Nokia und Sony unterstützt wird. Derjenige Vorschlag, der mindestens 75 Prozent der Stimmen des Spezifikationsgremiums hinter sich bringt, wird die Basis für den Standard 802.11n. Bis dahin müssen die Teilnehmer der Spezifikationsrunden noch eine Reihe von Kompromissen aushandeln, so dass erst für März 2007 mit der Veröffentlichung der Spezifikation gerechnet wird.

Bild 7 zeigt das Blockdiagramm des möglichen Übertragungsweges für Systeme gemäß 802.11n. Der binäre Datenstrom wird zunächst durch einen Faltungs-Codierer verarbeitet, dessen Rate an die Qualität der HF-Strecke angepasst werden kann. Danach erfolgt die Aufteilung der Datenströme für die beiden Pfade und die Abbildung auf die QAM-Symbole. Die Signalverarbeitung für die beiden parallelen Datenströme ist für beide Pfade identisch. Zunächst werden die Pilotöne und die Präambel hinzugefügt, letztere wird kompatibel zu 802.11a/g ausgelegt, sodass die In-

teroperabilität sichergestellt ist. Eine anschließende Frequenzmodulation der Symbolsequenz durch die inverse Fourier-Transformation (IFFT) generiert dann die OFDM-Symbole. Danach wird das Guard-Intervall eingefügt und das Signal gefiltert, damit ein schmales Ausgangsspektrum entsteht. Dann kann das digitale Ausgangssignal in ein analoges gewandelt und in den HF-Bereich umgesetzt werden. Die beiden Datenströme werden über zwei unterschiedliche Antennen abgestrahlt. In Empfangsrichtung erfolgt die Signalverarbeitung in entsprechender Form.

Bei dem Vorschlag von TGnSync sollen die höheren Datenraten durch MIMO und durch eine Verdoppelung der Kanalbandbreite auf 40 MHz erreicht werden. Durch das Zusammenfassen von zwei benachbarten 20-MHz-Kanälen zu einem 40-MHz-Kanal kann die Datenrate von heute 54 Mbit/s auf ca. 125 Mbit/s gesteigert werden, da das bisher ungenutzte Quad-Band zwischen den Kanälen ebenfalls aktiviert wird. So lassen sich über ein MIMO-System mit 2x2-Antennen und zwei räumlich getrennten Datenkanälen 315 Mbit/s übertragen. Entsprechend sollen mit vier Antennen Datenraten über 600 Mbit/s realisierbar sein. Durch „Beamforming“ in Senderichtung und verbesserte Kanalcodierung soll die Übertragung außerdem robuster gegenüber Störungen werden, sodass sich die Anforderungen an das Signal/Rausch-Verhältnis für eine weitgehend fehlerfreie Übertragung um mehr als 10 dB reduzieren.

Da im 5-GHz-Band ein Spektrum von 400 MHz zur Verfügung steht, sind für 802.11n-Netze elf Kanäle nutzbar, während im 2,4 GHz Band lediglich zwei Breitbandkanäle zur Verfügung stehen. Die Festlegung auf eine Kanalbandbreite von 40 MHz könnte

allerdings in einigen Ländern, wie z.B. Japan, auf regulatorische Probleme stoßen, sodass wahlweise auch eine Kanalbandbreite von 20 MHz vorgesehen werden soll.

Der Vorschlag von WWiSE behält die heutige Kanalbandbreite von 20 MHz bei und will höhere Datenraten zunächst durch effizientere Nutzung der zur Verfügung stehenden Kanalbandbreite und durch geeignete digitale Signalverarbeitung realisieren. Mit zwei Sendeantennen soll eine Datenrate von 135 Mbit/s erreicht werden. Für noch höhere Datenraten wird auch ein System mit mehreren Antennen sowie ein 40-MHz-Modus spezifiziert. Wegen eines geeigneten „Space Time“-Blockcodes soll sich das Mehrantennen-System sehr robust gegenüber Störungen verhalten. *jw*

Literatur

- [1] Haykin, S.; Mohrer, M.: Modern Wireless Communications. Pearson Education International, USA, 2005.
- [2] Kammeyer, K.D.: Nachrichtenübertragung. Teubner Verlag, Wiesbaden, 2004.
- [3] Alamouti, S.M.: A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications. IEEE J. on Selected Areas in Commun., Bd. 16(8), Oktober 1998, S. 1451ff.
- [4] Mietzner, J.; Hoehner, P.A.: Boosting the Performance of Wireless Communication Systems: Theory and Practice of Multiple-Antenna Techniques. IEEE Communications Magazine, Bd. 42(10), Oktober 2004, S. 40ff.
- [5] Foschini, G.J.: Layered Space-time Architecture for Wireless Communication in a Fading Environment when Using Multiple Antennas. Bell Labs Tech. J., Herbst 1996, S. 41ff.
- [6] Foschini, G.J.; Gans, M.J.: On Limits of Wireless Communications in Fading Environment when Using Multiple Antennas. Wireless Pers. Comm., Band 6, 1998, S. 311ff.
- [7] Telatar, I.E.: Capacity of Multi-Antenna Gaussian Channels. Euro. Trans. Telecommun., Bd. 10, Nr. 6, Nov. 1999, S. 585ff.