



Zürich, März 2015 / gd

Informationsblatt: W-LAN

1. Technische Standards

Die grundlegenden technischen Standards von W-LAN sind diejenigen von IEEE. Sie wurden im Wesentlichen von der Europäischen Regulierungsbehörde ETSI übernommen und wo nötig an geltende Vorschriften angepasst. Der Grundstandard ist IEEE 802.11. Mit dem technischen Fortschritt entwickelte sich diese Norm weiter, weshalb heute eine ganze Reihe von Unterstandards existiert. Diese sind mit Buchstaben als Zusatz gekennzeichnet. Die wichtigsten sind gegenwärtig b, g, h und n. In Zukunft wird der Standard ac bedeutsam werden. Er ist für den Transfer von sehr grossen Datenmengen (mehrere Gigabits pro Sekunde) vorgesehen.

Die meisten W-LAN-Anwendungen nutzen die Standards 802.11b und 802.11g im 2.4 GHz-Band. Zunehmend wichtig ist das 5 GHz-Band, das in Europa durch den Standard 802.11h reguliert ist (dieser entspricht mit einigen Ausnahmen den in den USA bzw. Japan geltenden 802.11a bzw. 802.11j). 802.11n ist ein Standard, der die Nutzung beider Frequenzbänder gleichzeitig ermöglicht. Grundsätzlich ist er (deshalb) der technisch leistungsfähigste. Allerdings sind nicht alle erhältlichen W-LAN Produkte so konfiguriert, dass sie die vollen Möglichkeiten der Norm nutzen.

Die wichtigsten technischen Daten zu den 4 heute üblichen Standards sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Bei der Zeile „reale Datenrate“ handelt es sich um die Angabe, was unter Alltagsbedingungen realisiert werden kann. Der in der Zeile maximale Datenrate aufgeführte Wert ist eine eher theoretische Grösse, die nur unter idealen Bedingungen im Labor realisiert werden kann.

| | 802.11b | 802.11g | 802.11h | 802.11n |
|-------------------------|---------|---------|------------|----------------|
| Frequenzbereich (Ghz) | 2.4 | 2.4 | 5 | 2.4 & 5 |
| Reichweite Indoor (m) | 30 | 30 | 30 | 30 |
| Anzahl Kanäle | 3 | 4 | 19 | 4 & 19 |
| Kanalbandbreite (MHz) | 20 | 20 | 20 | 10, 20, 40 |
| max. Datenrate (Mbps) | 11 | 54 | 54 | 450 |
| reale Datenrate (Mbps) | 5 | 20 | 30 | 150 |
| Frequenzwahl DFS | nein | nein | ja | optional* |
| Leistungsregelung TPC | nein | nein | ja | optional |
| max. Leistung EIRP (mW) | 100 | 100 | variabel** | 100/variabel** |

* falls im Gerät keine dynamische Frequenzwahl implementiert ist, darf das 5 GHz-Band wegen Störungsgefahr gegenüber anderen Funkanwendungen nicht genutzt werden

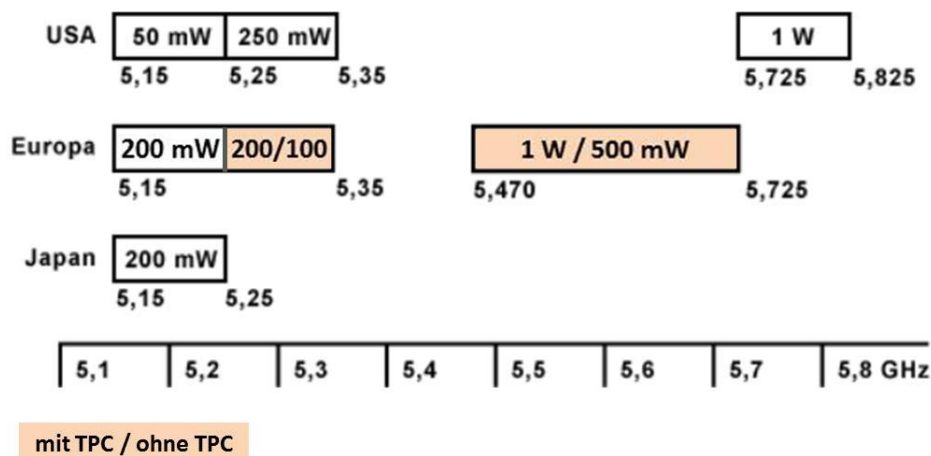
** je nach Frequenzbereich im 5 GHz-Band (siehe unten)

Tabelle 1: Ausgewählte technische Spezifikationen von W-LAN Standards.

Was die Leistungen von W-LAN Geräten anbetrifft: die Standards begrenzen die maximale Sendestärken gemäss Tabelle 1. Im 2.4 GHz-Band ist die maximal erlaubte Leistung auf 100 mW begrenzt, im 5 GHz-Band sind die Bestimmungen komplexer und international nicht harmonisiert. Selbst in Europa gibt es mit Grossbritannien ein Land, das eine eigene (lockerere) Regelung aufweist. In untenstehender Abbildung (Figur 1) sind die Vorschriften zusammengestellt. Um Störungen mit anderen Anwendungen, insbesondere mit Wet-



terrardaren, zu vermeiden, hat die Europäische Regulierungsbehörde ETSI für die Nutzung dieses Bandes durch W-LAN zwingend DFS (Dynamic Frequency Selection) vorgeschrieben: sobald ein W-LAN Gerät eine Anwendung detektiert, die gestört werden kann, wechselt es die Frequenz auf ein unbesetztes Nachbarband. Um das Störpotenzial weiter einzudämmen, ist auch die Leistungsobergrenze restriktiv gehandhabt. Nur wenn ein Gerät eine automatische Leistungsregelung (TPC – Transmit Power Control) besitzt, darf der Pegel überschritten werden (siehe Figur). Die automatische Leistungsregelung sorgt dafür, dass ein Gerät stets die schwächste Leistung verwendet, die es für eine einwandfreie Datenkommunikation noch braucht. In der Abbildung unten sind die gültigen Regelungen im 5 GHz-Band dargestellt.



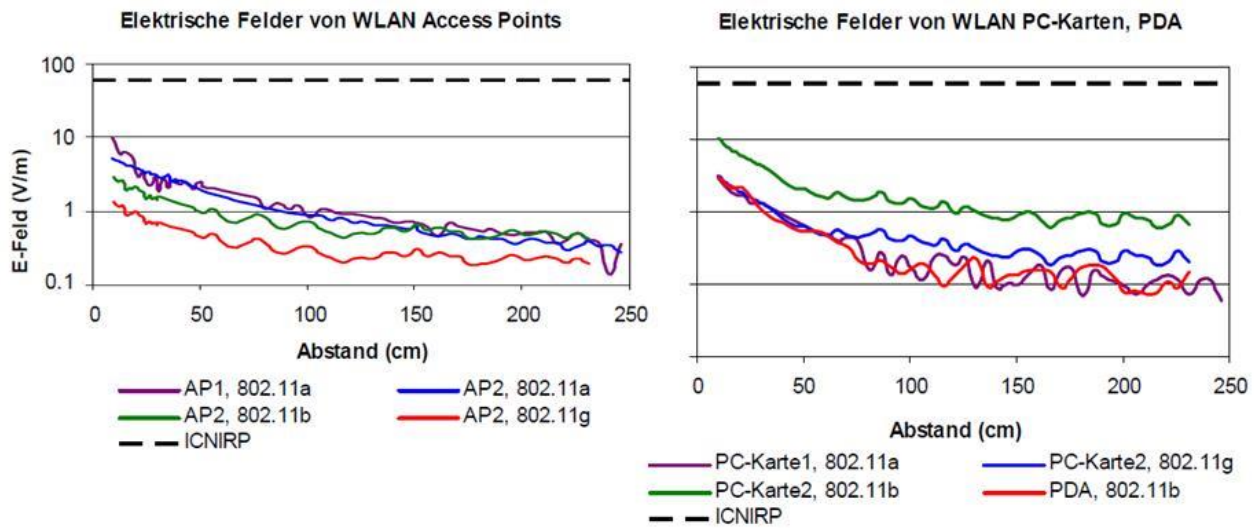
Figur 1: Maximal zulässige Sendeleistungen von W-LAN im 5 GHz-Band. Quelle: [2], eigene Ergänzungen.

Im Alltagsbetrieb sind die Sendestärken durchwegs geringer als die Standards erlauben, denn ein Access-Point ist selten ausgelastet. Je nach Anwendung wird unterschiedlich viel Kapazität benötigt. Surfen in Websites, skypen, audio streaming oder youtuben brauchen in den Standards 802.11g/h jeweils weniger als 5% der Kapazität. Erst hochauflösende Videos und Filetransfers nutzen die verfügbaren Bandbreiten. In [1] wurden aktive Access-Points vermessen. Die durchschnittliche Auslastung betrug 1.4%, die Maxima lagen im Bereich von 10%. Wenn keine Nutzdaten kommuniziert werden, etwa im Stand-by Betrieb, senden W-LAN Geräte nur Pilotsignale aus, damit sie bei einer Anfrage sofort betriebsbereit sind. Die durchschnittliche Sendeleistung im Stand-by Modus beträgt weniger als 1 mW. Auch müssen sich häufig mehrere Access-Points die verfügbaren Frequenzen teilen, so dass ein einzelnes Gerät nicht die maximale Datenrate nutzen kann. Zuletzt: die konkret verwendeten Antennen in den Geräten besitzen einen leichten Bündelungseffekt; dieser verpflichtet die Hersteller, die Leistungseinspeisung zu drosseln, um die Obergrenze der erlaubten Sendestärke (definiert für isotrope Antennen – sog. Rundstrahler) nicht zu überschreiten. Access-Points im 2.4 GHz-Band senden deshalb mit höchstens 60 mW.

2. Immissionen

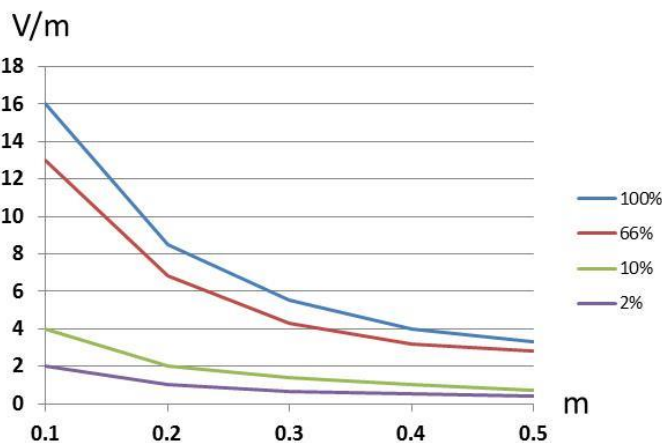
In [3] wurden die Felder von verschiedenen drahtlosen Indoor-Anwendungen, darunter auch W-LAN, im Labor unter sog. worst-case Annahmen (maximale Leistungen/Datenraten) gemessen. Wie bereits erwähnt arbeiten die Geräte in realen Umgebungen in der Regel deutlich unterhalb des Maximums und wenn keine Daten transferiert werden, senden die Anlagen nur ein technisches Kontrollsignal aus. Figur 2 aus einer Publikation des Bundesamtes für Gesundheit [4] zeigt die in [3] rapportierten worst-case Immissionen bei W-LAN Geräten. Aufgezeichnet sind die elektrischen Feldstärken in Abhängigkeit von der Distanz zur Antenne. (zur Orientierung ist der Immissionsgrenzwert der NISV – er entspricht dem ICNIRP Grenzwert – in schwarz vermerkt)¹.

¹ der Anlagegrenzwert (AGW) gilt nicht für W-LAN Access-Points und andere Konsumgüter (W-LAN Peripheriegeräte, Schnurlostelefone, Bluetooth-Sender etc.). Der AGW bezieht sich nur auf grosse Infrastrukturen wie Radio/TV-Sender oder Mobilfunkbasisstationen.



Figur 2: Elektrische Feldstärken von W-LAN Geräten in Abhängigkeit von der Distanz zur Sendeantenne unter worst-case Bedingungen. Quelle: [3], leicht angepasst.

In Figur 3 sind die elektrischen Feldstärken eines W-LAN Access-Points in Abhängigkeit von seiner Auslastung dargestellt. Die Daten wurden [1] entnommen. Betreffend Auslastung gilt es auch zu beachten: W-LAN nutzt verschiedene Modulationsverfahren. Je besser die Empfangsbedingungen, desto effizientere Verfahren werden eingesetzt. Effizienz wird dabei verstanden als Anzahl übermittelter Informationen pro Zeiteinheit. Werden weniger Datenpakete pro Sekunde versendet, sinken die Immissionen. Access-Points verursachen deshalb für die Übertragung einer bestimmten Datenmenge bei guten Empfangsbedingungen weniger Immissionen als bei schlechten Empfangsbedingungen.



Figur 3: Elektrische Feldstärken eines 2.4 GHz W-LAN Access-Points unter verschiedenen Auslastungen (100%: Simulation; 66% hochauflösendes Video streaming; 10% ausgelasteter Büroalltag, 2% allg. Durchschnitt). Daten: [1], gerundet.

Auf die Immissionen von W-LAN Netzwerken mit mehreren Access-Points wird in Abschnitt 4 näher eingegangen. Ein Vergleich der Immissionen von W-LAN Geräten mit anderen Anwendungen findet sich im FSM-Informationsblatt „Hochfrequenzfelder in Innenräumen“ [5].



3. Peripheriegeräte: absorbierte Leistung

Bei Geräten, die nahe am Körper verwendet werden (Telefone, Funkkopfhörer, Funkkarten in Tablets, etc.), limitieren die internationalen Produktnormen die maximale Einstrahlung auf den Körper. Sie schreiben vor, dass die absorbierte Leistung in Kopf und Rumpf 2 W/kg, in den Extremitäten 4 W/kg nicht übersteigen darf. In [3] sind für verschiedene Anwendungen diese sog. SAR-Werte² (sie gelten stets unter worst-case Bedingungen, also bei maximaler Sendeleistung) ermittelt worden. Tabelle 2 zeigt die Ergebnisse.

| | 10g-SAR (W/kg) |
|-------------------|-------------------|
| DECT Mobil | 0.01 - 0,05 |
| Bluetooth I | 0.5 |
| Bluetooth II | 0.01 |
| Bluetooth III | 0.001 |
| WLAN Peripherie | 0.1 - 0.8 |
| GSM Mobiltelefone | 0.1 - 2 |

Tabelle 2: SAR-Werte (Grössenordnungen) verschiedener Funkanwendungen bei maximalen Datenraten bzw. Sendeleistungen. Quellen: [3], [6]

Je nach Konstruktionsart variieren die Werte zwischen einzelnen Produkten markant. Entscheidend ist die Anordnung der Antenne. Wenn diese räumlich gut ins Gerät integriert ist, sind die SAR-Werte tiefer als in der Tabelle dargestellt, denn in [3] ist für die Messung der Exposition gegenüber W-LAN Peripheriegeräten die Antenne unmittelbar an der Oberfläche des Körpers positioniert worden. In dieser Konfiguration ergeben sich Belastungen in der Grössenordnung von GSM-Mobiltelefonen. Bei weniger nahe positionierten Antennen und im Alltagsbetrieb (hauptsächlich downloads, vergleichsweise wenige uploads mit aktiv sendender Antenne) sind die Belastungen deutlich tiefer: befindet sich etwa ein Tablet oder Laptop Computer auf dem Pult, ist der Abstand der Funkkarte zum Körper so gross, dass gemäss Berechnungen in [7] der SAR-Wert im Rumpf und Kopfbereich von 10 Jahre alten Kindern 0.005 W/kg beträgt. Gemäss [8] beläuft sich der Wert im realen Betrieb in Schulen auf 0.0001 W/kg (Distanz zum Laptop: 30 cm).

4. Netzwerke

Betreibt man mehrere Access-Points, so summieren sich die Felder der einzelnen Gräte. Dabei wächst das Summensignal nicht linear mit den Sendestärken der Einzelfelder. Wenn beispielsweise an einem Arbeitsplatz der nächstgelegene W-LAN Sender ein Feld von 1 V/m erzeugt und von zwei weiter entfernten Access-Points Felder von 0.5 V/m und 0.1 V/m gemessen werden, dann beträgt die Gesamtmission der drei Felder nicht, wie man intuitiv vielleicht meinen könnte, 1.6 V/m. Die Gesamtfeldstärke³ beläuft sich in diesem Fall auf 1.12 V/m. Das Summensignal wird in aller Regel vom stärksten Einzelsignal dominiert. Ein Netzwerk aus mehreren Access-Points erzeugt deshalb einen insgesamt nur geringfügig höheren Pegel (siehe auch [9]) – häufig sogar einen niedrigeren, weil bessere Funkverbindungen vorliegen und die Netzelemente (Access-Points und Peripheriegeräte) daher mit effizienteren Modulationsverfahren arbeiten können, also für dieselbe Datenmenge weniger Pakete pro Sekunde versenden müssen. Wenn ein Netzwerk mit Leistungsregelung eingesetzt wird, sinken die Gesamtmissionen zusätzlich, weil dann stets die tiefsten möglichen Sendestärken zum Einsatz kommen. In [10] wurde in einem Gebäude mit 7 verschiedenen Netzwerken (ohne Leistungsregelung) und mit über 200 Peripheriegeräten, wovon bei der Hälfte die maximal mögliche Datenrate eingestellt war, die Innenraumbelastung gemessen. In dieser eher unrealistisch funktintensiven Situation betrug die durchschnittliche Feldstärke 1.8 V/m. In realen Netzwerken sind die Geräte selten stark

² Bei Anwendungen nahe am Körper kann die Absorption kleinräumig stark variieren. In der Norm interessiert das am stärksten belastete Gewebe. Dabei hat man sich auf 10g geeinigt. 10g Gewebe entsprechen dem Volumen eines Würfels von etwas mehr als 2 cm Kantenlänge. Für dieses am stärksten belastete Gewebvolumen muss der SAR-Grenzwert eingehalten sein.

³ Berechnung: Wurzel aus der Summe der quadrierten Einzelfeldstärken.



ausgelastet. In [8] wurden 8 Schulnetzwerke während des Einsatzes im Unterricht vermessen. Die durchschnittliche Auslastung betrug um 5%. Nur während 5% der Zeit waren die Geräte stärker als 10% belegt.

5. Fazit

W-LAN Sender ermöglichen eine effiziente drahtlose Kommunikation. Es gibt mehrere Funkstandards, die unterschiedlich schnelle Verbindungen zulassen. Der neueste Standard ist mit Leistungsregelung ausgestattet, d.h. er sendet nur so stark, wie für eine optimale Datenverbindung gerade nötig ist. Ältere Standards senden mit konstanter Leistung. Die Immissionen durch W-LAN Sender und Peripheriegeräte können sehr unterschiedlich sein. Wird ein Gerät nicht benutzt (kein Datentransfer, Stand-by Betrieb), sendet es nur kurze Pilotsignale aus. Diese erzeugen keine nennenswerten Feldstärken. Bei aktiver Nutzung ist die aktuelle Anwendung entscheidend: die meisten Anwendungen, etwa surfen auf dem Internet, nutzen nur wenige Prozent der möglichen Kapazität. Entsprechend gering sind dann die Immissionen. Die datenintensivsten Anwendungen sind hochauflösendes Video-Streaming und file-transfers. Diese benötigen bis über die Hälfte der Sendekapazität eines Access-Points. Im Alltagseinsatz in einem Büro misst man Auslastungen bis gegen 10%. Die durchschnittlichen Feldstärken liegen dann, wenn man sich nicht unmittelbar bei einem Access-Point befindet, stets unter 1 V/m. In W-LAN Netzen sind meist mehrere Sender aktiv. Die elektromagnetischen Felder von gleichzeitig sendenden Geräten summieren sich dabei. Das Gesamtsignal entspricht jedoch nicht der Summe der Einzelsignale. In aller Regel ist es nur leicht höher als das stärkste Einzelsignal. Mehrere Access-Points bedeuten meist tiefere Immissionen, weil die Geräte bei kürzeren Distanzen bessere Empfangsbedingungen haben und dadurch Daten mit effizienteren (Modulations)Verfahren übermitteln können. Netzwerke des neuesten Standards mit Leistungsregelung senken die Immissionspegel zusätzlich.

6. Literatur

- [1] Joseph, W., Pareit, D., Vermeeren, G., Naudts, D., Verloock, L., Martens, L., Moerman, I. (2013): Determination of the duty cycle of WLAN for realistic radio frequency electromagnetic field exposure assessment. *Prog Biophys Mol Biol*, 111, 30-36.
- [2] <http://www.elektronik-kompodium.de/sites/net/0907041.htm>,
- [3] Kramer, A., Kühn, S., Lott, U., Kuster, N. (2005): Development of Procedures for the Assessment of Human Exposure to EMF from Wireless Devices in Home and Office Environments; http://www.bag.admin.ch/themen/strahlung/00053/00921/00922/index.html?lang=de&download=M3wBUQCu/8ulmKD_u36WenojQ1NTTjaXZnqWfVpzLhmfnapmmc7Zi6rZnqCkkIN0fHaCbKbXrZ2lhtTN34a13p6YrY7P1oah162apo3X1cjYh2+hojVn6w
- [4] BAG (Bundesamt für Gesundheit; 2007): Risikopotenzial von drahtlosen Netzwerken; <http://www.bag.admin.ch/wlan-bericht>
- [5] FSM (Forschungsstiftung Strom und Mobilkommunikation; 2005): Informationsblatt Innenraumbelastungen; http://www.emf.ethz.ch/fileadmin/redaktion/public/downloads/3_angebot/wissensvermittlung/komment_infobl_broch/Infoblatt_Innenraeume.pdf
- [6] <http://www.handywerte.de/>
- [7] Findlay, R.P., Dimbylow, P.J. (2010): SAR in a child voxel phantom from exposure to wireless computer networks (Wi-Fi). *Phys. Med. Biol.*, 55, 7, N405-11.
- [8] Khalid, M., Mee, T., Peyman, A., Addison, D., Calderon, C., Maslanyj, M., Mann, S. (2011): Exposure to radio frequency electromagnetic fields from wireless computer networks: duty factors of Wi-Fi devices operating in schools. *Prog Biophys Mol Biol*, 107, 3, 412-20.
- [9] Malone, D., Malone, L.A. (2009): Ambient radiofrequency power: the impact of the number of devices in a Wi-Fi network. *Health Phys*, 96, 6, 629-35.
- [10] Verloock, L., Joseph, W., Vermeeren, G., Martens, L. (2010): Procedure for assessment of general public exposure from WLAN in offices and in wireless sensor network testbed. *Health Phys*, 98, 4, 628-38.