



Zürich, März 2015 / update März 2016 / 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**

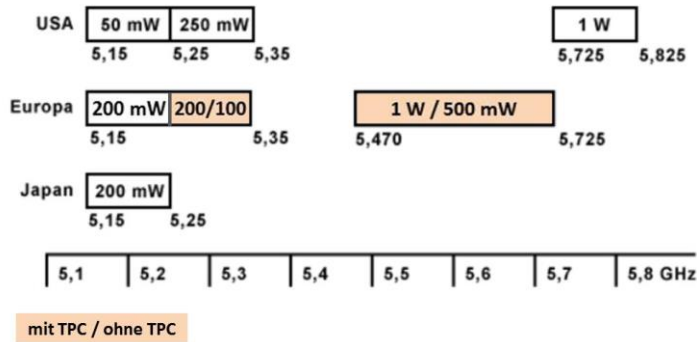
* falls im Gerät keine dynamische Frequenzwahl implementiert ist, darf das 5 GHz-Band wegen Störungsgefahr gegenüber anderen Funkanwendungen nicht genutzt werden

** 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 Wetterradaren, 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

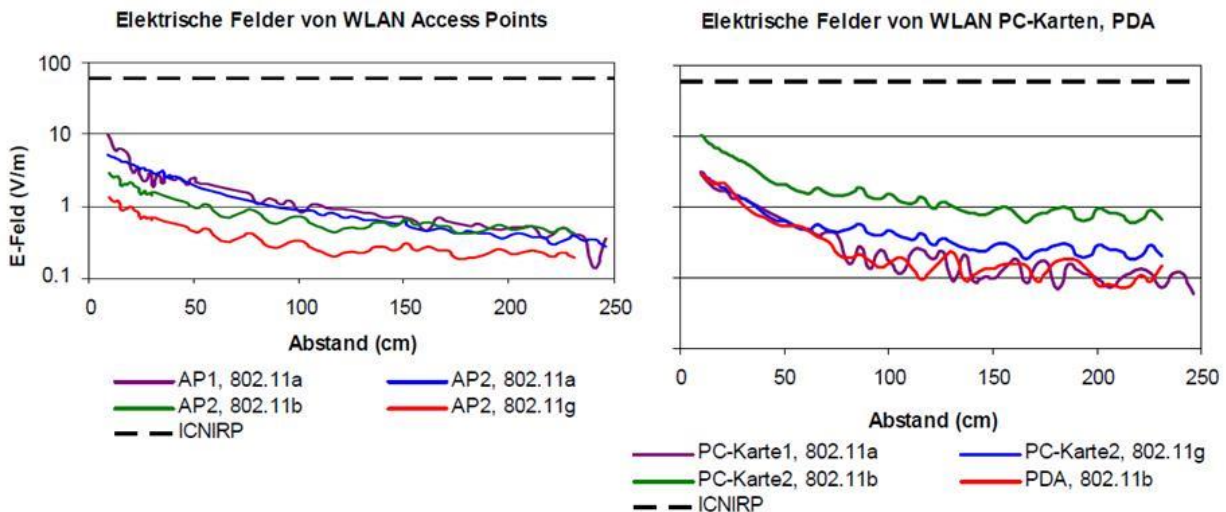
Pegel überschritten werden (siehe Figur). Die automatische Leistungsregelung sorgt dafür, dass ein Gerät stets die schwächste Leistung verwendet, die es für eine einwandfreie Datenkommunikation noch braucht. In der Abbildung unten sind die gültigen Regelungen im 5 GHz-Band dargestellt. Zuletzt: die konkret verwendeten Antennen besitzen einen leichten Bündelungseffekt; dieser verpflichtet die Hersteller, die Leistungseinspeisung zu drosseln, um die für isotrope Antennen (Rundstrahler) definierte Maximalleistung nicht zu überschreiten. Access-Points im 2.4 GHz-Band senden mit höchstens 60 mW Eingangsleistung.



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

2. Immissionen von einzelnen Geräten

Worst-Case Annahmen: In [2] wurden die Felder von verschiedenen drahtlosen Indoor-Anwendungen, darunter auch W-LAN, im Labor unter worst-case Annahmen (maximale Leistungen/Datenraten) gemessen. In realen Umgebungen arbeiten die Geräte 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 [3] zeigt die in [2] 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.



Figur 2: Elektrische Feldstärken von W-LAN Geräten in Abhängigkeit von der Distanz zur Sendeantenne unter worst-case Bedingungen. Quelle: [2], leicht angepasst; logarithmische Skala für die Feldstärke.

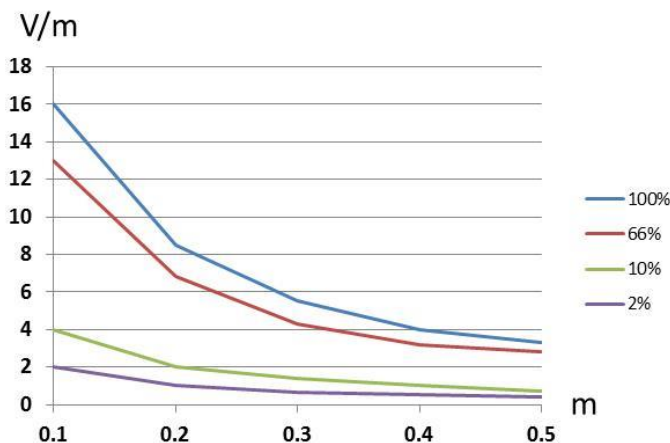
¹ der Anlagegrenzwert (AGW) gilt nicht für W-LAN Access-Points und andere Konsumgüter (W-LAN Peripheriegeräte, Schnurlostelefone, Bluetooth-Sender etc.). Der AGW bezieht sich nur auf grosse Infrastrukturen wie Radio/TV-Sender oder Mobilfunkbasisstationen.



Alltagsbetrieb: Im Alltagsbetrieb sind die Sendestärken durchwegs geringer als die Standards erlauben, denn ein Access-Point ist ganz 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 (gemäss [4] sind es sogar nur Zehntel eines Prozentes). Erst hochauflösende Videos und Filetransfers nutzen die verfügbaren Bandbreiten wirklich. In [5] 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 Pilot-signale 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 Peripheriegerät nicht die maximale Datenrate nutzen kann.

In Figur 3 sind die Feldstärken eines W-LAN Access-Points in Abhängigkeit von seiner Auslastung dargestellt. Die Daten wurden [5] entnommen. Betreffend Auslastung gilt zu beachten: W-LAN nutzt verschiedene Modulationsverfahren. Je besser die Empfangsbedingungen, desto effizienter wird gesendet (Effizienz verstanden als Anzahl übermittelter Informationen pro Zeiteinheit). Access-Points verursachen deshalb bei der Übertragung (einer bestimmten Datenmenge) bei guten Empfangsbedingungen weniger Immissionen als bei schlechten Empfangsbedingungen.

In [6] wurden die persönlichen Expositionen gegenüber W-LAN (und anderen Funkanwendungen) gemessen. Die durchschnittlichen Feldstärken über einen Tag gemittelt beliefen sich auf 0.05 V/m. Ca. 95% lagen unterhalb 0.2 V/m. Der Anteil der W-LAN Strahlung an der persönlichen Gesamtexposition (im Durchschnitt 0.18 V/m) belief sich auf 5%.



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: [5], gerundet.

Ein Vergleich der Immissionen von W-LAN Geräten mit anderen Anwendungen findet sich im FSM-Informationenblatt „Hochfrequenzfelder in Innenräumen“ [7].

3. Immissionen von Netzwerken

Betreibt man mehrere Access-Points, so summieren sich die Felder der einzelnen Geräte. 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 Gesamtfeldstärke² beläuft sich in diesem Fall auf 1.12 V/m. Das Summensignal wird in aller Regel vom stärksten Einzelsignal dominiert. Ein Netzwerk

² Berechnung: Wurzel aus der Summe der quadrierten Einzelfeldstärken.



aus mehreren Access-Points erzeugt deshalb einen insgesamt nur geringfügig höheren Pegel (siehe auch [8]) – häufig sogar einen niedrigeren, weil bei besseren Funkverbindungen die Netzelemente (Access-Points und Peripheriegeräte) mit effizienteren Modulationsverfahren arbeiten können.

Wenn ein Netzwerk mit Leistungsregelung vorliegt, sinken die Gesamtimmissionen zusätzlich, weil dann stets die tiefsten möglichen Sendestärken zum Einsatz kommen. In [9] 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 unrealistisch funkintensiven Situation betrug die durchschnittliche Feldstärke 1.8 V/m. In realen Netzwerken sind die Geräte meist nur wenige Prozent ausgelastet, so dass die Immissionen meist um eine Grössenordnung oder mehr tiefer liegen. In [10] wurden 8 Schulnetzwerke während des Einsatzes im Unterricht vermessen. Die durchschnittliche Auslastung betrug 5%. Nur während 5% der Zeit waren die Geräte stärker als 10% belegt. Die Spitzenfeldstärken betragen dann um 1 V/m (1 m Distanz zum access point). Die durchschnittlichen Immissionen durch die mit dem W-LAN kommunizierenden Laptops betragen in Arbeitsdistanz (30 cm) 0.1-0.2 V/m.

4. Absorbierte Leistungen

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 [2] sind für verschiedene Anwendungen diese sog. SAR-Werte³ (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: [2], [11].

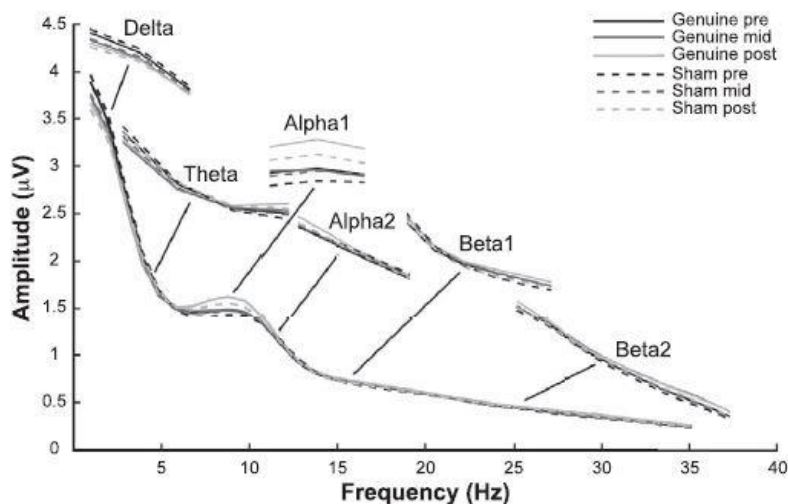
Je nach Konstruktionsart variieren die Werte zwischen einzelnen Produkten markant. Entscheidend ist die Anordnung der Antenne. Wenn diese räumlich gut ins Gerät integriert ist, sind die SAR-Werte tiefer als in der Tabelle dargestellt, denn in [2] ist für die Messung der Exposition gegenüber W-LAN Peripheriegeräten die Antenne unmittelbar an der Oberfläche des Körpers positioniert worden. In dieser Konfiguration ergeben sich bei maximaler Datenrate 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 [12] der SAR-Wert im Rumpf und Kopfbereich von 10 Jahre alten Kindern 0.005 W/kg beträgt. Gemäss [10] beläuft sich der Wert im realen Betrieb in Schulen auf 0.0001 W/kg (Distanz zum Laptop: 30 cm). Gemäss [13] liegen die rechnerischen worst-case Belastungen in 40 cm Distanz bei 0.01 W/kg, die im realen Betrieb vorkommenden Maximalbelastungen sind 10 bis 100 tiefer. Zu berücksichtigen: die worst-case Werte betreffen die Absorption durch die Haut. Dort ist die Belastung am höchsten. Die Werte für tiefer liegende Strukturen wie das Gehirn sind etwa zehnmals kleiner.

³ 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.

5. Gesundheitseffekte

Hinsichtlich Gesundheit liegen für WiFi bzw. W-LAN Signale erst wenige Studien vor. Eine Übersicht über die Sachlage gibt [14]. Danach wurden 7 Studien mit qualitativ ausreichend beschriebener Methodik in begutachteten Zeitschriften publiziert. Die studierten Gesundheitseffekte betrafen: Das Immunsystem, Stresshormone, Fruchtbarkeit, Entwicklung des Foetus sowie Gehirnentwicklung, allesamt untersucht bei Ratten. Keine dieser Studie fand einen Einfluss. 2 Arbeiten widmeten sich der menschlichen Fruchtbarkeit, 2 Veröffentlichungen betrafen mögliche Wirkungen auf die Hirnströme (EEG). Diese 4 Arbeiten wurden als wissenschaftlich mangelhaft taxiert, eine Arbeit zu Gehirnströmen stuften die Autoren als interessant ein. Der Artikel kommt insgesamt zum Urteil, dass biologische und gesundheitliche Effekte von WiFi-Strahlung unwahrscheinlich seien.

Die neueste Studie [13] hat mit einer robusten Methodik doppelblinde Experimente mit W-LAN-Signalen hinsichtlich Hirnströmen (EEG) und kognitiven Funktionen (Reaktionszeiten) durchgeführt. Es wurden 44 Personen getestet. Die Forscher konnten keinerlei Auswirkungen der Strahlung feststellen (ein Beispiel gibt Figur 4).



Figur 4: Amplituden von Hirnströmen (Bänder speziell hervorgehoben) vor, während und nach der Exposition mit WiFi (Linien) oder mit einem Scheinfeld (Sham; gestrichelt). Quelle: [13].

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.



nen. Netzwerke des neuesten Standards mit Leistungsregelung senken die Immissionspegel zusätzlich. Die realen Belastungen im Alltag sind klein. Nur in Ausnahmefällen können kurzzeitige Spitzen Felder produzieren, die in der Grössenordnung derjenigen von Schnurlos- oder Mobiltelefonen liegen. Durch die wenigen wissenschaftlichen Artikeln, die in begutachteten Fachzeitschriften erschienen sind, wurden bislang keine biologischen oder gesundheitlichen Effekte belegt.

6. Literatur

- [1] <http://www.elektronik-kompodium.de/sites/net/0907041.htm>,
- [2] 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 u36WenojQ1NTTjaXZnqWfVpzLhmfhnppmmc7Zi6rZnqCkIN0fHaCbKbXrZ2lhtTN34al3p6YrY7P1oah162apo3X1cjYh2+hoJ Vn6w>
- [3] BAG (Bundesamt für Gesundheit; 2007): Risikopotenzial von drahtlosen Netzwerken; <http://www.bag.admin.ch/wlan-bericht>
- [4] Foster, K.R., Moulder, J.E. (2015): Can Wi-Fi Affect Brain Function? Radiation Research, 184, 565–567.
- [5] Joseph, W., Pareit, D., Vermeeren, G., Naudts, D., Verloock, ., 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.
- [6] Rösli, M., Struchen, B., Eeftens, M., Roser, K. (2016): Persönliche Messungen von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern bei einer Bevölkerungsstichprobe im Kanton Zürich. Swiss TPH, Basel; http://www.awel.zh.ch/internet/baudirektion/awel/de/luft_klima_elektrosmog/elektrosmog.html
- [7] 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
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] <http://www.handywerte.de/>
- [12] 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.
- [13] Zentai, N. et al. (2015): No Effects of Acute Exposure to Wi-Fi Electromagnetic Fields on Spontaneous EEG Activity and Psychomotor Vigilance in Healthy Human Volunteers. Radiation Research, 184, 568–577.
- [14] Foster, K.R., Moulder, J.E. (2013): WiFi and health: review of current status of research. Health Phys, 105, 561-75.