

Forschungsvorhaben

*Bestimmung der Exposition bei Verwendung
kabelloser Übermittlungsverfahren
in Haushalt und Büro*

Teil 2 (Arbeitspaket 2):

Mess- und Berechnungsverfahren

Gernot Schmid, Daniel Lager, Patrick Preiner

Dezember 2004
Exemplar 1
ARC-IT-0106

Verteiler:

1-4 Bundesamt für Strahlenschutz
5 DI Lamedschwandner
6 DI Schmid
7 Hr. Lager
8 Hr. Preiner
9-10 Sekretariat ARCS/IT

*Bestimmung der Exposition bei Verwendung
kabelloser Übermittlungsverfahren
in Haushalt und Büro*

2. Zwischenbericht

**Arbeitspaket 2 :
Mess- und Berechnungsverfahren**

im Auftrag des

**Bundesamtes für Strahlenschutz
38201 Salzgitter, Deutschland**

Gernot Schmid, Daniel Lager, Patrick Preiner

ARC Seibersdorf research GmbH
Bereich Informationstechnologien
Geschäftsfeld Sichere Mobilkommunikation

Verfasser:

Dipl. Ing. Gernot Schmid
Geschäftsfeld Sichere Mobilkommunikation, Bereich Informationstechnologien
ARC Seibersdorf research GmbH
A-2444 Seibersdorf

Daniel Lager
Geschäftsfeld Sichere Mobilkommunikation, Bereich Informationstechnologien
ARC Seibersdorf research GmbH
A-2444 Seibersdorf

Patrick Preiner
Geschäftsfeld Sichere Mobilkommunikation, Bereich Informationstechnologien
ARC Seibersdorf research GmbH
A-2444 Seibersdorf

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers (Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) übereinstimmen.

ZUSAMMENFASSUNG

Im vorliegenden Zwischenbericht zum gegenständlichen Forschungsvorhaben wurden die gegenwärtig verfügbaren Mess- und Berechnungsverfahren, speziell im Hinblick auf die Expositionserfassung in den elektromagnetischen Feldern der in Haushalt und Büro häufig eingesetzten drahtlosen Übermittlungsverfahren analysiert und optimierte Mess- und Berechnungsparameter erarbeitet. Speziell bei der frequenzselektiven Messung in den HF-Feldern der modernen Breitbandkommunikationstechnologien wie WLAN und Bluetooth, sowie bei DECT, sind für quantitativ genaue Messungen sehr hohe Anforderungen an die Messgeräte und die Fachkompetenz des Messtechnikers zu stellen. Anhand von Referenzmessungen und theoretischen Betrachtungen konnte gezeigt werden, dass beim Einsatz vereinfachter Messmethoden, wie sie beispielsweise häufig für 'Worst Case'-Messungen eingesetzt werden, Überbewertungen der tatsächlich zu erwartenden und normgerecht beurteilten Immissionen um bis zu 3 Zehnerpotenzen möglich sind.

Weiters konnte gezeigt werden, dass die numerische Feldberechnung auf Basis optischer Ausbreitungsmodelle mittels adäquater Software-Werkzeuge (hier verwendet: *Wireless Insite*, Remcom, Inc.) zur Immissionsbewertung in den interessierenden Expositions-Szenarien herangezogen werden kann. Besonders bei messtechnisch schwierig zu erfassenden Immissionen (z.B. WLAN), liegen die Unsicherheiten der numerischen Feldberechnung bei sachgerechter Modellierung nicht, oder nur unwesentlich über den messtechnisch erzielbaren Unsicherheiten.

Zur Bewertung von Expositionen durch körpernah betriebene Sender kann auf die bereits bewährten Methoden der SAR-Messung (für 'Worst Case'-Abschätzungen) in vereinfachten, homogenen Körperrückbildungen bzw. auf die numerische Berechnung mittels FDTD-Software zurückgegriffen werden. Die quantitativ genaue numerische Berechnung setzt allerdings die Verfügbarkeit entsprechender anatomischer Körpermodelle und vor allem eine sorgfältige Modellierung der Strahlungsquelle voraus.

In der strahlenschutztechnischen Praxis wird bei der Immissionserfassung und der Immissionsbewertung meist ein Kompromiss zwischen vertretbarem messtechnischen Aufwand und erzielbarer Bewertungsunsicherheit gefunden werden müssen. Die einfachste Methode einer 'Worst Case'-Messung und der Vergleich so gewonnener Messergebnisse mit den Grenzwerten stellt allerdings eine, sowohl aus physikalischer Sicht, als auch im Hinblick auf die Themenkreise *Risikokommunikation* und *Risikowahrnehmung durch die Bevölkerung*, unbefriedigende Lösung dar. Im Zusammenhang mit der Angabe von 'Worst Case'-Immissionen sollte speziell im Hinblick auf die oben genannte Größenordnung der möglichen Unsicherheiten immer auch die Angabe der typisch zu erwartenden Immissionen angestrebt werden. Um auf Basis von 'Worst Case'-Messungen und der Kenntnis von einfachen statistischen Parametern der betrachteten HF-emittierenden Systeme (z.B. Datenverkehrs-Statistik in einem WLAN) auch Abschätzungen der tatsächlich zu erwartenden Immissionen gewinnen zu können, wurde ein Bewertungsmodell entwickelt und zunächst in vereinfachter Form als Software-Werkzeug implementiert. Die erwähnten Vereinfachungen der gegenwärtig vorliegenden Version des Software-Werkzeugs betreffen die Nicht-Berücksichtigung zeitlicher und frequenzabhängiger Schwankungen der Ausbreitungsbedingungen, sowie die Beschränkung der maximalen zeitlichen Auflösung der Immissionssignale auf 1 ms (aus Rechenzeit-Gründen).

INHALT

ZUSAMMENFASSUNG	1
INHALT	2
1 EINLEITUNG	4
2 MESSTECHNISCHE METHODEN ZUR EXPOSITIONSBEURTEILUNG	5
2.1 Allgemeines	5
2.2 Frequenzselektive Messung	6
2.2.1 Grundlagen	6
2.2.2 Systematische Unsicherheiten und Grenzen der Aussagekraft frequenzselektiver Messungen bei der Expositionserfassung in den Feldern verschiedener drahtloser Kommunikationstechnologien.....	7
2.2.2.1 Analoge Übertragungsverfahren und kontinuierliche Abstrahlung	8
2.2.2.2 Digitale Übertragungsverfahren mit intermittierender Abstrahlung, amplitudenkonstanter Modulation und definiertem Duty Cycle - DECT	10
2.2.2.3 Breitbandige digitale Übertragungsverfahren mit stochastischer Signalcharakteristik.....	13
2.2.2.4 Breitbandige digitale Übertragungsverfahren ohne konstanten Duty Cycle - Bluetooth	15
2.2.2.5 Breitbandige digitale Übertragungsverfahren mit stochastischer Signalcharakteristik und ohne konstanten Duty Cycle - WLAN	18
2.2.3 Mess-Systeme in der Praxis	22
2.2.4 Zusammenfassung Frequenzselektive Messung.....	25
2.3 Breitbandmessungen	27
2.3.1 Grundlagen	27
2.3.2 Unsicherheiten und Grenzen der Einsetzbarkeit.....	28
2.3.2.1 Analoge Übertragungsverfahren und kontinuierliche Abstrahlung	29
2.3.2.2 Digitale Übertragungsverfahren mit intermittierender Abstrahlung, amplitudenkonstanter Modulation und definiertem Duty Cycle - DECT	29
2.3.2.3 Breitbandige digitale Übertragungsverfahren ohne konstanten Duty Cycle – Bluetooth und WLAN	30
2.3.3 Zusammenfassung Breitbandmessung	31
2.4 SAR-Messungen für körpernahe Anwendungen	32
2.4.1 Grundlagen	32
2.4.2 Unsicherheiten und Grenzen der Einsetzbarkeit.....	34
3 NUMERISCHE METHODEN ZUR EXPOSITIONSBEURTEILUNG	36
3.1 Simulation großräumiger Szenarien	36
3.1.1 Grundlagen	36

3.1.2	Verifizierung der Zuverlässigkeit anhand einfacher Szenarien	36
3.1.2.1	Idealisierte Ausbreitungsverhältnisse - Absorberhalle (Szenario 1).....	38
3.1.2.2	Reale Ausbreitungsverhältnisse - Büroumgebung (Szenario 2)	42
3.2	Simulation körpernaher Anwendungen.....	49
3.2.1	Grundlagen	49
3.2.2	Unsicherheitsfaktoren und Grenzen der Einsetzbarkeit.....	49
3.3	Praktischer Einsatz numerischer Methoden zur Expositionsbeurteilung .	51
4	KONZEPTE FÜR DIE IMMISSIONSBEWERTUNG	52
4.1	Allgemeines	52
4.2	Worst Case Abschätzungen	53
4.2.1	Schwenkmethode	53
4.2.2	Raumrastermethode	53
4.3	Umfassende Analyse der tatsächlichen Immissionen	54
4.3.1	Numerisches Immissionsbewertungsmodell (NIBM).....	55
4.3.1.1	Realisierung in MATLAB.....	58
5	SCHLUSSFOLGERUNGEN FÜR DEN WEITEREN PROJEKTABLAUF	65
6	LITERATUR.....	67
ANHANG	69

1 EINLEITUNG

In Arbeitspaket AP1 des gegenständlichen Forschungsvorhabens wurden die, für die Expositionsbeurteilung relevanten, physikalischen Eigenschaften der betrachteten drahtlosen Übermittlungsverfahren erhoben und zusammengefasst, sowie die gegenwärtig verfügbaren mess- und rechentechnischen Methoden zur Expositionserfassung überblicksartig beschrieben [1]. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen werden im vorliegenden Zwischenbericht die verfügbaren Mess- und Berechnungsverfahren hinsichtlich ihrer praktischen Einsetzbarkeit, ihrer Unsicherheit und Tauglichkeit im Hinblick auf alle Aspekte einer normgemäßen Expositionsbeurteilung analysiert und bewertet. Diese, zunächst trivial anmutende Aufgabe, erweist sich bei näherer Betrachtung als relativ komplex, da die Tauglichkeit der jeweiligen Messverfahren nicht nur von einfach erfassbaren (bzw. spezifizierten) physikalischen Eigenschaften von Feldquelle und Messinstrument (z.B. Frequenzbereich, Modulation), sondern in vielen Fällen auch von den jeweiligen Betriebszuständen der Quelle abhängen, welche oftmals bei praktischen Messungen vor Ort nicht näher bekannt sind (z.B. WLAN-Datenverkehrszustand). Weiters hat die genaue Zielsetzung der Expositionsbeurteilung selbst maßgeblichen Einfluss darauf, ob eine Methode als tauglich angesehen werden kann oder als untauglich angesehen werden muss. Für eine strahlenschutztechnische 'Worst Case'-Abschätzung reichen oftmals relativ einfache Messverfahren und Geräte aus, wobei sich jedoch beträchtliche Überbewertungen der tatsächlichen Expositionssituation ergeben können. Eine 'präzise' und normgerechte Erfassung der tatsächlichen Exposition ist hingegen oft nur mit sehr hohem messtechnischem Aufwand möglich.

Im vorliegenden Bericht werden zunächst die grundsätzlich verwendbaren Mess- und Berechnungsmethoden detailliert beschrieben, wobei der systematische Einfluss von Mess- und Berechnungsparametern aufgezeigt wird. Je nach Art der Feldquelle erweisen sich dabei unterschiedliche Parameter als kritisch. Auf Basis von durchgeführten Referenzmessungen an ausgewählten Geräten der diversen Anwendungen (WLAN, Bluetooth, DECT, Babyphone) werden die Messunsicherheiten der einzelnen Mess- bzw. Beurteilungsmethoden aufgezeigt und damit eine Basis für eine vergleichende Bewertung der einzelnen Methoden geschaffen.

Schließlich werden verschiedene Konzepte für die Expositionserfassung bzw. Immissionsbeurteilung präsentiert, die sich in Komplexitätsgrad und Aussagekraft unterscheiden.

2 MESSTECHNISCHE METHODEN ZUR EXPOSITIONSBEURTEILUNG

2.1 Allgemeines

Eine der wesentlichsten Einflussgrößen für die Entscheidung welches Messverfahren einzusetzen ist, bzw. mit welcher Messgenauigkeit gerechnet werden kann, ist die Signalform der Feldquelle (im Zeitbereich). Die vergleichsweise komplexen Duplex-, Zugriffs- und Modulationsverfahren der modernen drahtlosen digitalen Kommunikation führen meist auch zu sehr komplexen Signalformen und erzwingen daher auch vergleichsweise komplizierte Messmethoden, um die damit verbundenen elektromagnetischen Immissionen genau erfassen zu können. Abbildung 2.1 zeigt eine Übersicht über die wichtigsten Unterscheidungsmerkmale der Signalform drahtloser Übermittlungsverfahren. Bei gegebener zu erreichender Genauigkeit steigen die Anforderungen an die Methoden der Expositionsbestimmung, wenn man sich in der Abbildung von links nach rechts bewegt.

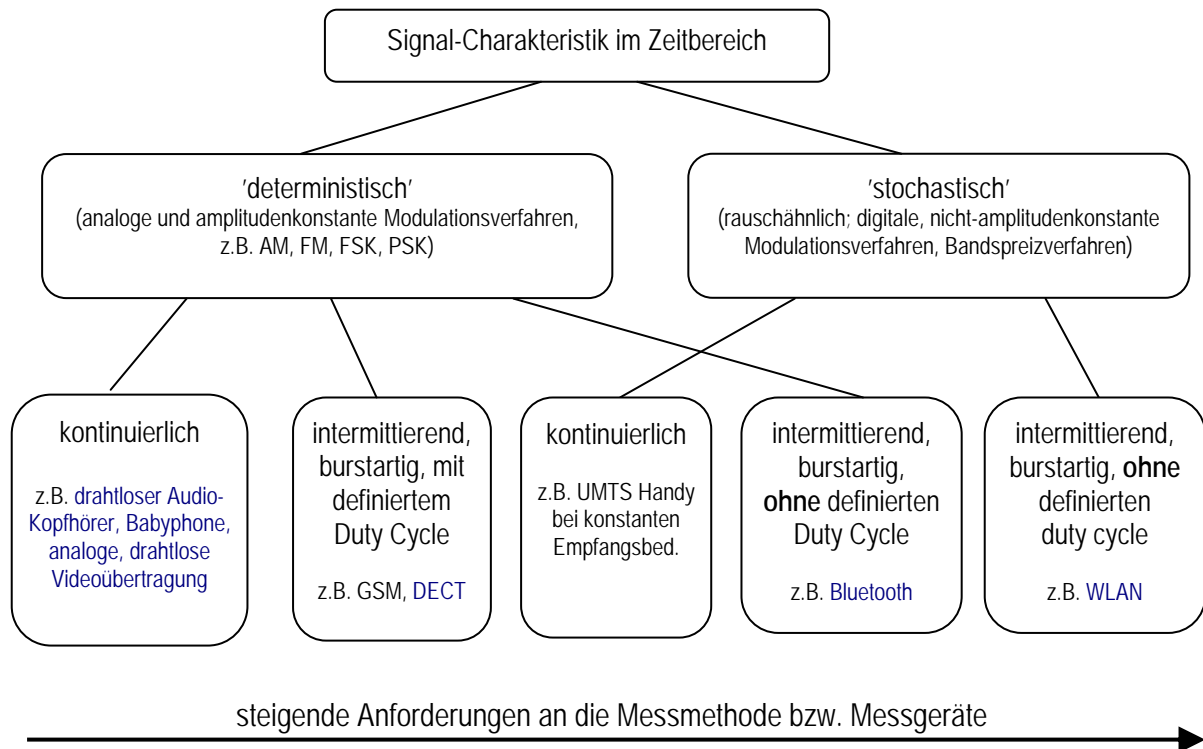


Abbildung 2.1: Für die Expositionserfassung relevante Unterscheidungsmerkmale der Signalform moderner drahtloser Übermittlungsverfahren

Im Folgenden werden die Einsatzmöglichkeiten und die erreichbaren Genauigkeiten für frequenzselektive bzw. breitbandige Messmethoden anhand von Referenzmessungen mit Signalen der interessierenden Übermittlungsverfahren diskutiert.

2.2 Frequenzselektive Messung

2.2.1 Grundlagen

Die frequenzselektive Messung hochfrequenter elektromagnetischer Felder wird mittels Spektrumanalysator und (kalibrierter) Messantenne durchgeführt. Abbildung 2.2 zeigt das Grundprinzip eines solchen Messaufbaus.

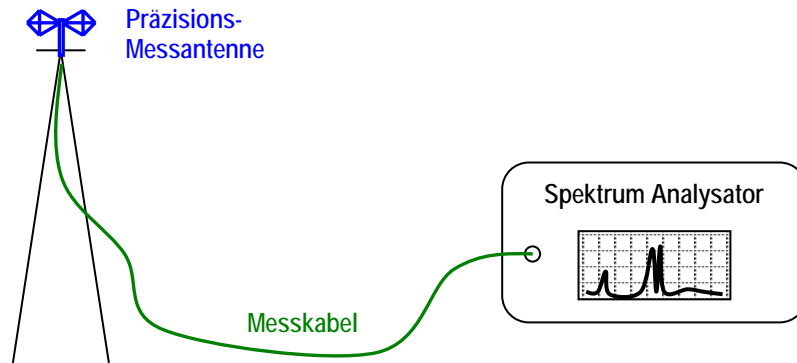


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung einer frequenzselektiven Messung elektromagnetischer Felder

Die (Präzisions-) Messantenne fungiert als Messwandler, der die Feldgrößen (z.B. elektrische Feldstärke) frequenzrichtig in eine elektrische Spannung überführt. Der Transformationsfaktor (Antennenfaktor), der den Zusammenhang zwischen der an der Antenne anliegenden Feldstärke und der vom Antennenausgang gelieferten elektrischen Spannung beschreibt, ist im Allgemeinen frequenzabhängig und wird bei der Kalibrierung der Antenne bestimmt (Angabe üblicherweise in dB/m). Die vom Antennenausgang gelieferte elektrische Spannung wird über ein Messkabel dem Spektrumanalysator zugeführt, mit dem eine frequenzselektive Auswertung des anliegenden Signals möglich ist. D.h., es kann die Intensität der einzelnen Spektralanteile über der Frequenz dargestellt und quantifiziert werden. Bei der Auswertung der Messergebnisse müssen, ausgehend von den Amplituden-Anzeigewerten am Spektrumanalysator, alle in der Messkette liegenden Komponenten (Dämpfungsglieder, Kabeldämpfung, Antennenfaktor) entsprechend berücksichtigt werden. Um jedoch quantitativ richtige Anzeigewerte am Spektrumanalysator zu erhalten, sind die Messparameter des Spektrumanalysators richtig einzustellen, wozu bereits relativ große Detailkenntnis über die Signalcharakteristik der Feldquelle notwendig ist. Die wichtigsten der angesprochenen Messparameter sind die *Auflöse- oder Messbandbreite (RBW, Resolution Bandwidth)*, die *Video-Bandbreite (VBW, Video Bandwidth)*, die *Sweep Zeit*, der *Detektortyp* (z.B. *PEAK, RMS* oder *Sample*) und die *Darstellungsart* (z.B. *Live, MaxHold* oder *Average*). Für detaillierte Informationen über die wichtigsten Messparameter von Spektrumanalysatoren sei auf die einschlägige Grundlagenliteratur, z.B. [2], verwiesen. Einige der genannten Messparameter sind funktionell miteinander verknüpft und können daher nicht unabhängig voneinander gewählt werden. Moderne Spektrumanalysatoren lassen automatisch nur physikalisch sinnvolle Parameter-Kombinationen zu, um grobe Fehlmessungen zu verhindern. Trotzdem müssen für genaue Messungen die Einstellungen des Spektrumanalysators sorgfältig gewählt werden, wie im Folgenden gezeigt wird. Weiters muss angemerkt werden, dass die Auswahlmöglichkeiten für die genannten Parameter stark von der Klasse (und damit vom Preis) des Spektrumanalysators abhängen. Beispielsweise ist die Auflösebandbreite einfacher

Geräte oftmals mit 1 MHz begrenzt und es steht oft nur ein PEAK-Detektor zur Verfügung. Qualitativ höherwertige Geräte bieten dagegen wesentlich höhere maximale *Auflöse-* und *Videobandbreiten*, zusätzlich auch *RMS* und *Sample*-Detektoren, sowie Mittelungsfunktionen (*Average*) an. Zusätzlich in hochwertigen Spektrumanalysatoren integriert und für viele Messungen vorteilhaft sind *Channel Power* bzw. *Band Power*-Funktionen, die es erlauben, die gesamte in einem (frei wählbaren) Frequenzbereich enthaltene spektrale Leistung zu erfassen (Integration über das Leistungsdichtespektrum).

Die in der strahlenschutztechnischen Praxis erreichbare Genauigkeit bei der frequenzselektiven Expositionserfassung hängt nun einerseits natürlich von den Geräteunsicherheiten (Kalibrierunsicherheiten von Spektrumanalysator, Antenne, Messkabel, usw.), und andererseits, in oft noch größerem Maße, von der Kombination der messtechnischen Möglichkeiten des Spektrumanalysators mit der Signalcharakteristik der Feldquelle ab. Die letztgenannte Quelle von Messunsicherheiten wird im folgenden Abschnitt mit ausgewählten Vertretern der hier interessierenden drahtlosen Kommunikationstechnologien anhand von Referenzmessungen näher beleuchtet. Unsicherheiten zufolge sich ändernder Ausbreitungsbedingungen, die in der Praxis immer vorhanden und aus der Sicht des Strahlenschutz-Messtechnikers praktisch nicht kontrollierbar sind, seien hier zunächst noch ausgeklammert.

2.2.2 Systematische Unsicherheiten und Grenzen der Aussagekraft frequenzselektiver Messungen bei der Expositionserfassung in den Feldern verschiedener drahtloser Kommunikationstechnologien

Um die systematischen Messunsicherheiten bei der frequenzselektiven Expositionsbestimmung der hier interessierenden Drahtlosttechnologien zu analysieren, wurden Referenzmessungen nach dem in Abbildung 2.3 dargestellten Schema durchgeführt. Die Messungen erfolgten dabei grundsätzlich kabelgebunden um Messunsicherheiten zufolge von Freiraum-Wellenausbreitungsphänomenen auszuschließen.

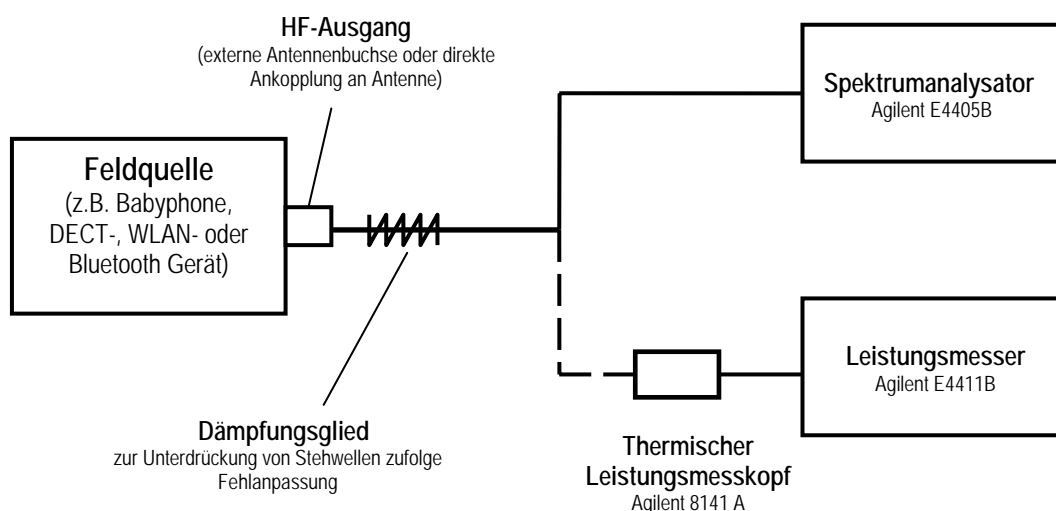


Abbildung 2.3: Messaufbau für die Referenzmessungen zur Untersuchung systematischer Messunsicherheiten bei der frequenzselektiven Expositionserfassung in den Feldern verschiedener drahtloser Kommunikationstechnologien

Bei Geräten ohne externe Antennenausgangsbuchse erfolge die Ankopplung durch direktes Anklempfen an den Antennenspeisepunkt (nach Öffnen des Gerätes). Da es sich bei den hier betrachteten Referenzmessungen nur um Relativmessungen, ohne Anspruch auf absolute quantitative Messgenauigkeit handelt, ist dies zulässig. Zur Unterdrückung störender Stehwellen am Messkabel zufolge des nicht angepassten HF-Abgriffs wurde ein Dämpfungsglied (>10 dB) verwendet.

Bei gleichbleibendem Betriebszustand der Feldquelle wurde einerseits die effektive HF-Leistung mittels thermischem Leistungsmesskopf und zugehörigem Leistungsmesser gemessen und alternativ dazu eine Messung mittels Spektrumanalysator bei unterschiedlichen Einstellungen der Messparameter durchgeführt. Der mit dem Leistungsmesser ermittelte Wert diene dabei als Referenzwert (thermischer Messkopf liefert zuverlässig den wahren Effektivwert)¹.

2.2.2.1 Analoge Übertragungsverfahren und kontinuierliche Abstrahlung

Bei Betrachtung der im Haushalt und Büro häufig eingesetzten Drahtlostechnologien fallen die meisten Geräte der folgenden Anwendungsgebiete in diese Kategorie:

- *Babyphones*
- *Drahtlose Kopfhörer*
- *Drahtlose Videoübertragung (z.B. Wireless Webcams)*
- *Drahtlose Tastatur und Maus (sofern nicht Bluetooth-Technologie)²*

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Referenzmessungen nach Abbildung 2.3 für analoge Übertragungsverfahren, am Beispiel eines handelsüblichen Babyphones (*BABYFON BM1000, Vivanco GmbH*) als Feldquelle dargestellt.

Die folgenden Abbildungen zeigen die Einhüllende des HF-Signal zunächst im Zeitbereich (Zero Span Modus, Abb. 2.4a) und im Frequenzbereich bei unterschiedlichen Einstellungen des Spektrumanalysators (Abbildungen 2.4b,c,d). Die blauen Kurven wurden jeweils mit PEAK-Detektor und die roten Kurven mit RMS-Detektor gemessen. Der grundsätzliche Unterschied zwischen den Abbildungen 2.4b,c,d liegt in der Verwendung unterschiedlicher Auflösungs- bzw. Messbandbreiten (RBW). Für die Bestimmung der tatsächlichen Bandbreite des Immissionssignals ist eine möglichst kleine Auflösungsbandbreite zu verwenden, um Verfälschungen der Flanken des Spektrums zu vermeiden (verursacht durch Integration über die Auflösungsbandbreite). Aus Abbildung 2.4b ist ersichtlich, dass das Funksignal ca. 1,4 kHz im Spektrum belegt, d.h. alle relevanten Spektralanteile liegen innerhalb eines ca. 1,4 kHz breiten Intervalls (10dB Bandbreite). Die in Abbildung 2.4b eingestellte Messbandbreite von 100 Hz führt daher zu einer Unterbewertung um ca. 10,2 dB, entsprechend ca. einem Faktor 10,5 (vgl. Messwert $-43,2$ dBm, rechts oben eingeblendet, mit Referenzwert $P=-33,0$ dBm). Die Messergebnisse in Abbildungen 2.4c und d wurden mit Messbandbreiten von 1 kHz bzw. 3 kHz gemessen und führen daher zu wesentlich genaueren Messergebnissen (Abweichungen zum Referenzwert $-2,0$ bzw. $0,2$ dB). D.h., wird mit Messbandbreiten gemessen, welche deutlich unterhalb

¹ Die in diesem Zusammenhang erwähnten ‚idealen‘ Eigenschaften thermischer Leistungsmessköpfe helfen für die praktische Immissionsbestimmung nicht weiter, da mit ihnen 1. keine frequenzselektiven Messungen möglich sind, und 2. ihre Empfindlichkeit begrenzt ist (üblicherweise mindestens 30 dB geringer als Spektrumanalysatoren)

² Die Bezeichnung ‚kontinuierliche Abstrahlung‘ ist bei drahtlosen Computermäusen nur bedingt richtig, da in Bewegungspausen zur Batterieschonung keine HF-Abstrahlung erfolgt.

der Signalbandbreite liegen, muss das Messergebnis nach folgender Beziehung korrigiert werden (z.B. nach Messvorschrift Reg TP MV 09/EMF/3 [3]):

$$P_{eff} [\text{dBm}] = P_{gemessen} [\text{dBm}] + 10 * \log_{10} \left(\frac{\text{Signalbandbreite}}{\text{äquivalente Rauschbandbreite}} \right) \quad (2.1)$$

wobei P_{eff} die tatsächliche (korrigierte) Leistung und $P_{gemessen}$ die, mit zu geringer Messbandbreite ermittelte Leistung ist. Die äquivalente Rauschbandbreite hängt vom Typ des ZF-Filters des Spektrumanalysators ab. Für Gaußfilter (heute in den meisten Geräten implementiert) beträgt sie ca. $1,1 * \text{Messbandbreite}$.

Korrigiert man den in Abbildung 2.4b bei einer Messbandbreite von 100 Hz gemessenen Wert von $-43,2 \text{ dBm}$ entsprechend der Gleichung (2.1), ergibt sich als korrigierter Messwert

$$P_{eff} [\text{dB}] = -43,2 \text{ dBm} + 10 * \log_{10} \left(\frac{1,4 \text{ kHz}}{0,11 \text{ kHz}} \right) = -32,2 \text{ dBm},$$

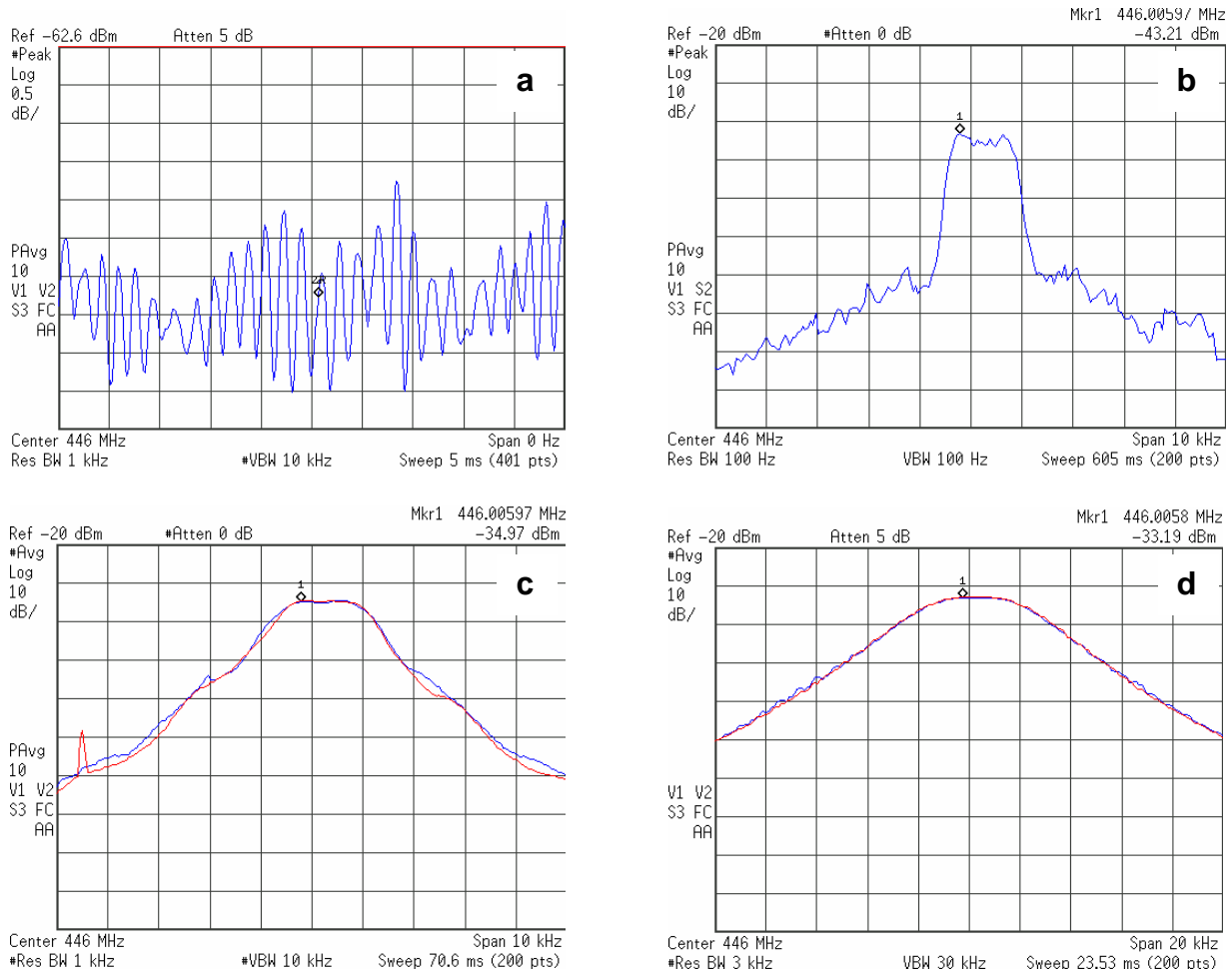
welcher mit nur sehr geringer Abweichung dem Referenzwert von $-33,0 \text{ dBm}$ entspricht.

Eine entsprechende Korrektur des Messergebnisses aus Abbildung 2.4c führt auf $-33,9 \text{ dBm}$ als korrigiertes Messergebnis.

Weiters wird aus Abbildung 2.4 ersichtlich, dass sich auch kein praktisch bedeutsamer Unterschied zwischen Verwendung eines PEAK- oder eines RMS-Detektors ergibt. Ebenso ergibt sich bei kontinuierlicher, stabiler Sendeleistung kein Unterschied zwischen den LIVE dargestellten und im MAXHOLD Modus aufgezeichneten Messkurven.

Bei intermittierender HF-Abstrahlung der Feldquelle wäre am Spektrumanalysator im LIVE Modus kein stabiles Bild erzeugbar, wodurch man in einem solchen Fall gezwungen ist im MAXHOLD Modus zu messen und anschließend (sofern die tatsächlich abgestrahlte mittlere HF-Leistung von Interesse ist) den Messwert entsprechend des Ein/Aus-Zyklus (Duty Cycle) zu korrigieren.

Zusammenfassend sind bei der frequenzselektiven Expositionsbestimmung in den elektromagnetischen Feldern von Geräten mit kontinuierlicher Abstrahlung von sinusförmigen Signalen (z.B. Babyphons, drahtlose Kopfhörer, drahtlose Tastatur und Maus und drahtlose Videoübertragung) keine wesentlichen systematischen Messunsicherheiten aufgrund der Verwendung unterschiedlicher Detektoren bzw. anderer Messparameter zu erwarten. Es ist daher in diesem Fall möglich, auch mit relativ einfachen Spektrumanalysatoren genaue Messungen durchzuführen. Die resultierende absolute Gesamtmessunsicherheit wird in diesen Fällen vorwiegend durch die Kalibrierunsicherheit der Messgeräte und eventuell vorhandener (unkontrollierbarer) Variationen der Ausbreitungsbedingungen der elektromagnetischen Wellen bestimmt.



$$P_{\text{eff}} = -33.0 \text{ dBm} \quad (\text{=Messung mit Leistungsmesser = Referenzwert})$$

Abbildung 2.4: Messung der HF-Leistung an einem handelsüblichen Babyphone (kontinuierliche, analoge Audioübertragung) mit unterschiedlichen Einstellungen des Spektrumanalysators. a: Signaleinhüllende im Zero-Span Modus; b: spektrale Darstellung mit RBW 100 Hz; c: spektrale Darstellung mit RBW 1 kHz; d: spektrale Darstellung mit RBW 3 kHz
blau: PEAK Detektor, rot: RMS-Detektor

2.2.2.2 Digitale Übertragungsverfahren mit intermittierender Abstrahlung, amplitudenkonstanter Modulation und definiertem Duty Cycle - DECT

Im Hinblick auf die für Haushalts- und Büroanwendungen häufig verwendeten Technologien, ist hier vor allem DECT zu nennen.

Im Folgenden werden die wesentlichsten Faktoren für die korrekte frequenzselektive Immissionsbewertung bei DECT-Immissionen erörtert.

Hinsichtlich Messbandbreite und Detektor gilt auch in diesem Fall, das bereits im vorangegangenen Abschnitt gesagt. D.h. bei Messbandbreiten, die kleiner als die Signalbandbreite sind, sind die Messergebnisse entsprechend Gleichung (2.1) zu korrigieren (Abbildung 2.5a), und aufgrund der amplitudenkonstanten Modulation des DECT-Systems ist die Verwendung von PEAK- und RMS-Detektoren praktisch gleichwertig (Abbildung 2.5b).

Beachtenswerte Punkte, die bei der Immissionsbewertung von DECT-Aussendungen im Auge behalten werden müssen, sind jedoch einerseits das verwendete Zeitschlitzverfahren, und andererseits die dynamische, automatische Frequenzwahl im DECT-Standard (siehe auch [1]). Abbildung 2.6 illustriert qualitativ das Zeitschlitzverfahren bei einer einzelnen DECT-Gesprächsverbindung, gemessen im Zero-Span Modus des Spektrumanalysators. Die Messungen wurden mittels einer Messantenne nahe der Basisstation durchgeführt. Die hohen, alle 10 ms auftretenden Bursts stammen daher von der Basisstation, die niedrigeren, um 5 ms dazu versetzten Bursts vom weiter entfernten Mobilteil.

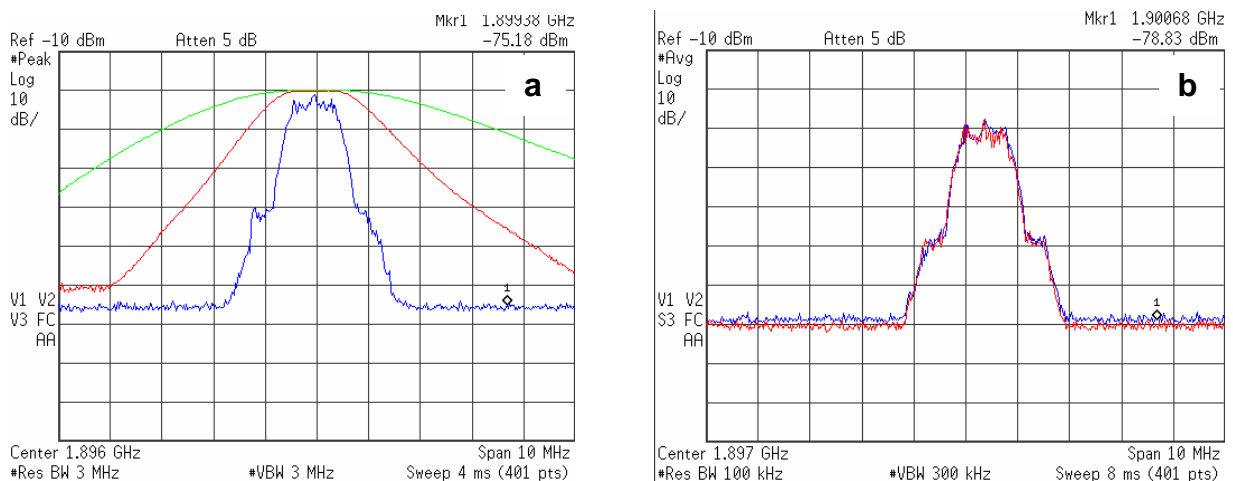


Abbildung 2.5: Immissionsmessung einer einzelnen DECT-Gesprächsverbindung, gemessen mit unterschiedlichen Messbandbreiten (a) und PEAK- bzw. RMS-Detektor (b).

- a: DECT-Kanal, gemessen mit Messbandbreiten von 100 kHz (blau), 1 MHz (rot) und 3 MHz (grün).
- b: DECT-Kanal, gemessen mit PEAK-Detektor (rot) und RMS-Detektor (blau)

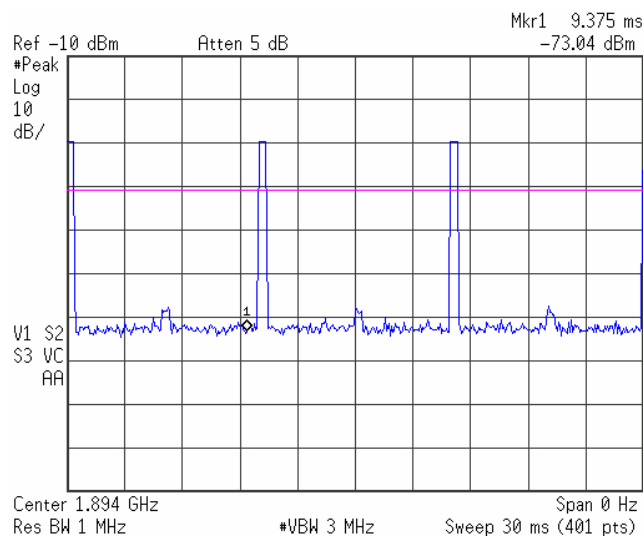


Abbildung 2.6: Immissionen (qualitativ) einer einzelnen DECT-Gesprächsverbindung, gemessen im Zero-Span-Modus nahe der Basisstation. Die hohen alle 10 ms auftretenden Bursts stammen daher von der Basisstation, die niedrigeren dazu um 5 ms versetzten Bursts vom weiter entfernten Mobilteil

Gemeinsam mit der im DECT-Standard implementierten automatischen dynamischen Frequenzwahl ergeben sich daraus weitreichende Konsequenzen für die quantitativ richtige Expositionsbestimmung. Einerseits sind Pegelmessungen im Zero-Span Modus oft schwierig, weil sich die Übertragungsfrequenz ständig ändern kann, und

andererseits ist bei Messungen im Frequenzbereich aufgrund des Zeitschlitzverfahrens keine stabile Anzeige am Spektrumanalysator zu erreichen. Ein Ausweg, der in einem solchen Fall auch bei einfachen Spektrumanalysatoren besteht, sind Messungen im MAXHOLD-Modus. Abbildung 2.7 zeigt ein solches Messergebnis für eine Aufzeichnungsdauer von ca. 1 Minute bei ständiger Bewegung der Mobilstation (Messantenne nahe der Basisstation). Zu beachten ist dabei, dass es sich um ein Messergebnis bei Aktivsein von nur einer einzigen Gesprächsverbindung handelt! Durch die automatische dynamische Frequenzwahl und die sich ändernden Empfangsbedingungen hat diese Gesprächsverbindung während der Aufzeichnungsdauer 9 der insgesamt 10 verfügbaren DECT-Frequenzkanäle benutzt. Das sich daraus ergebende messtechnische Problem ist, dass sich dieses Messergebnis in keiner Weise von der Situation bei hoher Netzauslastung, verbunden mit wesentlich höherer Immission, unterscheidet³.

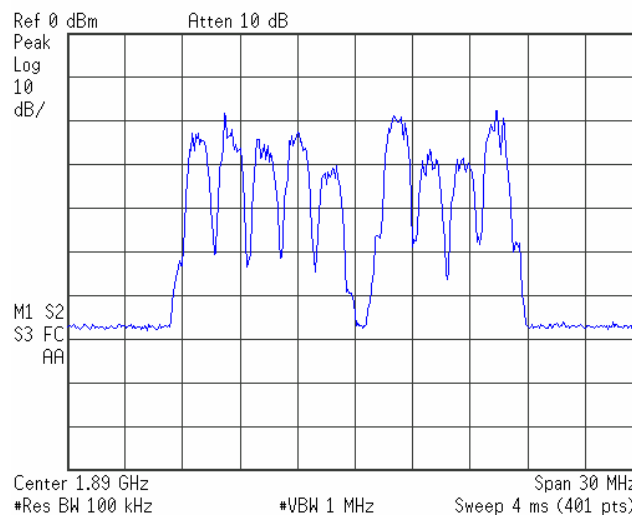


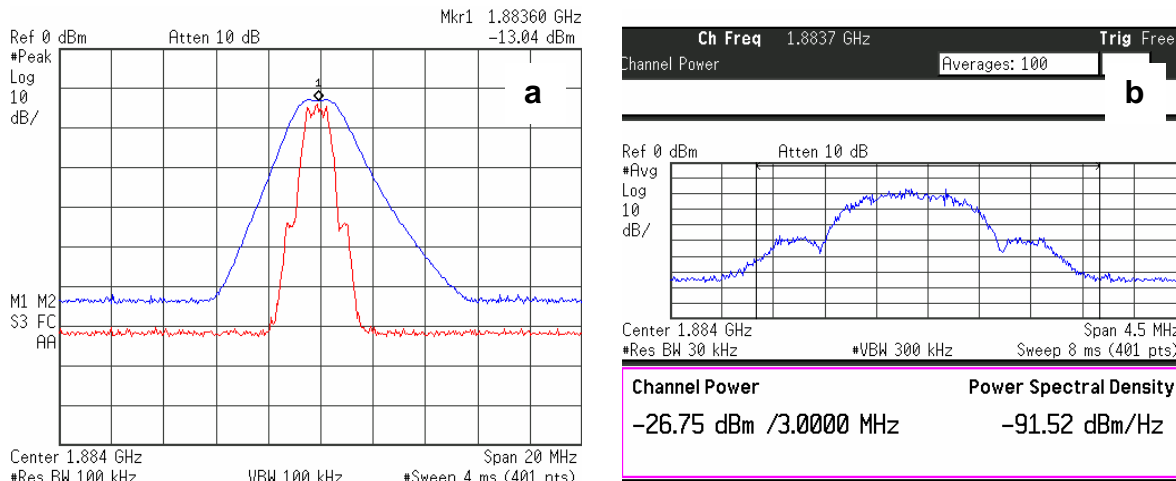
Abbildung 2.7: Immissionen (qualitativ) einer einzelnen DECT-Gesprächsverbindung, gemessen im Frequenzbereich im MAXHOLD-Modus. Obwohl immer nur eine Gesprächsverbindung aktiv war, erscheint durch die automatische dynamische Frequenzwahl des DECT-Standards der gesamte Frequenzbereich belegt (9 von insgesamt 10 Kanälen, bei einer Aufzeichnungsdauer von ca. 1 Minute und ständiger Bewegung des Mobilteils).

Am Messergebnis von DECT-Immissionen im MAXHOLD-Modus können daher nur die Verhältnisse bei einer ‚Worst Case‘ Situation abgelesen werden. Im Extremfall (tatsächlich nur eine Gesprächsverbindung aktiv) ergibt sich daher eine systematische Überbewertung bis zu einem Faktor 120 (!), entsprechend ca. 21 dB.

Der einzige Ausweg aus diesem Problem ist die Echtzeit-Leistungsdichte-Messung, die von hochwertigen Spektrumanalysatoren unter Namen wie *Channel Power*- oder *Band Power*-Funktion angeboten werden. Mittels dieser Funktionen ist die tatsächlich momentan in einem gewissen Frequenzbereich vorhandene HF-Leistung messbar. In Zusammenhang mit Mittelungsfunktionen (zur Stabilisierung des Anzeigewertes) sind auf diesem Weg die tatsächlichen Immissionen von DECT-Systemen quantitativ richtig erfassbar. Abbildung 2.8 zeigt dies anhand von Referenzmessungen an einer DECT-Basisstation (*Siemens Gigaset*) entsprechend Abbildung 2.3, bei Vorhandensein einer

³ Der einzige während der Messung zu beobachtende Unterschied wäre, dass bei hoher Netzauslastung das Bild des Spektrums am Spektrumanalysator schneller entsteht, was aber auch keinerlei quantitative Aussage zulässt.

einzigsten aktiven DECT-Gesprächsverbindung. Im Teilbild 2.8a ist das im MAXHOLD-Modus gemessene Spektrum dargestellt, aus dem sich ein Leistungswert von $-13,04$ dBm ablesen lässt. Aus dem Wissen, dass nur eine Gesprächsverbindung aktiv ist und nur das Downlink-Signal gemessen wird (d.h., nur einer von 24 möglichen Zeitschlitz verwendet wird), ist hier mit einer Überbewertung um einen Faktor 24 (entsprechend $13,8$ dB) zu rechnen. Teilbild 2.8b zeigt das Messergebnis bei Verwendung der *Channel Power*-Funktion und Mittelwertbildung über 100 Sweeps (entsprechend 800 ms). Das Messergebnis der *Channel Power* Messung führt auf einen Messwert von $-26,75$ dBm, was nahezu exakt dem tatsächlich zu erwartenden Wert entspricht.



$$P_{\text{eff}} = -26.5 \text{ dBm} \quad (= \text{Messung mit Leistungsmesser} = \text{Referenzwert})$$

Abbildung 2.8: Referenzmessungen am Downlink-Kanal einer einzelnen DECT-Gesprächsverbindung.

- a: Im MAXHOLD-Modus gemessen kommt es aufgrund des Zeitschlitzverfahrens zu einer systematischen Überbewertung
- b: Mittels Channel Power-Funktion gemessener erhält man den tatsächlichen Wert.

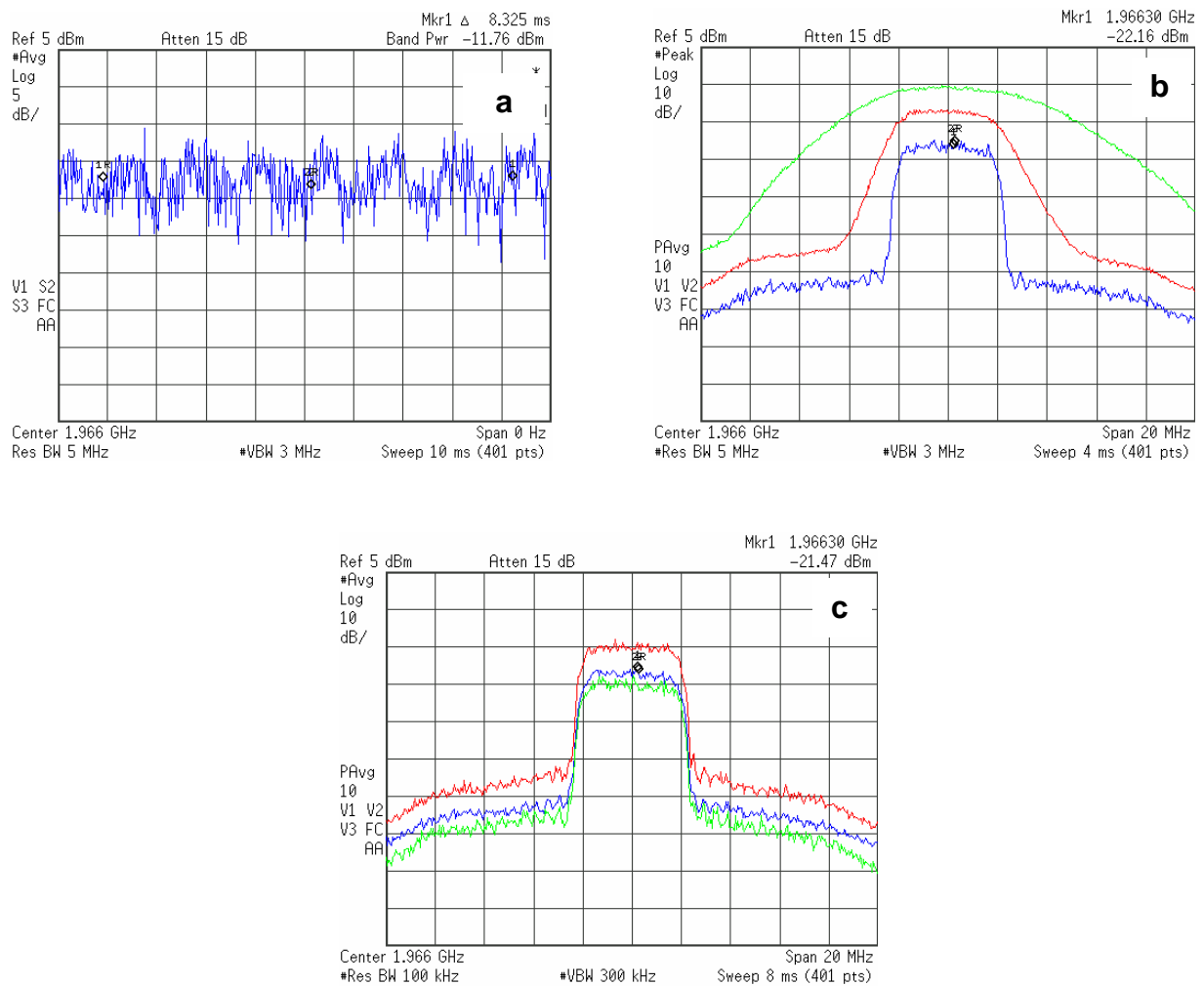
Zusammenfassend ist daher im Hinblick auf die Bewertung von DECT-Immissionen zu beachten, dass bei frequenzselektiver Messung nur mit hochwertigen Spektrumanalysatoren quantitativ genaue Messungen der tatsächlichen Exposition erwartet werden können. Ohne Verwendung von *Channel Power*- bzw. *Band Power*-Funktionen, bzw. ohne zeitsynchrone Information über den Netzauslastungszustand (praktisch meist nicht verfügbar), sind systematische Überschätzungen der tatsächlichen Immissionen bis zu einem Faktor 120 (!) unvermeidbar.

2.2.2.3 Breitbandige digitale Übertragungsverfahren mit stochastischer Signalcharakteristik

Bevor in den nächsten Abschnitten konkret die zu erwartenden Unsicherheiten bei der frequenzselektiven Messung von Bluetooth und WLAN-Anwendungen analysiert werden, soll im Folgenden zunächst ein kontinuierlich abgestrahltes breitbandiges, digitales Signal mit stochastischer Charakteristik betrachtet werden, wie es beispielsweise von einem UMTS-Mobiltelefon (im FDD Modus) unter konstanten Empfangsbedingungen erwartet werden kann. Im konkreten Fall wurde für die unten

dargestellten Messungen (entsprechend Abb. 2.3) ein generischer Signalgenerator [4] verwendet.

Abbildung 2.9a zeigt das Signal im Zero Span Modus (Zeitbereichsdarstellung) und verdeutlicht die stochastische Signalcharakteristik, verursacht durch die spezielle Übertragungstechnik (WCDMA) bei UMTS. Die effektive HF-Leistung des Signals (gemessen mit thermischem Leistungsmesskopf) betrug -9,8 dBm. Teilbild 2.9b zeigt die Messergebnisse (im Frequenzbereich) bei Verwendung unterschiedlicher Messbandbreiten (blau 100 kHz, rot 1 MHz, grün 5 MHz) und eines PEAK-Detektors.



$$P_{\text{eff}} = -9.8 \text{ dBm} \quad (= \text{Messung mit Leistungsmesser} = \text{Referenzwert})$$

Abbildung 2.9: Messung der HF-Leistung eines generischen UMTS Signals konstanter mittlerer Leistung. Durch die stochastische Signalcharakteristik führen die Verwendung von PEAK-Detektor und MAXHOLD Modus zu großen Überbewertungen der effektiven Leistung. Nähere Details, siehe Text.

In Abbildung 2.9c sind die Messergebnisse bei Verwendung einer Messbandbreite RBW von 100 kHz mit PEAK-Detektor (blaue Kurve) und RMS-Detektor (grüne Kurve) dargestellt (80 ms-Mittelwerte). Die rote Kurve wurde mit PEAK-Detektor im MAXHOLD Modus aufgezeichnet. Nach Korrektur für die zu geringe Messbandbreite

(RBW=100 kHz, 10 dB-Signalbandbreite ca. 4,5 MHz) entsprechend Gleichung (2.1) ergeben sich folgende Werte:

RMS-Detektor:	Messwert -25 dBm \Rightarrow korr. Wert -8,9 dBm
PEAK-Detektor:	Messwert -21,5 dBm \Rightarrow korr. Wert -5,4 dBm
PEAK-Det. und MAXHOLD:	Messwert -15 dBm \Rightarrow korr. Wert +1,1 dBm

Ein Vergleich mit dem Referenzwert (-9,8 dBm) zeigt, dass durch die stochastische Signalcharakteristik nur Messungen mit RMS Detektor auf Unsicherheiten < 1 dB (entsprechend ca. 26 %) führen. Allein durch die Verwendung eines PEAK-Detektors ergibt sich bei dem betrachteten Signal eine Überschätzung von über 4 dB (entsprechend einem Faktor 2,5). Die Verwendung eines PEAK-Detektors im MAXHOLD Modus führt sogar zu Überschätzungen von über 10 dB, d.h. um mehr als einen Faktor 10!

Diese Ergebnisse zeigen, dass bei stochastischer Signalcharakteristik (selbst bei stabiler mittlerer Leistung) für eine genaue Erfassung der Immissionen Spektrumanalysatoren erforderlich sind, welche die Verwendung eines RMS-Detektors erlauben. Andernfalls kommt es zwangsläufig zu teilweise massiven Überbewertungen. Die einzige Möglichkeit, diese rechnerisch zu kompensieren, setzt die Kenntnis der stochastischen Signaleigenschaften (Signalstatistik) voraus.

2.2.2.4 Breitbandige digitale Übertragungsverfahren ohne konstanten Duty Cycle - Bluetooth

Im vorangegangenen Abschnitt wurde gezeigt, dass bei stochastischer Signalcharakteristik schon relativ hohe messgerätetechnische Anforderungen zu erfüllen sind, um systematische Messunsicherheiten in vertretbaren Grenzen zu halten, selbst, wenn es sich um Signale mit konstanter⁴ mittlerer Leistung handelt. Bluetooth verwendet zwar eine amplitudenkonstante Modulation (GFSK), bedient sich jedoch eines Frequenzsprungverfahrens (FHSS) zur Erhöhung der Störsicherheit. Die Tatsache der amplitudenkonstanten Modulation führt zunächst dazu, dass mit Spektrumanalysatoren, welche nur einen PEAK-Detektor besitzen, keine zusätzlichen Messunsicherheiten entstehen. Abbildung 2.10 illustriert dies. Die rote Kurve wurde mit PEAK-Detektor und die blaue Kurve mit RMS-Detektor gemessen. Sie führen beide auf den gleichen Maximalpegel. Durch den in beiden Fällen aktivierten MAXHOLD-Modus werden nach und nach die einzelnen Frequenzkanäle dargestellt, auf denen jedoch niemals gleichzeitig gesendet wird. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass die Zeitdauer und Häufigkeit der abgestrahlten HF-Bursts vom Datenverkehrsaufkommen im betrachteten Bluetooth-Netzwerk abhängt⁵.

⁴konstant bei Mittelungsintervallen in der Größenordnung von mehr als einige 100 ms.

⁵ streng genommen sogar zusätzlich noch von der Datenstruktur. Die Übertragung vieler kleiner Dateien (kleine Paketlängen) wird zu einem geringeren effektiven Duty Cycle führen, als die Übertragung von großen Dateien (maximale Paketlängen und damit relativ wenig Austastlücken).

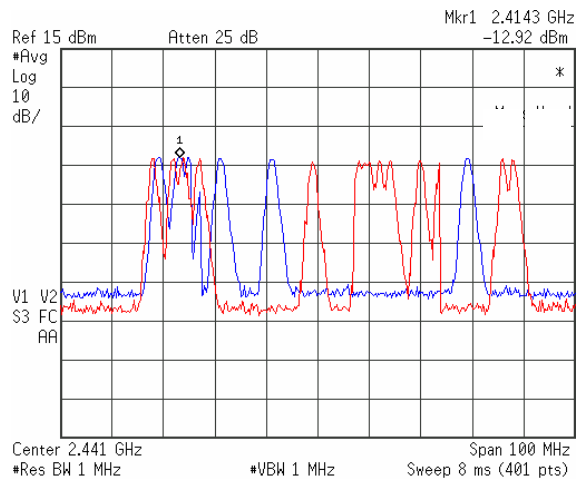


Abbildung 2.10: Messung der HF-Leistung an der Antenne eines Bluetooth-USB-Sticks im MAXHOLD Modus des Spektrumanalysators (rote Kurve: PEAK-Detektor, blaue Kurve: RMS-Detektor)

Würde man bei der Immissionsbestimmung im MAXHOLD-Modus messen und den dabei erhaltenen Maximalpegel als Immissionswert betrachten, hätte man zwar eine obere Immissionsgrenze gefunden, die niemals (nicht einmal theoretisch) überschritten werden könnte. Die tatsächliche Immission am betrachteten Ort könnte damit aber in hohem Ausmaß überbewertet sein. Dies soll an einem vereinfachten Beispiel einer Immissionsbestimmung in einem Bluetooth Netzwerk illustriert werden (Abbildung 2.11). Es werden dabei 3 Bluetooth Geräte in unterschiedlichen Entfernungen (dargestellt durch unterschiedliche Streckendämpfungswerte) zum Immissionsort betrachtet. Der Einfachheit halber wird angenommen, dass alle drei Geräte mit der gleichen maximalen Sendeleistung P senden können. Die ersten 3 Teildiagramme in Abbildung 2.8 zeigen schematisch die zeitliche Abfolge der Aussendungen der Geräte (bestimmt durch die jeweilige Kommunikationssituation). In diesem Beispiel sei angenommen, dass sich der dargestellte Zeitabschnitt (normierte Zeitachse von 0 bis 1) periodisch wiederholt (zumindest für eine Dauer von 6 Minuten, um das in den meisten Normen angegebene zeitliche Mittelungsintervall für die Expositionsbewertung zugrunde legen zu können).

Aufgrund der unterschiedlichen Streckendämpfung und der in diesem Beispiel angenommenen zeitlichen Sendefolge der Geräte, ergibt sich am Immissionsort ein Verlauf der empfangenen HF-Leistung P_{IP} entsprechend des vierten Teildiagramms. Im MAXHOLD-Modus des Spektrumanalysators würde als Messwert nur der Maximalpegel des von Gerät 1 empfangenen Anteils bestimmbar sein ($P-30\text{dB}$). Eine zeitliche Mittelung der tatsächlich empfangenen HF-Leistung führt aber auf eine effektive Empfangsleistung $P_{IP,EFF}$, welche um ca. 13 dB (Faktor 20) unterhalb diesem Wert liegt. In Extremfällen, in denen das der Empfangsantennen nächstgelegene Gerät (mit höchstem Immissionsspitzenwert) nur selten und nur kurze Pakete sendet, kann der Faktor der Überbewertung noch wesentlich größer sein. Die einzige Möglichkeit, in solchen Fällen genauere Messwerte der am betrachteten Immissionsort tatsächlich vorherrschenden Verhältnisse zu gewinnen, ist der Einsatz von *Channel Power*- bzw. *Band Power*-Funktionen, die von hochwertigen Spektrumanalysatoren angeboten werden. Mittels dieser Funktionen ist die tatsächlich momentan in einem gewissen Frequenzbereich vorhandene HF-Leistung messbar. In Zusammenhang mit Mittelungsfunktionen besteht auf diesem Weg die Möglichkeit, die tatsächlichen Immissionen von Bluetooth-Geräten quantitativ richtig, mit nur geringer Messunsicherheit, zu erfassen.

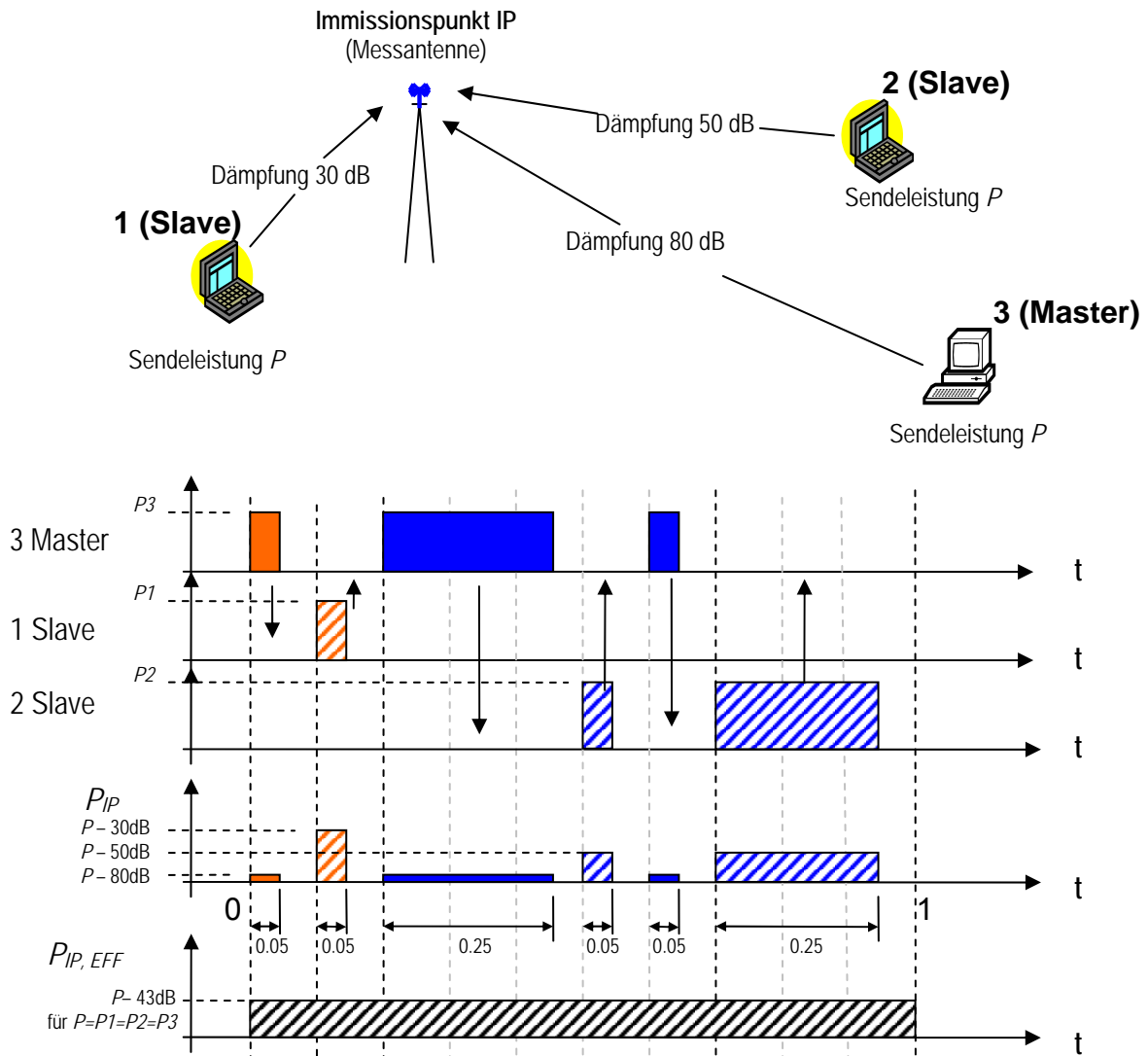
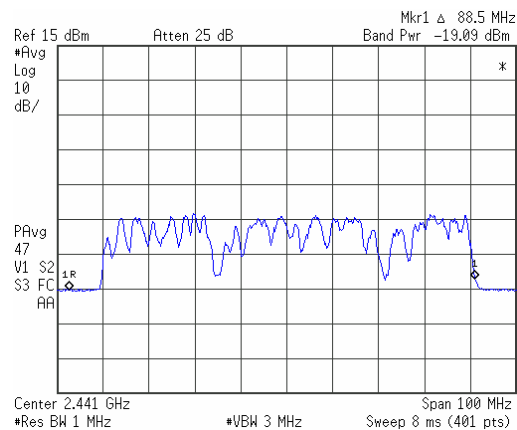


Abbildung 2.11: Vereinfachtes Beispiel einer Immissionsmessung in einem Bluetooth Netzwerk zur Illustration der Überbewertung bei Messung mit MAXHOLD Funktion. P_{IP} ist dabei die am Immissionsort empfangene HF-Leistung.

Abbildung 2.12 zeigt das Ergebnis der *Band Power*-Messung (Momentan-Messwert rechts oben eingeblendet) bei Referenzmessungen nach Abbildung 2.3, an der Antenne eines Bluetooth-USB-Sticks (Bluetooth USB-Adapter, Fa. Belkin). Um für die Messungen eine über einige Sekunden möglichst konstante vom Bluetooth-USB-Stick abgestrahlte HF-Leistung zur Verfügung zu haben, wurde eine große Datei vom USB-Stick zu einem anderen Bluetooth Gerät übertragen. Bei Mittelung über ca. 50 Sweeps (entsprechend ca. 400 ms) lag der Anzeigewert am Spektrumanalysator zwischen -18 dBm und -20 dBm. Der Schwankungsbereich des mittels Effektivleistungsmesser gemessenen Referenzwertes der HF-Leistung lag zwischen -17 dBm und -20 dBm. D.h., die *Band Power*-Funktion ermöglicht hier die Erfassung der tatsächlichen Immissionen mit Unsicherheiten im Bereich weniger dB. Die angegebenen Schwankungsbreiten der Messwerte ergeben sich aufgrund des a priori nicht definierten Duty Cycles der abgestrahlten HF-Leistung. Die Ein-/ Austastzeiten des abgestrahlten HF-Signals sind in der Praxis vom im Netzwerk vorherrschenden Datenverkehr und auch von den zu übertragenden Daten (Paketgrößen) abhängig. Bei gleicher Gesamt-Nettodatenmenge führt beispielsweise die Übertragung eines großen

Ordners mit vielen kleinen Dateien zu wesentlich geringerem effektiven Duty Cycle⁶, als die Übertragung einer einzigen großen Datei (maximale Paketlängen und damit geringere Sendepausen zwischen den einzelnen Paketen). Zusätzlich ergeben sich auch noch zufällige, nicht kontrollierbare Schwankungen im effektiven Duty Cycle aufgrund von eventuell *erforderlichen Re-Transmissions* nach Übertragungsfehlern. Die hier beschriebene Schwankungsbreite von ca. $\pm 1,5$ dB wurde unter optimierten Verhältnissen (Punkt zu Punkt Übertragung einer großen Datei) erreicht und wird daher bei Immissionsmessungen in der Praxis (in einem in Betrieb befindlichen Bluetooth-Netzwerk) wahrscheinlich nicht erreichbar sein. Aufgrund mehrerer Teilnehmer im Netz und der üblicherweise nicht ständigen Vollausslastung des Übertragungsmediums, sind hier wesentliche größere Schwankungsbreiten zu erwarten.



$P_{\text{eff}} = -20 \text{ dBm} \dots -17 \text{ dBm}$ (=Messung mit Leistungsmesser = Referenzwert)

Abbildung 2.12: Messung der HF-Leistung an der Antenne eines Bluetooth USB-Sticks mittel Band Power Funktion des Spektrumanalysators. Die mittels Spektrumanalysator gemessene HF-Leistung im Bluetooth-Frequenzbereich lag zwischen -18 dBm und -20 dBm und liegt daher im gleichen Bereich der, mittels Effektiv-Leistungsmesser gemessenen Werte.

2.2.2.5 Breitbandige digitale Übertragungsverfahren mit stochastischer Signalcharakteristik und ohne konstanten Duty Cycle - WLAN

In den beiden vorangegangenen Abschnitten wurden die messtechnischen Probleme einerseits bei der frequenzselektiven Messung von breitbandigen HF-Signalen mit stochastischer Signalcharakteristik (rauschähnliche Signale), andererseits von Signalen mit nicht konstantem Duty Cycle erörtert. Sowohl die Tatsache der stochastischen Signalcharakteristik, als auch jene des a priori nicht definierten Duty Cycles gibt Anlass zu systematischen Messunsicherheiten, die je nach den Möglichkeiten des eingesetzten Spektrumanalysators mehrere Größenordnungen betragen können. Die derzeit auf dem Markt befindlichen WLAN-Systeme (nach IEEE 802.11a,b,g) vereinen beide oben genannte Eigenschaften in sich, woraus die zu erwartenden Probleme bei der korrekten Immissionserfassung bereits erahnt werden können.

Die folgenden Abbildungen zeigen zunächst Ergebnisse von Messungen im Zero Span Modus (Zeitbereichsmessung) am Senderausgang eines WLAN-Access Points (L54g Wireless, Fa. LANCOM Systems). Es wurde jeweils direkt über Kabelverbindung am Antennenausgang gemessen (vg. Abbildung 2.3). Abbildung 2.13 zeigt das Ausgangssignal des Access Points für den Fall, dass kein Datenverkehr im Netzwerk

⁶ Als effektiver Duty Cycle wird in diesem Zusammenhang das Verhältnis der Zeitsumme aller EIN- zur Zeitsumme aller AUS-Phasen über den betrachteten Zeitraum verstanden.

existiert, d.h., der Access Point sendet nur alle 100 ms einen ca. 0,25 ms langen *Beacon* aus, der zur Synchronisation aller am Netzwerk beteiligten Geräte dient. Teilbild a zeigt die Verhältnisse mit Zeitbasis 500 ms, Teilbild b zeigt einen einzigen *Beacon* mit Zeitbasis 1 ms.

Abbildung 2.14 zeigt den Zeitverlauf der HF-Ausgangsleistung des Access Points bei einer Datenübertragung von einem WLAN-Client über den WLAN-Access Point zu einem anderen WLAN-Client im gleichen WLAN (gleicher Funkkanal). Übertragen wird dabei eine mehrere hundert Megabyte große Datei, um über längeren Zeitraum möglichst Volllastung des Netzwerks zu simulieren. Die Teilabbildungen zeigen unmittelbar hintereinander gemessene Zeitverläufe der HF-Ausgangsleistung in unterschiedlichen zeitlichen Auflösungen (500 ms, 100 ms und 10 ms Zeitfenster).

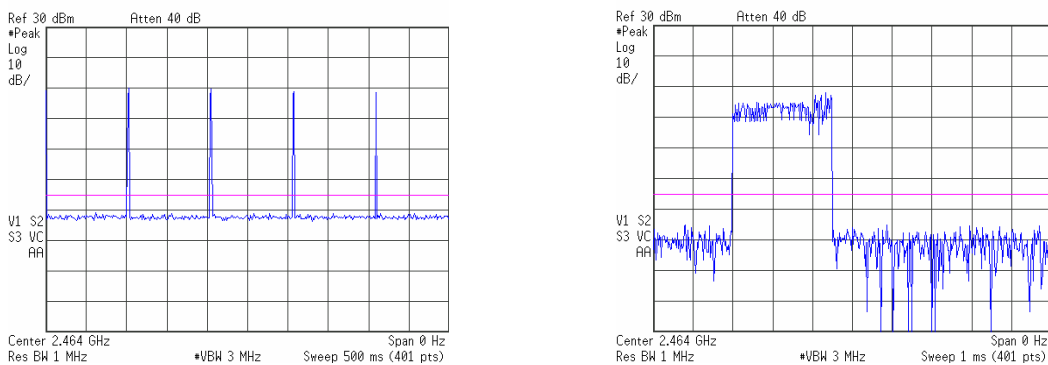


Abbildung 2.13: Messung des Zeitverlaufs der HF-Leistung am Antennenausgang eines WLAN Access Points in unterschiedlicher zeitlicher Auflösung (a: Zeitfenster 500 ms, b: Zeitfenster 10 ms). Es gibt keinen Datenverkehr im Netzwerk, der Access Point sendet in regelmäßigen Abständen nur das Beacon Signal aus.

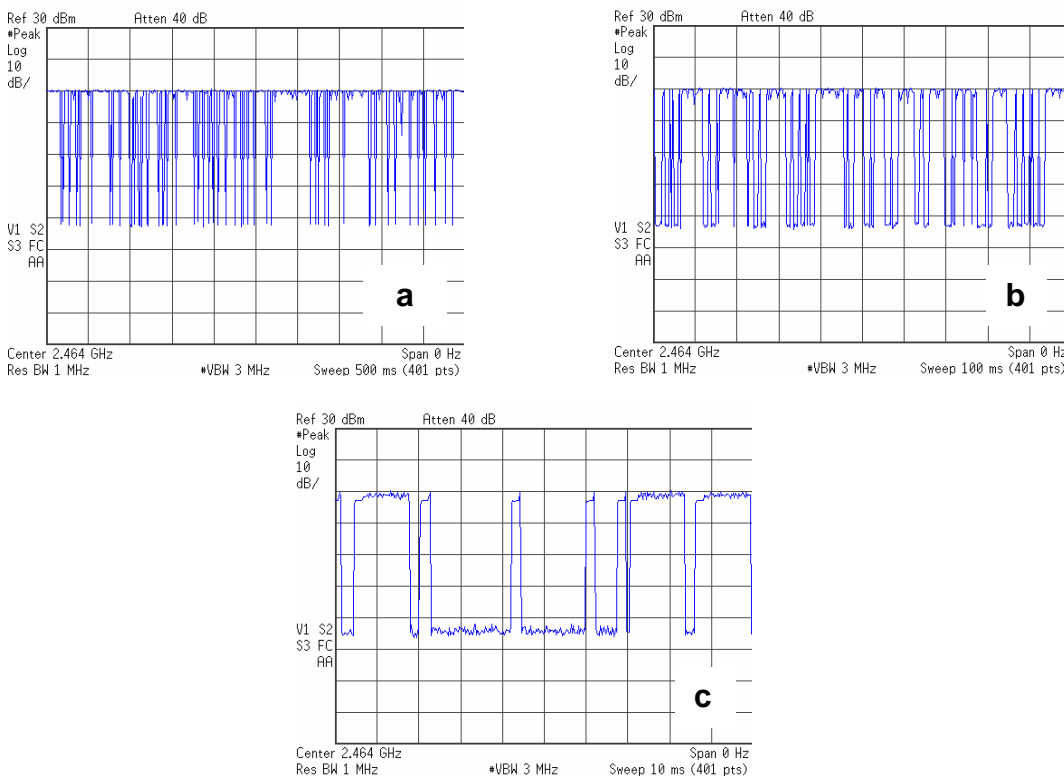


Abbildung 2.14: Messungen des Zeitverlaufs der HF-Leistung am Antennenausgang eines WLAN Access Points in unterschiedlicher zeitlicher Auflösung bei voller Übertragungskapazität von Client A über den Access Point zu Client B. Der effektive Duty Cycle liegt ca. bei 50 %. a: Zeitfenster 500 ms; b: Zeitfenster 100 ms; c: Zeitfenster 10 ms

Bei höherer zeitlicher Auflösung ist erkennbar, dass der effektive Duty Cycle (Verhältnis der Summen von EIN- und AUS-Zeiten) deutlich kleiner als 100% ist (trotz voller Netzauslastung). Der Grund hierfür ist, dass der Zugriff auf den Funkkanal im Zeitmultiplex erfolgt. D.h., in der hier betrachteten Konfiguration einer Übertragungskette Client A – Access Point – Client B muss der Access Point abwechselnd empfangen und senden, womit sich theoretisch ein maximaler Duty Cycle von 50% ergibt (unter Annahme gleicher Datenraten im Aufwärts und Abwärtspfad). Praktisch liegt der effektive Duty Cycle auch in der hier betrachteten Konfiguration aber unter 50%, da der Access Point auch während einer längeren Übertragung mögliche andere Clients im Netzwerk servicieren muss. Tatsächlich wurde für diese Konfiguration (Übertragung einer großen Datei) durch Mittelung über mehrere Sekunden während der Übertragung ein mittlerer effektiver Duty Cycle von ca. 48 % ermittelt (Schwankungsbreite 30 % ... 65 %). Wie schon im vorangegangenen Abschnitt erwähnt, gilt auch für WLAN-Anwendungen, dass der effektive Duty Cycle auch von der übertragenen Datenstruktur abhängt. Die Übertragung vieler kleiner Dateien führt aufgrund der kürzeren Paketlängen zu kleineren effektiven Duty Cycles beim sendenden Gerät. Im Vergleich zum oben genannten, bei der Übertragung einer einzigen großen Datei ermittelten Wert, führte die Übertragung eines großen Dateiverzeichnisses mit vielen kleinen Dateien (mittlere Größe ca. 5 kB), unter sonst gleichen Bedingungen zu einem effektiven Duty Cycle von nur ca. 25 %.

In anderen Betriebszuständen können jedoch von einzelnen WLAN-Sendern sehr wohl effektive Duty Cycles im Bereich von größer als 80% erreicht werden. Als Beispiel zeigt Abbildung 2.15 das HF-Ausgangssignal des oben genannten Access Points für den Fall einer Übertragung von einem Client A kabelgebunden (Ethernet) zum Access Point und vom Access Point (drahtlos) zu einem Client B. In diesem Fall steht dem Access Point (nahezu) die gesamte Funkschnittstelle zum Senden zur Verfügung (die Daten von Client A erhält er ja kabelgebunden). Die kurzen Unterbrechungen im Sendesignal sind in diesem Fall hauptsächlich für das Empfangen der Acknowledge-Pakete von Client B notwendig.

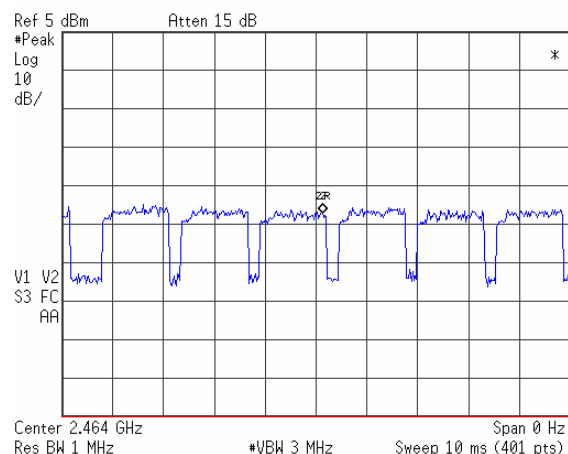


Abbildung 2.15: Messungen des Zeitverlaufs der HF-Leistung am Antennenausgang eines WLAN Access Points bei voller Übertragungskapazität von Client A kabelgebunden zum Access Point und vom Access Point drahtlos zu Client B. Der effektive Duty Cycle liegt in diesem Fall bei größer als 80%.

Ein weiterer Fall, bei dem effektive Duty Cycles nahe 100 % auftreten können, sind Punkt zu Punkt Verbindungen zwischen einzelnen Clients (*peer to peer* Netzwerk). Wird in einer solchen Konfiguration eine große Datei von einem Client A zu einem Client B übertragen, dann sind tatsächlich nur sehr kurze Sendepausen bei Client A

notwendig (für Empfang der Acknowledge-Pakete von Client B) und das Verhältnis EIN- zu AUS der Sendeleistung eines Gerätes kann ca. 90 % erreichen.

Aus diesen Überlegungen hinsichtlich der von WLAN Sendern abgestrahlten effektiven HF-Leistung folgt, dass in der Praxis die effektive Sendeleistung eines einzelnen WLAN-Access Points zwischen ca. 0,3 % (nur Beacon Abstrahlung) und ca. 90 % der maximalen Sendeleistungsamplitude variieren kann, wobei diese Schwankungen bei praktischen Immissionsmessungen üblicherweise nicht kontrollierbar sind und somit bei Messungen im MAXHOLD Modus einen proportionalen Unsicherheitsbeitrag bis zu einem Faktor 300 liefern können.

Neben der in diesem Abschnitt bisher ausschließlich betrachteten Problematik des in der Praxis üblicherweise stark variierenden effektiven Duty Cycles von WLAN-Sendern, existieren darüber hinaus erhöhte messtechnische Anforderungen aufgrund der stochastischen Signalcharakteristik. Abbildung 2.16 zeigt dazu die Ergebnisse der Messung entsprechend Abbildung 2.3. Um während der Messungen eine möglichst konstante mittlere Sendeleistung am Antennenausgang des Access Points zur Verfügung zu haben, wurde eine große Datei von Client A über den Access Point zu Client B übertragen (alle Verbindungen drahtlos). Messungen mittels Effektiv-Leistungsmesser am Ausgang des Access Points ergaben Messwerte zwischen 11 dBm und 14 dBm. Die blaue Kurve in Abbildung 2.16 wurde mit PEAK-Detektor im MAXHOLD Modus und die rote Kurve mit RMS-Detektor im MAXHOLD Modus gemessen. Die grüne Kurve ist das Messergebnis bei Messung mit RMS-Detektor bei Mittelung über 100 Sweeps (entsprechend 800 ms), um die Schwankungen der Anzeige zu reduzieren. Die Messbandbreite betrug in allen Fällen 1 MHz. Die PEAK-Detektor Messung im MAXHOLD Modus führte auf einen Messwert von ca. 11 dBm, die RMS-Detektor-Messung im MAXHOLD Modus auf ca. 8 dBm. Die Messung mit RMS-Detektor und Mittelungsfunktion ergab einen Messwert von ca. 0 dBm ($\pm 1,5$ dB). Da die Signalbandbreite (10 dB-Bandbreite ca. 18 MHz) wesentlich größer ist als die verwendete Messbandbreite (1 MHz), müssen die Messwerte gemäß Gleichung (2.1) korrigiert werden, was auf folgende Werte führt:

RMS-Detektor (AVG):	Messwert	0 dBm	\Rightarrow korr. Wert: +12,6 dBm
RMS-Det. und MAXHOLD:	Messwert	8 dBm	\Rightarrow korr. Wert: +20,6 dBm
PEAK-Det. und MAXHOLD:	Messwert	11 dBm	\Rightarrow korr. Wert: +23,6 dBm

Verglichen mit der tatsächlichen HF-Leistung (11 dBm ... 14 dBm) führt nur die RMS-Detektor-Messung mit Mittelungsfunktion zu korrekten Messwerten. Die Messungen mittels MAXHOLD-Funktion, bei einfachen Spektrumanalysatoren oft die einzige Möglichkeit um auf stabile Anzeigewerte zu kommen, führen zu einer Überbewertung von mehr als einer Zehnerpotenz (!). Die hier unter Volllast (effektiver Duty Cycle des Access Points am HF-Ausgang ca. 48 %) erhaltenen Messwerte der MAXHOLD Messungen würden sich in der gleichen Weise auch bei wesentlich weniger Datenverkehrsaufkommen im Netzwerk einstellen, d.h., die Überbewertung der tatsächlichen Immissionsgrößen würde noch höher ausfallen.

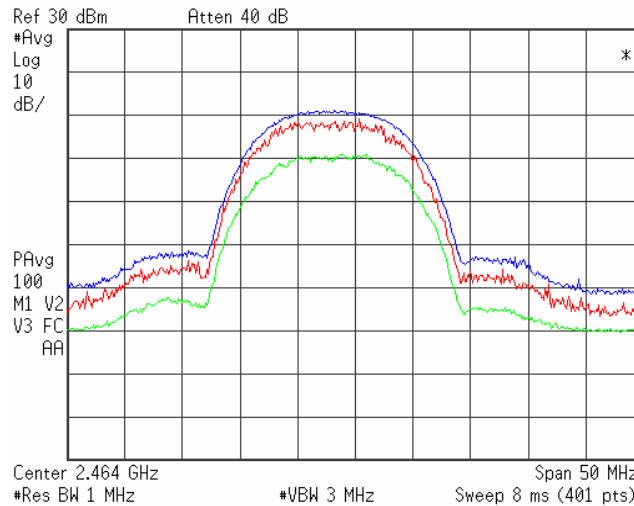


Abbildung 2.16: Messung des Frequenzspektrums des HF-Ausgangssignals eines WLAN Access Points bei voller Übertragungskapazität von Client A über den Access Point zu Client B. Die Messung im MAXHOLD-Modus, bei einfachen Spektrumanalysatoren oft die einzige Möglichkeit, um auf stabile Anzeigewerte zu kommen, kann auf Überbewertungen der Immissionsgrößen um mehrere Größenordnungen führen.

Eine Messung mittels *Band Power*-Funktion und Mittelung über 100 Sweeps (entsprechend 800 ms) führte zu Messwerten von 12 dBm ($\pm 1,0$ dB), also ebenfalls mit sehr geringer systematischer Messunsicherheit.

Eine weitere bei Immissionsmessungen im MAXHOLD Modus zum Tragen kommende Quelle systematischer Messunsicherheit, kann durch stark unterschiedliche Immissionsbeiträge (hinsichtlich Dauer und Intensität) von einzelnen Sendern entstehen. Dieses Problem wurde in Abbildung 2.11 für ein Bluetooth-Netzwerk schematisch dargestellt, gilt aber in gleicher Weise auch für WLAN und kann zu Überbewertungen der tatsächlichen Immissionen zwischen 1 und 2 Zehnerpotenzen führen.

Zusammenfassend ist daher im Hinblick auf die Erfassung und Bewertung von WLAN-Immissionen zu beachten, dass bei frequenzselektiver Messung nur mit hochwertigen Spektrumanalysatoren quantitativ richtige Messungen der tatsächlichen Exposition erwartet werden können, bei denen die Restunsicherheit auf wenige dB eingeschränkt bleibt. Ohne Verwendung von RMS-Detektoren und Mittelungsfunktionen bzw. *Channel Power*- oder *Band Power*- Funktionen sind bei Verwendung von PEAK-Detektoren im MAXHOLD Modus systematische Überschätzungen der tatsächlichen Immissionen um 2 bis 3 Zehnerpotenzen möglich bzw. unvermeidbar!

2.2.3 Mess-Systeme in der Praxis

Neben den Spezifikationen des Spektrumanalysators sind für die praktische Durchführung von frequenzselektiven Messungen auch die Spezifikationen des verwendeten Messantennensystems von Bedeutung. Sie beeinflussen in hohem Ausmaß die erreichbare Empfindlichkeit (Antennenfaktor) und die Praktikabilität der Messungen. Wünschenswert sind vor allem Breitbandigkeit und Isotropie der Messantenne. Die Forderung nach Breitbandigkeit kann am leichtesten durch den Einsatz von Logarithmisch-Periodischen (LogPer) Antennen oder Horn-Antennen

erfüllt werden. Diese haben allerdings den Nachteil, dass sie eine ausgeprägte Richtcharakteristik aufweisen. D.h., um die Immissionsgröße 'quasi isotrop' zu erfassen, sind (zeitlich hintereinander) mehrere Einzelmessungen durchzuführen und die einzelnen Raumkomponenten der elektrischen Feldstärke geometrisch zur resultierenden Gesamtfeldstärke zu addieren. Bei Verwendung von Horn- oder LogPer-Antennen sind dabei im allgemeinsten Fall 12 Einzelmessungen⁷ mit jeweils veränderter Antennenorientierung notwendig. Neben den damit verbundenen aufwendigen Manipulationen kann daraus aber auch unmittelbar ein grundlegendes physikalisches Problem bei der frequenzselektiven Messung zeitlich veränderlicher Immissionen ersehen werden. Aufgrund der Tatsache, dass die Einzelmessungen nur zeitlich hintereinander durchgeführt werden können, kann die Immissionsmessung strenggenommen nur dann als korrekt angesehen werden, wenn sich die Immission während der Gesamtdauer aller erforderlicher Einzelmessungen nicht ändert. Andernfalls würden ja die einzelnen zu addierenden Raumkomponenten nicht zur gleichen Immissionssituation gehören. Diese Tatsache ist naturgemäß umso problematischer, je größer die zeitliche Dynamik der Immissionsgröße bzw. je größer die benötigte Dauer für die Durchführung der Einzelmessungen ist. Etwas entschärft kann diese Problematik durch die Verwendung von z.B. Bikonischen (BiKo) Antennen werden, die zwar wesentlich schmalbandiger als Horn- und LogPer Antennen sind, aber einen großen Vorteil hinsichtlich ihrer Richtcharakteristik besitzen. Bei Verwendung von BiKo-Antennen oder ähnlichen Antennen sind wegen der Dipol-ähnlichen Richtcharakteristik nur mehr 3 Einzelmessungen für die 'quasi isotrope' Immissionsmessung notwendig. Dies stellt somit einen guten Kompromiss zwischen Breitbandigkeit und einfacher Handhabung dar.

Ein auf diesem Prinzip beruhendes und für Immissionsmessungen im Frequenzbereich von 80 MHz bis 3 GHz einsetzbares, von ARC Seibersdorf research GmbH entwickeltes und sehr erfolgreich vermarktetes Antennensystem, ist 'Field Nose' [5] (Abbildung 2.17a). Die auf einer automatischen, von der Systemsoftware gesteuerten, Drehvorrichtung montierte Antenne (*Precision Conical Dipole, PCD*) ist über ein kalibriertes Messkabel mit dem Spektrumanalysator verbunden. Durch die spezielle Ausrichtung der Antenne sind für eine quasi-isotrope Messung nur 3 Einzelmessungen notwendig, die automatisch von der Systemsoftware ausgeführt und entsprechend ausgewertet werden. Je nach notwendiger Sweep Zeit am Spektrumanalysator, liegt die minimal erreichbare Zeit zwischen den Einzelmessungen (vor allem zur Rotation der Antennen benötigt) bei ca. 8 Sekunden. Ein großer Vorteil des Systems ist die Tatsache, dass die Antenne (inklusive Drehvorrichtung) und Software als separates Paket erhältlich sind und mit jedem beliebigem Spektrumanalysator betrieben werden können. Es bestehen damit keine grundsätzlichen Einschränkungen hinsichtlich der Qualität der Messung im Sinne der Ausführungen in Kapitel 2. Als weiterer Vorteil kann die Tatsache genannt werden, dass es sich bei diesem System um einen rein passiven Sensor handelt und somit Messfehler zufolge Übersteuerung von Vorverstärkern (in anderen Systemen zur Empfindlichkeitserhöhung teilweise verwendet) ausgeschlossen sind. Die Anschaffungskosten für Antenne (inklusive Drehvorrichtung und Messkabel) und Software sind mit ca. 6.000,- Euro als vergleichsweise preiswert einzustufen.

⁷ auf 3 zueinander orthogonalen Raumachsen durch den Immissionspunkt, in jeweils 2 Richtungen, jeweils horizontal und vertikal polarisiert

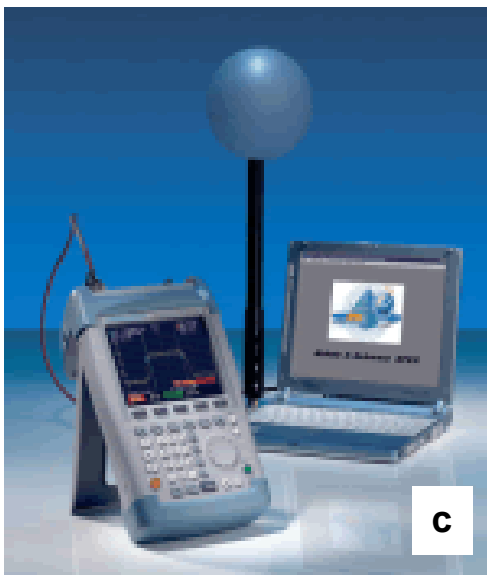
Ein anderes, seit kurzem am Markt erhältliches, quasi-isotropes und frequenzselektives System, ist das *Selektiv Radiation Meter* SRM 3000 [6] von Narda Industries, Inc., USA (Abbildung 2.17b). Es handelt sich dabei um ein Komplettsystem für den Frequenzbereich von 75 MHz bis 3 GHz, bestehend aus Mess-Sonde und Handgerät, das eine frequenzselektive Auswertung der Immissionsgröße ermöglicht. Die Quasi-Isotropie wird dabei durch einen bereits im Sondenkopf implementierten HF-Schalter erreicht. Dieser wird vom Handgerät gesteuert und es erfolgt im Zeitmultiplex die frequenzselektive Auswertung und Superposition der räumlichen Einzelkomponenten. Der große Nachteil des Systems liegt in der relativ einfachen Konzeption des Handgerätes. Neben der sehr großen minimalen Sweep Zeit (≥ 200 ms) sind für genaue Messungen oftmals erforderliche Funktionen wie *Channel Power* bzw. *Band Power* nicht verfügbar (vgl. Kapitel 2). Als Mindestdauer für eine komplette quasi-isotrope Immissionsmessung (abhängig von der Sweep Zeit), wird für hier interessierende Messungen (mit großen Auflösungsbandbreiten) eine Zeit von wenigen Sekunden erreichbar sein. Die Anschaffungskosten des Systems liegen bei ca. 15.000,- Euro.

Ein von Rohde und Schwarz GmbH & Co. KG, Deutschland, entwickeltes System ist TS-EMF [7] (Abbildung 2.17c). Es besteht, ähnlich dem SRM 3000 von Narda, aus einer Sonde mit 3 orthogonalen Antennenelementen, deren Empfangssignale im Zeitmultiplex ausgewertet werden. Anders als beim SRM 3000 erfolgt die Ansteuerung des dafür notwendigen HF-Switchs nicht vom Spektrumanalysator aus, sondern von einer externen Steuerbox, die von der Mess-Software angesteuert wird. Die Mess-Software organisiert vollautomatisch den Messablauf und die Auswertung der Messdaten, einerseits durch Ansteuerung des Multiplexers (Steuerbox) und andererseits durch entsprechende Befehle an den angeschlossenen Spektrumanalysator. Der Einsatz-Frequenzbereich wird mit 80 MHz – 2,5 GHz angegeben. Aufgrund der Konzeption (Steuerung des Multiplexers direkt von der Software aus) wäre die Mess-Sonde grundsätzlich mit jedem beliebigem Spektrumanalysator kombinierbar. Allerdings wird das System derzeit nur als geschlossenes System vertrieben, d.h., die Schnittstellen der Steuerbox wurden vom Hersteller bisher nicht offen gelegt und damit ist der Betrieb an Spektrumanalysatoren von Rohde und Schwarz gebunden. Die Kosten für die Anschaffung (inklusive dem einfachsten Spektrumanalysator SFH3 von Rohde und Schwarz) belaufen sich auf ca. 18.000,- Euro. Aus dem Preis des Spektrumanalysators von ca. 6.500,- Euro, kann für die Anschaffung der Mess-Sonde inklusive Steuerbox und Software ein Betrag von ca. 11.500,- Euro abgeleitet werden.

Ein zum oben genannten System von Rohde und Schwarz sehr ähnliches System wurde kürzlich von der Fa. Antennessa auf den Markt gebracht. Das unter dem Namen Comobase [8] vermarktete Mess-System besteht ebenfalls aus einem ‚quasi-isotropen‘ Sensor, bei dem zeitlich hintereinander (im Multiplex) die drei Raumkomponenten erfasst und ausgewertet werden (Abbildung 2.17d). Das Multiplexing erfolgt von der Steuerbox aus über eine externe Steuerbox. Das System ist offen und kann daher grundsätzlich (bei Verfügbarkeit entsprechender Software-Gerätetreiber) mit jedem Spektrumanalysator betrieben werden. Die Anschaffungskosten für das Grundsystem (Feldsensor, Software und Steuerbox) belaufen sich auf ca. 14.500,- Euro.



Quelle: [6]



Quelle: [7]



Quelle: [8]

Abbildung 2.17: Auswahl von verschiedenen, gegenwärtig am Markt erhältlichen, Mess-Systemen zur frequenzselektiven ‚quasi-isotropen‘ Erfassung von Immissionen im Frequenzbereich der modernen Drahtlostechnologien.

- a: Add3D von ARC Seibersdorf research GmbH, b: SRM 3000 von Narda Industries, Inc,
- c: TS-EMF mit Spektrumanalysator FSH3 von Rohde und Schwarz GmbH & Co. KG,
- d: Comobase von Antennessa (Abbildung mit Anritsu-Spektrumanalysator)

2.2.4 Zusammenfassung Frequenzselektive Messung

Tabelle 2.1 fasst die in den vorangegangenen Abschnitten diskutierten Eigenschaften und systematischen Unsicherheitsbereiche der unterschiedlichen Messparameter-Einstellungen bei der frequenzselektiven Immissionsmessung in den Feldern der unterschiedlichen Drahtlostechnologien zusammen. Eine entsprechend richtige

Messwertkorrektur für Messwerte, welche mit Messbandbreiten kleiner als die Signalbandbreite ermittelt wurden, wird dabei vorausgesetzt.

Zu berücksichtigen ist, dass die angegebenen Unsicherheitswerte zwar unter Miteinbeziehung eventuell vorhandener Schwankungen der abgestrahlten Sendeleistung zufolge nichtkonstantem Datenverkehr, jedoch unter definierten ‚Ausbreitungsverhältnissen‘ (kabelgebundene Leistungsmessung) gefunden wurden. Bei Immissionsmessungen in der Praxis immer vorhandene Unsicherheiten zufolge sich ändernder Ausbreitungsbedingungen, welche zusätzlich zu zeitlichen und räumlichen Schwankungen der Immissionsgrößen führen, sind hier noch nicht berücksichtigt.

analoge, kontinuierliche Signale; digitale, amplitudenkonstante Signale (Babyphone, drahtlose Kopfhörer, drahtlose Webcams, ...)			
PEAK- oder RMS- Detektor	Frequenzbereich	MAXHOLD	Bei kontinuierlich abgestrahlten leistungsstabilen Träger führen alle diese Verfahren auf verlässliche Messwerte für die tatsächliche Momentanimmission
		LIVE	
		Bandpower od. Channel Power	
		Bandpower od. Channel Power mit AVG	kann bei instabilem Träger zur Ermittlung der mittleren Immission benutzt werden.

DECT			
PEAK- oder RMS- Detektor	Frequenzbereich	Zero Span	aufgrund dynamischer automatischer Frequenzwahl praktisch schwierig
		MAXHOLD	nur für Worst Case Abschätzung tauglich; systematische Überbewertung aufgrund des Zeitschlitzverfahrens, je nach Netzauslastung bis zu 21 dB möglich (27 dB ohne aktive Gespräche)
		LIVE	keine stabile Anzeige aufgrund des Zeitschlitzverfahrens
		Bandpower od. Channel Power	keine stabile Anzeige bei sich ändernder Netzauslastung
		Bandpower od. Channel Power mit AVG	bei Integration über den gesamten DECT Frequenzbereich, verlässlichste Messmethode zur Erfassung der tatsächlichen Momentanimmission (Restunsicherheit im Bereich weniger dB).

Bluetooth			
PEAK- oder RMS-	Frequenzbereich	Zero Span	aufgrund des Frequenzsprungverfahrens praktisch schwierig
		MAXHOLD	nur für Worst Case Abschätzung tauglich; systematische Überbewertung aufgrund des variablen, vom Datenverkehr abhängigen Duty Cycles, bis zu 10 dB - 20 dB möglich
		LIVE	keine stabile Anzeige möglich
		Bandpower od. Channel Power	keine stabile Anzeige durch variablen Duty Cycle
		Bandpower od. Channel Power mit AVG	bei Integration über den gesamten Bluetooth Frequenzbereich verlässlichste Messmethode zur Erfassung der tatsächlichen Momentanimmission (Restunsicherheit im Bereich weniger dB).

Tabelle 2.1 (Fortsetzung nächste Seite)

		WLAN (IEEE 802.11x)	
PEAK-Detektor	Zero Span	MAXHOLD	nur für Worst Case Abschätzung tauglich; systematische Überbewertung aufgrund des variablen Duty Cycles und PEAK-Detektor im Bereich 3 dB bis 27 dB
		LIVE	Messung der maximalen Burstamplitude (ca. 3 dB Überbewertung allein aufgrund PEAK-Detektor); Wenn Trigger-Funktion vorhanden, ist die Abschätzung des mittleren effektiven Duty Cycles zur Rückrechnung auf mittlere Exposition möglich, aber umständlich und zeitaufwendig (viele Aufzeichnungen mit hoher Zeitauflösung notwendig).
	Frequenzbereich	MAXHOLD	nur für Worst Case Abschätzung tauglich; systematische Überbewertung aufgrund des variablen Duty Cycles und PEAK-Detektor im Bereich 3 dB bis 27 dB möglich
		LIVE	keine stabile Anzeige möglich
		Bandpower od. Channel Power	keine stabile Anzeige durch variablen Duty Cycle
		Bandpower od. Channel Power mit AVG	bei Integration über den gesamten betrachteten WLAN Funkkanal, systematische 3 dB Überbewertung durch PEAK-Detektor.
RMS-Detektor	Zero Span	MAXHOLD	nur für Worst Case Abschätzung tauglich; systematische Überbewertung aufgrund des variablen Duty Cycles bis 24 dB möglich
		LIVE	Messung der maximalen Burstamplitude; Wenn Trigger-Funktion vorhanden, ist die Abschätzung des mittleren effektiven Duty Cycles zur Rückrechnung auf mittlere Exposition möglich, aber umständlich und zeitaufwendig (viele Aufzeichnungen mit hoher Zeitauflösung notwendig).
	Frequenzbereich	MAXHOLD	nur für Worst Case Abschätzung tauglich; systematische Überbewertung aufgrund des variablen Duty Cycles bis 24 dB
		LIVE	keine stabile Anzeige möglich
		Bandpower od. Channel Power	keine stabile Anzeige durch variablen Duty Cycle
		Bandpower od. Channel Power mit AVG	bei Integration über den gesamten betrachteten WLAN Funkkanal, verlässlichste Messmethode zur Erfassung der tatsächlichen Momentanmission (Restunsicherheit im Bereich weniger dB).

Tabelle 2.1 (Fortsetzung): Zusammenfassung der Eigenschaften und systematischen Unsicherheiten verschiedener Messparameter bei der frequenzselektiven Immissionsmessung in den Feldern moderner drahtloser Kommunikationstechnologien. Eine entsprechend richtige Messwertkorrektur für Messwerte, welche mit Messbandbreiten kleiner als die Signalbandbreite ermittelt wurden, ist dabei vorausgesetzt. Zu beachten ist, dass RMS-Detektoren und *Band-* bzw. *Channel Power*-Funktionen meist nur in hochwertigen (und damit teuren) Spektrumanalysatoren implementiert sind.

2.3 Breitbandmessungen

2.3.1 Grundlagen

Breitbandmessungen werden üblicherweise mit elektrischen bzw. magnetischen *Feldsonden* durchgeführt, wobei im Mikrowellenbereich (> 1GHz) ausschließlich elektrische Feldsonden eingesetzt werden. Im Falle einer isotropen elektrischen Feldsonde besteht der feldsensitive Teil üblicherweise aus 3 zueinander orthogonalen Dipolen, in deren Zentren (zwischen den Ästen des Dipols) jeweils eine Hochfrequenzdetektordiode sitzt. Die gesamte über die Dipole an die HF-Detektordiode gelangende HF-Leistung wird durch die HF-Detektordiode in einen Dioden(gleich)strom umgesetzt. Auf diese Weise geht bereits hier jegliche Frequenzinformation des Immissionssignals verloren. Die von den drei Dioden gelieferten, zur HF-Leistung und damit zum Quadrat der elektrischen Feldstärke proportionalen Signale, werden schließlich einem dreikanaligen Summierverstärker zugeführt. Das daraus resultierende Gesamtsignal entspricht demnach der quadratischen Summe der einzelnen Raumkomponenten der elektrischen Feldstärke und wird entsprechend zur Anzeige gebracht (entweder als elektrische Feldstärke E oder als äquivalente Strahlungsleistungsdichte S, welche aus E und der Freiraumimpedanz $Z_0=120\pi$ Ohm gemäß $S=E^2/Z_0$ errechnet werden kann).

Der HF-empfindliche Bereich von Detektordioden überstreicht üblicherweise mehrere Zehnerpotenzen der Frequenz, und somit trägt die gesamte innerhalb des sensitiven Spektralbereiches liegende und auf die Diode treffende HF-Leistung zum Ausgangssignal bei. D.h., das von der Detektordiode abnehmbare Signal erlaubt keinen Rückschluss mehr auf die detaillierte Frequenzzusammensetzung des anliegenden elektromagnetischen Feldes. Es kann lediglich die Aussage getroffen werden, dass die über den sensitiven Frequenzbereich der Sonde integrierte HF-Leistung einer mittleren vom SONDENSYSTEM angezeigten äquivalenten elektrischen Feldstärke entspricht.

Für weitere Details wird auf [1] verwiesen.

2.3.2 Unsicherheiten und Grenzen der Einsetzbarkeit

Die allgemeine Bedeutung der Sondenparameter *Frequenzbereich*, *zeitliches Mittelungsverhalten (Integrationszeit)*, *Dynamikbereich* und *räumliches Mittelungsverhalten* wurden bereits in [1] näher diskutiert. Im Folgenden soll speziell auf die Einsetzbarkeit und die Unsicherheiten von Immissionsmessungen mit Breitbandsonden in den Feldern der hier zur Diskussion stehenden drahtlosen Übermittlungsverfahren eingegangen werden.

Grundsätzlich wird angemerkt, dass immer nur eine Gesamtbeurteilung aller im Frequenzbereich der Sonde vorhandenen Immissionen erfolgen kann. Die Beurteilung nur einzelner Technologien (z.B. Beurteilung speziell der WLAN-Immissionen in einem Büro) ist nur dann möglich, wenn sichergestellt ist, dass alle anderen Immissionsbeiträge im Frequenzbereich der Feldsonde vernachlässigbar klein sind.

Alle im Folgenden beschriebenen Messungen wurden mit einem Breitbandfeldsonden-System EMR300, E-Feldsonde Type18, Frequenzbereich 100 kHz - 3 GHz (Hersteller Wandel & Goltermann), als ein häufig eingesetzter Vertreter moderner HF-Breitbandfeldsonden, durchgeführt.

Um die grundsätzliche Einsetzbarkeit und die zu erwartenden Unsicherheiten ermitteln zu können, wurden Referenzmessungen nach dem in Abbildung 2.18 dargestellten Prinzip durchgeführt. In einer ersten Messung wurde dabei das HF-Ausgangssignal der jeweils untersuchten Feldquelle (Schalterstellung 1) verstärkt und der Hornantenne zugeführt. Über einen bidirektionalen Richtkoppler und thermische Leistungsmessköpfe wurden dabei sowohl effektive Vorwärts- als auch Rückwärtsleistung gemessen. Im Strahlungsfeld der Hornantenne wurde das Breitband-Feldsondensystem in einer absorbierenden Schirmkabine positioniert (Distanz Antenne-Sondenkopf ca. 1 m). Der Anzeigewert der Feldsonde wurde über eine Lichtwellenleiter-Datenverbindung fernausgelesen. In einer weiteren Messung (Schalterstellung 2) erfolgte, bei unveränderter Positionierung von Antenne und Feldsonde, die Anspeisung der Antenne vom Signalgenerator mit einem kontinuierlichen HF-Signal bei der Mittenfrequenz der jeweiligen Feldquelle. Der Leistungspegel wurde dabei so eingestellt, dass sich die gleiche resultierende Leistung am Antenneneingang ergab wie im Fall der ersten Messung (Schalterstellung 1). Aus dem Vergleich der Sondenanzeigewerte bei Schalterstellung 1 und Schalterstellung 2 konnte die Messunsicherheit der Feldsondenmessung zufolge der speziellen Signaleigenschaften der Feldquellen ermittelt werden.

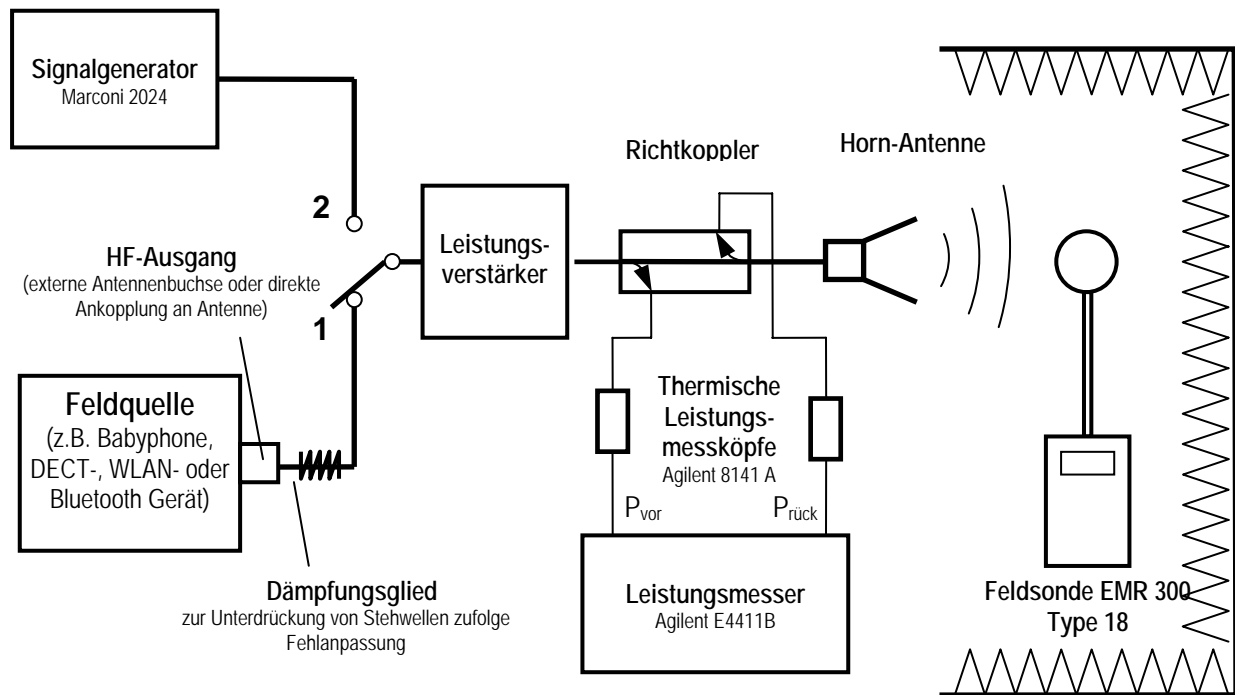


Abbildung 2.18: Messaufbau für die Referenzmessungen zur Untersuchung systematischer Messunsicherheiten bei der breitbandigen Expositionserfassung in den Feldern verschiedener drahtloser Kommunikationstechnologien

2.3.2.1 Analoge Übertragungsverfahren und kontinuierliche Abstrahlung

In diesem Fall unterscheiden sich die beiden Einzelmessungen gemäß Abbildung 2.18 praktisch nicht und es ist daher auch keine systematische Messunsicherheit zu erwarten. D.h., für Immissionsmessungen in den Feldern von Geräten mit analogen Übertragungsverfahren (und auch digitalen Verfahren mit amplitudenkonstanter Modulation) und kontinuierlicher Abstrahlung sind Breitband-Feldsonden ohne Einschränkung verwendbar und führen auf einfache Weise zu verlässlichen Messergebnissen.

2.3.2.2 Digitale Übertragungsverfahren mit intermittierender Abstrahlung, amplitudenkonstanter Modulation und definiertem Duty Cycle - DECT

Für Immissionsmessungen in den elektromagnetischen Feldern von Geräten dieser Kategorie (z.B. DECT) ist vor allem das zeitliche Mittelungsverhalten der verwendeten Feldsonden von Bedeutung. Tabelle 2.2 fasst die Ergebnisse der Referenzmessungen nach Abbildung 2.18 für ein DECT-Basisstations-Signal bei einer aktiven Gesprächsverbindung und ohne aktive Gesprächsverbindung zusammen. Die in der Tabelle eingetragenen Werte für P_{vor} und $P_{rück}$ sind bereits hinsichtlich der Auskoppel- und Längsdämpfung des Richtkopplers korrigiert. Die Ergebnisse zeigen, dass die verwendete Feldsonde selbst bei sehr geringem Duty Cycle (ca. 3,7 % bei einer aktiven Gesprächsverbindung, ca. 1 % ohne aktive Gesprächsverbindung) noch den wahren Effektivwert der Immissionsgröße anzeigt. Grundsätzlich ist jedoch anzumerken, dass das zeitliche Mittelungsverhalten von Feldsonde zu Feldsonde unterschiedlich sein kann. Weiters muss bei der Immissionsmessung mit Breitbandfeldsonden bei burstartig abgestrahlten Signalen mit geringem Duty Cycle darauf geachtet werden, dass die Burst-Spitzenwerte nicht oberhalb der

Aussteuergrenze der Feldsonde liegen, da es sonst durch Begrenzungseffekte zwangsläufig zu einer Unterschätzung der Immissionen kommt. Liegt der Quotient aus Anzeigewert der Feldsonde und Duty Cycle der Immissionsgröße oberhalb der spezifizierten Aussteuergrenze der Feldsonde, so besteht Gefahr der Unterbewertung der Immissionen aufgrund der genannten Begrenzungseffekte.

	Messung (Schalterstellung in Abb. 2.18)	P_{vor} [mW]	$P_{rück}$ [mW]	$P_{antenne}$ (= $P_{vor}-P_{rück}$) [mW]	Sonden- Messwert E [V/m]
1 aktives Gespräch	1	15,1	0,32	14,78	1,81
	2	15,3	0,33	14,97	1,83
ohne aktives Gespräch	1	3,78	0,08	3,70	0,88
	2	3,82	0,08	3,74	0,90

Tabelle 2.2: Messergebnisse der Referenzmessungen gemäß Abbildung 2.18. Für DECT Signale zeigt sich bei der verwendeten Breitband-Feldsonde keine systematische Messunsicherheit zufolge der nicht kontinuierlichen HF-Abstrahlung. Die Werte für P_{vor} und $P_{rück}$ sind bereits hinsichtlich der Auskoppel- und Längsdämpfung des Richtkopplers korrigiert.

Bei Annahme von realistischen Bedingungen im Fall von DECT-Immissionsmessungen, wird dies aufgrund der geringen maximalen Sendeleistung des DECT-Systems jedoch üblicherweise kein Problem darstellen (bei Feldsonden mit Aussteuergrenzen von ≥ 50 V/m). Eher wird bei geringer Netzauslastung das Problem bestehen, dass die Immissionswerte unterhalb des Eigensrauschens der Feldsonde liegen (üblicherweise in der Größenordnung von ca. 0,1 V/m).

2.3.2.3 Breitbandige digitale Übertragungsverfahren ohne konstanten Duty Cycle – Bluetooth und WLAN

Trotz der unterschiedlichen Übertragungsverfahren von Bluetooth und WLAN ist hinsichtlich der Breitbandmessung aus praktischer Sicht kein bedeutender Unterschied zu erwarten⁸. Grundsätzlich eignen sich Breitbandfeldsonden auch für Immissionsmessungen bei Bluetooth- und WLAN-Anwendungen. Zusätzlich zu dem im vorangegangenen Abschnitt Gesagten kommt hier jedoch die Problematik des nicht konstanten und datenverkehrsabhängigen Duty Cycles hinzu, was in der Praxis zu schwankenden Anzeigewerten führen kann. Gemäß den Ausführungen in Kapitel 2.2.2.5 können diese Schwankungen im Extremfall 1-2 Zehnerpotenzen betragen. Tabelle 2.3 zeigt die Messergebnisse der Referenzmessungen an einem WLAN Access Point nach Abbildung 2.18 bei der Übertragung einer großen Datei, die zu voller Netzauslastung über mehrere Minuten führte (annähernd konstanter mittlerer effektiven Duty Cycle von ca. 48 %). Bei Befeldung mit dem WLAN-Signal (Schalterstellung 1 in Abb. 2.18) schwankten die Anzeigewerte der Feldsonde zwischen 4,0 und 7,5 V/m, bei Aktivierung der Mittelungsfunktion (5 Sekunden-Mittelwerte) konnte die Schwankung auf den Bereich 4,9 V/m bis 6,5 V/m reduziert werden. Das leistungsäquivalente kontinuierliche HF-Signal (Schalterstellung 2) führte zu einem (stabilen) Sondenanzeigewert von 5,9 V/m. Selbst ohne Datenverkehr, d.h., wenn der Access Point nur *Beacons* aussendet, liefert die Feldsonde in dieser

⁸ Streng genommen führen stochastische, bzw. rauschähnliche Signale (mit hohem Crest-Faktor) an Diodendetektoren nur dann zu korrekten, d.h. leistungsproportionalen Anzeigewerten, solange man sich ausschließlich im quadratischen Teil der Diodenkennlinie bewegt, d.h., bei nicht zu großer Aussteuerung. Aufgrund der relativ geringen Sendeleistungen von WLAN-Sendern, kann dies in der Praxis für übliche Breitbandsondensysteme vorausgesetzt werden.

Versuchsanordnung noch korrekte Werte. In der Praxis werden die Immissionswerte bei sehr geringem effektiven Duty Cycle (geringer Datenverkehr), aufgrund der relativ geringen Sendeleistung von WLAN-Sendern jedoch sehr nahe an die Nachweisgrenze üblicher Feldsonden herankommen (üblicherweise in der Größenordnung von ca. 0,1 V/m).

	Messung (Schalterstellung in Abb. 2.18)	P_{Antenne} (= $P_{\text{vor}} - P_{\text{rück}}$) [mW]	Sonden- Messwert LIVE E [V/m]	Sonden- Messwert 5s MITTELWERT E [V/m]
volle Übertragung ca. 48% eff. Duty Cycle	1	72 ... 280	4,0 ... 7,5	4,9 ... 6,5
	2	172	5,9	5,9
nur Beacon	1	0,43 ... 1,7	0,30 ... 0,55	0,35 ... 0,45
	2	1,1	0,45	0,45

Tabelle 2.3: Messergebnisse der Referenzmessungen gemäß Abbildung 2.18. Für WLAN Signale zeigt sich bei der verwendeten Breitband-Feldsonde nur eine Unsicherheit zufolge des nicht konstanten Duty Cycle. Die zur Berechnung der in die Antenne eingespeiste Leistung P_{Antenne} verwendeten Werte für P_{vor} und $P_{\text{rück}}$ wurden entsprechend der Auskoppel- und Längsdämpfung des Richtkopplers korrigiert.

2.3.3 Zusammenfassung Breitbandmessung

Die vorangegangenen Betrachtungen haben die grundsätzliche Einsetzbarkeit von Breitbandfeldsonden für Immissionsmessungen in den Feldern der modernen drahtlosen Übertragungsverfahren gezeigt. Für die praktische Anwendung ergeben sich je nach untersuchtem Expositionsszenario möglicherweise folgende Einschränkungen:

fehlende Frequenzselektivität

Aufgrund der Tatsache, dass Messungen mit Breitbandfeldsonden keinen Rückschluss auf die detaillierte Zusammensetzung des Immissionsspektrums erlauben, sind sie nur zur Bestimmung der Immissionsbeiträge bestimmter Technologien einsetzbar, wenn für die Zeit der Messungen sichergestellt ist, dass Fremdimmissionen (von anderen Technologien) nur in vernachlässigbarem Ausmaß vorhanden sind.

zeitliches Mittelungsverhalten

Die meisten modernen Breitbandfeldsondensysteme liefern bis zu sehr geringen Duty Cycle der Immissionsgrößen den wahren Effektivwert. Das zeitliche Mittelungsverhalten von Breitbandfeldsondensystemen ist jedoch typenspezifisch unterschiedlich und sollte daher vor Messungen überprüft werden.

Empfindlichkeit

Aufgrund der relativ geringen Sendeleistungen der hier betrachteten Drahtlostechnologien, sind für praktische Messungen sehr empfindliche Messsysteme notwendig, um die Immissionen überhaupt erfassen zu können. Als Mindestanforderung an die Sondenempfindlichkeit sollte eine untere Nachweisgrenze von $\leq 0,1$ V/m gelten. Damit wäre die Immission eines leerlaufenden WLAN-Access Points (nur *Beacon*, $P_{\text{spitze}}=100\text{mW}$ EIRP) in 3 Meter Entfernung gerade noch messbar.

2.4 SAR-Messungen für körpernahe Anwendungen

2.4.1 Grundlagen

Die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Messverfahren eignen sich für Immissionsbestimmungen im Fernfeld, bzw. im strahlenden Nahfeld von Strahlungsquellen, oder anders ausgedrückt im Falle einer hinreichend großen Distanz zwischen Strahlungsquelle und exponierter Person. Bei körpernahen Anwendungen, bei denen sich der HF-Sender in unmittelbarer Nähe des Körpers befindet (z.B. DECT-Mobiltelefon, Bluetooth-Headset), sind diese Messmethoden jedoch nicht mehr zielführend, da zwischen Strahlungsquelle und exponiertem Objekt aufgrund der räumlichen Nähe im Allgemeinen eine starke elektromagnetische Kopplung besteht. D.h., die elektromagnetischen Eigenschaften des exponierten Objekts wirken direkt auf die Abstrahleigenschaften der Strahlungsquelle zurück. Dies gilt speziell im Fall der Exposition biologischer Medien wie z.B. menschliche Körpergewebe, die ausgeprägte elektrische Eigenschaften besitzen. Zur Beurteilung solcher Expositionsszenarien muss daher die tatsächliche Befeldungs-Situation mit einer künstlichen (und vereinfachten) Nachbildung des menschlichen Körpers (Phantom) nachgestellt und die relevante Immissionsgröße (spezifische Absorptionsrate, SAR, in W/kg) direkt im Phantom gemessen werden. Dazu wird die Strahlungsquelle in der zu untersuchenden Situation (z.B. bestimmungsgemäße Haltung) realitätsgetreu am Phantom angebracht und unter definierten Sendeleistungsbedingungen betrieben, während im flüssigkeitsgefüllten Phantominneren die räumliche Verteilung der SAR mittels spezieller Miniaturfeldsonden gemessen wird. Zusätzlich zu den speziell kalibrierten Miniaturfeldsonden, einem entsprechenden Körperphantom und den gewebe-simulierenden Flüssigkeiten ist dazu ein automatisches Positioniersystem für die Miniaturfeldsonden notwendig. Da die Angabe von SAR- Werten nur im Zusammenhang mit einem zugehörigen räumlichen Mittelungsvolumen sinnvoll ist, sind auch entsprechende Softwarewerkzeuge für die Nachbearbeitung der Roh-Messdaten (zumeist in Form von SAR-Messwerten an den Punkten eines räumlichen Messrasters im Phantom) erforderlich. Für weitere Details zu den Grundlagen der SAR-Messtechnik wird auf [1] verwiesen.

Hinsichtlich körpernaher Anwendungen der hier interessierenden drahtlosen Kommunikationstechnologien sind vor allem DECT-Mobiltelefone bzw. DECT-Headsets, sowie Bluetooth-Headsets für GSM- und UMTS-Mobiltelefone zu nennen, die unmittelbar am Kopf getragen werden. Weiters kann die häufig zu beobachtende Situation eines im Sitzen auf den Oberschenkeln platzierten Notebooks eine relevante körpernahe Exposition darstellen, wenn das Notebook mit WLAN-Sendern ausgestattet ist (z.B. mit WLAN USB-Stick oder PCMCIA-Karte).

In Bezug auf die beiden erstgenannten Anwendungen am Kopf ist anzumerken, dass sowohl DECT-Mobilteile als auch Bluetooth Headsets mittlere Ausgangsleistungen von maximal 10 mW aufweisen. Nimmt man die gegenwärtige europäische Personenschutz-Grenzwertgebung als Grundlage ($SAR_{max}=2$ W/kg, gemittelt über 10 g), so ist ersichtlich, dass mit solchen Geräten schon auf Basis theoretischer Überlegungen eine Grenzwertüberschreitung ausgeschlossen werden kann. Selbst wenn, in einer theoretischen Annahme, die gesamte zur Verfügung stehende HF-Leistung (10 mW) in den Körper eingetragen würde, so kann der über 10 g gemittelte SAR-Wert 1 W/kg nicht überschritten werden. Auf dieser Überlegung basiert auch die Fachgrundnorm EN 50371 [9], welche Geräte mit mittleren HF-Ausgangsleistungen kleiner oder gleich 20 mW ohne weitere Überprüfung als konform zu den europäischen SAR-Basisgrenzwerten einstuft.

Besteht trotz der von vornherein gegebenen Basisgrenzwert-Konformität Interesse an der im Kopf des Benutzers maximal zu erwartenden SAR (z.B. für Produktvergleiche), so können SAR-Messungen in Anlehnung an EN 50361⁹ [10] eine anerkannte Bewertungsgrundlage bieten. Abbildung 2.19 zeigt eine mögliche Positionierung von Bluetooth-Headset am genormten SAM-Kopfphantom für eine SAR-Messung in Anlehnung an EN 50361.



Abbildung 2.19: Mögliche Positionierung von Bluetooth Headsets am genormten SAM-Kopfphantom zur SAR-Messung

Gegenwärtig am Markt erhältliche WLAN-Geräte (IEEE 802.11b,g,h), können aufgrund ihrer in Europa zulässigen maximalen Sendeleistung von 100 mW bzw. 200 mW, a priori nicht mehr als konform zum Basisgrenzwert eingestuft werden. Fest installierte WLAN-Geräte (Access Points, Steckkarten in Arbeitsplatzrechnern, usw.) werden üblicherweise nicht zu einer körpernahen Anwendung in hier diskutierten Sinn führen. Denkbar ist jedoch die bereits oben angesprochene Situation eines Notebooks (mit WLAN-Sender), das im Sitzen auf den Oberschenkeln betrieben wird. Unter realistischen Annahmen kann es hier zu einer Annäherung zwischen Antenne und Körper im Bereich von ca. 1 cm kommen. Da gegenwärtig weder für WLAN-Sender, noch für Notebooks einschlägige Produktnormen im Hinblick auf den Personenschutz gegenüber elektromagnetischen Feldern existieren, muss hier auf die Anwendung allgemeinerer Dokumente zurückgegriffen werden. Ein diesbezüglich im Bereich der europäischen Normungsgebung gegenwärtig anwendbares Dokument ist die Fachgrundnorm EN 50392 [11], die generell für elektrische Geräte und Einrichtungen, die für die Verwendung durch die Allgemeinbevölkerung bestimmt sind, gilt. Allerdings stellt diese Norm keine speziellen Anforderungen an die genaue Prozedur der SAR-Messung (Phantomform, Positionierung der Strahlungsquelle am Phantom). Aus anderen anerkannten Dokumenten zum Thema SAR-Messung (z.B. [12], [13], [14]) kann jedoch abgeleitet werden, dass für körpernahe Expositionen am Rumpf, bzw. den Gliedmaßen die Verwendung von flachen Phantomen (ohne anatomische Körperkontur) als adäquat angesehen werden kann. Die genauen Abmessungen der Phantome sollten nach [14] oberhalb gewisser Mindestmaße liegen, die von den

⁹ EN 50361 ist speziell für Mobiltelefone konzipiert und beschreibt für solche Geräte einen detaillierten Algorithmus für die reproduzierbare Positionierung der Mobiltelefone am Phantom. Andere Strahlungsquellen als Mobiltelefone werden in diesem Dokument nicht behandelt. Kein anderes europäisches Dokument befasst sich allerdings ähnlich detailliert mit allen Aspekten der SAR-Messung wie EN 50361, weshalb diese Norm als Grundlage auch für SAR-Messungen mit anderen Strahlungsquellen dienen kann.

Abmessungen des zu untersuchenden Gerätes, sowie von der emittierten Frequenz abhängen. In EN 50383 [12] wird ein flaches Phantom mit festen Abmessungen und einer maximal zulässigen Schalendicke von 1 cm definiert. Allerdings muss angemerkt werden, dass der Geltungsbereich von [12] formal auf ‚*Mobilfunk-Basisstationen und stationäre Teilnehmergeräte von schnurlosen Kommunikationseinrichtungen*‘ beschränkt ist und ein Notebook, wenn überhaupt, nur bedingt als stationäres Gerät bezeichnet werden kann. Flache Phantome mit kleineren maximal zulässigen Schalendicken (2 mm) werden gegenwärtig verwendet um die Konformität von Mobiltelefonen in sogenannter ‚Body worn‘ Konfiguration¹⁰ zu überprüfen. Diese Überprüfung ist für die Zulassung in den USA nach den Richtlinien der *Federal Communications Commission (FCC)* zusätzlich zu den SAR-Messungen am SAM-Kopfphantom erforderlich. Die grundlegenden Spezifikationen dieser Messungen sind in [13] und [14] festgelegt.

Von ARC Seibersdorf research GmbH im Auftrag eines Notebook-Herstellers im Jahr 2003 durchgeführte SAR Messungen an einem Notebook mit integriertem WLAN-Modul führten zu einem maximalen, über 10 g gemittelten SAR Wert von 0,062 W/kg. Es wurde dabei das in EN 50383 beschriebene Phantom (1 cm Schalendicke) verwendet, wobei sich ein resultierender Abstand zwischen der Oberfläche des Notebooks (im Bereich der integrierten Antenne) und Phantomflüssigkeit von ca. 1,5 cm ergab. Die Eigenschaften der gewebesimulierenden Flüssigkeit wurden entsprechend [13] für ‚Body Tissue‘ gewählt.

2.4.2 Unsicherheiten und Grenzen der Einsetzbarkeit

Grundsätzlich ist bei der Interpretation von SAR-Messergebnissen immer im Auge zu behalten, dass es sich um Messungen in einer sehr einfachen, homogenen Körperrückbildung handelt. Die komplexen, anatomischen Details des inneren Körperbaus werden dabei nicht berücksichtigt. Ihre strahlenschutztechnische Rechtfertigung bekommen SAR Messungen erst durch die geeignete Wahl der Messparameter (Messalgorithmus, dielektrische Eigenschaften der zu verwendenden gewebesimulierenden Flüssigkeiten, usw.). Für standardisierte Zulassungsprüfungen sind die in den entsprechenden Standards definierten Spezifikationen der SAR-Messungen üblicherweise im Sinne einer ‚Worst Case‘ Abschätzung festgelegt. D.h., die Aussage einer solchen normgerechten Messung ist dahingehend zu verstehen, dass die im realen menschlichen Körper maximal auftretende SAR nicht über jener im Zuge der SAR Messung im Phantom maximal gefundenen liegen sollte.

Für die detaillierte Bestimmung der im realen menschlichen Körper in einer bestimmten Expositionssituation auftretenden SAR, kann die SAR-Messung aufgrund der Vereinfachungen des Phantoms daher nur eingeschränkt bzw. gar nicht dienen. Tiefere Untersuchungen betreffend die SAR-Verteilung in unterschiedlichen Gewebestrukturen sind gegenwärtig nur durch aufwendige numerische Verfahren (siehe Kapitel 3.2) möglich.

Die Messunsicherheiten der SAR-Messung selbst (d.h. ohne Bezugnahme auf die Übertragbarkeit in reale anatomische Strukturen), ist aufgrund der Vielfältigkeit der einzelnen Unsicherheitsquellen relativ groß und liegt in der Größenordnung von ca. 25-30 % (erweiterte Messunsicherheit, $k=2$) für über 1g bzw. über 10 g gemittelte SAR.

¹⁰ Es soll dabei die Situation eines am Körper getragenen (z.B. am Gürtel oder in der Brusttasche) Mobiltelefons während eines Gespräches mit Headset nachgestellt werden.

Tabelle 2.4 zeigt als Beispiel ein Unsicherheitsbudget eines SAR-Messplatzes für spezielle SAR-Messungen mit Mobiltelefonen.

Error source	uncert. [%]	Dist.	Div	ci	std. uncert. [%]	vi ² or v _{eff}
Measurement system						
Probe calibration	10	N	1	1	10	∞
Axial isotropy	4.7	R	1.73	0.7	1.9	∞
Hemispherical isotropy	9.6	R	1.73	0.7	3.9	∞
Boundary effects	2.0	R	1.73	1	1.2	∞
Linearity	4.7	R	1.73	1	2.7	∞
System detection limit	1.0	R	1.73	1	0.6	∞
Readout electronics	1.0	N	1	1	1.0	∞
Response time	1.0	R	1.73	1	0.6	∞
Integration time	2.6	R	1.73	1	1.5	∞
RF ambient conditions	3.0	R	1.73	1	1.7	∞
Probe positioning system	2.0	R	1.73	1	1.2	∞
Algorithms for max. SAR evaluation	3.0	R	1.73	1	1.7	∞
Test sample related						
Device positioning	2.0	N	1	1	2.0	20
Device holder uncertainty	5.0	N	1	1	5.0	5
Power variation (SAR-drift)	5.0	R	1.73	1	2.9	∞
Phantom and Set-up						
Phantom uncertainty	2.0	R	1.73	1	1.2	∞
Liquid conductivity - dev from target	5.0	R	1.73	0.64	1.8	∞
Liquid conductivity - meas. uncert.	4.0	N	1	0.64	2.6	∞
Liquid permittivity - dev from target	5.0	R	1.73	0.6	1.7	∞
Liquid permittivity - meas. uncert.	3.0	N	1	0.6	1.8	∞
Combined uncertainty		rss			13.9	
Expanded uncertainty (CI 95%)		k=2			27.8 %	

Tabelle 2.4: Unsicherheitsbudget des automatischen SAR-Messplatzes bei der ARC Seibersdorf research GmbH, erstellt für spezielle Messungen mit Mobiltelefonen. Für die Definitionen der statistischen Kenngrößen in den Tabellen wird auf [10] bzw. [13] verwiesen

Hinsichtlich der speziellen WLAN-Signalform (stochastische Signalcharakteristik) sind mit herkömmlichen Miniaturfeldsonden, wie sie seit Jahren für SAR-Messungen eingesetzt werden, keine besonderen Einschränkungen notwendig. Eine diesbezügliche Untersuchung wurde 2003 veröffentlicht [15] und zeigte bei üblichen Aussteuerungen im Bereich unterhalb 10 W/kg keine nennenswerten Unterschiede zu kontinuierlichen Sinus-Signalen.

3 NUMERISCHE METHODEN ZUR EXPOSITIONSBEURTEILUNG

3.1 Simulation großräumiger Szenarien

3.1.1 Grundlagen

Zur numerischen Berechnung hochfrequenter elektromagnetischer Felder bzw. von Feldverteilungen in großräumigen Szenarien haben sich in den letzten Jahren Verfahren etabliert, die auf optische Ausbreitungsmodelle zurückgreifen. In [1] wurden die wichtigsten Verfahren kurz beschrieben, sowie einige kommerzielle Softwarepakete vorgestellt. Gründliche Evaluierungsphasen mit mehreren Softwarepaketen, welche auf Basis ihrer Spezifikationen als grundsätzlich tauglich erschienen, haben eindeutig das Softwarepaket *Wireless Insite* (Remcom Inc., USA) als das gegenwärtig, für die vorliegenden Aufgabenstellungen, bestgeeignete Programmpaket erwiesen. Neben der standardmäßigen Implementierung phasenrichtiger 3D-Berechnungs- bzw. Ausbreitungsmodelle bietet es große Freiheiten hinsichtlich Modellierung des Feldraumes und Definition der Materialeigenschaften. Weiters wird die Modellierung einer Vielzahl von Antennencharakteristiken und der Import von CAD-Objekten zur Modellierung komplexer Szenarien unterstützt.

Im Folgenden wird die zu erwartende Genauigkeit bzw. die Unsicherheit solcher numerischer Feldberechnungen an zwei einfachen Indoor-WLAN-Szenarien, die messtechnisch verifiziert wurden, gezeigt. Alle Berechnungen wurden mit dem Softwarepaket *Wireless Insite* durchgeführt.

3.1.2 Verifizierung der Zuverlässigkeit anhand einfacher Szenarien

Um die grundsätzliche Tauglichkeit dieser Berechnungsverfahren für die hier interessierende Expositionsbeurteilung zu überprüfen, bzw. die zu erwartenden Unsicherheiten zu quantifizieren, wurden zwei einfache Indoor-Szenarien mit WLAN-Geräten simuliert und gemessen. Es wurde dazu jeweils eine WLAN-Datenübertragung (IEEE 802.11b) von einem Client A über einen Access Point zu einem Client B angenommen, bzw. realisiert.

In einem ersten Schritt (Szenario 1) wurden die Verhältnisse unter möglichst idealen Ausbreitungsbedingungen untersucht. Zu diesem Zweck wurde das genannte Szenario für die Messungen in einer Absorberhalle aufgebaut, bzw. in der Simulation durch ideal absorbierende Begrenzungen des Feldraumes modelliert.

Im nächsten Schritt wurde die Annahme der idealisierten Ausbreitungsverhältnisse fallen gelassen. Zu diesem Zweck wurde das oben genannte, einfache WLAN-Szenario in einem Büroraum mit mehreren Arbeitsplätzen (Raum Nr. CA 2-33) auf dem Gelände der ARC Seibersdorf research GmbH simuliert, bzw. realisiert (Szenario 2).

Zur Bewertung der Zuverlässigkeit der numerischen Feldberechnungen wurden für beide Szenarien die Berechnungsergebnisse den entsprechenden Messergebnissen in ausgewählten Raumbereichen gegenübergestellt.

Die Modellierung der Sendeantennen erfolgte auf Basis des Antennentyps (Dipol bzw. Patch), ihrer Abmessungen und den angegebenen Spezifikationen im Datenblatt (Antennengewinn und Öffnungswinkel). Die Sendeleistungen der WLAN-Geräte wurden entsprechend den Spezifikationen modelliert.

Aufgrund der Tatsache, dass die numerische Feldberechnung nach optischen Ausbreitungsmodellen nur von kontinuierlich strahlenden Feldquellen ausgehen kann, bei der realen WLAN-Übertragung jedoch burstartige HF-Abstrahlung im Zeitmultiplex erfolgt, müssen die Berechnungsergebnisse entsprechend skaliert werden, um einen physikalisch sinnvollen Vergleich von Berechnung und Messung anstellen zu können. Weiters ist bei der numerischen Berechnung zu berücksichtigen, dass die drei potentiellen Feldquellen nicht gleichzeitig senden können. D.h., es sind zunächst drei separate Simulationen notwendig, um die maximale Amplitude der drei Immissionsbeiträge an den interessierenden Immissionsorten zu berechnen. Auf Basis dieser Berechnungsergebnisse und unter Berücksichtigung des Zeitmultiplex können die in den Immissionspunkten tatsächlich erwarteten Strahlungsleistungsdichten, bzw. Feldstärkewerte, errechnet werden. Abbildung 3.1 soll dies schematisch, unter vereinfachten Annahmen (RTS und CTS Pakete nicht dargestellt), verdeutlichen.

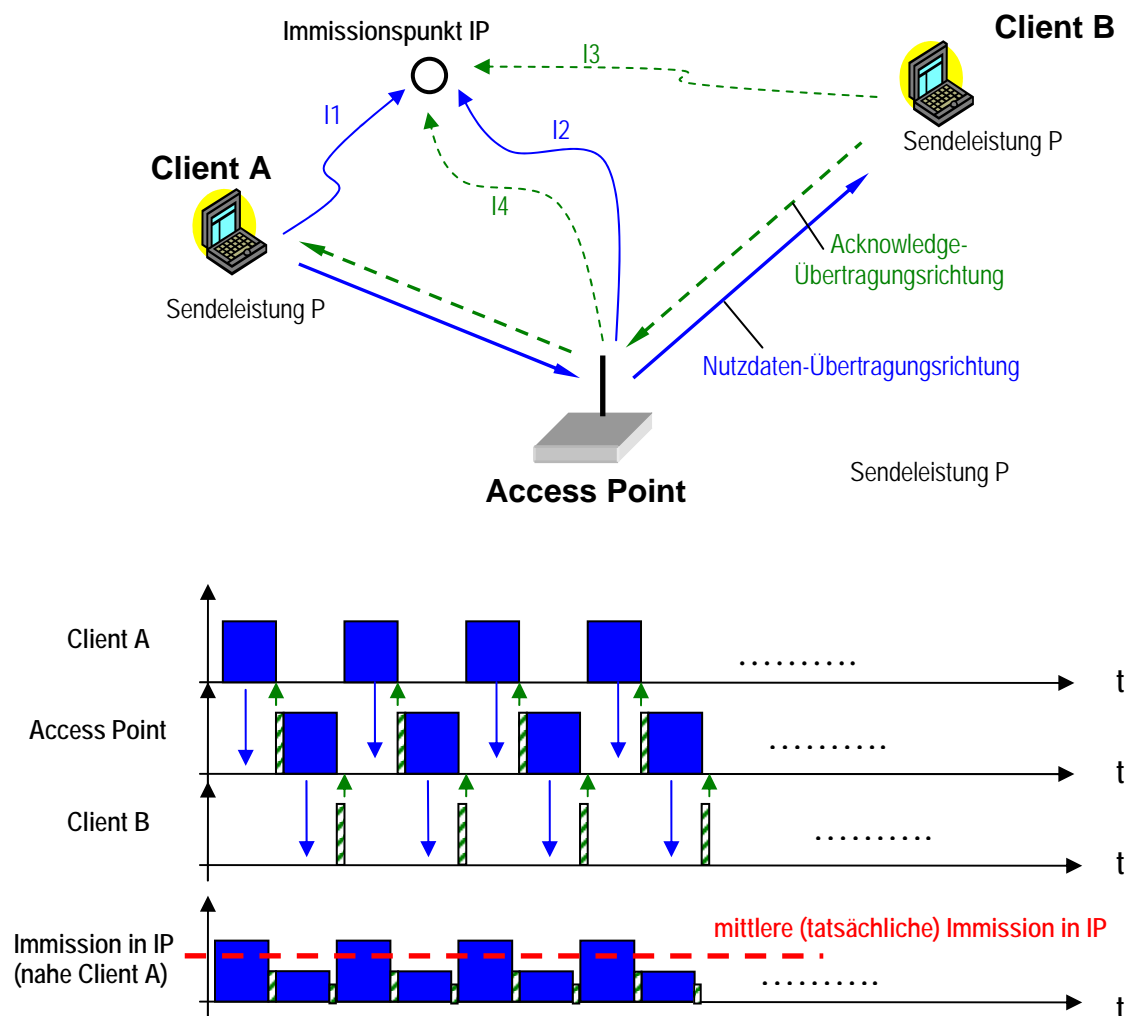


Abbildung 3.1: Schematisierter, vereinfachter (ohne RTS und CTS-Pakete) Zusammenhang zwischen den Einzel-Immissionsbeiträgen und der resultierenden Gesamtimmission in einem betrachteten Punkt aufgrund des Zeitmultiplex. Bei Messungen in der Praxis nahe einer Quelle (z.B. am Arbeitsplatz von Client A) werden die Immissionsbeiträge von fernerer Quellen sogar oft vernachlässigbar klein sein.

Für die in den beiden Szenarien betrachteten Verhältnisse (Übertragung einer großen Datei von Client A über den Access Point zu Client B zur Erzielung einer möglichst konstanten Verkehrssituation im Netz) ergab sich ein mittlerer effektiver Duty der vom Access Point abgestrahlten Leistung von ca. 48 % (vgl. Kapitel 2.2.2.5). Die mittlere von Client A abgestrahlte Leistung betrug ca. 42 % der maximalen Sendeleistungsamplitude. Betrachtet man nun z.B. einen Arbeitsplatz in unmittelbarer Nähe des Access Points (Entfernung ca. 50 cm), oder den Arbeitsplatz an dem Client A sendet (z.B. vor Notebook), so sind die Immissionsbeiträge von den weiter entfernt liegenden Quellen praktisch vernachlässigbar und es kann nahe dem Access Point ein Skalierungsfaktor von 0,48 und nahe Client A von 0,42 angenommen werden, mit dem die Simulationsergebnisse (unter Annahme kontinuierlicher Abstrahlung) auf die tatsächlich zu erwartenden Werte umgerechnet werden müssen.

3.1.2.1 Idealisierte Ausbreitungsverhältnisse - Absorberhalle (Szenario 1)

Es wurde ein IEEE 802.11b WLAN-Netzwerk bestehend aus einem Access Point und 2 Clients in der Absorberhalle der ARC Seibersdorf research GmbH aufgebaut. Um für die Messungen der elektrischen Feldstärke annähernd konstanten Datenverkehrszustand im Netz zu generieren, wurde eine mehrere hundert Megabyte große Datei von Client A (USB-Easy Client 2, Wireless Network Solutions) über den Access Point (L54g Wireless, LANCOM Systems) zu Client B (Notebook Acer Travelmate 634LCI mit integriertem WLAN-Client) übertragen. Gemäß obiger Ausführungen führt dies zu effektiven Duty Cycles der Sendeleistung von ca. 48 % am Access Point und ca. 42 % am als Datenquelle fungierenden Client A. Der die Daten empfangende Client B sendet während der Übertragung nur Acknowledge-Pakete und erreicht damit einen effektiven Duty Cycle der Sendeleistung von ca. 8 %. Zusätzlich wurde Client B während der Messungen immer möglichst weit entfernt von den jeweils betrachteten Messpositionen platziert, so dass die Immissionsbeiträge von Client B in diesem Fall vernachlässigt werden können. Abbildung 3.2 zeigt das *Wireless Insite* – Simulationsmodell von Szenario 1, wobei die beiden relevanten Feldquellen (Access Point und Client A) durch ihre 3D-Richtcharakteristika dargestellt sind (Access Point: Dipolantenne 17 dBm, 3dBi, Client A: Patch Antenne 12 dBm, 8 dBi).

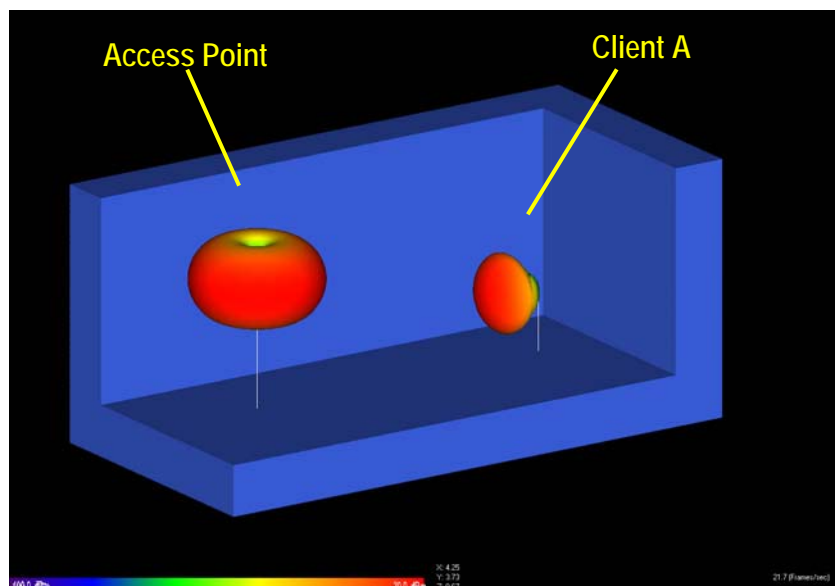


Abbildung 3.2: Wireless Insite Modell von Szenario 1. Die Feldquellen sind durch ihre 3D-Richtcharakteristiken symbolisiert.

Access Point und Client A wurden in einer Horizontalentfernung von 4 m aufgestellt. Die Aufstellungshöhe des Access Points betrug 2 m, jene von Client A 1 m über dem Fußboden.

Mittels des vollständigen 3D-Ausbreitungsmodells von *Wireless Insite* wurden die Feldverhältnisse in der Absorberhalle simuliert (separat für jede der beiden Feldquellen). Abbildung 3.3 zeigt die Berechnungsergebnisse. Im linken Teilbild sind die Feldverteilungen in der Absorberhalle jeweils in der Höhenebene des sendenden Antennenfußpunktes dargestellt. Das rechte Teilbild zeigt die räumliche Feldverteilung in der Umgebung der Feldquellen. Farblich dargestellt ist jeweils die empfangene HF-Leistung im jeweiligen Raumpunkt (räumliche Horizontal-Auflösung 2 cm).

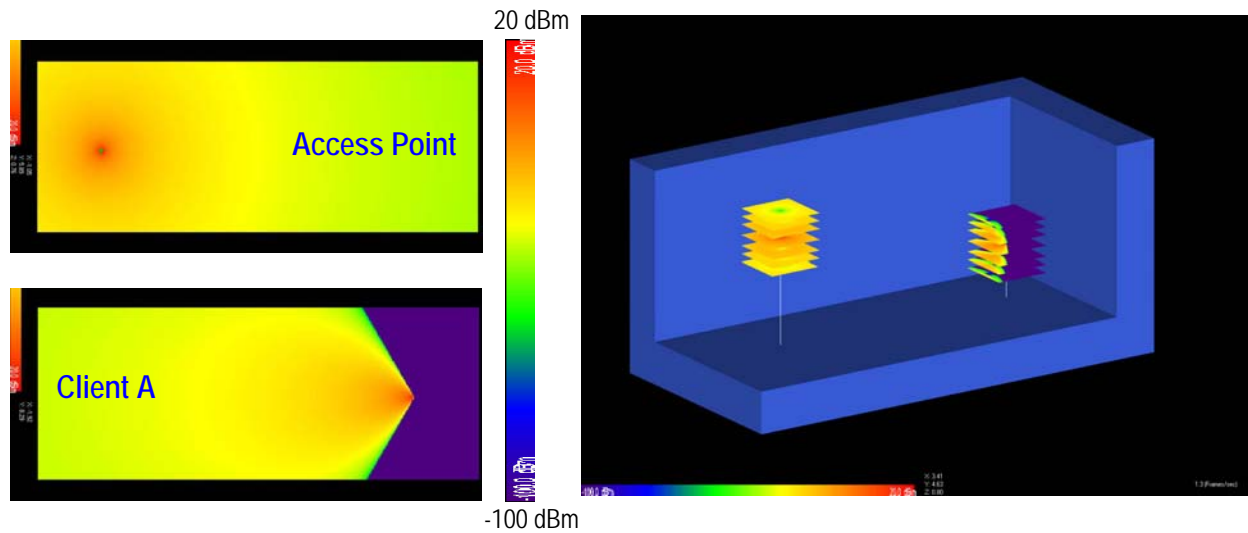
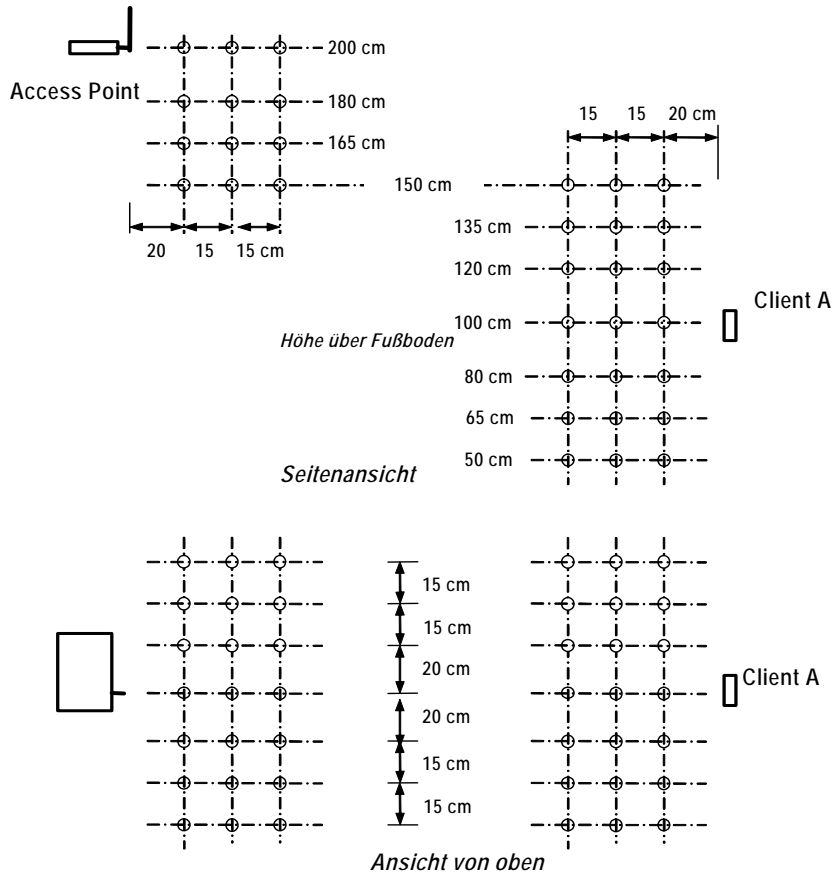


Abbildung 3.3: Simulationsergebnisse für Szenario 1. Das linke Teilbild zeigt die Feldverteilung in der Absorberhalle jeweils in der Horizontalebene des jeweils sendenden Gerätes (oben Access Point, unten Client A). Das rechte Teilbild zeigt die räumlichen Feldverteilungen im Umgebungsbereich der Feldquellen.

Die Berechnung der räumlichen Feldverteilungen im Umgebungsbereich der Feldquellen erfolgte in diskreten Horizontal-Ebenen (in jeweils 5 cm Distanz, vgl. Abbildung 3.3, rechts). Zur Verifizierung dieser Berechnungsergebnisse wurden am Realaufbau des Szenarios Messungen der elektrischen Feldstärke an räumlichen Messpunktgittern (Schrittweite 15 bis 20 cm) entsprechend Abbildung 3.4 durchgeführt. Als Mess-System wurde eine isotrope Breitbandfeldsonde (Wandel und Goltermann EMR 300, E-Feldsonde Typ 18, 100 kHz – 3GHz) verwendet. Die räumliche Anordnung der Messpunktgitter wurde derart gewählt, dass sie denkbaren Annäherungsbereichen an Access Point bzw. Client-Sendeantenne unter realistischen Bedingungen entsprechen. Die Abmessungen der Messpunktgitter entsprechen etwa den Dimensionen der unter diesen Annahmen am höchsten exponierten Körperpartien, da gegenwärtig anerkannte Personenschutz-Grenzwerte (Referenzwerte) als über die Körperdimension gemittelte Werte zu verstehen sind (siehe z.B. [16]). Abbildung 3.5 zeigt den Vergleich der Simulations- und Berechnungsergebnisse für den Raumbereich vor dem Access Point, Abbildung 3.6 zeigt den Vergleich für den Raumbereich vor Client A (Datenquelle). Die Diagramme zeigen die Mittelwerte jeder Horizontalebene, in der gemessen wurde (Mittelwert über $3 \times 4 = 12$ Messpunkte, bzw. berechnete Feldpunkte). Da das Original-Simulationsergebnis nur für kontinuierliche Leistungsabstrahlung gilt, muss es noch entsprechend dem mittleren effektiven Duty Cycle skaliert werden (grüne Kurven in Diagrammen), um einen quantitativen Vergleich zwischen Simulation und Messung durchführen zu können. Da jeweils relativ nahe einer Feldquelle gemessen wurde,

kann der Immissionsbeitrag der anderen (weiter entfernten) Quelle hier vernachlässigt werden (ca. 50-60 dB, schwächer als der Immissionsbeitrag der nahen Quelle; dies



entspricht einem Faktor 316 -1000 in Bezug auf die Feldstärke).

Abbildung 3.4: Definition der räumlichen Messpunktgitter zum Vergleich von Mess- und Simulationsergebnissen

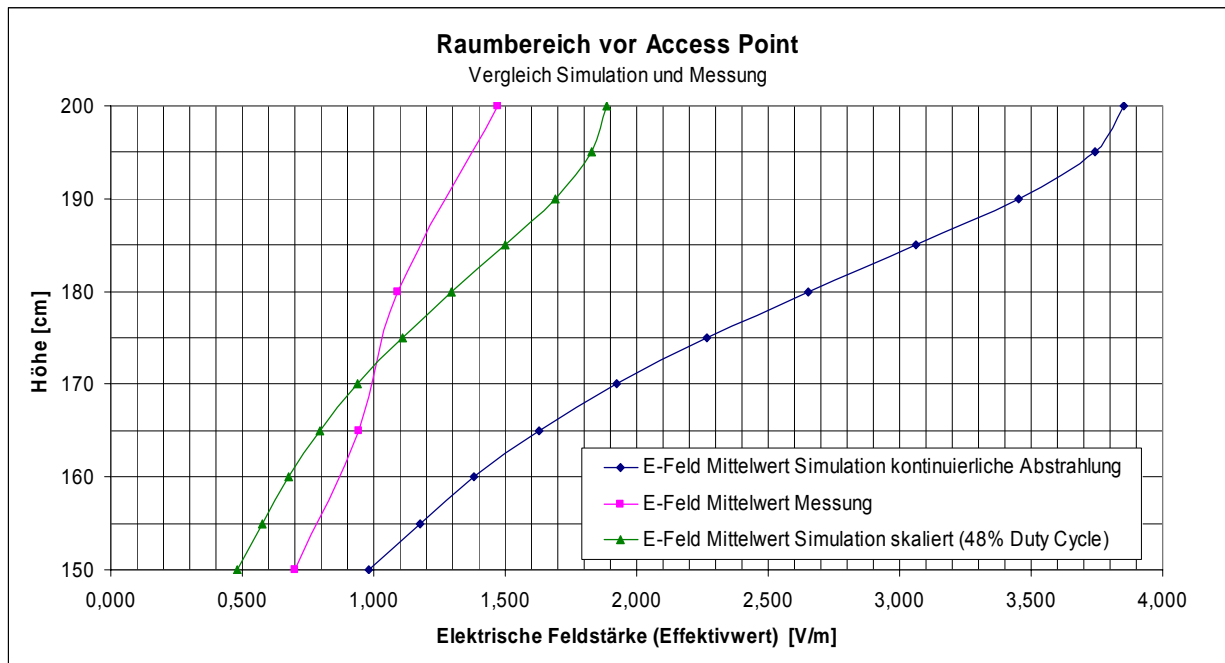


Abbildung 3.5: Vergleich von Mess- und Simulationsergebnissen im Raumbereich vor dem Access Point. Die Feldstärkewerte entsprechen jeweils dem Mittelwert über eine 100 cm x 45 cm große Horizontalebene in der entsprechenden Höhe (vgl. Abb. 3.4).

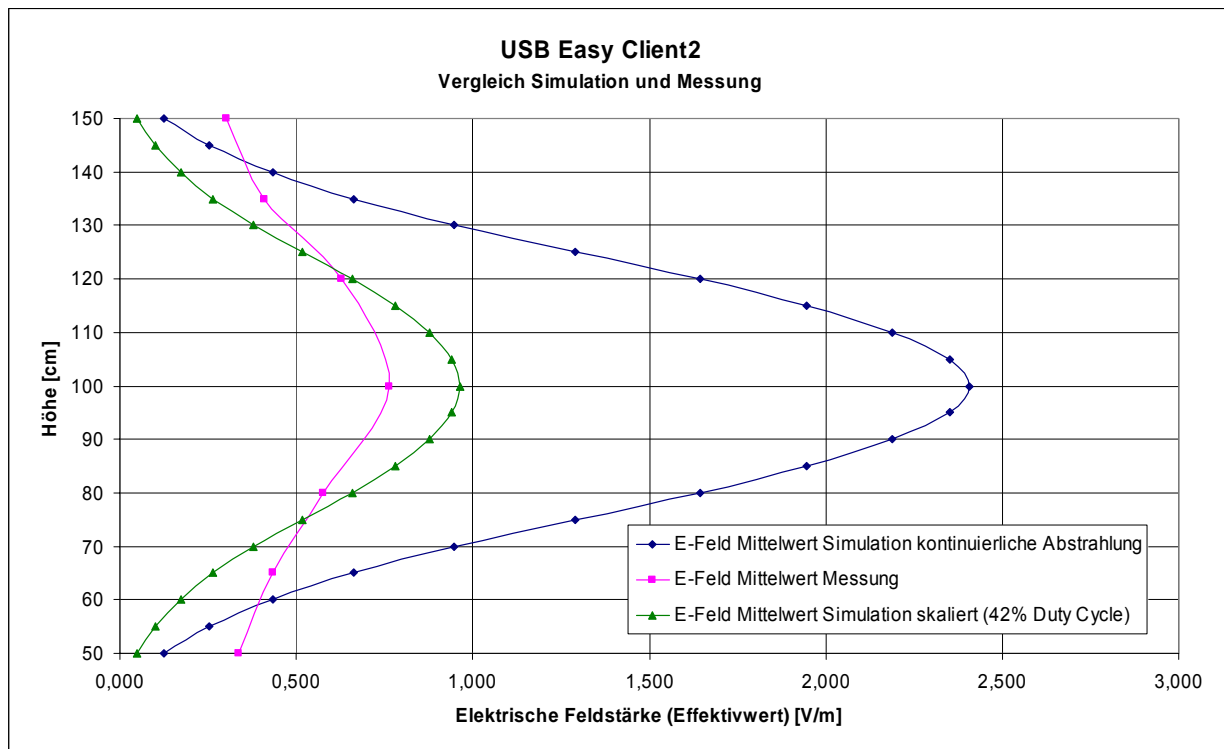


Abbildung 3.6: Vergleich von Mess- und Simulationsergebnissen im Raumbereich vor Client A. Die Feldstärkewerte entsprechen jeweils dem Mittelwert über eine 100 cm x 45 cm große Horizontalebene in der entsprechenden Höhe (vgl. Abb. 3.14).

Aus Abbildungen 3.5 und 3.6 kann ersehen werden, dass die maximalen Abweichungen zwischen Messung und numerischer Berechnung unter den gegebenen Bedingungen im Bereich der Hauptstrahlrichtung der Feldquellen bei ca. 20 -30 % liegen. Abweichungen in dieser Größenordnung sind unter den gegebenen Bedingungen durch die Unsicherheitsfaktoren solcher Simulationen erklärbar (z.B. Modellierung der Antennencharakteristik, Schwankungen des effektiven Duty Cycles, tatsächlich abgestrahlte vs. spezifizierte Sendeleistung).

Betrachtet man die Gesamt-Mittelwerte über das jeweilige gesamte Volumen der untersuchten Raumbereiche ergeben sich die in Tabelle 3.1. angeführten Werte.

	Simuliert (CW)	Gemessen	Simuliert u. skaliert	Abweichung
	E [V/m]	E [V/m]	E [V/m]	
Access Point	2,2	1,05	1,06	+ 1 %
Client A	1,76	0,49	0,50	+ 2 %

Tabelle 3.1: Vergleich von Mess- und Simulationsergebnissen hinsichtlich des räumlichen Gesamtmittelwertes der elektrischen Feldstärke. Die maximalen Abweichungen liegen bei weniger als 2 %.

3.1.2.2 Reale Ausbreitungsverhältnisse - Büroumgebung (Szenario 2)

Ähnlich wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben, wurde ein IEEE 802.11b WLAN-Netzwerk bestehend aus einem Access Point und 2 Clients, diesmal allerdings in einem Büroraum der ARC Seibersdorf research GmbH aufgebaut (Raum Nr. CA 2-33). Um für die Messungen der elektrischen Feldstärke annähernd konstanten Datenverkehrszustand im Netz zu generieren, wurde eine mehrere hundert Megabyte große Datei von Client A (MA111 802.11b Wireless USB Adapter, Fa. Netgear) über den Access Point (L54g Wireless, LANCOM Systems) zu Client B (USB-Easy Client 2, Wireless Network Solutions) übertragen. Wie bereits erwähnt, führt dies zu effektiven Duty Cycles der Sendeleistung von ca. 48 % am Access Point und ca. 42 % am als Datenquelle fungierenden Client A. Der die Daten empfangende Client B sendet während der Übertragung nur Acknowledge-Pakete und erreicht damit einen effektiven Duty Cycle der Sendeleistung von ca. 8 %. Abbildung 3.7 zeigt das *Wireless Insite* – Simulationsmodell dieses Szenarios in 3D-Ansicht. (vordere und rechte Wand in der Abbildung entfernt). Bildschirme (Flach- und Röhrenmonitore), Arbeitsplatzcomputer und Tischbeine wurden als ideal metallisch modelliert (graue Objekte). Tischplatten, Kästen und Regale wurden mit Materialeigenschaften entsprechend Holz (braun dargestellt) versehen. Die Materialparameter für Fenster, Außenwände (Beton), Innenwände (Trockenbau), Decken und Boden (Beton) wurden aus einer Materialdatenbank entnommen. Die drei Feldquellen sind als grüne Würfel sichtbar (Access Point hellgrün, Clients dunkelgrün). Die beiden Clients sind über die USB-Schnittstelle direkt an Desktop PCs angeschlossen und befinden sich daher knapp (10 cm) über der Horizontalebene der Tischplatten. Der Access Point befindet sich in einem Regal an der gegenüberliegenden Wand des Büroraumes (70 cm Höhendifferenz zu den Clients).

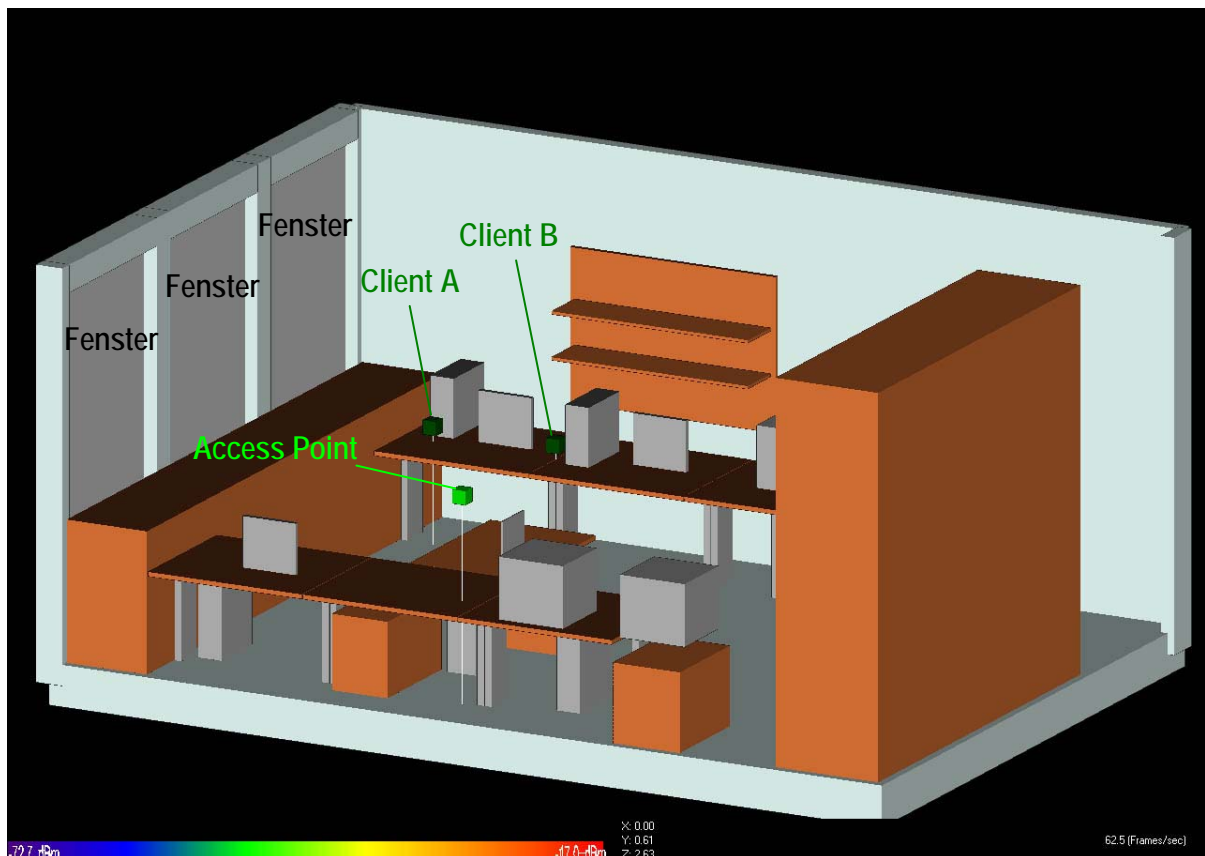


Abbildung 3.7: Wireless Insite Modell von Szenario 2 (Büroumgebung).

Die Quellencharakteristiken von Access Point und Client B wurden anhand der Spezifikationen modelliert (Access Point: Dipolantenne 17 dBm, 3 dBi, Client B: Patch Antenne 12 dBm, 8 dBi). Für die Abstrahlcharakteristik von Client A waren keine Spezifikationen aus der Produktbeschreibung verfügbar. Es wurde daher ein generisches Antennenpattern auf Basis von zuvor durchgeführten Messungen der Abstrahlcharakteristik in der Absorberhalle für Client A modelliert (Dipol 8 dBm, 3 dBi). Als hinsichtlich der Immissionen interessierende Raumbereiche wurden der Arbeitsplatz nahe den Clients, sowie der dem Access Point nächstgelegene Arbeitsplatz definiert (jeweils 2 cm Auflösung in horizontaler Richtung in diskreten Ebenen in 5 cm Vertikalabstand). Abbildungen 3.8 bis 3.10 zeigen die Immissionsbeiträge der einzelnen Sender in den untersuchten Raumbereichen unter Annahme von kontinuierlicher Abstrahlung der Quellen. Für die Ermittlung der tatsächlichen Immissionen müssen diese Berechnungsergebnisse noch entsprechend den effektiven Duty Cycles der einzelnen Sender skaliert werden. Zusätzlich wurde für jeden der drei möglichen Sende-Konfigurationen die Feldverteilung im gesamten Bürobereich in vier Ebenen (50, 85, 100 und 150 cm über Fußbodenniveau) berechnet (Abbildungen 3.11 bis 3.13).

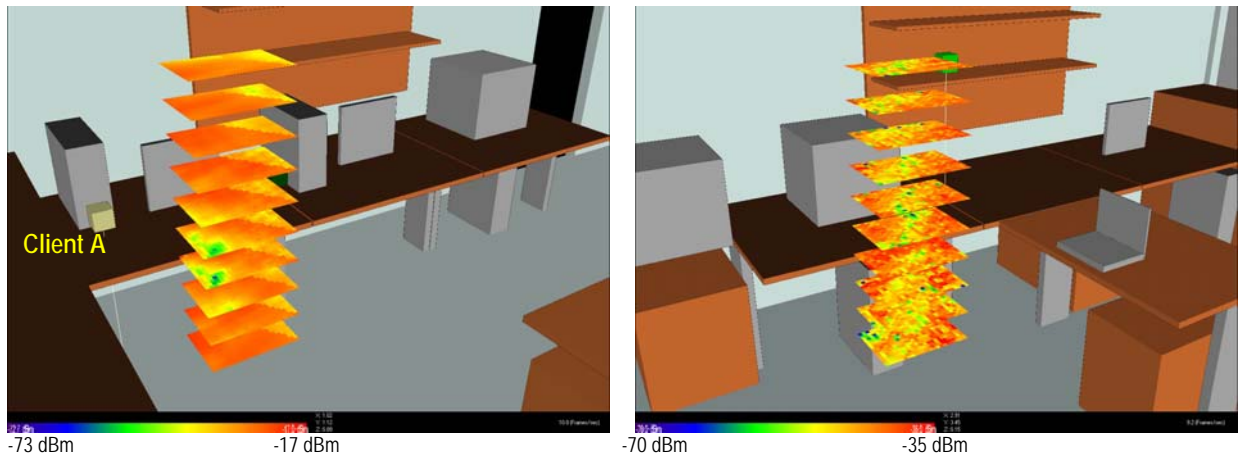


Abbildung 3.8: Immissionsbeiträge von Client A (bei kontinuierlicher Abstrahlung).
links: Arbeitsplatz nahe Client A, rechts: Arbeitsplatz nahe Access Point.

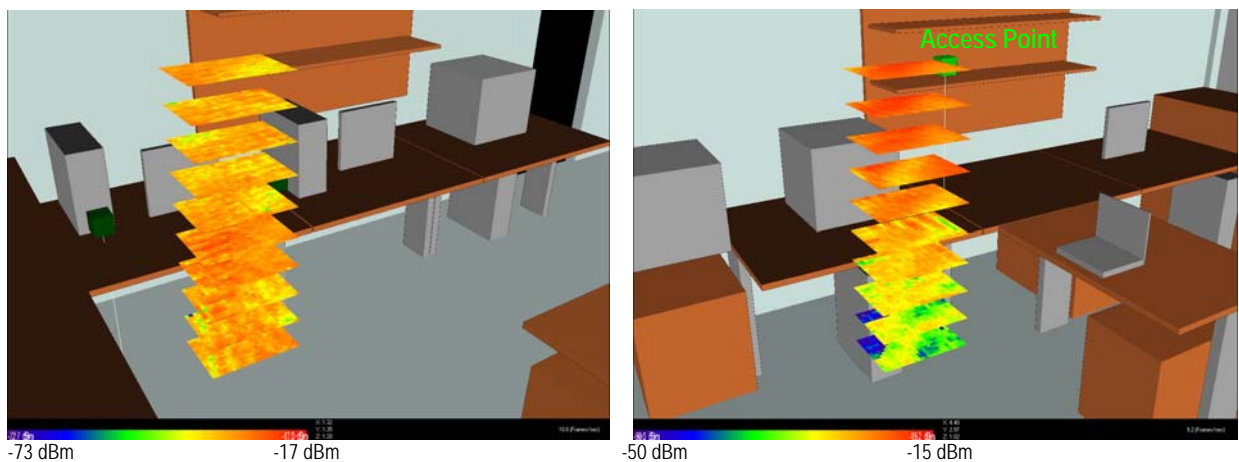


Abbildung 3.9: Immissionsbeiträge des Access Points (bei kontinuierlicher Abstrahlung).
links: Arbeitsplatz nahe Client A, rechts: Arbeitsplatz nahe Access Point.

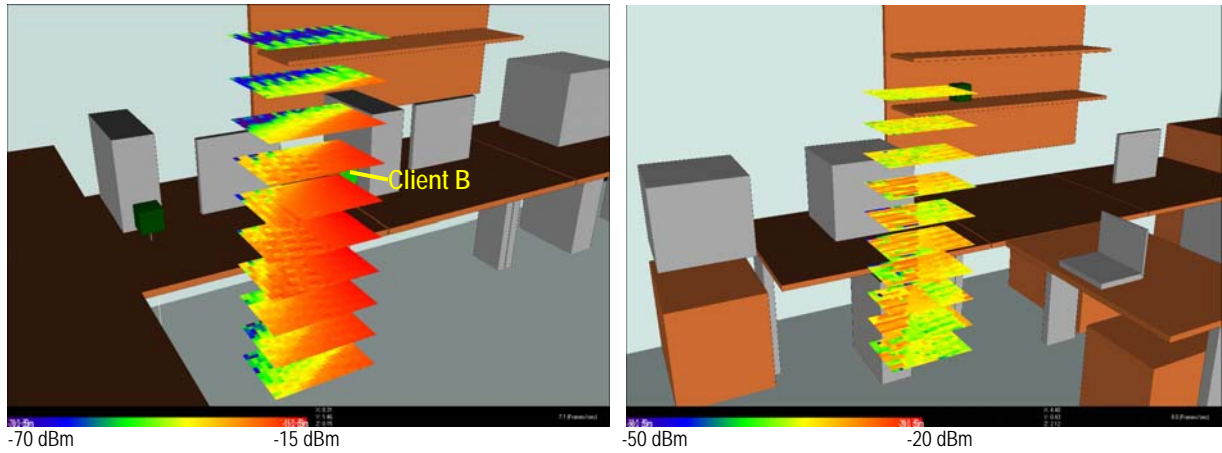


Abbildung 3.10: Immissionsbeiträge von Client B (bei kontinuierlicher Abstrahlung).
links: Arbeitsplatz nahe Client A, rechts: Arbeitsplatz nahe Access Point.

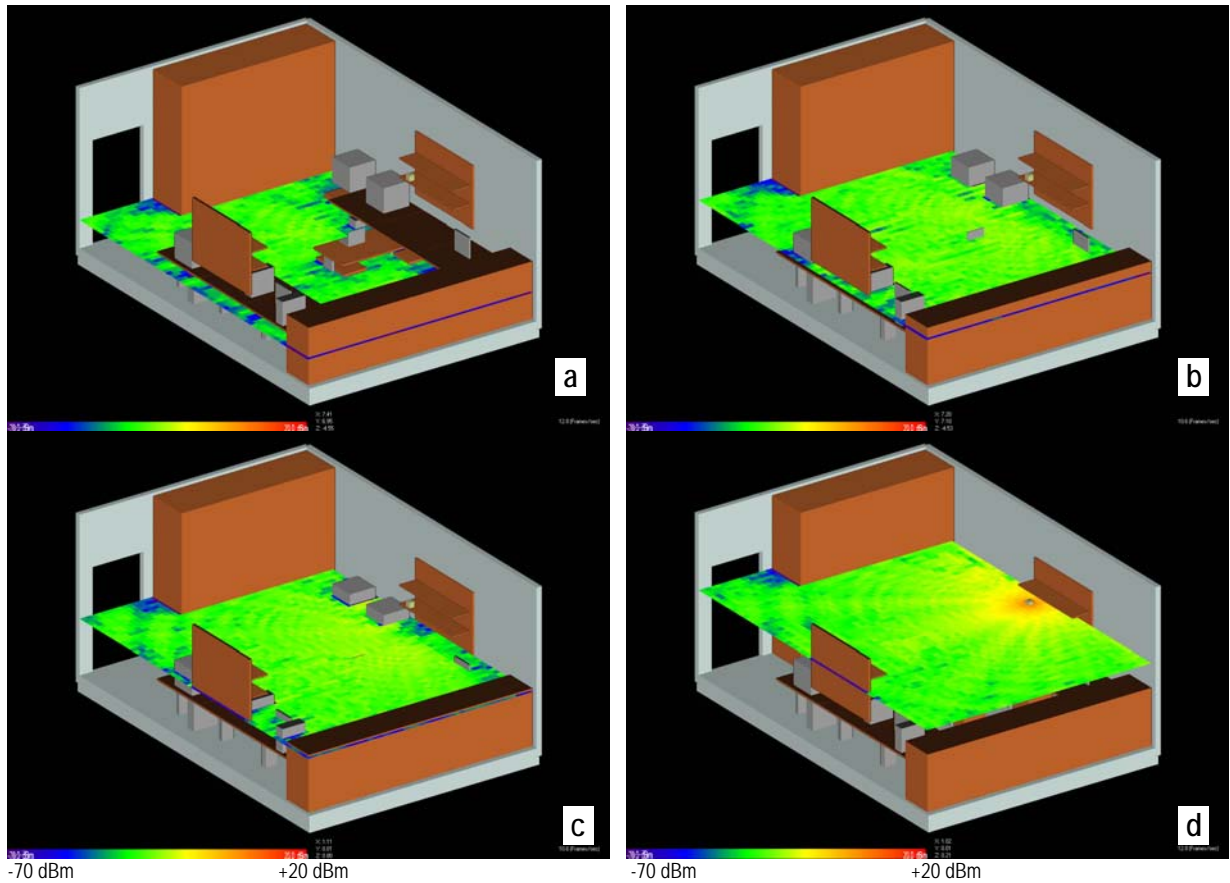


Abbildung 3.11: Immissionsbeiträge des Access Points (bei kontinuierlicher Abstrahlung) im gesamten Büro in unterschiedlichen Höhen über dem Fußboden: a) 50 cm, b) 85 cm, c) 100 cm, d) 150 cm

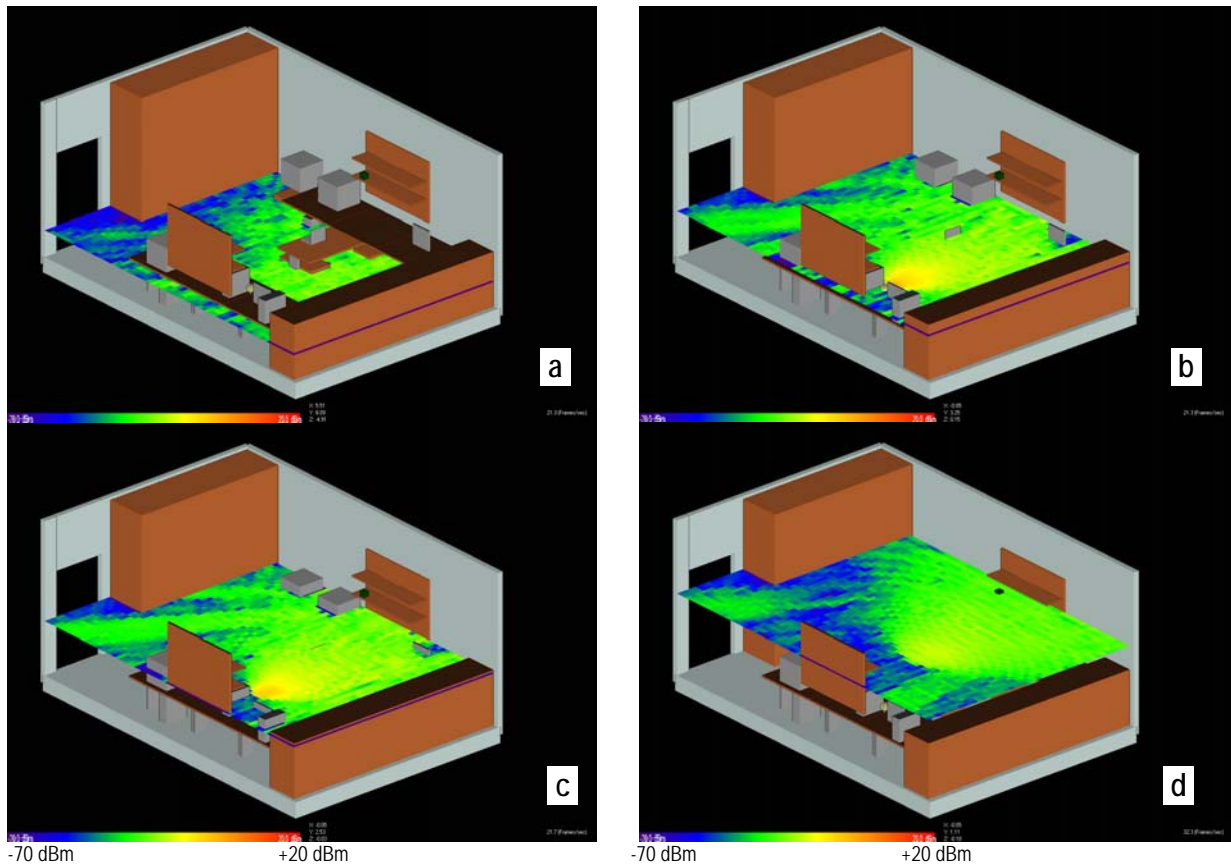


Abbildung 3.12: Immissionsbeiträge von Client B (bei kontinuierlicher Abstrahlung) im gesamten Büro in unterschiedlichen Höhen über dem Fußboden: a) 50 cm, b) 85 cm, c) 100 cm, d) 150 cm

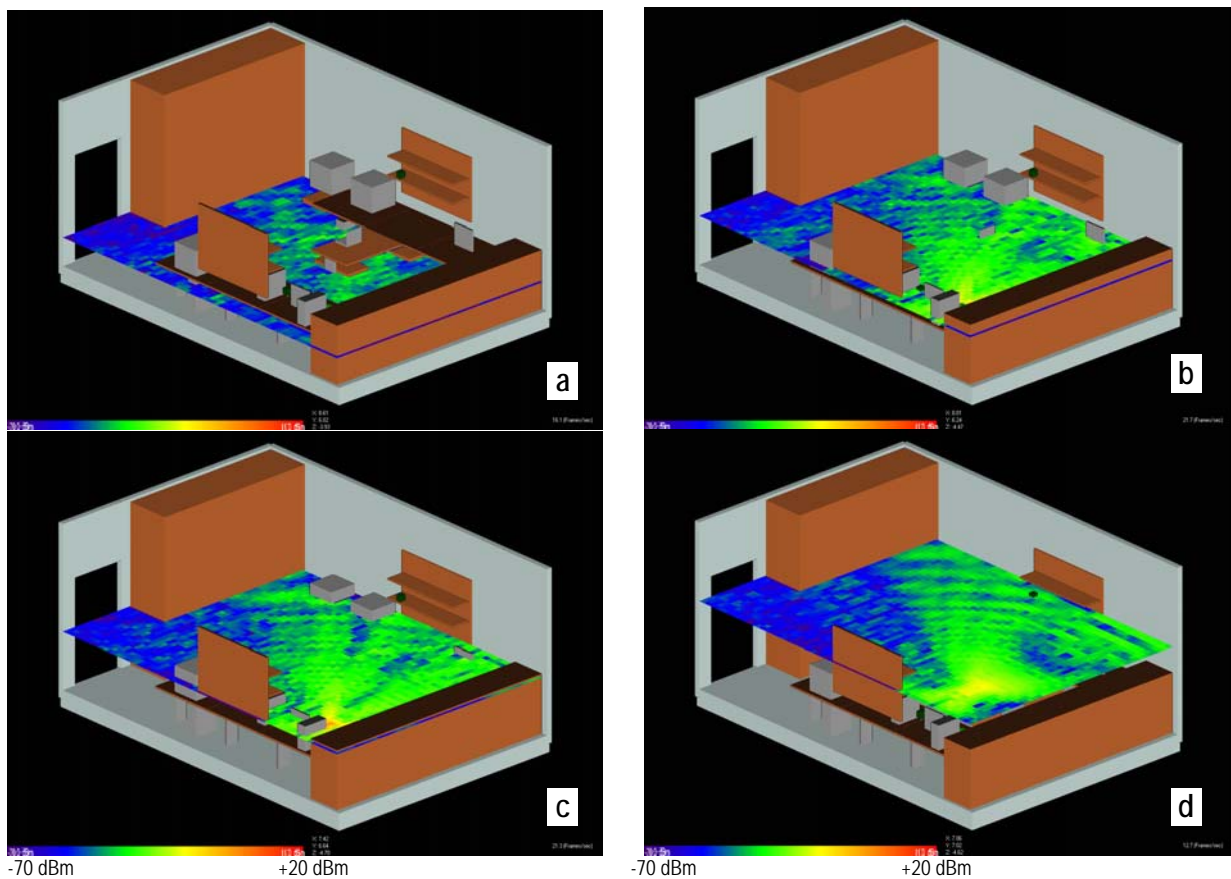


Abbildung 3.13: Immissionsbeiträge von Client A (bei kontinuierlicher Abstrahlung) im gesamten Büro in unterschiedlichen Höhen über dem Fußboden: a) 50 cm, b) 85 cm, c) 100 cm, d) 150 cm

Zur Verifizierung dieser Berechnungsergebnisse wurden am Realaufbau des Szenarios Messungen der elektrischen Feldstärke an räumlichen Messpunktgittern (Schrittweite 15 cm) entsprechend Abbildung 3.14 durchgeführt (Mess-System Field Nose mit Agilent-Spektrumanalysator E4405B). Die räumliche Anordnung der Messpunktgitter wurde derart gewählt, dass sie eine Beurteilung der Immissionen an zwei ausgewählten Arbeitsplätzen im untersuchten Raum erlauben.

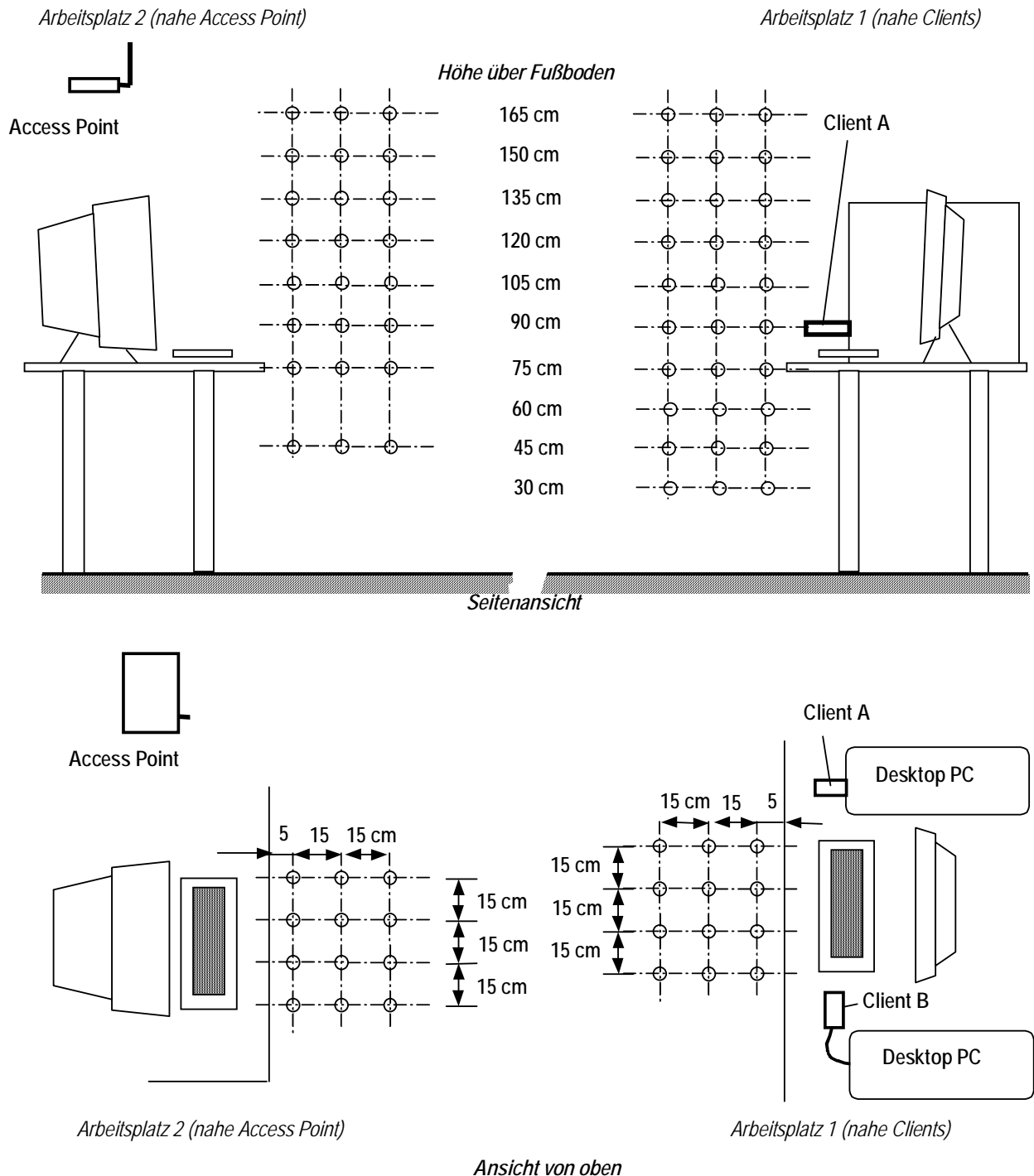


Abbildung 3.14: Definition der räumlichen Messpunktgitter zum Vergleich von Mess- und Simulationsergebnissen

Abbildung 3.15 zeigt den Vergleich der Simulations- und Berechnungsergebnisse für den Arbeitsplatz nahe den Clients, Abbildung 3.16 zeigt den Vergleich für den Arbeitsplatz nahe dem Access Point. Die Diagramme zeigen die Mittelwerte jeder Horizontalebene, in der gemessen wurde (Mittelwert über 3 x 4 = 12 Messpunkte, bzw. berechnete Feldpunkte). Da das Original-Simulationsergebnis nur für kontinuierliche Leistungsabstrahlung gilt, musste es noch entsprechend dem mittleren effektiven Duty Cycle skaliert werden, um einen quantitativen Vergleich zwischen Simulation und Messung durchführen zu können.

Abbildung 3.15 zeigt, dass am Arbeitsplatz nahe dem Access Point die Immissionsbeiträge der Clients nur mehr verschwindend geringen Einfluss haben.

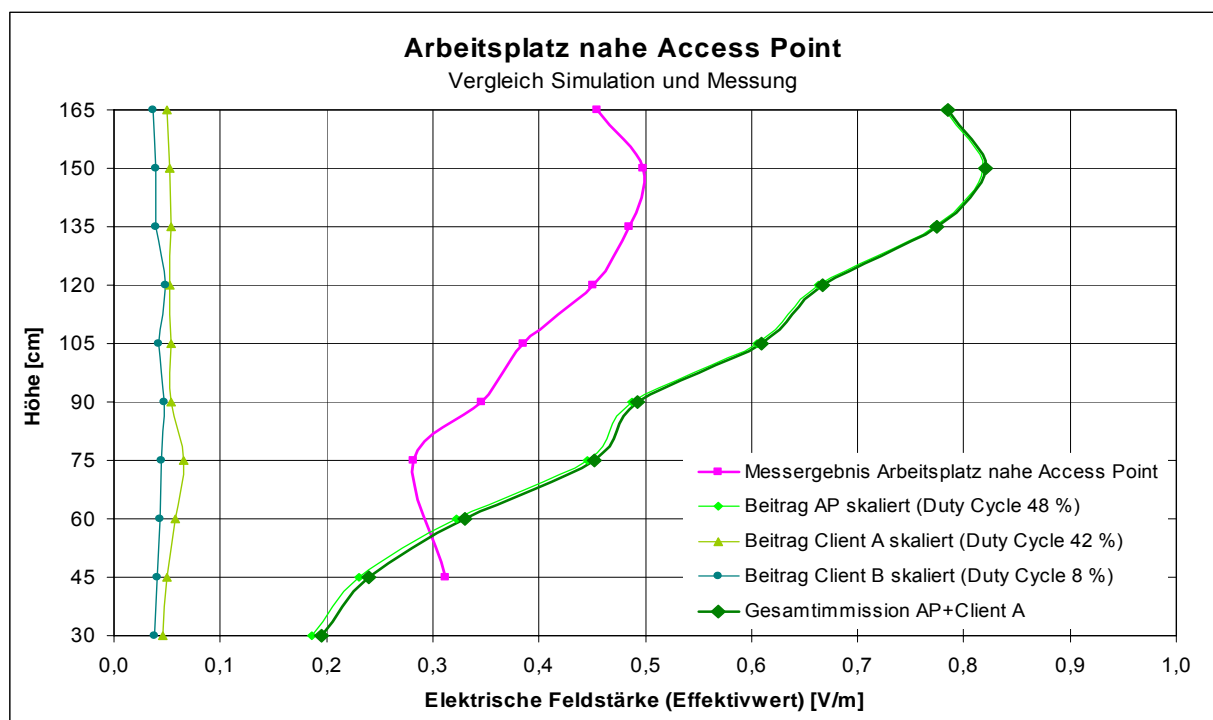


Abbildung 3.15: Vergleich von Mess- und Simulationsergebnissen im Bereich des Arbeitsplatzes nahe dem Access Point . Die Feldstärkewerte entsprechen jeweils dem Mittelwert über eine 30 cm x 45 cm große Horizontalebene in der entsprechenden Höhe (vgl. Abb. 3.14).

Hinsichtlich der Gesamt-Mittelwerte über das jeweilige gesamte Volumen der untersuchten Arbeitsplätze ergeben sich die in Tabelle 3.2. angeführten Werte.

	Gesamtimmission aus Simulation	Gesamtimmission gemessen	Abweichung
	E [V/m]	E [V/m]	
Arbeitsplatz 1 (nahe Access Point)	0,52	0,42	+ 24 %
Arbeitsplatz 2 (nahe Clients)	0,40	0,46	-13 %

Tabelle 3.2: Vergleich von Mess- und Simulationsergebnissen hinsichtlich des räumlichen Gesamtmittelwertes der elektrischen Feldstärke.

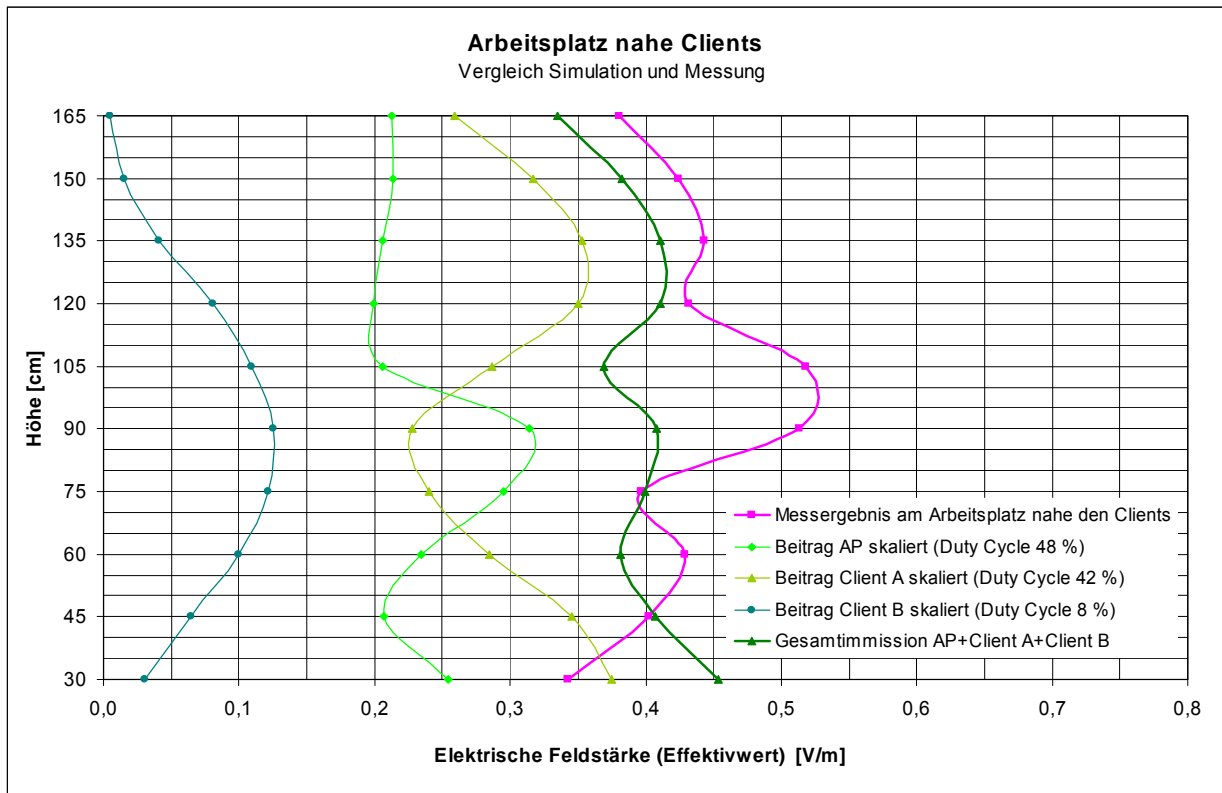


Abbildung 3.16: Vergleich von Mess- und Simulationsergebnissen im Bereich des Arbeitsplatzes nahe den Clients. Die Feldstärkewerte entsprechen jeweils dem Mittelwert über eine 30 cm x 45 cm große Horizontalebene in der entsprechenden Höhe (vgl. Abb. 3.14).

Die vorangegangenen Betrachtungen zeigen, dass bei sorgfältiger Modellierung des Expositionsszenarios numerische Feldberechnungen auf Basis optischer Ausbreitungsmodelle grundsätzlich zur Abschätzung der resultierenden Immissionen tauglich sind. Die unvermeidlichen Unsicherheiten bei der Modellierung aufgrund vereinfachter Geometrien, meist nur näherungsweise bekannte Materialeigenschaften und Feldquellen-Spezifikationen, führen bei der Betrachtung der Immissionen in einzelnen Raumpunkten auf teilweise relativ große Abweichungen zwischen Messung und Berechnung (selbst bei guter Modellbildung bis zu 10 dB bis 15 dB möglich). Diese punktuell relativ großen Abweichungen kommen vor allem durch die kleinräumig ($\lambda/2 \approx 6$ cm) inhomogenen Feldverhältnisse zustande (Interferenzmuster durch Mehrwegeausbreitung). Bei der Betrachtung von räumlichen Mittelwerten, wie sie für die Immissionsbewertung eigentlich relevant sind, liegen die erreichbaren resultierenden Unsicherheiten bei guter Modellbildung jedoch nur mehr in einem Bereich, in dem sich auch die typische erreichbare Messunsicherheit bewegt.

3.2 Simulation körpernaher Anwendungen

3.2.1 Grundlagen

SAR-Messungen in vereinfachten, homogenen Körperrückbildungen können bei entsprechender Wahl der Messparameter immer nur als ‚Worst Case‘- Abschätzungen der tatsächlichen Verhältnisse im realen Körper gesehen werden. Ein detaillierter Einblick in die Verteilung der SAR in einzelnen Geweben kann gegenwärtig nur mittels aufwendiger Computersimulationen erreicht werden. Voraussetzung dazu ist die Verfügbarkeit eines hinreichend detaillierten anatomischen Modells für die numerische Feldberechnung. Für die Bewertung von Expositionssituationen bei körpernah betriebenen HF-Strahlungsquellen hat sich in den vergangenen Jahren die Methode der Finiten Differenzen im Zeitbereich (FDTD) durchgesetzt, mittels der eine vollständige Lösung der zeit- und raumdiskreten Maxwell-Gleichungen für beliebig komplexe Geometrien möglich ist. Eine der gegenwärtig mächtigsten FDTD-Simulationsplattformen ist SEMCAD (Schmid & Partner Engineering AG, Zürich, Schweiz), für die auch einige anatomische Kopfmodelle sowie ein Ganzkörpermodell verfügbar sind. Für weitere Details wird auf [1] verwiesen.

3.2.2 Unsicherheitsfaktoren und Grenzen der Einsetzbarkeit

Die im Rahmen der Bewertung einer speziellen Expositionssituation zu erwartenden Unsicherheiten sind, bei sinnvoll festgelegter räumlicher Diskretisierung des Feldraumes, vor allem durch das verwendete Körpermodell und die Modellierung der Strahlungsquelle bestimmt:

Körpermodell:

Repräsentativität

Bei der Bewertung von Simulationsergebnissen, die anhand von Simulationen mit einem, bzw. einer beschränkten Anzahl von Körpermodellen gewonnen wurden, ist zu berücksichtigen, dass die anatomischen Parameter realer menschlicher Körper teilweise relativ große Schwankungsbreiten aufweisen, die direkt Einfluss auf das Simulationsergebnis haben können (unterschiedliche Kopf- bzw. Körperabmessungen, Kopf- bzw. Körperformen, Gewebeschichtdicken, usw.).

Räumliche Auflösung und Detailtreue

Ein weiterer Einflussfaktor ist die Detailtreue und die räumliche Auflösung des Körpermodells. Organe bzw. Gewebebereiche welche hinsichtlich der SAR-Verteilung von Interesse sind, müssen räumlich entsprechend hoch aufgelöst sein, so dass ihre natürliche Form möglichst gut angenähert ist und der durch die kubische Diskretisierung des Simulationsraumes auftretende ‚stair casing error‘ vernachlässigbar wird. Vor allem bei sehr kleinen anatomischen Strukturen, die in gegenwärtig verfügbaren Körpermodellen aufgrund von zu geringer räumlicher Auflösung bei der medizinischen Bilderstellung teilweise überhaupt nicht modelliert sind (z.B. Gehörschnecke, Gleichgewichtsorgan), stößt man diesbezüglich gegenwärtig sehr schnell auf Grenzen der Aussagekraft. Wesentlich dabei ist, dass die räumliche Auflösung der Körpermodelle nicht als unabhängige Größe gesehen werden kann, sondern immer im Verhältnis zur Wellenlänge im Gewebe zu sehen ist. Abgesehen von der benötigten anatomischen Detailtreue kann die für die Stabilität der FDTD-Methode notwendige Forderung, dass die maximale Voxelgröße unter ca. 1/10 bis 1/20 der minimal vorkommenden Wellenlänge (im Gewebe) liegen muss, üblicherweise auch im Hinblick

auf die numerische Genauigkeit als ausreichend angesehen werden, da andere Unsicherheitsquellen (z.B. Quellenmodellierung, dielektrische Gewebeeigenschaften, Repräsentativität der Körpermodelle) wesentlich größeren Einfluss auf die Genauigkeit des Rechenergebnisses haben und die numerische Ungenauigkeit verursacht durch die Diskretisierung dagegen vernachlässigbar ist.

Dielektrische Eigenschaften der Gewebe

Ähnlich wie die anatomischen Schwankungsbreiten (Körper- bzw. Organabmessungen, Lage und Schichtdicken der Gewebe), stellen die elektrisch relevanten Gewebeeigenschaften (Permittivität ϵ , Leitfähigkeit σ) bestimmende Größen für die resultierende SAR in einer Expositionssituation dar. Für viele Körpergewebe werden gegenwärtig die von Gabriel et al [17] veröffentlichten Datensätze für ϵ und σ verwendet. Biologische Schwankungsbreiten dieser Größen (ca. $\pm 10\%$ bis $\pm 20\%$), sowie die Unsicherheit bezüglich der Übertragbarkeit der an tierischem Gewebe bzw. ex vivo gewonnenen Werte auf den Fall menschlicher Gewebe in vivo sind hier die wesentlichen Unsicherheitsfaktoren. Speziell im Zusammenwirken mit den genannten anatomischen Größen können ungünstige Kombinationen von Gewebesichtungen und dielektrischen Materialparametern zu ‚Anpassungseffekten‘ (*impedance matching*) führen, die in einzelnen Geweben zu erhöhten SAR-Werten führen können.

Modellierung der Strahlungsquelle:

Notwendige Vereinfachungen komplexer Strukturen

Bei der Modellierung der in der Realität geometrisch oft sehr komplexen Strahlungsquellen bzw. Antennenstrukturen, sind meist Vereinfachungen notwendig. Oftmals können ursprünglich als geringfügig eingestufte Vereinfachungen aber große Auswirkungen auf das resultierende Strahlungsverhalten der Quelle haben. Bei sehr kleinen Strukturen stellt durch die begrenzte räumliche Auflösung unter Umständen das ‚stair casing‘ Problem eine nicht mehr zu vernachlässigende Unsicherheitsquelle dar.

HF-Anspeisung

Wenn reale Strahlungsquellen modelliert werden (z.B. Antennenstrukturen von Mobiltelefonen oder Headsets), muss vor der Simulation mit anatomischen Kopfmodellen zunächst die korrekte Modellierung der Quelle verifiziert werden. In der Praxis bei der Modellierung realer Feldquellen, stellt die korrekte Modellierung der Antennenanspeisung oftmals ein großes Problem dar. Da im hier interessierenden Frequenzbereich für die Feldeinkopplung in den Körper hauptsächlich die magnetische Feldkomponente verantwortlich ist [18], ist vor allem darauf zu achten, dass die Stromverteilung auf der Antennenstruktur (und allen anderen mitstrahlenden Teilen) möglichst exakt jener im realen Gerät entspricht. Eine Verifizierung erfolgt zweckmäßiger Weise auf Basis von SAR-Messungen in homogenen Phantomen und entsprechender SAR-Simulation unter Verwendung eines gleichen numerischen Phantoms (z.B. SAM Phantom sowohl physisch als auch numerisch vorhanden). Nur wenn diese Verifizierung zufrieden stellende Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation führt, kann davon ausgegangen werden, dass das numerische Quellenmodell korrekt ist und die reale Quelle hinreichend genau repräsentiert.

Positionierung relativ zum Körpermodell

Schließlich stellt die relative Position der Feldquelle zum exponierten Körperteil einen wichtigen Faktor dar, der meist nicht unabhängig von den anatomischen Verhältnissen gesehen werden kann. Die Aufgabe eine Feldquelle an zwei anatomisch unterschiedlichen Kopfmodellen ‚in gleicher Weise‘ zu positionieren, sodass nur der Einfluss des Kopfmodells isoliert betrachtet werden kann, stellt in der Praxis oft ein nicht zufrieden stellend lösbares Problem dar. Dieses Problem wird umso größer, je näher sich die Feldquelle am Körper befindet.

3.3 Praktischer Einsatz numerischer Methoden zur Expositionsbeurteilung

Die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen numerischen Methoden stellen taugliche und wichtige Werkzeuge für eine umfassende Expositionsbeurteilung dar. Vor allem bei komplexen Szenarien, wo messtechnische Verfahren zu aufwendig werden oder überhaupt nicht mehr einsetzbar sind, sind diese Methoden oftmals die einzige Möglichkeit Einblicke in Details der betrachteten Expositionssituation zu erhalten.

Mit den in Kapitel 3.1 beschriebenen numerischen Verfahren zur Feldberechnung in großräumigen Szenarien können bei sorgfältiger Modellierung des jeweiligen Expositionsszenarios Berechnungsgenauigkeiten erzielt werden, die in der gleichen Größenordnung oder nur unwesentlich über den erzielbaren messtechnischen Unsicherheiten liegen (zumindest hinsichtlich des räumlichen Mittelwertes über Körperdimensionen, wie gegenwärtig von praktisch allen Normendokumenten für den Vergleich mit den abgeleiteten Grenzwerten verlangt). Vor allem bei komplexen und zeitlich variierenden Expositionen (z.B. WLAN, Bluetooth, DECT) erlaubt die numerische Analyse von Expositionsszenarios oftmals wesentlich detaillierte Einblicke in die tatsächlichen Immissionsverhältnisse, als mit vergleichbarem messtechnischen Aufwand erreichbar wären. Dies vor allem deshalb, weil nach erfolgter Modellierung des Szenarios mit relativ geringem Aufwand durch Variieren der Modellparameter unterschiedliche Betriebszustände der Feldquellenquellen simuliert werden können, während Messungen üblicherweise nur als ‚Momentaufnahmen‘ gesehen werden können.

Numerische Methoden zur SAR-Berechnung im Körper (Kapitel 3.2) haben sogar essentiellen Charakter, da die SAR-Bestimmung im menschlichen Körper messtechnisch in der Praxis überhaupt nicht zugänglich ist.

Für beide oben genannten numerischen Methoden gilt jedoch gleichermaßen, dass sie nur bei entsprechend sorgfältiger Modellierung der betrachteten Expositionsszenarios zu physikalisch richtigen Ergebnissen führen können. Eine sinnvolle Verwendung dieser Software-Werkzeuge erfordert jedenfalls fundierte physikalische Detailkenntnisse auf dem Gebiet der Elektrodynamik und der Wellenausbreitung sowie ausreichendes Verständnis der implementierten numerischen Verfahren. Keinesfalls sind derartige Softwarepakete als Ersatz für hinreichende Sachkenntnis zu sehen.

4 KONZEPTE FÜR DIE IMMISSIONSBEWERTUNG

4.1 Allgemeines

Die Bewertung hochfrequenter elektromagnetischer Immissionen ist in den letzten Jahren zu einem zentralen Punkt des Strahlenschutzes geworden. Gleichzeitig damit wurden auch eine Vielzahl von Mess-Systemen auf den Markt gebracht, die es erlauben, mit relativ einfachen Mitteln und relativ wenig technisch/physikalischen Grundkenntnissen über Wellenausbreitungsphänomene Messungen durchzuführen. Vor allem die in jüngster Zeit eingeführten modernen digitalen Funktechnologien bedürfen aber relativ breiter Fachkenntnis, um mit den gegenwärtig verfügbaren Messmethoden quantitativ zuverlässige Aussagen über die mit diesen Technologien verbundenen Immissionen machen zu können.

Eine physikalisch sinnvolle und haltbare Bewertung einer Expositionssituation besteht grundsätzlich aus zwei Arbeitsschritten, nämlich der Immissionsmessung und der (normgerechten) Immissionsbewertung. Dabei darf nicht außer Acht gelassen werden, dass die Möglichkeit einer normgerechten Bewertung der Immission oft bereits Mindestanforderungen an die Immissionsmessung stellt. Beispielsweise sind die Referenzwerte für die elektrische bzw. magnetische Feldstärke in den meisten gegenwärtig anerkannten Sicherheitsnormen als über die Körperdimensionen räumlich gemittelte¹¹ und zeitlich über 6 Minuten gemittelte Werte definiert.

In der strahlenschutztechnischen Praxis erfordern diese Methoden jedoch teilweise sehr großen zeitlichen und messgerätetechnischen Aufwand, wodurch oftmals zu (sehr) vereinfachten Methoden gegriffen wird, die von ihrer Konzeption zu einer Überbewertung der Immissionen führen und dadurch als ‚Worst Case‘ Abschätzungen gerechtfertigt werden.

In Kapitel 2 des vorliegenden Berichts wurden bereits für die hier interessierenden Funktechnologien systematische Unsicherheiten bei der Immissionserfassung bei Verwendung unterschiedlicher Messmethoden bzw. Messparameter analysiert. Diese dort analysierten und teilweise auch quantifizierten Unsicherheiten wurden aber nur durch die Kombination der speziellen Eigenschaften der Immissionsgrößen mit den Eigenschaften der eingesetzten Messmittel (Messparameter) verursacht. Eine weitere, unter Umständen maßgebliche Unsicherheitsquelle für die praktische Immissionsmessung stellen zeitliche und räumliche Schwankungen der Immissionsgröße aufgrund sich ändernder Ausbreitungsverhältnisse im Feldraum dar. Bei realistischer Betrachtung kann damit die Gesamtunsicherheit von Immissionsmessungen bei ungünstig gewählten Messmitteln bzw. Messparametern mehrere Größenordnungen, meist im Sinne einer Immissions-Überbewertung, betragen.

Eine vereinfachte Immissionsbewertung für einzelne Feldquellen (Technologien) im Sinne einer ‚Worst Case‘-Abschätzung, wie gegenwärtig oft praktiziert, ist für viele gegenwärtige Expositionssituationen vertretbar, wenn sich das Ausmaß der tatsächlichen Gesamtexposition relativ weit unterhalb der Grenzwerte bewegt. Wobei als Gesamtexposition hier die Summenexposition über den gesamten Spektralbereich verstanden wird, die ja letztendlich durch die Sicherheitsnormen begrenzt wird (nicht

¹¹ wenn sichergestellt ist, dass auch lokal die Basisgrenzwerte eingehalten werden

nur Einzelbeiträge bestimmter Technologien). Problematisch könnte die Situation jedoch werden, wenn in (zukünftigen) Szenarien in denen mehrere (spektral) unterschiedliche Technologien als Strahlungsquellen wirken und für jede einzelne dieser Technologien eine ‚Worst Case‘ - Immissionsbewertung mit Überbewertungen in oben genanntem Ausmaß vorgenommen wird. Die Summe dieser Einzelbeiträge, welche es ja zu begrenzen gilt, könnte dann eventuell ein kritisches Ausmaß ergeben, obwohl die tatsächliche Exposition weit geringer ist. Ferner muss auch im Hinblick auf die immer wichtiger werdenden Themenkreise *Risikokommunikation* und *Risikowahrnehmung durch die Bevölkerung* die Frage gestellt werden, ob es sinnvoll bzw. vertretbar ist, nach oben genannter Vorgehensweise ermittelte ‚Worst Case‘ Messergebnisse zu veröffentlichen, ohne eine fundierte Angabe über die tatsächliche zu erwartenden Immissionen zu geben bzw. geben zu können.

Aufgrund dieser Überlegungen wird im folgenden Kapitel zunächst auf einige Aspekte unterschiedlicher Methoden von ‚Worst Case‘-Abschätzungen, speziell im Hinblick auf die hier interessierenden Funktechnologien eingegangen. In Kapitel 4.3 wird dann ein neu entwickeltes Konzept für die umfassende Analyse von tatsächlich zu erwartenden Immissionen unter Berücksichtigung der normgerechten Immissionsbewertung vorgestellt.

4.2 Worst Case Abschätzungen

Trotz des eindeutig anmutenden Begriffs ‚Worst Case‘ werden in Zusammenhang mit Immissionsbewertungen teilweise grundlegend unterschiedliche Verfahren berichtet.

4.2.1 Schwenkmethode

Diese Methode wird beispielsweise in [19] vorgeschlagen. Es wird dabei, während der Spektrumanalysator im MAXHOLD Modus aufzeichnet, die Messantenne (vom Messtechniker) im zu untersuchenden Raumbereich der Art bewegt, dass in möglichst allen Punkten des Untersuchungsraumes möglichst alle Polarisationsrichtungen erfasst werden. Ist die Schwenkgeschwindigkeit an die jeweilige Sweep Zeit des Spektrumanalysators angepasst, erhält man als Ergebnis **einen** Messwert, der als ‚Worst Case‘-Feldstärkeamplitude im untersuchten Feldbereich angesehen werden kann. Unter Miteinbeziehung der Ausführungen von Kapitel 2, und der Tatsache, dass die von praktisch allen Sicherheitsnormen geforderte räumliche und zeitliche Mittelung der Immissionen bei der Schwenkmethode völlig ignoriert wird, ist unmittelbar einsichtig, dass diese Methode unter normalen Umständen zu Überbewertungen der tatsächlichen Immissionen um mehrere Größenordnungen führen kann.

Der unbestreitbare Vorteil der Schwenkmethode ist die Einfachheit und Schnelligkeit.

4.2.2 Raumrastermethode

Wesentlich aufwendiger als die oben beschriebene Schwenkmethode ist die Messung der Immissionen an einem Raumpunktgitter im zu untersuchenden Feldraum. Zweckmäßigerweise ist dabei das Messgitter im Bereich häufiger Aufenthaltsorte von Personen (z.B. Arbeitsplatz) zu errichten. In jedem einzelnen Gitterpunkt sind dann die Emissionen zu bestimmen, wobei hier der Grad der Überbewertung je nach Art der Immissionsgröße und verwendeter Messmethode bzw. eingestellter Messparameter variabel ist. Ohne Verwendung der MAXHOLD-Funktion und unter Einsatz von

Channel Power bzw. *Band Power*-Funktionen kann hier der Grad der systematischen Überbewertung praktisch auf Null reduziert werden.

Wird in den einzelnen Messpunkten mittels MAXHOLD-Funktion gemessen, steigt der Grad der Überbewertung naturgemäß stark an, durch die Möglichkeit der (normativ geforderten) räumlichen Mittelung wird sie aber weniger ausgeprägt sein wie im Fall der Schwenkmethode.

Theoretisch besteht bei der Raumrastermethode, bei ungünstig gewähltem Raumraster auch die Möglichkeit einer Unterbewertung der Immission. Dies kann beispielsweise der Fall sein, wenn die einzelnen Messpunkte immer genau in den Minima ('Täler') einer kleinräumig inhomogenen Feldverteilung ('Stehwellengebirge') zu liegen kommen und das räumliche Auflösungsvermögen der Feldsonde bzw. Messantenne (entspricht üblicherweise etwa der Größe der Sonde bzw. der Antenne) besser ist, als die Distanz zwischen den 'Gipfeln' des 'Stehwellengebirges'. Zu große Distanz zwischen den einzelnen Rasterpunkten birgt ebenfalls die Gefahr von Unterbewertungen, da möglicherweise hohe 'Gipfel' zwischen den einzelnen Messpunkten liegen, und damit unberücksichtigt bleiben. Bei den Frequenzen der hier interessierenden Funkanwendungen (d.h. < 2,5 GHz) und üblichen räumlichen Auflösungen der verwendeten Feldsonden bzw. Antennen (> 8 cm) stellen Raumraster-Punktabstände im Bereich von 15-30 cm gute Kompromisse zwischen messtechnischem Aufwand und Vermeidung großer Unterbewertungen dar. Kleinere Raumrasterpunkt-Abstände verringern aus statistischen Gründen die Wahrscheinlichkeit für Unterbewertungen.

Beiden oben genannten ‚Worst Case‘-Messmethoden, wie auch allen anderen ‚Kurzzeit‘-Immissionsmessungen ist gemeinsam, dass räumliche und zeitliche Schwankungen zufolge sich ändernder Ausbreitungsbedingungen nicht zufriedenstellend erfasst werden, und die Messergebnisse daher immer nur eine Momentaufnahme der zum Zeitpunkt der Messungen vorherrschenden Situation darstellen. Die Größenordnung solcher Schwankungsbereiche kann im Allgemeinen nur durch Langzeitmessungen bzw. numerische Berechnungen erfasst werden. Im Rahmen von Indoor-Szenarien, wie sie im Rahmen des vorliegenden Vorhabens von Interesse sind, könnte dieser Schwankungsbereich auch schon während ‚Kurzzeit‘-Messungen nach der Raumrastermethode näherungsweise erfasst werden. Da bei üblichen Indoor-Verhältnissen (d.h., alle für den Immissionspunkt relevanten Feldquellen befinden sich in einem räumlich relativ eng eingegrenzten, kontrollierbaren Bereich) die ausbreitungsbedingten Feldschwankungen vor allem durch die Bewegung von Personen und Objekten in überschaubarer bzw. kontrollierbarer Entfernung vom Immissionspunkt hervorgerufen werden, könnten diese Personen- bzw. Objektbewegungen während der Messung provoziert werden. D.h., nach Aufstellung der Messantenne in einem Messgitterpunkt können alle üblichen bzw. denkbaren Personen- und Objektbewegungen vollzogen werden und die entsprechende Schwankung des Messwertes durch Beobachtung des Anzeigewertes registriert werden.

4.3 Umfassende Analyse der tatsächlichen Immissionen

Im vorangegangenen Abschnitt wurde unter Miteinbeziehung der Ergebnissen aus Kapitel 2 gezeigt, dass die heute meistens verwendeten ‚Worst Case‘-Verfahren bei der frequenzselektiven Immissionsbewertung in den Feldern von DECT, Bluetooth, und WLAN-Geräten zu systematischen Überbewertungen im Ausmaß mehrerer Größenordnungen führen können. Über das Ausmaß der tatsächlichen, normgemäß

bewerteten Immissionen geben diese Verfahren keine Auskunft. Andererseits steht dazu in der Praxis oftmals keine mit vertretbarem Aufwand realisierbare Alternative zur Verfügung.

Um auf der Grundlage relativ einfacher Messungen dennoch Aussagen über die zu erwartende Gesamtimmission treffen zu können, wird im Folgenden ein Modell für ein numerisches Bewertungsverfahren vorgestellt, das auf Basis von bekannten Systemeigenschaften der Feldquellen und unter Zuhilfenahme von einfachen statistischen Methoden das zu erwartende Ausmaß der Gesamtimmission abschätzen lässt.

4.3.1 Numerisches Immissionsbewertungsmodell (NIBM)

Dieses Modell wurde speziell für die gegenständliche Problematik mehrerer gleichzeitig betriebener Indoor-Funktechnologien erarbeitet. Wie bereits an mehreren Stellen angemerkt, können einfache ‚Worst Case‘-Messungen (MAXHOLD-Modus des Spektrumanalysators) bei derartigen Immissionen vor allem aufgrund des Zeitmultiplex-Zugriffsverfahrens auf sehr hohe Überbewertungen der tatsächlichen Immissionen führen. Unter Zuhilfenahme bekannter Systemeigenschaften, bzw. empirisch gefundener Systemdaten (z.B. typisches Datenverkehrsaufkommen in einem Netzwerk), erlaubt dieses Modell eine wesentlich realistischere Bewertung der Immissionen.

Dem Modell liegt das allgemeine, in Abbildung 4.1 schematisch dargestellte Szenario zugrunde.

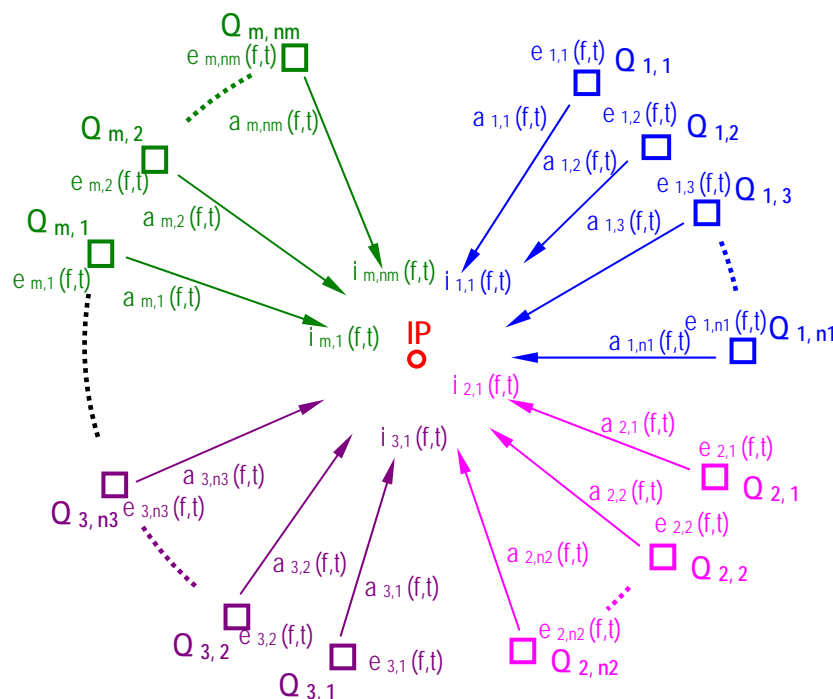


Abbildung 4.1: Allgemeines Schema des zugrundeliegenden Immissionsmodells.

Es wird dabei davon ausgegangen, dass m unterschiedliche Systeme (Technologien mit unterschiedlichen Sendefrequenzen) mit jeweils mehreren Feldquellen $Q_{i,j}$ (Anzahl der Feldquellen des i -ten Systems = n_i) relevante Immissionsbeiträge am interessierenden Immissionspunkt IP hervorrufen. IP könnte z.B. eine Messposition in einem räumlichen Messpunktgitter sein. Jeder Quelle $Q_{i,j}$ kann eine zeit- und

frequenzabhängige Emission $e_{i,j}(f,t)$ zugeordnet werden. Die Zeitabhängigkeit der Emissionsfunktionen spiegelt z.B. die burstartige HF-Abstrahlung wider, die Frequenzabhängigkeit kann unterschiedliche Funkkanäle der Emission beschreiben. Wesentlich dabei ist, dass innerhalb eines Systems diese Emissionsfunktionen nicht zeitlich unabhängig voneinander sind, sondern durch das implementierte Zugriffsverfahren (Zeitmultiplex) streng korreliert sind. Ein bestimmter Anteil der von jeder Quelle $Q_{i,j}$ ausgehenden Emission $e_{i,j}(f,t)$ trifft als Immissionsanteil $i_{i,j}(f,t)$ am Immissionsort IP ein, wobei der Zusammenhang zwischen den Emissionsfunktionen $e_{i,j}(f,t)$ und den Immissionsanteilen $i_{i,j}(f,t)$ ganz allgemein über eine Ausbreitungsfunktion $a_{i,j}(f,t)$ beschrieben wird, wobei gilt $i_{i,j}(f,t) = a_{i,j}(f,t) \cdot e_{i,j}(f,t)$. Im einfachsten Fall stabiler Ausbreitungsverhältnisse ($a_{i,j}(f,t) = a_{i,j}(f)$) beschreiben die Funktionen $a_{i,j}(f)$ einfach den Zusammenhang zwischen der von der Quelle abgestrahlten Leistung und dem dadurch an IP verursachten Immissionsanteil. Wird jedoch die Zeitabhängigkeit der $a_{i,j}(f,t)$ beibehalten, so ließen sich dadurch auch Einflüsse sich ändernder Ausbreitungsverhältnisse modellieren. Die am Immissionsort IP resultierende Gesamtmission lässt sich jedenfalls ganz allgemein schreiben als

$$i_{res}(t) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} \frac{i_{i,j}(f,t)}{GW_{i,j}(f)} \quad (4.1)$$

Die Immissionsanteile $i_{i,j}(f,t)$ sind hier als Leistungsgrößen (z.B. Strahlungsleistungsdichten S) aufzufassen. $GW(f)$ ist der jeweils zugehörige Grenzwert (Referenzwert). Die normgemäße Beurteilung verlangt nun die Überprüfung, ob jeder beliebige 6-Minuten-Mittelwert der resultierenden Immission $i_{res}(t)$ kleiner oder gleich 1 ist:

$$\bar{i}_{res}(6 \text{ min}) \leq 1 \quad (4.2)$$

Im Zuge einer praktischen 'Worst Case'-Abschätzung wie in Kapitel 4.2 beschrieben, würden die maximalen Immissionsbeiträge der m Systeme bestimmt und zur (zeitunabhängigen) Gesamtmission

$$I_{ges} = \sum_{i=1}^m \max_{j=1..n} \{ i_{i,j}(f,t) \} / GW_{i,j}(f) \quad (4.3)$$

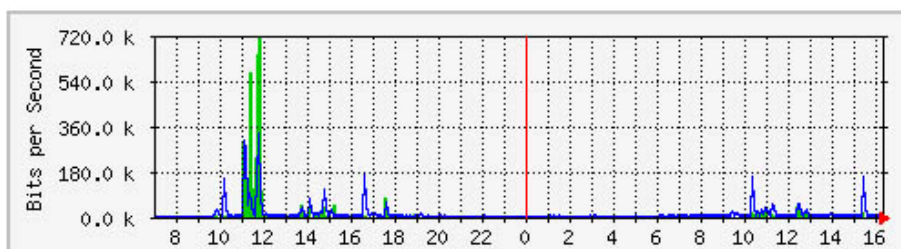
summiert und diese Summe mit dem Wert 1 verglichen werden.

Auf Basis der Übertragungs- bzw. Zugriffsverfahren der hier zur Diskussion stehenden drahtlosen Übermittlungsverfahren (WLAN, DECT, Bluetooth) kann aber geschlossen werden, dass die Zeitmittelwerte der Funktionen $i_{i,j}(f,t)$ üblicherweise nur einen sehr kleinen Bruchteil ihrer maximalen Amplitude ausmachen. Dies begründet in Zusammenhang mit Gleichung (4.3), die Möglichkeit einer Immissions-Überbewertung um eventuell sogar mehrere Größenordnungen.

Die Angabe eines solchermaßen erfassten 'Worst-Case'-Immissionswertes kann zwar im Sinne des Strahlenschutzes als ausreichend angesehen werden, ist aber aus physikalischer Sicht und eventuell auch aus der Sicht der *Risikokommunikation* und *Risikowahrnehmung durch die Bevölkerung* unbefriedigend. Neben der Angabe des 'Worst Case'-Wertes wäre jedenfalls auch eine begründbare Aussage hinsichtlich der tatsächlich durchschnittlich zu erwartenden Immissionen wünschenswert.

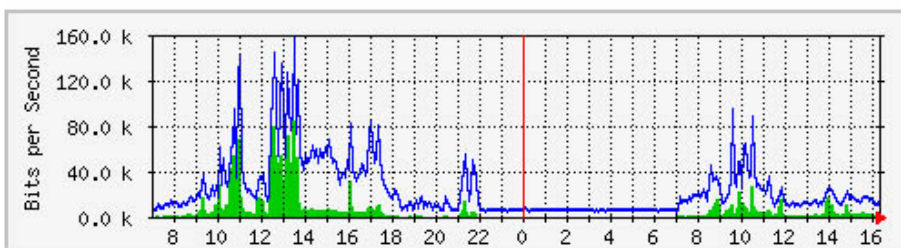
Grundsätzlich besteht die Möglichkeit der Ableitung solcher Aussagen auf Basis des oben vorgestellten Immissionsmodells, auf Basis statistischer Daten über die zeitliche Veränderung des Emissionsverhaltens der Quellen (Funktionen $e_{i,j}(f,t)$) und auf Basis einfach erfassbarer ('Worst Case') Messdaten der wichtigsten Immissionsbeiträge $i_{i,j}(f,t)$. Die statistischen Daten bezüglich des zeitlichen Emissionsverhaltens der Quellen können bei in Betrieb befindlichen Anlagen (z.B. WLAN-Installationen) beispielsweise durch Netzwerkmonitor-Software erfasst werden. Abbildung 4.2 zeigt als Beispiel den typischen Datenverkehr in einem Firmennetzwerk an einem Arbeitsplatzcomputer und einem Server während eines 33 Stunden-Zeitintervalls, aufgezeichnet mit der Software *MRTG (Multi Router Traffic Grapher)*. Sind solche Daten nicht verfügbar, können auch einfache generische statistische Modelle verwendet werden, um eine Abschätzung der tatsächlich zu erwartenden Immissionen vornehmen zu können, bzw. eine konkrete Vorstellung über das Ausmaß der Überbewertung bei 'Worst Case'-Abschätzungen zu erhalten.

'Daily' Graph (5 Minute Average)



Max In: 716.0 kb/s (7.2%) Average In: 11.3 kb/s (0.1%) Current In: 1488.0 b/s (0.0%)
 Max Out: 336.8 kb/s (3.4%) Average Out: 16.1 kb/s (0.2%) Current Out: 9304.0 b/s (0.1%)

'Daily' Graph (5 Minute Average)



Max In: 85.4 kb/s (0.1%) Average In: 6400.0 b/s (0.0%) Current In: 3192.0 b/s (0.0%)
 Max Out: 158.5 kb/s (0.2%) Average Out: 24.6 kb/s (0.0%) Current Out: 14.4 kb/s (0.0%)

Abbildung 4.2: Beispiele für Netzwerk-Datenverkehrsaufzeichnungen zur Gewinnung statistischer Daten für eine umfassende Immissionsbewertung in WLAN-Systemen
 oben: Arbeitsplatzcomputer, unten: Server

4.3.1.1 Realisierung in MATLAB

Zur konkreten Abschätzung der Überbewertung bei 'Worst Case'–Messungen, bzw. um eine Aussage über die tatsächlich zu erwartenden Immissionen machen zu können, wurde in der Software-Entwicklungsumgebung MATLAB das im vorangegangenen Abschnitt vorgestellte Modell implementiert. Die notwendigen statistischen Daten über den Netzdatenverkehr (für WLAN und DECT) können dabei aus spezifizierbaren Verteilungsfunktionen pseudozufällig generiert werden. Abbildung 4.3 zeigt schematisch die Struktur des Programms.

Zur Konfiguration des Programms sind die Anzahl der betrachteten Systeme und die Anzahl der relevanten Clients bzw. Mobilstationen in jedem der Systeme zu definieren. Weiters können die zur Generierung des Datenverkehrs verwendeten statistischen Modellparameter spezifiziert werden. Parameter wie Zugriffs-Anzahl, Zugriffsstartzeit, Datenrate, Datenmenge werden auf Basis von Normalverteilungen (spezifiziert durch Mittelwert und Standardabweichung) modelliert. Der jeweils verwendete Frequenzkanal bei DECT wird mittels einer diskreten Gleichverteilung (10 mögliche Kanäle) modelliert. Zusätzlich sind die maximalen Immissionsbeiträge von jedem System am interessierenden Immissionsort (z.B. durch 'Worst Case'-Messung oder Simulation ermittelt) anzugeben. Werden von einem System mehrere Feldquellen als relevant erachtet, so sind für diese Feldquellen das jeweilige Verhältnis (in dB) zur dominanten Feldquelle (welche den maximalen Immissionsbeitrag verursacht) zu spezifizieren.

Die gegenwärtige Version der Software ist derzeit noch auf die generische Modellierung des Datenverkehrs in den betrachteten Netzwerken beschränkt. Eine Datenschnittstelle zum Import von realen Verkehrsszenarien stellt allerdings kein technisches Problem dar, sofern diese Daten Text basiert in entsprechender Zeitaufösung vorliegen. Übliche Software-Werkzeuge für das Netzwerkmonitoring (siehe z.B. Abbildung 4.2) bieten diese Möglichkeit prinzipiell an, wobei die zeitliche Auflösung zumeist auf 5-Minuten Mittelwerte der Datenrate beschränkt ist. Diese 5-Minutenmittelwerte könnten in einem einfachen Ansatz in erster Näherung direkt in die Software übernommen werden, um entsprechenden Datenverkehr zu generieren. Dies kann als konservativer Ansatz bei der Immissionsbewertung gesehen werden, da die normgerechte Bewertung auf Basis eines 6-Minuten-Mittelwertes zu erfolgen hat.

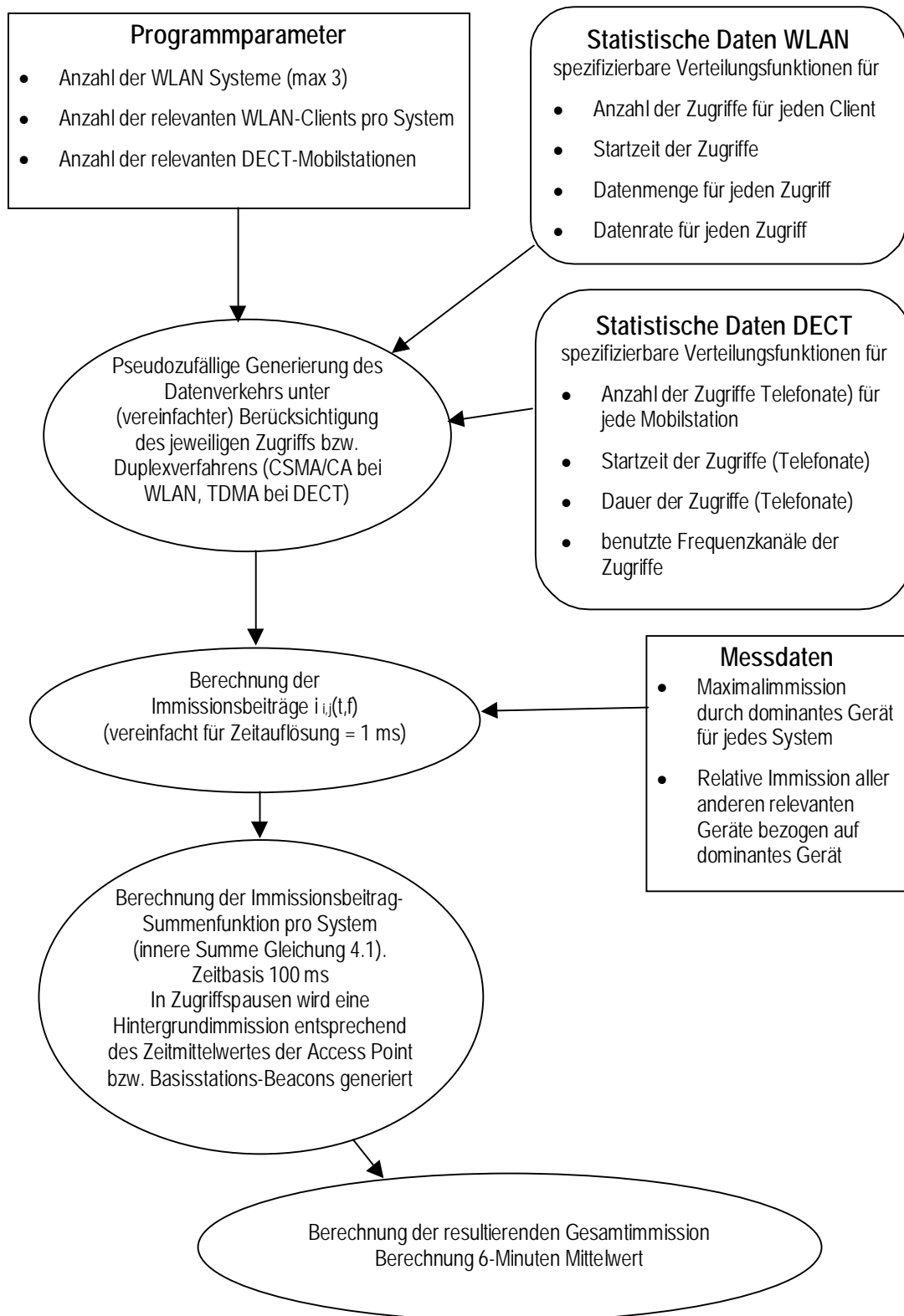


Abbildung 4.3: Schematische Programmstruktur zur Berechnung der tatsächlich zu erwartenden WLAN-bzw. DECT-Immissionen auf Basis einfach erfassbarer Messdaten und statistischer Modelle für den Datenverkehr

Als Beispiel soll zunächst folgendes einfache Szenario angenommen werden: Eine Abteilung einer Firma ist über WLAN IEEE 802.11b vernetzt. Insgesamt werden 10 Clients von einem Access Point versorgt. Betrachtet wird als Beispiel ein zweistündiges Zeitintervall (z.B. 7 Uhr morgens bis 9 Uhr morgens). Am betrachteten Immissionspunkt nahe Client 1 wurde unter 'Worst Case'-Bedingungen ein maximaler Leistungsflussdichtewert 20 mW/m^2 gemessen (während Client 1 Daten sendete). Der maximale Immissionsbeitrag des Access Points am betrachteten Immissionsort liegt 10 dB unterhalb des von Client 1 verursachten Immissionsbeitrages. Die maximalen Immissionsbeiträge aller anderen Clients liegen zwischen 3 dB und 30 dB unterhalb, was einer eher extremen Annahme entspricht (räumlich sehr enge Konzentration der einzelnen Geräte). Tabelle 4.1 fasst die Details der Modellannahmen zusammen.

WLAN System: 1 Access Point, 10 Clients					
maximale Immission (Client 1): 20 mW/m^2					
	rel. Immission	Anzahl Zugriffe	Startzeit Zugriffe	gesendete Datenmengen während der Zugriffe	Datenrate bei Zugriffen
Client 2	-10 dB	pseudozufällig normalverteilt Mittelwert: 30 Standardabw.: 20	pseudozufällig normalverteilt Mittelwert: 8:00 Standardabw.: 30min	pseudozufällig normalverteilt Mittelwert: 2MB Standardabw.: 500k	pseudozufällig normalverteilt Mittelwert: 2MBps Standardabw.: 1MBps max.: 5 MBps min.: 0.5 MBps
Client 3	-30 dB				
Client 4	-5 dB				
Client 5	-30 dB				
Client 6	-20 dB				
Client 7	-25 dB				
Client 8	-15 dB				
Client 9	-20 dB				
Client 10	-20 dB				
Access Point	-3 dB				

Tabelle 4.1: Zusammenfassung der Modellannahmen für ein WLAN-Szenario

Die 'Worst Case' Beurteilung dieser Situation würde von einem Immissionswert von 20 mW/m^2 ausgehen und somit, bei Zugrundelegung der Grenzwerte von [16], 0,2 % des Grenzwertes ergeben.

Abbildung 4.4 zeigt das Ergebnis der Berechnung nach dem vorgestellten Immissionsbewertungsmodell. Das Berechnungsergebnis zeigt, dass der tatsächliche, normgemäß über beliebige 6 Minuten Intervalle gemittelte, Immissionswert am betrachteten Immissionsort bei maximal 0,016 % des Grenzwertes liegt, d.h., bei weniger als einem Zehntel der Wertes aus der 'Worst-Case'-Abschätzung.

Eine Berechnung unter den gleichen Modellannahmen, nur unter Weglassung aller Client-Beiträge, deren relative Immission 20 dB oder mehr unterhalb des dominanten Beitrages liegt, führt auf das gleiche Ergebnis (Abweichungen < 1%). D.h., in der Praxis genügt es üblicherweise nur einige wenige Feldquellen zu berücksichtigen. Andererseits sollte sichergestellt sein, dass die potentiell stärkste Feldquelle (z.B. nächstgelegenes Gerät) bei der 'Worst-Case'-Abschätzung erfasst wurde (d.h. während der Messungen aktiv war).

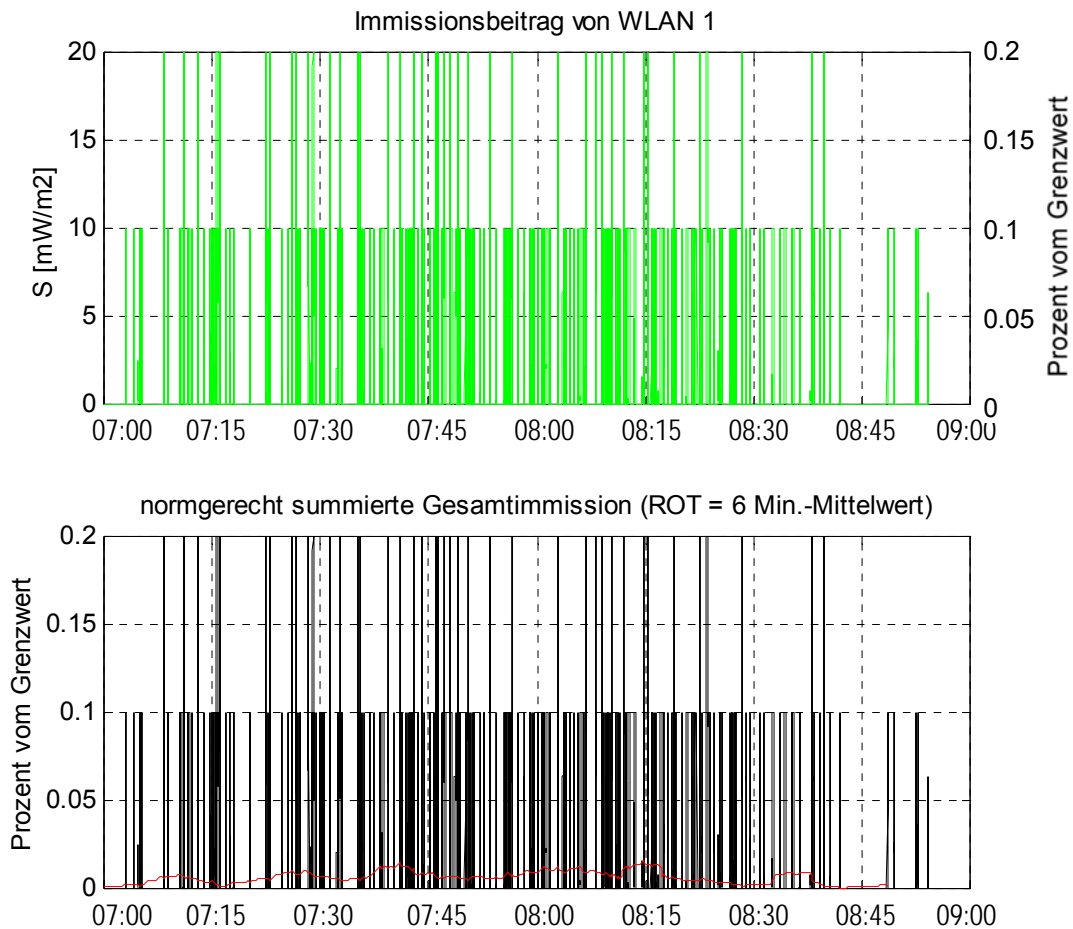


Abbildung 4.4: Ergebnis der Berechnung des Modells gemäß Tabelle 4.1

In Erweiterung des oben modellierten Szenarios sollen jetzt zusätzlich DECT-Immissionen vorhanden sein. Jeder der 10 Arbeitsplätze sei mit einer DECT-Mobilstation ausgerüstet, die über eine Basisstation versorgt werden. Die Häufigkeit, Dauer der Gesprächsverbindungen, sowie die jeweils benutzten Frequenzkanäle werden dazu wieder über einfache statistische Verteilungsfunktionen pseudozufällig errechnet. Tabelle 4.2 fasst die Modellparameter dieses Szenarios zusammen, wobei zwei verschiedene Immissionspunkte betrachtet werden.

Der Immissionspunkt IP1 ist dabei nahe der Basisstation angenommen, d.h., die maximale Immissionsbeitrags-Amplitude im Immissionspunkt (mit 'Worst Case'-Messung erfasst) wird von der Basisstation hervorgerufen und sei 20 mW/m^2 . Die Beiträge der Mobilstationen sind entsprechend zwischen 3 dB und 30 dB abgeschwächt.

Der Immissionspunkt IP2 wird etwas weiter entfernt von der Basisstation angenommen, sodass der dominante Immissionsbeitrag dort von der Mobilstation 1 hervorgerufen wird (wieder mit 20 mW/m^2 angenommen). Die Maximalamplitude des Basisstationsbeitrags in IP2 liegt einen Faktor 10 unterhalb jener der Mobilstation 1. Alle anderen Mobilstationen liefern maximale Beiträge zwischen 5 dB und 30 dB unterhalb des dominanten Beitrages von Mobilstation 1. Die WLAN-Immissionsbeiträge werden für beide Immissionspunkte identisch angenommen.

WLAN System: 1 Access Point, 10 Clients					
maximale Immission (Client 1): 20 mW/m ²					
	rel. Immission IP1 u. IP2	Anzahl Zugriffe	Startzeit Zugriffe	gesendete Datenmengen während der Zugriffe	Datenrate bei Zugriffen
Client 2	-10 dB	pseudozufällig normalverteilt Mittelwert: 30 Standardabw.: 20	pseudozufällig normalverteilt Mittelwert: 8:00 Standardabw.: 30min	pseudozufällig normalverteilt Mittelwert: 2MB Standardabw.: 500k	pseudozufällig normalverteilt Mittelwert: 2MBps Standardabw.: 1MBps max.: 5 MBps min.: 0.5 MBps
Client 3	-30 dB				
Client 4	-5 dB				
Client 5	-30 dB				
Client 6	-20 dB				
Client 7	-25 dB				
Client 8	-15 dB				
Client 9	-20 dB				
Client 10	-20 dB				
Access Point	-3 dB				

DECT-System: 1 Basisstation, 10 Mobilstationen						
	rel. Immission IP1	rel. Immission IP2	Anzahl Zugriffe (Telefonate)	Startzeit Zugriffe (Telefonate)	Dauer der Zugriffe (Telefonate)	benutzte Frequenzen (Kanäle)
Mobilst. 1	-3 dB	0 dB (20 mW/m ²)	pseudozufällig normalverteilt Mittelwert: 10 Stabw.: 5	pseudozufällig normalverteilt Mittelwert: 8:00 Stabw.: 30min	pseudozufällig normalverteilt Mittelwert: 5 min. Stabw.: 2 min.	diskret gleichverteilt zwischen 1 und 10
Mobilst. 2	-10 dB	-10 dB				
Mobilst. 3	-15 dB	-3 dB				
Mobilst. 4	-20 dB	-20 dB				
Mobilst. 5	-30 dB	-10 dB				
Mobilst. 6	-30 dB	-5 dB				
Mobilst. 7	-30 dB	-30 dB				
Mobilst. 8	-30 dB	-30 dB				
Mobilst. 9	-30 dB	-30 dB				
Mobilst. 10	-30 dB	-30 dB				
Basisstation	0 dB (20 mW/m ²)	-10 dB	aus Mobilstation-Datenverkehr errechnet			

Tabelle 4.2: Zusammenfassung der Modellannahmen für ein kombiniertes WLAN- und DECT-Szenario

Abbildung 4.5 zeigt das Berechnungsergebnis für Immissionspunkt IP1 und Abbildung 4.6 jenes im Immissionspunkt IP2.

Im Immissionspunkt IP1 nahe der DECT-Basisstation wird im hier angenommenen Szenario die resultierende Gesamtmission durch die DECT-Basisstation dominiert. Der errechnete maximale 6-Minuten-Mittelwert entspricht 0.39 % des Grenzwertes. Unter ausschließlicher Verwendung der 'Worst Case'-Messdaten, ohne jeden Anhaltspunkt über die tatsächliche Netzauslastung, müsste folgende resultierende Gesamtmission angegeben werden (alle DECT-Frequenzen verwendet):

$$I_{ges} = \frac{20\text{mW/m}^2}{10000\text{mW/m}^2} + 10 * \frac{20\text{mW/m}^2}{9450\text{mW/m}^2} = 0,041 = 4,1\% \quad (4.4)$$

wobei in Gleichung (4.4) der Einfachheit halber angenommen wurde, dass alle 10 DECT-Frequenzkanäle mit gleicher Amplitude am Spektrumanalysator aufgezeichnet wurden. Physikalisch bedeutet diese Annahme, dass die dominante Feldquelle (Basisstation) während der 'Worst Case' Messung alle 10 DECT-Frequenzkanäle verwendet hat und dass (innerhalb des DECT-Frequenzbereichs) keine relevante Frequenzabhängigkeit der Ausbreitungsbedingungen besteht. Weiters wurde in Gleichung (4.4) aus Gründen der Übersichtlichkeit mit einem mittleren Grenzwert im DECT-Bereich von 9450 mW/m^2 gerechnet. Da im DECT-Frequenzbereich (1880 MHz – 1890 MHz) der Grenzwert nach [16] frequenzabhängig ist, müsste streng genommen der Beitrag jedes Frequenzkanals mit seinem spezifischen Grenzwert ins Verhältnis gesetzt und die sich ergebenden Quotienten addiert werden. D.h., der zweite Term in Gleichung (4.4) würde aus 10 Einzelsummanden bestehen. Aufgrund des sehr schmalen Frequenzbereiches von DECT führt die getroffene Vereinfachung jedoch zu keiner wesentlichen Ungenauigkeit.

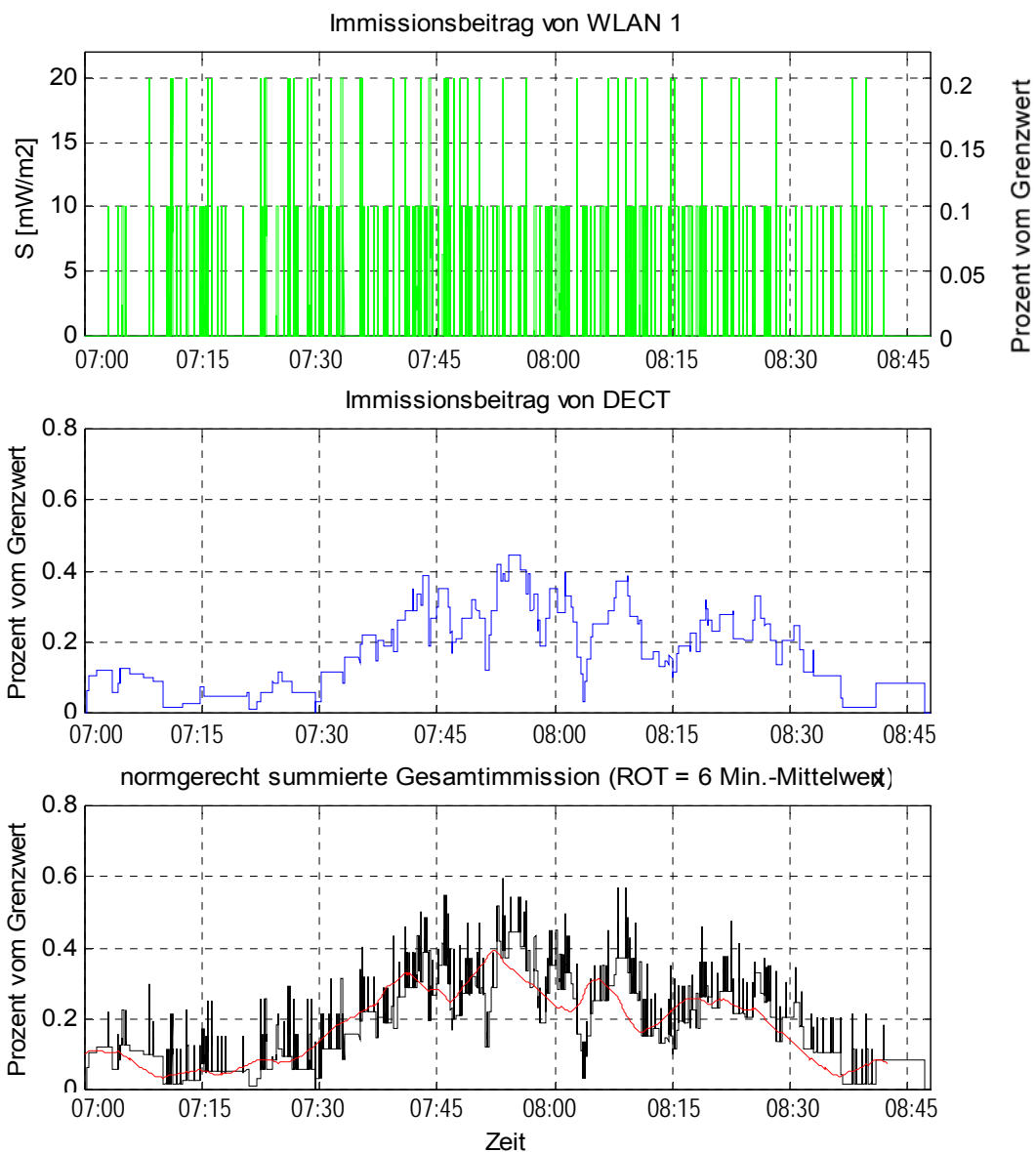


Abbildung 4.5: Ergebnis der Berechnung in IP1 des kombinierten WLAN-DECT-Szenarios gemäß Tabelle 4.2

Der Vergleich des Ergebnisses von Gleichung (4.4) mit dem Berechnungsergebnis aus dem numerischen Immissionsbewertungsmodell für IP1 zeigt eine Überschätzung der Immissionen durch die 'Worst Case'-Messmethode um ca. einen Faktor 10.

In IP2 (Abbildung 4.6) wird die resultierende Gesamtimmission durch die Mobilstation 1 dominiert (vgl. Tabelle 4.2). Der errechnete maximale 6-Minuten-Mittelwert entspricht 0.06 % des Grenzwertes. Unter ausschließlicher Verwendung der 'Worst Case'-Messdaten würde sich unter den getroffenen Annahmen die gleiche resultierende Immission wie in IP1 ergeben, d.h., 4,1 % des Grenzwertes (siehe Gleichung 4.4). D.h., das Ausmaß der Überbewertung durch die 'Worst Case'-Methode liegt hier bei einem Faktor von nahezu 70.

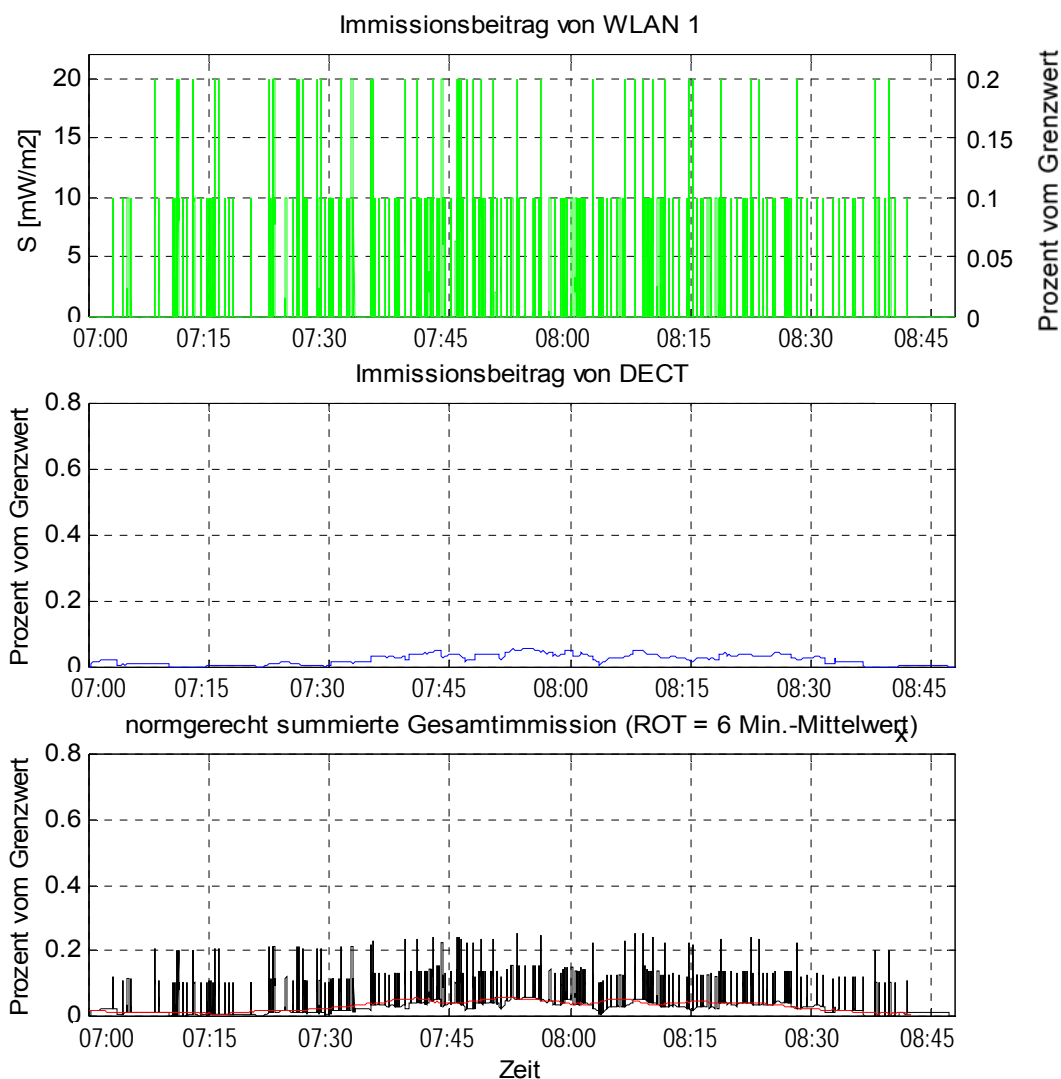


Abbildung 4.6: Ergebnis der Berechnung in IP2 des kombinierten WLAN-DECT-Szenarios gemäß Tabelle 4.2

5 SCHLUSSFOLGERUNGEN FÜR DEN WEITEREN PROJEKTABLAUF

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die Eigenschaften, Vorzüge und Nachteile der einzelnen gegenwärtig verfügbaren Verfahren zur Expositionsbeurteilung diskutiert und beschrieben. Tabelle 5.1 fasst die wichtigsten Kenndaten und Einsatzmöglichkeiten der einzelnen Verfahren noch einmal überblicksartig zusammen. Für nähere Details wird auf die entsprechenden Kapitel im voranstehenden Text verwiesen.

		Vorteile	Nachteile	Einsatzmöglichkeiten/ Bemerkungen
Immissionsbewertung nach den Referenzwerten	Breitbandmessungen (Feldsonden)	-einfach -geringe Gerätekosten	-nur einsetzbar, wenn nur eine dominante Frequenz vorliegt und alle anderen Immissionsbeiträge dagegen vernachlässigbar sind -bei nichtkontinuierlichen Immissionsgrößen schwankende Anzeigewerte	-verwendbar zur Bestimmung der Momentanmission in einfachen Szenarien (Einschränkungen siehe Spalte ‚Nachteile‘).
	Frequenzselektive Messung (Spektrumanalyse)	-auch in komplexen Szenarien mit vielen unterschiedlichen Immissionsbeiträgen einsetzbar -Immissionsgrößen den Quellen (Systemen) zuordenbar	-aufwendig -teure Geräte	-erreichbare Genauigkeit hängt stark von den Eigenschaften der Immissionsgröße und den messtechnischen Möglichkeiten des Spektrumanalysators ab (siehe Kapitel 2.2)
	Numerische Berechnung (optische Verfahren)	-Detailanalysen der Auswirkungen von Veränderungen der Parameter des Expositionsszenarios flexibel möglich	-Modellerstellung unter Umständen aufwendig -zumindest stichprobenartige messtechnische Verifizierung empfehlenswert	-für umfassende Immissionsbewertung im Hinblick auf die tatsächlich zu erwartenden Immissionen (Mittelwerte, Maximalwerte) am besten geeignet
Immissionsbewertung nach den Basisgrenzwerten (SAR)	FDTD-Simulation	-detaillierte Analyse der Absorptions- verhältnisse möglich	-Quellenmodellierung unter Umständen aufwendig	-anatomisch detaillierte Körpermodelle müssen vorhanden sein
	SAR-Messung in homogenen Phantomen	- realer Geräte messbar	-nur Schätzwert für tatsächliche Exposition ermittelbar	-Die zuverlässige Erfassung des Worst Case erfordert das Vorhandensein eines entsprechend verifizierten Modells (Phantom, gewebesimulierende Flüssigkeit)

Tabelle 5.1: Überblicksartig Zusammenfassung der wichtigsten Vorteile, Nachteile und Einsatzmöglichkeiten, der einzelnen Verfahren zur Expositionsbeurteilung

Im abschließenden Arbeitspaket AP3 sollen Immissionsmessungen im Bereich bestehender Installationen bzw. in der Nähe häufig benutzter Geräte durchgeführt werden. Bei Messungen zur Beurteilung nach den Referenzwerten sollen dabei die

unterschiedlichen Beurteilungsverfahren gegenübergestellt werden. D.h., in jedem messtechnisch untersuchten Szenario sollen Messungen mit Breitbandfeldsonden, frequenzselektiven Messmethoden und numerische Verfahren eingesetzt und die damit erhaltenen Ergebnisse verglichen werden. Die Berücksichtigung von Personen im Feldraum wird bei der numerischen Feldberechnung auf Basis einfacher homogener Modelle erfolgen.

SAR-Messungen in homogenen Phantomen werden Berechnungsergebnisse unter Verwendung heterogener Körpermodelle gegenübergestellt.

Konkret sind folgende Messungen geplant, wobei jeweils sowohl 'Worst Case'-Messmethoden eingesetzt, als auch die tatsächlichen Immissionen erfasst werden sollen:

- Ein WLAN-Szenario (z.B. Büroszenario oder Universitätscampus)
- Ein DECT-Szenario (z.B. Bürobereich mit DECT-Nebenstellenanlage)
- Immissionsmessungen im Nahbereich von Babyphones und Sendestationen drahtloser Kopfhörer
- SAR-Messungen mit WLAN-bzw. Bluetooth-PCMCIA Karte oder USB-Stick an einem Notebook (Annahme des Notebooks auf den Oberschenkeln)

Weiters ist die numerische Berechnung von Immissionen der hier interessierenden Technologien in folgenden (Extrem-) Szenarien geplant:

- *Call Center*-Szenario: Arbeitsplätze mit WLAN vernetzt, jeder Mitarbeiter arbeitet mit DECT-Headset
- *Haushalts*-Szenario: Schreibtisch im Arbeitszimmer mit DECT-Mobiltelefon, WLAN für Internetzugang, Bluetooth-Verbindung zum Drucker, drahtloser Kopfhörer und Webcam; Babyphone im Nebenzimmer (Kinderzimmer) bei Annahme guter HF-Transparenz der Trennwand (z.B. Trockenbau). Besonderes Interesse gilt den resultierenden Immissionen am Schlafplatz des Kindes.

6 LITERATUR

- [1] Schmid G, Preiner P, Überbacher R, Neubauer G; Bestimmung der Exposition bei Verwendung kabelloser Übermittlungsverfahren in Haushalt und Büro. Zwischenbericht AP1: Bestandsaufnahme, Mai 2004, http://www.emf-forschungsprogramm.de/forschung/dosimetrie/dosimetrie_verg/dosi_verg_030_lstudie.pdf
- [2] Rauscher C., Janssen V., Minihold R., „Grundlagen der Spektrumanalyse“, Rohde & Schwarz GmbH & Co KK, 1. Auflage, 2000
- [3] Ndoumbè Mbonjo Mbonjo H, Streckert J, Bitz A, Hansen V, Glasmachers A, Gencol S, Rozic D. 2004. A generic UMTS test signal for RF bio-electromagnetic studies. Bioelectromagnetics 25:415-25.
- [4] Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post: Reg TP MV 09/EMF/3 Messvorschrift für bundesweite EMVU-Messreihen der vorhandenen Umgebungsfeldstärken; http://www.regtp.de/imperia/md/content/tech_reg_t/emvu/Messvorschrift.pdf
- [5] Datenblatt Add3D, ARC Seibersdorf research GmbH, <http://www.elsinco.com/pdf/DS-FieldNoseSystem.pdf>
- [6] Datenblatt Narda SRM 3000, Narda Industries, Inc., http://www.narda-sts.de/pdf/datenblatt/d_SRM-3000.pdf
- [7] Datenblatt TS-EMF, Rohde und Schwarz GmbH & Co. KG, [http://www.rohde-schwarz.co.uk/www/datsheet.nsf/file/TS-EMF_11_web.pdf/\\$file/TS-EMF_11_web.pdf](http://www.rohde-schwarz.co.uk/www/datsheet.nsf/file/TS-EMF_11_web.pdf/$file/TS-EMF_11_web.pdf)
- [8] Datenblatt Comobase <http://www.antennessa.com/mods/en/rf/fm/data/1087831563471/voir>
- [9] EN 50371, Fachgrundnorm zum Nachweis der Übereinstimmung von elektronischen und elektrischen Geräten kleiner Leistung mit den Basisgrenzwerten für die Sicherheit von Personen in elektromagnetischen Feldern (10 MHz bis 300 GHz) – Allgemeine Öffentlichkeit, CENELEC, Brüssel, März 2002
- [10] EN 50361: Grundnorm zur Messung der Spezifischen Absorptionsrate (SAR) in Bezug auf die Sicherheit von Personen in elektromagnetischen Feldern von Mobiltelefonen (300 MHz bis 3 GHz), CENELEC, Brüssel, Juli 2001
- [11] EN50392: Fachgrundnorm zur Demonstration der Konformität elektronischer und elektrischer Geräte mit den Basisgrenzwerten für die Exposition von Personen gegenüber elektromagnetischen Feldern (0 Hz bis 300 GHz), CENELEC, Brüssel, April 2003
- [12] EN 50383: Grundnorm für die Berechnung und Messung der elektromagnetischen Felder und SAR in Bezug auf die Sicherheit von Personen in elektromagnetischen Feldern von Mobilfunk-Basisstationen und stationären Teilnehmergeräten von schnurlosen Telekommunikationsanlagen (110MHz bis 40GHz), CENELEC, Brüssel, August 2002
- [13] IEEE Std P1528-2003, IEEE Recommended Practice for Determining the Peak Spatial Average Specific Absorption Rate (SAR) in the Head from Wireless Communications Devices: Measurement Techniques, IEEE, New York, USA, 15.10.2003
- [14] Federal Communications Commission (FCC), Office of Engineering & Technology: Evaluating Compliance with FCC Guidelines for Human Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields. Additional Information for Evaluating Compliance of Mobile and Portable Devices with FCC Limits for Human Exposure to radiofrequency Emissions; Supplement C (Edition 01-01) to OET-Bulletin 65 (Edition 97-01).,

- [15] DiNallo C, Faraone A; Effect of Amplitude Modulation of the CDMA Signal on SAR Measurements. 25th annual meeting of the Bioelectromagnetics Society, June 22-27, 2003, Maui, Hawaii, USA, Abstract Book p. 233.
- [16] EU-Ratsempfehlung 1999/519/EG: Empfehlung des Rates zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern (0 Hz – 300 GHz); 12. Juli 1999
- [17] Gabriel S, Lau RW, Gabriel C. 1996. The dielectric properties of biological tissues: III. Parametric models for the dielectric spectrum of tissues. *Phys. Med. Biol.* 41:2271-2293.
- [18] Kuster N, Balzano Q, "Energy absorption mechanism by biological bodies in the near field of dipole antennas above 300 MHz", *IEEE Trans. Vehicular Tech.* 41(1992), pp.17-23
- [19] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft und Bundesamt für metrologie und Akkreditierung METAS (Hrsg.), Bern, Schweiz, 2002; Nichtionisierende Strahlung, Mobilfunk-Basisstationen (GSM) Messempfehlung.

ANHANG

A.1 Verwendete Messgeräte

Spektrumanalysator Agilent 4405B

9 kHz – 13.2 GHz

SN: US40520766

Präzisionsmessantenne PCD8250

80 MHz – 2,5 GHz

SN: 3141/02

Dual Powermeter Agilent 4419B

SN: GB40201856

Leistungsmesskopf Agilent 8481A

10 MHz- 18 GHz

-30 dBm - + 20dBm

SN: MY41091414

Leistungsmesskopf Agilent 8481A

10 MHz- 18 GHz

-30 dBm - + 20dBm

SN: MY41091468

Richtkoppler NARDA 4226-20

0,5-18 GHz

SN: 03692

Richtkoppler NARDA 4226-20

0,5-18 GHz

SN: 03693

Signalgenerator Marconi 2024

9 kHz – 2,4 GHz

SN: 112246/044

Leistungsverstärker Amplifier Research AR50S1G4

800 MHz – 4,2 GHz, 50 W

SN: 27947

Doppelsteghornantenne EMCO 3115

1 GHz – 18 GHz

SN: 9112/3767

Breitbandfeldsondensystem Wandel und Goltermann

Auslesegerät EMR 300, SN: H-0005

E-Feldsonde Typ 18, 100 kHz – 3 GHz, SN: D0002

A.2 Untersuchte Geräte

WLAN IEEE 802.11b,g - Geräte



L-54g Access Point Lancom Systems



USB-Easy Client 2, Wireless Network Solutions



MA111 802.11b Wireless USB Adapter, Netgear



Drahtlose 802.11g Notebook-Netzwerkkarte, Belkin

Bluetooth – Geräte



Bluetooth PC-Karte, Belkin,



Bluetooth USB-Adapter, Belkin



Bluetooth Wireless Desktop, Logitech

DECT-Geräte



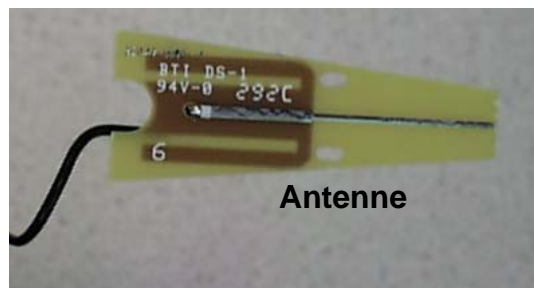
Siemens Gigaset A 100

Diverse Computerperipherie

Wireless Desktop ,Precision', Logitech (27 MHz)



Wireless Camera ,Quickcam', Logitech (2,45 GHz)

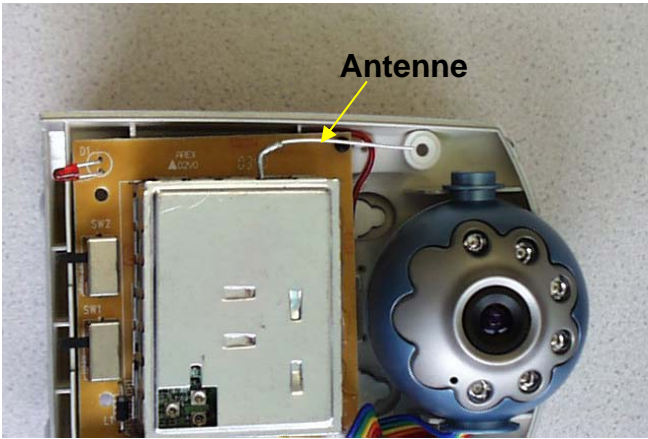


Babyphones

Babyphone 'BM 1000', VIVANCO Babyfon (446 MHz, 500 mW)



Babyphone 'Baby Star', mit Video-Übertragung (2,45 GHz)



Funkkopfhörer

Funkkopfhörer ,K 105', AKG (860 MHz)

