

Tobias Gieseke
gieseke@irt.de
Sachgebiet Speicher und Netze im Rundfunk

20. Dez. 2007

Testbericht: Übertragungsverhalten einer typischen WLAN-Heimvernetzung

1. Einführung

Wireless LAN bietet seit einigen Jahren eine erschwingliche Lösung für den Aufbau eines drahtlosen Netzwerkes. Besonders öffentliche Einrichtungen wie Hochschulen, Cafés und Flughäfen nutzen WLAN, um Gäste mit Internet zu versorgen. Aber auch im Heimgebrauch ist WLAN allgegenwärtig. Wer möchte sich schon Kabel über den Flur legen, wenn ihm mit WLAN eine kostengünstige Alternative geboten wird? Setzt man einen modernen Haushalt voraus, so kann man von mindestens 2 Computern ausgehen, die mit Internet über WLAN versorgt werden müssen. Folgt man den Gedanken unbedarft, sind beide Computer mit der Geschwindigkeit von 54 Mbit/s bei 11g WLAN ausreichend versorgt. In der Praxis lernt der Benutzer jedoch, dass sich bei 2 Computern die Durchsatzrate halbiert. Jedem Rechner stehen also nur 27 Mbit/s zur Verfügung, die für das Internet aber immer noch mehr als ausreichend sind. Hat der Anwender noch ein paar Computerzeitschriften gelesen, so ist ihm klar, dass die 54 Mbit/s nur die Linkrate angibt und die Nutzdatenrate deutlich darunter liegt. Eine Annahme von 26 Mbit/s für die Nutzdatenrate ist dabei ein praktikabler Wert. Jedem der 2 Computer würden also, bei gleichzeitiger Nutzung des WLANs, etwa 13 Mbit/s zur Verfügung. Da die allermeisten Benutzer über eine Internetverbindung von, sagen wir mal, 6000 kbit/s verfügen (oder darunter), reicht die Kapazität seines WLAN theoretisch aus, um das Internet nicht auszubremsten. Dies ist sicherlich in der Praxis auch richtig, wenngleich 13 Mbit/s an jedem Computer in der Realität eine optimistische Abschätzung ist. Nun betont die Werbung von großen Netzbetreibern, dass auf das Heimnetzwerk, also auch auf das WLAN, mehr zukommt als die reine „Weiterleitung“ des Internets. Digitales Fernsehen oder Triple-Play sind hierbei die Stichworte. Die drei bisher getrennten Dienste Telefon, Internet und Fernsehen sollen in Zukunft aus einem einzelnen DSL-Kabel kommen, welches letztendlich im WLAN-Router des mehr oder weniger erfahrenen Benutzers endet.

Vielen WLAN-Nutzern dürfte vermutlich nicht bewusst sein, wie stark in der Praxis die WLAN-Geschwindigkeit absinken kann. Selbst die Formel: Nutzdatenrate geteilt durch die Anzahl der Computer, gibt nur den maximal erreichbaren Wert des Datendurchsatzes an. Deshalb führte das Institut für Rundfunktechnik (IRT) eine Messreihe in einem selbst aufgebauten WLAN durch. Sie soll zeigen, wie stark sich mehrere Stationen im WLAN gegenseitig beeinflussen. Das Institut hat sich dabei auf die Messung des Funkstandards IEEE 802.11n (Draft) spezialisiert, welcher in absehbarer Zeit 11g in Notebooks, Router etc. ablösen wird; so zumindest die Einschätzung des IRT. Die Mechanismen die für die Koordination der WLAN-Stationen zuständig sind, sind bei WLAN 11b/g und 11n identisch. Die Messungen können also auch auf ein 11g Netzwerk bezogen werden.

Um der Interpretation der Messergebnisse besser folgen zu können, sei zunächst erklärt, wie Senden und Empfangen im WLAN koordiniert wird.

2. Senden und Empfangen im WLAN

Ein wichtiger Aspekt bei WLAN ist, dass im Gegensatz zu Ethernet, so genannte versteckte Stationen (hidden Stations) auftreten (siehe Abb. 1). Weil eine Station im gängigen „Infrastruktur“-Modus (im Gegensatz zum Ad-Hoc Modus) nur mit dem WLAN-Router bzw. Access Point kommunizieren muss, kann eine Station nicht immer „hören“ ob eine andere gerade sendet.

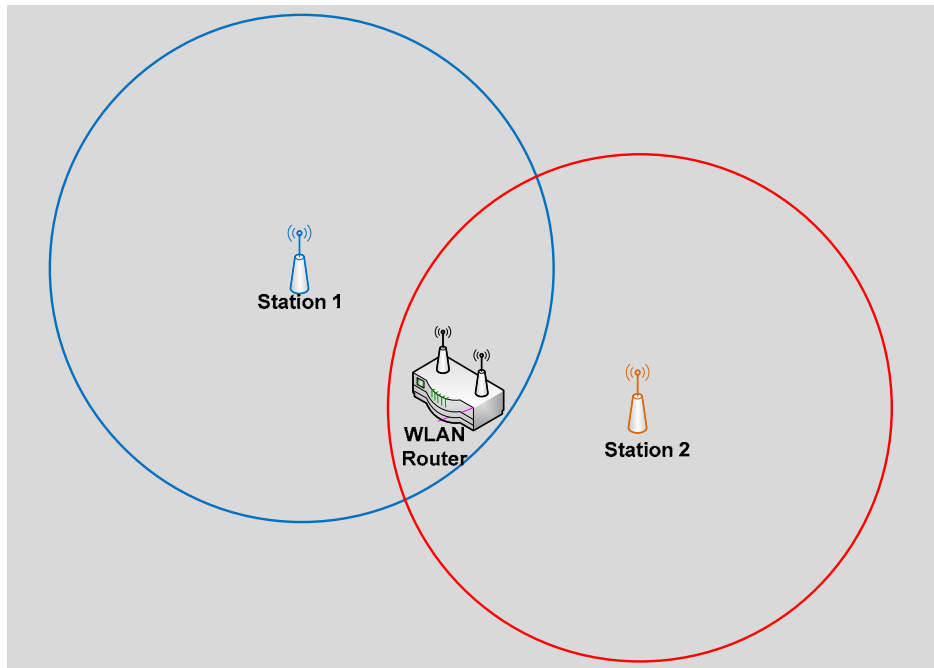


Abbildung 1: Hidden Station im WLAN

Damit nicht alle Stationen zur gleichen Zeit senden und damit eine unverständliche Summe aus Funksignalen am WLAN-Router erzeugen, darf nur dieser entscheiden wann eine Station senden darf. Diese Funktion nennt sich DCF (Distributed Coordination Function) und koordiniert die Stationen untereinander.

Möchte eine Station senden, kündigt sie das mit dem RTS-Frame (Request to Send) an. Dieser RTS Frame enthält Daten über Sender und Empfänger des Frames sowie die Dauer der geplanten Übertragung. Empfängt eine andere Station einen RTS-Frame, so gilt für sie das Übertragungsmedium für diese Dauer als besetzt und sie darf nicht senden. Bei dem Beispiel im Bild 1 würde Station 2 den RTS-Frame von Station 1 aber gar nicht empfangen, da deren Reichweite nicht ausreicht. Deshalb bestätigt der Router den RTS-Frame von Station 1 mit einem CTS-Frame (Clear-to-Send), wenn er Daten von Station 1 empfangen möchte. Dieser CTS-Frame wird von allen Stationen des BSS (Basic-Service-Set), also von den Stationen in der Reichweite des WLANs gehört, und löst das Gleiche aus wie der RTS-Frame. Ist die angekündigte Datenübertragung vorüber und vom Empfänger (Router) mit einem ACK-Frame (Acknowledge-Frame) quittiert worden, starten alle Stationen einen zufälligen Backoff-Timer. Ist der Timer bei einer Station abgelaufen darf sie einen RTS-Frame senden. Alle anderen Stationen halten dann ihren aktuellen Wert des Timers, der erst weiterläuft wenn das Medium wieder frei ist. Die Station mit dem kleinsten Timer Wert darf also immer als nächstes senden.

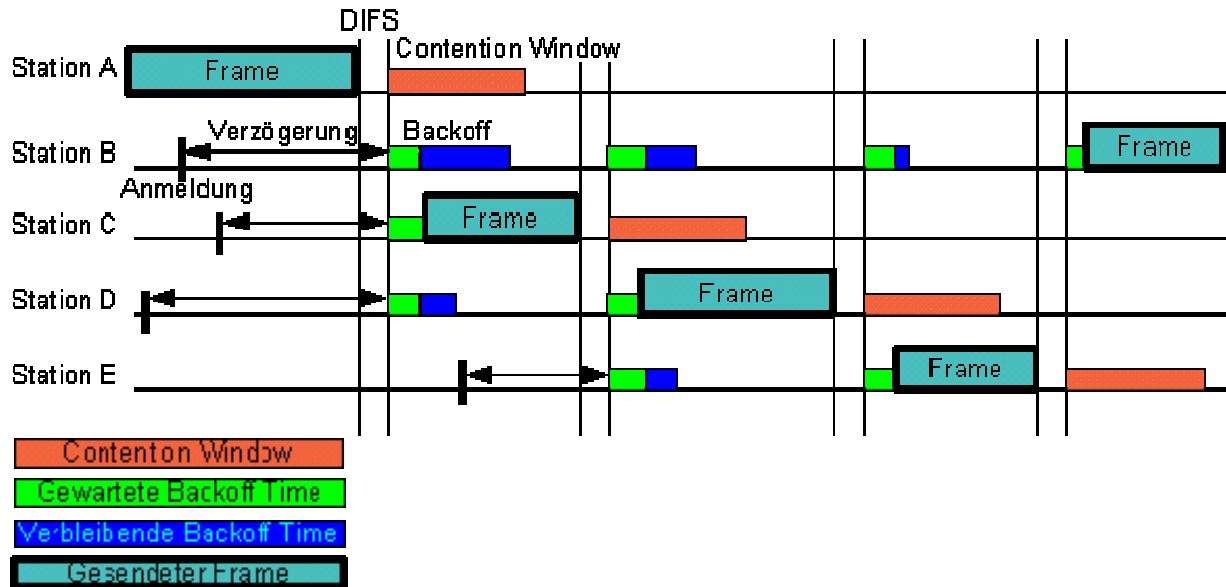


Abbildung 2: DCF bei mehreren Stationen. RTS, CTS und ACK-Frames sind nicht eingezeichnet

Nach einem ACK-Frame müssen alle Station den so genannten DIFS (DCF Inter-frame-space) abwarten. Dadurch kann bei Bedarf die sogenannte PCF (Point Coordination Function) eingreifen und eine bestimmte Station bevorzugen. Vor einer Datenübertragung oder einem CTS-Frame ist der kürzere SIFS (Short-Inter-frame-space) abzuwarten. Diese Pausen garantieren, dass sich keine Frames überschneiden. SIFS sind in Abbildung 2 nicht eingezeichnet.

Wie die Theorie deutlich macht, sendet immer nur eine Station zu einer Zeit. Somit steht nicht jeder Station die volle Nutzdatenrate von etwa 26 Mbit/s zur Verfügung. Des Weiteren führen DIFS und SIFS zu weiterer Reduktion der Datenrate. Es ist zu beachten, dass hier nur die MAC-Schicht (Media Access Control) betrachtet wurde. Die Datenrate im WLAN sinkt in der Realität zusätzlich noch durch andere Faktoren ab. Sie sind im Folgenden kurz erläutert.

Modulation:

Um überhaupt seine 54Mbit/s Linkrate zu erreichen muss ein WLAN-Gerät, meist ein WLAN-Router, auf seine höchste Modulation 64-QAM schalten. Er muss also ein Signal aussenden was 64 verschiedene Zustände hat. Dies macht es aber sehr stör anfällig und ist deshalb nur in ungestörter Umgebung möglich. Wände, große Metallgegenstände oder Störquellen zwischen Sender und Empfänger dämpfen die Nutzsignale stark, was zu einem „Herunterschalten“ der Modulation (z.B. 16-QAM) mit entsprechend niedrigerer Linkrate führt.

Coderate (Fehlerschutz):

Sie gibt an, wie groß der Anteil an Nutzdaten im Sendestrom ist. Eine Code-Rate von $\frac{3}{4}$ bedeutet, dass $\frac{1}{4}$ der gesendeten Bits zur Fehlersicherung dienen. Dadurch reduziert sich entsprechend der Anteil an Nutzbits und der Datendurchsatz sinkt. Aber genau wie bei der Modulation ist auch eine hohe Coderate nur bei weitgehend ungestörter Umgebung einsetzbar.

Bei zu groß gewählter Coderate treten zu viele Fehler auf und Pakete müssten doppelt gesendet werden, was wiederum die Durchsatzrate reduziert.

Protokollheader:

Jedes Paket eines paketorientierten Netzwerkprotokoll (TCP, IP, RTP etc.) besitzt einen Header, in dem Informationen für die Übertragung und Verwendung des Datenpaketes gespeichert sind. Diese Informationen sind für die reinen Nutzdaten der Applikation (z. B. Internet HTML-Seiten) irrelevant,

übertragen werden müssen sie aber trotzdem. Typischerweise kommen bei Applikationen mehrere Protokolle gleichzeitig zur Anwendung, sodass einem Nutzdatenpaket mehrere Header zugeordnet sein können (IP – UDP – RTP). Da der Router aber nur mit einer gewissen Geschwindigkeit senden kann, reduziert sich durch Protokollheader die Durchsatzrate der eigentlichen Nutzdaten.

3. Untersuchung einer typischen WLAN Infrastruktur eines Heimnetzwerkes

Die hier untersuchte Infrastruktur, besteht aus insgesamt 4 Stationen (STAs) von denen 3 über eine WLAN-Sichtverbindung zum Router verfügen. STA4 fungiert auch als Konsole und ist über Ethernet an den Router/AccessPoint (AP) angeschlossen.

Die Netzwerkadapter DWA-645 (PCMCIA) und DWA-140 (USB) sind von der Firma D-Link und unterstützen IEEE 802.11 Draft N.

Der verwendete Draft N Router trägt die Modellbezeichnung DIR-655. Alle Messungen werden auf Kanal 13 im 20 MHz Mode mit WPA2 Verschlüsselung durchgeführt.

Die folgende Tabelle zeigt die Übersicht mit den maßgeblich gemessenen Downstreams von der STA4.

Station	Hardware	Netzwerkadapter	Anbindung	IP-Adresse	Throughput vom AP [Mbps]
STA1	Samsung X10	DWA – 645	WLAN	192.168.0.197	22,85
STA2	Acer Ferrari 1	DWA – 140	WLAN	192.168.0.198	37,314
STA3	Shuttle X	DWA – 140	WLAN	192.168.0.195	44,11
STA4 Console	Acer Ferrari 2	1 Gbit Ethernet	Ethernet	192.168.0.199	x

Tabelle1: Anbindungsgeschwindigkeiten

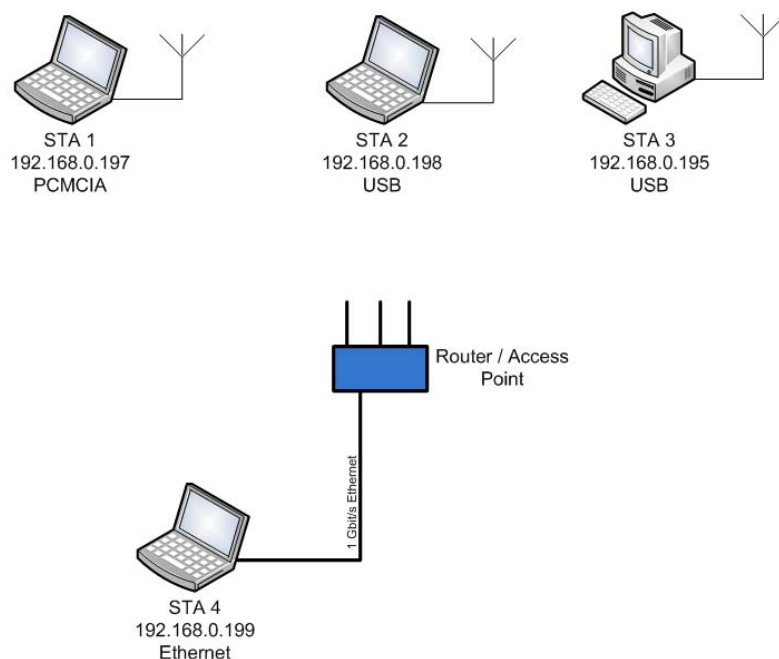


Abbildung 3: Messaufbau der Infrastruktur

Mit dem Messaufbau wird eine Situation simuliert, die einem Büro entspricht und in dem alle Computer mit WLAN über einen Access Point miteinander kommunizieren.

3.1 Vergleichsmessung

Als erstes wurde ein einfacher TCP-Dateitransfer von jeder Station zu jeder anderen Station gemessen, um die Geschwindigkeiten jeder Strecke zu ermitteln. Dies ist die Vergleichsmessung in der immer nur eine einzige Übertragung läuft. Verantwortlich für die Geschwindigkeiten sind hier nur die drei erläuterten Faktoren Modulation, Coderate und Protokolloverhead. Das Ergebnis zeigt die nachfolgende Tabelle und das zugehörige Diagramm. Die Richtung der Daten ist dabei immer von Endpoint 1 (EP1) nach Endpoint 2 (EP2).

[Mbps]		Endpoint 2			
		STA1	STA2	STA3	STA4
Endpoint 1	STA 1	X	11,913	12,797	16,401
	STA 2	13,721	X	21,354	54,215
	STA 3	56,949	28,637	X	52,739
	STA 4	22,85	37,314	44,11	X

Tabelle 2: Anbindungsgeschwindigkeiten

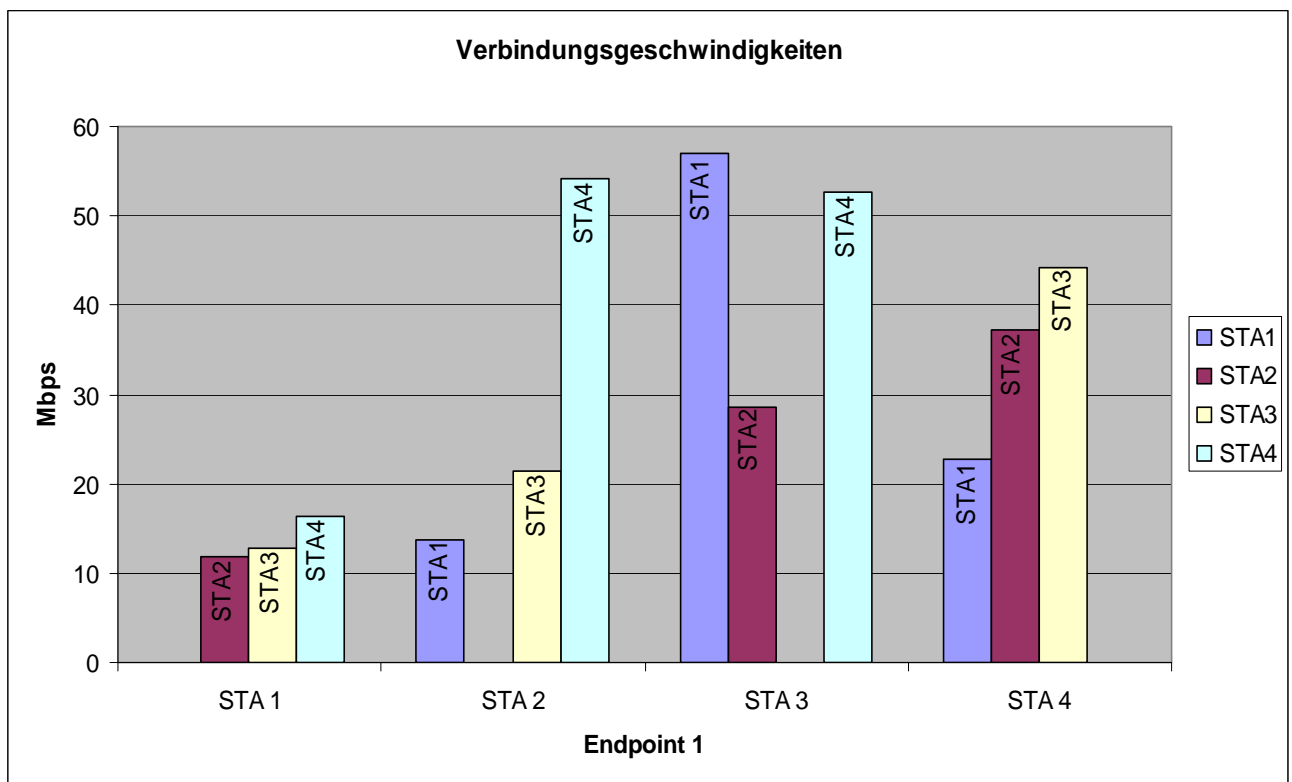


Abbildung 4: Diagramm der Verbindungsgeschwindigkeiten

Es zeigt sich, dass eine pauschale Aussage über die Verbindungsqualität einer Station nicht zu treffen ist. Selbst Upstream und Downstream derselben Verbindung können stark voneinander abweichen.

Beispiel:

STA 3 -> STA1 = 56,949 Mbps

STA 1 -> STA3 = 12,797 Mbps

Die Ursache für die sehr unterschiedlichen Durchsatzraten lässt sich wie folgt erklären. Zum einen ist in STA1 ein anderer Netzwerkadapter verwendet worden als bei STA2 und STA3. Dies erklärt die niedrigen Datenraten für STA1 als EP1.

Zum anderen ist eine Line-of-Sight-Verbindung (LOS) bei WLAN innerhalb eines von Wänden umgebenen Raumes nicht allein durch eine Direktverbindung, sondern auch durch zusätzlich existierende Mehrwegeausbreitung geprägt. Diese an Gegenständen und Wänden durch Reflexionen und Beugungen entstehende Vielzahl an unterschiedlichen Übertragungswegen erzeugt eine komplexe, über die Zeit schwankende Empfangssituation. Da beim getesteten Draft 11n Verfahren die MIMO Technik zum Einsatz kommt, welche aus den unterschiedlichen Mehrwegepfaden deutlichen Nutzen für die Datenrate ziehen kann, bedeutet dies eine empfindliche Abhängigkeit von den Standorten der Prüflinge. Da außerdem jede Art von Bewegung im Wellenfeld des Messfeldes auch die Mehrwegeausbreitung beeinflusst ergeben sich somit unterschiedlichste Anbindungen für die STAs. Näheres über MIMO ist im Blauen Bericht Nr.197 vom IRT unter www.irt.de/de/publikationen.html zu finden.

3.2 Gleichzeitige Hin- und Rückrichtung

Als nächstes wurden die Simplexübertragungen (in eine Richtung) zu einer Duplexübertragung erweitert. In beide Richtungen (Up – und Downstream) wird eine Datei ohne Beschränkung der Datenrate übertragen. Wegen der DCF (s.o.) steht jeder Richtung 50% der „Sendezeit“ zu und sollte auch somit nur 50% des Simplexdatendurchsatzes haben, wenn zur STA4 bzw. den AP gesendet wird. Bei einer Client zu Client-Verbindung sind sogar nur 25% von der langsameren Verbindung zu erwarten.

Die gemessenen Verbindungen sind in der nachfolgenden Tabelle notiert.

Duplexverbindungen [Mbps]				
EP1	EP2	Throughput im Duplex	Throughput im Simplex	Beschreibung
STA4	STA1	6,45	22,85	
STA1	STA4	8,07	16,40	
Gesamt		14,51		AP zu STA1
STA4	STA2	21,10	37,31	
STA2	STA4	23,24	54,22	
Gesamt		44,35		AP zu STA2
STA1	STA2	5,64	11,91	
STA2	STA1	5,81	13,72	
Gesamt		11,44		STA1 zu STA2
STA3	STA2	6,49	28,64	
STA2	STA3	11,79	21,35	
Gesamt		18,28		STA3 zu STA2

Tabelle 3: Messung der Duplexverbindungen.

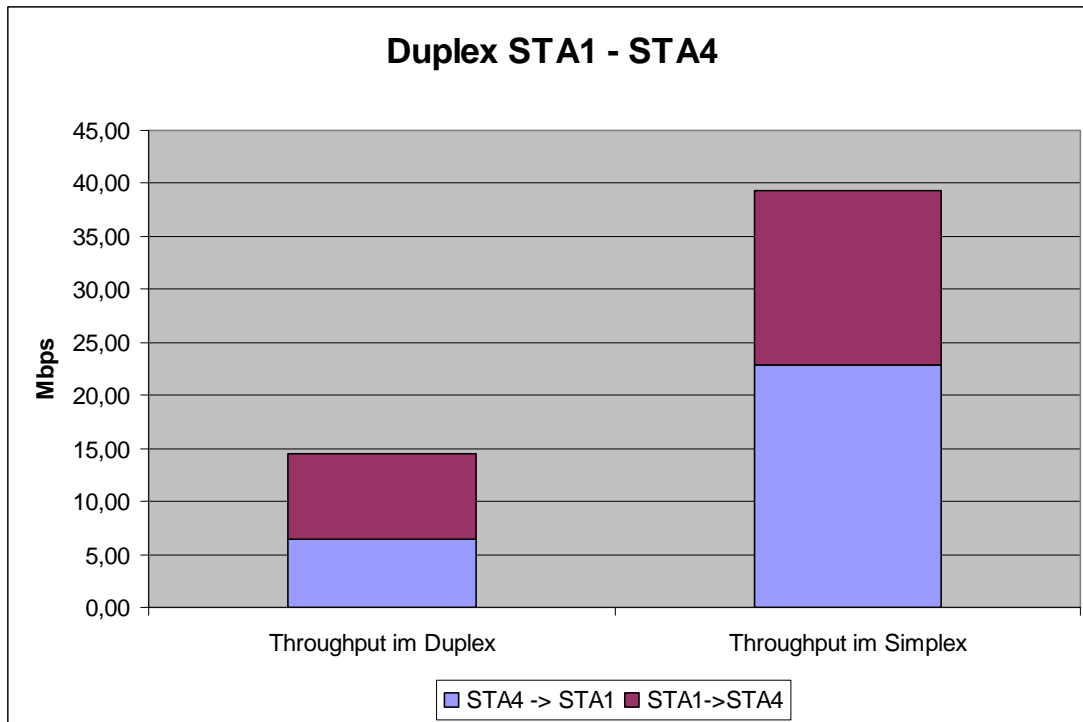


Abbildung 5: Duplex STA1 – STA4

Die Messung STA1 – STA4 ergab, dass die Summendatenrate etwa gleich der langsameren Verbindung STA1 -> STA4 im Simplex ist. Die im Simplex wesentlich schnellere Richtung wird im Duplex sogar langsamer als ihre Gegenrichtung.

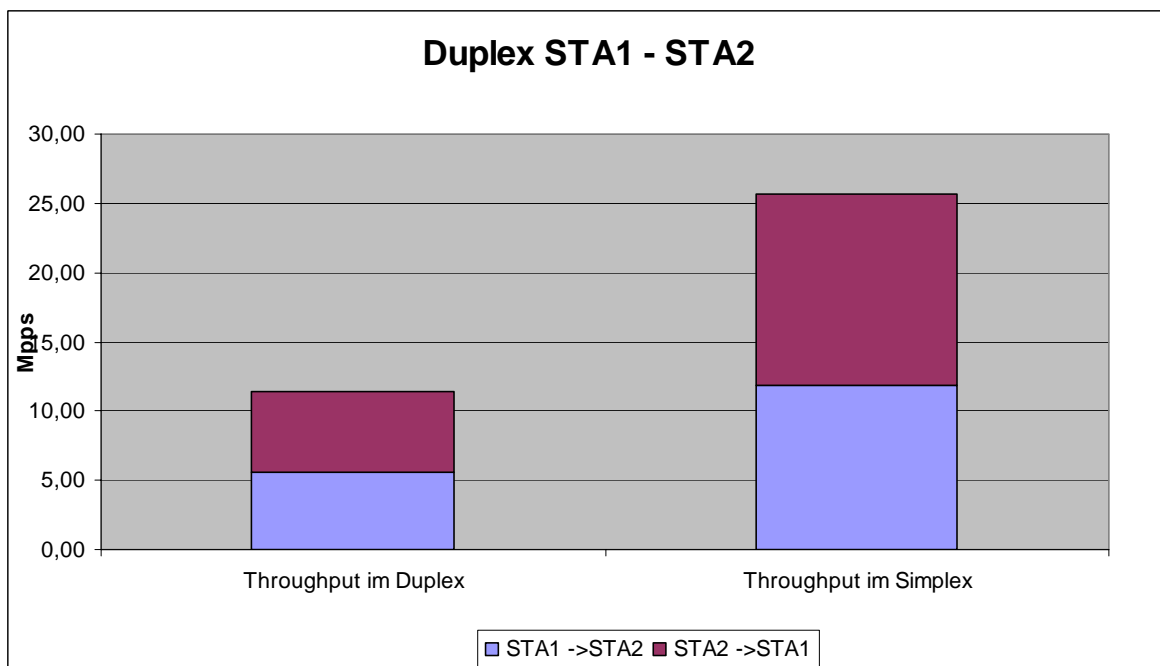


Abbildung 6: Duplex STA1 – STA2

Auch bei einer Client – Client Verbindung reduziert sich die Datenrate erheblich, jedoch nicht so stark wie erwartet. Beide Richtungen büßen hier die Hälfte von ihrer Simplexgeschwindigkeit ein. Auch hier ist die Summengeschwindigkeit gleich der langsameren Geschwindigkeit im Simplex.

3.3 Zwei gleichzeitige Verbindungen

Die nächsten Messungen enthalten gleichzeitige Datenübertragungen zwischen verschiedenen STAs. Erwartungen können bei dieser Messung nur sehr schwer getroffen werden, da die Koordination der STAs sehr undurchsichtig wird. Obwohl alle drei STAs über eine Sichtverbindung zum Access Point verfügen, ist trotzdem die Datenrate zu unterschiedlich, um mit Hilfe der DCF eine Annahme des Datendurchsatzes zu treffen (siehe Erklärung zu Mehrwegeausbreitung oben).

Zweifachverbindungen [Mbps]				
EP1	EP2	Throughput gemessen	Throughput im Simplex	Beschreibung
STA4	STA1	6,58	22,85	
STA4	STA2	21,37	37,31	
Gesamt		27,95		2 x AP zu STA
STA4	STA1	7,53	22,85	
STA2	STA3	8,41	21,35	
Gesamt		15,94		AP zu STA1 + STA2 zu STA3
STA1	STA2	6,49	11,91	
STA3	STA2	10,08	28,64	
Gesamt		16,57		STA1 und STA3 zu STA2

Tabelle 4: Zweifachverbindungen

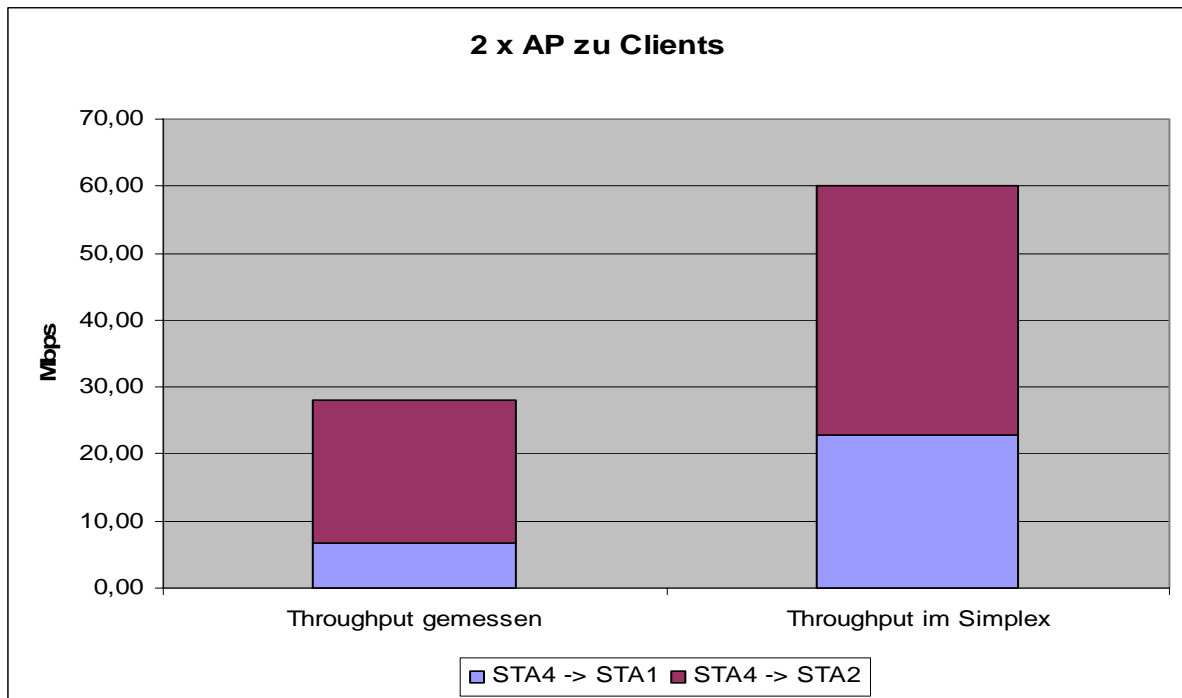


Abbildung 7: 2 mal Access Point zu Clients

Bei der 2 x AP zu Client Messung wird die STA4 -> STA1 Richtung stark ausgebremst. Während die Richtung STA4 -> STA2 um noch nicht mal 50% reduziert wird, ergibt sich bei der anderen Richtung eine Reduktion um mehr als 66%.

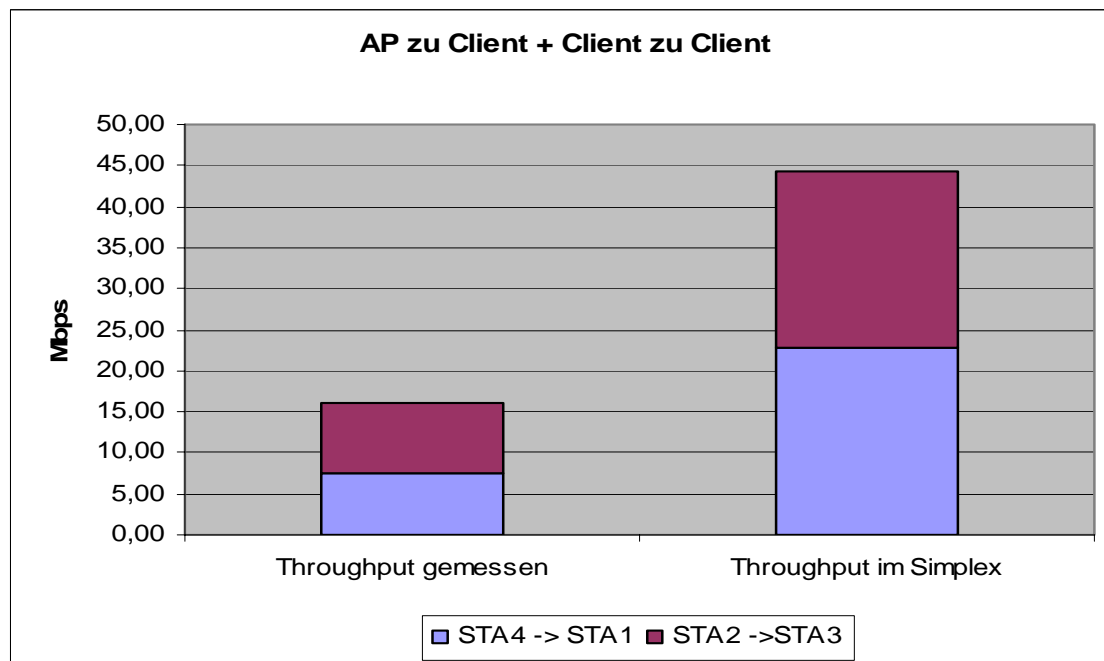


Abbildung 8: Access Point zu Client und Client zu Client

Bei dieser Messung bleibt das Verhältnis der beiden Strecken gleich. Die Gesamtdatenrate ist dennoch geringer als die der langsameren Strecke STA2 -> STA3

3.4 Drei gleichzeitige Verbindungen

Die Untersuchungen von drei gleichzeitigen Verbindungen führten zu gleichen Ergebnissen wie die vorhergegangenen Messungen. Wobei hier wiederum eine pauschale Aussage darüber, welche Strecke prozentual am meisten verliert, nicht möglich ist.

Einzig und allein ist festzustellen, dass die Bandbreite, die jede STA zur Verfügung hat überproportional absinkt, je mehr STAs sich im Netzwerk befinden.

Dreifachverbindungen [Mbps]				
EP1	EP2	Throughput gemessen	Throughput im Simplex	Beschreibung
STA4	STA1	5,577	22,85	
STA4	STA2	13,39	37,31	
STA4	STA3	16,267	44,11	
Gesamt		35,234		AP zu allen STAs
STA1	STA4	2,641	16,40	
STA2	STA4	6,017	54,22	
STA3	STA4	4,808	52,74	
Gesamt		13,466		alle STAs zu AP
STA4	STA1	2,039	22,85	
STA1	STA4	3,842	16,40	
STA3	STA4	33,252	52,74	
Gesamt		39,133		AP zu STA1 + 2x STA zu AP
STA1	STA4	3,708	16,40	
STA4	STA1	2,836	22,85	
STA4	STA3	32,134	44,11	
Gesamt		38,678		STA1 zu AP + 2xAP zu STA

Tabelle 5: Dreifachverbindungen

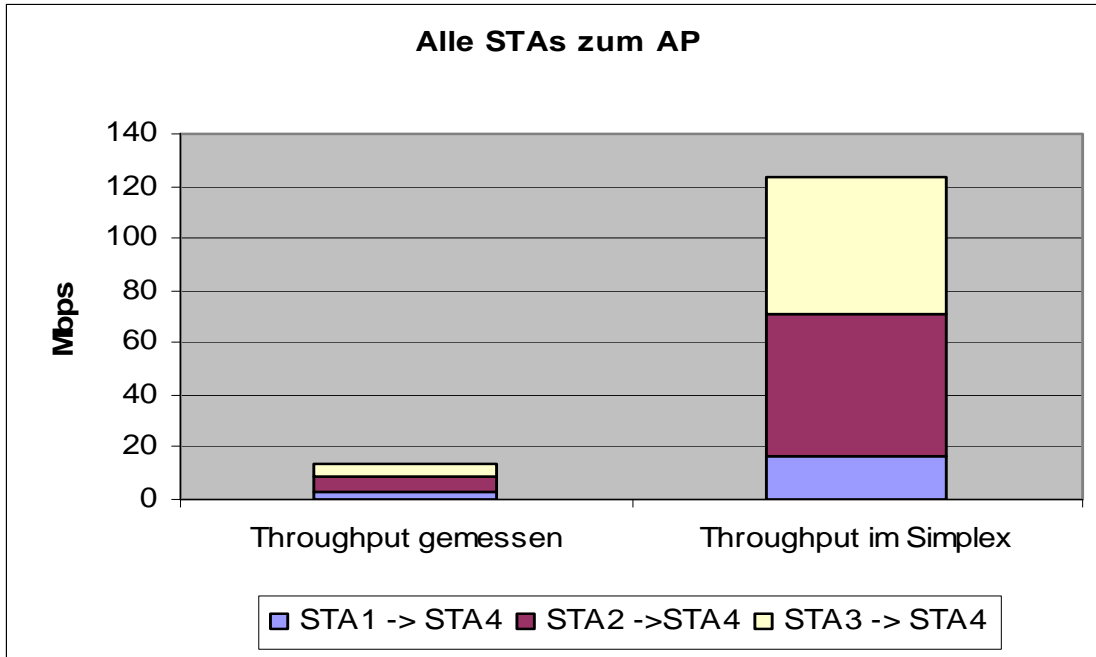


Abbildung 9: Dreifachverbindung, Stationen zum AP

Dieses Beispiel zeigt einen Extremfall, was den Leistungseinbruch der WLAN-Verbindung angeht.

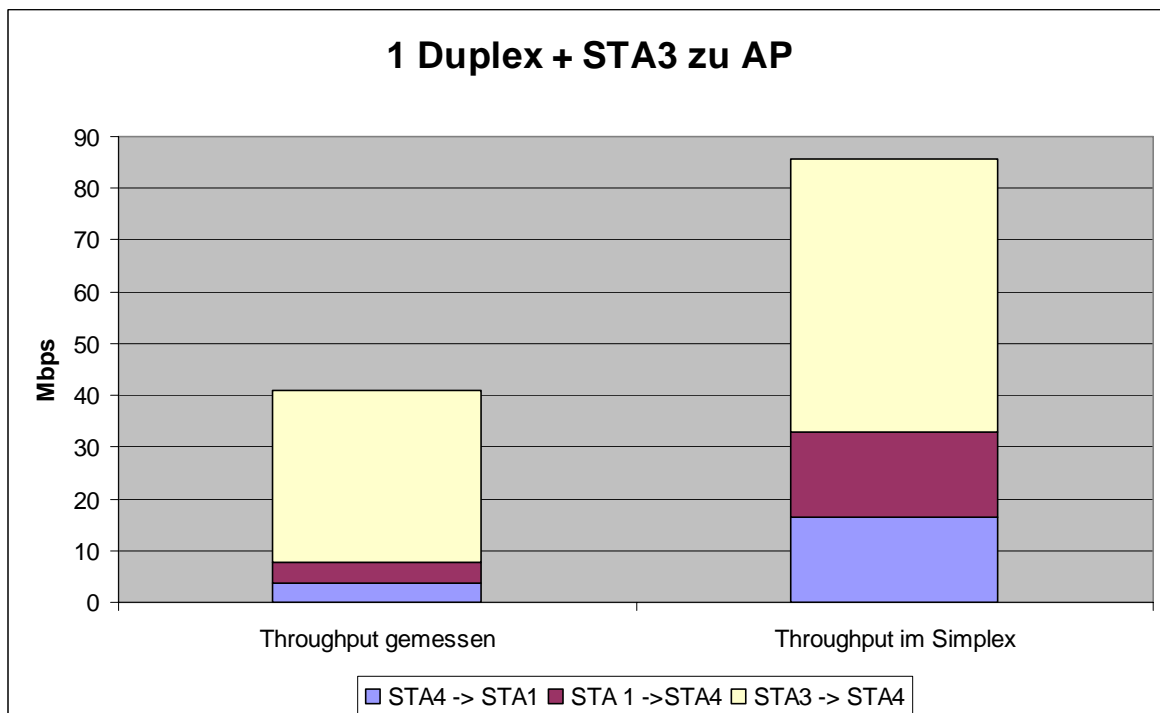


Abbildung 10: Duplexverbindung und Downlink

Unerwartet zeigt sich hier die Verbindung STA3 -> STA4 als dominant und wird nicht so stark reduziert wie, die beiden andern Strecken.

Voice over WLAN

Um herauszufinden, wie empfindlich ein VoWLAN- Gespräch (Voice over WLAN) gegen einen Download ist, der zwischen 2 anderen Stationen läuft, wird auch dieser Fall in der Infrastruktur gemessen. Dabei wird mittels der Messsoftware IxChariot die Qualität des VoIP als MOS-Wert gemessen.

Die Übersicht über die VoIP-Messung zeigt die folgende Tabelle.

Belastetes VoIP					
EP1	EP2	Script	MOS / Throughput	Erwarteter MOS oder TP	
STA4	STA1	VoIP 64kbps	4,34	4,5	
STA1	STA4	VoIP 64kbps	4,32	4,5	
STA2	STA3	HP_TP 2Mbps	1,995 Mbps	2Mbps	keine Beeinflussung des VoIP
STA4	STA1	VoIP 64kbps	4,37	4,5	
STA1	STA4	VoIP 64kbps	4,32	4,5	
STA2	STA3	HP_TP 5Mbps	4,986 Mbps	5Mbps	keine Beeinflussung des VoIP
STA4	STA1	VoIP 64kbps	4,37	4,5	
STA1	STA4	VoIP 64kbps	4,33	4,5	
STA2	STA3	HP_TP 10Mbps	9,976 Mbps	10Mbps	keine Beeinflussung des VoIP
STA4	STA1	VoIP 64kbps	4,36	4,5	
STA1	STA4	VoIP 64kbps	4,35	4,5	
STA2	STA3	HP_TP 25Mbps	19,876 Mbps	25Mbps	keine Beeinflussung des VoIP

Tabelle 6: Voice over WLAN

Das hier in IxChariot ausgewählte Script HP_TP bedeutet High_Performance_Throuput und erzeugt TCP-Traffic mit der vorgegebenen Datenrate. Wie sich zeigt ist das VoIP zu jeder Zeit bevorzugt und selbst bei Einbruch der TCP Datenrate liegt der Mean-Opinion-Score deutlich über 4,0. Durch die DCF bekommt die VoIP-Verbindung trotz ihrer geringen „Größe“ regelmäßig Sendezeit zugewiesen, sodass die kleinen Pakete auch regelmäßig beim Empfänger ankommen.

3.6 Videostreaming im WLAN

Abschließend wurde gemessen, wie sich eine Videoübertragung im WLAN verhält. Dabei wurden Videos im WLAN gestreamt, die in ihrer Summe immer die gleiche Datenrate haben. Die Messung zeigt, in wie weit ein Video mit hoher Datenrate andere Videoübertragungen beeinflusst.

Video Streaming						
EP1	EP2	Datenrate [Mbps]	Throughput [Mbps]	Lost_Data [%]	Delay [ms]	Jitter [ms]
STA4	STA1	9,00	8,984	0,084	1	0,121
STA4	STA2	9,00	8,744	2,664	6	0,288
STA4	STA3	9,00	8,833	1,671	6	0,151
STA4	STA1	13,50	13,494	0,013	0	0,012
STA4	STA2	6,75	6,701	0,661	3	0,188
STA4	STA3	6,75	6,714	0,471	2	0,137
STA4	STA1	21,60	21,582	0,114	2	0
STA4	STA2	2,70	2,702	0	4	0,671
STA4	STA3	2,70	2,7	0,046	2	0,539
STA1	STA2	6,00	6,018	0,006	1	0,046
STA2	STA3	6,00	5,989	0,252	2	0,114
STA1	STA2	9,00	9,004	0,008	1	0,047
STA2	STA3	3,00	2,996	0,013	4	0,459
STA1	STA2	10,80	10,744	0,163	6	0,174
STA2	STA3	1,20	1,199	0,097	7	1,041

Tabelle 7: Videostreaming

Auch die Videoübertragung blieb stabil, solange die Summe der Datenraten die Kapazität des WLAN nicht überschritt. Obwohl bei STA1 in der TCP-Messung die niedrigste Datenrate gemessen wurde, sind Jitter und Delay bei der Video-Messung am kleinsten, wenn STA1 beteiligt ist. Da für diese Station ein Netzwerkadapter mit PCMCIA verwendet wurde, ergibt sich durch den anderen Bus von PCMCIA eine höhere Verarbeitungsgeschwindigkeit der Netzwerkdaten im Rechner, was dazu führt, dass Delay- und Jitterzeiten geringer ausfallen. Die gemessenen Zeiten sind hier aber auch bei den USB-Adaptoren in STA2 und STA3 nicht kritisch. Eine Beeinflussung der TCP- Durchsatzmessungen durch die Ausführungen der Netzwerkadapter ist auszuschließen, da der reine Durchsatz nicht zeitkritisch ist

4. Fazit

Als Fazit der gesamten Untersuchung kann man sagen, dass sich nur sehr schwer abschätzen lässt, wie viel Bandbreite jedem Client in einem WLAN-Netz zur Verfügung steht. Insbesondere bei Übertragungsbedingungen mit Sichtverbindung (LOS), aber innerhalb eines von Wänden und Mauern umgebenen Raumes, führt die Mehrwegeausbreitung gerade bei MIMO-basierten 11n-Geräten zu einer Zeit- und Ortsabhängigkeit. Je nach Ausführung des WLAN-Adapters des Clients und der Gegenseite schwanken bei Sichtverbindung die Datenraten zwischen 10 und 50 Mbit/s bei neuesten 11n Routern und Netzwerkkarten. Erzeugen mehrere Clients gleichzeitig großen Traffic, reduziert sich die Datenübertragungsrate erheblich. VoIP und Videostreams lassen sich solange fehlerfrei übertragen, bis eine gewisse „Kapazität“, die sich aus der Konstellation Router und Anzahl/Art der Clients ergibt, erreicht wird. Diese Kapazität liegt in dem vorliegenden Netzwerk bei ca. 27 MBit/s. Theoretisch würde diese Grenze bei 11n WLAN bei geschätzten 150 MBit/s liegen. Bei einem optimierten Netzwerk könnte in der Praxis mit dem derzeitigen Stand des 11n Standards jedoch maximal ca. 50 MBit/s als „Kapazität“ erreicht werden. Die DCF sorgt in jedem Fall dafür, dass auch Übertragungen mit geringer Datenrate nicht vernachlässigt werden.