

# LANCOM™ Techpaper

## IEEE 802.11n im Überblick

### Vorteile von 802.11n

Mit einer Reihe von technologischen Veränderungen verspricht der Standard IEEE 802.11n – ratifiziert im September 2009 unter dem Namen „WLAN Enhancements for Higher Throughput“ – die Performance von WLAN-Systemen etwa um das Sechsfache zu steigern. Zu den Vorteilen der neuen Technologie gehören unter anderem die folgenden Aspekte:

- **Höherer effektiver Datendurchsatz**  
Der Standard IEEE 802.11n beinhaltet zahlreiche neue Mechanismen um die verfügbare Bandbreite signifikant zu erhöhen. Bei den aktuellen WLAN-Standards nach 802.11a/g sind physikalische Datenraten (Brutto-Datenraten) von bis zu 54 Mbit/s möglich, netto werden ca. 22 Mbit/s erreicht. Netzwerke nach 802.11n erzielen derzeit einen Brutto-Datendurchsatz von bis zu 300 Mbit/s (netto in der Praxis ca. 120 bis 130 Mbit/s) – prinzipiell definiert der Standard bis zu 600 Mbit/s mit vier Datenströmen. Die tatsächlich realisierbaren Geschwindigkeiten überschreiten zum ersten Mal den Fast-Ethernet-Standard mit 100 Mbit/s in einem kabelgebundenen Netzwerk, was an den meisten Arbeitsplätzen den Standard darstellt.
- **Bessere und zuverlässigere Funkabdeckung**  
Die neuen Technologien bei 802.11n steigern nicht nur den Datendurchsatz, sondern reduzieren gleichzeitig auch die Bereiche von Funklöchern. Das Ergebnis sind bessere Signalabdeckung und höhere Stabilität, die insbesondere für Anwender im professionellen Umfeld eine deutliche Verbesserung bei der Nutzung des drahtlosen Netzwerkes bieten.
- **Höhere Reichweite**  
Mit der Entfernung des Empfängers vom Sender nimmt im Allgemeinen der Datendurchsatz ab. Durch den insgesamt verbesserten Datendurchsatz erzielen WLAN-Netze nach 802.11n auch eine

höhere Reichweite, da in einer bestimmten Entfernung vom Access Point ein wesentlich stärkeres Funksignal empfangen wird als in 802.11a/b/g-Netzen.

### Kompatibilität mit anderen Standards

IEEE 802.11n ist rückwärts-kompatibel mit bisherigen Standards (IEEE 802.11a/b/g). Einige der Vorteile der neuen Technologie sind jedoch nur verfügbar, wenn neben den Access Points auch die WLAN-Clients die Verfahren von 802.11n unterstützen.

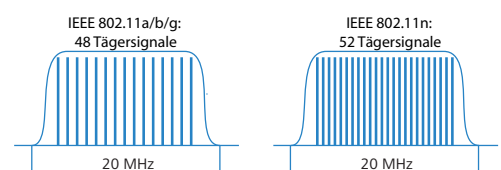
Um die Co-Existenz von WLAN-Clients nach 802.11a/b/g zu ermöglichen (die im Sprachgebrauch von 802.11n als „Legacy-Clients“ bezeichnet werden), bieten die 802.11n-Access Points besondere Betriebsarten für den gemischten Betrieb an, in denen die Performance-Steigerungen gegenüber 802.11a/b/g geringer ausfallen. Nur in reinen 802.11n-Umgebungen wird der „Greenfield-Modus“ verwendet, der alle Vorteile der neuen Technologien ausnutzen kann.

### Technische Aspekte von 802.11n

#### Verbesserte OFDM-Modulation

802.11n nutzt wie auch 802.11a/g das OFDM-Verfahren (Orthogonal Frequency Division Multiplex) als Modulationstechnik. Dabei wird das Datensignal nicht nur auf ein Einzelnes, sondern parallel auf mehrere Trägersignale moduliert. Der Datendurchsatz, der mit dem OFDM-Verfahren zu erzielen ist, hängt u. a. von folgenden Parametern ab:

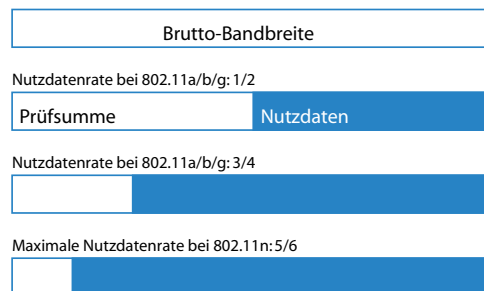
- **Anzahl der Trägersignale:** Während bei 802.11a/g 48 Trägersignale verwendet werden, nutzt 802.11n maximal 52 Trägersignale.



# LANCOM™ Techpaper

## IEEE 802.11n im Überblick

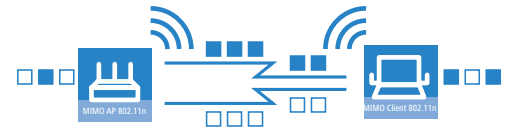
- Nutzdatenrate:** Die Übertragung der Daten über die Luft ist grundsätzlich nicht zuverlässig. Schon leichte Störungen im WLAN-System können zu Fehlern in der Datenübertragung führen. Um diese Fehler auszugleichen, werden sogenannte Prüfsummen verwendet, die einen Teil der verfügbaren Bandbreite beanspruchen. Die Nutzdatenrate gibt das Verhältnis der theoretisch verfügbaren Bandbreite zu den tatsächlichen Nutzdaten an. 802.11a/g können mit Nutzdatenraten von 1/2 oder 3/4 arbeiten, 802.11n kann bis zu 5/6 der theoretisch verfügbaren Bandbreite für die Nutzdaten verwenden.



Mit diesen beiden Maßnahmen steigt die nutzbare Bandbreite von maximal 54 Mbit/s bei 802.11a/g auf 65 Mbit/s bei 802.11n. Diese Steigerung ist noch nicht spektakulär, sie wird jedoch durch die noch folgenden Maßnahmen weiter verbessert.

### Die MIMO-Technologie

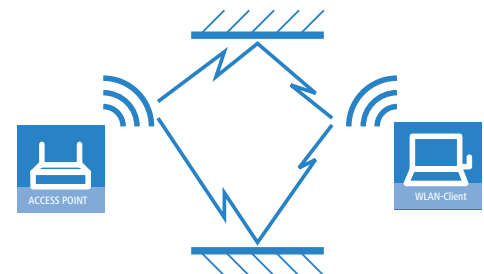
MIMO (Multiple Input Multiple Output) ist die wichtigste neue Technologie in 802.11n. MIMO benutzt mehrere Sender und mehrere Empfänger, um bis zu vier parallele Datenströme auf dem gleichen Übertragungskanal zu übertragen (derzeit werden nur zwei parallele Datenströme realisiert). Das Resultat ist eine Steigerung des Datendurchsatzes und Verbesserung des Funkabdeckung.



Die Daten werden also z. B. beim Access Point in zwei Gruppen aufgeteilt, die jeweils über separate Antennen, aber gleichzeitig zum WLAN-Client gesendet werden. Mit dem Einsatz von zwei Sende- und Empfangsantennen kann also der Datendurchsatz verdoppelt werden.

Wie aber können auf einem Kanal mehrere Signale gleichzeitig übertragen werden, was bei den bisherigen WLAN-Anwendungen immer für unmöglich gehalten wurde?

Betrachten wir dazu die Datenübertragung in „normalen“ WLAN-Netzen: Die Antenne eines Access Points sendet Daten je nach Antennentyp in mehrere Richtungen gleichzeitig. Die elektromagnetischen Wellen werden an vielen Flächen in der Umgebung reflektiert, sodass ein ausgesendetes Signal auf vielen unterschiedlichen Wegen die Antennen des WLAN-Clients erreicht – man spricht auch von „Mehrwegeausbreitung“. Jeder dieser Wege ist unterschiedlich lang, sodass die einzelnen Signale mit einer gewissen Zeitverzögerung den Client erreichen.



Die zeitverzögerten Signale überlagern sich beim WLAN-Client so, dass aus diesen Interferenzen eine deutliche Verschlechterung des Signals resultiert. Aus diesem Grund werden in den bisherigen WLAN-Netzwerken die direkten Sichtbeziehungen zwischen

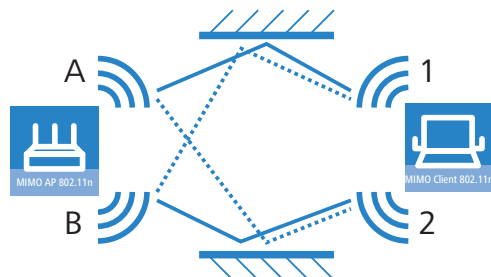
# LANCOM™ Techpaper

## IEEE 802.11n im Überblick

Sender und Empfänger (englisch: Line of Sight – LOS) angestrebt, um den Einfluss der Reflexionen zu reduzieren.

Die MIMO-Technologie wandelt diese Schwäche der WLAN-Übertragung in einen Vorteil, der eine enorme Steigerung des Datendurchsatzes ermöglicht. Wie schon angemerkt ist es eigentlich unmöglich, zur gleichen Zeit auf dem gleichen Kanal unterschiedliche Signale zu übertragen, da der Empfänger diese Signale nicht auseinanderhalten kann. MIMO nutzt die Reflexionen der elektromagnetischen Wellen, um mit dem räumlichen Aspekt ein drittes Kriterium zur Identifizierung der Signale zu gewinnen.

Ein von einem Sender A ausgestrahltes und vom Empfänger 1 empfangenes Signal legt einen anderen Weg zurück als ein Signal von Sender B zu Empfänger 2 – beide Signale erfahren auf dem Weg andere Reflexionen und Polarisationsänderungen, haben also einen charakteristischen Weg hinter sich. Zu Beginn der Datenübertragung wird dieser charakteristische Weg in einer Trainingsphase mit normierten Daten aufgezeichnet. In der Folgezeit kann aus den empfangenen Daten zurückgerechnet werden, zu welchem Datenstrom die Signale gehören. Der Empfänger kann also selbst entscheiden, welches der anliegenden Signale verarbeitet wird und vermeidet so die Verluste durch die Interferenzen der ungeeigneten Signale.



MIMO ermöglicht also die gleichzeitige Übertragung mehrerer Signale auf einem geteilten Medium wie der Luft. Die einzelnen Sender und Empfänger müssen dazu jeweils einen räumlichen Mindestabstand ein-

halten, der allerdings nur wenige Zentimeter beträgt. Dieser Abstand schlägt sich in unterschiedlichen Reflexionen bzw. Signalwegen nieder, die zur Trennung der Signale verwendet werden können.

Generell sieht MIMO bis zu vier parallele Datenströme vor, die auch als „Spatial Streams“ bezeichnet werden. In der aktuellen Chipsatz-Generation werden jedoch nur zwei parallele Datenströme realisiert, da die Trennung der Datenströme anhand der charakteristischen Wegeinformationen sehr rechenintensiv ist und daher relativ viel Zeit und Strom benötigt. Gerade Letzteres ist aber besonders bei WLAN-Systemen eher unerwünscht, da oft eine Unabhängigkeit vom Stromnetz bei Nutzung von PoE-Versorgung angestrebt wird.

Auch wenn das Ziel von vier Spatialströmen derzeit nicht erreicht wird, führt die Verwendung von zwei separaten Datenverbindungen zu einer Verdoppelung des Datendurchsatzes, was einen wirklichen Technologiesprung im Bereich der WLAN-Systeme darstellt. Zusammen mit den Verbesserungen in der OFDM-Modulation steigt der erreichbare Datendurchsatz damit auf maximal 130 Mbit/s.

Mit der Kurzbezeichnung „Sender x Empfänger“ wird die tatsächliche Anzahl der Sender- und Empfänger Antennen wiedergegeben. Ein 3x3-MIMO beschreibt also drei Sender- und drei Empfänger-Antennen. Die Anzahl der Antennen ist jedoch nicht gleich bedeutend mit der Anzahl der Datenströme: Die verfügbaren Antennen begrenzen nur die maximale Anzahl der Spatial Streams. Der Grund für den Einsatz von mehr Antennen als für die Übertragung der Datenströme eigentlich notwendig sind, liegt in der Zuordnung der Signale über den charakteristischen Weg: Mit einem dritten Signal werden zusätzliche räumliche Informationen übertragen. Sollten sich die Daten aus den beiden ersten Signalen einmal nicht eindeutig zuordnen lassen, kann die Berechnung mithilfe des dritten Signals dennoch gelingen. Die Verwendung von zusätzlichen

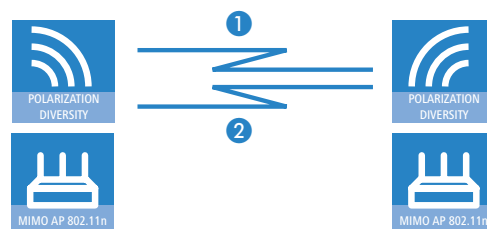
# LANCOM™ Techpaper

## IEEE 802.11n im Überblick

Antennen trägt also nicht zur Steigerung des Datendurchsatzes bei, resultiert aber in einer gleichmäßigeren und besseren Abdeckung für die Clients.

### MIMO im Outdoor-Einsatz

Bei Outdoor-Anwendungen von 802.11n können die natürlichen Reflexionen nicht genutzt werden, da die Signalübertragung üblicherweise auf direktem Weg zwischen den entsprechend ausgerichteten Antennen stattfindet. Um auch hier zwei Datenströme parallel übertragen zu können, werden spezielle Antennen verwendet, die gezielt zwei um 90° gedrehte Polarisationsrichtungen verwenden. Bei diesen sogenannten „Dual-Slant-Antennen“ handelt es sich also eigentlich um zwei Antennen in einem gemeinsamen Gehäuse. Da ein drittes Signal hier keine zusätzliche Sicherheit bringen würde, werden bei Outdoor-Anwendungen üblicherweise genau so viele Antennen (bzw. Polarisationsrichtungen) eingesetzt, wie Datenströme übertragen werden.

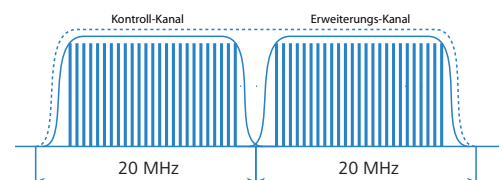


### 40 MHz-Kanäle

Bei den Ausführungen zur OFDM-Modulation wurde bereits beschrieben, dass der Datendurchsatz mit zunehmender Anzahl von Trägersignalen steigt, weil so mehrere Signale gleichzeitig übertragen werden können. Wenn in einem Kanal mit einer Bandbreite von 20 MHz nicht mehr als 48 (802.11a/g) bzw. 52 (802.11n) Trägersignale genutzt werden können, liegt es nahe, einen zweiten Kanal mit weiteren Trägersignalen zu verwenden.

Bereits in der Vergangenheit wurde diese Technik von einigen Herstellern (u. a. LANCOM Systems) eingesetzt und als „Turbo-Modus“ bezeichnet, der Datenraten von bis zu 108 Mbit/s ermöglicht. Der Turbo-Modus ist zwar nicht Bestandteil der offiziellen IEEE-Standards, wird aber z. B. auf Point-to-Point-Verbindungen häufig eingesetzt, weil dabei die Kompatibilität zu anderen Herstellern eine eher untergeordnete Rolle spielt.

Der Erfolg hat der zugrunde liegenden Technik aber dazu verholfen, in die Entwicklung von 802.11n einzufließen. Der IEEE-Standard verwendet den zweiten Übertragungskanal allerdings in einer Art und Weise, dass die Kompatibilität zu Geräten nach IEEE 802.11a/g erhalten bleibt. 802.11n überträgt die Daten über zwei direkt benachbarte Kanäle. Einer davon übernimmt die Aufgabe des Kontroll-Kanals, über den u. a. die gesamte Verwaltung der Datenübertragung abgewickelt wird. Durch diese Konzentration der Basisaufgaben auf den Kontroll-Kanal können auch Geräte angebunden werden, die nur Übertragungen mit 20 MHz unterstützen. Der zweite Kanal fungiert als Erweiterungs-Kanal, der nur dann zum Zuge kommt, wenn die Gegenstelle auch 40 MHz-Übertragungen unterstützt. Die Nutzung des zweiten Kanals bleibt dabei optional, Sender und Empfänger können während der Übertragung dynamisch entscheiden, ob einer oder beide Kanäle verwendet werden sollen.



Da die 40 MHz-Implementation im 802.11n-Standard durch die Aufteilung in Kontroll- und Erweiterungs-Kanal etwas effizienter geregelt ist als im bisherigen Turbo-Modus, können statt der doppelten Anzahl sogar noch ein paar zusätzliche Trägersignale gewonnen werden (in Summe 108). So steigt der maximale

# LANCOM™ Techpaper

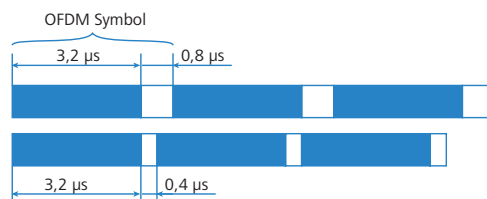
## IEEE 802.11n im Überblick

Datendurchsatz damit bei Nutzung der verbesserten OFDM-Modulation und zwei parallelen Datenströmen auf maximal 270 Mbit/s.

### Short Guard Interval

Die letzte Verbesserung des Standards IEEE 802.11n bezieht sich auf die Verbesserung der zeitlichen Abläufe in der Datenübertragung. Ein Signal zur Datenübertragung in einem WLAN-System wird nicht nur zu einem diskreten Zeitpunkt ausgestrahlt, sondern es wird für eine bestimmte Sendezeit konstant „in der Luft gehalten“. Um Störungen auf der Empfangsseite zu verhindern, wird nach dem Ablauf der Sendezeit eine kleine Pause eingelegt, bevor die Übertragung des nächsten Signals beginnt. Die gesamte Dauer aus Sendezeit und Pause wird in der WLAN-Terminologie als „Symbol“ bezeichnet, die Pause selbst ist als „Guard Interval“ bekannt.

Bei IEEE 802.11a/g wird ein Symbol mit einer Länge von 4 µs genutzt: Nach einer Übertragung von 3,2 µs und einer Pause von 0,8 µs wechselt die auf dem Trägersignal übertragene Information. 802.11n reduziert die Pause zwischen den Übertragungen auf das sogenannte „Short Guard Interval“ von nur noch 0,4 µs.



Durch die Übertragung der Datenmenge in kürzeren Intervallen steigt der maximale Datendurchsatz damit bei Nutzung der verbesserten OFDM-Modulation, zwei parallelen Datenströmen und Übertragung mit 40 MHz auf maximal 300 Mbit/s.

### Optimierung des Netto-Datendurchsatzes

Die bisher beschriebenen Verfahren haben zum Ziel, den physikalisch möglichen Datendurchsatz zu verbessern. Mit den im Folgenden beschriebenen Verfahren optimieren 802.11n-Netzwerke auch den Durchsatz, der netto zu erzielen ist – also den Durchsatz für die tatsächlichen Nutzdaten.

### Frame-Aggregation

Jedes Datenpaket enthält neben den eigentlichen Nutzdaten auch Verwaltungsinformationen, die für den reibungslosen Datenaustausch wichtig sind. Mit der Frame-Aggregation werden mehrere Datenpakete (Frames) zu einem größeren Paket zusammengefasst. Als Folge davon müssen die Verwaltungsinformationen nur einmal für das gesammelte Paket angegeben werden, der Anteil der Nutzdaten am gesamten Datenvolumen steigt.

### Block Acknowledgement

Jedes Datenpaket wird nach dem Empfang sofort bestätigt. Der Sender wird so informiert, dass das Paket richtig übertragen wurde und nicht wiederholt werden muss. Dieses Prinzip gilt auch für die aggregierten Frames bei 802.11n.

Aus einem solchen aggregierten Frame können aber unter Umständen einige Pakete erfolgreich zugestellt werden, andere jedoch nicht. Um nicht unnötig einen ganzen aggregierten Frame erneut zustellen zu müssen, aus dem vielleicht nur ein Paket nicht zugestellt wurde, wird für jedes einzelne WLAN-Paket aus einem aggregierten Frame eine separate Bestätigung erstellt. Diese Bestätigungen werden wieder zu einem Block zusammengefasst und gemeinsam an den Sender zurückgemeldet (Block Acknowledgement). Der Sender erhält eine Information über den Empfangsstatus von jedem einzelnen WLAN-Paket und kann so bei Bedarf

# LANCOM™ Techpaper

## IEEE 802.11n im Überblick

auch gezielt nur die nicht erfolgreichen Pakete erneut übertragen.

### Resultierender Datendurchsatz

Der gesamte Datendurchsatz in einem 802.11n-Netzwerk wird von der Nutzung der vorher beschriebenen Techniken bestimmt. Eine eindeutige Kombination aus Modulationsverfahren, Nutzdatenrate und Anzahl der Spatial Streams wird als Modulation Coding Scheme (MCS) bezeichnet. Der Datendurchsatz hängt weiter davon ab, ob das kurze Guard-Intervall und die Kanalbündelung auf 40 MHz genutzt werden.

802.11n verwendet den Begriff „Datendurchsatz“ anstelle von „Datenrate“ bei älteren WLAN-Standards, weil die Datenrate keine ausreichende Beschreibung mehr ist. Die folgende Tabelle zeigt den maximalen Brutto-Datendurchsatz bei Nutzung von kurzem Guard-Intervall mit 40 MHz-Kanälen.

Der Netto-Datendurchsatz – also die Menge an tatsächlich übertragenen IP-Paketen – erreicht für einen 802.11n-Datenstrom bis zu 90 Mbit/s, bei zwei Spatial Streams entsprechend bis zu 180 Mbit/s. Der in der

Praxis zu beobachtende Netto-Datendurchsatz liegt meist im Bereich zwischen 80 und 130 Mbit/s, was am individuellen Reifegrad der Hardware- und Software-Optimierung sowie an der Chipsatz-Abstimmung zwischen verschiedenen Herstellern liegt.

Datenströme	Modulation	Nutzdatenrate	Datendurchsatz (GI=0,4 µs, 40 MHz)
1	BPSK	1/2	15
1	QPSK	1/2	30
1	QPSK	3/4	45
1	16QAM	1/2	60
1	16QAM	3/4	90
1	64QAM	1/2	120
1	64QAM	3/4	135
1	64QAM	5/6	150
2	BPSK	1/2	30
2	QPSK	1/2	60
2	QPSK	3/4	90
2	16QAM	1/2	120
2	16QAM	3/4	180
2	64QAM	1/2	240
2	64QAM	3/4	270