

Forschungsvorhaben

*Bestimmung der realen Feldverteilung von  
hochfrequenten elektromagnetischen Feldern  
in der Umgebung von Wireless LAN-  
Einrichtungen (WLAN) in innerstädtischen  
Gebieten*

**Abschlussbericht**

**Patrick Preiner, Gernot Schmid, Daniel Lager, Reinhard Georg**

November 2006  
Exemplar 1  
ARC-IT-0179

Verteiler:

- 1-4 Bundesamt für Strahlenschutz
- 5 DI Lamedschwandner
- 6 DI Schmid
- 7 DI Preiner
- 8 DI(FH) Lager
- 9 Dr Georg
- 10 Sekretariat ARC-sr/IT

*Bestimmung der realen Feldverteilung von  
hochfrequenten elektromagnetischen Feldern  
in der Umgebung von Wireless LAN-  
Einrichtungen (WLAN) in innerstädtischen  
Gebieten*

**Abschlussbericht**

im Auftrag des

**Bundesamtes für Strahlenschutz  
38201 Salzgitter, Deutschland**

**Patrick Preiner<sup>1</sup>, Gernot Schmid<sup>1</sup>, Daniel Lager<sup>1</sup>, Reinhard Georg<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> ARC Seibersdorf research GmbH  
Bereich Informationstechnologien  
Geschäftsfeld Sichere Mobilkommunikation

<sup>2</sup> Dr. Reinhard Georg  
Ingenieurbüro für Telekom-Consult,  
Datenschutz und Datensicherheit

**Verfasser:**

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

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

Dipl. Ing. (FH) Daniel Lager  
Geschäftsfeld Sichere Mobilkommunikation, Bereich Informationstechnologien  
ARC Seibersdorf research GmbH  
A-2444 Seibersdorf

Dr.-Ing. Reinhard Georg  
Ingenieurbüro für Telekom-Consult, Datenschutz und Datensicherheit  
Zeilstraße 20  
D-61476 Kronberg/Taunus

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 Rahmen des Forschungsvorhabens wurden Immissionsberechnungen und Immissionsmessungen an ausgewählten Indoor und Outdoor WLAN Szenarien durchgeführt. Konkret wurden Untersuchungen in einem kleinflächigen Raum mit wenigen Personen (Starcoffee in Heidelberg) sowie in einem großflächigen Raum (Flughafen Frankfurt am Main) als repräsentative Indoor-Szenarien durchgeführt. Als Outdoor-Szenarien wurden zwei Installationen mit WLAN Versorgung öffentlicher Plätze (Europaplatz in Kiel und Platz vor der Universitätsbibliothek in Stuttgart) und zwei Installationen mit WLAN-Außenantennen zur Indoor Versorgung in Wohngebieten betrachtet (Medusastraße und Schulstraße in Kiel). Zusätzlich erfolgten Messungen bei der CeBit 2006 in Hannover, um die WLAN Immission im Vergleich zu den Immissionen anderer Funkdienste im Bereich zwischen 80 MHz und 2,485 GHz darzustellen.

Um nicht nur die im Realbetrieb vorgefundenen Immissionen in einzelnen, eng begrenzten Raumbereichen zu erfassen, sondern auch Aussagen über die großflächige Feldverteilung, bzw. Einflüsse von veränderten Umgebungsbedingungen (Personen) bewerten bzw. berücksichtigen zu können, erfolgten in allen Fällen aufwendige Berechnungen der Immissionen auf Basis optischer Ausbreitungsmodelle (Programmpaket *Wireless Insite 2.0.5*), sowie messtechnische Immissionserhebungen in den Szenarien.

Die erhobenen Immissionen lagen in allen untersuchten Indoor- sowie Outdoor-Szenarien deutlich unterhalb der Referenzwerte der Ratsempfehlung der Europäischen Union 1999/519/EG.

Im untersuchten kleinräumigen Indoor-Szenario lagen die zeitlich (für typische Datenverkehrssituationen) und räumlich (über Körperdimensionen) gemittelten Immissionen typischerweise im Bereich zwischen ca.  $40 \mu\text{W}/\text{m}^2$  und  $8 \text{mW}/\text{m}^2$  (entsprechend 0,0004% und 0,08% des oben genannten Referenzwertes), jeweils abhängig von der Distanz zu den WLAN-Sendern (Access Points oder Clients). Zeitliche und räumliche Spitzenwerte der Immissionen lagen 1-2 Zehnerpotenzen oberhalb der Raum- und Zeitmittelwerte. Zeitliche und räumliche Immissions-Spitzenwerte von über  $100 \text{mW}/\text{m}^2$  (entsprechend 1% des genannten Referenzwertes) traten nur in unmittelbarer Umgebung (Distanz  $\leq 30 \text{cm}$ ) der WLAN-Sendegeräte auf.

In den großräumigeren Indoor-Szenarien traten aufgrund der in solchen Situationen üblicherweise größeren Distanzen zu den Sendern (z.B. Deckenmontage der Access Point Antennen) geringere WLAN-Immissionen auf. Für die konkret untersuchten Räumlichkeiten lagen die zeitlich (für typische Datenverkehrssituationen) und räumlich (über Körperdimensionen) gemittelten Immissionen typischerweise im Bereich zwischen ca.  $1 \mu\text{W}/\text{m}^2$  und  $4 \text{mW}/\text{m}^2$  (entsprechend 0,00001% und 0,04% des oben genannten Referenzwertes). Räumliche und zeitliche Spitzenwerte können auch hier, wieder abhängig von der Distanz zu nächstgelegenen aktiven WLAN Gerät, 1-2 Zehnerpotenzen oberhalb der Raum- und Zeitmittelwerte liegen.

Im Vergleich zu den Indoor-Szenarien (mit Indoor-WLAN-Sendern) wesentlich geringere Immissionen zeigten sich für die Outdoor-Szenarien. In Situationen wo eine Annäherung an die Access Point Antenne auf bis zu einige Meter möglich ist (z.B. Montage der Antenne an einer Hausfassade, zirka in der Höhe des ersten Obergeschoßes), lagen die maximalen, von den WLAN Access Points verursachten Immissionen (sowohl Raum- und Zeitmittelwerte als auch räumliche und zeitliche Spitzenwerte) immer unter  $1 \text{mW}/\text{m}^2$ . Noch geringere Immissionen ergaben sich in

Situationen mit Access Point Antennen, wie sie für die WLAN-Versorgung in Wohngebieten typisch sind (Access Point Antenne auf dem Hausdach oder auf einem Masten). In solchen Situationen sind Immissionen im Ausmaß von typischerweise weniger als  $1 \mu\text{W}/\text{m}^2$  zu erwarten.

Hinsichtlich einer im Hinblick auf Effizienz und Zuverlässigkeit sinnvollen WLAN-Immissionsbestimmung in der strahlenschutztechnischen Praxis zeigen die Ergebnisse, dass vor allem für die großräumigen Outdoor-Szenarien (große Distanzen zwischen Immissionsorten und Quellen), die aufwendige numerische Modellierung aus Aufwandsgründen zumeist nur schwer zu rechtfertigen sein wird, da die Immissionswerte in diesen Fällen üblicherweise extrem gering und daher nahezu vernachlässigbar sind (ca. 7 Zehnerpotenzen unterhalb des Referenzwertes der EU-Ratsempfehlung 1999/519/EG). In diesen Fällen sind aus praktischer Sicht Messungen oder Abschätzungen der Immissionen auf Basis der bekannten Fernfeldformel, unter der Annahme der maximal zulässigen WLAN-Quellenleistung von 100 mW EIRP mit kaum weniger Aussagekraft verbunden.

## SUMMARY

In the frame of this project, the personal exposure caused by WLAN installations was computed and measured for certain indoor and outdoor WLAN scenarios. Investigations in smaller areas with only a few persons (Star Coffee Heidelberg) as well as in larger areas (Airport Frankfurt am Main) were performed to represent Indoor scenarios. As outdoor scenarios two WLAN installations where public places (Europaplatz in Kiel and entrance area in front of the University's library in Stuttgart), are supplied with wireless internet access, as well as two installations with WLAN outdoor-antennas for indoor supply in residential areas, were investigated (Medusastraße and Schulstraße in Kiel). In addition, measurements at the CeBit 2006 in Hannover were performed to compare the extent of exposure caused by WLAN with the exposure caused by other radio services in the frequency range between 80 MHz and 2,485 MHz.

In order to not only assess the electromagnetic fields in restricted areas, but also to assess field distributions on a larger scale and to investigate the influence of environmental conditions (localization of persons), computations of the electromagnetic fields based on optical propagation models (software tool *Wireless Insite 2.0.5*) as well as measurements under real life conditions were carried out in all scenarios.

Generally, the evaluated electromagnetic fields were clearly below the reference level according to the Recommendation of the European Council 1999/519/EC in all investigated indoor and outdoor scenarios.

The time (for typical data rates) and spatially (over body dimensions) averaged power density in the evaluated small sized indoor scenario were in the range between  $40 \mu\text{W}/\text{m}^2$  and  $8 \text{mW}/\text{m}^2$  (corresponding to 0,0004% and 0,08% of the above mentioned reference level), depending on the distance to the WLAN transmitters (access points and clients). Time and spatial peaks were found to be 1-2 orders of magnitudes above the averaged values. Time and spatial peaks higher than  $100 \text{mW}/\text{m}^2$  (corresponding to 1% of the reference level) were found only in the immediate vicinity (distance  $\leq 30\text{cm}$ ) of the WLAN transmitters.

A lower extent of exposure was found for the wide area indoor scenarios due to the usually bigger distance to the transmitters (e.g. access points usually mounted at the ceiling). For the investigated scenarios, time (for typical data rates) and spatially (over body dimensions) averaged exposures, were typically in the range between approximately  $1 \mu\text{W}/\text{m}^2$  and  $4 \text{mW}/\text{m}^2$  (corresponding to 0,00001% and 0,04% of the above mentioned reference level). Spatial and time peaks of the power density might also be 1-2 magnitudes higher than the average values, depending on the distance to the next active transmitter.

Clearly lower exposure was found in the outdoor scenarios in comparison to the indoor scenarios (with indoor WLAN transmitters). In the case where an approach up to a few meters to a transmitting WLAN antenna is possible (antenna mounted on a house front, approximately in the height of the first floor) the maximum power density caused by this antenna (time and spatial averaged, as well as time and spatial peaks) was always below  $1 \text{mW}/\text{m}^2$ . Even lower values were found for scenarios with the access point antenna mounted in the way to supply surrounding residences with WLAN (access point antenna mounted on the rooftop or on a mast). In such situations the power density was typically below  $1 \mu\text{W}/\text{m}^2$ .

In view of a, regarding efficiency and reliability, reasonable WLAN exposure assessment in practice, the obtained results show that for large scale outdoor scenarios (big distance between transmitter and location of interest) the effort for complex numerical simulations seems not to be justifiable, because the power density in such cases are usually extremely small (about 7 orders of magnitude below the reference level according to the recommendation of the European Council 1999/519/EC). Therefore, from a practical view, measurements or exposure estimates based on the known far field formula under the assumption of maximum output power of the WLAN sources, i.e., 100 mW EIRP seem to be sufficiently convenient in such cases.

# INHALT

<b>1 EINLEITUNG</b> .....	<b>7</b>
<b>2 DIE GEGENWÄRTIGE WLAN-TECHNOLOGIE</b> .....	<b>8</b>
<b>2.1 Der Standard IEEE 802.11</b> .....	<b>8</b>
2.1.1 WLAN-Standards IEEE 802.11 und IEEE 802.11b [1], [3] .....	8
2.1.2 WLAN-Standard IEEE 802.11a [2] .....	15
2.1.3 WLAN-Standard IEEE 802.11g [4] .....	17
2.1.4 WLAN-Standard IEEE 802.11h [5] .....	20
2.1.5 Wi-Fi [12] .....	21
2.1.6 Gesetzliche Grundlagen für WLANs in Deutschland .....	21
2.1.7 Gegenwärtige WLAN-Produkte, Anwendungen und Antennen .....	22
<b>3 MESS- UND BERECHNUNGSMETHODEN</b> .....	<b>24</b>
<b>3.1 Messung von WLAN-Immissionen</b> .....	<b>24</b>
3.1.1 Grundlagen der frequenzselektiven Messung von WLAN-Immissionen .....	24
3.1.2 Messtechnisch relevante Eigenschaften von WLAN-Signalen .....	25
3.1.3 Kommerziell erhältliche Mess-Systeme .....	28
<b>3.2 Numerische Expositionserfassung</b> .....	<b>31</b>
3.2.1 Ray Launching (Methode der Strahlenausendung) .....	31
3.2.2 Ray Tracing (Methode der Strahlenverfolgung) .....	32
<b>3.3 EINGESETZTE MESS- UND BERECHNUNGSVERFAHREN</b> .....	<b>33</b>
3.3.1 Numerische Berechnung der Feldverteilung .....	33
3.3.2 Messtechnische Immissionsbestimmung .....	43
3.3.3 Vor- und Nachteile messtechnischer und numerischer Methoden .....	46
<b>4 VORLIEGENDE ARBEITEN ZUM THEMA</b> .....	<b>48</b>
<b>5 UNTERSUCHTE INDOOR-SZENARIEN</b> .....	<b>52</b>
<b>5.1 Kleinflächiger Raum (Star Coffee Heidelberg)</b> .....	<b>52</b>
5.1.1 Beschreibung des Szenarios und technische Kenndaten .....	52
5.1.2 Numerische Immissionsbestimmung .....	53
5.1.3 Messtechnische Immissionsbestimmung .....	64
5.1.4 Vergleich von numerischer Berechnung und Messung .....	64
5.1.5 Immissionsbeurteilung im Hinblick auf die Grenzwerte .....	65
5.1.6 Vergleich der Immissionswerte mit bisher publizierten Daten .....	66
5.1.7 Mögliche Maßnahmen zur Immissionsminderung .....	66
<b>5.2 Großflächiger Raum mit vielen Personen (Flughafen)</b> .....	<b>67</b>
5.2.1 Bereich 1 (Abflug Gates A1 bis A5) .....	67
5.2.2 Bereich 2 (Abflug Gates A28 bis A30) .....	80
5.2.3 Vergleich von numerischer Berechnung und Messung .....	93
5.2.4 Immissionsbeurteilung im Hinblick auf die Grenzwerte .....	93
5.2.5 Vergleich der Immissionswerte mit bisher publizierten Daten .....	94
5.2.6 Mögliche Maßnahmen zur Immissionsminderung .....	94
<b>6 UNTERSUCHTE OUTDOOR-SZENARIEN</b> .....	<b>95</b>
<b>6.1 Universität Stuttgart</b> .....	<b>95</b>
6.1.1 Innenstadt vor Universitätsbibliothek .....	95
6.1.2 Vergleich von numerischer Berechnung und Messung .....	101
6.1.3 Immissionsbeurteilung im Hinblick auf die Grenzwerte .....	102
6.1.4 Vergleich der Immissionswerte mit bisher publizierten Daten .....	102
6.1.5 Mögliche Maßnahmen zur Immissionsminderung .....	102
<b>6.2 Europaplatz, Kiel</b> .....	<b>103</b>
Beschreibung des Szenarios und technische Kenndaten .....	103

6.2.2	Vergleich von numerischer Berechnung und Messung .....	109
6.2.3	Immissionsbeurteilung im Hinblick auf die Grenzwerte .....	110
6.2.4	Vergleich der Immissionswerte mit bisher publizierten Daten .....	110
6.2.5	Mögliche Maßnahmen zur Immissionsminderung .....	111
<b>6.3</b>	<b>Schulstrasse, Kiel .....</b>	<b>111</b>
6.3.2	Vergleich von numerischer Berechnung und Messung .....	117
6.3.3	Immissionsbeurteilung im Hinblick auf die Grenzwerte .....	117
6.3.4	Vergleich der Immissionswerte mit bisher publizierten Daten .....	118
6.3.5	Mögliche Maßnahmen zur Immissionsminderung .....	118
<b>6.4</b>	<b>Medusastrasse, Kiel .....</b>	<b>118</b>
	Beschreibung des Szenarios und technische Kenndaten .....	118
6.4.2	Vergleich von numerischer Berechnung und Messung .....	124
6.4.3	Immissionsbeurteilung im Hinblick auf die Grenzwerte .....	125
6.4.4	Vergleich der Immissionswerte mit bisher publizierten Daten .....	125
6.4.5	Mögliche Maßnahmen zur Immissionsminderung .....	125
<b>7</b>	<b>CeBit 2006.....</b>	<b>126</b>
<b>8</b>	<b>WLAN-IMMISSIONEN IM VERGLEICH MIT DEN IMMISSIONEN ANDERER FUNKDIENSTE .....</b>	<b>132</b>
<b>9</b>	<b>LITERATUR.....</b>	<b>134</b>

# 1 EINLEITUNG

Mit der Verabschiedung des US-amerikanischen IEEE 802.11 Standards [1] 1997 begannen sich lokale Funknetzwerke (Wireless LANs, WLANs) immer mehr zu verbreiten. Die ersten Versionen des Standards blieben jedoch aufgrund der relativ niedrigen erzielbaren Netto-Übertragungsraten von deutlich unter 1 MBit/s auf Heim- und sehr einfache (hinsichtlich der Übertragungsraten unkritische) Büroanwendungen beschränkt. Durch die stetige Weiterentwicklung und Erweiterung des Standards (Versionen 802.11a-h [2],[3],[4],[5]) sind gegenwärtig laut Spezifikationen bereits Brutto-Datenraten bis 54 MBit/s möglich und WLANs wurden in den vergangenen Jahren daher zunehmend attraktiver. Obwohl die gegenwärtige WLAN-Technologie im Vergleich zu modernen kabelgebundenen Kommunikationsnetzwerken, wie z.B. Ethernet, hinsichtlich der maximal erzielbaren Datenraten noch deutlich unterlegen ist, bietet die aufgrund der drahtlosen Kommunikation gegebene Portabilität der Endgeräte genügend Vorteile, um WLAN als erfolgreiches Geschäftsmodell am Markt zu etablieren [6]. Neben der drahtlosen Vernetzung von Arbeitsplätzen untereinander im Heim- und Bürobereich gewann vor allem der drahtlose (und damit flexiblere) Einstieg ins Internet, als Alternative zu fest verkabelten Varianten über Telefonleitung, ISDN oder xDSL, zunehmend an Bedeutung. Allein in Deutschland sind laut [7] gegenwärtig bereits über 12000 ‚Hot Spots‘ im öffentlichen Bereich im Betrieb, die, mit entsprechend ausgerüsteter Computerhardware, den Einstieg ins Internet ermöglichen. Europaweit wird derzeit von über 50.000 solcher ‚Access Points‘ ausgegangen, Tendenz weiterhin steigend. Mit der steigenden Anzahl von ‚Hot Spots‘ in öffentlichen Bereichen geht natürlich auch eine steigende Exposition der Bevölkerung mit hochfrequenter elektromagnetischer Strahlung einher. Obwohl aus den wenigen bisher verfügbaren Arbeiten (z.B. [8],[9],[10],[11]) zur Frage der HF-Exposition durch WLAN-Sendegeräte eindeutig hervorgeht, dass die zu erwartenden Expositionen deutlich unterhalb der gegenwärtig von ICNIRP empfohlenen Grenzwerte liegen, besteht begründetes Interesse hinsichtlich der Größe des Anteils der WLAN-Immissionen an der elektromagnetischen Gesamtmission. Im Rahmen des gegenständlichen Forschungsvorhabens wurde diese Frage anhand ausgewählter realer Szenarien (WLAN-Installationen) beleuchtet, wobei sowohl numerische Feldberechnungen als auch umfangreiche Messkampagnen an den ausgewählten Installationen durchgeführt wurden. Kapitel 2 fasst zunächst die strahlenschutztechnisch relevanten Eigenschaften der gegenwärtigen eingesetzten WLAN-Technologien zusammen und diskutiert die für die Immissionsbestimmung bestgeeigneten Mess- und Berechnungsmethoden. Eine kurze Übersicht über gegenwärtig verfügbare und im Rahmen dieses Vorhabens konkret eingesetzte Mess- und Berechnungsverfahren gibt Kapitel 3. Kapitel 4 fasst die zum Thema der WLAN-Immissionen bisher publizierten Arbeiten zusammen. In den Kapiteln 5 und 6 sind die für die betrachteten WLAN-Szenarien erarbeiteten Mess- und Berechnungsergebnisse dokumentiert und Kapitel 7 fasst Ergebnisse von Vergleichsmessungen der Immissionen von WLAN und anderen Funkdiensten (durchgeführt auf der CeBit 2006 in Hannover) zusammen.

## 2 DIE GEGENWÄRTIGE WLAN-TECHNOLOGIE

### 2.1 Der Standard IEEE 802.11

Die Arbeitsgruppe 802.11 des unabhängigen US amerikanischen *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (kurz IEEE 802.11) ist eine von mehreren Arbeitsgruppen des IEEE 802 *Standards Committee* und befasst sich mit der Standardisierung von lokalen Funknetzwerken (WLANs). Historisch gesehen ist das 1980 gegründete *Standards Committee* IEEE 802 mit Sicherheit die bedeutendste Institution auf dem Gebiet der Standardisierung von lokalen Netzwerken (*Local Area Networks*, LANs). Beispielsweise wurde der heute unter dem Namen *Ethernet* wahrscheinlich bekannteste Netzwerk-Standard in Arbeitsgruppe IEEE 802.3 entwickelt. In diesem Lichte ist es daher nicht verwunderlich, dass sich gegenwärtige WLAN-Produkte zum allergrößten Teil an den IEEE 802.11 Standards orientieren. Betrachtet man die physikalische Ebene, so gibt es derzeit 4 von IEEE 802.11 standardisierte Basistechnologien (802.11b, a, g, h), die im Folgenden in der Reihenfolge ihrer gegenwärtigen Bedeutung für den europäischen Markt beschrieben werden.

#### 2.1.1 WLAN-Standards IEEE 802.11 und IEEE 802.11b [1], [3]

##### Allgemeines und Entwicklungsgeschichte

Im Jahr 1997 wurde von IEEE der WLAN Standard 802.11 veröffentlicht, der im weltweit unlicenzierten ISM (*Industrial Scientific Medical*) Frequenzband von 2400 bis 2483,5 MHz arbeitet und für maximale Übertragungsraten von 1 Mbps bzw. 2 Mbps ausgelegt war. Als Übertragungsverfahren sieht dieser Standard zwei unterschiedliche Methoden vor, nämlich *Frequency Hopping Spread Spectrum* (FHSS) und *Direct Sequence Spread Spectrum* (DSSS). Im Fall von FHSS-Übertragung wurde als Modulationsart 2-GFSK<sup>1</sup> (für 1 Mbps) bzw. 4-GFSK (für 2 Mbps) spezifiziert. Bei DSSS-Übertragung hingegen wurde standardmäßig DBPSK<sup>2</sup> (für 1 Mbps) bzw. DQPSK<sup>3</sup> (für 2 Mbps) als Modulationsart definiert.

Noch bevor sich Geräte nach IEEE 802.11 am europäischen Markt in großem Stil durchsetzen konnten, kam es 1999 zur Veröffentlichung des Standards IEEE 802.11b (oft auch als IEEE 802.11 HighRate oder kurz IEEE 802.11HR bezeichnet), der eine Erweiterung von IEEE 802.11 darstellt und maximale Übertragungsraten von 5,5 bzw. 11 Mbps ermöglicht. Dieser Standard sieht nur mehr DSSS-Übertragung vor und entspricht bezüglich Kanal und Frequenzaufteilung der DSSS-Variante von IEEE 802.11. Die höheren Bitraten von 5,5 bzw. 11 Mbps werden durch eine aufwendigere Modulationsform (*Complementary Code Keying*, CCK) erreicht.

Bedingt durch diese historische Entwicklung finden sich gegenwärtig am europäischen Markt praktisch keine Geräte mehr nach IEEE 802.11, sondern nur mehr Geräte, die mindestens IEEE 802.11b entsprechen. Das FHSS-Übertragungsverfahren hat daher gegenwärtig innerhalb der IEEE 802.11 Standards keine praktische Bedeutung. Im Weiteren wird daher nur mehr IEEE 802.11b behandelt.

---

<sup>1</sup> GFSK ... Gaussian Frequency Shift Keying

<sup>2</sup> DBPSK ..Differential Binary Phase Shift Keying

<sup>3</sup> DQPSK ..Differential Quaternary Phase Shift Keying

## Technische Beschreibung

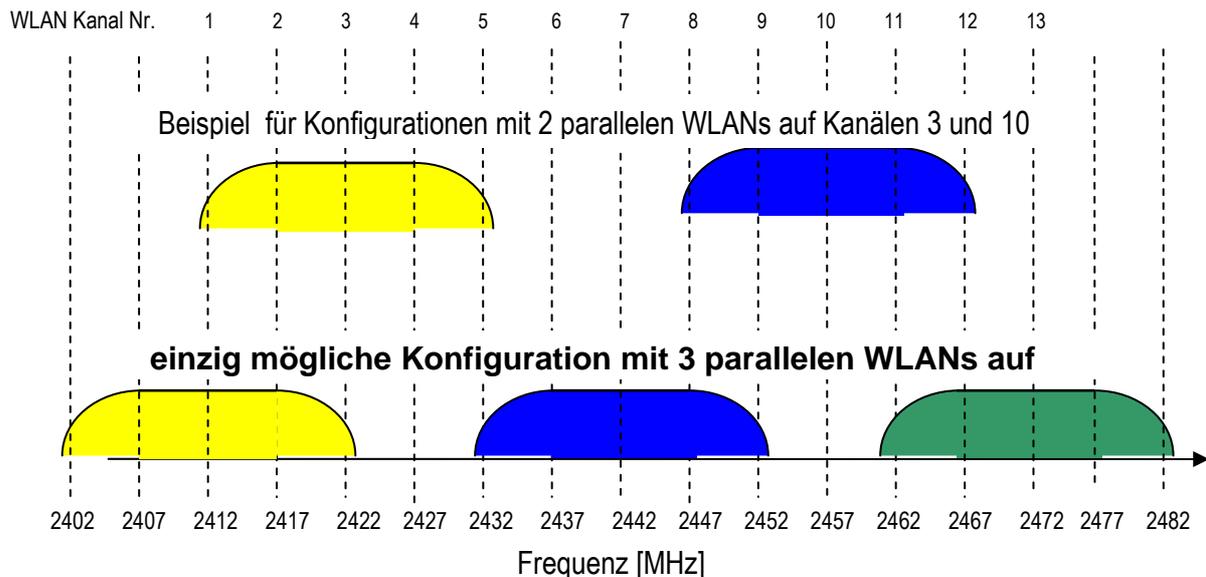
Die Funkübertragung des IEEE 802.11b WLAN-Standards arbeitet im weltweit unlicenzierten 2,4 GHz ISM (*Industrial Scientific Medical*) Frequenzband und verwendet ein *Direct Sequence Spread Spectrum* (DSSS) Übertragungsverfahren. Dabei wird das ursprünglich im Basisband ca. 1 MHz breite Signalspektrum (2 MHz HF-Bandbreite) künstlich auf 22 MHz Bandbreite aufgeweitet („gespreizt“). Die Spreizung erfolgt dabei durch Multiplikation des ursprünglichen Signals mit einem speziellen, so genannten „Spreizcode“. Die Bandspreizung dient im hier vorliegenden Fall lediglich der Erhöhung der Robustheit (Verringerung von Störungen) der Übertragung und nicht auch dazu, wie beispielsweise im Fall von UMTS, um unterschiedliche Benutzer voneinander zu unterscheiden. Die eigentliche zu übertragende Information ist, wie üblich, durch Modulation dem Signal aufgeprägt. Die unterschiedlichen, verfügbaren Übertragungsraten von 1, 2, 5,5 und 11 Mbps werden dabei durch den Einsatz unterschiedlicher Modulationsverfahren bzw. durch unterschiedliche Spreizcodes erreicht (Tabelle 2.1).

Bitrate	Modulation	Bandspreizung
1 Mbps	DBPSK	11 chip Barker Sequenz
2 Mbps	DQPSK	11 chip Barker Sequenz
5,5 Mbps	DQPSK	4 8-chip CCK Spreizung
11 Mbps	DQPSK	64 8-chip CCK Spreizung

Tabelle 2.1: Gegenüberstellung der unterschiedlichen Modulations- und Spreizcodetypen zur Erreichung der unterschiedlichen Übertragungsraten bei WLANs nach IEEE 802.11b. Die Sendebandbreite beträgt immer (unabhängig von der Bitrate) 22 MHz.

Entsprechend dem bisher Gesagten beträgt die benötigte Übertragungsbandbreite eines WLANs nach IEEE 802.11b daher 22 MHz (unabhängig von der Bitrate). In Europa stehen dafür innerhalb des 2,4 GHz ISM Bandes (2400 MHz – 2483,5 MHz) insgesamt 13 je 5 MHz breite Funkkanäle zur Verfügung (Kanal 1: 2412 MHz, .... Kanal 13: 2472 MHz, angegeben ist jeweils die Mittenfrequenz). Für den praktischen Betrieb von IEEE 802.11b - WLANs ergibt sich daraus als Konsequenz, dass man bei günstiger Kanalwahl maximal 3 sich räumlich überlappende WLANs betreiben kann, ohne dass gegenseitige Beeinflussungen erwartet werden müssen (siehe Abbildung 2.1).

WLAN-Systeme nach IEEE 802.11b können grundsätzlich in zwei unterschiedlichen Netzwerk-Architekturen betrieben werden. Im so genannten *Infrastruktur-Netzwerk* kommunizieren die im WLAN eingebundenen Geräte über einen zentralen Netzwerkknoten, den so genannten *Access Point*. Über diesen *Access Point* kann das WLAN auch an ein anderes Netzwerk (z.B. Ethernet) angebunden werden. Da der *Access Point* zentrale Aufgaben im Bereich der Netzwerkorganisation übernimmt, ist die direkte Kommunikation von Endgeräten miteinander, d.h. ohne Einbindung des *Access Points* in einem *Infrastruktur-Netzwerk*, nicht erlaubt.

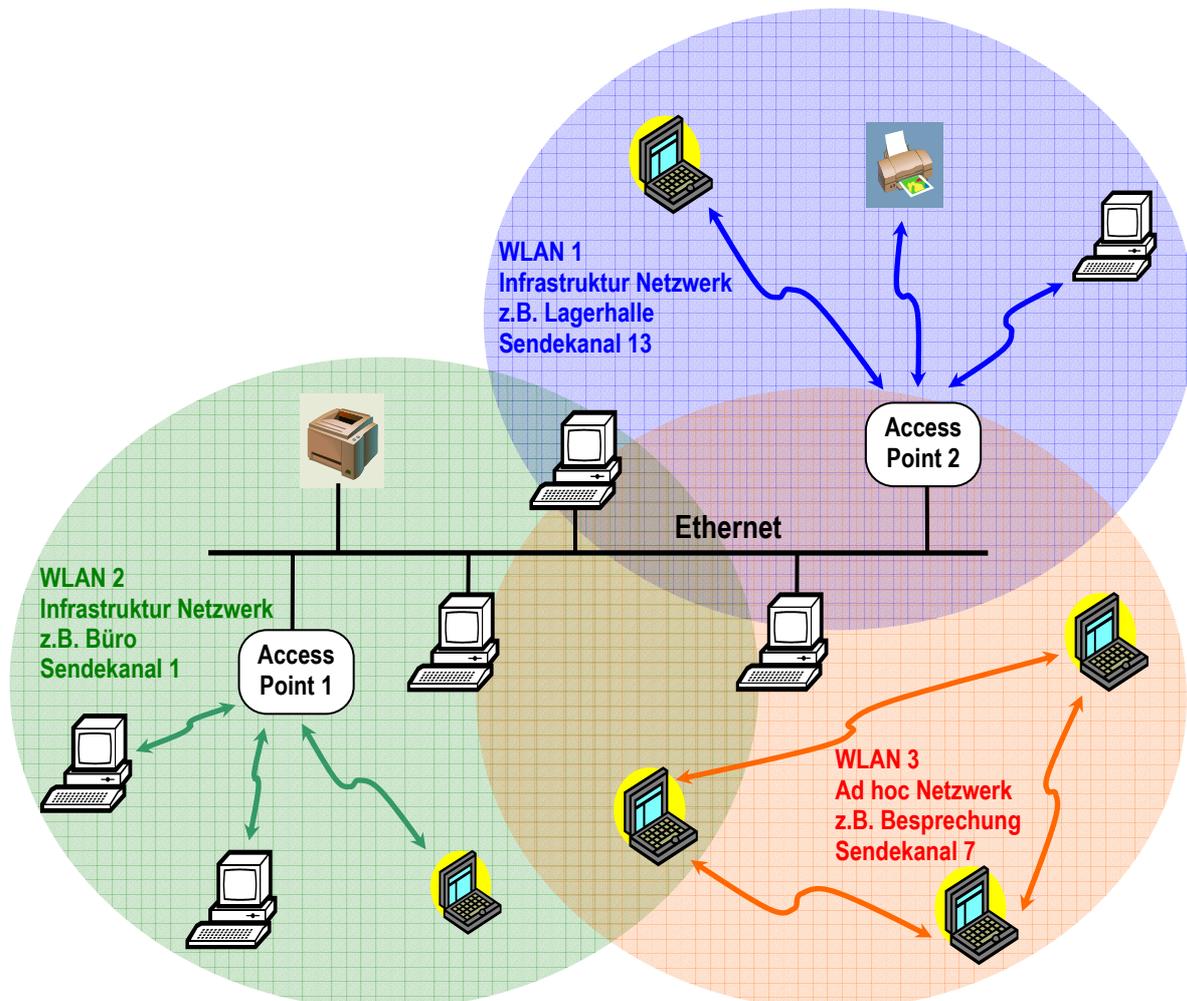


**Abbildung 2.1:** Mögliche Nutzungen des 2,4 GHz ISM-Bandes für WLANs nach IEEE 802.11b. Will man 3 räumlich überlappende unabhängige WLANs ohne gegenseitige Beeinflussungen betreiben, so ergibt sich aufgrund der beschränkten Frequenzressourcen und der 22 MHz Bandbreite nur eine möglich Konfiguration (Kanal 1,7,13). Für 2 unabhängige WLANs können dementsprechend mehrere unterschiedliche Konfigurationen gefunden werden.

Dagegen können in einem so genannten *ad-hoc Netzwerk* zwei oder mehrere Endgeräte direkt miteinander kommunizieren. In einem *ad-hoc Netzwerk* gibt es daher keinen *Access Point*. Abbildung 2.2 versucht die unterschiedlichen Netzwerk-Architekturen an einem konkreten Beispiel in vereinfachter Weise unter folgenden Annahmen zu illustrieren: In einem Firmengebäude besteht ein bewährtes Firmennetzwerk (z.B. Ethernet). Durch Expansion der Firma werden an das bestehende Gebäude eine Lagerhalle und ein weiterer Bürotrakt angebaut, welche auch an das Firmennetz anzubinden sind, wobei man sich aus Kostengründen (entfallende Kabelinstallation) für eine WLAN-Lösung entschieden hat. Abbildung 2.2 zeigt, dass die beiden Sub-Netze auf WLAN-Basis (*Infrastruktur Netzwerke*) über die jeweiligen *Access Points* an das bestehende Ethernet angebunden sind. Werden die beiden WLAN-Subnetze günstig im zur Verfügung stehenden Frequenzband platziert (vgl. Abbildung 2.1), so kann im gleichen räumlichen Bereich auch noch ein weiteres WLAN betrieben werden (beispielsweise in Form eines *ad-hoc Netzwerks* in einem Besprechungsraum zwischen den Notebooks der Besprechungsteilnehmer). Die unterschiedlichen Sendefrequenzen sind in Abbildung 2.2 durch unterschiedliche Farben der Netzwerkbereiche dargestellt.

Der Verbindungsaufbau in einem IEEE 802.11 WLAN erfolgt in mehreren Schritten nach einem streng festgelegten Schema. Das mit dem WLAN zu verbindende Gerät beginnt nach dem Einschalten (bzw. Starten des Verbindungsaufbaus) mit einem Suchvorgang (*Scanning*), wobei *passives Suchen* und *aktives Suchen* implementiert sein können. Eine zentrale Rolle dabei spielt der so genannte *Beacon-Frame*. Dieses spezielle Datenpaket wird in regelmäßigen Abständen (in einem *Infrastruktur-Netzwerk*) vom *Access Point* abgesendet und dient allen Geräten im Empfangsbereich zur Synchronisation. In einem *ad-hoc Netzwerk* erfolgt die Abstrahlung des *Beacons* von dem Gerät aus, welches als erstes aktiv wurde. Während des *passiven Suchens* beginnt das zu verbindende Gerät einfach mit dem „Abhören“ des Funkkanals, bis es einen *Beacon* empfängt und sich damit synchronisieren kann. Nach der Synchronisation und daran anschließender

erfolgreicher Authentifizierung ist das Gerät mit dem WLAN verbunden. Beim (schnelleren) *aktiven Suchvorgang* beginnt das zu verbindende Gerät von sich aus spezielle Anfrage-Datenpakete (*Probe Request Frames*) abzusetzen, die bereits spezielle Informationen bezüglich des angestrebten Verbindungstyps enthalten. Jene zur Anfrage passende Station im Empfangsbereich (*Access Point* im Infrastruktur-Netzwerk oder ein anderes Gerät im *ad-hoc Netzwerk*), die den letzten *Beacon* ausgesendet hat, antwortet daraufhin mit einem so genannten *Probe Response Frame* und das neue Gerät wird nach einer Authentifizierungsprozedur im Netzwerk aufgenommen.



**Abbildung 2.2:** Beispiel zur Illustration der beiden grundsätzlich unterschiedlichen Netzwerkarchitekturen bei WLANs nach IEEE 802.11. Zwei WLAN Sub-Netze (*Infrastruktur Netzwerke*, blau und grün) sind über zwei Access Points an das bestehende Ethernet angebunden. Werden die beiden WLAN-Subnetze günstig im zur Verfügung stehenden Frequenzband platziert (z.B. Kanal 1 und Kanal 13), so kann im gleichen räumlichen Bereich noch ein weiteres WLAN betrieben werden (beispielsweise in Form eines *ad-hoc Netzwerks* in einem Besprechungsraum zwischen den Notebooks der Besprechungsteilnehmer. Die unterschiedlichen Sendefrequenzen (Sendekanäle) sind durch unterschiedliche Farben der Netzwerkbereiche dargestellt.

Die Organisation des Datenverkehrs innerhalb eines IEEE 802.11 Funknetzwerkes, d.h. wann welches Gerät senden darf, erfolgt nach dem Prinzip des *Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance (CSMA/CA)*<sup>4</sup>. In einfachen Worten bedeutet dies, dass ein Gerät nur dann senden darf, wenn gerade kein anderes Gerät sendet. Dazu ist es notwendig, dass jedes Gerät, das Daten senden möchte, vorher in den Funkkanal „hineinhört“, ob andere Geräte gerade senden.

Das CSMA/CA Prinzip alleine kann jedoch in der Praxis unter Umständen nicht ausreichend sein um eine effiziente und verlässliche Datenübertragung zu gewährleisten, wie am Beispiel des Problems „versteckter Geräte“ (*Hidden Node Problem*) deutlich gemacht werden kann. Als „verstecktes“ Gerät bezeichnet man ein Gerät, das nicht zu allen anderen Geräten im selben WLAN Funkverbindung hat. Gründe dafür können Abschattungseffekte (Hindernisse im Funkfeld) oder destruktive Interferenz infolge Mehrwegausbreitung sein. Abbildung 2.3 zeigt dies anschaulich an einem einfachen Beispiel eines *ad-hoc Netzwerks*. Geräte 1 und 2 haben Funkverbindung und können miteinander kommunizieren. Ebenso besteht eine Funkverbindung zwischen Gerät 2 und Gerät 3. Aufgrund eines Hindernisses ist jedoch kein direkter Funkkontakt zwischen Gerät 1 und Gerät 3 möglich. Aufgrund dieser Konstellation kann Gerät 3 eine eventuelle Übertragung von Gerät 1 zu Gerät 2 nicht wahrnehmen und der Funkkanal erscheint daher aus der Sicht des Gerätes 3 frei zu sein. D.h. die Strategie des CSMA/CA Prinzips alleine ist in diesem Fall nicht ausreichend um Kollisionen zu vermeiden.

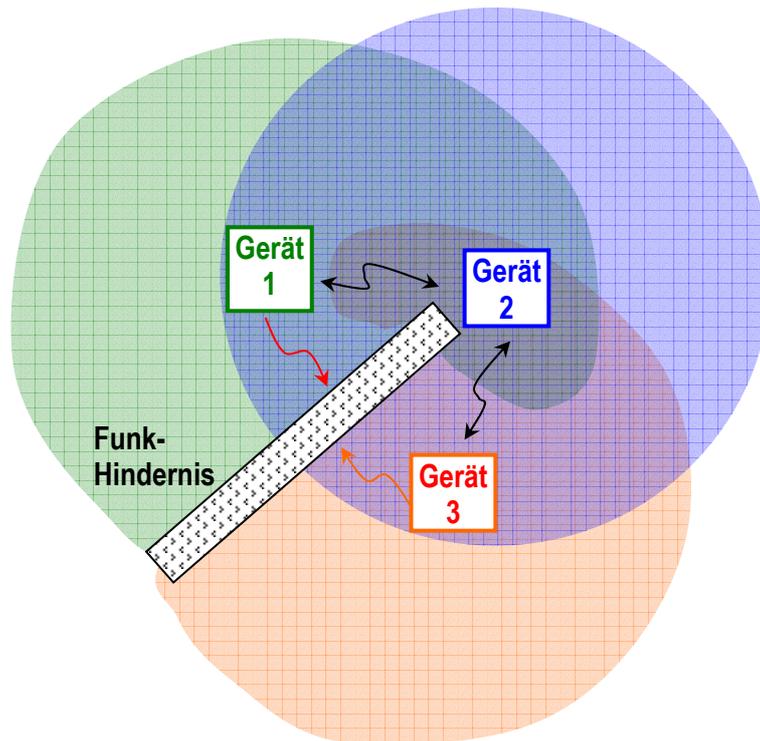
Abhilfe für dieses Problem schafft die Verwendung von Anfrage- und Bereitschafts-Kommandos zwischen Sende und Empfangsstation (*Request To Send RTS* und *Clear To Send CTS*). Bei Anwendung dieser Strategie sendet jenes Gerät, das Daten übertragen möchte (Gerät 1 im hier betrachteten Beispiel) zunächst ein Anfrage-Datenpaket (RTS) aus, das zwar von Gerät 2 aber nicht von Gerät 3 empfangen werden kann (Abbildung 2.4). Gerät 2 erkennt aus dem RTS-Datenpaket, dass es selbst das Ziel der von Gerät 1 angestrebten Datenübertragung ist und sendet nun seinerseits ein Bestätigungs-Datenpaket (CTS) aus um anzuzeigen, dass es bereit zum Empfangen der Daten ist. Dieses CTS-Datenpaket kann nun neben Gerät 1 auch Gerät 3 empfangen, das bisher noch nichts von der angestrebten Übertragung „wusste“ (konnte RTS von Gerät 1 ja nicht empfangen). Dadurch ist nun sichergestellt, dass Gerät 3 den Funkkanal nicht fälschlicherweise als frei wahrnimmt und es kann zu keiner Kollision während der Datenübertragung von Gerät 1 zu Gerät 2 kommen.

Die WLAN-Standards IEEE 802.11 sehen verpflichtend nur reines CSMA/CA vor, RTS/CTS-Signalisierung ist optional vorgesehen, wird jedoch praktisch immer implementiert.

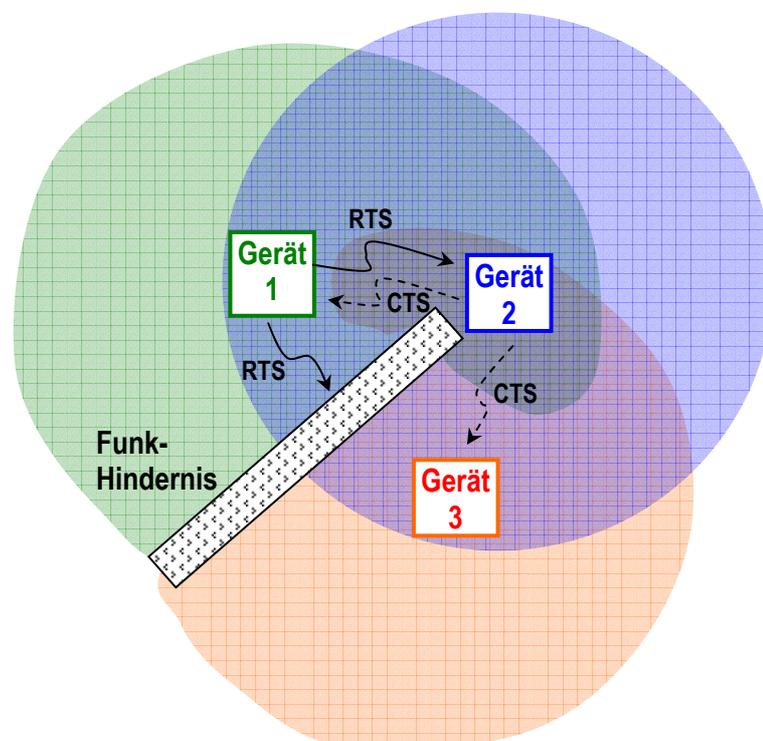
Eine weitere in IEEE 802.11 optional vorgesehene Regelung des Zugriffs auf den Funkkanal betrifft den Zugriff bei Übertragung von zeitkritischen Daten, wie Sprache oder Video, die so genannte *Point Coordination Function (PCF)*. PCF benötigt eine zentrale Steuerung durch den *Access Point*.

---

<sup>4</sup> Dieses Prinzip ist sehr ähnlich dem beim kabelgebundenen Ethernet verwendeten CSMA/CD (*Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection*). Bei Funknetzwerken ist jedoch die Detektion von Kollisionen nicht möglich, da eine Station nicht gleichzeitig auf derselben Frequenz senden und empfangen kann. Daher werden bei den Funknetzwerken Strategien verwendet, die versuchen Zugriffskollisionen von vornherein zu vermeiden („Collision **A**voidance“)



**Abbildung 2.3:** Beispiel zur Illustration des *Hidden Node Problems*, bei dem einzelne Geräte nicht zu allen anderen Geräten im selben WLAN Funkkontakt haben. Gerät 1 liegt im Funkfeld von Gerät 2, jedoch außerhalb der Reichweite von Gerät 3. Gerät 2 hat Funkkontakt zu allen anderen Geräten und Gerät 3 hat Funkkontakt zu Gerät 2, jedoch nicht zu Gerät 1. Die Funkbereiche der einzelnen Geräte sind durch entsprechende Farbhinterlegung veranschaulicht. Ohne weitere Maßnahmen zusätzlich zum CSMA/CA-Verfahren, kann dies zu Kollisionen im Datenverkehr führen. Abhilfe schafft ein *Handshaking*-Verfahren mit *Request to Send* (RTS) und *Clear to Send* (CTS) Kommandos.



**Abbildung 2.4:** Lösung des *Hidden Node Problems* in IEEE 802.11 Netzwerken durch ein *Handshaking* Verfahren unter Verwendung von *Request to Send* (RTS) und *Clear to Send* (CTS) Kommandos.

## **Sendeleistung**

Die für WLAN-Geräte im 2,4 GHz ISM-Band maximal zulässige abgestrahlte Sendeleistung beträgt in Europa 100 mW EIRP. In IEEE 802.11b ist keine automatische Sendeleistungsregelung implementiert, zur Verringerung des Energieverbrauchs können die Geräte allerdings in einen Schlafmodus übergehen, bei dem der Sender kurzzeitig abgeschaltet wird. In einem *ad-hoc Netzwerk* (d.h. ohne *Access Point*) können die einzelnen Geräte von sich aus in den Schlafmodus übergehen, müssen aber zu jedem ausgesendeten *Beacon* wieder „aufwachen“. In einem *Infrastruktur-Netzwerk* übernimmt der *Access Point* die Aufgabe der Schlafmodus-Verwaltung für die einzelnen Geräte im Netz. Die einzelnen Stationen in einem Infrastruktur-Netzwerk sind daher nicht gezwungen zu jedem *Beacon* „aufzuwachen“, was eine effizientere Energieeinsparung bewirkt.

Die von einem WLAN-Gerät nach IEEE 802.11b im zeitlichen Mittel abgestrahlte Sendeleistung hängt vom momentanen Daten-Verkehrszustand ab und kann praktisch jeden Wert zwischen 0 (Gerät über längere Zeit im Schlafzustand) und nahezu maximaler Sendeleistung (Gerät sendet große Datenmenge) annehmen. Für einen *Access Point*, bzw. ein die Synchronisation innerhalb eines *ad-hoc Netzwerkes* aufrechterhaltendes Gerät, ist die minimal abgestrahlte Sendeleistung durch die periodische Abstrahlung des *Beacons* definiert. Der *Beacon* wird in einem IEEE 802.11 Netzwerk typischerweise alle 100 ms abgestrahlt und hat eine maximale Länge von ca. 0,5 ms. Daraus kann, z.B. für einen *Access Point* in einem WLAN, in dem gerade kein Datenaustausch stattfindet, eine mittlere abgestrahlte HF-Leistung von ca.  $0,5 \text{ ms} \cdot 100 \text{ mW} / 100 \text{ ms} = 0,5 \text{ mW}$  errechnet werden.

Für ein Gerät, das unter der (theoretischen) Annahme von Vollausslastung Daten absendet, entspricht die tatsächlich abgestrahlte Leistung nahezu der zulässigen Maximalleistung von 100 mW. „Nahezu“ deshalb, da die Datenpaketlänge grundsätzlich beschränkt ist und auch unter der getroffenen Annahme nach jedem Datenpaket zumindest eine Bestätigungsmeldung des Empfänger-Gerätes abgewartet werden muss, wodurch sich auch für ein unter Volllast sendendes WLAN-Gerät zwangsläufig kurze Sendepausen ergeben. Bei Mittelungsintervallen von größer als einige hundert Millisekunden, liegt die mittlere von einem WLAN-Gerät maximal (unter Volllast) abgestrahlte Sendeleistung daher bereits aus theoretischen Überlegungen mindestens ca. 2% Prozent unterhalb der maximal zulässigen Spitzenleistung von 100 mW (bei Annahme langer Datenpakete). Praktische Messungen an WLAN-Geräten in [11] zeigten jedoch, dass dieses theoretische Maximum nicht erreicht wird. Tatsächlich wurden unter optimalen Bedingungen mittlere Sendeleistungen von nicht mehr als ca. 90% der Spitzensendeleistung gemessen. Bei entsprechend kürzeren Datenpaketen sinkt auch die mittlere abgestrahlte Leistung, da bezogen auf ein fixes Zeitintervall, der relative Anteil der Sendepausen (Zeit für die Bestätigungsmeldung der Empfangsstation) steigt.

Für den praktisch üblichen Fall einer nur gelegentlichen Beteiligung eines WLAN-Gerätes am Datenverkehr im Netzwerk, sind entsprechend reduzierte mittlere abgestrahlte Sendeleistungen zu erwarten, die je nach Länge des betrachteten Mittelungsintervalls und des tatsächlichen Datenverkehrs um 2-3 Zehnerpotenzen unterhalb von 100 mW liegen können (untere Grenze ist durch Aussendung des *Beacons* gegeben).

## 2.1.2 WLAN-Standard IEEE 802.11a [2]

### Allgemeines und Entwicklungsgeschichte

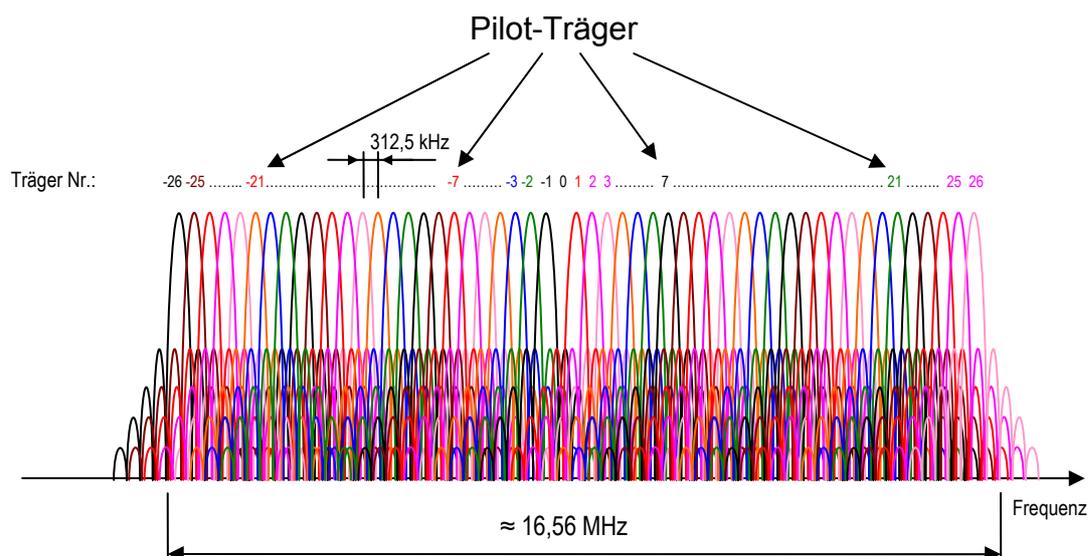
Kurz vor IEEE 802.11b wurde im Jahr 1999 auch der WLAN-Standard IEEE 802.11a veröffentlicht, der, basierend auf einem gänzlich anderen Übertragungs- und Modulationsverfahren, Bitraten bis zu 54 Mbps ermöglicht. IEEE 802.11a unterscheidet sich vom Basisstandard im Wesentlichen nur auf physikalischer Ebene, d.h. höhere logische Ebenen, wie z.B. die Organisation des Datenverkehrs innerhalb des Netzwerks und der Zugriff auf den Funkkanal (CSMA/CA) sind identisch mit dem Basisstandard IEEE 802.11. Systeme nach IEEE 802.11a operieren im Frequenzbereich von 5,15 – 5,35 GHz, bzw. von 5,725 – 5,825 GHz und verwenden *Orthogonal Frequency Division Multiplex* (OFDM) als Übertragungsverfahren. Obwohl WLAN-Produkte nach IEEE 802.11a bereits am Markt verfügbar sind, sind sie für den europäischen Markt nicht sinnvoll einsetzbar, da die europäischen Regulierungsbehörden im angesprochenen 5 GHz Band ohne das Vorhandensein einer automatischen Sendeleistungsregelung (TCP, *Transmit Power Control*) und einer dynamischen Frequenzwahl (DFC, *Dynamic Frequency Selection*) als maximale Sendeleistung nur 30 mW zulassen. Mit den beiden angesprochenen Merkmalen würden 200 mW als maximale Sendeleistung zugelassen sein. Der IEEE Standard 802.11h sieht eine Ergänzung des Standards IEEE 802.11a mit TCP und DFC vor (siehe Kapitel 2.1.4).

### Technische Beschreibung

Die Funkübertragung von WLAN-Systemen die nach IEEE 802.11a arbeiten, erfolgt im Frequenzband von 5,15 – 5,35 GHz, bzw. von 5,725 – 5,825 GHz. Als Übertragungsverfahren wird *Orthogonal Frequency Division Multiplex* (OFDM) mit insgesamt 52 orthogonalen Einzelträgern (48 Übertragungskanäle und 4 Pilot-Kanäle) verwendet. Der Mittenabstand zweier benachbarter Träger beträgt 312,5 kHz. Das gesamte Spektrum belegt daher ca. 16,56 MHz. Eine Besonderheit des OFDM-Signals nach IEEE 802.11a ist, dass Träger Nr. 0 nicht gesendet wird, was im Spektrum durch eine entsprechende (kleine) Lücke sichtbar wird. Abbildung 2.5 zeigt schematisch das Frequenzspektrum. Die unterschiedlichen verfügbaren Datenraten von 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 und 54 Mbps werden durch Verwendung unterschiedlicher Modulationsverfahren bzw. unterschiedlicher Faltungs-Kodierraten erreicht. Tabelle 2.2 fasst die bei IEEE 802.11a verwendeten Modulations- und Kodierungsformen für die unterschiedlichen Datenraten zusammen.

Da sich IEEE 802.11a vom Basis-Standard 802.11 nur bezüglich der physikalischen Ebene unterscheidet, gilt für die möglichen Netzwerkarchitekturen (*ad-hoc Netzwerk* und *Infrastrukturnetzwerk*) für IEEE 802.11a das gleiche wie schon in Kapitel 5.2.1 für IEEE 802.11 beschrieben.

Ebenso sind die für IEEE 802.11 beschriebenen Verfahren bezüglich Netzwerkaufbau und Zugriffs-Strategien (CSMA/CA) in gleichem Maße für IEEE 802.11a-WLANs gültig.



**Abbildung 2.5:** Schematische Darstellung des Spektrums einer Funkübertragung nach IEEE 802.11a. Insgesamt werden 48 modulierte Datenträger plus 4 Pilot-Träger gleichzeitig übertragen. Die Überlagerung der insgesamt 52 jeweils 312,5 kHz breiten Trägersignale belegt ca. 16,56 MHz Bandbreite im vorgesehenen Frequenzbereich von 5,15 – 5,35 GHz, bzw. von 5,725 – 5,825 GHz.

Datenrate [Mbps]	Modulationsart	Kodierrate
6	BPSK	$\frac{1}{2}$
9	BPSK	$\frac{3}{4}$
12	QPSK	$\frac{1}{2}$
18	QPSK	$\frac{3}{4}$
24	16QAM	$\frac{1}{2}$
36	16QAM	$\frac{3}{4}$
48	64QAM	$\frac{1}{2}$
54	64QAM	$\frac{3}{4}$

BPSK.. Binary Phase Shift Keying

QPSK...Quaternary Phase Shift Keying

16QAM Quadratur-Amplitudenmodulation mit 16 unterschiedlichen Zuständen (Symbolen)

64QAM Quadratur-Amplitudenmodulation mit 64 unterschiedlichen Zuständen (Symbolen)

**Tabelle 2.2:** Verwendete Modulationsarten bzw. Kodierraten zur Erreichung der definierten Bitraten nach IEEE 802.11a.

## Sendeleistung

Obwohl der Standard IEEE 802.11a Sendeleistungen bis zu 800 mW (in den USA je nach Frequenzbereich zulässig) vorsieht, ist der Betrieb von IEEE 802.11a-Produkten in Europa seitens der Regulierungsbehörden nur mit maximal 30 mW Sendeleistung erlaubt. Der Grund dafür liegt im Fehlen einer automatischen Sendeleistungsregelung (TCP, *Transmit Power Control*) und einer dynamischen Frequenzwahl (DFC, *Dynamic Frequency Selection*). Mit diesen beiden Merkmalen wären 200 mW EIRP als maximale Sendeleistung zulässig. Der IEEE Standard 802.11h sieht eine Ergänzung des Standards IEEE 802.11a mit TCP und DFC vor (siehe Kapitel 2.1.4). Es ist daher davon auszugehen, dass sich Produkte nach IEEE 802.11a am europäischen Markt nicht durchsetzen werden, obwohl sie prinzipiell bereits verfügbar sind. Am europäischen Markt werden, wenn auch durch die verspätete Produktverfügbarkeit etwas verzögert, eher Alternativen zu IEEE 802.11a zum Zug kommen (z.B. IEEE 802.11h).

Bezüglich der mittleren von einem WLAN-Gerät nach IEEE 802.11a abgestrahlten Sendeleistung, gilt aufgrund des gleichen Zugriffsverfahrens (CSMA/CA) Ähnliches wie für Geräte nach IEEE 802.11b. Als Mindestabstrahlung eines aktiven WLAN-Gerätes nach IEEE 802.11a kann die regelmäßige Aussendung des *Beacons* angesehen werden. Dieser wird üblicherweise alle 100 ms mit einer maximalen Dauer von ca. 0,5 ms abgestrahlt. Damit ergibt sich für diesen Fall ein maximales Verhältnis von mittlerer abgestrahlter Leistung  $P$  zu maximaler Sendeleistung  $P_{\max}$  von  $P/P_{\max} = 0,5/100 = 0,005$ .

Für ein Gerät, das unter der (theoretischen) Annahme von Volllast Daten absendet, entspricht die tatsächlich abgestrahlte Leistung nahezu der zulässigen Maximalleistung. „Nahezu“ deshalb, da die Datenpaketlänge grundsätzlich beschränkt ist und auch unter der getroffenen Annahme nach jedem Datenpaket zumindest ein Bestätigungsmeldung des Empfänger-Gerätes abgewartet werden muss, wodurch sich auch für ein unter Volllast sendendes WLAN-Gerät zwangsläufig kurze Sendepausen ergeben. Bei Mittelungsintervallen von größer als einige Millisekunden, liegt die mittlere von einem WLAN-Gerät maximal (unter Volllast) abgestrahlte Sendeleistung daher etwas unterhalb der maximal zulässigen Spitzenleistung (bei Annahme langer Datenpakete). Bei entsprechend kürzeren Datenpaketen sinkt auch die mittlere abgestrahlte Leistung, da bezogen auf ein fixes Zeitintervall der relative Anteil der Sendepausen (Zeit für die Bestätigungsmeldung der Empfangsstation) steigt.

Für den praktisch üblichen Fall einer nur gelegentlichen Beteiligung eines WLAN-Gerätes am Datenverkehr im Netzwerk sind entsprechend reduzierte mittlere abgestrahlte Sendeleistungen zu erwarten, die je nach Länge des betrachteten Mittelungsintervalls und des tatsächlichen Datenverkehrs um 2-3 Zehnerpotenzen unterhalb der maximalen Sendeleistung liegen können (untere Grenze ist durch Aussendung des *Beacons* gegeben).

### 2.1.3 WLAN-Standard IEEE 802.11g [4]

#### Allgemeines und Entwicklungsgeschichte

Im Jahr 2003 wurde neuerlich ein Erweiterungs-Standard der IEEE 802.11-Serie veröffentlicht. Dieser Standard IEEE 802.11g arbeitet wieder im 2,4 GHz ISM-Band, soll Datenraten bis zu 54 Mbps ermöglichen und rückwärtskompatibel zu IEEE 802.11b sein. Die hohen Datenraten werden dabei (ähnlich wie bei IEEE 802.11a) mit einem OFDM-Übertragungsverfahren und entsprechender Modulation und Kodierung erreicht. Der Grund für die Entwicklung dieses Standards lag offensichtlich in der kostengünstigeren HF-Hardware für 2,4 GHz im Vergleich zu Geräten nach IEEE 802.11a im 5 GHz Band. IEEE 802.11g unterscheidet sich vom Basis-Standard wieder nur hinsichtlich der physikalischen Ebene, höhere logische Ebenen, wie z.B. die Organisation des Datenverkehrs innerhalb des Netzwerks und der Zugriff auf den Funkkanal (CSMA/CA) sind wieder identisch mit dem Basisstandard IEEE 802.11.

#### Technische Beschreibung

Der WLAN-Standard IEEE 802.11g arbeitet ausschließlich im weltweit unlicenzierten 2,4 GHz ISM-Band. Der Standard sieht die Unterstützung der Übertragungsraten von 1, 2, 5,5, 11, 6, 12 und 24 Mbps obligatorisch vor. Die Übertragungsraten 9, 18, 36,

48 und 54 Mbps können optional implementiert werden. Zur Erreichung dieser Datenraten verwendet IEEE 802.11g die aus IEEE 802.11b und IEEE 802.11a bekannten Übertragungs-, Modulations- und Kodierverfahren. Tabelle 2.3 fasst die unterschiedlichen Datenraten und zugehörigen Verfahren zusammen. Zusätzlich sind durch spezielle Paket-Faltungscodierung auch die optionalen Datenraten 22 und 33 Mbps definiert, die aber für die zu erwartenden Produkte wahrscheinlich keine Bedeutung haben werden.

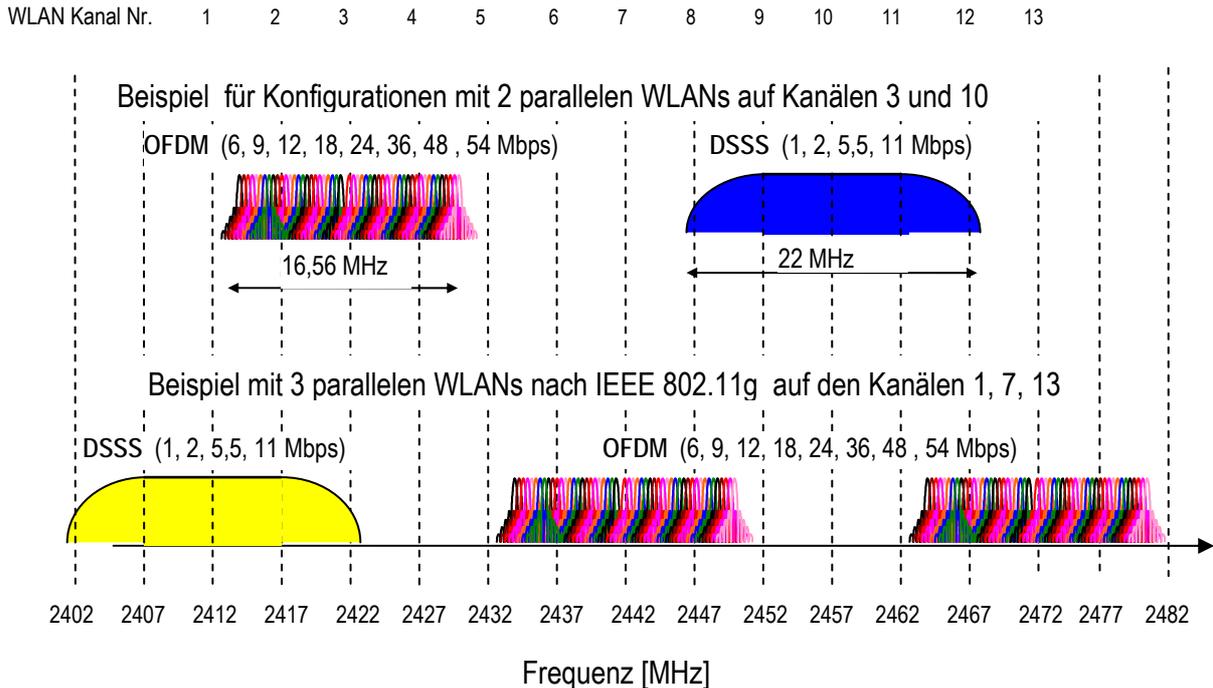
Datenrate [Mbps]	Modulation Einzelträger	Übertragungsverfahren	Faltungs-Kodiertrate	Bemerkung	optional/obligat.
1	DBPSK	DSSS (11 chip Barker Sequ.)	-	siehe IEEE 802.11	obligatorisch
2	DQPSK				obligatorisch
5,5	DQPSK	DSSS (4 8-chip CCK)	-	siehe IEEE 802.11b	obligatorisch
11	DQPSK	DSSS (64 8-chip CCK)	-		obligatorisch
6	BPSK	OFDM (48 Datenträger +4 Pilot-Träger)	1/2	siehe IEEE 802.11a  hier allerdings ausschließlich im 2,4 GHz Band	obligatorisch
9	BPSK		3/4		optional
12	QPSK		1/2		obligatorisch
18	QPSK		3/4		optional
24	16QAM		1/2		obligatorisch
36	16QAM		3/4		optional
48	64QAM		1/2		optional
54	64QAM		3/4		optional

Tabelle 2.3: Verwendete Modulations-, Übertragungs- und Kodierverfahren zur Erreichung der Bitraten nach IEEE 802.11g.

Das resultierende Frequenzspektrum entspricht für die Datenraten 1, 2, 5,5 und 11 Mbps exakt jenem in Kapitel 2.1.1 für IEEE 802.11 und IEEE 802.11b beschriebenen (vgl. Abbildung 2.1), d.h., pro System sind mindestens 22 MHz Bandbreite erforderlich. Für die Datenraten 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 und 54 Mbps entspricht das Frequenzspektrum jenem in Kapitel 2.1.2 für IEEE 802.11a beschriebenen (16,56 MHz Gesamtbandbreite aller 52 Träger, siehe Abbildung 2.6), mit dem Unterschied, dass IEEE 802.11g ausschließlich im 2,4 GHz Band arbeitet. Da das 2,4 GHz ISM Band für WLAN-Anwendungen insgesamt 13 jeweils 5 MHz breite Kanäle vorsieht, könnte eine Frequenzbelegung mit IEEE 802.11g Systemen beispielsweise wie in Abbildung 2.6 dargestellt aussehen (vgl. auch mit Abbildung 2.1).

Da sich IEEE 802.11g vom Basis-Standard 802.11 nur bezüglich der physikalischen Ebene unterscheidet, gilt für die möglichen Netzwerkarchitekturen (*ad-hoc Netzwerk* und *Infrastrukturnetzwerk*) für IEEE 802.11g das Gleiche wie schon in Kapitel 2.1.1 für IEEE 802.11 beschrieben.

Ebenso sind die für IEEE 802.11 beschriebenen Verfahren bezüglich Netzwerkaufbau und Zugriffs-Strategien (CSMA/CA) in gleichem Maße für IEEE 802.11g-WLANs gültig.



**Abbildung 2.6:** Mögliche Nutzungen des 2,4 GHz ISM-Bandes für WLANs nach IEEE 802.11g. Als Beispiel sind in der oberen Bildhälfte die Spektren zweier parallel betriebener WLAN-Systeme dargestellt, wobei das auf Kanal 3 betriebene System eine der Bitraten 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 oder 54 Mbps in OFDM überträgt und das auf Kanal 10 betriebene System entweder 1, 2, 5,5 oder 11 Mbps als DSSS-Signal. Die untere Bildhälfte zeigt schematisch das Spektrum beim Betrieb von 3 parallelen Systemen, wobei auf Kanal 1 in DSSS übertragen wird und auf den Kanälen 7 und 13 in OFDM.

## Sendeleistung

Wie generell im 2,4 GHz ISM Band für WLAN-Anwendungen, sind auch für Geräte nach IEEE 802.11g als maximale Sendeleistung 100 mW EIRP zulässig. Sendeleistungsregelung ist in IEEE 802.11g keine vorgesehen.

Bezüglich der mittleren von einem WLAN-Gerät nach IEEE 802.11g abgestrahlten Sendeleistung, gilt aufgrund des gleichen Zugriffsverfahrens (CSMA/CA) Ähnliches wie für die Geräte aller anderen IEEE 802.11 - Standards. Als Mindestabstrahlung eines aktiven WLAN-Gerätes nach IEEE 802.11g kann wieder die regelmäßige Aussendung des *Beacons* angesehen werden. Dieser wird üblicherweise alle 100 ms mit einer maximalen Dauer von ca. 0,5 ms abgestrahlt. Damit ergibt sich für diesen Fall ein maximales Verhältnis von mittlerer abgestrahlter Leistung  $P$  zu maximaler Sendeleistung  $P_{\max}$  von  $P/P_{\max} = 0,5/100 = 0,005$ .

Für ein Gerät, das unter der (theoretischen) Annahme von Vollaustattung Daten absendet, entspricht die tatsächlich abgestrahlte Leistung nahezu der zulässigen Maximalleistung. „Nahezu“ deshalb, da die Datenpaketlänge grundsätzlich beschränkt ist und auch unter der getroffenen Annahme nach jedem Datenpaket zumindest eine Bestätigungsmeldung des Empfänger-Gerätes abgewartet werden muss, wodurch sich auch für ein unter Vollast sendendes WLAN-Gerät zwangsläufig kurze Sendepausen ergeben. Bei Mittelungsintervallen von größer als einige Millisekunden liegt die mittlere von einem WLAN-Gerät maximal (unter Vollast) abgestrahlte Sendeleistung daher etwas unterhalb der maximal zulässigen Spitzenleistung (bei Annahme langer Datenpakete). Bei entsprechend kürzeren Datenpaketen sinkt auch die mittlere abgestrahlte Leistung, da bezogen auf ein fixes

Zeitintervall der relative Anteil der Sendepausen (Zeit für die Bestätigungsmeldung der Empfangsstation) steigt.

Für den praktisch üblichen Fall einer nur gelegentlichen Beteiligung eines WLAN-Gerätes am Datenverkehr im Netzwerk, sind entsprechend reduzierte mittlere abgestrahlte Sendeleistungen zu erwarten, die je nach Länge des betrachteten Mittelungsintervalles und des tatsächlichen Datenverkehrs um 2-3 Zehnerpotenzen unterhalb der maximalen Sendeleistung liegen können (untere Grenze ist durch Aussendung des *Beacons* gegeben).

#### **2.1.4 WLAN-Standard IEEE 802.11h [5]**

##### **Allgemeines und Entwicklungsgeschichte**

Der neue Standard IEEE 802.11h setzt im Wesentlichen auf IEEE 802.11a auf und erweitert diesen im Hinblick auf eine automatische Sendeleistungsregelung (TCP, *Transmit Power Control*) und eine dynamische Frequenzauswahl (DFC, *Dynamic Frequency Selection*). Mit diesen Funktionen werden Geräte nach IEEE 802.11h auch in Europa mit Sendeleistungen bis 200 mW zugelassen. Trotzdem seit 2005 bereits Produkte am Markt erhältlich sind, hat sich dieser Standard im Vergleich zu IEEE 802.11b,g bisher noch nicht stark verbreitet.

##### **Technische Beschreibung**

Im Wesentlichen entspricht IEEE 802.11h dem Standard IEEE 802.11a, jedoch erweitert um eine automatische Sendeleistungsregelung (TCP, *Transmit Power Control*) und eine dynamische Frequenzauswahl (DFC, *Dynamic Frequency Selection*). D.h., als Übertragungsverfahren kommt OFDM (48 Datenträger + 4 Pilot-Träger) im 5 GHz-Band zum Einsatz (vgl. Abbildung 2.6). Auch Modulation und Kodierung der Einzelträger wird jener in IEEE 802.11a definierten entsprechen (vgl. Tabelle 2.2). TCP und DFC sollen gemeinsam dafür sorgen, dass einerseits möglichst nur auf Kanälen gesendet wird, die nicht gerade von anderen Funkdiensten verwendet werden, und dass andererseits die in den verwendeten Kanälen abgestrahlte Sendeleistung auf das gerade notwendige Minimum reduziert wird. Damit soll die Wahrscheinlichkeit von Störungen anderer Funkdienste im gleichen Frequenzband (in Europa z.B. teilweise militärische Funkdienste und Flugnavigationsdienste) durch den Betrieb von WLANs minimiert werden.

Auf den höheren logischen Ebenen wird es keinen Unterschied zum Basis Standard IEEE 802.11 geben, d.h. bezüglich möglicher Netzwerkarchitekturen und Zugriffsverfahren gilt das in Kapitel 5.2.1 Beschriebene auch für Systeme nach IEEE 802.11h. Gleiches gilt für die Organisation des Datenverkehrs (CSMA/CA) und des Netzwerkaufbaus (siehe Kapitel 5.2.1).

##### **Sendeleistung**

Durch die Implementierung der automatischen Sendeleistungsregelung (TCP, *Transmit Power Control*) und der dynamischen Frequenzauswahl (DFC, *Dynamic Frequency Selection*) sind Geräte nach IEEE 802.11h auch in Europa mit einer maximalen Sendeleistung von 200 mW EIRP zugelassen (teilweise abhängig von den nationalen Funkregulatoren). Die resultierende mittlere abgestrahlte Sendeleistung wird dann nicht nur durch den Datenverkehr bestimmt (vgl. vorherige Kapitel), sondern auch maßgeblich von der Sendeleistungsregelung abhängen. Der

Dynamikbereich der Sendeleistungsregelung wird im IEEE 802.11h Standard nicht definitiv festgeschrieben und bleibt damit gerätespezifisch. Aus der für IEEE 802.11h Geräte mitgeltenden europäischen Norm EN 301 893 (März 2005) ist jedoch eine Mindestanforderung an die Dynamik der Sendeleistungsregelung von 6 dB abzulesen<sup>5</sup>.

### 2.1.5 Wi-Fi [12]

Wi-Fi (*Wireless Fidelity*) wird häufig als eigener WLAN-Standard bezeichnet. Tatsächlich handelt es sich dabei um ein Warenzeichen (Label), das die Interoperabilität von WLAN-Produkten der IEEE 802.11 Standard-Familie bescheinigt. Ausgestellt wird dieses Zertifikat von der *Wireless Ethernet Compatibility Alliance* (WECA), welche 1999 als Non-Profit Organisation gegründet wurde.

D.h. *Wi-Fi Produkte* stellen somit keinen eigenen Funkstandard dar, sondern arbeiten (zertifiziert) nach den Standards der IEEE 802.11 Arbeitsgruppe.

### 2.1.6 Gesetzliche Grundlagen für WLANs in Deutschland

Die gesetzlichen Grundlagen für WLANs nach IEEE 802.11x sind durch die beiden RegTP Verfügungen Vfg. 35/2002 (für die Frequenzbereiche 5150-5350 MHz und 5470-5725 MHz) und Vfg. 89/2003 (für den Frequenzbereich 2400,0-2483,5 MHz) gegeben, in denen die genannten Frequenzbereiche WLAN-Funkanwendungen zugeteilt wurden. Beide Verfügungen basieren auf der Grundlage von §47 Abs. 1 und 5 des Telekommunikationsgesetzes (TKG) vom 25.Juli 1996 (BGBl. I S. 1120) in Verbindung mit der Frequenzzuteilungsverordnung (FrequZutV) vom 26.April 2001 (BGBl. I S. 829).

Für den Frequenzbereich von 2400,0-2483,5 MHz legt Vfg.89/2003 eine maximale äquivalente (EIRP) Strahlungsleistung von 100 mW fest.

Die Festlegungen für die WLAN-Frequenzbereiche in den 5 GHz Bändern sind etwas komplizierter, da hier teilweise auch andere kritische Funkanwendungen operieren (z.B. militärische Radaranwendungen). Als maximal zulässige äquivalente EIRP Strahlungsleistungen in den Frequenzbereichen 5150-5350 MHz bzw. 5470-5725 MHz werden in Vfg. 35/2002 200 mW bzw. 1 W festgelegt, wobei die Anwendbarkeit dieser Maximalwerte ein automatisches Frequenzwahlverfahren und eine automatische Sendeleistungsregelung (Minstdynamik 6 dB) voraussetzt.

Die ausschließliche Nutzung des Frequenzbereichs 5150-5250 MHz ist auch ohne automatisches Frequenzwahlverfahren erlaubt, solange die maximale äquivalente Strahlungsleistung (EIRP) 60 mW (mit automatischer Sendeleistungsregelung mit mindestens 6 dB Regelbereich) bzw. 30 mW (ohne automatische Sendeleistungsregelung) nicht überschreitet.

Sowohl Vfg. 35/2002 als auch Vfg. 89/2003 treffen neben Festlegungen für die maximale EIRP Sendeleistung weiters auch Festlegungen für die maximal zulässige spektrale Leistungsdichte innerhalb der Funkkanäle.

---

<sup>5</sup> Als maximale Sendeleistung auf der niedrigsten Sendeleistungsstufe werden in EN 301 893 Werte von 17 dBm (im Frequenzbereich von 5,250 bis 5,350 GHz) und 24 dBm (im Frequenzbereich von 5,470 bis 5,725 GHz) festgelegt. Als maximale Sendeleistungen in diesen Frequenzbändern sind 23 dBm bzw. 30 dBm definiert. Diese 6 dB Mindestanforderung findet man auch in der RegTP Verfügung 35/2002, welche die gesetzliche Grundlage für die Frequenznutzung durch WLANs im 5 GHz Bereich in Deutschland bildet.

## 2.1.7 Gegenwärtige WLAN-Produkte, Anwendungen und Antennen

WLANs in Europa werden derzeit nach wie vor von Geräten nach IEEE 802.11b beherrscht, wobei neu auf den Markt kommende Geräte meistens bereits IEEE 802.11g implementiert haben (kompatibel zu IEEE 802.11b). Angeboten werden WLAN-Einsteckkarten für PCs und Laptops, WLAN-Module zum Anschluss diverser Computer-Peripherie (Drucker, Scanner, u.s.w.), komplette WLAN-Lösungen inklusive *Access Point* Module, um nur einige Beispiele zu nennen.

Die Verbreitung von Geräten nach IEEE 802.11h hat zwar 2005 begonnen, schreitet aber nur sehr zögerlich voran.

Geräte nach IEEE 802.11a sind seit 2001 prinzipiell erhältlich, müssen in Europa aufgrund der oben genannten Regulierungs-Problematik jedoch auf maximal 30 mW Sendeleistung gedrosselt werden. Im Vergleich zu Geräten nach IEEE 802.11b und IEEE 802.11g sind Geräte nach IEEE 802.11a daher in Europa selten. Bei den angebotenen Produkten handelt es sich zumeist um „Dual Band“-Module die sowohl IEEE 802.11a als auch IEEE 802.11b unterstützen.

Weiters werden in Zusammenhang mit IEEE 802.11a von einigen Anbietern WLAN-Lösungen mit Datenraten bis zu 108 Mbps angeboten. Es handelt sich dabei um Systeme die 2 parallele IEEE 802.11a Funkkanäle (je 54 Mbps) zur Übertragung nutzen („bündeln“) und auf diese Weise eine theoretische Datenrate von 108 Mbps übertragen können. Allerdings zeigten Tests [13] mit solchen Systemen, dass aufgrund des zur Abstimmung der beiden parallelen Kanäle notwendigen Verwaltungsaufwandes die tatsächlich nutzbaren Datenraten kaum über 30-40 Mbps liegen.

Aufgrund der geringen Kosten und der mittlerweile etablierten Technologien erstreckt sich der Anwendungsbereich von WLAN-Systemen nach IEEE 802.11b und IEEE 802.11g in Europa heute nicht mehr nur auf Insel-Anwendungen im privaten und im Bürobereich. Diese Technologien werden auch als Internetzugänge im öffentlichen Bereich (so genannte *HotSpots*, z.B. auf Flughäfen, Bahnhöfen, u.s.w.) immer häufiger eingesetzt. Allein in Deutschland sind gegenwärtig laut [7] bereits über 12000 solcher ‚Hot Spots‘ im öffentlichen Bereich im Betrieb. Europaweit wird derzeit von ca. 50.000 solcher ‚*Access Points*‘ ausgegangen, Tendenz weiterhin steigend.

### Antennen

Als Sendeantennen kommen je nach WLAN-Gerätetyp bzw. Anwendung unterschiedlichste Antennenformen zum Einsatz. WLAN-Adapter in Form von Einsteckkarten für PCs und Laptops sind meist mit sehr einfach aufgebauten Dipol bzw. Patch Antennen (direkt als gedruckte Schaltung aufgebaut) ausgestattet. Daneben sind aber auch externe Antennen (z.B. am Schreibtisch aufstellbar, mit geringem Antennengewinn, z.B. 3-5 dBi) im Einsatz. Zur Ausstattung von *Access Points* im Outdoor-Bereich sind teilweise auch Antennen mit größerer Richtwirkung (Antennengewinn z.B. 18 dBi<sup>6</sup>) erhältlich. Die maximal zulässigen Sendeleistungen für WLAN-Komponenten im 2,45 GHz-Band sind in Europa als 100 mW EIRP (äquivalente Strahlungsleistung unter Annahme isotroper Abstrahlung) definiert. Diese Begrenzung der maximal erlaubten Sendeleistung für WLANs erfolgt in

---

<sup>6</sup> z.B. Patch-Antenne *Netgear ANT24D18*

Deutschland durch die RegTP-Verfügung Vfg. 89/2003 (siehe Kapitel 2.1.6). Bei Verwendung von Gewinnantennen muss daher (den Vorschriften der Regulierungsbehörde folgend) die Ausgangsleistung auf entsprechende Werte unterhalb des EIRP-Limits (100 mW bei WLAN im 2,4 GHz ISM-Band) reduziert werden. Da, wie erwähnt, am Markt jedoch nicht nur WLAN-Komponenten mit fix installierter Antenne erhältlich sind, sondern z.B. *Access Points* mit unterschiedlichen Antennen (mit unterschiedlichem Antennengewinn) ausgestattet werden können, ist in der Praxis nicht auszuschließen, dass es zu (eigentlich nicht gesetzeskonformen) Situationen kommen kann, in denen in Hauptstrahlrichtung von Gewinnantennen Leistungsflussdichten auftreten, die wesentlich über jenen liegen, wie sie bei Einhaltung des EIRP-Limits zu erwarten wären.

## 3 MESS- UND BERECHNUNGSMETHODEN

### 3.1 Messung von WLAN-Immissionen

Für die Messung von HF-Immissionen einzelner interessierender Funkdienste in der Praxis, wie hier gefordert, kommen grundsätzlich nur frequenzselektive Messverfahren in Betracht, da andernfalls (mit Breitband-Messmethoden) Immissionsanteile von anderen Funkdiensten (aus anderen Frequenzbereichen) nicht von den eigentlich interessierenden unterschieden werden können.

#### 3.1.1 Grundlagen der frequenzselektiven Messung von WLAN-Immissionen

Die frequenzselektive Messung hochfrequenter elektromagnetischer Felder wird mittels Spektrumanalysator und (kalibrierter) Messantenne durchgeführt. Abbildung 3.1 zeigt das Grundprinzip eines solchen Messaufbaus.

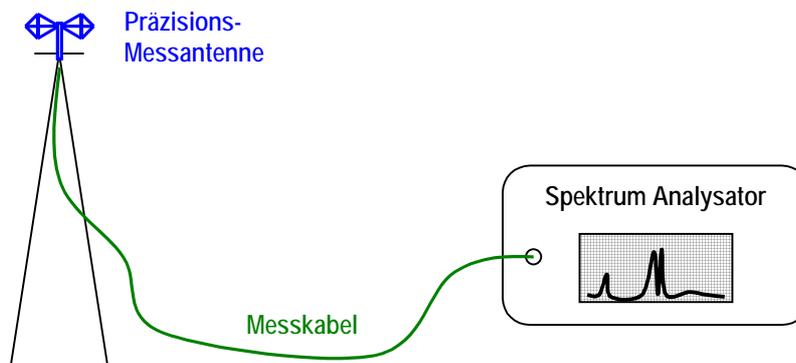


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung einer frequenzselektiven Messung elektromagnetischer Felder.

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 (und optional über ein zusätzliches Dämpfungsglied um Fehlanpassungseffekte zu vermindern) 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. [14], 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. Weiters muss angemerkt werden, dass die Auswahlmöglichkeiten für die genannten Parameter stark von der Klasse (und damit vom Preis) des Spektrumanalysators abhängen. Qualitativ höherwertige Geräte bieten wesentlich höhere maximale *Auflöse- und Videobandbreiten*, sowie Mittelungsfunktionen (*Average*) und, für viele Messungen vorteilhaft, *Channel Power* bzw. *Band Power*-Funktionen an, 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 speziell für die hier diskutierten WLAN-Signale 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.

### **3.1.2 Messtechnisch relevante Eigenschaften von WLAN-Signalen**

Aufgrund der in den WLAN-Standards IEEE 802.11x definierten Modulations- und Mediums-Zugriffsverfahren ergeben sich vor allem die folgenden drei Eigenschaften von WLAN-Signalen (Immissionen), die für die korrekte Messparameterwahl von Bedeutung sind (siehe auch [11]).

#### ***Stochastische Signalcharakteristik im Zeitbereich***

Aufgrund der bei WLAN eingesetzten Übertragungsverfahren (DSSS bzw. OFDM) ergeben sich im Zeitbereich rauschähnliche (stochastische) Signalformen, die für eine korrekte Messung den Einsatz von RMS-Detektoren notwendig machen. Die Messung stochastischer Signale mit PEAK-Detektoren würde auf eine systematische Überschätzung der Immissionsgrößen führen (Abbildung 3.2). Ferner muss die Videobandbreite (VBW) bei Verwendung von RMS-Detektoren wesentlich größer als die Auflösungsbandbreite (RBW) gewählt werden.

#### ***Große Bandbreite im Frequenzbereich***

Je nach betrachtetem Standard liegt die von einem WLAN-Kanal im Frequenzspektrum belegte Bandbreite bei ca. 22 MHz (bei DSSS-Übertragung nach IEEE 802.11b) oder bei ca. 16,7 MHz (bei OFDM-Übertragung nach IEEE 802.11a,g,h). Diese Bandbreiten liegen deutlich oberhalb üblicher maximaler Auflösungsbandbreiten gängiger Spektrumanalysatoren. D.h., die Messung muss

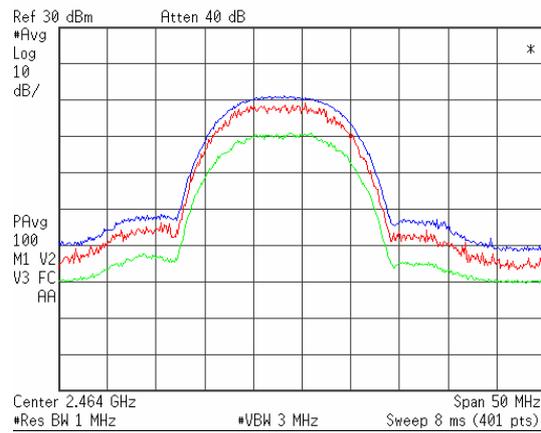
zwangsläufig Auflösungsbandbreite < Signalbandbreite durchgeführt und nachträglich entsprechend folgender Beziehung (z.B. [15]) korrigiert werden:

$$P_{eff} [\text{dBm}] = P_{gemessen} [\text{dBm}] + 10 * \log_{10} \left( \frac{\text{Signalbandbreite}}{\text{äquivalente Rauschbandbreite}} \right) \quad (1)$$

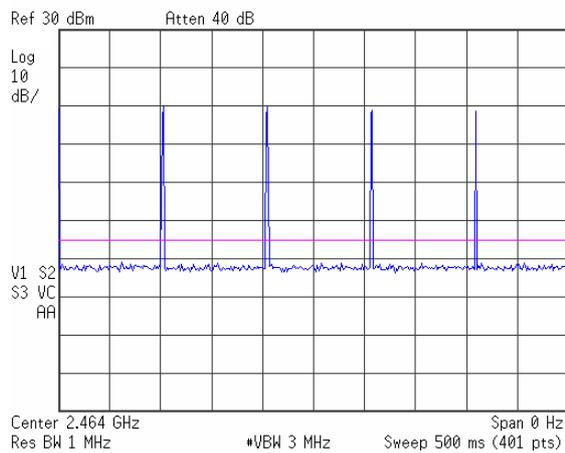
Unter *äquivalenter Rauschbandbreite* eines realen Filters versteht man in diesem Zusammenhang die Bandbreite eines idealen Rechteckfilters, dessen Fläche unter der quadrierten Filter-Übertragungsfunktion gleich jener des realen Filters ist.

### **Nicht kontinuierliche, datenverkehrsabhängige Signalausendung**

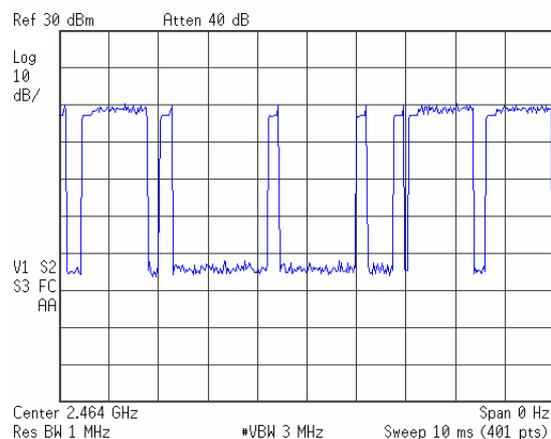
Diese Eigenschaft von WLAN-Geräten ist für die korrekte Immissionsbeurteilung von besonders großer Bedeutung. Aufgrund des für WLANs (wie auch für viele anderen Datennetze) definierten CSMA/CA Zugriffsverfahrens senden WLAN Geräte nur bei Bedarf "HF-Pakete" (*Bursts*) aus. D.h., solange ein WLAN-Gerät keine Daten sendet oder empfängt, entstehen keine HF-Emissionen. Eine Ausnahme stellen diesbezüglich *Access Points* dar, die aus netzwerkorganisatorischen Gründen immer, in regelmäßigen Abständen sogenannte *Beacons* (alle 100 ms ein maximal ca. 0,5 ms langer HF-Burst) aussenden (Abbildung 3.3). Die Clients hingegen emittieren HF-Felder nur, wenn sie Daten senden oder empfangen, wobei die mittleren HF-Emissionen beim Empfangen von Daten naturgemäß wesentlich geringer sind (es werden nur Acknowledge-Pakete gesendet) als im Fall des Sendens (Abbildung 3.4). Wie groß die Zeitanteile des Sendens und des Nicht-Sendens (effektiver Duty Cycle) einzelner Geräte in einem Netzwerk sind, ist daher a priori völlig unbestimmt und hängt vom Datenverkehr innerhalb des gesamten Netzwerks ab. Für die praktische Immissionsmessung bedeutet dies, dass im *Live-Modus* des Spektrumanalysators kein stehendes Bild erzielbar ist, das die Immissionsgröße quantifizierbar machen würde. Die einfachste Abhilfe für dieses Problem stellen Messungen im *MaxHold-Modus* dar, bei denen die Maximalwerte bei jedem Sweep-Durchlauf festgehalten werden. Damit entsteht nach einigen Sweep-Durchläufen ein stehendes Bild des gesamten WLAN-Spektrums auf der Anzeige des Spektrumanalysators, wobei die Amplitude des Spektrums durch den Immissionsanteil mit der größten Burstamplitude (üblicherweise vom nächstgelegenen Gerät) bestimmt ist, auch wenn diese Bursts möglicherweise nur relativ selten auftreten. Daraus kann abgeleitet werden, dass derartige MaxHold-Messungen immer zu einer Überbewertung der tatsächlichen mittleren Immission führen müssen. Das Ausmaß dieser Überbewertung im Hinblick auf die mittlere Exposition kann dabei, je nach Situation, mehrere Zehnerpotenzen betragen (vgl. dazu auch die näheren Ausführungen in [11]). Ein Ausweg aus dieser Situation besteht in *Channel Power* Messungen, bei denen die spektrale HF-Leistung innerhalb eines wählbaren Frequenzbereichs summiert (integriert) wird. In Kombination mit Mittelungsfunktionen kann auf diese Weise die tatsächliche mittlere HF-Immission in der Messposition bestimmt werden. Eine andere näherungsweise Möglichkeit wären Messungen im *Zero-Span* Modus, der im Wesentlichen einer Darstellung der Immissionsgröße im Zeitbereich entspricht (Abbildungen 3.3 und 3.4). Aus der Burstamplitude (würde dem Messwert bei MaxHold-Messung entsprechen) und dem aus der Zeitbereichsdarstellung näherungsweise ermittelbaren effektiven Duty Cycle könnte auch auf diese Weise auf die tatsächlichen (gemittelten) HF-Immissionen rückgerechnet werden.



**Abbildung 3.2:** Messung des Frequenzspektrums des HF-Ausgangssignals eines WLAN Access Points (IEEE 802.11b) bei voller Übertragungskapazität. Blaue Kurve: PEAK-Detektor im MAX-HOLD Modus; rote Kurve RMS-Detektor im MAX-HOLD Modus; grüne Kurve: gemittelte (800ms) Channel Power-Messung.



**Abbildung 3.3:** Beacon-Aussendung (im Zeitbereich) eines Access Points ohne Datenverkehr im Netzwerk. Die mittlere abgestrahlte HF-Leistung ist demnach entsprechend gering.



**Abbildung 3.4:** HF-Aussendung (im Zeitbereich) eines Access Points während Datenverkehr im Netzwerk. Die einzelnen HF-Bursts werden in unregelmäßigen Abständen abgestrahlt (abhängig vom Datenverkehr im Netzwerk und von der gesendeten Datenstruktur).

### 3.1.3 Kommerziell erhältliche Mess-Systeme

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 Einzelmessungen<sup>7</sup> 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 Antennensystem, ist 'Field Nose' (Abbildung 3.5a). 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 separate Pakete 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 3.1.1. Als weiterer Vorteil kann die Tatsache

---

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

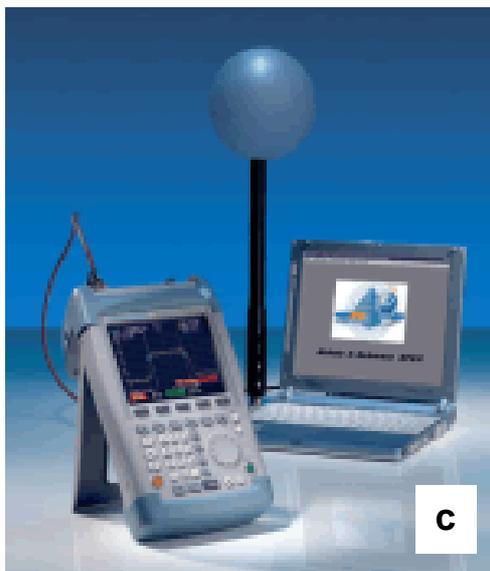
genannt werden, dass es sich bei diesem System um einen rein passiven Sensor handelt und somit Messfehler zufolge Übersteuerung von Vorverstärkern (in anderen Systemen zur Empfindlichkeitserhöhung teilweise verwendet) ausgeschlossen sind. Die Anschaffungskosten für Antenne (inklusive Drehvorrichtung und Messkabel) und Software sind mit ca. 6.000,- Euro als vergleichsweise preiswert einzustufen.

Ein anderes, seit kurzem am Markt erhältliches, quasi-isotropes und frequenzselektives System, ist das *Selektiv Radiation Meter* SRM 3000 von Narda Industries, Inc., USA (Abbildung 3.5b). 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. Nachteile des Systems liegen in der relativ großen minimalen Sweep Zeit ( $\geq 200$  ms) und in eingeschränkter Flexibilität bei der Einstellung der Messparameter (aufgrund der relativ einfachen Konzeption des Handgerätes im Vergleich zu üblichen Spektrumanalysatoren). Der Vorteil des Systems liegt zweifellos in seiner Kompaktheit. Als Mindestdauer für eine komplette quasi-isotrope Immissionsmessung (abhängig von der Sweep Zeit), ist für hier interessierende Messungen eine Zeit von wenigen Sekunden erreichbar. Die Anschaffungskosten des Systems liegen bei ca. 15.000,- Euro.

Ein von Rohde und Schwarz GmbH & Co. KG, Deutschland, entwickeltes System ist TS-EMF (Abbildung 3.5c). 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 von der Fa. Antennessa auf den Markt gebracht. Das unter dem Namen Comobase vermarktete Mess-System besteht ebenfalls aus einem ‚quasi-isotropen‘ Sensor, bei dem zeitlich hintereinander (im Multiplex) die drei Raumkomponenten erfasst und ausgewertet werden (Abbildung 3.5d). 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.



**Abbildung 3.5:** 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)

## 3.2 Numerische Expositionserfassung

Neben der messtechnischen Expositionserfassung sind auch numerische Feldberechnungsmethoden einsetzbar, wobei im hier interessierenden Fall großräumiger Feldverteilungen optische Näherungsverfahren sehr vorteilhaft eingesetzt werden können. Diese Verfahren finden in der Simulation elektromagnetischer Felder dort ihren Einsatz, wo aus Gründen des Arbeitsspeicherbedarfs, nicht mehr auf feldtheoretische Verfahren wie z.B. MoM, FEM oder FDTD zurückgegriffen werden kann. Grundlage für die optischen Verfahren hinsichtlich Reflexion und Transmission sind die „Fresnel’schen Gleichungen“, und für Beugungsphänomene die geometrische bzw. vereinheitlichte Beugungstheorie (*GTD/UTD, Geometrical Theory of Diffraction/ Unified Theory of Diffraction*). Die *GTD/UTD* setzt voraus, dass es sich bei allen vorkommenden Wellen um rein planare Wellen handelt.

Die Vorteile der *GTD/UTD* sind keine Limitierung bezüglich maximaler Objektgrößen und keine Abhängigkeit der Simulationsdauer von der Frequenz, wie bei den feldtheoretischen Verfahren.

Die Hauptanwendung der optischen Verfahren liegt in der Berechnung von Feldverteilungen in großräumigen Feldgebieten (z.B. zur Funknetzplanung in der Mobilkommunikation).

Hinsichtlich der grundsätzlichen Berechnungsstrategie derartiger Verfahren werden üblicherweise 2 Methoden, *Ray Launching* und *Ray Tracing* unterschieden, wobei gegenwärtige Software-Produkte oftmals beide Strategien vorteilhaft kombinieren.

### 3.2.1 Ray Launching (Methode der Strahlensendung)

Bei der Methode der Strahlensendung (*Ray Launching*) werden von der Sendeantenne Strahlen in alle Richtungen ausgesandt. Meist wird dabei der gesamte Raumwinkel  $4\pi$  in  $N$  gleich große Sektoren unterteilt, und jeweils ein Strahl durch den Mittelpunkt eines solchen Sektors ausgesandt. Diese Strahlen werden nun auf ihrem Weg durch die Umgebung verfolgt; insbesondere wird die Dämpfung jedes Strahls durch die Freiraumdämpfung berücksichtigt. Jeder Strahl repräsentiert einen gewissen Raumwinkel. Unterschreitet die Energie in einem Strahl einen gewissen Wert, so wird die Beobachtung dieses Strahls abgebrochen, und der nächste Strahl betrachtet. Bei der Strahlensendung werden Dämpfung durch Reflexion oder Transmission berücksichtigt, ebenso wie das Entstehen neuer Strahlen bei der Reflexion an einer Grenzschicht. Bei ausgefeilten Modellen wird auch die Beugung an Kanten berücksichtigt; auch hier entstehen an jeder Kante mehrere neue Strahlen, die gemäß dem Beugungsgesetz unterschiedliche Amplituden und Richtungen haben. Dabei besteht ein Kompromiss zwischen Genauigkeit der Modellierung (wann soll man die Strahlbeobachtung abbrechen, wie werden Mehrfachbeugungen berücksichtigt, ....) und Rechenzeit.

Mit der Strahlensendungsmethode erhält man (für eine fixe Sendeantennenposition) die Empfangsleistung in einem ganzen Gebiet, allerdings ist der Rechenaufwand erheblich. Abbildung 3.6 zeigt ein vereinfachtes Schema zur Veranschaulichung des Ray Launching.

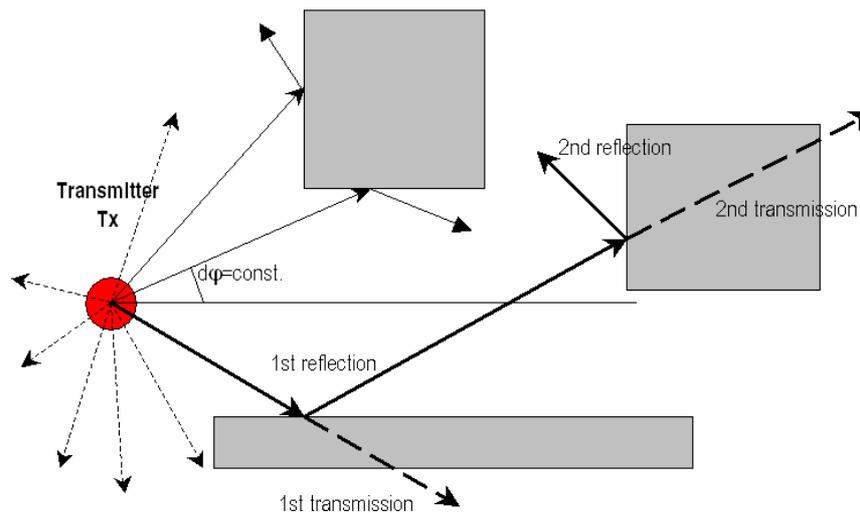


Abbildung 3.6 Schema zur Veranschaulichung der Ray Launching Methode.

### 3.2.2 Ray Tracing (Methode der Strahlenverfolgung)

Bei der Strahlverfolgungsmethode (*Ray Tracing*) wird nur die Empfangsleistung an einer vordefinierten Stelle im Raum berechnet. In einem ersten Schritt werden alle Strahlen ermittelt, über die Energie vom Sender zu den definierten Empfängerpunkten gelangen kann. Dies wird meist mit dem Spiegelungsprinzip durchgeführt: Strahlen, die über eine Reflexion zum Empfänger gelangen, verhalten sich so wie Strahlen, von einer virtuellen Quelle, die sich am Ort des Spiegelbildes (bezüglich der reflektierenden Oberfläche) der echten Quelle befindet. Natürlich muss die Dämpfung durch die endlichen Reflexionsfaktoren bei der Berechnung der Stärke der virtuellen Quelle berücksichtigt werden.

Mit dieser Methode können Einfach- und Zweifachreflexionen sehr schnell berechnet werden. Der Nachteil ist, dass der Aufwand bei Berücksichtigung von mehreren Reflexionen exponentiell steigt.

Abbildung 3.7 zeigt ein vereinfachtes Schema zur Veranschaulichung des Ray Tracing.

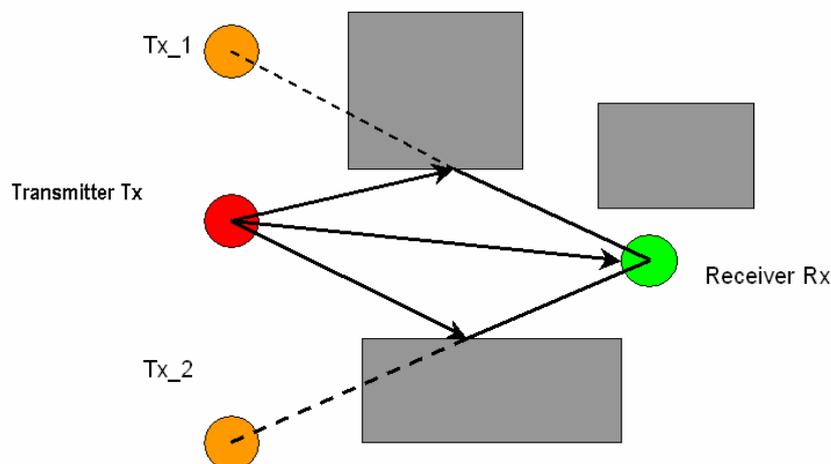


Abbildung 3.7 Schema zur Veranschaulichung der Ray Tracing Methode.

Die gegenwärtig verfügbare Version 2.0.5 der Simulations-Software *Wireless Insite* (Remcom Inc., USA) zählt derzeit zu den ausgereiftesten Simulationswerkzeugen auf dem Gebiet der optischen Näherungsverfahren für elektromagnetische Wellenausbreitungsphänomene. Es sind verschiedenste Ausbreitungsmodelle, inklusive eines vollständigen 3D-Ausbreitungsmodell verfügbar, wobei die Anzahl berücksichtigter Reflexionen, Transmissionen und Beugungen einstellbar ist und grundsätzlich phasenrichtige Strahlenverfolgung implementiert ist. Weiters bietet *Wireless Insite* große Flexibilität hinsichtlich der Modellierung der Szenarien (CAD-Objekte können importiert werden) und der Feldquellen (umfangreiche Datenbank an konfigurierbaren Antennentypen implementiert). Hinsichtlich der geometrischen Komplexität der in den Szenarien vorkommenden Objekte sind jedoch Grenzen gesetzt, die in den meisten Fällen eine geometrische Vereinfachung der Objekte für die UTD-Berechnungen erfordern. Die Ursache dafür sind die beschränkten Rechnerressourcen bzw. die beschränkte akzeptable Rechenzeit. Da die Funknetzplanung einen Schwerpunkt der Einsetzbarkeit von *Wireless Insite* darstellt, ist diese Software besonders vorteilhaft für Feldberechnungen in urbanen Bereichen einsetzbar und wird daher im Rahmen dieses Forschungsvorhabens zum Einsatz kommen. Die grundsätzliche Tauglichkeit von *Wireless Insite* für die Expositionsbewertung in den elektromagnetischen Feldern von WLAN-Installationen konnte im Rahmen eines anderen Forschungsprojektes bereits gezeigt werden ([11]).

### 3.3 EINGESETZTE MESS- UND BERECHNUNGSVERFAHREN

#### 3.3.1 Numerische Berechnung der Feldverteilung

Für die numerischen Berechnungen wurde ausschließlich das Softwarepaket ***Wireless Insite Version 2.0.5*** (Remcom Inc., USA) eingesetzt. Diese Software arbeitet auf der Grundlage optischer Ausbreitungsmodelle für die HF-Strahlung. Für alle hier betrachteten Berechnungen wurde jeweils das *Full 3D Propagation Model* verwendet, das neben Reflexion auch Transmission und Beugung berücksichtigt, wobei immer phasenrichtige Überlagerung der Einzelstrahlen erfolgt.

Die geometrische Modellbildung kann direkt im Grafik-User-Interface von *Wireless Insite* erfolgen. Weiters besteht auch die Möglichkeit verschiedene CAD-Formate zu importieren. Aufgrund der Berechnungsmethode, sowie aufgrund beschränkter Hardware-Ressourcen und der Einschränkung auf sinnvolle Rechenzeiten müssen komplexe geometrische Formen in den Modellen jedoch vereinfacht werden. Für die Berechnung auf Basis optischer Ausbreitungsmodelle werden alle im Szenario vorkommenden Objekte in einzelne Oberflächen (*Faces*) unterteilt. An diesen *Faces* werden Einzelstrahlen (je nach Materialeigenschaften) nach optischen Gesetzmäßigkeiten reflektiert. An den Kanten von *Faces* tritt Beugung auf und im Falle nicht ideal elektrisch leitender *Faces* wird (je nach Materialeigenschaften) ein Teil des Strahles reflektiert und ein Teil durchdringt die Oberfläche, wird entsprechend abgeschwächt und tritt an der gegenüberliegenden Oberfläche wieder aus (wieder unter Berücksichtigung der optischen Reflexionsgesetze).

Für das Auffinden der Ausbreitungspfade, das am Beginn jeder Berechnung steht und den Gesamt-Zeitaufwand einer Berechnung bestimmt, verwendet *Wireless Insite* die sogenannte *Shooting and Bouncing Ray (SBR)*-Methode. Es werden dabei von jedem Sender Strahlen in zu definierenden Winkelabständen ausgesendet. Dieser Winkelabstand der einzelnen Strahlen, das *Ray Spacing*, ist einer der wesentlichsten Berechnungsparameter im Hinblick auf die Aussagekraft und Unsicherheiten der

Berechnungsergebnisse. Zu groß gewähltes *Ray Spacing* führt dazu, dass in definierten Empfängerpunkten (Feldpunkten) in großer Entfernung zum Sender keine Strahlen mehr ankommen und damit die Feldverteilung nur lückenhaft erfasst wird. In weiterer Folge werden damit lokale Maxima möglicherweise nicht erfasst.

Ein weiterer wesentlicher Berechnungs-Parameter ist der *Collection Surface Radius*. Da aufgrund der endlichen Anzahl ausgesendeter Strahlen die Wahrscheinlichkeit gegen Null geht, dass ein Strahl genau durch einen definierten Empfängerpunkt trifft, ist es notwendig für jeden definierten Empfängerpunkt (Feldpunkt) einen ihm zugeordneten Raumbereich festzulegen. Alle Strahlenpfade welche die Begrenzung dieses Raumbereichs (*Collection Surface*) schneiden, werden als Pfade zum betreffenden Empfängerpunkt erkannt. Die Größe dieses Raumbereiches wird durch den *Collection Surface Radius* festgelegt. Zur Beschleunigung des Algorithmus zum Auffinden der relevanten Strahlenpfade vom Sender zum jeweiligen Empfängerpunkt kann zusätzlich eine *Receiver Bounding Box* definiert werden. Es werden damit (je nach definierter Größe der *Receiver Bounding Box*) zunächst mehrere Empfängerpunkte zusammengefasst und in einem ersten Schritt alle Strahlen gesucht, welche die *Receiver Bounding Box* schneiden. Auf diese Weise kann der Algorithmus zunächst eine grobe Vorauswahl an Strahlenpfaden ermitteln, bevor im Detail nach Strahlen gesucht wird, welche Schnittpunkte mit den *Collection Surfaces* der Empfängerpunkte aufweisen. Insgesamt kann mit dieser „schrittweisen“ Vorgehensart eine signifikante Verringerung der Rechenzeit erreicht werden. Die Wahl der Größe der *Receiver Bounding Box* hat keinen Einfluss auf das Rechenergebnis, sondern nur auf die Berechnungsdauer.

Aus dem oben Gesagten ist offensichtlich, dass neben der Detailliertheit der Feldraummodellierung und der Quellenmodellierung (Antennenpattern, Sendeleistung) vor allem die Wahl des *Ray Spacings* und des *Collection Surface Radius* unmittelbaren Einfluss auf die numerische Genauigkeit des Berechnungsergebnisses haben.

Da für die optimale Wahl von *Ray Spacing* und *Collection Surface Radius* stets ein vom jeweiligen Szenario abhängiger Kompromiss zwischen Rechenzeit und erzielbarer Genauigkeit getroffen werden muss, sind entsprechende Überlegungen spezifisch für jedes Szenario anzustellen.

Im folgenden Kapitel werden einige diesbezügliche Überlegungen angestellt und die auf Basis derartiger numerischer Berechnungen erzielbaren Genauigkeiten diskutiert.

### **3.3.1.1 Unsicherheiten und Grenzen der Genauigkeit**

Im Hinblick auf die mit gegenwärtigen optischen Feldberechnungsalgorithmen erreichbaren Genauigkeiten muss aus physikalischer Sicht zwischen numerischen Unsicherheiten der Berechnungsmethode und Unsicherheiten zufolge der notwendigen Vereinfachungen bei der Modellierung der Szenarien unterschieden werden.

Zur letztgenannten Gruppe sind vor allem folgende Beiträge zu zählen:

- Vereinfachungen der Objekte im Feldraum und deren Geometrie
- Unsicherheiten bezüglich Materialparameter (Leitfähigkeit, Permittivität)
- Unsicherheiten/Vereinfachungen bezüglich Antennencharakteristik

Die wichtigsten Unsicherheitsbeiträge seitens der Berechnungsmethode sind:

- Beschränkte Anzahl von Reflexionen, Transmissionen, Beugungen
- Vereinfachungen durch *Ray Spacing* und *Collection Surface Radius*

Im Bezug auf die in der Realität vorherrschenden Immissionen an bestimmten Orten sind weiters die in der Praxis immer vorhandenen dynamischen Veränderungen der Ausbreitungsverhältnisse (wie z.B. durch sich bewegende Objekte und/oder Personen) als wichtige Unsicherheitsfaktoren zu nennen.

Welche Unsicherheitsfaktoren dominieren, hängt üblicherweise vom konkret untersuchten Szenario ab. Dennoch können, wie im Folgenden gezeigt, einige grundlegende Regeln zur Minimierung der Unsicherheiten aufgestellt werden.

### **Auswirkung von Modellierungsvereinfachungen**

Abbildung 3-1 zeigt ein Beispiel-Szenario für das untersucht wurde, wie sich geometrische Vereinfachungen bei der Modellierung auf das Berechnungsergebnis auswirken. Das Szenario zeigt eine Feldquelle (vertikaler 3 dBi Dipol, 2,45 GHz, 17 dBm, z.B. WLAN Access Point) auf einem Holz-Regal an der Wand (links oben im Bild). Der interessierende Feldbereich (rote Ebene der Empfängererelemente im 5 cm x 5 cm Raster) in der gegenüber liegenden Ecke des Raumes stellt beispielsweise einen Arbeitsplatz mit Holz-, Metall- und Mauerelementen dar.

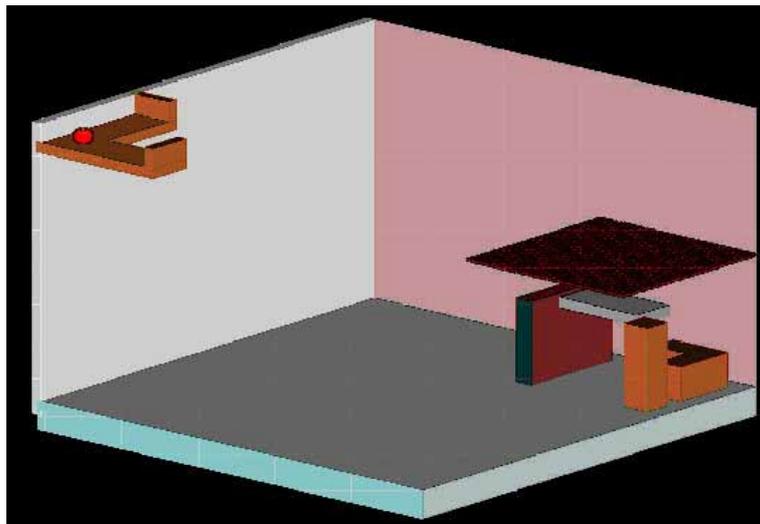


Abbildung 3-1: Beispiel-Szenario zur Untersuchung des Einflusses von Modellvereinfachungen nahe dem Sender (Feldquelle) und nahe der Empfänger (interessierender Feldbereich).

Tabelle 3-1 fasst die Berechnungsergebnisse für unterschiedliche Grade der Vereinfachung zusammen. Demnach ist vor allem eine möglichst detailgetreue Modellierung in unmittelbarer Nähe des Sender wichtig.

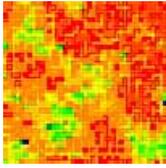
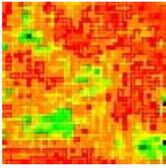
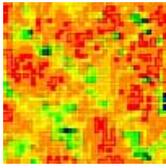
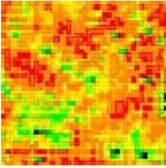
Szenario	S [mW/m <sup>2</sup> ]		Feldverteilung
	Mittelwert	Maximum	
keine Objekte im Raum	Mittelwert	0.464	
	Maximum	2.706	
	Standardabweichung	0.381	
	75. Perzentil	0.622	
Objekte (Regal) bei Sender vernachlässigt	Mittelwert	0.507	
	Maximum	4.460	
	Standardabweichung	0.417	
	75. Perzentil	0.676	
Objekte nahe Empfänger vernachlässigt	Mittelwert	0.339	
	Maximum	2.054	
	Standardabweichung	0.239	
	75. Perzentil	0.460	
Alle Objekte berücksichtigt (Abb. 2.1)	Mittelwert	0.339	
	Maximum	2.108	
	Standardabweichung	0.248	
	75. Perzentil	0.470	

Tabelle 3-1: Berechnungsergebnisse für das Beispielszenario aus Abbildung 3-1 bei unterschiedlichen Vereinfachungsgraden. Vereinfachungen nahe der Quelle wirken sich wesentlich stärker auf die Immissionen aus als Vereinfachungen im interessierenden Feldbereich.

In ähnlicher Weise wurde der Einfluss von Modellierungs-Vereinfachungen in einem komplexeren Szenario untersucht (Abbildung 3-2). Dieses Szenario entspricht der in Kapitel 5.2.2 im Detail untersuchten Immissionssituation auf einem Flughafen. Als Feldquelle wird ein Access Point auf WLAN Kanal 10 betrachtet. Die Immissionsbestimmung erfolgt in einer Horizontalebene in 1 m Höhe im Bereich der nächstgelegenen Sitzgelegenheiten ("Sessel" in Abbildung 3-2 bzw. Detaildarstellung Abbildung 3-3).

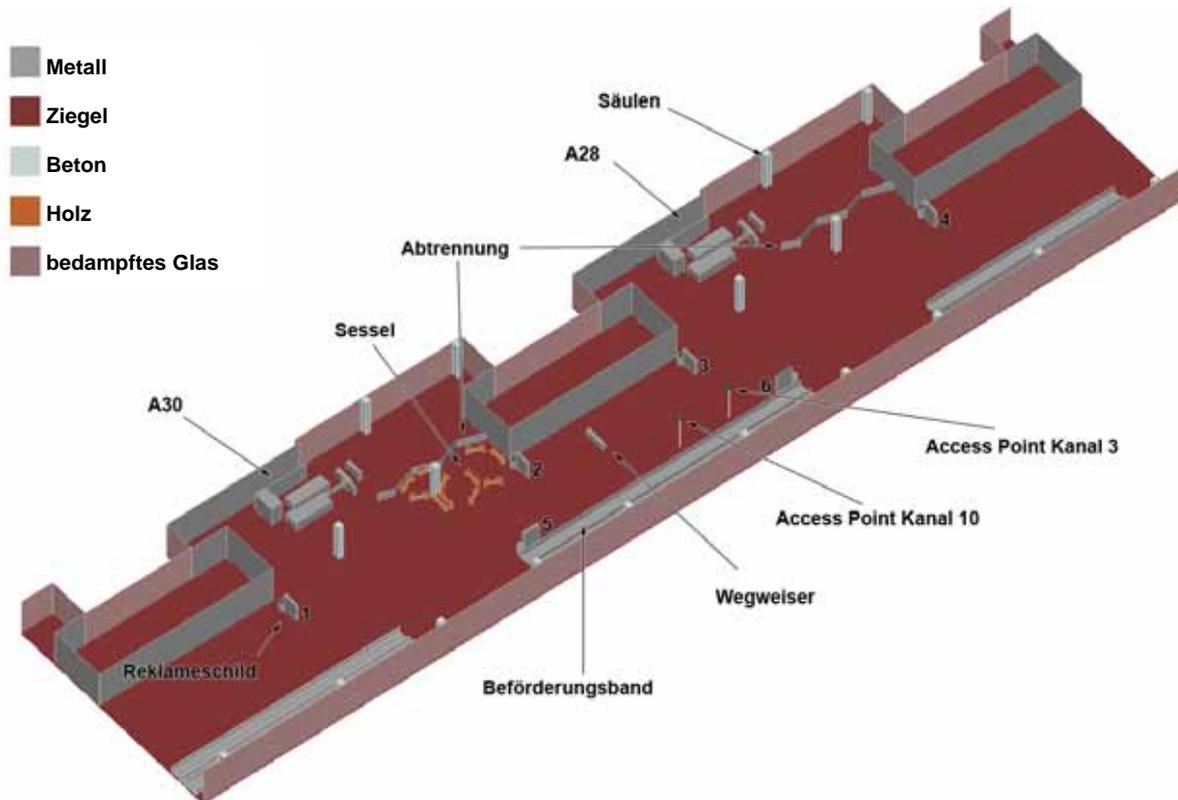


Abbildung 3-2: Detailliertes Modell eines Abschnittes eines Flughafengebäudes mit WLAN-Versorgung (2 Access Points).



Abbildung 3-3: Detaildarstellung des hinsichtlich der Immissionen interessierenden Bereiches („Sessel“ in Abbildung 3-2, 5 cm x 5 cm Empfängerpunktraster).

Tabelle 3-2 fasst die Berechnungsergebnisse für unterschiedliche Grade der Vereinfachung zusammen (vertikale 8dBi-Access Point Antenne, Sendeleistung 12dBm).

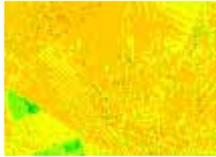
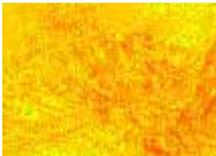
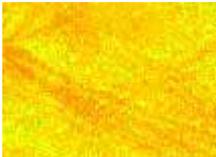
Szenario	S [mW/m <sup>2</sup> ]		Feldverteilung
keine Objekte im Raum	Mittelwert	0.0206	
	Maximum	0.233	
	Standardabweichung	0.0182	
	75. Perzentil	0.0275	
folgende sendernahe Objekte vernachlässigt (vgl. Abbildung 3-2): <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wegweiser,</li> <li>• Reklameschilder 2,3,5,6</li> <li>• Beförderungsbänder</li> </ul>	Mittelwert	0.0670	
	Maximum	1.0881	
	Standardabweichung	0.0809	
	75. Perzentil	0.0850	
Stühle im Empfängerbereich vernachlässigt	Mittelwert	0.0323	
	Maximum	0.3504	
	Standardabweichung	0.0336	
	75. Perzentil	0.0430	
Alle Objekte berücksichtigt (wie in Abbildung 3-2)	Mittelwert	0.0381	
	Maximum	0.4239	
	Standardabweichung	0.0396	
	75. Perzentil	0.0509	

Tabelle 3-2: Berechnungsergebnisse für das Szenario aus Abbildung 3-2 bei unterschiedlichen Vereinfachungsgraden. Vereinfachungen nahe der Quelle wirken sich wesentlich stärker auf die Immissionen aus als Vereinfachungen im interessierenden Feldbereich.

Die Ergebnisse zeigen wieder, dass vor allem zu starke Vereinfachungen (Weglassung von Objekten) in der Nähe des Senders problematisch sind. Vereinfachungen im Empfängerbereich wirken sich wesentlich weniger stark auf das Berechnungsergebnis aus (Abweichungen zum Fall ohne Weglassung von Objekten < 20%).

### Unsicherheiten zufolge Materialparameterwahl

Für Feldberechnungsmethoden auf Basis optischer Ausbreitungsmodelle können die elektrischen Materialkennwerte Permittivität  $\epsilon_r$  und elektrische Leitfähigkeit  $\sigma$ , anders als im Fall von feldtheoretischen Berechnungsmethoden (z.B. FDTD), nicht direkt in den Berechnungsalgorithmus eingehen. Es werden hier auf Basis dieser Materialkenngrößen Reflexions- und Transmissionsfaktoren für alle Objektoberflächen berechnet. Für die meisten praktisch eingesetzten Materialien liegen die Materialparameter jedoch teilweise nur schlecht definiert vor bzw. unterliegen großen Streuungen. Tabelle 3-3 veranschaulicht dies anhand von Kennwerten aus 2 unterschiedlichen Materialdatenbanken. Um die Größenordnung der damit verbundenen Unsicherheiten im Hinblick auf die Berechnungsergebnisse abzuschätzen, wurde das in Abbildung 3-2 dargestellte Szenario unter sonst exakt gleichen Bedingungen einmal mit den Materialparametern der *Wireless Insite*-Datenbank und einmal mit den Materialparametern der *Winprop*-Datenbank berechnet. Tabelle 3-4 zeigt den Vergleich der Berechnungsergebnisse.

	Materialparameter-Datenbank	
	Wireless Insite	WinProp
<b>Holz</b>	$\epsilon=5, \sigma=0 \text{ S/m}$	$\epsilon=1.8, \sigma=40 \text{ mS/m}$
<b>Ziegel</b>	$\epsilon=4.4, \sigma=1 \text{ mS/m}$	$\epsilon=4, \sigma=53.3 \text{ mS/m}$
<b>Metall</b>	Perfect Electric Conductor	Perfect Electric Conductor
<b>Beton</b>	$\epsilon=15, \sigma=15 \text{ mS/m}$	$\epsilon=5, \sigma=53.3 \text{ mS/m}$
<b>Fensterglas</b>	$\epsilon=2.4, \sigma=0 \text{ S/m}$	$\epsilon=19, \sigma=13.33 \text{ mS/m}$

Tabelle 3-3: Auszug aus zwei Materialdatenbanken für elektrische Eigenschaften von relevanten Materialien. Die Kennwerte unterliegen teilweise großen Streuungen.

	Ergebnis mit Wireless Insite- Materialkennwerten	Ergebnis mit WinProp- Materialkennwerten
	S [mW/m <sup>2</sup> ]	S [mW/m <sup>2</sup> ]
Mittelwert	0.0381	0.0601
Maximum	0.4239	0.6914
Standardabweichung	0.0396	0.0609
75. Perzentil	0.0509	0.0804

Tabelle 3-4: Zum Einfluss der Materialkenngrößen auf das Berechnungsergebnis.

Im hier betrachteten Szenario können die Unsicherheiten der Materialparameter also bereits zu ca. 2 dB Abweichung im Berechnungsergebnis führen.

### **Einfluss von *Ray Spacing* und *Collection Surface Radius***

Wie eingangs erwähnt ist für praktische numerische Berechnungen immer ein Kompromiss zwischen Komplexität des Berechnungsmodells und sinnvollen Rechenzeiten zu finden. Neben der geometrischen Komplexität des Modells sind für die Rechenzeiten vor allem das gewählte *Ray Spacing* und der *Collection Surface Radius* von Bedeutung. Aus grundlegenden geometrischen Überlegungen folgt, dass die Rechenzeit umgekehrt proportional zum Quadrat des *Ray Spacings* ansteigt. An einem einfachen Szenario wird im Folgenden gezeigt, wie mit feiner aufgelöstem *Ray Spacing* die Berechnungsergebnisse konvergieren.

Abbildung 3-4 zeigt das Szenario mit einem WLAN-Sender (z.B. Notebook auf Tisch, 2,45 GHz, Antennengewinn 3 dBi, Sendeleistung 17 dBm) im Hintergrund und einem Empfänger-Raster im Vordergrund. Auf Basis des 5 cm x 5 cm Empfängerpunkt-rasters wurde ein *Collection Surface Radius* von 2,5 cm gewählt und die Auswirkung unterschiedlicher Werte für das *Ray Spacing* auf das Berechnungsergebnis untersucht.

Abbildung 3-5 zeigt die Berechnungsergebnisse grafisch für *Ray Spacing*-Werte von 1°, 0,5°, 0,3°, 0,2°, 0,1° und 0,05°. Dargestellt sind jeweils nur die Strahlen, die direkt (ohne Reflexion) auf das Empfängerraster treffen. Tabelle 3-5 vergleicht die Berechnungsergebnisse im Hinblick auf maximale und mittlere Leistungsflussdichte im Empfängerpunkt-raster, sowie deren Standardabweichung. Für das hier betrachtete Szenario erweist sich demgemäß ein *Ray Spacing* von 0,2° - 0,3° als guter Kompromiss zwischen Rechenzeit und Genauigkeit des Ergebnisses. Da der Wert des jeweils optimalen *Ray Spacings* einerseits vom gewählten *Collection Surface Radius* und, basierend auf einfachen geometrischen Überlegungen, andererseits von

der Distanz zwischen Sender und Empfänger abhängt, sind Überlegungen zur Optimierung der Simulationsparameterwahl individuell für jedes betrachtete Szenario anzustellen.

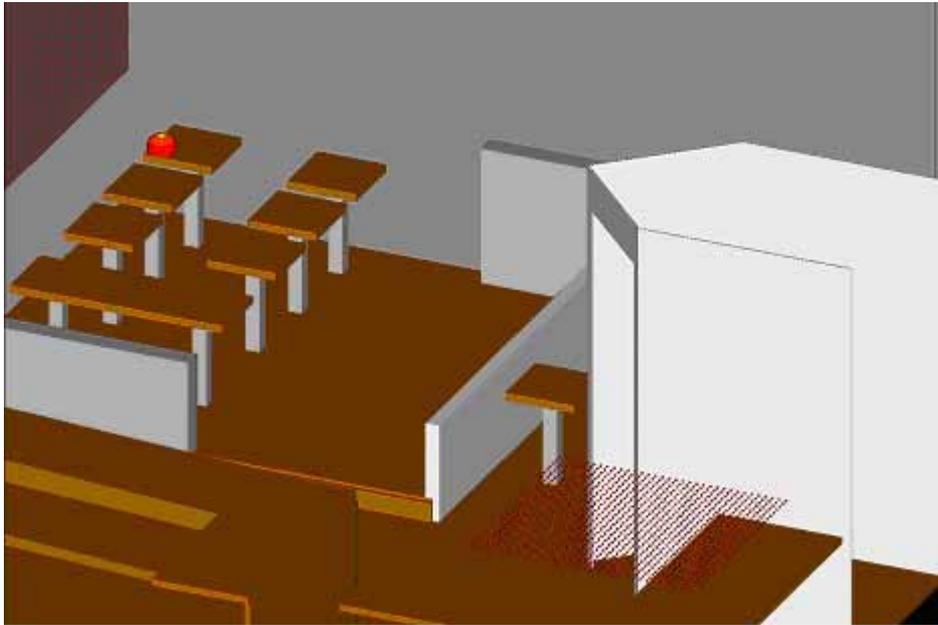


Abbildung 3-4: Betrachtetes Szenario zur Untersuchung der Auswirkung unterschiedlicher Werte des *Ray Spacings*.

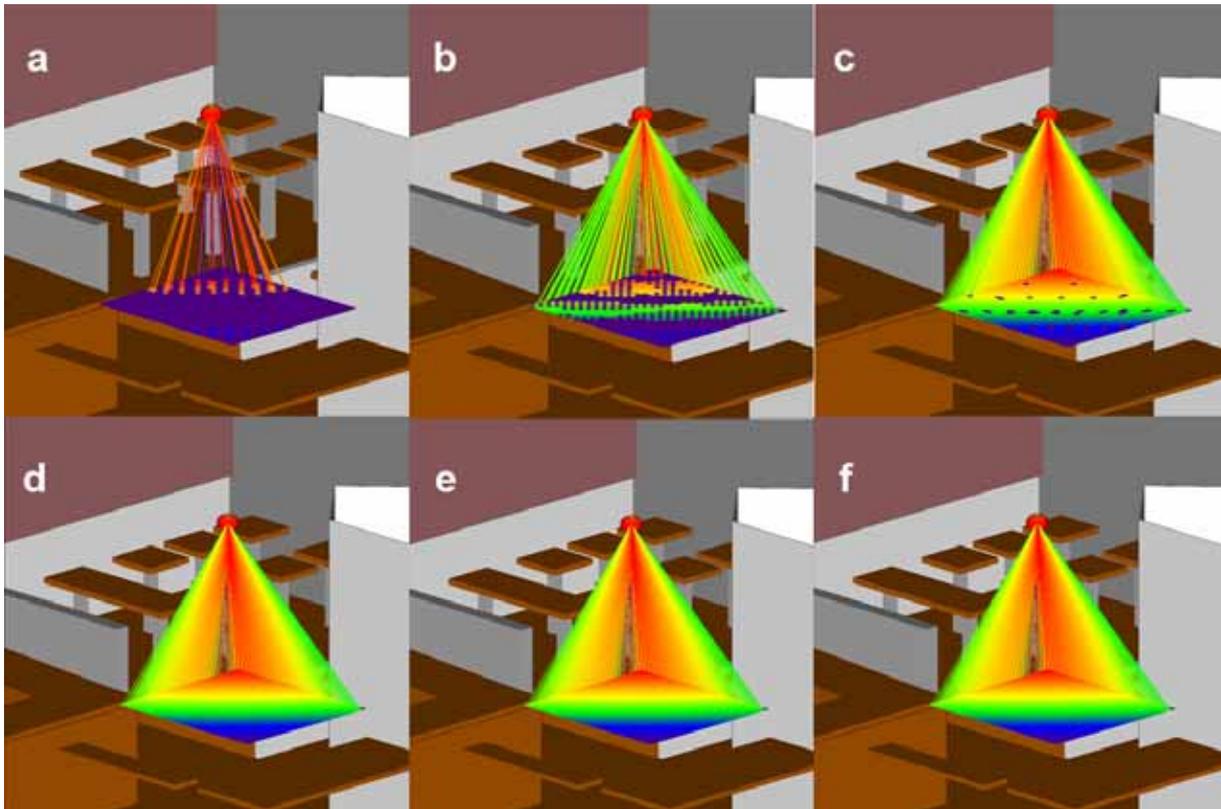


Abbildung 3-5: Auswirkung unterschiedlicher *Ray Spacing*-Werte auf das Berechnungsergebnis im Empfängerpunktraster  
a) 1°; b) 0,5°; c) 0,3°; d) 0,2°; e) 0,1°; f) 0,05°.

Ray Spacing [°]	S [mW/m <sup>2</sup> ] Mittelwert	S [mW/m <sup>2</sup> ] Maximum	S [mW/m <sup>2</sup> ] Standardabw.
1	0,0111	0,1483	0,0362
0,5	0,0509	0,1608	0,0610
0,3	0,1136	0,1608	0,0330
0,2	0,1209	0,1608	0,0145
0,1	0,1209	0,1608	0,0145
0,05	0,1209	0,1608	0,0145

Tabelle 3-5: Auswirkung des *Ray Spacings* auf das Berechnungsergebnis.

### Beschränkte Anzahl von Reflexionen, Transmissionen und Beugungen

Ebenso wie für das *Ray Spacing* ist für die Anzahl der bei der Berechnung zu berücksichtigenden Reflexionen, Transmissionen und Beugungen ein sinnvoller Kompromiss zwischen Berechnungsgenauigkeit und Rechenzeit zu treffen. Dies trifft vor allem für Szenarien zu, in denen keine direkte Sichtverbindung zwischen Sender und interessierendem Feldbereich besteht. Anhand des in Abbildung 3-6 dargestellten Szenarios wird dies gezeigt. Der Sender (2,45 GHz, Antennengewinn 3 dBi, Sendeleistung 17 dBm) befindet sich rechts nahe dem Eingangsbereich (grüne Markierung). Als im Hinblick auf die Immissionen interessierender Bereich wird ein Nebenraum (Verbindungsstüre geöffnet) betrachtet (rotes Empfängerpunktraster im Raum links hinten in Abbildung 3-6). Tabelle 3-6 fasst die Berechnungsergebnisse für unterschiedliche Anzahl von Reflexionen, Transmissionen und Beugungen, bei einem *Ray Spacing* von 0,2° zusammen.



Abbildung 3-6: Betrachtetes Szenario zur Untersuchung der Auswirkung unterschiedlicher Anzahl von berücksichtigten Reflexionen, Transmissionen und Beugungen.

Anzahl von Reflexionen (R), Transmissionen (T), Beugungen (B)	S [mW/m <sup>2</sup> ] Mittelwert	S [mW/m <sup>2</sup> ] Maximum	S [mW/m <sup>2</sup> ] Standardabw.	Berechnungs Dauer
3R 2T 0B	0,0424	0,3629	0,0441	ca. 3 h
3R 2T 1B	0,0866	0,6192	0,0756	ca. 5 h
4R 2T 1B	0,0866	0,6078	0,0758	ca. 7 h
4R 3T 1B	0,0710	0,6258	0,0687	ca. 9 h
4R 4T 3B	0,0764	0,5782	0,0702	ca. 10 h

Tabelle 3-6: Berechnungsergebnisse für das in Abbildung 3-6 dargestellte Szenario bei unterschiedlicher Anzahl berücksichtigter Reflexionen, Transmissionen und Beugungen.

Der Vergleich zeigt für das hier betrachtete Szenario, dass 3 Reflexionen, 2 Transmissionen und eine Beugung bereits ausreichend sind um die damit verbundenen Unsicherheiten auf etwa 15% einzuschränken. Auch hier gilt, wie bei der Frage des *Ray Spacing*, dass die optimale Parameterwahl stark vom jeweils betrachteten Szenario abhängig sein kann. Es müssen individuell für jedes betrachtete Szenario Überlegungen zur Optimierung der Simulationsparameter angestellt werden.

Für die im vorliegenden Bericht betrachteten Indoor-Szenarien wurden solche Optimierungsbetrachtungen angestellt. Sowohl *Ray Spacing* und die Anzahl von Reflexionen, Transmissionen und Beugungen wurden jeweils derart gewählt, dass die daraus resultierende Unsicherheit auf einen Bereich von ca.  $\pm 20\%$  beschränkt blieb. Davon ausgehend kann, unter Berücksichtigung der anderen im vorangegangenen Abschnitt diskutierten Unsicherheitsbeiträge näherungsweise das in Tabelle 3-7 dargestellte Unsicherheitsbudget für die numerischen Berechnungen erstellt werden. Der Unsicherheitsbeitrag zufolge vereinfachter Modellierung der Antennenabstrahlcharakteristik wurde dabei für eine typischerweise verwendete omnidirektionale Antenne abgeschätzt. Die Gesamtunsicherheit wurde unter der Annahme statistischer Unabhängigkeit und Normalverteilung der Einzelbeiträge berechnet. Für die Wahl der Simulationsparameter bei den Outdoor-Szenarien wurde von den an den Indoor-Szenarien gewonnenen Erfahrungswerten ausgegangen, wobei aufgrund der einfacheren Strukturierung der Outdoor Szenarien in Antennennähe teilweise mit einer geringeren Anzahl von Transmissionen und Beugungen gerechnet wurde, um die Rechenzeiten in vertretbaren Maßen (mehrere Tage) zu halten.

Beitrag <i>i</i>	Unsicherheit <i>u</i>
vereinfachte geometrische Modellierung (detailtreue Modellierung in Sendernähe, vereinfachte Modellierung in Empfängernähe)	$\pm 20\%$
Materialparameter	$\pm 50\%$
Antennencharakteristik	$\pm 15\%$
<i>Ray Spacing</i> und <i>Collection Surface Radius</i>	$\pm 20\%$
Anzahl Reflexionen, Transmissionen, Beugungen	$\pm 20\%$
Gesamtunsicherheit $u = \sqrt{\sum u_i^2}$	$\pm 63\%$

Tabelle 3-7: Abschätzung der Gesamtunsicherheit der Berechnungen zufolge der Modellierung und zufolge Einschränkungen hinsichtlich der Simulationsparameter.

Die in Tabelle 3-7 abgeschätzte Gesamtunsicherheit für die Berechnungsmethode gilt nur unter der Annahme von statischen Verhältnissen, d.h. kontinuierliche Abstrahlung mit konstanter Sendeleistung und keine bewegten Objekte im Feldraum. Die Frage nach der Absolutgenauigkeit von derartigen Berechnungsergebnissen im Hinblick auf die Immissionsverhältnisse in einem bestimmten Raumbereich in der Praxis, d.h., bei zeitlich nicht konstanter Sendeleistung und dynamisch veränderlichen Ausbreitungsverhältnissen ist sehr viel schwieriger abzuschätzen. Vor allem Bewegungen von Objekten und/oder Personen nahe dem Sender bzw. zwischen Sender und interessierendem Feldbereich können Schwankungen der Immissionen in einem Ausmaß verursachen, das wesentlich oberhalb der in Tabelle 3-7 angeführten Gesamtunsicherheit liegt. Weiters sind die angegebenen Werte für die Gesamtunsicherheit nur für räumliche Feldmittelwerte (etwa über Körperdimensionen) gültig. Für einzelne räumliche Maximalwerte der Feldverteilung müssen auf Basis von physikalischen Überlegungen wesentlich größere Unsicherheiten erwartet werden. Dies stellt jedoch keine gravierende Einschränkung dar, da im Sinne einer normgerechten Immissionsbeurteilung (z.B. nach [16]) immer nur räumlich (über Körperdimensionen) gemittelte Immissionswerte relevant sind<sup>8</sup>.

Für die hier durchgeführten Berechnungen wurde versucht eine strahlenschutztechnisch sinnvolle Vorgehensweise zu wählen. Es wurden dazu die Immissionsberechnungen sowohl ohne Anwesenheit von Personen im Feldraum, als auch mit einfachen Personenmodellen durchgeführt um die Größenordnung deren Auswirkung auf die Feldverteilung zu erfassen. Die Berechnungen selbst wurden unter der Annahme kontinuierlicher Abstrahlung jeder einzelnen Quelle im Feldbereich durchgeführt. Dies bietet den Vorteil, ausgehend von diesen Berechnungsergebnissen, die realen (zeitlich gemittelten) Immissionsverhältnisse nachträglich flexibel durch individuelle Skalierung und entsprechender Überlagerung der Einzelbeiträge ableiten zu können.

### **3.3.2 Messtechnische Immissionsbestimmung**

Alle messtechnischen Immissionsbestimmungen im Zuge dieses Vorhabens wurden mittels frequenzselektiver Messung (Messantenne und Spektrumanalysator) durchgeführt.

Um die Messungen hinsichtlich der Anforderungen zu optimieren wurde eine quasi-isotrope Messantenne mit elektrischer Umschaltung zwischen den einzelnen Polarisationsrichtungen (Sonde des NARDA SRM3000 Systems, siehe auch Kapitel 3.1.3) in Kombination mit einem leistungsstarken Spektrumanalysator Agilent E 4405B (Abbildung 3-7, rechts) verwendet. Das NARDA SRM3000 Mess-System (Abbildung 3-7 links, siehe auch [11]) wird allerdings nur als geschlossenes System, bestehend aus der elektrisch umschaltbaren quasi-isotropen Mess-Sonde und dem dazugehörigen Spektrumanalysator vertrieben. Da der Spektrumanalysator des NARDA SRM3000 Systems für die hier relevanten Messaufgaben nicht optimal geeignet ist (zu langsam), wurde eigens eine Umschaltelektronik entwickelt, welche die Verwendung der quasi-isotropen Sonde des NARDA SRM3000 Systems auch in

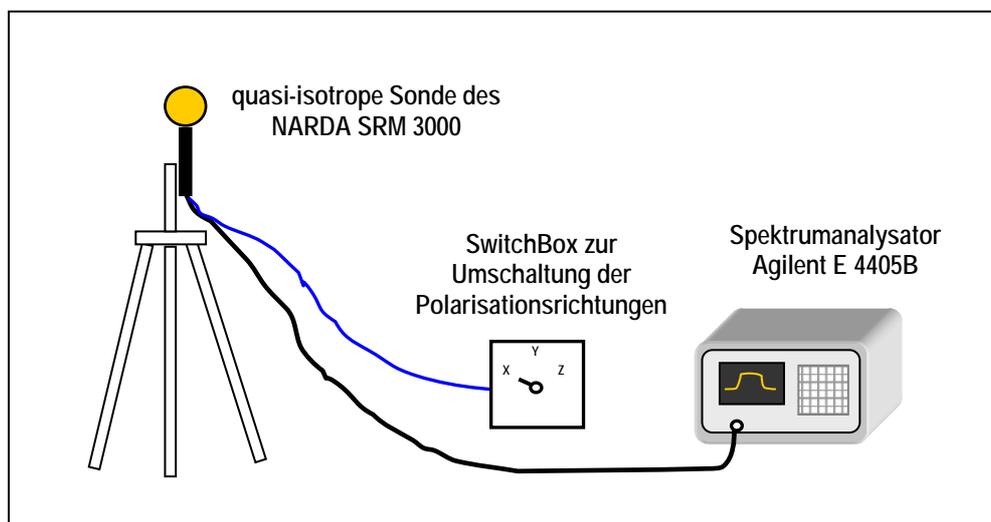
---

<sup>8</sup> Dies gilt streng genommen nur, wenn auch lokal die Einhaltung des Basisgrenzwertes gegeben ist. Diese Voraussetzung kann jedoch im vorliegenden Fall von WLAN-Fernfeld-Immissionen stets angenommen werden.

Kombination mit höherwertigen Spektrumanalysatoren erlaubt (Abbildung 3-8 und Abbildung 3-9).



**Abbildung 3-7:** Mess-System SRM 3000 von NARDA (links) und Spektrumanalysator E4405B von Agilent (rechts)



**Abbildung 3-8:** Schema des verwendeten Mess-Systems bestehend aus der quasi-isotropen Mess-Sonde des SRM3000 Systems und dem Spektrumanalysator E4405B von Agilent. Zur Umschaltung der Polarisationsrichtungen in der Sonde wurde eine entsprechende SwitchBox entwickelt.

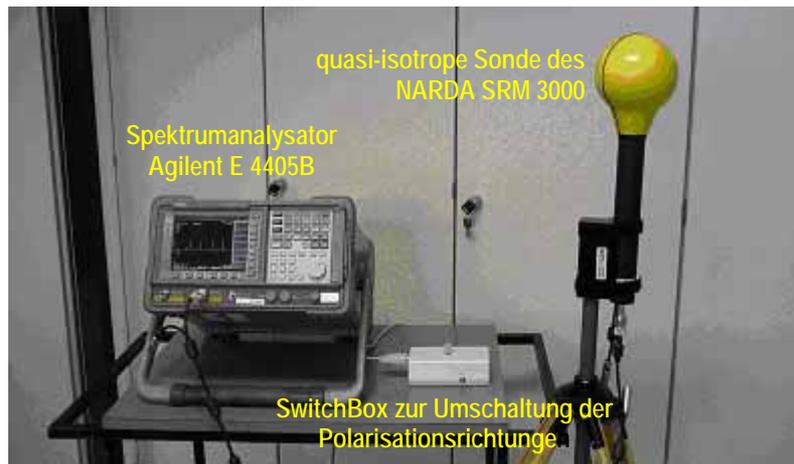


Abbildung 3-9: Foto des verwendeten Mess-Systems.

Alle Messungen wurden im Zero Span Modus des Spektrumanalysators mit RMS Detektor und einer Auflösebandbreite von 100 kHz durchgeführt, da dies bei Verwendung eines RMS Detektors und der vorliegenden Signalform der Immissionen gemäß [10] einen guten Kompromiss zwischen Schnelligkeit und Genauigkeit der Messungen darstellt. Eine entsprechende Korrektur der Messwerte aufgrund des Verhältnisses zwischen Auflösebandbreite und Signalbandbreite wurde vorgenommen (vgl. Gleichung (1) in Kapitel 3.1.2).

### 3.3.2.1 Messtechnische Unsicherheiten

Die Gesamt-Messunsicherheit kann gemäß Tabelle 3-8 aus den Beiträgen der Einzelkomponenten (aus Kalibrierzertifikaten abgeleitet) abgeschätzt werden.

Unsicherheitsbeitrag <i>i</i>	Unsicherheit <i>u</i>
Spektrumanalysator Agilent E4405B (overall amplitude uncertainty)	± 15%
Korrektur für zu geringe Messbandbreite	± 15%
Kalibrierunsicherheit Messkabel	± 5%
Kalibrierunsicherheit Antennenfaktor	± 25%
Anzahl Reflexionen, Transmissionen, Beugungen	± 20%
Gesamtunsicherheit $u = \sqrt{\sum u_i^2}$	± 39%

Tabelle 3-8: Abschätzung der Gesamtunsicherheit der Messungen.

Die in Tabelle 3-8 abgeschätzte Gesamtunsicherheit für die Messmethode gilt nur unter der Annahme von statischen Verhältnissen, d.h. kontinuierliche Abstrahlung mit konstanter Sendeleistung und keine bewegten Objekte im Feldraum. Vor allem Bewegungen von Objekten und/oder Personen nahe dem Sender bzw. zwischen Sender und interessierendem Feldbereich können Schwankungen der Immissionen in einem Ausmaß verursachen, das wesentlich oberhalb der in Tabelle 3-8 angeführten Gesamtunsicherheit liegt.

### **3.3.3 Vor- und Nachteile messtechnischer und numerischer Methoden**

Aus den voranstehenden Kapiteln ist ableitbar, dass eine physikalisch sinnvolle Immissionsbestimmung mit beträchtlichem Aufwand verbunden sein kann, unabhängig davon, ob man sich numerischer oder messtechnischer Methoden bedient. Eine einfache Regel wann welche Methode zielführender ist (im Sinne von effizient und trotzdem zuverlässig), lässt sich jedoch nur sehr schwer bis gar nicht angeben. Auf Basis physikalischer Überlegungen angeben lassen sich Vor- und Nachteile der verschiedenen Methoden, wie dies in der folgenden (nicht den Anspruch auf Vollständigkeit erhebenden) Zusammenstellung für die hier interessierenden Szenarien versucht wurde:

#### ***Messtechnische Immissionserfassung***

##### Vorteile:

- Erfassung der realen IST-Situation (keine Unsicherheiten bezüglich Quellen- und Objektmodellierung)
- Wenn die Immissionen nur an einzelnen, wenigen Punkten von Interesse, zeiteffizient durchführbar

##### Nachteile:

- großflächige Analyse der Feldverteilung aus Aufwandsgründen meist nicht möglich
- im Realbetrieb ist eine Analyse von Einzelimmissionsbeiträgen im selben Frequenzbereich meist nur schwer bis gar nicht möglich

#### ***Numerische Immissionserfassung***

##### Vorteile:

- Erfassung großflächiger Feldverteilungen (auch mit hoher räumlicher Auflösung) möglich
- Flexibilität hinsichtlich Vorhersagen für zukünftige Szenarien, bzw. für geänderte Situationen (z.B. Analyse Immissionsreduzierender Maßnahmen)
- Analyse von Einzelbeiträgen im selben Frequenzband möglich

##### Nachteile:

- erheblicher Modellierungsaufwand bei komplexen Szenarien
- erhebliche Rechenzeiten, sowie Hardwareressourcen-Bedarf bei komplexen Szenarien
- Modellierungsunsicherheiten (Objekte, Quellen, Materialparameter...)

Aus dieser Zusammenstellung können bereits für einige Immissionserfassungsaufgaben in der Praxis sinnvolle Vorgehensweisen abgeleitet werden. Ist beispielsweise nur die punktuelle Immission in einem eingeschränkten Bereich (z.B. Arbeitsplatz, oder Schlafplatz) von Interesse, so ist eine Messung der Immissionen vor Ort mit Sicherheit wesentlich effizienter und nicht von geringerer Aussagekraft als eine aufwendig zu modellierende Computersimulation.

Für die Analyse von großflächigen Immissionssituationen wird hingegen der Modellierungs- und Rechenzeitaufwand für die numerische Immissionserfassung akzeptabel sein, im Vergleich zu Immissionsmessungen an hunderten oder tausenden Punkten. Dies gilt besonders dann, wenn Einzelimmissionsbeiträge und unterschiedliche Quellen- und Ausbreitungsszenarien untersucht werden sollen. Für solche Situationen bietet die numerische Methode (eventuell unterstützt durch

verifizierenden Messungen) große Vorzüge. Zudem ist es beim Einsatz numerischer Methoden möglich (bei ausgereiften Softwaretools), durch Veränderung der Simulationsparameter Freiheiten hinsichtlich des immer zu treffenden Kompromiss' zwischen Zuverlässigkeit (Genauigkeit) des Berechnungsergebnisses und Aufwand auszunutzen, was allerdings große Erfahrung des bearbeitenden Ingenieurs voraussetzt.

Allein aufgrund von Überlegungen hinsichtlich der prinzipiell erreichbaren Genauigkeit kann in der Praxis jedenfalls keine eindeutige Entscheidung zugunsten der einen oder der anderen Methode getroffen werden. Es muss dabei immer die betrachtete Gesamtsituation (hinsichtlich Topologie, Quellen, Objekte, usw.) und vor allem die Fragestellung (punktuelle Bewertung, flächenhafte Analyse, usw.) miteinbezogen werden.

Im Rahmen dieses Vorhabens, dessen Fragestellung auch auf die *reale Feldverteilung* in der Umgebung von WLAN-Einrichtungen abzielt, ist die ausschließliche Verwendung messtechnischer Methoden aus den oben genannten Überlegungen nicht ausreichend. Es wurde daher versucht, mit einer Kombination aus messtechnischen Untersuchungen und entsprechenden numerischen Berechnungen das mögliche und typische Ausmaß der Exposition der Bevölkerung durch WLAN-Einrichtungen mit hohem Maß an Zuverlässigkeit zu erfassen und zu bewerten.

## 4 VORLIEGENDE ARBEITEN ZUM THEMA

Trotz der rasanten Verbreitung der WLAN-Technologien in den vergangenen Jahren liegen nur sehr wenige Daten hinsichtlich der Exposition von Personen durch die emittierten HF-Felder vor.

Eine der ersten öffentlich zugänglichen Arbeiten war ein Gutachten des nova Instituts (50254 Hürth, Deutschland) aus 2001, im Rahmen dessen die Immissionen des an der Universität Bremen installierten WLANs erfasst wurden [7]. Unter anderem wurden dabei einerseits die verschiedenen *Access Points* zuordenbaren WLAN-Immissionen an Arbeitsplätzen und andererseits auch Immissionen, stammend von Netzwerkkarten in Notebooks erfasst. Die Untersuchungen an den Arbeitsplätzen ergaben maximale Immissionswerte (Leistungsflussdichte) entsprechend 0,025% des Grenzwertes ( $10 \text{ W/m}^2$ ) der 26. BImSchV. In 20 cm Abstand zu den WLAN-Netzwerkkarten wurden maximal 1,58 % dieses Grenzwertes für die Leistungsflussdichte festgestellt. Hierzu muss bemerkt werden, dass den eigentlichen Messergebnissen pauschal ein Sicherheitsfaktor von 6 dB zugeschlagen wurde. Begründet wird dieser Sicherheitszuschlag mit den möglichen vorhandenen Fehlerquellen (Kalibrierunsicherheiten, Feldschwankungen durch Personen im Raum, Feldinhomogenitäten zufolge Reflexionen). Weiters ist anzumerken, dass bei der Beschreibung der Messmethode zwar von Zero-Span Messungen gesprochen wird, jedoch die Abbildungen auf die in diesem Zusammenhang verwiesen wird (Screenshots vom Display des Spektrumanalysators) keine Zero-Span Messungen zeigen. Über den verwendeten Detektor-Typ, sowie über etwaige Korrekturen hinsichtlich des Verhältnisses von Auflösungsbandbreite zu Signalbandbreite werden leider keine Angaben gemacht. Da jeweils nur die Burst-Amplituden gemessen wurden, werden die Messwerte von den Autoren als Maximalwerte („Worst Case“-Werte) bei voller Auslastung der WLAN-Geräte interpretiert. Dazu ist jedoch anzumerken, dass auch theoretisch ein WLAN-Gerät nicht ununterbrochen über längere Zeit senden kann, da die Netzwerk-Übertragungsprotokolle 'Acknowledge'-Pakete der Empfangsstation vorsehen, während derer die Sendestation nicht sendet. Setzt man voraus, dass die Bandbreitenkorrektur der Messwerte korrekt vorgenommen wurde, so stellen die in [7] präsentierten Immissionswerte daher mit hoher Wahrscheinlichkeit grobe Überbewertungen der realistischere zu erwartenden mittleren Immissionen dar. Die angegebenen Messwerte können aber als Burst-Spitzenwerte interpretiert werden (korrekte Bandbreitenkorrektur und Verwendung eines RMS-Detektors vorausgesetzt). Kann eine entsprechende Bandbreitenkorrektur nicht vorausgesetzt werden, so ist keine Einschätzung der Aussagekraft der angegebenen Messwerte möglich.

In einem weiteren Gutachten desselben Instituts wurden 2004 weitere Immissionsmessungen am erweiterten WLAN-Netz der Universität Bremen durchgeführt [9], wobei sowohl Messungen in Innenräumen, als auch Messungen im Außenbereich (nahe Außenantennen) durchgeführt wurden. Es wurden sowohl WLAN Immissionen im 2,45 GHz Band (IEEE 802.11b,g) als auch im 5,2 GHz Band (IEEE 802.11a) erfasst. Anders als in [7] wird in [9] jeweils die spektrale Leistung (Integration über die Kanalbandbreite) des mit *MaxHold* ermittelten Spektrums als Messwert erfasst. Den Messergebnissen in Innenräumen wird wieder pauschal ein Sicherheitsfaktor von 6 dB, den Messergebnissen in Außenbereichen pauschal ein Sicherheitsfaktor von 3 dB zugeschlagen. Über den verwendeten Detektor-Typ wird

leider keine Angabe gemacht. Als maximale Leistungsflussdichte nahe der untersuchten Notebook-Netzwerkkarten werden in 10 cm Abstand  $6,98 \text{ mW/m}^2$  angegeben (entsprechend  $0,0698\%$  des Referenzwertes nach EU-Ratsempfehlung 1999/519/EG [16] bzw. nach 26.BImSchV). Der ebenfalls angegebene Immissionswert in 3 cm Abstand sollte jedoch aus physikalischer Sicht hinterfragt werden, da bei derartig geringer Distanz zwischen Sendeantenne und Messantenne Rückwirkungen auf die Sendeantenne nicht ausgeschlossen werden können. Ferner sind die damit erfassten Messwerte in keiner Weise repräsentativ hinsichtlich eines Vergleichs mit Referenzwerten (abgeleiteten Grenzwerten). Bei derartigen Nahfeldexpositionen kann eine sinnvolle Beurteilung der Exposition immer nur mit Bezug auf die Basisgrenzwerte (SAR-Messung) durchgeführt werden. Die maximale Leistungsflussdichte in den untersuchten Messpositionen in Innenräumen (nahe *Access Points*) wird mit  $9,3 \text{ mW/m}^2$  (70 cm Distanz zum *Access Point*), entsprechend  $0,093\%$  des Referenzwertes nach [16] angegeben. Als Messergebnisse an Außenantennen werden Leistungsflussdichtewerte in unterschiedlichen Abständen zur Antenne angegeben. Beispielsweise liegt der in 2 m Abstand zu den untersuchten Antennen angegebene Maximalwert der Leistungsflussdichte bei  $6,51 \text{ mW/m}^2$  (entsprechend  $0,0651\%$  des entsprechenden Referenzwertes nach [16]). Grundsätzlich werden in [9] auch (naturgemäß) höhere Immissionswerte für geringere Abstände zu den Antennen aufgelistet und neben den Grenzwerten gemäß 26.BImSchV (entsprechen jenen aus [16]) zusätzlich auch mit anderen Grenzwerten bzw. Vorsorgewerten verglichen. Da diese zusätzlich angeführten Grenzwerte bzw. Vorsorgewerte jedoch definitionsgemäß für **Innenräume** gelten, erscheint ein Vergleich der Immissionsgrößen in extrem geringen Abstand zu **Außenantennen** (in [9] bis zu  $0,00 \text{ m}$  Abstand angegeben!!) als unrealistisch bzw. fragwürdig. Grundsätzlich müssen die in [9] dargestellten Messwerte aufgrund der Messmethode wieder (zumindest teilweise) als grobe Überbewertung der tatsächlich realistischerweise zu erwartenden Exposition angesehen werden. Dieser Verdacht wird allein schon dadurch erhärtet, dass die an Außenantennen durchgeführten Messungen (mit in guter Näherung freien Ausbreitungsverhältnissen) auf Messwerte führen, die auf Basis von grundlegenden physikalischen Überlegungen als zu hoch eingestuft werden müssen. Beispielsweise wird in [9] angegeben, dass die Außenantennen für die Messungen von einem *Access Point* mit maximaler Sendeleistung von  $50 \text{ mW}$  gespeist wurden. Für die Messungen im Nahbereich der untersuchten Rundstrahlantenne (Cushcraft Type S2403 BP) würde dies etwa der maximal zulässigen Konfiguration mit  $P_{\text{EIRP}}=100 \text{ mW}$  entsprechen (Antennengewinn ca.  $3 \text{ dBi}$ ). Vergleicht man nun die damit theoretisch (bei kontinuierlichem Senden mit  $100 \text{ mW EIRP}$ ) möglichen Leistungsflussdichten  $S$  auf Basis der elementaren Beziehung (d...Abstand zur Antenne)

$$S = \frac{P_{\text{EIRP}}}{4\pi d^2}$$

mit jenen in [9] angegebenen, so erweisen sich die in [9] angegebenen Werte sogar außerhalb der Hauptstrahlrichtung durchwegs als wesentlich höher als die theoretisch möglichen Werte.

Die Type der zweiten untersuchten Richtantenne für Außenbereiche wird in [9] mit ‚WL-ANT-Y12‘ angegeben. Eine kurzerhand durchgeführte Internet-Recherche konnte auf Basis dieser Angaben leider keine kommerziell erhältliche Antenne identifizieren. Bei Bezugnahme auf in der Antennenbranche übliche

Modellbezeichnungen deutet die Kombination ‚Y12‘ jedoch auf einen Antennengewinn von 12 dBi hin. Aus dem äußeren Erscheinungsbild der Antenne (auf Fotos in [9] abgebildet) und aus dem Verhältnis der in [9] angegebenen Messwerte an der Vorderseite zu jenen an der Rückseite der Antenne erscheint diese Annahme auch plausibel. Unter der Voraussetzung der Richtigkeit dieser Annahme und der in [9] angegebenen in die Antenne eingespeisten Sendeleistung von 50 mW würde sich daher eine Sendeleistung von ca. **790 mW EIRP** ergeben, was natürlich einer **unzulässigen Situation** entsprechen würde. Dies würde ebenfalls die im Vergleich zu den theoretisch möglichen Werten **viel zu hohen** Immissionswerte im Bereich der mit WL-ANT-Y12 bezeichneten Antenne in [9] erklären.

Zusammenfassend kann daher mit hoher Wahrscheinlichkeit gesagt werden, dass die in [9] präsentierten Immissionswerte zumindest teilweise, entweder aufgrund von falschen Messbedingungen (unzulässig hohe Sendeleistungen), oder aufgrund der verwendeten Messmethode eine deutliche Überbewertung der tatsächlichen Immissionen darstellen.

Nach durchgeführten Testmessungen empfiehlt die Zeitschrift Ökotest [18] in der Novemberausgabe 2002 unter anderem zu WLAN-Antennen einen Mindestabstand von 10 m einzuhalten. Abgesehen von einem offensichtlichen Druckfehler am Beginn der Zusammenfassung der Testergebnisse, der maximale Leistungsflussdichten von 23.000 W/m<sup>2</sup> attestiert, findet sich in den präsentierten Detailergebnissen dann ein Maximalwert von 23 mW/m<sup>2</sup> (0,23% des Referenzwertes nach [16]) in 1 m Abstand zu 2 Außenantennen. Die Messwerte werden jedenfalls von den Autoren als ‚Worst-Case‘ Werte bezeichnet, nähere Angaben über die genaue Vorgehensweise bei der Messung werden nicht gemacht (z.B. Messmodus des Spektrumanalysators).

In einem über das Internet zugänglichen Informationsblatt (2004) [19] gibt die Baudirektion des Kantons Zürich die in ca. 20 cm Abstand zu einem Notebook maximal gefundene elektrische Feldstärke während des Kopierens großer Datenmengen mit 0,88 V/m an (ca. 2,1 mW/m<sup>2</sup> bei Annahme von Fernfeldbedingungen, entsprechend 0,021% des Referenzwertes nach [16]). Die genaue Messmethode ist aus dem Informationsblatt nicht ersichtlich.

In seiner sehr ausführlichen und wissenschaftlich fundierten Master Thesis an der Chalmers University, Schweden, befasste sich Myhr 2004 [10] mit Messmethoden zur Immissionserfassung von WLAN Sendern. Neben grundsätzlichen Bedingungen wie die Verwendung eines RMS-Detektors und die Wahl sinnvoller Auflösungsbandbreiten und entsprechender Messwertkorrektur wird, ähnlich wie in [11], aufgezeigt, dass *MaxHold*-Messungen zu Immissionswerten führen, die nicht einmal theoretisch erreicht werden können. Myhr empfiehlt in seiner Arbeit für die Erfassung der realen Immissionen die Skalierung von *MaxHold*-Messergebnissen entsprechend den Datenverkehrsverhältnissen, wie dies auch in [11] diskutiert wurde. Aus Messungen nahe Geräten eines in Betrieb befindlichen WLANs wird als höchster gemessener Wert eine maximale Leistungsflussdichte von 19,6 mW/m<sup>2</sup> (*MaxHold*) bzw. 1,72 mW/m<sup>2</sup> (skaliert mit effektivem Duty Cycle) in 75 cm Abstand zu einem *Access Point* angegeben. Diese Werte entsprechen 0,196% bzw. 0,0172% des Referenzwertes nach [16].

Schließlich befasst sich ein bereits abgeschlossenes Forschungsprojekt ([11]) im Rahmen des deutschen Mobilfunk Forschungsprogramms unter anderem auch mit den Immissionen von WLANs. Wie auch in [10] wird darauf verwiesen, dass *MaxHold*-Messungen zu teilweise massiven Überbewertungen (teilweise bis zu mehreren Zehnerpotenzen) der tatsächlichen (zeitlich gemittelten) Immissionen führen. Für die Messungen der Momentan-Immissionen wird in [11] die Verwendung von Channel Power Funktionen (Integration über das Leistungsdichtespektrum) empfohlen. Für eine flexiblere Beurteilung von Expositionssituationen werden Berechnungen basierend auf statistischen Modellen des Datenverkehrs vorgeschlagen, wobei als Basis die Burst-Amplituden-Werte der Immissionsgröße dienen (aus *MaxHold*-Messungen oder mittels numerischer Simulation ermittelt). Ferner wird in [11] die grundsätzliche Tauglichkeit numerischer Berechnungsmethoden nach dem Prinzip optischer Näherungsverfahren für die Immissionsbewertung gezeigt (entsprechend ausgereifte Software vorausgesetzt). Vergleiche von Messungen in realen Szenarien und entsprechenden Simulationsmodellen zeigten zwar punktuell (d.h. bezogen auf einzelne Positionen im Raum) relativ große Abweichungen aufgrund der notwendigen Vereinfachungen bei der Modellerstellung, bei Betrachtung von räumlichen Mittelwerten in einer Ausdehnung von Körperdimensionen (wie von den meisten Sicherheitsnormen gefordert) sind jedoch Abweichungen von nur wenigen dB erzielbar. Aus Messungen und Berechnungen sehr nahe an WLAN-Geräten (Abstand im Bereich zwischen 20 und 50 cm) werden z.B. über eine Fläche von 30 x 30 cm räumlich gemittelte, maximale Leistungsflussdichten von unter 10 mW/m<sup>2</sup> bzw. von unter 0,1% des Referenzwertes nach [16] berichtet (Zeitmittelwert bei Dauer-Volllast-Betrieb). In typischen Situationen mit größeren Abständen zu Geräten sind die Immissionen naturgemäß noch kleiner. Beispielsweise führten Messungen an einem Arbeitsplatz (mit voll aktivem Client-Notebook) in ca. 2,5 m Entfernung vom nächstgelegenen *Access Point* auf maximale Immissionswerte von 0,36 mW/m<sup>2</sup> (Channel Power Messung) bzw. 2,34 mW/m<sup>2</sup> (*MaxHold*-Messung). Diese Werte entsprechen 0,0036% bzw. 0,234% des Referenzwertes nach [16].

Weiters werden in [11] anhand einer Notebook-WLAN-Karte SAR-Messungen bei Kontakt der Karte zu einem einfachen Körperphantom durchgeführt. Die bei den betrachteten Expositionssituationen (Kontakt des Kartengehäuses zum Körperphantom) bei maximaler Sendeleistung und Volllast gemessene, maximale, über 10g gemittelte SAR betrug 0,052 W/kg. Dies entspricht 1,3% des SAR-Grenzwertes für Gliedmaßen nach [16]. Für andere WLAN-Geräte wurden kürzlich auch wesentlich höhere SAR-Werte, bis zu maximal ca. 0,8 W/kg (gemittelt über 10g) berichtet [17]. Diese Messergebnisse wurden allerdings unter eher unrealistischen Bedingungen ermittelt, wie z.B. mit einer Access Point-Monopolantenne direkt am Phantom (d.h., in 0 mm Distanz). In der Praxis besteht bei körpernah betriebenen WLAN-Geräten (Notebook-Einsteckkarten, integrierte WLAN-Module in Notebooks, u.s.w.) durch das Gerätegehäuse selbst bei Berührung des Gerätes üblicherweise ein Mindestabstand zur Antenne von 0,5-10 mm.

## 5 UNTERSUCHTE INDOOR-SZENARIEN

### 5.1 Kleinflächiger Raum (Star Coffee Heidelberg)

Als Vertreter eines typischen kleinflächigen WLAN Szenarios wurde das Star Coffee in der Heidelberger Sophienstraße ausgewählt.

#### 5.1.1 Beschreibung des Szenarios und technische Kenndaten

Abbildung 5-1 zeigt den Grundrissplan des Star Coffees mit Markierung der untersuchten Messpositionen (MP1-MP6). In jeder der Messpositionen wurden die WLAN-Immissionen in 5 unterschiedlichen Höhen (75 cm bis 175 cm über Fußboden) gemessen. Abbildung 5-2 und Abbildung 5-3 zeigen einige Fotos zur Veranschaulichung der Situation. Rot markiert in Abbildung 5-1 ist auch die Lage des Access Points, der unterhalb der Theke platziert ist (Abbildung 5-4).

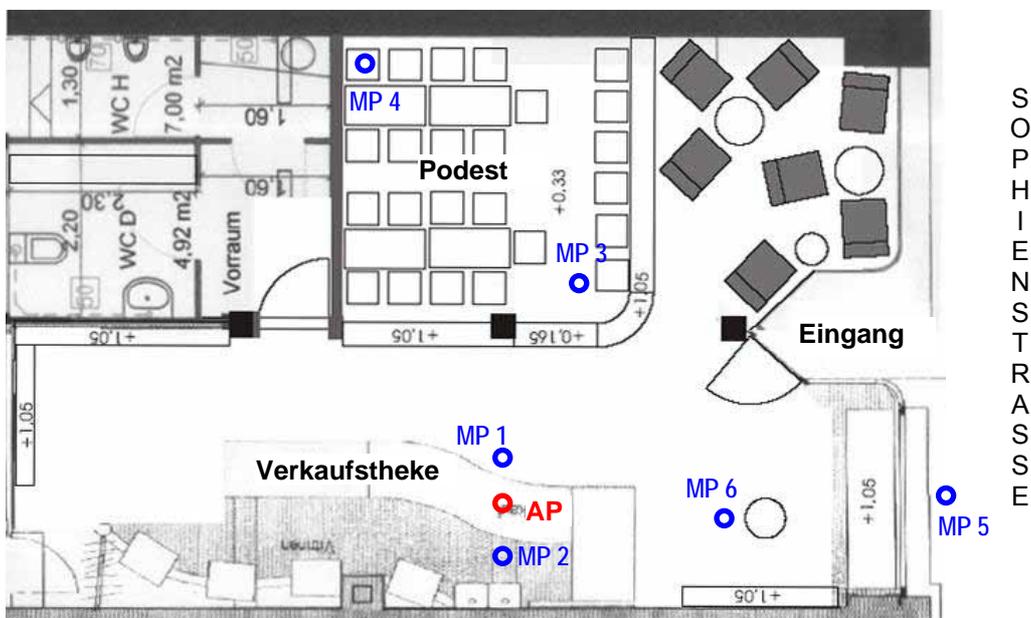


Abbildung 5-1: Grundrissplan des StarCoffees in Heidelberg, Sophienstraße, mit eingetragener Lage des Access Points (AP) und der untersuchten Messpositionen (MP).



Abbildung 5-2: Eingang in der Sophienstraße (links) und Thekenbereich (rechts).



Abbildung 5-3: Sitzmöglichkeiten auf Podest (links) und im Fensterbereich (rechts).



Abbildung 5-4: Aufstellung des Access Points *LINKSYS WRT54G* und Produktfoto.

Beim verwendeten Access Point handelt es sich um einen *LINKSYS WRT54G* (laut Spezifikationen 18 dBm EIRP bei 15 dBm Sendeleistung). Für die numerischen Berechnungen wird daher eine Antenne mit 3 dBi Antennengewinn angenommen.

### 5.1.2 Numerische Immissionsbestimmung

Die numerische Modellierung des Szenarios erfolgte auf Basis des Grundrissplanes und der vor Ort vorgefundenen Situation. Abbildung 5-5 und Abbildung 5-6 zeigen das Modell *in Wireless Insite* in 2 Ansichten. Neben dem Access Point wurden auch noch 2 Notebook Clients (jeweils modelliert mit 17 dBm Sendeleistung bei 3 dBi Antennengewinn) im Bereich nahe der Glasfassade berücksichtigt.

Die Ergebnisse der Immissionsberechnungen liefern zunächst die einzelnen Immissionsbeiträge der einzelnen Quellen unter der Annahme kontinuierlicher Aussendung. Diese Einzelbeiträge können dann entsprechend dem tatsächlichen effektiven Duty Cycle skaliert und zur zeitlich gemittelten Gesamtimmission in den betrachteten Empfängerpunkten überlagert werden. Als Empfängerpunkte (für die Immissionsbestimmung interessierende Punkte) wurden einerseits Empfängerpunkt-raster in zwei unterschiedlichen Horizontalebene (100 cm und 175 cm) durch das gesamte StarCoffee definiert und andererseits räumlich höher aufgelöste Empfängerpunkt-raster in den messtechnisch untersuchten Raumbereichen betrachtet (50 cm x 50 cm Raster in 5 unterschiedlichen Höhen von 75 cm bis 175 cm).

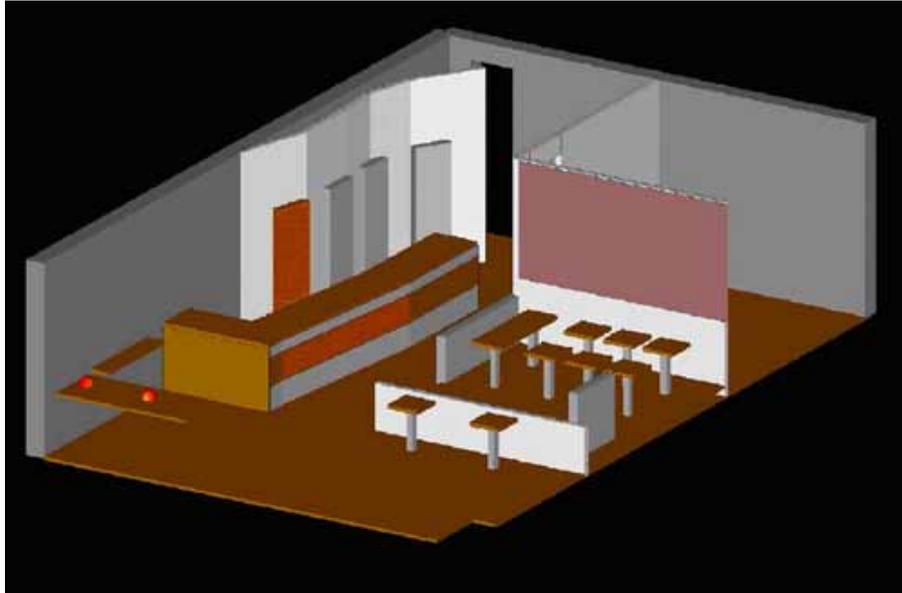


Abbildung 5-5: Modell des Szenarios. In dieser Ansicht sind nur die beiden Notebook Clients sichtbar (dargestellt durch das 3D Antennenpattern).

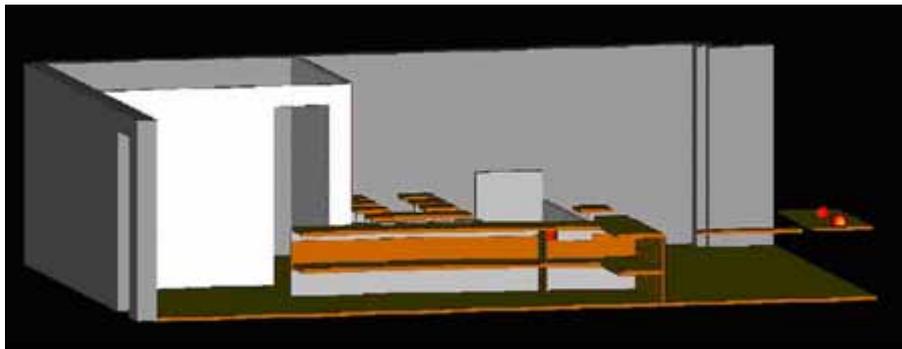


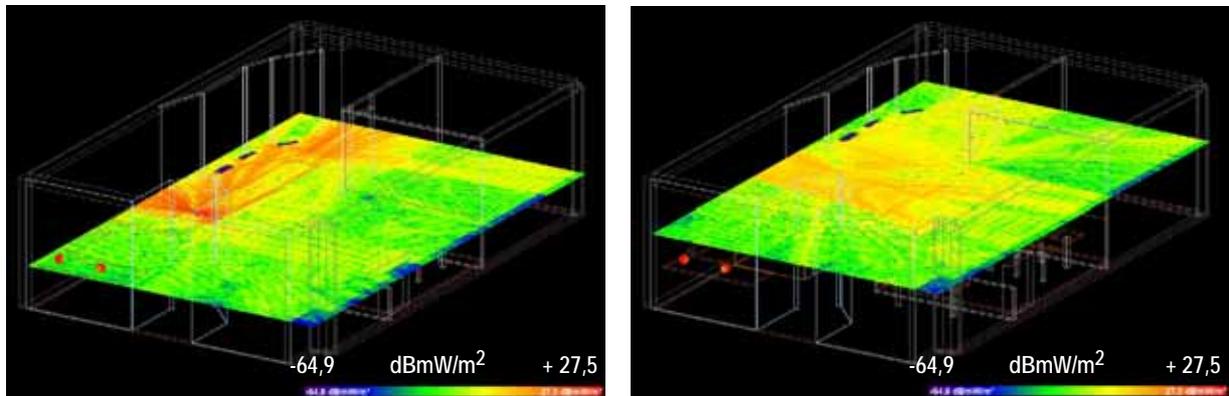
Abbildung 5-6: Modell des Szenarios. In dieser Ansicht sind alle Quellen (Access Point und Notebook Clients) sichtbar (rot dargestellt durch das 3D Antennenpattern).

Tabelle 5-1 fasst die wesentlichsten Berechnungsparameter zusammen. *Ray Spacing*, *Collection Surface Radius* und Anzahl berücksichtigter *Reflexionen*, *Transmissionen* und *Beugungen* wurden entsprechend den Ausführungen in Kapitel 2.1 gewählt.

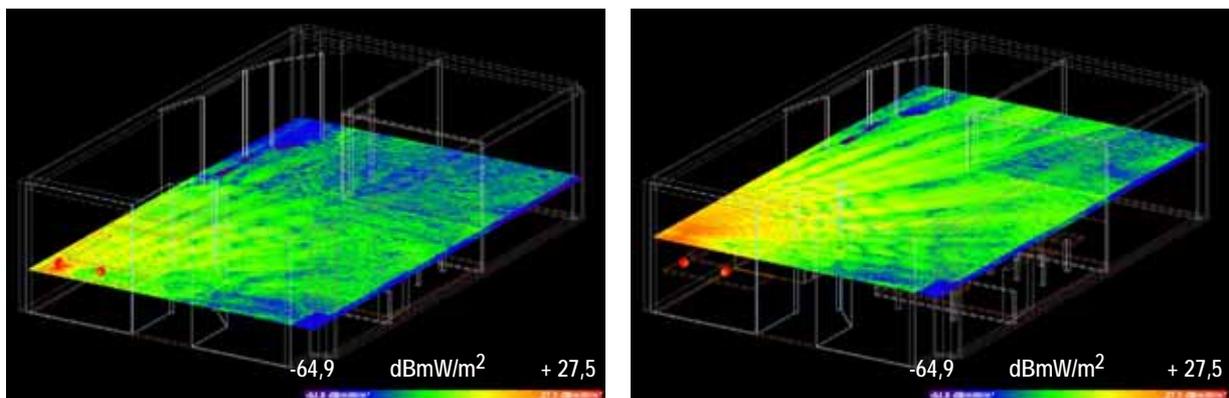
<b>Berechnungsparameter für Berechnung Star Coffee</b>		
Ray Spacing	0,2°	
Collection Surface Radius	2,5 cm	
Anzahl Reflexionen, Transmissionen, Beugungen	4 Reflexionen, 4 Transmissionen, 1 Beugung	
Materialparameter	Glas	$\epsilon=6, \quad \sigma=6,7 \text{ mS/m}$
	Holz	$\epsilon=1,8, \quad \sigma=40 \text{ mS/m}$
	Spiegelglas	$\epsilon=8, \quad \sigma=1,3 \text{ mS/m}$
	Metall	PEC
	Beton	$\epsilon=5, \quad \sigma=53,3 \text{ mS/m}$
Access Point	2,462 GHz, Sendeleistung 15 dBm, Dipol mit 3 dBi	
Notebook Client 1	2,462 GHz, Sendeleistung 17 dBm, Dipol mit 3 dBi	
Notebook Client 2	2,462 GHz, Sendeleistung 17 dBm, Dipol mit 3 dBi	

Tabelle 5-1: Berechnungsparameter für das Star Coffee Szenario.

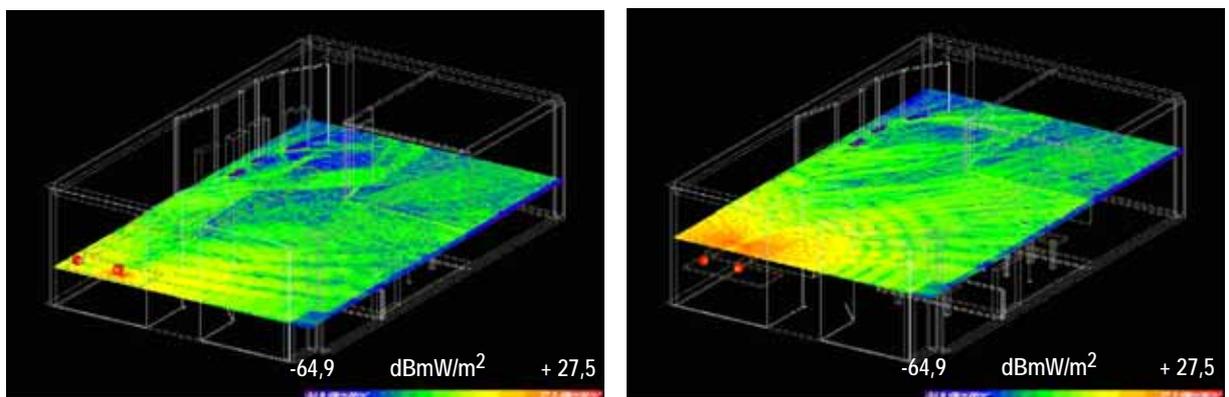
Abbildung 5-7 bis Abbildung 5-9 zeigen die Einzelbeiträge der drei HF-Quellen in zwei unterschiedlichen Horizontalebenen durch den gesamten Raum unter der (für WLAN unrealistischen) Annahme kontinuierlicher Abstrahlung.



**Abbildung 5-7:** Immissionsbeitrag des Access Points (unter Annahme kontinuierlicher HF Abstrahlung); links: Horizontalebene 100 cm über dem Fußboden; rechts: Horizontalebene 175 cm über dem Fußboden.

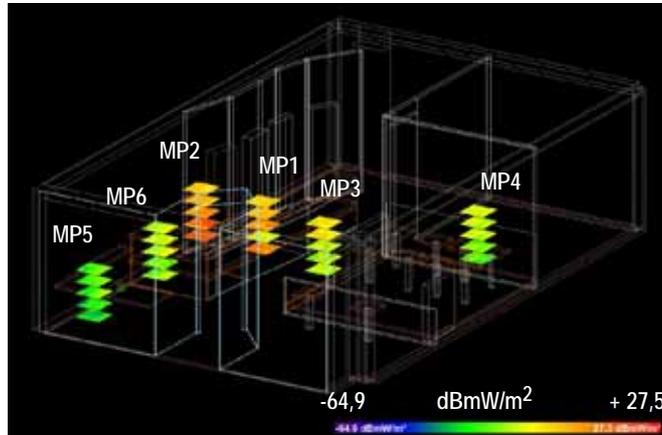


**Abbildung 5-8:** Immissionsbeitrag des Notebook Clients 1 (unter Annahme kontinuierlicher HF Abstrahlung); links: Horizontalebene 100 cm über dem Fußboden; rechts: Horizontalebene 175 cm über dem Fußboden.

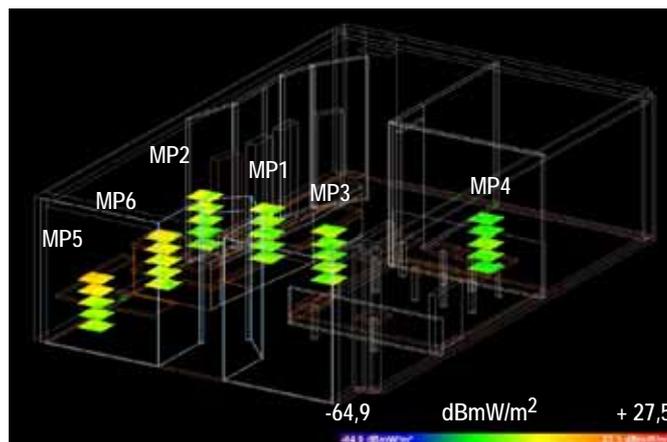


**Abbildung 5-9:** Immissionsbeitrag des Notebook Clients 2 (unter Annahme kontinuierlicher HF Abstrahlung); links: Horizontalebene 100 cm über dem Fußboden; rechts: Horizontalebene 175 cm über dem Fußboden.

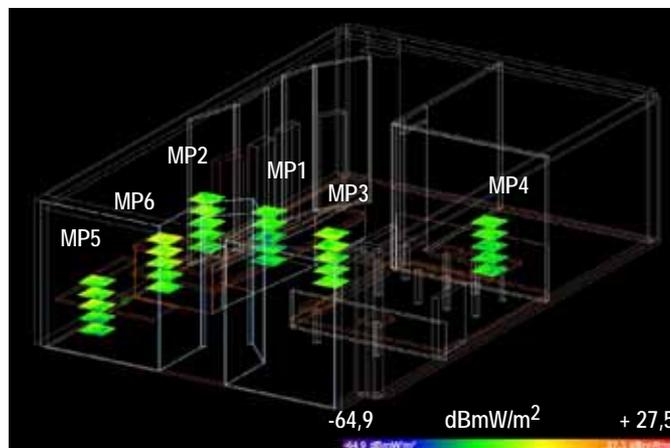
In Abbildung 5-10 bis Abbildung 5-12 sind die Einzelbeiträge der drei HF-Quellen in den Raumbereichen der Messpositionen MP1 bis MP6 (vgl. Abbildung 5-1), wieder unter der (für WLAN unrealistischen) Annahme kontinuierlicher Abstrahlung, dargestellt.



**Abbildung 5-10:** Immissionsbeitrag des Access Points (unter Annahme kontinuierlicher HF Abstrahlung) in 5 unterschiedlichen Höhen an den betrachteten Messpositionen MP1 bis MP6.



**Abbildung 5-11:** Immissionsbeitrag des Notebook Clients 1 (unter Annahme kontinuierlicher HF Abstrahlung) in 5 unterschiedlichen Höhen an den betrachteten Messpositionen MP1 bis MP6.

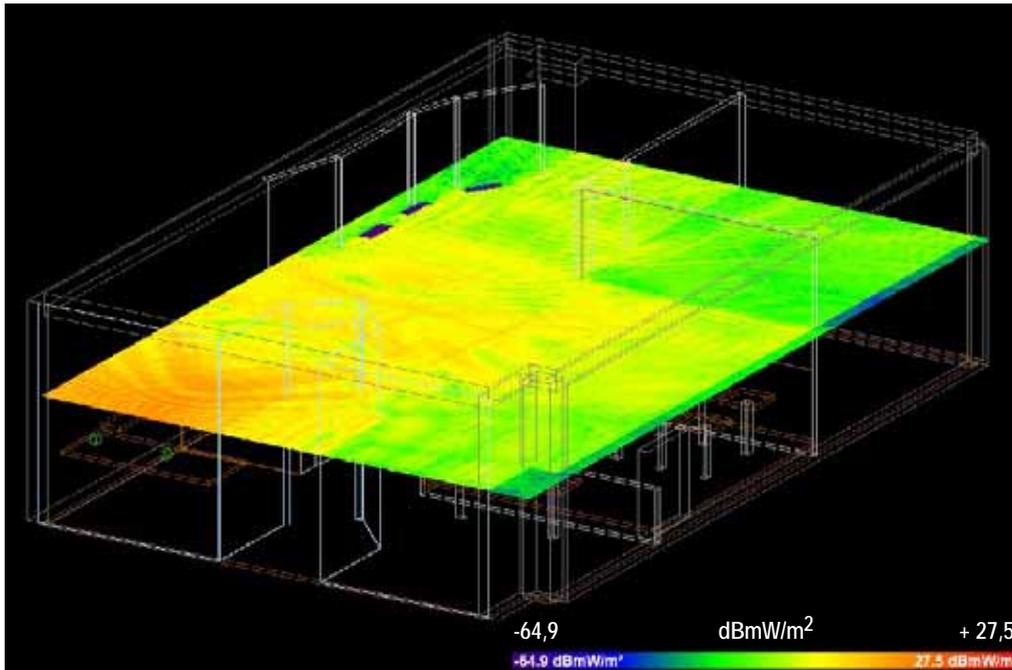


**Abbildung 5-12:** Immissionsbeitrag des Notebook Clients 2 (unter Annahme kontinuierlicher HF Abstrahlung) in 5 unterschiedlichen Höhen an den betrachteten Messpositionen MP1 bis MP6.

Tabelle 5-2 fasst die Berechnungsergebnisse in den einzelnen Messpositionen für unterschiedlich angenommene effektive Duty Cycles (Datenverkehrs-Situationen) zusammen. Der oberste Teil der Tabelle („Einzel-Immissions-Spitzenwerte“) stellt keine realistische Situation dar, soll jedoch zur Orientierung über das Verhältnis der Einzelbeiträge (Burst-Spitzenwerte) in den unterschiedlichen Messpositionen dienen. Situation 1 entspricht im Mittel einer typischen Datenverkehrssituation wie sie vor Ort beobachtet werden konnte. Für diesen Fall ist die summierte Feldverteilung in einer Horizontalebene in 175 cm Höhe (Kopfhöhe) in Abbildung 5-13 dargestellt. Situation 2 entspricht einem intensiven Download, Situation 3 einem intensiven Upload von Notebook Client 2. Situation 4 entspricht etwa den Verhältnissen, ohne Clients im Netzwerk (nur Aussendung des Beacons durch den Access Point).

	effektiver Duty Cycle		Immission in mW/m <sup>2</sup>					
			MP1	MP2	MP3	MP4	MP5	MP6
<b>Einzel-Immissions-Spitzenwerte</b>	AP: 1.0	räumlicher Mittelwert	2.7692	12.5249	0.1308	0.0382	0.0041	0.0337
		räumliches Maximum	32.2903	123.4453	0.9504	0.2740	0.0271	0.2013
	NB1: 1.0	räumlicher Mittelwert	0.0712	0.0352	0.2796	0.1268	2.4350	0.4458
		räumliches Maximum	0.4296	0.1669	1.7789	0.6147	13.7455	2.5420
	NB2: 1.0	räumlicher Mittelwert	0.6216	0.3667	0.2394	0.1628	4.3766	1.8139
		räumliches Maximum	2.5633	1.4595	2.7725	0.6185	17.8970	8.3095
<b>Situation 1</b> mittlere summierte Immission	AP: 0.3	räumlicher Mittelwert	0.9000	3.7977	0.0911	0.0404	0.6824	0.2361
	NB1: 0.1	räumliches Maximum	9.8056	37.0602	0.3975	0.1195	2.4118	0.8583
	NB2: 0.1							
<b>Situation 2</b> mittlere summierte Immission	AP: 0.6	räumlicher Mittelwert	1.8001	7.5953	0.1823	0.0808	1.3648	0.4722
	NB1: 0.1	räumliches Maximum	19.6112	74.1203	0.7949	0.2391	4.8236	1.7167
	NB2: 0.1							
<b>Situation 3</b> mittlere summierte Immission	AP: 0.1	räumlicher Mittelwert	0.7120	1.5092	0.1806	0.1178	3.0640	1.2731
	NB1: 0.0	räumliches Maximum	4.0877	12.5296	1.9715	0.4397	12.5288	5.8206
	NB2: 0.7							
<b>Situation 4</b> mittlere summierte Immission	AP: 0.005	räumlicher Mittelwert	0.01385	0.06262	0.00065	0.00019	0.00002	0.00017
	NB1: 0.0	räumliches Maximum	0.16145	0.61723	0.00475	0.00137	0.00014	0.00101
	NB2: 0.0							

**Tabelle 5-2:** Berechnungsergebnis in Form einer Zusammenstellung der Einzelimmissionsbeiträge und der mittleren summierten Immission für unterschiedliche Datenverkehrs-Situationen in den betrachteten Messpositionen MP1 bis MP6.

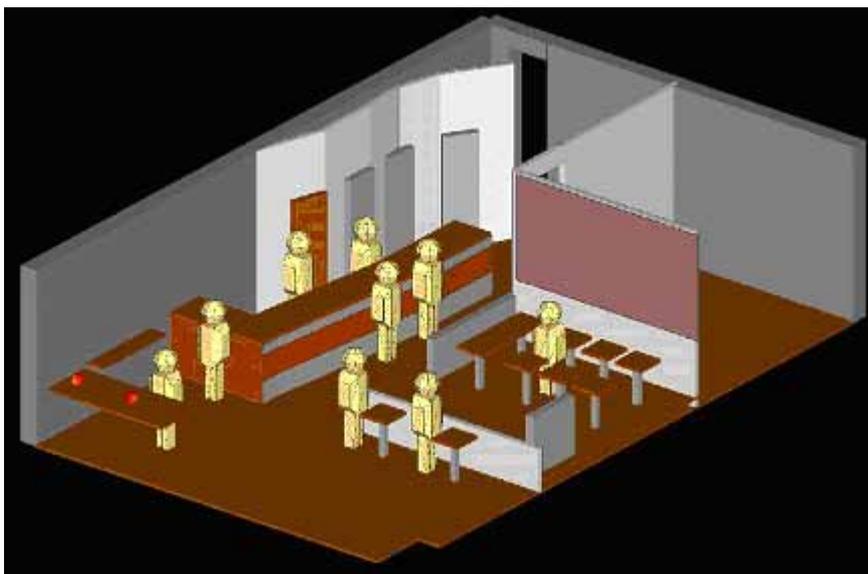


**Abbildung 5-13:** Summierte mittlere Immissionsverteilung in 175 cm Höhe für eine typische Datenverkehrs-Situation (effektive Duty Cycles: AP: 0,3, Client1: 0,1, Client 2: 0,1).

### 5.1.2.1 Variation der Immissionen durch Veränderungen im Szenario

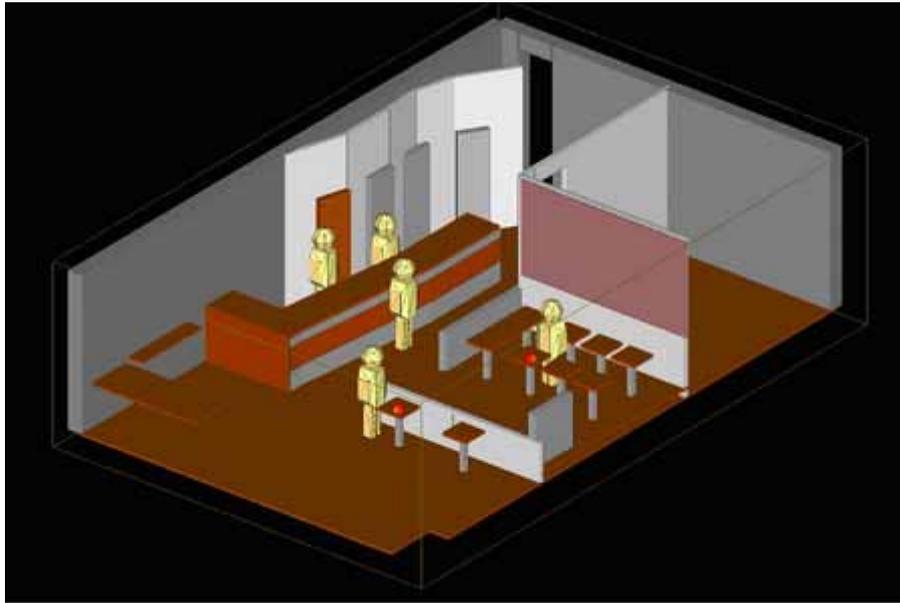
Um einen Anhaltspunkt für die Variationen der Immissionen, verursacht durch Veränderungen im Feldraum zu gewinnen, wurde das oben beschriebene Szenario, unter Beibehaltung aller sonstigen Berechnungsparameter zusätzlich unter folgenden Annahmen simuliert:

- Anwesenheit von Personen im Feldraum bei gleicher Quellenpositionierung wie im ursprünglich, in Kapitel 5.1.2 betrachteten Szenario (Abbildung 5-14).
- Veränderte Personenverteilung und veränderte Aufstellung der Clients (Abbildung 5-15)



**Abbildung 5-14:** Szenario mit Anwesenheit von Personen und unveränderter Quellenpositionierung. In der Grafik sind nur die beiden Clients als Quellen rot markiert, der unter der Theke platzierte Access Point ist in dieser Ansicht nicht sichtbar.

Als Materialeigenschaften für die stark vereinfachten homogenen Personenmodelle wurden  $\epsilon_r = 53$  und  $\sigma = 1,95 \text{ S/m}$  gewählt.



**Abbildung 5-15:** Szenario mit veränderter Personenverteilung und veränderter Aufstellung der Clients. In der Grafik sind nur die beiden Clients als Quellen rot markiert, der unter der Theke platzierte Access Point ist in dieser Ansicht nicht sichtbar.

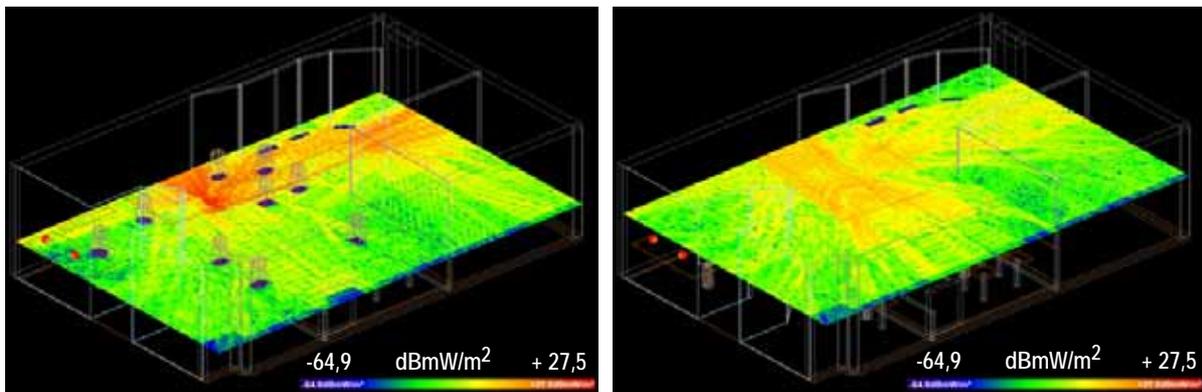
Abbildung 5-16 bis Abbildung 5-18 zeigen die Einzelbeiträge der drei HF-Quellen in zwei unterschiedlichen Horizontalebene durch den gesamten Raum unter der (für WLAN unrealistischen) Annahme kontinuierlicher Abstrahlung bei Anwesenheit von Personen und unveränderter Quellenpositionierung (vgl. Abbildung 5-14).

Abbildung 5-19 bis Abbildung 5-21 zeigen die Feldverteilungen in den gleichen Ebenen bei veränderter Personenverteilung und veränderter Positionen der Clients gemäß Abbildung 5-15 (wieder unter der Annahme kontinuierliche Abstrahlung, d.h. Feldwerte entsprechen Burst-Spitzenwerten).

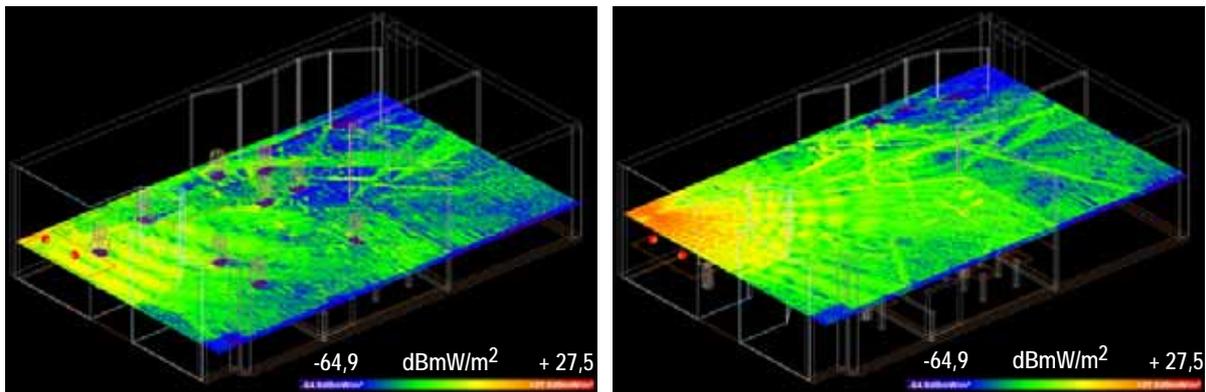
Tabelle 5-3 und Tabelle 5-4 fassen die Berechnungsergebnisse in den einzelnen Messpositionen für unterschiedlich angenommene effektive Duty Cycles (Datenverkehrs-Situationen) zusammen. Der oberste Teil der Tabelle („Einzel-Immissions-Spitzenwerte“) stellt keine realistische Situation dar, soll jedoch zur Orientierung über das Verhältnis der Einzelbeiträge (Burst-Spitzenwerte) in den unterschiedlichen Messpositionen dienen. Die angenommenen effektiven Duty Cycles entsprechen jenen von Tabelle 5-2 um einen direkten Vergleich des Einflusses der angenommenen Veränderungen im Feldraum mit den Verhältnissen ohne Personen im Feldraum zu erlauben. In Analogie zu Abbildung 5-13 zeigen Abbildung 5-22 und Abbildung 5-23 die summierten Feldverteilungen in einer Horizontalebene in 175 cm Höhe (Kopfhöhe) für die in den Tabellen mit Situation 1 bezeichnete Datenverkehrssituation in den Szenarien nach Abbildung 5-14 und Abbildung 5-15.

Ein Vergleich der Berechnungsergebnisse für die Situationen mit und ohne Personen, bei unveränderter Quellenpositionierung zeigt Veränderungen der räumlich gemittelten Immissionswerte in den betrachteten Messpositionen bis zu einem Faktor 3,2 (entsprechend 5,1 dB), als Auswirkung der Anwesenheit der Personenmodelle (Abschattung, Beugung und Reflexionen an den Personenmodellen, vgl. Abbildung 5-7 bis Abbildung 5-9 mit Abbildung 5-16 bis Abbildung 5-18). Es sind dabei, abhängig von der jeweiligen Messposition, sowohl teilweise Erhöhungen, als auch

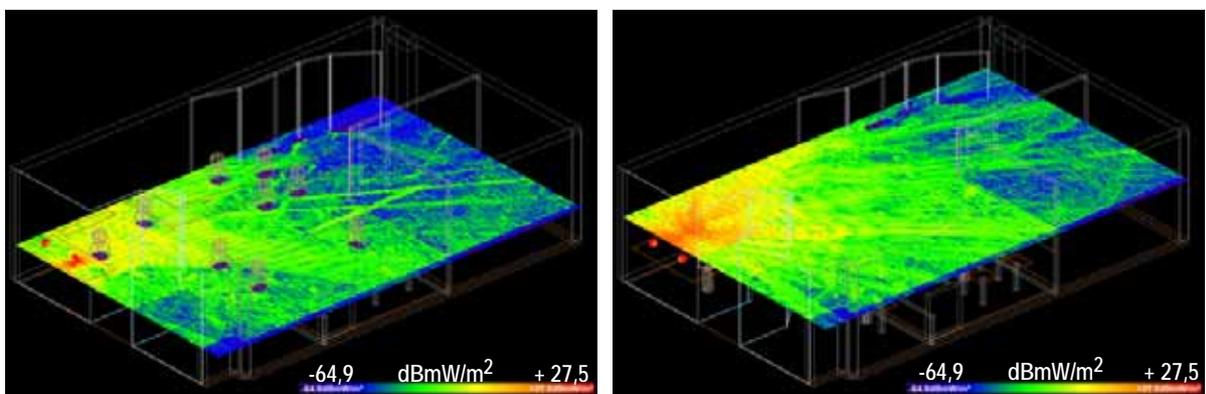
teilweise Verringerungen der Immissionen zu beobachten. Beispielsweise ist der Immissionsbeitrag des Access Points in Messposition MP2 (direkte Sicht zum Access Point) im Szenario mit Personen erhöht. Dies kann im vorliegenden Fall durch Reflexionen an den, den Raumbereich von Messposition und Access Point umgebenden Personen erklärt werden. Andererseits zeigt sich in Messposition MP1 eine deutliche Reduzierung des mittleren Immissionsbeitrages von Notebook Client 2, was durch die Abschattung, verursacht durch den Notebook User (zwischen Quelle und Messposition), erklärbar ist.



**Abbildung 5-16:** Immissionsbeitrag des Access Points (unter Annahme kontinuierlicher HF Abstrahlung) für das Szenario mit Personen und unveränderter Quellenpositionierung gemäß Abbildung 5-14.  
links: Horizontalebene 100 cm über dem Fußboden; rechts: Horizontalebene 175 cm über dem Fußboden.

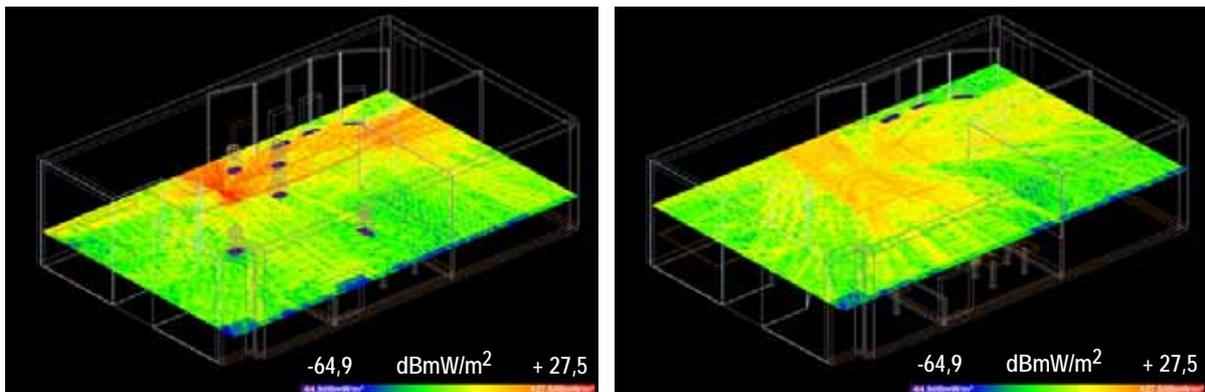


**Abbildung 5-17:** Immissionsbeitrag des Notebook Clients 1 (unter Annahme kontinuierlicher HF Abstrahlung) für das Szenario mit Personen und unveränderter Quellenpositionierung gemäß Abbildung 5-14.  
links: Horizontalebene 100 cm über dem Fußboden; rechts: Horizontalebene 175 cm über dem Fußboden.

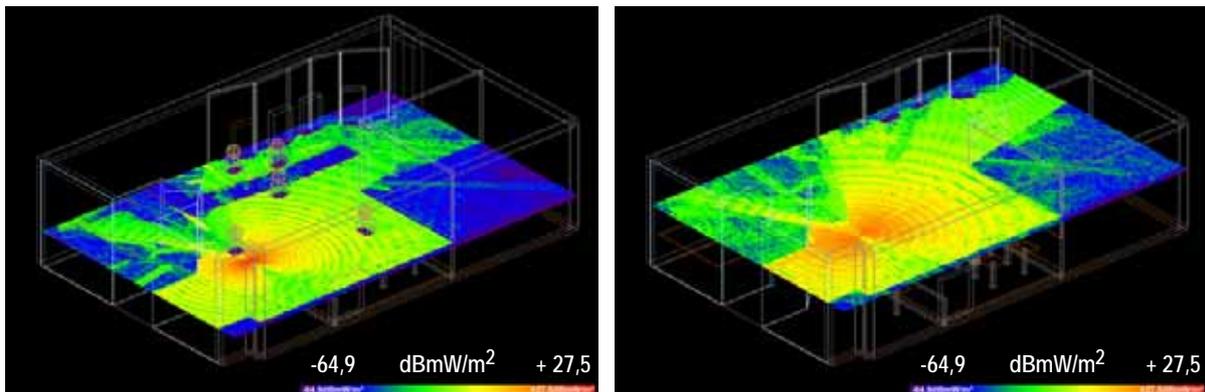


**Abbildung 5-18:** Immissionsbeitrag des Notebook Clients 2 (unter Annahme kontinuierlicher HF Abstrahlung) für das Szenario mit Personen und unveränderter Quellenpositionierung gemäß Abbildung 5-14.  
links: Horizontalebene 100 cm über dem Fußboden; rechts: Horizontalebene 175 cm über dem Fußboden.

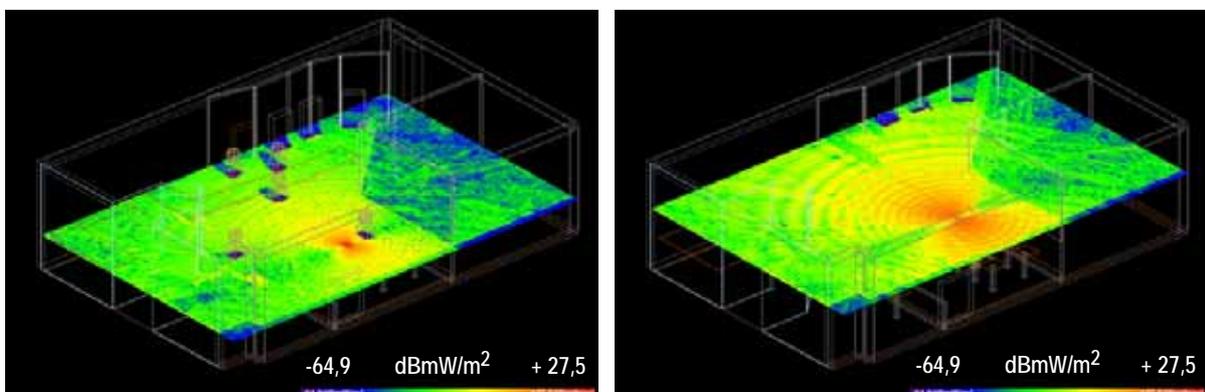
Abgesehen von sehr einfachen Situationen, wie in den beiden oben genannten Fällen, werden im Allgemeinen, aufgrund der beteiligten komplexen Wellenausbreitungsphänomene, jedoch keine einfachen Ursache-Wirkungszusammenhänge für die beobachteten Schwankungen der Exposition in Abhängigkeit von einzelnen Parametern der Personenverteilung gemacht werden können. Es ist vielmehr die Gesamtheit des vorliegenden Szenarios mit allen seinen Einzelheiten, das die, im Allgemeinen sehr komplexe und inhomogene räumliche Feldverteilung (und damit die mittlere Immission in einzelnen Messpositionen) bestimmt.



**Abbildung 5-19:** Immissionsbeitrag des Access Points (unter Annahme kontinuierlicher HF Abstrahlung) für das Szenario mit veränderter Personenverteilung und veränderter Quellenpositionierung gemäß Abbildung 5-15.  
links: Horizontalebene 100 cm über dem Fußboden; rechts: Horizontalebene 175 cm über dem Fußboden.



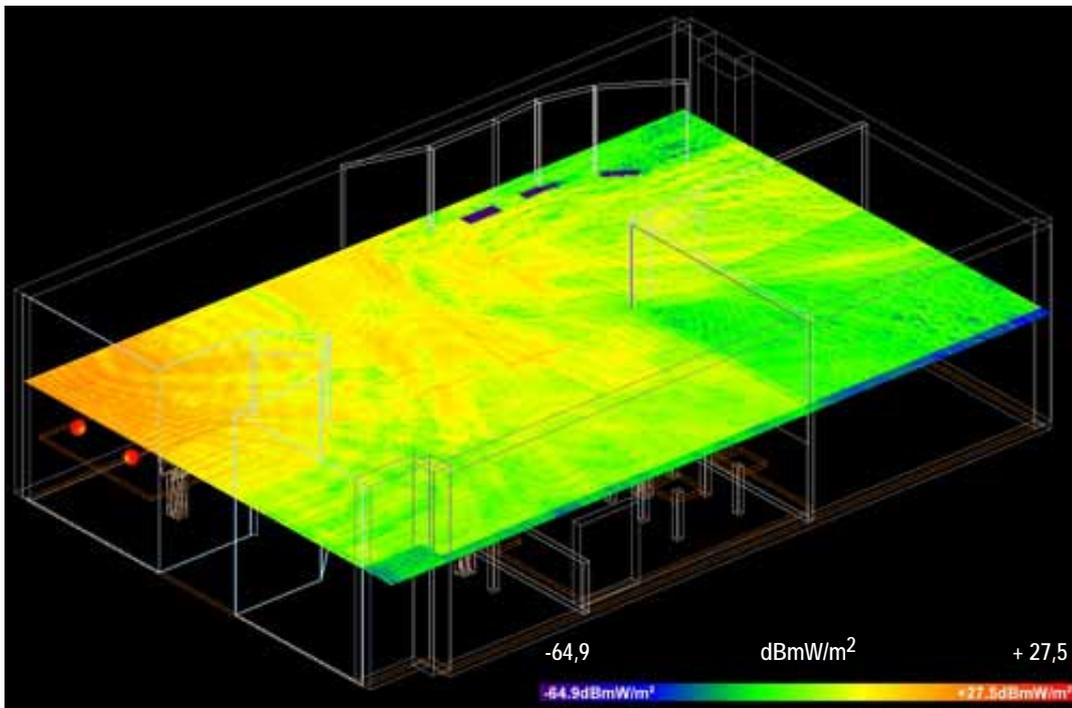
**Abbildung 5-20:** Immissionsbeitrag des Notebook Clients 1 (unter Annahme kontinuierlicher HF Abstrahlung) für das Szenario mit veränderter Personenverteilung und veränderter Quellenpositionierung gemäß Abbildung 5-15.  
links: Horizontalebene 100 cm über dem Fußboden; rechts: Horizontalebene 175 cm über dem Fußboden.



**Abbildung 5-21:** Immissionsbeitrag des Notebook Clients 2 (unter Annahme kontinuierlicher HF Abstrahlung) für das Szenario mit veränderter Personenverteilung und veränderter Quellenpositionierung gemäß Abbildung 5-15.  
links: Horizontalebene 100 cm über dem Fußboden; rechts: Horizontalebene 175 cm über dem Fußboden.

	effektiver Duty Cycle		Immission in mW/m <sup>2</sup>					
			MP1	MP2	MP3	MP4	MP5	MP6
Einzel- Immissions- Spitzenwerte	AP: 1.0	räumlicher Mittelwert	2.5140	18.1756	0.1159	0.0160	0.0004	0.0354
		räumliches Maximum	35.6720	182.6800	0.8113	0.1439	0.0036	0.6499
	NB1: 1.0	räumlicher Mittelwert	0.0779	0.0470	0.1928	0.0891	2.4705	0.5630
		räumliches Maximum	0.3514	0.2299	0.9959	0.4698	13.6550	2.6168
	NB2: 1.0	räumlicher Mittelwert	0.1941	0.1971	0.2807	0.1052	4.5355	1.2290
		räumliches Maximum	1.0119	1.7019	1.5244	0.5970	22.2930	10.8880
Situation 1 mittlere summierte Immission	AP: 0.3	räumlicher Mittelwert	0.7814	5.4771	0.0821	0.0242	0.7007	0.1898
	NB1: 0.1 NB2: 0.1	räumliches Maximum	10.7312	54.8196	0.3650	0.0779	2.4477	1.1333
Situation 2 mittlere summierte Immission	AP: 0.6	räumlicher Mittelwert	1.5356	10.9297	0.1169	0.0290	0.7008	0.2004
	NB1: 0.1 NB2: 0.1	räumliches Maximum	21.4328	109.6236	0.6084	0.1104	2.4477	1.1422
Situation 3 mittlere summierte Immission	AP: 0.1	räumlicher Mittelwert	0.3873	1.9555	0.2081	0.0752	3.1749	0.8639
	NB1: 0.0 NB2: 0.7	räumliches Maximum	3.7562	18.3655	1.0693	0.4219	15.6051	7.6219
Situation 4 mittlere summierte Immission	AP: 0.005	räumlicher Mittelwert	0.0126	0.0909	0.0006	0.0001	0.0000	0.0002
	NB1: 0.0 NB2: 0.0	räumliches Maximum	0.1784	0.9134	0.0041	0.0007	0.0000	0.0032

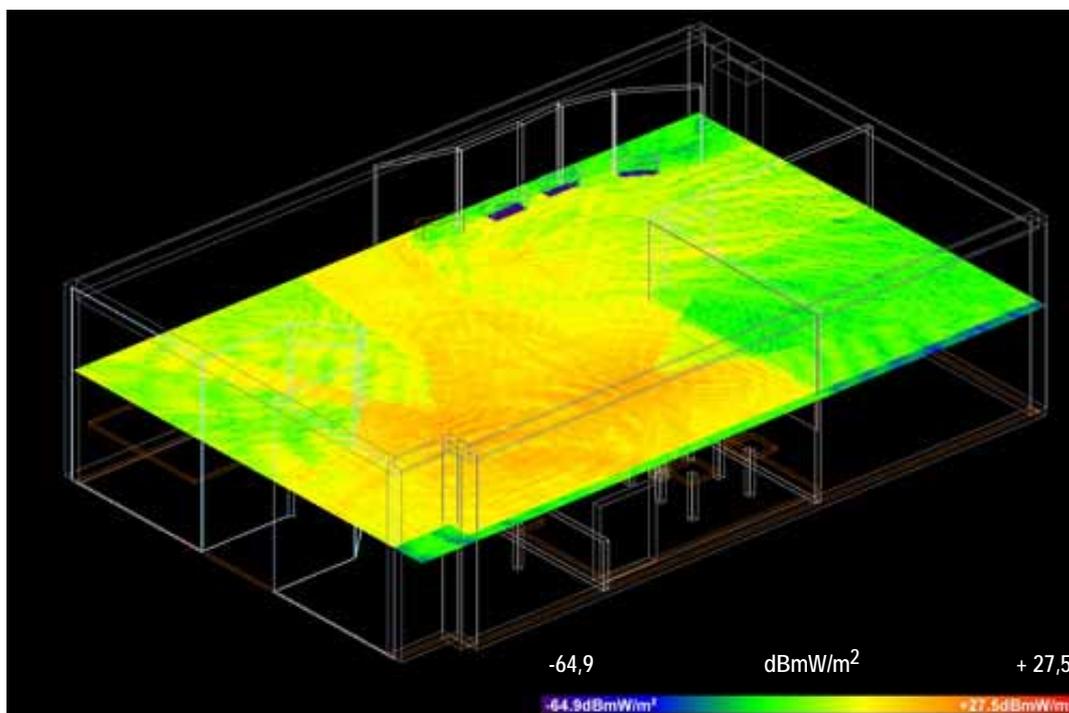
**Tabelle 5-3:** Berechnungsergebnis in Form einer Zusammenstellung der Einzelimmissionsbeiträge und der mittleren summierten Immission für unterschiedliche Datenverkehrs-Situationen in den betrachteten Messpositionen MP1 bis MP6 bei Anwesenheit von Personen im Feldraum (Quellenpositionierung unverändert, vgl. Abbildung 5-14).



**Abbildung 5-22:** Summierte mittlere Immissionsverteilung in 175 cm Höhe für eine typische Datenverkehrs-Situation im Szenario mit Personen und unveränderter Quellenpositionierung gemäß Abbildung 5-14. (effektive Duty Cycles: AP: 0,3, Client1: 0,1, Client 2: 0,1).

	effektiver Duty Cycle		Immission in mW/m <sup>2</sup>					
			MP1	MP2	MP3	MP4	MP5	MP6
Einzel- Immissions- Spitzenwerte	AP: 1.0	räumlicher Mittelwert	2.5346	18.1792	0.1194	0.0168	0.0005	0.0629
		räumliches Maximum	34.8850	177.7500	0.8870	0.1322	0.0039	0.6413
	NB1: 1.0	räumlicher Mittelwert	0.6360	0.1404	3.0051	0.4416	0.0137	0.2163
		räumliches Maximum	4.52050	1.0161	14.3140	2.0247	0.1149	1.6154
	NB2: 1.0	räumlicher Mittelwert	0.1783	0.1129	1.4789	1.8859	0.0269	0.1330
		räumliches Maximum	0.79069	0.5897	6.6424	7.0569	0.3046	0.7717
Situation 1 mittlere summierte Immission	AP: 0.3	räumlicher Mittelwert	0.8418	5.4791	0.4842	0.2378	0.0042	0.0538
	NB1: 0.1 NB2: 0.1	räumliches Maximum	10.5460	53.3370	1.5403	0.7349	0.0309	0.2104
Situation 2 mittlere summierte Immission	AP: 0.6	räumlicher Mittelwert	1.6022	10.9329	0.5200	0.2428	0.0044	0.0727
	NB1: 0.1 NB2: 0.1	räumliches Maximum	21.0115	106.6620	1.6481	0.7351	0.0310	0.3943
Situation 3 mittlere summierte Immission	AP: 0.1	räumlicher Mittelwert	0.3783	1.8970	1.0471	1.3218	0.0189	0.0994
	NB1: 0.0 NB2: 0.7	räumliches Maximum	3.6128	17.7820	4.6735	4.9399	0.2132	0.5438
Situation 4 mittlere summierte Immission	AP: 0.005	räumlicher Mittelwert	0.0127	0.0909	0.0006	0.0001	0.0000	0.0003
	NB1: 0.0 NB2: 0.0	räumliches Maximum	0.1744	0.8888	0.0044	0.0007	0.0000	0.0032

**Tabelle 5-4:** Berechnungsergebnis in Form einer Zusammenstellung der Einzelimmissionsbeiträge und der mittleren summierten Immission für unterschiedliche Datenverkehrs-Situationen in den betrachteten Messpositionen MP1 bis MP6 bei Anwesenheit von Personen im Feldraum und veränderter Quellenpositionierung gemäß Abbildung 5-15.



**Abbildung 5-23:** Summierte mittlere Immissionsverteilung in 175 cm Höhe für eine typische Datenverkehrs-Situation im Szenario mit veränderter Personenverteilung und veränderter Quellenpositionierung gemäß Abbildung 5-15. (effektive Duty Cycles: AP: 0,3, Client1: 0,1, Client 2: 0,1).

### 5.1.3 Messtechnische Immissionsbestimmung

In den in Abbildung 5-1 blau markierten Messpositionen MP1 bis MP6 wurden frequenzselektive Immissionsmessungen mittels der in Kapitel 2.2 beschriebenen Messmethode durchgeführt. Abbildung 5-24 zeigt Fotos von einigen Messpositionen.



Abbildung 5-24: Aufstellung der Mess-Sonde in Messpositionen MP1, MP3, MP4, MP5 (von links nach rechts).

Die Messungen erfolgten grundsätzlich im Zero Span Modus des Spektrumanalysators mit RMS Detektor und bei 100 kHz Auflösebandbreite. Tabelle 5-5 fasst die gemessenen und bezüglich der Auflösebandbreite korrigierten Burst-Spitzenwerte in den Messpositionen MP1 bis MP6 zusammen. Während der Messungen in MP1, MP2 und MP4 war kein aktiver Client vorhanden, d.h., die Immissionen stammen ausschließlich vom Access Point. Die Messungen in MP3 bis MP6 erfolgten im Realbetrieb, d.h., es herrschte Datenverkehr im WLAN und die gemessenen Burst-Spitzenwerte konnten nicht mehr eindeutig den einzelnen Quellen zugeordnet werden.

### 5.1.4 Vergleich von numerischer Berechnung und Messung

Da für Immissionsmessungen vor Ort im Realbetrieb eines WLAN Netzes nur sehr eingeschränkt kontrollierte Bedingungen geschaffen werden können, sind auch die erfassten Messwerte nur eingeschränkt direkt mit den Berechnungsergebnissen vergleichbar. Im konkret vorliegenden Fall eines beschränkten und überschaubaren WLAN-Netzes ist ein direkter Vergleich für die Messpositionen MP1, MP2 und MP4 möglich. Während der Messungen an diesen Positionen war kein aktiver Client im Netz vorhanden und es können daher die gemessenen Burst-Spitzenwerte (Tabelle 5-5) in diesen Positionen den Berechnungsdaten für kontinuierliche Access Point Aussendung (Tabelle 5-2 bis Tabelle 5-4, jeweils 1. Zeile) gegenübergestellt werden. Ein Vergleich der räumlichen Immissionsmittelwerte zeigt maximale Abweichungen zwischen Berechnungen und Messung von ca. 4 dB (ca. Faktor 2,5). Hinsichtlich der Messwerte in den anderen Messpositionen (MP3, MP5, MP6) ist ein Vergleich zwischen Berechnungs- und Messergebnis nicht ohne weiteres möglich, da in diesen Fällen jeweils mindestens 1 Client im Netz aktiv war und damit die gemessenen Burst-Spitzenwerte nicht mehr einer bestimmten Quelle zuzuordnen waren.

Die Abweichungen zwischen den Messungen und den Berechnungen liegen demnach ca. in der gleichen Größenordnung wie die Schwankungsbreite der Immissionen, verursacht durch die Berücksichtigung von Personen im Szenario. Insofern bestätigen die Messungen (im Normalbetrieb, d.h. während üblicher Bewegungen der anwesenden Personen im StarCoffee durchgeführt) die Berechnungsergebnisse.

Messposition	Höhe [cm]	Messwert S [mW/m <sup>2</sup> ]	räumlicher Mittelwert S [mW/m <sup>2</sup> ]	Andere Clients während Messung aktiv
MP1	75	2.631	<b>2.238</b>	<b>Nein</b> (Vergleich mit Simulation möglich)
	100	0.607		
	125	2.371		
	150	2.986		
	175	2.597		
MP2	75	17.400	<b>9.714</b>	<b>Nein</b> (Vergleich mit Simulation möglich)
	100	22.394		
	125	5.500		
	150	1.804		
	175	1.471		
MP3	75	0.110	<b>0.170</b>	<b>Ja</b> (Vergleich mit Simulation nicht möglich)
	100	0.076		
	125	0.212		
	150	0.180		
	175	0.271		
MP4	75	0.023	<b>0.041</b>	<b>Nein</b> (Vergleich mit Simulation möglich)
	100	0.033		
	125	0.058		
	150	0.018		
	175	0.072		
MP5	75	0.745	<b>0.533</b>	<b>Ja</b> (Vergleich mit Simulation nicht möglich)
	100	0.406		
	125	0.191		
	150	0.831		
	175	0.491		
MP6	75	0.254	<b>0.229</b>	<b>Ja</b> (Vergleich mit Simulation nicht möglich)
	100	0.361		
	125	0.293		
	150	0.093		
	175	0.145		

Tabelle 5-5: Messergebnisse (Burst-Spitzenwerte) in den Messpositionen MP1 bis MP6.

### 5.1.5 Immissionsbeurteilung im Hinblick auf die Grenzwerte

Der Vergleich von Berechnungs- und Messergebnissen mit dem Referenzwert (im hier interessierenden Frequenzbereich 10000 mW/m<sup>2</sup>) gemäß EU-Ratsempfehlung 1999/519/EG [16] setzt zunächst Klarheit voraus welche Größen mit dem genannten Referenzwert zu vergleichen sind. Gemäß dem genannten Dokument sind jeweils zeitlich über 6 Minuten Intervalle und räumlich über Körperdimensionen gemittelte Feldgrößen (Strahlungsleistungsdichte) mit dem Referenzwert zu vergleichen. D.h., die in Tabelle 5-5 zusammengefassten räumlichen Mittelwerte der Burst-Spitzenwerte sind noch entsprechend dem effektiven Duty Cycle über einen Zeitraum von 6 Minuten zu mitteln.

Die in Tabelle 5-2 bis Tabelle 5-4 für die Situationen 1 bis 4 angegebenen räumlichen Mittelwerte aus den Berechnungen können, unter Annahme von jeweils für die

Situation definierten konstanten Datenverkehrsverhältnisse über einen 6 Minuten Zeitraum, direkt mit dem Referenzwert verglichen werden. Es zeigt sich dabei, dass selbst **unter extremen Verhältnissen** (z.B. Situation 2 in MP2: Person nahe am Access Point während intensiven Downloads) die resultierenden Immissionen **typischerweise kaum höher als 1 Promille des Referenzwertes** liegen.

**Unter** für das Szenario **üblichen Verhältnissen** (z.B. Situation 1 in MP1, MP3-6) werden die Immissionen noch ein bis 2 Zehnerpotenzen geringer sein, d.h., **≤ 0.01% des Referenzwertes**. Immissionen oberhalb von 1 Promille des Referenzwertes sind üblicherweise nur in unmittelbarer Nähe (Distanz von weniger als 30 cm) von WLAN Access Point Antennen oder Client Antennen zu erwarten. Bei noch größerer Annäherung an Antennen verliert die Beurteilung auf Basis von Referenzwerten ihre physikalische Sinnhaftigkeit und es muss auf andere Beurteilungsmethoden (mit Bezugnahme auf den Basisgrenzwert) zurückgegriffen werden (SAR-Messung). Bisher vorliegende Untersuchungen dazu (z.B. [11], [17]) zeigten jedoch auch für solche Fälle keine Überschreitung der Basisgrenzwerte für WLAN-Geräte nach IEEE 802.11b,g, wenngleich in [17] SAR-Werte bis zu 40% des Basisgrenzwertes berichtet werden.

Selbst bei Vernachlässigung der in [16] geforderten zeitlichen und räumlichen Mittelwertbildung liegen die zu erwartenden räumlichen Maximalwerte der Burst-Spitzenwerte, selbst unter extremen Verhältnissen (z.B. in MP2) im unteren einstelligen Prozentbereich des Referenzwertes von 10000 mW/m<sup>2</sup>.

### **5.1.6 Vergleich der Immissionswerte mit bisher publizierten Daten**

Ein Vergleich der hier ermittelten Immissionswerte mit bisher zu diesem Thema in [7]-[11] und [17] publizierten Daten zeigt grundsätzlich Übereinstimmung hinsichtlich der Größenordnung der Immissionen, wenn die Daten auf eine vergleichbare Basis gestellt werden (z.B., direkter Vergleich der Burst-Spitzenwerte oder für gleichen Duty Cycle). Bei Angaben relativ zu Referenz- bzw. Grenzwerten ist dabei zu beachten, dass in einigen Arbeiten lokale Burst-Spitzenwerte mit den Referenz- bzw. Grenzwerten verglichen werden, was nach den meisten Grenzwert definierenden Dokumenten (z.B. [16]) nicht korrekt ist (zeitliche und räumliche Mittelung!).

### **5.1.7 Mögliche Maßnahmen zur Immissionsminderung**

Grundsätzlich ist, wie bereits oben erwähnt, festzuhalten, dass die vorgefundenen Immissionen weit unterhalb der heute gültigen Referenzwerte liegen, d.h., aus formaler Sicht besteht kein Anlass für immissionsreduzierende Maßnahmen. Sollen dennoch die in diesem Szenario typischen Immissionen vermindert werden, bietet sich eine etwas günstigere Positionierung des Access Points an (z.B. an der Decke). Damit könnte vor allem die Exposition des Personals hinter der Theke und jene der im Bereich der Kasse unmittelbar vor der Theke stehenden Kunden reduziert werden. Eine immissionsmindernde Positionierung der Clients im vorliegenden Szenario (bzw. wahrscheinlich generell bei WLAN-Szenarien) ist dagegen schwer zu erreichen, da die Aufstellung individuell durch die Kunden erfolgt und damit nicht kontrollierbar ist. Hier kann nur versucht werden (eventuell durch vor Ort aufliegendes Informationsmaterial) die User anzuhalten bei der Aufstellung der Clients (Notebooks) entsprechend Rücksicht auf andere zu nehmen (z.B. Aufstellung des Clients bzw. Ausrichtung der Antenne wenn möglich zu einer nicht unmittelbar besetzten Seite).

## 5.2 Großflächiger Raum mit vielen Personen (Flughafen)

Als Vertreter großflächiger Indoor WLAN-Szenarien wurden zwei WLAN versorgte Bereiche am Flughafen Frankfurt/Main betrachtet.

### 5.2.1 Bereich 1 (Abflug Gates A1 bis A5)

#### Beschreibung des Szenarios und technische Kenndaten

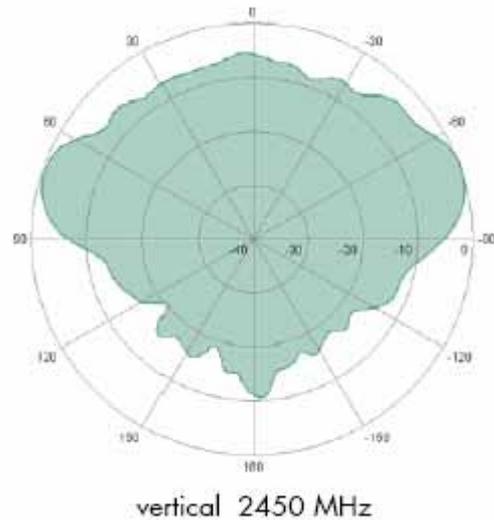
Für die auf den Abflug wartenden Passagiere ist dieser Bereich mit 2 WLAN Access Points auf Kanal 1 und Kanal 11 ausgestattet. In beiden Fällen wird jeweils eine omnidirektionale Antenne (SOA 2454/360/720/DF) von Huber und Suhner (Schweiz) mit einem spezifizierten Antennengewinn von 6 dBi eingesetzt. Abbildung 5-25 und Abbildung 5-26 zeigen Fotos vom untersuchten WLAN-Bereich. Abbildung 5-27 zeigt eine der beiden jeweils an der Metall-Lamellendecke montierten Antenne und deren vertikales Richtdiagramm (aus dem Datenblatt). Eine der Antennen ist im Bereich vor Gate A4, die andere im Bereich vor Gate A2 montiert.



Abbildung 5-25: Blick von Gate A5 in Richtung A4 bis A1 (links) und Blick auf Gate A5 (rechts).



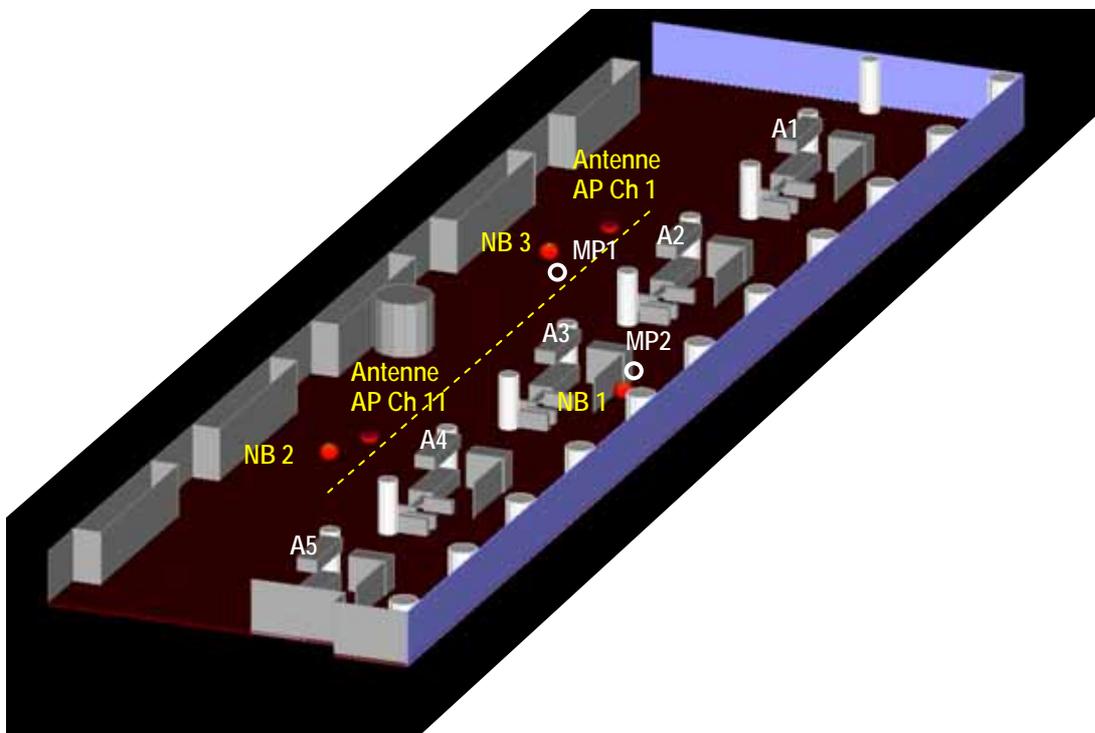
Abbildung 5-26: Blick (Vorfeld-seitig) von A5 nach A4 bis A1 (links) und Blick von Gate A2 in Richtung A3 bis A5 (rechts).



**Abbildung 5-27:** An der Metall-Lamellendecke montierte Access Point Antenne (links) und ihr vertikales Pattern (rechts).

Abbildung 5-28 zeigt das Szenario als Wireless Insite Modell.

Nach Angabe des Betreibers werden beide Access Points mit einer Sendeleistung von 17 dBm betrieben, allerdings liegen keine verlässlichen Angaben über die Kabeldämpfung zwischen Access Point und Antenne vor. Für die Berechnungen wird daher von der maximal zulässigen EIRP Sendeleistung (20 dBm) ausgegangen. D.h., es wird von 14 dBm Antenneneingangsleistung (bei 6 dBi Antennengewinn) ausgegangen.



**Abbildung 5-28:** Wireless Insite Szenario des Bereiches vor den Gates A1 bis A5.

### 5.2.1.1 Numerische Immissionsbestimmung

Die numerische Modellierung des Szenarios erfolgte auf Basis von Grundrissplänen des Gebäudes (aus Vertraulichkeits- bzw. Sicherheitsgründen hier nicht abgebildet) und der vor Ort vorgefundenen Situation. Zusätzlich zu den beiden Access Point Antennen wurden Notebook Clients (jeweils mit 17 dBm Sendeleistung bei 3 dBi Antennengewinn) modelliert (Abbildung 5-28).

Die Ergebnisse der Immissionsberechnungen liefern zunächst die einzelnen Immissionsbeiträge der einzelnen Quellen unter der Annahme kontinuierlicher Aussendung. Diese Einzelbeiträge können dann entsprechend dem tatsächlichen effektiven Duty Cycle skaliert und zur zeitlich gemittelten Gesamtimmission in den betrachteten Empfängerpunkten überlagert werden. Als Empfängerpunkte wurden einerseits ein Empfängerpunktraster in 175 cm Höhe über den gesamten Raumbereich vor den Gates A1 bis A5 definiert und andererseits räumlich höher aufgelöste Empfängerpunktraster in den messtechnisch untersuchten Raumbereichen MP1 und MP2 betrachtet (50 cm x 50 cm Raster in 5 unterschiedlichen Höhen von 75 cm bis 175 cm).

Tabelle 5-6 fasst die wesentlichsten Berechnungsparameter zusammen. *Ray Spacing*, *Collection Surface Radius* und Anzahl berücksichtigter *Reflexionen*, *Transmissionen* und *Beugungen* wurden entsprechend den Ausführungen in Kapitel 3.3.1.1 gewählt.

<b>Berechnungsparameter für Berechnung vor Gates A1 bis A5</b>	
Ray Spacing	0,2°
Collection Surface Radius	2,5 cm
Anzahl Reflexionen, Transmissionen, Beugungen	3 Reflexionen, 1 Transmissionen, 1 Beugung
Materialparameter	Glas $\epsilon=19$ , $\sigma=13,3$ mS/m
	Ziegel $\epsilon=4,0$ , $\sigma=53,2$ mS/m
	Metall     PEC
	Stahlbeton $\epsilon=9$ , $\sigma=120,0$ mS/m
Access Point Antenne 1	2,412 GHz, Sendeleistung 14 dBm, Omni 6 dBi
Access Point Antenne 2	2,462 GHz, Sendeleistung 14 dBm, Omni 6 dBi
Notebook Client 1	2,462 GHz, Sendeleistung 17 dBm, Dipol 3 dBi
Notebook Client 2	2,412 GHz, Sendeleistung 17 dBm, Dipol 3 dBi
Notebook Client 3	2,462 GHz, Sendeleistung 17 dBm, Dipol 3 dBi

Tabelle 5-6: Berechnungsparameter für das Szenario vor den Gates A1 bis A5.

Abbildung 5-29 zeigt die Einzelbeiträge (zeitlich unskaliert, d.h., entsprechend der Burst-Spitzenwerte) der beiden Access Points zur großflächigen Feldverteilung in der Horizontalebene in 175 cm Höhe. Abbildung 5-30 zeigt die summierte mittlere Feldverteilung in dieser Ebene für den Fall, dass keine aktiven Clients vorhanden sind (beide Access Points senden nur den Beacon). Abbildung 5-31 bis Abbildung 5-35 zeigen die Beiträge (zeitlich unskaliert, d.h., entsprechend der Burst-Spitzenwerte) der einzelnen Quellen in den beiden messtechnisch untersuchten Messpositionen MP1 und MP2.

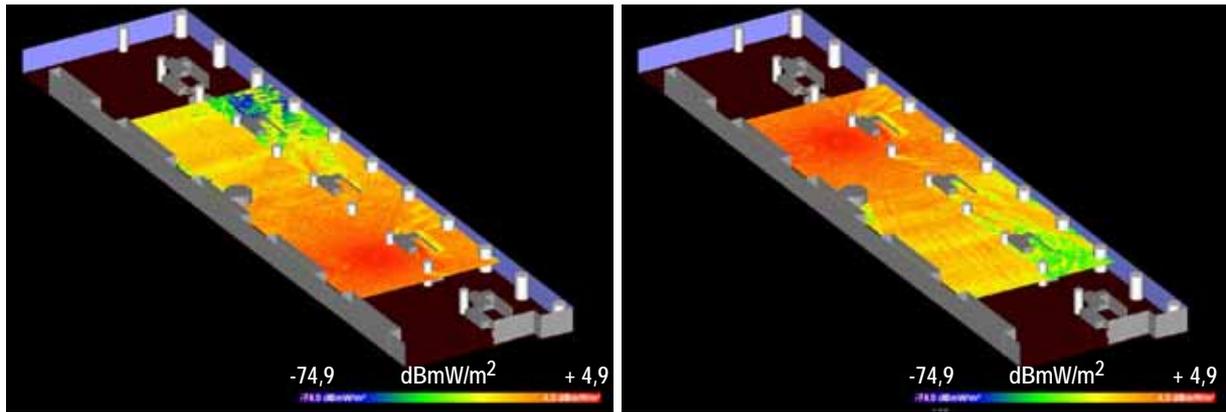


Abbildung 5-29: Immissionsbeiträge des Access Points 2 vor Gate A4 (links) und des Access Points 1 vor Gate 2 (rechts) in einer Horizontalebene in 175 cm Höhe, jeweils unter der Annahme kontinuierlicher HF Abstrahlung (entspricht Burst-Spitzenwerten).

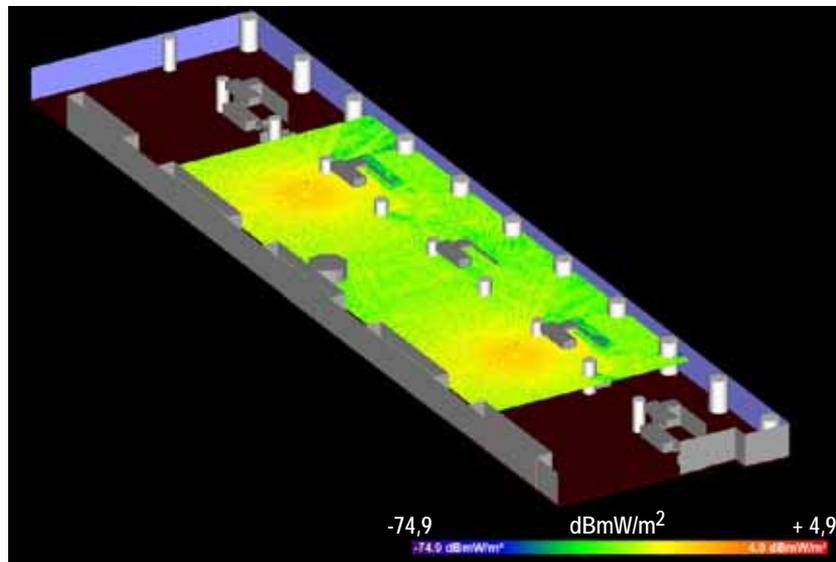
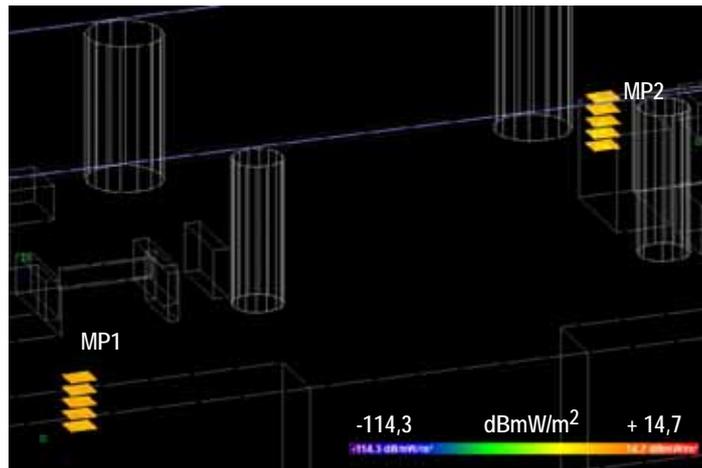


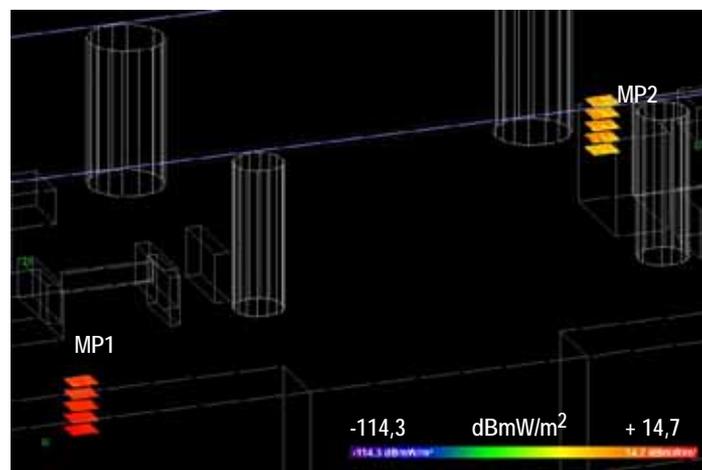
Abbildung 5-30: Summierte mittlere Immissionsverteilung in 175 cm Höhe für den Fall ohne aktive Clients (nur Beacon Aussendung der Access Points).



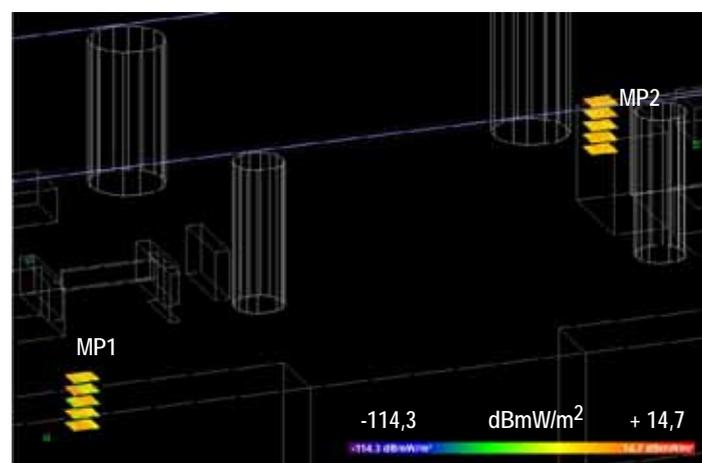
Abbildung 5-31: Immissionsbeitrag des Access Points vor Gate A2 (unter Annahme kontinuierlicher HF Abstrahlung) in 5 unterschiedlichen Höhen an den betrachteten Messpositionen MP1 und MP2.



**Abbildung 5-32:** Immissionsbeitrag des Access Points vor Gate A4 (unter Annahme kontinuierlicher HF Abstrahlung) in 5 unterschiedlichen Höhen an den betrachteten Messpositionen MP1 und MP2.



**Abbildung 5-33:** Immissionsbeitrag des Notebook Clients 1 (unter Annahme kontinuierlicher HF Abstrahlung) in 5 unterschiedlichen Höhen an den betrachteten Messpositionen MP1 und MP2.



**Abbildung 5-34:** Immissionsbeitrag des Notebook Clients 2 (unter Annahme kontinuierlicher HF Abstrahlung) in 5 unterschiedlichen Höhen an den betrachteten Messpositionen MP1 und MP2.

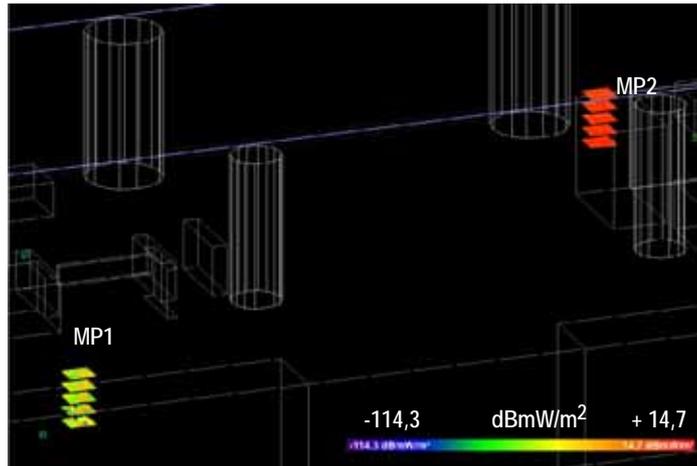


Abbildung 5-35: Immissionsbeitrag des Notebook Clients 3 (unter Annahme kontinuierlicher HF Abstrahlung) in 5 unterschiedlichen Höhen an den betrachteten Messpositionen MP1 und MP2.

	effektiver Duty Cycle		Immission in mW/m <sup>2</sup>	
			MP1	MP2
Einzel- Immissions- Spitzenwerte	AP1: 1.0	räumlicher Mittelwert	0.4647	0.0091
		räumliches Maximum	1.4893	0.0679
	AP2: 1.0	räumlicher Mittelwert	0.0086	0.0055
		räumliches Maximum	0.0342	0.0551
	NB1: 1.0	räumlicher Mittelwert	6.4946	0.0255
		räumliches Maximum	29.7465	0.3158
	NB2: 1.0	räumlicher Mittelwert	0.0046	0.0073
		räumliches Maximum	0.0567	0.0551
	NB3: 1.0	räumlicher Mittelwert	0.0027	3.1990
		räumliches Maximum	0.0259	11.0488
Situation 1 mittlere summierte Immission	AP1: 0.2	räumlicher Mittelwert	0.74569	0.32666
	AP2: 0.3			
	NB1: 0.1			
	NB2: 0.1			
Situation 2 mittlere summierte Immission	NB3: 0.1	räumliches Maximum	3.06794	1.11042
	AP1: 0.6	räumlicher Mittelwert	0.93412	0.33195
	AP2: 0.6			
	NB1: 0.1			
NB2: 0.1				
Situation 3 mittlere summierte Immission	NB3: 0.1	räumliches Maximum	3.30578	1.11764
	AP1: 0.1	räumlicher Mittelwert	2.00001	1.29383
	AP2: 0.1			
	NB1: 0.3			
NB2: 0.7				
Situation 4 mittlere summierte Immission	NB3: 0.4	räumliches Maximum	8.97016	4.42480
	AP1: 0.005	räumlicher Mittelwert	0.00237	0.00007
	AP2: 0.005			
	NB1: 0.0			
NB2: 0.0				
	NB3: 0.0	räumliches Maximum	0.00748	0.00039

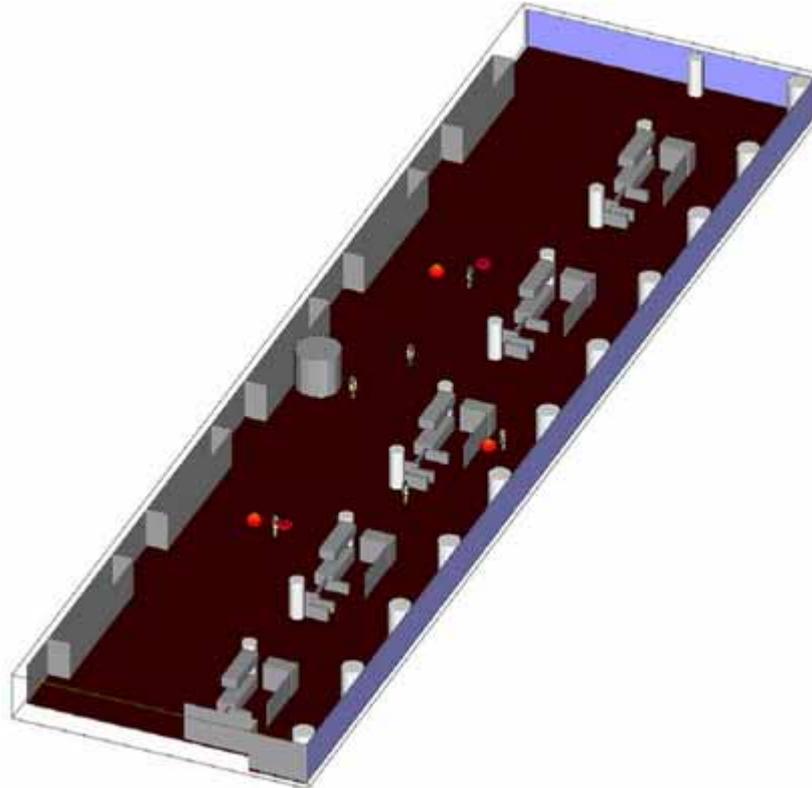
Tabelle 5-7: Berechnungsergebnis in Form einer Zusammenstellung der Einzelimmissionsbeiträge und der mittleren summierten Immission für unterschiedliche Datenverkehrs-Situationen in den betrachteten Messpositionen MP1 und MP2.

Tabelle 5-7 fasst die Berechnungsergebnisse in den einzelnen Messpositionen für unterschiedlich angenommene effektive Duty Cycles (Datenverkehrs-Situationen) zusammen. Der obere Teil der Tabelle („Einzel-Immissions-Spitzenwerte“) stellt keine realistische Situation dar, soll jedoch zur Orientierung über das Verhältnis der Einzelbeiträge (Burst-Spitzenwerte) in den unterschiedlichen Messpositionen dienen. Situation 1 entspricht im Mittel einer typischen Datenverkehrssituation wie sie vor Ort im Zeitraum der Messungen maximal beobachtet werden konnte. Situation 2 kann als Repräsentant für den Extremfall eines intensiven Downloads angesehen werden, Situation 3 soll die Verhältnisse während intensiven Uploads von den 3 vorhandenen Notebooks widerspiegeln. Situation 4 entspricht etwa den Verhältnissen, ohne Clients im Netzwerk (nur Aussendung des Beacons durch die Access Points). Für diesen Fall ist die summierte Feldverteilung in einer Horizontalebene in 175 cm Höhe (Kopfhöhe) in Abbildung 5-30 dargestellt.

### **Variation der Immissionen durch Veränderungen im Szenario**

Um einen Anhaltspunkt für die Variationen der Immissionen, verursacht durch Veränderungen im Feldraum zu gewinnen, wurde das oben beschriebene Szenario, unter Beibehaltung aller sonstigen Berechnungsparameter zusätzlich unter folgenden Annahmen simuliert:

- Anwesenheit von Personen im Feldraum bei gleicher Quellenpositionierung wie im ursprünglichen Szenario (Abbildung 5-36).
- Veränderte Personenverteilung und veränderte Aufstellung der Clients (Abbildung 5-37)



**Abbildung 5-36:** Szenario mit Anwesenheit von Personen und unveränderter Quellenpositionierung.  
In der Grafik sind alle Quellen rot markiert.

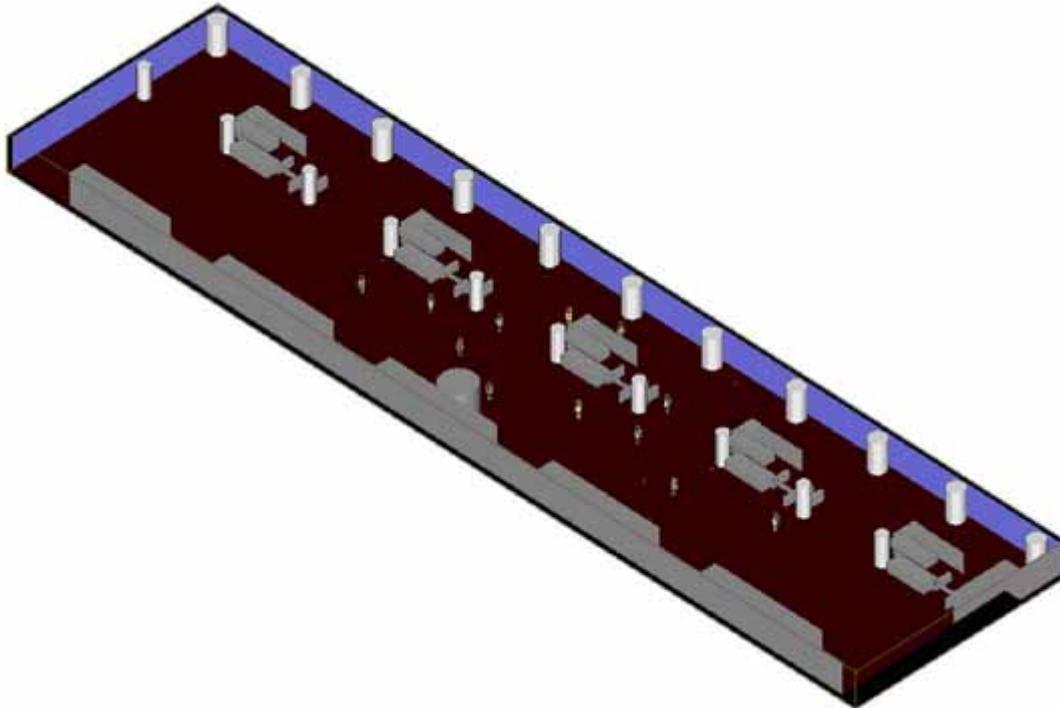


Abbildung 5-37: Szenario mit veränderter Personenverteilung und veränderter Aufstellung der Clients.

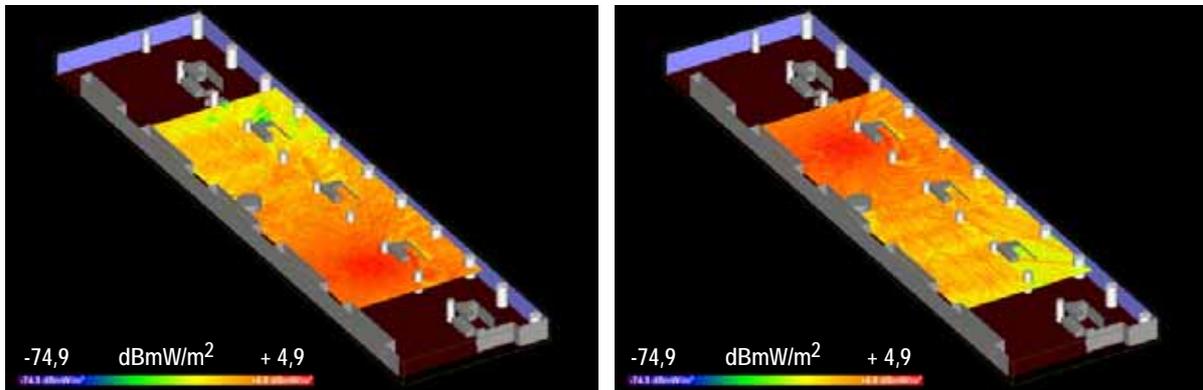
Als Materialeigenschaften für die stark vereinfachten homogenen Personenmodelle wurden  $\epsilon_r = 53$  und  $\sigma = 1,95 \text{ S/m}$  gewählt.

Abbildung 5-38 zeigt die Einzelbeiträge (zeitlich unskaliert, d.h., entsprechend der Burst-Spitzenwerte) der beiden Access Points zur großflächigen Feldverteilung in der Horizontalebene in 175 cm Höhe und Abbildung 5-39 zeigt die summierte mittlere Feldverteilung in dieser Ebene für den Fall, dass keine aktiven Clients vorhanden sind (beide Access Points senden nur den Beacon) bei Anwesenheit von Personen und unveränderter Quellenpositionierung (vgl. Abbildung 5-36).

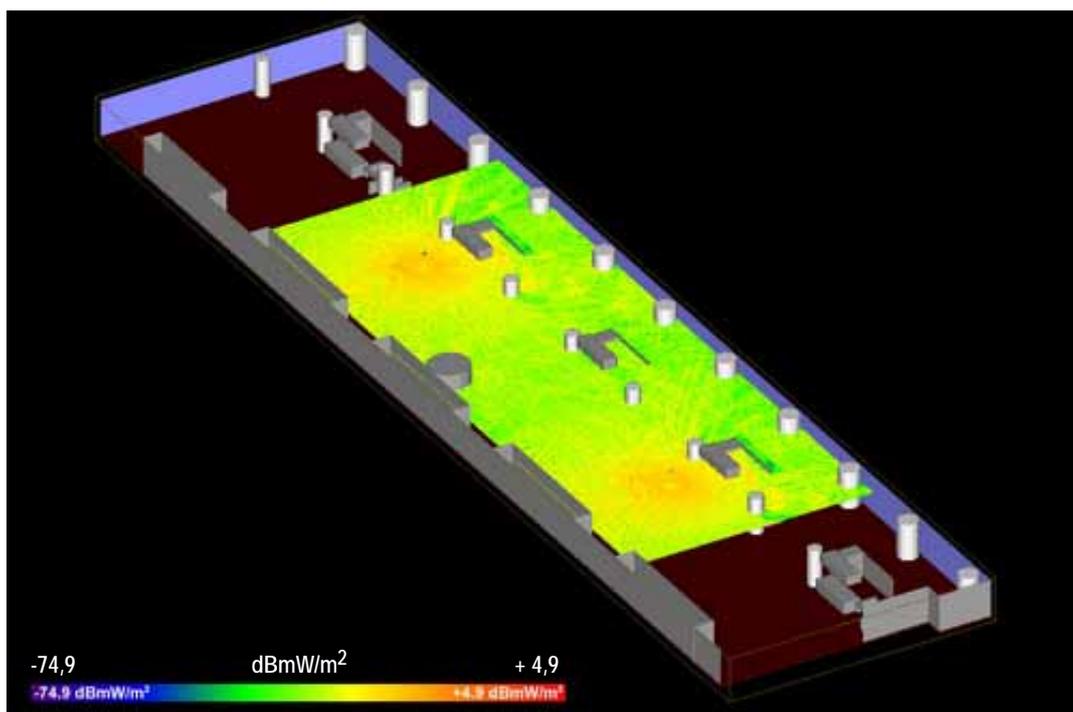
Abbildung 5-40 und Abbildung 5-41 zeigen in analoger Weise die Verhältnisse für das Szenario mit veränderter Personenverteilung und veränderter Positionen der Clients gemäß Abbildung 5-37 (wieder unter der Annahme kontinuierliche Abstrahlung, d.h. Feldwerte entsprechen Burst-Spitzenwerten).

Tabelle 5-8 und Tabelle 5-9 fassen die Berechnungsergebnisse in den einzelnen Messpositionen für unterschiedlich angenommene effektive Duty Cycles (Datenverkehrs-Situationen) zusammen. Der obere Teil der Tabelle („Einzel-Immissions-Spitzenwerte“) stellt keine realistische Situation dar, soll jedoch zur Orientierung über das Verhältnis der Einzelbeiträge (Burst-Spitzenwerte) in den unterschiedlichen Messpositionen dienen. Situation 1 entspricht im Mittel einer typischen Datenverkehrssituation wie sie vor Ort im Zeitraum der Messungen maximal beobachtet werden konnte. Situation 2 kann als Repräsentant für den Extremfall eines intensiven Downloads angesehen werden, Situation 3 soll die Verhältnisse während intensiven Uploads von den 3 vorhandenen Notebooks widerspiegeln. Situation 4 entspricht etwa den Verhältnissen, ohne Clients im Netzwerk (nur Aussendung des Beacons durch die Access Points). Für diesen Fall sind die summierten Feldverteilung in einer Horizontalebene in 175 cm Höhe (Kopfhöhe) in Abbildung 5-39 und Abbildung 5-41 dargestellt.

Die angenommenen effektiven Duty Cycles entsprechen jenen von Tabelle 5-7 um einen direkten Vergleich des Einflusses der angenommenen Veränderungen im Feldraum mit den Verhältnissen ohne Personen im Feldraum zu erlauben.



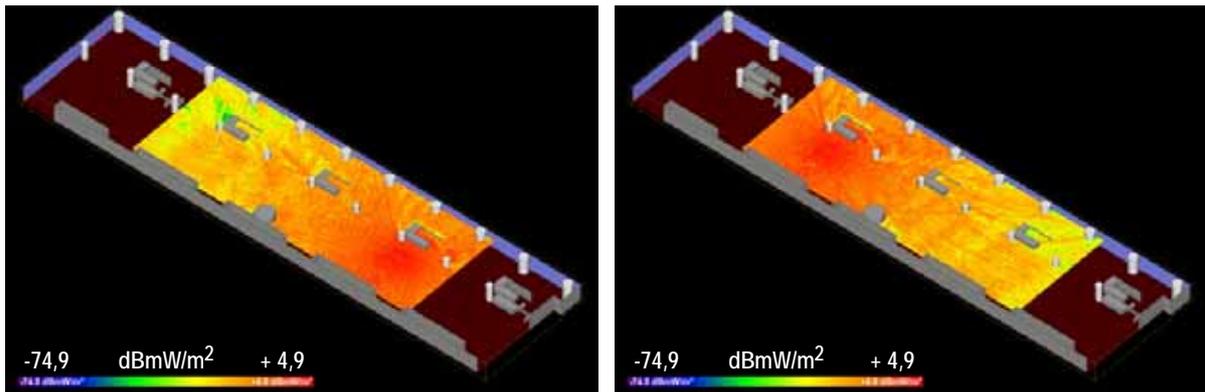
**Abbildung 5-38:** Immissionsbeiträge des Access Points 2 vor Gate A4 (links) und des Access Points 1 vor Gate 2 (rechts) in einer Horizontalebene in 175 cm Höhe, jeweils unter der Annahme kontinuierlicher HF Abstrahlung (entspricht Burst-Spitzenwerten) für das modifizierte Szenario gemäß Abbildung 5-36 (mit Personen und unveränderter Quellenmodellierung).



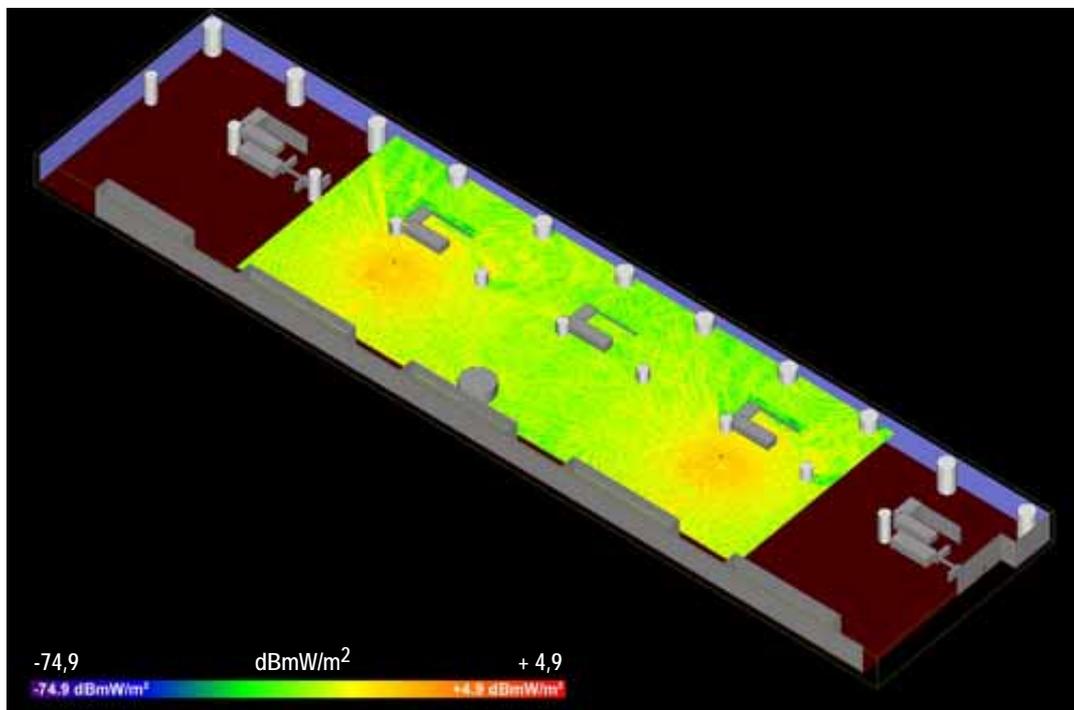
**Abbildung 5-39:** Summierte mittlere Immissionsverteilung in 175 cm Höhe für den Fall ohne aktive Clients (nur Beacon Aussendung der Access Points) für das modifizierte Szenario gemäß Abbildung 5-36 (mit Personen und unveränderter Quellenmodellierung).

Ein Vergleich der Berechnungsergebnisse für Situationen mit und ohne Personen, bei unveränderter Quellenpositionierung zeigt Veränderungen der räumlich gemittelten Immissionswerte in den betrachteten Messpositionen im Ausmaß von weniger als 30%, was als Folge der Weitläufigkeit des untersuchten Bereichs und der damit verbundenen relativ geringen Personendichte gesehen werden kann. Es sind dabei,

abhängig von der jeweiligen Messposition, sowohl teilweise Erhöhungen, als auch teilweise Verringerungen der Immissionen zu beobachten. Einfache Ursache-Wirkungszusammenhänge für die beobachteten Schwankungen der Exposition in Abhängigkeit von einzelnen Parametern der Personenverteilung können, aufgrund der beteiligten komplexen Wellenausbreitungsphänomene, im Allgemeinen nicht ohne weiteres abgeleitet werden. Es ist vielmehr die Gesamtheit des vorliegenden Szenarios mit allen seinen Einzelheiten, das die, im Allgemeinen sehr komplexe und inhomogene räumliche Feldverteilung (und damit die mittlere Immission in einzelnen Messpositionen) bestimmt.



**Abbildung 5-40:** Immissionsbeiträge des Access Points 2 vor Gate A4 (links) und des Access Points 1 vor Gate 2 (rechts) in einer Horizontalebene in 175 cm Höhe, jeweils unter der Annahme kontinuierlicher HF Abstrahlung (entspricht Burst-Spitzenwerten) für das modifizierte Szenario gemäß Abbildung 5-37 (mit veränderter Personenverteilung und veränderter Positionierung der Clients).



**Abbildung 5-41:** Summierte mittlere Immissionsverteilung in 175 cm Höhe für den Fall ohne aktive Clients (nur Beacon Aussendung der Access Points) für das modifizierte Szenario gemäß Abbildung 5-37 (mit veränderter Personenverteilung und veränderter Positionierung der Clients).

	effektiver Duty Cycle		Immission in mW/m <sup>2</sup>		
			MP1	MP2	
<b>Einzel- Immissions- Spitzenwerte</b>	AP1: 1.0	räumlicher Mittelwert	0.4836	0.0095	
		räumliches Maximum	1.6083	0.0622	
	AP2: 1.0	räumlicher Mittelwert	0.0087	0.0058	
		räumliches Maximum	0.0341	0.0429	
	NB1: 1.0	räumlicher Mittelwert	6.4497	0.0260	
		räumliches Maximum	30.2180	0.3206	
	NB2: 1.0	räumlicher Mittelwert	0.0045	0.0057	
		räumliches Maximum	0.0568	0.0644	
	NB3: 1.0	räumlicher Mittelwert	0.0027	3.2578	
		räumliches Maximum	0.0266	10.7900	
	<b>Situation 1</b> mittlere summierte Immission	AP1: 0.2 AP2: 0.3 NB1: 0.1	räumlicher Mittelwert	0.74502	0.33259
		NB2: 0.1 NB3: 0.1	räumliches Maximum	3.20093	1.08250
<b>Situation 2</b> mittlere summierte Immission	AP1: 0.6 AP2: 0.6 NB1: 0.1	räumlicher Mittelwert	0.94108	0.33812	
	NB2: 0.1 NB3: 0.1	räumliches Maximum	3.55686	1.08656	
<b>Situation 3</b> mittlere summierte Immission	AP1: 0.1 AP2: 0.1 NB1: 0.3	räumlicher Mittelwert	1.98835	1.31644	
	NB2: 0.7 NB3: 0.4	räumliches Maximum	9.15459	4.31817	
<b>Situation 4</b> mittlere summierte Immission	AP1: 0.005 AP2: 0.005 NB1: 0.0	räumlicher Mittelwert	0.00246	0.00008	
	NB2: 0.0 NB3: 0.0	räumliches Maximum	0.00808	0.00035	

**Tabelle 5-8:** Berechnungsergebnis in Form einer Zusammenstellung der Einzelimmissionsbeiträge und der mittleren summierten Immission für unterschiedliche Datenverkehrs-Situationen in den betrachteten Messpositionen MP1 und MP2 bei Anwesenheit von Personen im Feldraum (Quellenpositionierung unverändert, vgl. Abbildung 5-36).

	effektiver Duty Cycle		Immission in mW/m <sup>2</sup>		
			MP1	MP2	
Einzel- Immissions- Spitzenwerte	AP1: 1.0	räumlicher Mittelwert	0.4807	0.0101	
		räumliches Maximum	1.5363	0.0740	
	AP2: 1.0	räumlicher Mittelwert	0.0086	0.0058	
		räumliches Maximum	0.0333	0.0460	
	NB1: 1.0	räumlicher Mittelwert	0.1804	0.0083	
		räumliches Maximum	0.9680	0.1386	
	NB2: 1.0	räumlicher Mittelwert	0.0115	0.2471	
		räumliches Maximum	0.2214	1.0583	
	NB3: 1.0	räumlicher Mittelwert	0.0065	0.0091	
		räumliches Maximum	0.0678	0.1153	
	Situation 1 mittlere summierte Immission	AP1: 0.2 AP2: 0.3 NB1: 0.1 NB2: 0.1 NB3: 0.1	räumlicher Mittelwert	0.11856	0.03021
			räumliches Maximum	0.32683	0.11041
Situation 2 mittlere summierte Immission	AP1: 0.6 AP2: 0.6 NB1: 0.1 NB2: 0.1 NB3: 0.1	räumlicher Mittelwert	0.31342	0.03600	
		räumliches Maximum	0.94290	0.13752	
Situation 3 mittlere summierte Immission	AP1: 0.1 AP2: 0.1 NB1: 0.3 NB2: 0.7 NB3: 0.4	räumlicher Mittelwert	0.11372	0.18066	
		räumliches Maximum	0.32657	0.75070	
Situation 4 mittlere summierte Immission	AP1: 0.005 AP2: 0.005 NB1: 0.0 NB2: 0.0 NB3: 0.0	räumlicher Mittelwert	0.00245	0.00008	
		räumliches Maximum	0.00771	0.00041	

Tabelle 5-9: Berechnungsergebnis in Form einer Zusammenstellung der Einzelimmissionsbeiträge und der mittleren summierten Immission für unterschiedliche Datenverkehrs-Situationen in den betrachteten Messpositionen MP1 und MP2 bei Anwesenheit von Personen im Feldraum und veränderter Quellenpositionierung gemäß Abbildung 5-37.

### 5.2.1.2 Messtechnische Immissionsbestimmung

Bei Beginn der Messungen war kein aktiver Client im Bereich vorhanden. Es wurden zunächst entlang einer Verbindungslinie zwischen den beiden Access Point Antennen in 175 cm Höhe die Immissionsbeiträge der beiden Access Points gemessen. Abbildung 5-42 zeigt die Aufstellung der Mess-Sonde nahe dem Access Point auf Kanal 1. Weiters wurde in den in Abbildung 5-28 markierten Messpositionen MP1 und MP2 Messungen in mehreren Höhen (75 cm bis 125 cm Höhe) durchgeführt. Abbildung 5-43 zeigt die Mess-Sonde in diesen Messpositionen.

Die Messungen erfolgten grundsätzlich im Zero Span Modus des Spektrumanalysators mit RMS Detektor und bei 100 kHz Auflösebandbreite.



**Abbildung 5-42:** Aufstellung der Mess-Sonde nahe dem Access Point auf Kanal 11.  
Die Antenne an der Decke ist am oberen Bildrand zu erkennen.



**Abbildung 5-43:** Aufstellung der Mess-Sonde in MP2 (links) und MP1 (rechts).

Tabelle 5-10 fasst die gemessenen und bezüglich der Auflösebandbreite korrigierten Burst-Spitzenwerte in den Messpositionen MP1 und MP2 zusammen. Abbildung 5-44 zeigt das Ergebnis der Messungen entlang einer gedachten Verbindungslinie auf 175 cm Höhe zwischen den Access Points. Es zeigt sich dabei erwartungsgemäß eine maximale Leistungsflussdichte direkt unterhalb der Antennen. Auffallend ist jedoch, dass unterhalb der Antenne des Access Points AP2 deutlich höhere Immissionen auftreten als unterhalb der Antenne des Access Points AP1, obwohl die Access Points laut Betreiber mit gleicher Ausgangsleistung arbeiten und auch identische Antennen eingesetzt werden. Die Erklärung für diesen Unterschied (ca. Faktor 3 bezüglich der Leistungsflussdichte) dürfte auf unterschiedliche Leitungslängen (und damit unterschiedliche Dämpfungswerte) zwischen Access Points und Antennen zurückzuführen sein. Konkrete Angaben zu den Leitungsdämpfungen bzw. den

Leitungslängen konnten, wie bereits weiter oben erwähnt, seitens des Betreibers nicht gemacht werden.

Messposition	Höhe [cm]	Messwert S [mW/m <sup>2</sup> ]		räumlicher Mittelwert S [mW/m <sup>2</sup> ]	
		Ch 1	Ch 11	Ch 1	Ch 11
MP1	75	0.039	0.014	<b>2.047</b>	<b>0.014</b>
	100	3.009	0.012		
	125	3.092	0.017		
MP2	75	0.219	0.095	<b>0.125</b>	<b>0.096</b>
	100	0.180	0.120		
	125	0.079	0.073		

Tabelle 5-10: Messergebnisse (Burst-Spitzenwerte) in den Messpositionen MP1 und MP2.

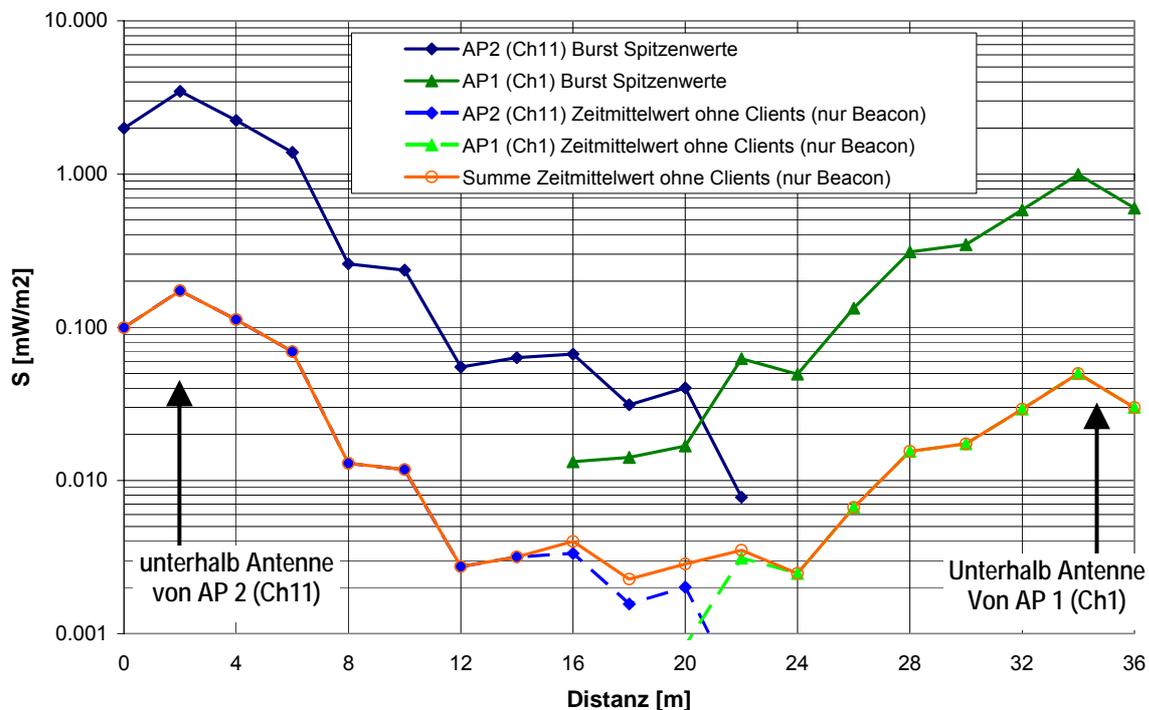


Abbildung 5-44: Messergebnis bei Messungen entlang einer gedachten Verbindungslinie auf 175 cm Höhe zwischen den Access Points.

## 5.2.2 Bereich 2 (Abflug Gates A28 bis A30)

### Beschreibung des Szenarios und technische Kenndaten

Ähnlich wie in 5.2.1 werden auch in diesem Bereich für die auf den Abflug wartenden Passagiere 2 WLAN Access Points auf Kanal 6 und Kanal 11 betrieben. In beiden Fällen wird jeweils eine omidirektional Antenne (CXL 2400-1/I) von Procom (Dänemark) mit einem spezifizierten Antennengewinn von 2 dBi eingesetzt. Abbildung 5-45 zeigt Fotos vom untersuchten WLAN-Bereich. Abbildung 5-46 zeigt die beiden jeweils an der Metalldecke montierten Antennen und deren vertikales Richtdiagramm (aus dem Datenblatt). Beide Antennen sind im Bereich zwischen Gate A28 und Gate A30 montiert.

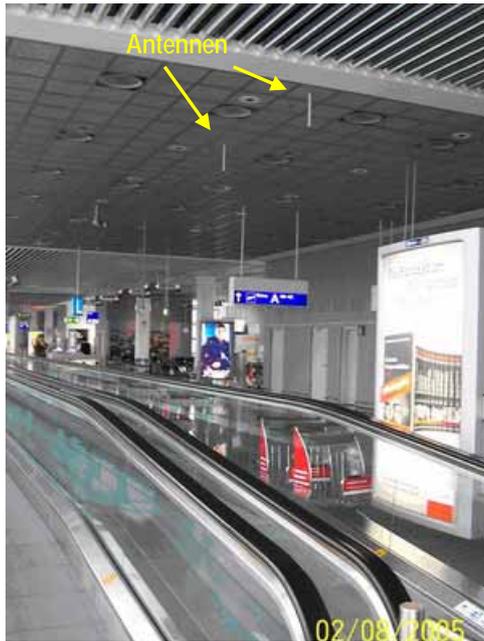


Abbildung 5-45: Blick von Höhe A28 in Richtung A30 (links) und Blick von A30 in Richtung Ost-Nordost (rechts).

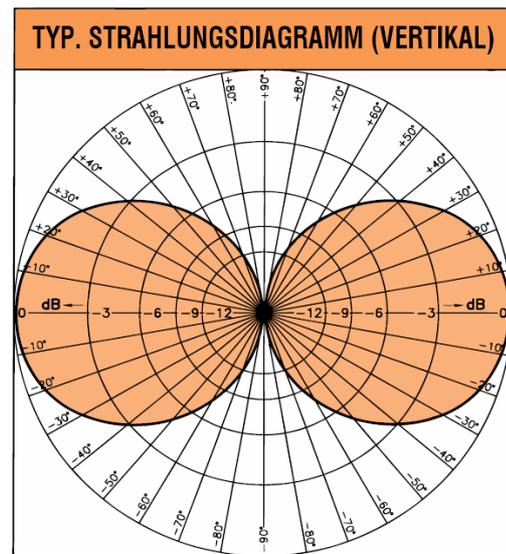


Abbildung 5-46: Detailansicht der Antennen (links) und zugehöriges vertikales Antennenmuster gemäß Datenblatt (rechts).

Abbildung 5-47 und Abbildung 5-48 zeigen das in *Wireless Insite* generierte Gesamtmodell, sowie eine Detailansicht des interessierenden Bereiches mit markierten Quellen (2 Access Point Antennen und ein Notebook Client, jeweils modelliert als Dipolantenne).

Nach Angabe des Betreibers werden beide Access Point mit einer Sendeleistung von 17 dBm betrieben, allerdings liegen keine verlässlichen Angaben über die Kabeldämpfung zwischen Access Point und Antenne vor. Für die Berechnungen wird von 17 dBm Antenneneingangsleistung (bei 2 dBi Antennengewinn) ausgegangen.

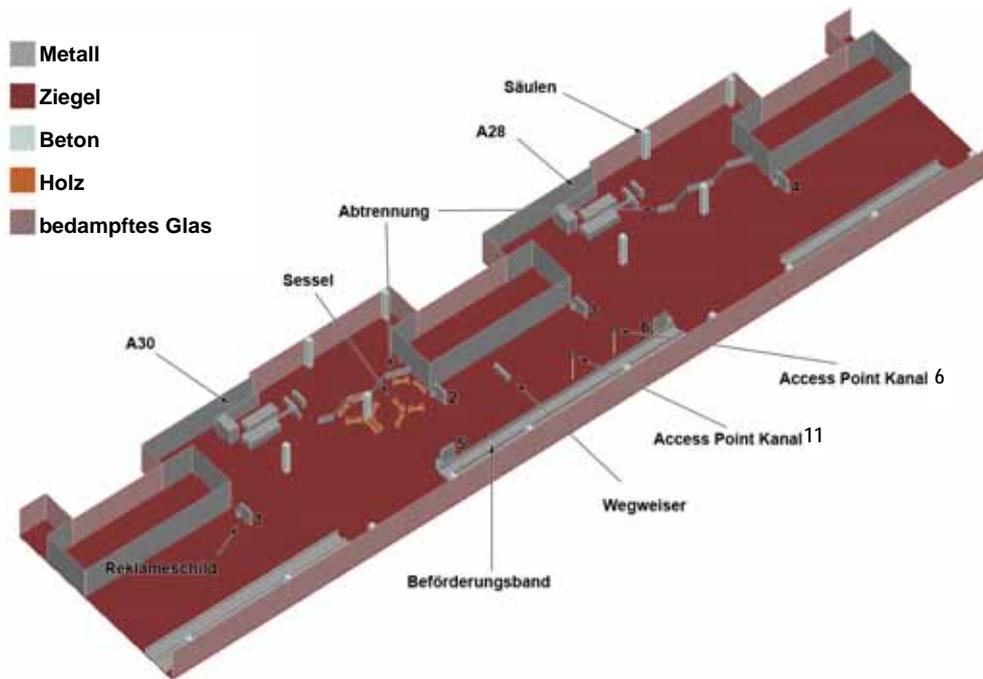


Abbildung 5-47: Wireless Insite Szenario des Bereiches vor den Gates A28 bis A30.

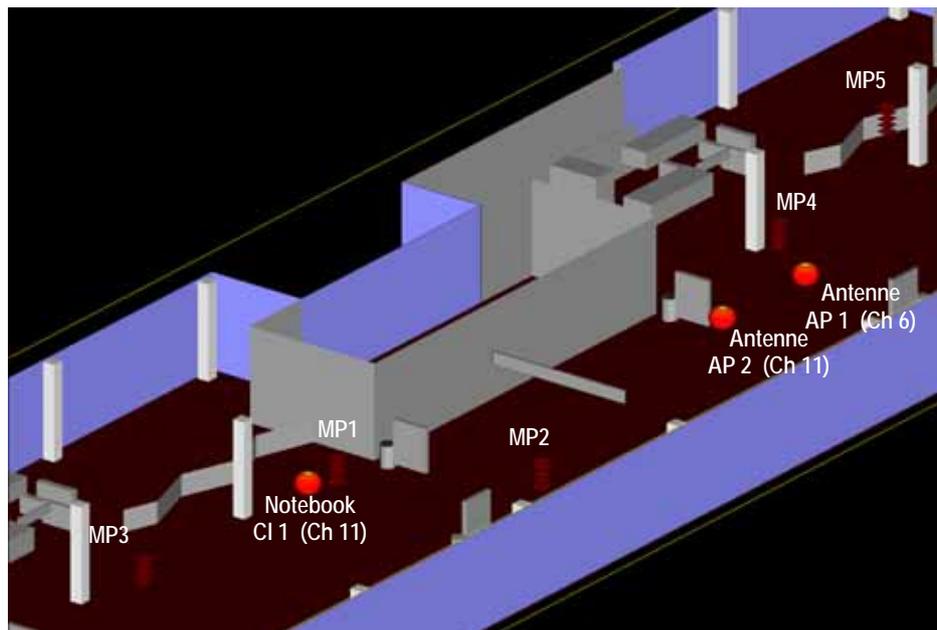


Abbildung 5-48: Detail des Modell-Szenarios des Bereiches vor den Gates A28 bis A30 mit markierten Quellen und für die detaillierte Immissionsbestimmung betrachteten Messpositionen MP1 bis MP5.

### 5.2.2.1 Numerische Immissionsbestimmung

Die numerische Modellierung des Szenarios erfolgte auf Basis von Grundrissplänen des Gebäudes (aus Vertraulichkeits- bzw. Sicherheitsgründen hier nicht abgebildet) und der vor Ort vorgefundenen Situation. Zusätzlich zu den beiden Access Point Antennen wurde ein Notebook Client (jeweils mit 17 dBm Sendeleistung bei 3 dBi Antennengewinn) modelliert (Abbildung 5-48).

Die Ergebnisse der Immissionsberechnungen liefern zunächst die einzelnen Immissionsbeiträge der einzelnen Quellen unter der Annahme kontinuierlicher

Aussendung. Diese Einzelbeiträge können dann entsprechend dem tatsächlichen effektiven Duty Cycle skaliert und zur zeitlich gemittelten Gesamtmission in den betrachteten Empfängerpunkten überlagert werden. Als Empfängerpunkte wurde einerseits ein Empfängerpunktraster in 175 cm Höhe über den gesamten Raumbereich vor den Gates A28 bis A30 definiert und andererseits räumlich höher aufgelöste Empfängerpunktraster in den messtechnisch untersuchten Raumbereichen MP1 bis MP5 betrachtet (50 cm x 50 cm Raster in 5 unterschiedlichen Höhen von 75 cm bis 175 cm).

Tabelle 5-11 fasst die wesentlichsten Berechnungsparameter zusammen. *Ray Spacing*, *Collection Surface Radius* und Anzahl berücksichtigter *Reflexionen*, *Transmissionen und Beugungen* wurden entsprechend den Ausführungen in Kapitel 3.3.1.1 gewählt.

Berechnungsparameter für Berechnung vor Gates A28 bis A30			
Ray Spacing	0,2°		
Collection Surface Radius	2,5 cm		
Anzahl Reflexionen, Transmissionen, Beugungen	3 Reflexionen, 1 Transmissionen, 1 Beugung		
Materialparameter	Glas	$\epsilon=19$ ,	$\sigma=13,3$ mS/m
	Ziegel	$\epsilon=4,0$ ,	$\sigma=53,2$ mS/m
	Metall	PEC	
	Stahlbeton	$\epsilon=9$ ,	$\sigma=120,0$ mS/m
Access Point Antenne 1	2,437 GHz, Sendeleistung 17 dBm, Dipol 2 dBi		
Access Point Antenne 2	2,462 GHz, Sendeleistung 17 dBm, Dipol 2 dBi		
Notebook Client 1	2,462 GHz, Sendeleistung 17 dBm, Dipol 3 dBi		

Tabelle 5-11: Berechnungsparameter für das Szenario vor den Gates A28 bis A30.

Abbildung 5-49 zeigt die Einzelbeiträge (zeitlich unskaliert, d.h., entsprechend der Burst-Spitzenwerte) der beiden Access Points zur großflächigen Feldverteilung in der Horizontalebene in 175 cm Höhe. Abbildung 5-50 zeigt die summierte mittlere Feldverteilung in dieser Ebene für den Fall, dass keine aktiven Clients vorhanden sind (beide Access Points senden nur den Beacon).

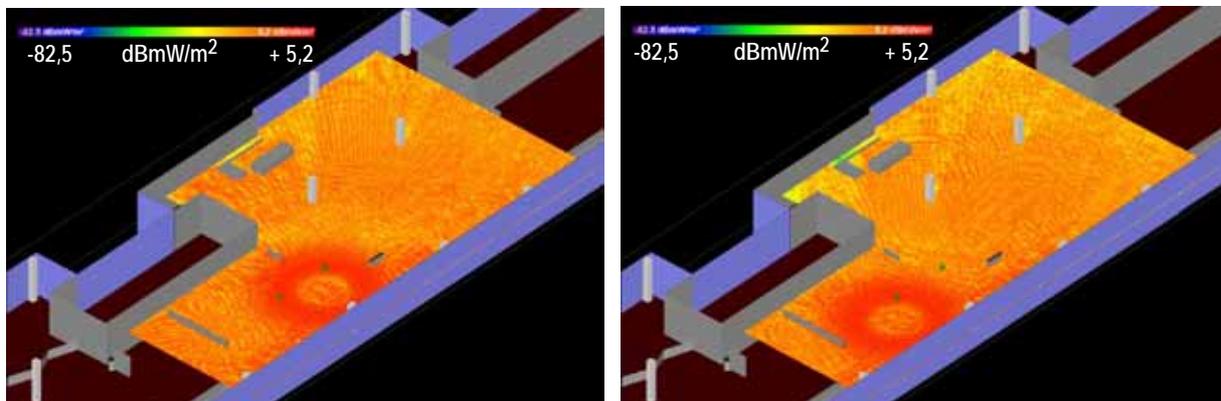


Abbildung 5-49: Immissionsbeiträge des Access Points auf Kanal 6 (links) und des Access Points auf Kanal 11 (rechts) in einer Horizontalebene in 175 cm Höhe, jeweils unter der Annahme kontinuierlicher HF Abstrahlung (entspricht Burst-Spitzenwerten).

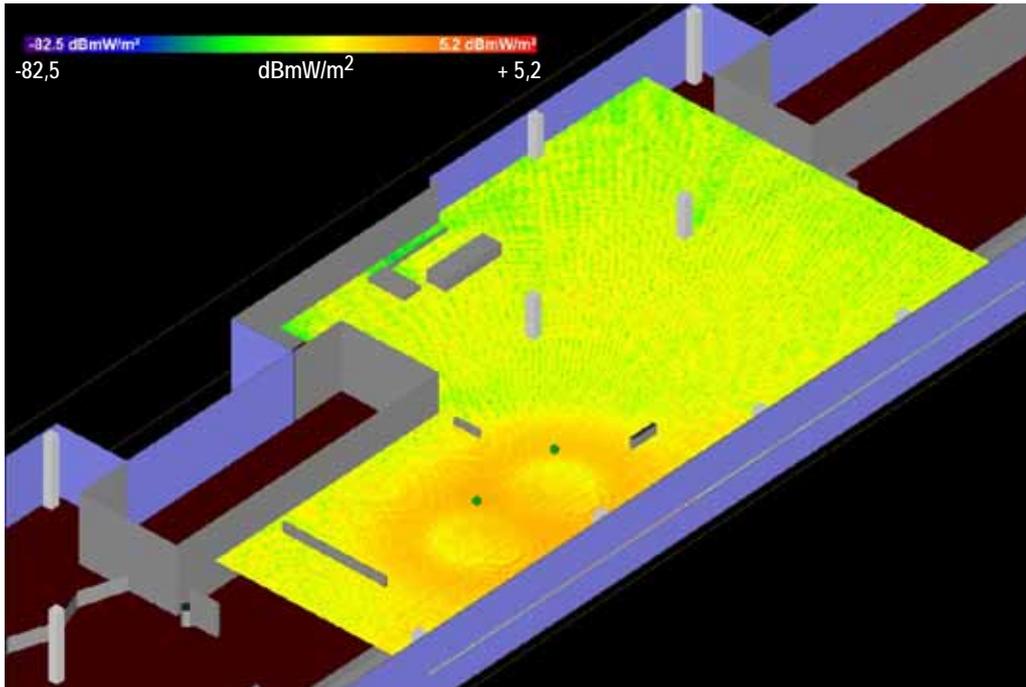


Abbildung 5-50: Summierte mittlere Immissionsverteilung in 175 cm Höhe für den Fall ohne aktive Clients (nur Beacon Aussendung der Access Points).

Abbildung 5-51 bis Abbildung 5-53 zeigen die Beiträge (zeitlich unskaliert, d.h., entsprechend der Burst-Spitzenwerte) der einzelnen Quellen in den messtechnisch untersuchten Messpositionen MP1 bis MP5.

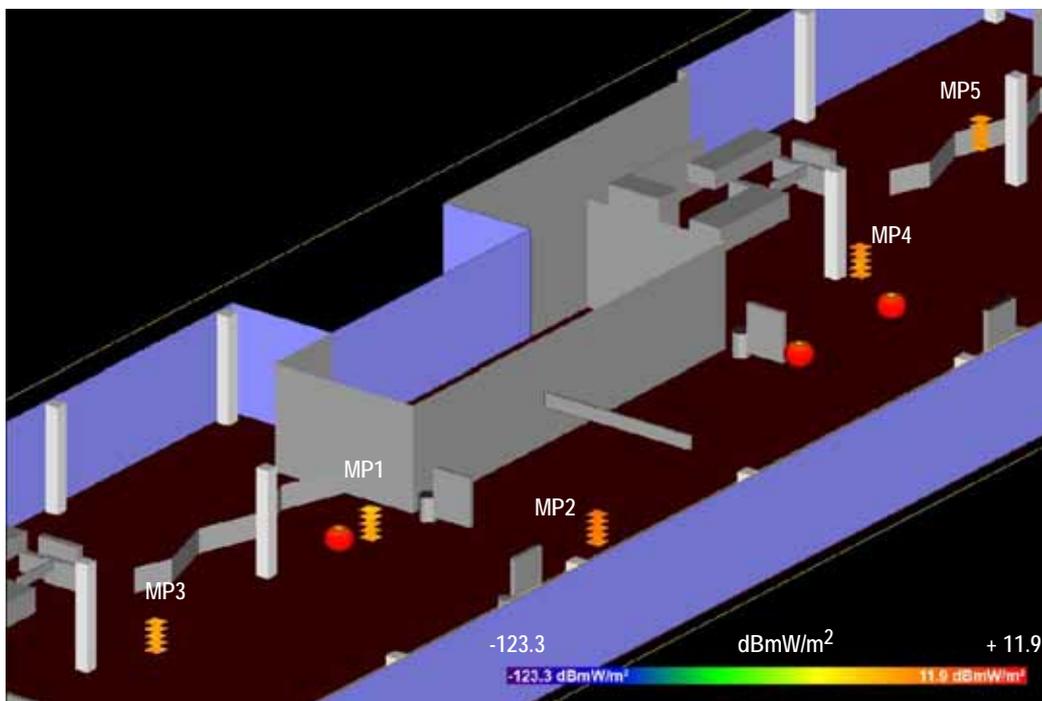
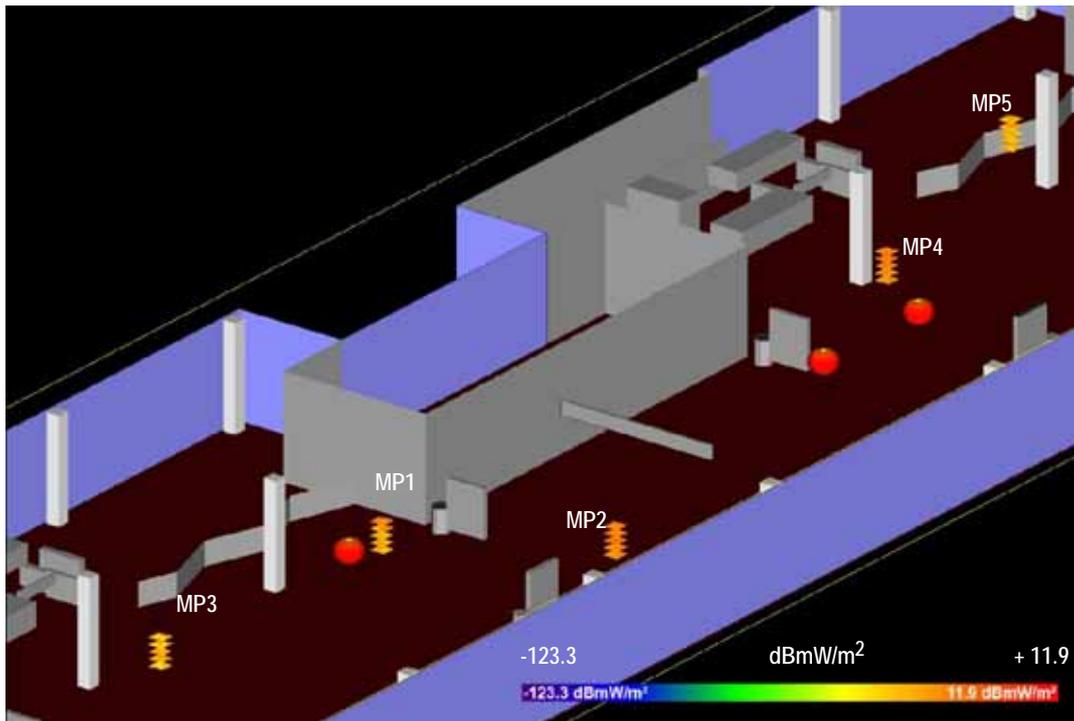
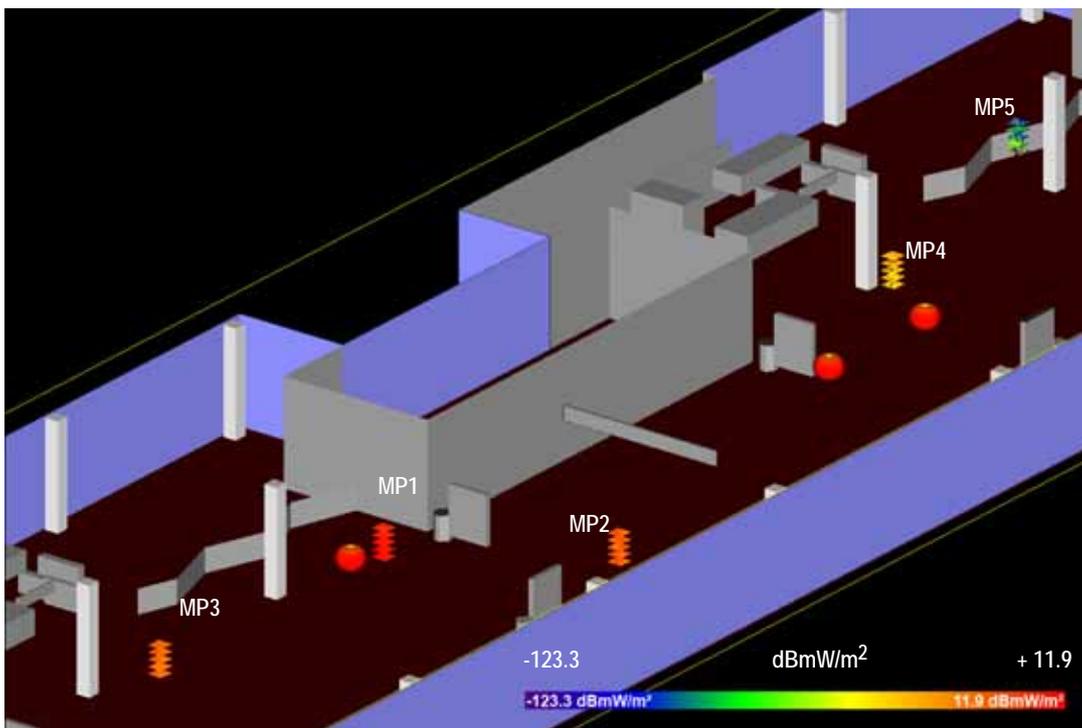


Abbildung 5-51: Immissionsbeitrag von Access Point 1 auf Kanal 6 (unter Annahme kontinuierlicher HF Abstrahlung) in 5 unterschiedlichen Höhen an den betrachteten Messpositionen MP1 bis MP5.



**Abbildung 5-52:** Immissionsbeitrag von Access Point 2 auf Kanal 11 (unter Annahme kontinuierlicher HF Abstrahlung) in 5 unterschiedlichen Höhen an den betrachteten Messpositionen MP1 bis MP5.



**Abbildung 5-53:** Immissionsbeitrag des Notebook Clients 1 auf Kanal 11 (unter Annahme kontinuierlicher HF Abstrahlung) in 5 unterschiedlichen Höhen an den betrachteten Messpositionen MP1 bis MP5.

Tabelle 5-12 fasst die Berechnungsergebnisse in den einzelnen Messpositionen für unterschiedlich angenommene effektive Duty Cycles (Datenverkehrs-Situationen) zusammen. Der obere Teil der Tabelle („Einzel-Immissions-Spitzenwerte“) stellt keine realistische Situation dar, soll jedoch zur Orientierung über das Verhältnis der Einzelbeiträge (Burst-Spitzenwerte) in den unterschiedlichen Messpositionen dienen.

Situation 1 entspricht im Mittel einer typischen Datenverkehrssituation wie sie vor Ort im Zeitraum der Messungen maximal beobachtet werden konnte. Situation 2 kann als Repräsentant für den Extremfall eines intensiven Downloads angesehen werden, Situation 3 soll die Verhältnisse während intensiven Uploads vom Notebook widerspiegeln. Situation 4 entspricht etwa den Verhältnissen, ohne Clients im Netzwerk (nur Aussendung des Beacons durch die Access Points). Für diesen Fall ist die summierte Feldverteilung in einer Horizontalebene in 175 cm Höhe (Kopfhöhe) in Abbildung 5-50 dargestellt.

	effektiver Duty Cycle		Immission in mW/m <sup>2</sup>				
			MP1	MP2	MP3	MP4	MP5
Einzel- Immissions- Spitzenwerte	AP1: 1.0	räumlicher Mittelwert	0.0066	0.0578	0.0080	0.0272	0.0205
		räumliches Maximum	0.0485	0.2996	0.0625	0.1881	0.1326
	AP2: 1.0	räumlicher Mittelwert	0.0124	0.0398	0.0062	0.0312	0.0106
		räumliches Maximum	0.1124	0.2301	0.0594	0.1725	0.0865
	NB1: 1.0	räumlicher Mittelwert	5.1118	0.2337	0.1383	0.0045	0.0001
		räumliches Maximum	16.2482	1.3090	0.7972	0.0629	0.0035
Situation 1 mittlere summierte Immission	AP1: 0.05	räumlicher Mittelwert	0.51399	0.03422	0.01547	0.00806	0.00317
	AP2: 0.2 NB1: 0.1	räumliches Maximum	1.62546	0.13397	0.08063	0.03630	0.01757
Situation 2 mittlere summierte Immission	AP1: 0.7	räumlicher Mittelwert	0.52449	0.09167	0.02376	0.04136	0.02183
	AP2: 0.7 NB1: 0.1	räumliches Maximum	1.63079	0.38146	0.09065	0.14638	0.12769
Situation 3 mittlere summierte Immission	AP1: 0.1	räumlicher Mittelwert	3.58015	0.17335	0.09823	0.00902	0.00321
	AP2: 0.1 NB1: 0.7	räumliches Maximum	11.37459	0.91914	0.55962	0.04892	0.01824
Situation 4 mittlere summierte Immission	AP1: 0.005	räumlicher Mittelwert	0.00095	0.00488	0.00071	0.00292	0.00156
	AP2: 0.005 NB1: 0.0	räumliches Maximum	0.00565	0.02646	0.00343	0.01039	0.00912

Tabelle 5-12: Berechnungsergebnis in Form einer Zusammenstellung der Einzelimmissionsbeiträge und der mittleren summierten Immission für unterschiedliche Datenverkehrs-Situationen in den betrachteten Messpositionen MP1 bis MP5.

### Variation der Immissionen durch Veränderungen im Szenario

Um einen Anhaltspunkt für die Variationen der Immissionen, verursacht durch Veränderungen im Feldraum zu gewinnen, wurde das oben beschriebene Szenario, unter Beibehaltung aller sonstigen Berechnungsparameter zusätzlich unter folgenden Annahmen simuliert:

- Anwesenheit von Personen im Feldraum bei gleicher Quellenpositionierung wie im ursprünglichen Szenario (Abbildung 5-54).
- Veränderte Personenverteilung und veränderte Aufstellung der Clients (Abbildung 5-55)

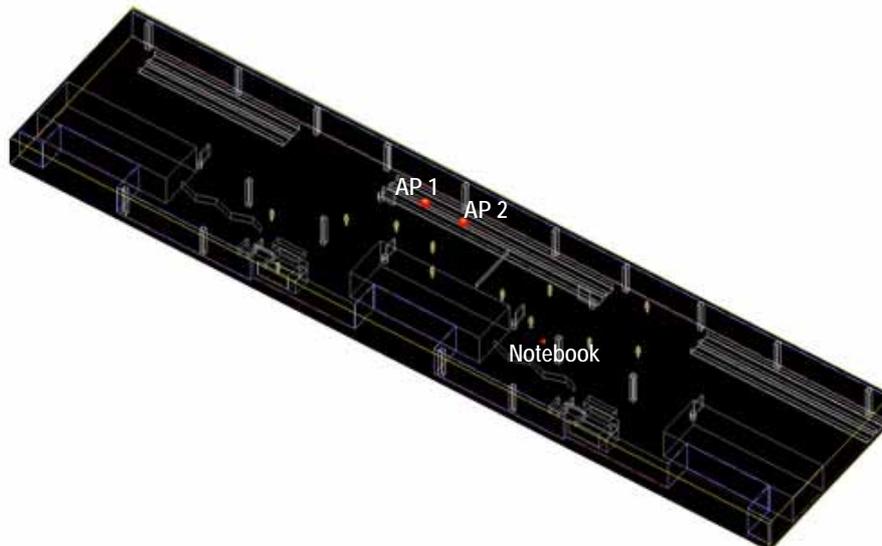


Abbildung 5-54: Szenario mit Anwesenheit von Personen und unveränderter Quellenpositionierung. In der Grafik sind alle Quellen rot markiert.

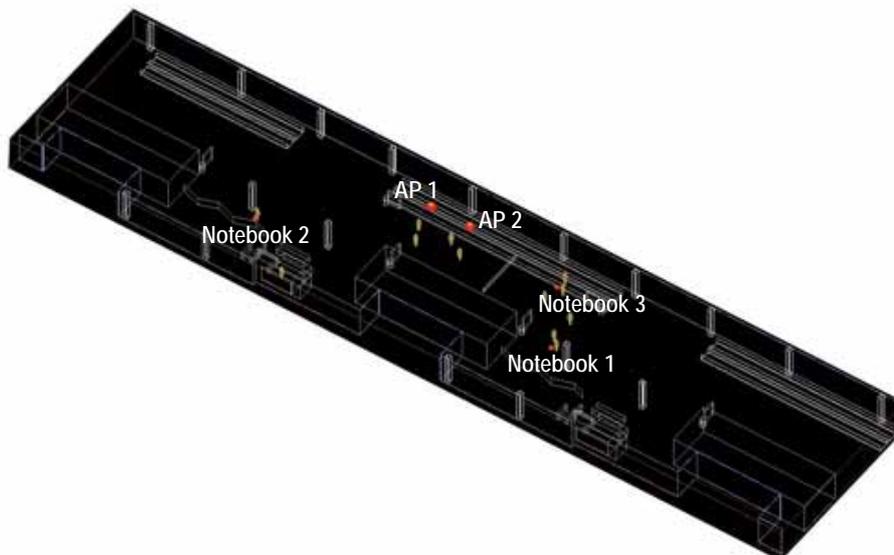


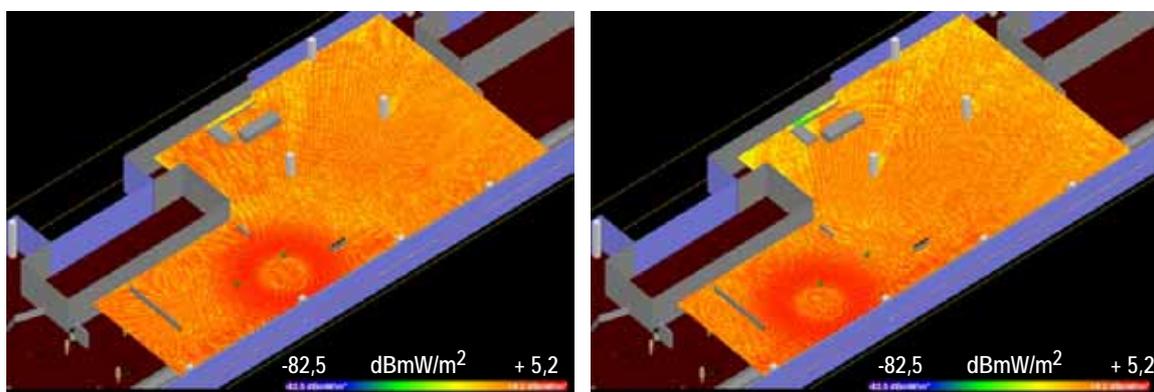
Abbildung 5-55: Szenario mit veränderter Personenverteilung und veränderter Aufstellung der Clients.

Als Materialeigenschaften für die stark vereinfachten homogenen Personenmodelle wurden  $\epsilon_r = 53$  und  $\sigma = 1,95$  S/m gewählt.

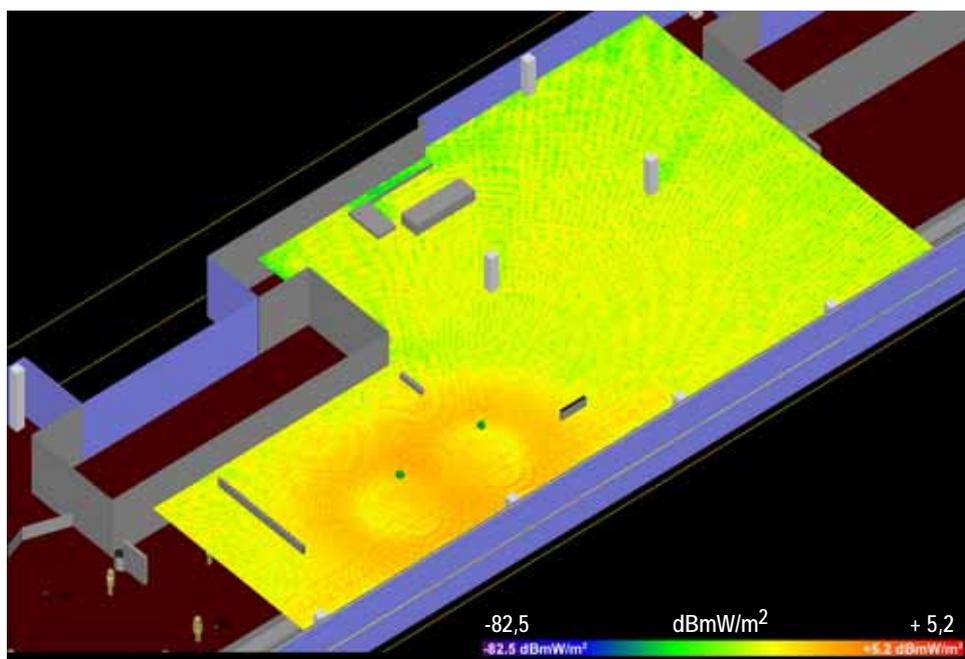
Abbildung 5-56 zeigt die Einzelbeiträge (zeitlich unskaliert, d.h., entsprechend der Burst-Spitzenwerte) der beiden Access Points zur großflächigen Feldverteilung in der Horizontalebene in 175 cm Höhe und Abbildung 5-57 zeigt die summierte mittlere Feldverteilung in dieser Ebene für den Fall, dass keine aktiven Clients vorhanden sind (beide Access Points senden nur den Beacon) für das Szenario mit Personen und unveränderter Quellenpositionierung gemäß Abbildung 5-54.

Abbildung 5-58 und Abbildung 5-59 zeigen in analoger Weise die Verhältnisse für das Szenario mit veränderter Personenverteilung und veränderter Positionen der Clients gemäß Abbildung 5-55.

Tabelle 5-13 und Tabelle 5-14 fassen die Berechnungsergebnisse in den einzelnen Messpositionen für unterschiedlich angenommene effektive Duty Cycles (Datenverkehrs-Situationen) zusammen. Der obere Teil der Tabelle („Einzel-Immissions-Spitzenwerte“) stellt keine realistische Situation dar, soll jedoch zur Orientierung über das Verhältnis der Einzelbeiträge (Burst-Spitzenwerte) in den unterschiedlichen Messpositionen dienen. Situation 1 entspricht im Mittel einer typischen Datenverkehrssituation wie sie vor Ort im Zeitraum der Messungen maximal beobachtet werden konnte. Situation 2 kann als Repräsentant für den Extremfall eines intensiven Downloads angesehen werden, Situation 3 soll die Verhältnisse während intensiven Uploads vom Notebook widerspiegeln. Situation 4 entspricht etwa den Verhältnissen, ohne Clients im Netzwerk (nur Aussendung des Beacons durch die Access Points). Für diesen Fall sind die summierten Feldverteilungen in einer Horizontalebene in 175 cm Höhe (Kopfhöhe) in Abbildung 5-57 und Abbildung 5-59 dargestellt.

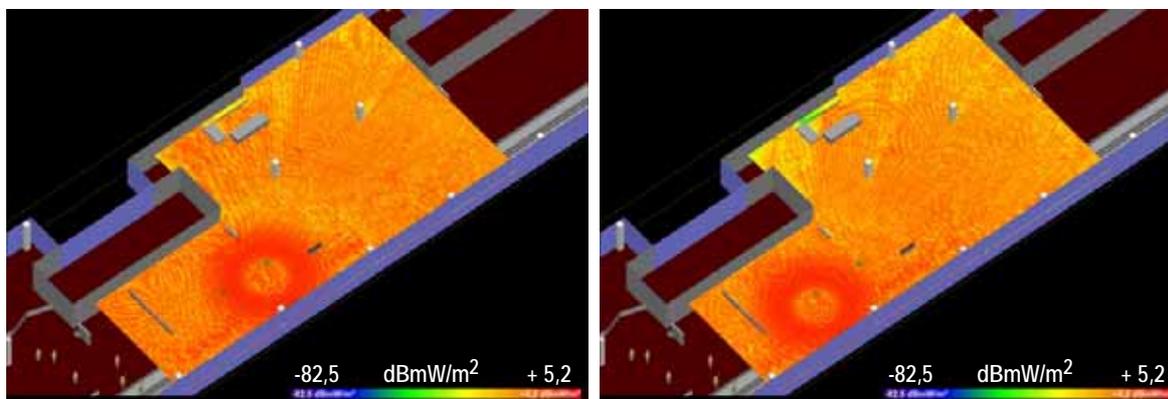


**Abbildung 5-56:** Immissionsbeiträge des Access Points auf Kanal 6 (links) und des Access Points auf Kanal 11 (rechts) in einer Horizontalebene in 175 cm Höhe, jeweils unter der Annahme kontinuierlicher HF Abstrahlung (entspricht Burst-Spitzenwerten) für das modifizierte Szenario gemäß Abbildung 5-54 (mit Personen und unveränderter Quellenmodellierung).

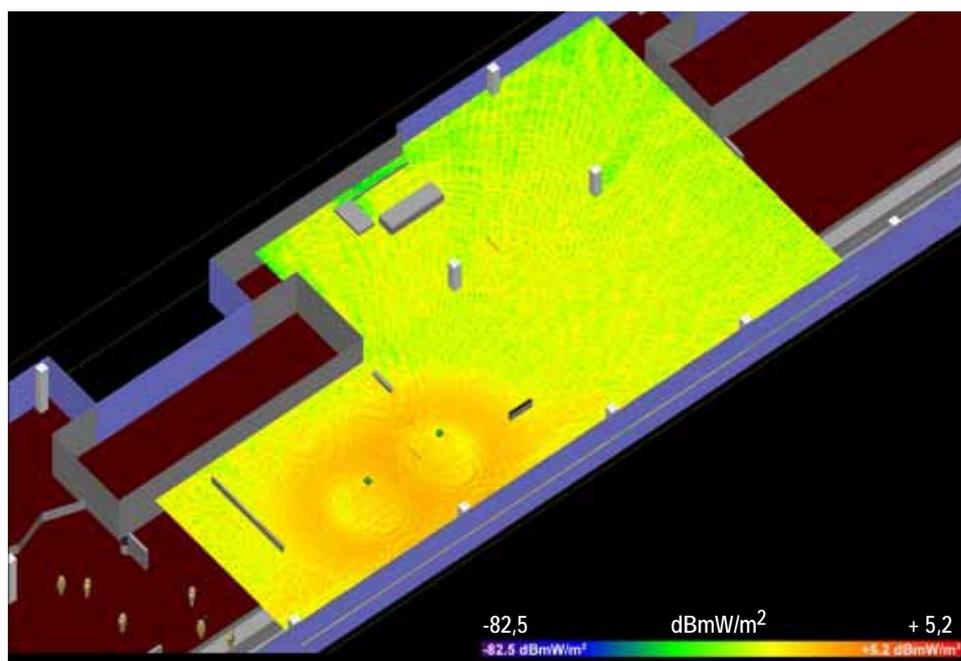


**Abbildung 5-57:** Summierte mittlere Immissionsverteilung in 175 cm Höhe für den Fall ohne aktive Clients (nur Beacon Aussendung der Access Points) für das modifizierte Szenario gemäß Abbildung 5-54 (mit Personen und unveränderter Quellenmodellierung).

Die angenommenen effektiven Duty Cycles entsprechen jenen von Tabelle 5-12 um einen direkten Vergleich des Einflusses der angenommenen Veränderungen im Feldraum mit den Verhältnissen ohne Personen im Feldraum zu erlauben.



**Abbildung 5-58:** Immissionsbeiträge des Access Points auf Kanal 6 (links) und des Access Points auf Kanal 11 (rechts) in einer Horizontalebene in 175 cm Höhe, jeweils unter der Annahme kontinuierlicher HF Abstrahlung (entspricht Burst-Spitzenwerten) für das modifizierte Szenario gemäß Abbildung 5-55 (mit veränderter Personenverteilung und veränderter Positionierung der Clients).



**Abbildung 5-59:** Summierte mittlere Immissionsverteilung in 175 cm Höhe für den Fall ohne aktive Clients (nur Beacon Aussendung der Access Points) für das modifizierte Szenario gemäß Abbildung 5-55 (mit veränderter Personenverteilung und veränderter Positionierung der Clients).

	effektiver Duty Cycle		Immission in mW/m <sup>2</sup>				
			MP1	MP2	MP3	MP4	MP5
Einzel- Immissions- Spitzenwerte	AP1: 1.0	räumlicher Mittelwert	0.0065	0.0596	0.0084	0.0302	0.0218
		räumliches Maximum	0.0487	0.2932	0.0656	0.1685	0.1318
	AP2: 1.0	räumlicher Mittelwert	0.0127	0.0402	0.0059	0.0326	0.0103
		räumliches Maximum	0.1096	0.2201	0.0541	0.1872	0.0914
	NB1: 1.0	räumlicher Mittelwert	5.1527	0.2353	0.1406	0.0038	0.0001
		räumliches Maximum	16.7660	1.1776	0.8131	0.0663	0.0019
Situation 1 mittlere summierte Immission	AP1: 0.05	räumlicher Mittelwert	0.5178	0.0319	0.0153	0.0070	0.0022
	AP2: 0.2 NB1: 0.1	räumliches Maximum	1.6781	0.1260	0.0816	0.0379	0.0185
Situation 2 mittlere summierte Immission	AP1: 0.7	räumlicher Mittelwert	0.5287	0.0934	0.0241	0.0443	0.0224
	AP2: 0.7 NB1: 0.1	räumliches Maximum	1.6872	0.3734	0.0911	0.1442	0.1206
Situation 3 mittlere summierte Immission	AP1: 0.1	räumlicher Mittelwert	3.6088	0.1747	0.0998	0.0089	0.0033
	AP2: 0.1 NB1: 0.7	räumliches Maximum	11.7377	0.8391	0.5706	0.0542	0.0172
Situation 4 mittlere summierte Immission	AP1: 0.005	räumlicher Mittelwert	0.0001	0.0005	0.0001	0.0003	0.0002
	AP2: 0.005 NB1: 0.0	räumliches Maximum	0.0006	0.0026	0.0004	0.0010	0.0009

Tabelle 5-13: Berechnungsergebnis in Form einer Zusammenstellung der Einzelimmissionsbeiträge und der mittleren summierten Immission für unterschiedliche Datenverkehrs-Situationen in den betrachteten Messpositionen MP1 bis MP5 bei Anwesenheit von Personen im Feldraum (Quellenpositionierung unverändert, vgl. Abbildung 5-54).

Ein Vergleich der Berechnungsergebnisse für Situationen mit und ohne Personen, bei unveränderter Quellenpositionierung zeigt Veränderungen der räumlich gemittelten Immissionswerte in den betrachteten Messpositionen im Ausmaß von weniger als 20%. Es sind dabei, abhängig von der jeweiligen Messposition, sowohl teilweise Erhöhungen, als auch teilweise Verringerungen der Immissionen zu beobachten. Einfache Ursache-Wirkungszusammenhänge für die beobachteten Schwankungen der Exposition in Abhängigkeit von einzelnen Parametern der Personenverteilung können, aufgrund der beteiligten komplexen Wellenausbreitungsphänomene, im Allgemeinen nicht ohne weiteres abgeleitet werden. Es ist vielmehr die Gesamtheit des vorliegenden Szenarios mit allen seinen Einzelheiten, das die, im Allgemeinen sehr komplexe und inhomogene räumliche Feldverteilung (und damit die mittlere Immission in einzelnen Messpositionen) bestimmt.

	effektiver Duty Cycle		Immission in mW/m <sup>2</sup>					
			MP1	MP2	MP3	MP4	MP5	
Einzel- Immissions- Spitzenwerte	AP1: 1.0	räumlicher Mittelwert	0.0096	0.0636	0.0081	0.0282	0.0187	
		räumliches Maximum	0.0844	0.2524	0.0711	0.1945	0.1572	
	AP2: 1.0	räumlicher Mittelwert	0.0124	0.0434	0.0063	0.0307	0.0073	
		räumliches Maximum	0.1085	0.2802	0.0689	0.1526	0.0757	
	NB1: 1.0	räumlicher Mittelwert	6.7089	0.2414	0.1700	0.0064	0.0001	
		räumliches Maximum	36.6010	1.2331	0.9729	0.0644	0.0020	
	NB2: 1.0	räumlicher Mittelwert	0.0007	0.0053	0.0002	0.1716	2.7678	
		räumliches Maximum	0.0138	0.0564	0.0082	0.5787	10.1620	
	NB3: 1.0	räumlicher Mittelwert	0.2803	10.8128	0.0352	0.0077	0.0023	
		räumliches Maximum	1.3375	54.2310	0.1883	0.0603	0.0305	
	Situation 1 mittlere summierte Immission	AP1: 0.05	räumlicher Mittelwert	0.7015	1.1149	0.0218	0.0249	0.2786
		AP2: 0.2						
Situation 2 mittlere summierte Immission	NB1: 0.1	räumliches Maximum	3.6708	5.4637	0.0980	0.0649	1.0186	
	NB2: 0.1							
Situation 3 mittlere summierte Immission	NB3: 0.1	räumlicher Mittelwert	0.7144	1.1809	0.0306	0.0598	0.2952	
	AP1: 0.7							
Situation 4 mittlere summierte Immission	AP2: 0.7	räumliches Maximum	3.6756	5.5056	0.1100	0.1884	1.0284	
	NB1: 0.1							
Situation 3 mittlere summierte Immission	NB2: 0.1	räumlicher Mittelwert	2.1275	4.4119	0.0667	0.1310	1.9410	
	NB3: 0.4							
Situation 4 mittlere summierte Immission	AP1: 0.1	räumliches Maximum	11.0219	21.7891	0.2955	0.4096	7.1167	
	AP2: 0.1							
Situation 4 mittlere summierte Immission	NB1: 0.3	räumlicher Mittelwert	0.0001	0.0005	0.0001	0.0003	0.0001	
	NB2: 0.7							
Situation 4 mittlere summierte Immission	NB3: 0.4	räumliches Maximum	0.0006	0.0023	0.0004	0.0011	0.0008	
	AP1: 0.005							
Situation 4 mittlere summierte Immission	AP2: 0.005	räumliches Maximum	0.0006	0.0023	0.0004	0.0011	0.0008	
	NB1: 0.0							
Situation 4 mittlere summierte Immission	NB2: 0.0	räumliches Maximum	0.0006	0.0023	0.0004	0.0011	0.0008	
	NB3: 0.0							

Tabelle 5-14: Berechnungsergebnis in Form einer Zusammenstellung der Einzelimmissionsbeiträge und der mittleren summierten Immission für unterschiedliche Datenverkehrs-Situationen in den betrachteten Messpositionen MP1 bis MP5 bei veränderter Personenverteilung und veränderter Quellenpositionierung gemäß Abbildung 5-55.

### 5.2.2.2 Messtechnische Immissionsbestimmung

Während der Messungen in Messposition 1 wurde mit dem nahen Notebook Client (vgl. Abbildung 5-60, links) Datenverkehr generiert, die Messergebnisse (Burst-Spitzenwerte auf Kanal 11) wurden daher von diesem Client dominiert. In allen weiteren Messpositionen war keine eindeutige Zuordnung zu einzelnen Quellen mehr möglich, da aufgrund der großen Ausdehnung und der Unüberschaubarkeit des Bereiches keine zuverlässigen Aussagen getroffen werden können, wo WLAN Nutzer

gerade aktiv waren. Abbildung 5-60 bis Abbildung 5-62 zeigen die Aufstellung der Mess-Sonde in den Messpositionen.



Abbildung 5-60: Messposition MP1 (links), Messposition MP2 (mitte) und Messposition MP5 (rechts).



Abbildung 5-61: Messposition MP3.



Abbildung 5-62: Messposition MP4.

Die Messungen erfolgten grundsätzlich im Zero Span Modus des Spektrumanalysators mit RMS Detektor und bei 100 kHz Auflösebandbreite. Tabelle 5-15 fasst die gemessenen und bezüglich der Auflösebandbreite korrigierten Burst-Spitzenwerte in den Messpositionen in den Messpositionen MP1 bis MP5 zusammen.

Messposition	Höhe [cm]	Messwert S [mW/m <sup>2</sup> ]		räumlicher Mittelwert S [mW/m <sup>2</sup> ]	
		Ch 6	Ch 11	Ch 6	Ch 11
MP1	75	0.258	0.042	<b>1.125</b>	<b>0.070</b>
	100	1.801	0.120		
	125	1.862	0.096		
	150	0.824	0.039		
	175	0.881	0.054		
MP2	75	0.080	0.031	<b>0.099</b>	<b>0.075</b>
	100	0.138	0.035		
	125	0.069	0.090		
	150	0.080	0.123		
	175	0.129	0.096		
MP3	75	0.022	0.249	<b>0.027</b>	<b>0.108</b>
	100	0.021	0.040		
	125	0.027	0.050		
	150	0.030	0.094		
	175	0.033	0.108		
MP4	75	0.109	0.046	<b>0.183</b>	<b>0.076</b>
	100	0.162	0.035		
	125	0.345	0.092		
	150	0.144	0.103		
	175	0.154	0.105		
MP5	75	0.065	0.016	<b>0.140</b>	<b>0.035</b>
	100	0.248	0.016		
	125	0.275	0.037		
	150	0.058	0.048		
	175	0.053	0.058		

Tabelle 5-15: Messergebnisse (Burst-Spitzenwerte) in den Messpositionen MP1 bis MP5.

### 5.2.3 Vergleich von numerischer Berechnung und Messung

Aufgrund der Tatsache, dass die Messungen im Realbetrieb durchgeführt wurden und aufgrund der praktischen Unüberschaubarkeit des Szenarios ist ein direkter Vergleich von Mess- und Berechnungsergebnissen hier nur schwer zu bewerkstelligen. Die Messergebnisse liegen jedoch jedenfalls in dem durch die Berechnung vorhergesagten Bereich möglicher Immissionen bei unterschiedlichen Datenverkehrssituationen.

### 5.2.4 Immissionsbeurteilung im Hinblick auf die Grenzwerte

Unter Beachtung der Ausführungen in Kapitel 5.1.5 hinsichtlich der normgerechten Interpretation von räumlich und zeitlich gemittelten Immissionswerten wird auch für

die hier untersuchten Szenarien deutlich, dass die **typisch** zu erwartenden WLAN Immissionen **deutlich unterhalb von 1 Promille des Referenzwertes** nach [16] liegen.

Höhere Werte können naturgemäß bei starker Annäherung an die Antennen erreicht werden, jedoch werden auch in diesem Fall die Referenzwerte bzw. Basisgrenzwerte nach [16] nicht überschritten (vgl. hierzu Kapitel 5.1.5).

### **5.2.5 Vergleich der Immissionswerte mit bisher publizierten Daten**

Ein Vergleich der hier ermittelten Immissionswerte mit bisher zu diesem Thema in [7]-[11] und [17] publizierten Daten zeigt grundsätzlich Übereinstimmung hinsichtlich der Größenordnung der Immissionen, wenn die Daten auf eine vergleichbare Basis gestellt werden (z.B., direkter Vergleich der Burst-Spitzenwerte oder für gleichen Duty Cycle). Bei Angaben relativ zu Referenz- bzw. Grenzwerten ist dabei zu beachten, dass in einigen Arbeiten lokale Burst-Spitzenwerte mit den Referenz- bzw. Grenzwerten verglichen werden, was nach den meisten Grenzwert definierenden Dokumenten (z.B. [16]) nicht korrekt ist (zeitliche und räumliche Mittelung!).

### **5.2.6 Mögliche Maßnahmen zur Immissionsminderung**

Die Abbringung der Access Point Antennen an der Decke in relativ großem Abstand zu den (eventuell über längeren Zeitraum besetzten) Sitzgelegenheiten erscheint in den beiden betrachteten Szenarien als optimal hinsichtlich einer Minimierung der Exposition durch den Betreiber. Weiteres Minimierungspotential lässt sich demnach hier nicht ableiten. Eine immissionsmindernde Positionierung der Clients im vorliegenden Szenario (bzw. wahrscheinlich generell bei WLAN-Szenarien) ist dagegen schwer zu erreichen, da die Aufstellung individuell durch die Kunden erfolgt und damit nicht kontrollierbar ist. Hier kann nur versucht werden (eventuell durch vor Ort aufliegendes Informationsmaterial) die User anzuhalten bei der Aufstellung der Clients (Notebooks) entsprechend Rücksicht auf andere zu nehmen (z.B. Aufstellung des Clients bzw. Ausrichtung der Antenne wenn möglich zu einer nicht unmittelbar besetzten Seite).

## 6 UNTERSUCHTE OUTDOOR-SZENARIEN

Es wurden messtechnische und numerische Immissionsbestimmungen in Outdoor Szenarien durchgeführt. Untersucht wurden konkret die WLAN-Immissionen im Bereich der Universitätsbibliothek in der Innenstadt von Stuttgart, die Verhältnisse am Europaplatz in Kiel, sowie zwei Wohngebiete in Kiel (Schulstrasse und Medusastrasse).

### 6.1 Universität Stuttgart

#### 6.1.1 Innenstadt vor Universitätsbibliothek

##### Beschreibung des Szenarios und technische Kenndaten

Die Universitätsbibliothek in der Innenstadt von Stuttgart befindet sich in einer großräumigen Parkanlage. Der Außenbereich des Bibliotheksgebäudes ist mit 2 Access Points (Kanal 1 und Kanal 11) versorgt. Die beiden omnidirektionalen 5,15 dBi Antennen vom Typ S2403BP (Cushcraft) befinden sich an den beiden Ecken der vorderen Gebäudefront. Abbildung 6-1 bis Abbildung 6-3 zeigen die Lage der beiden Antennen.

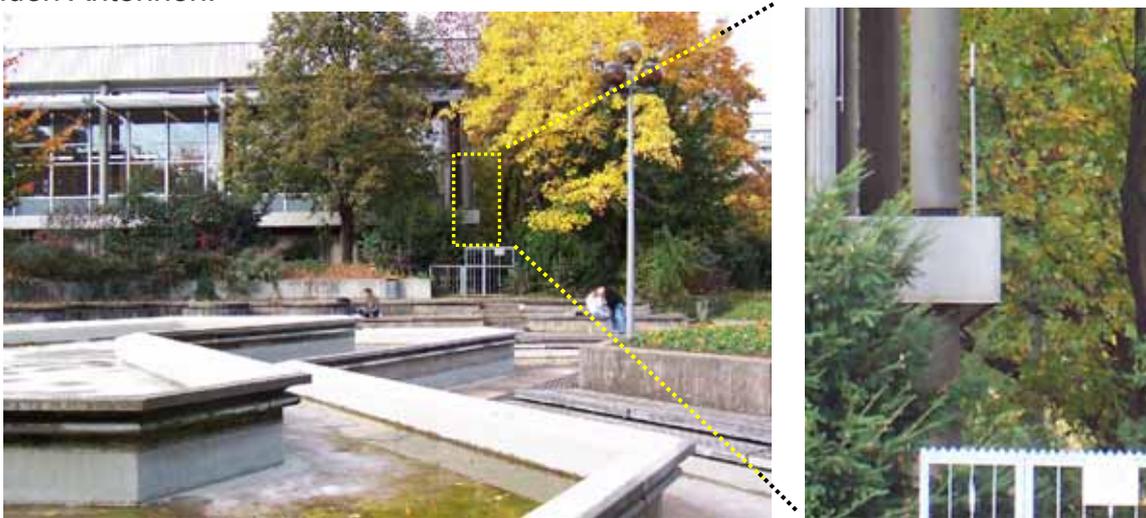


Abbildung 6-1: WLAN Antenne für Kanal 11.

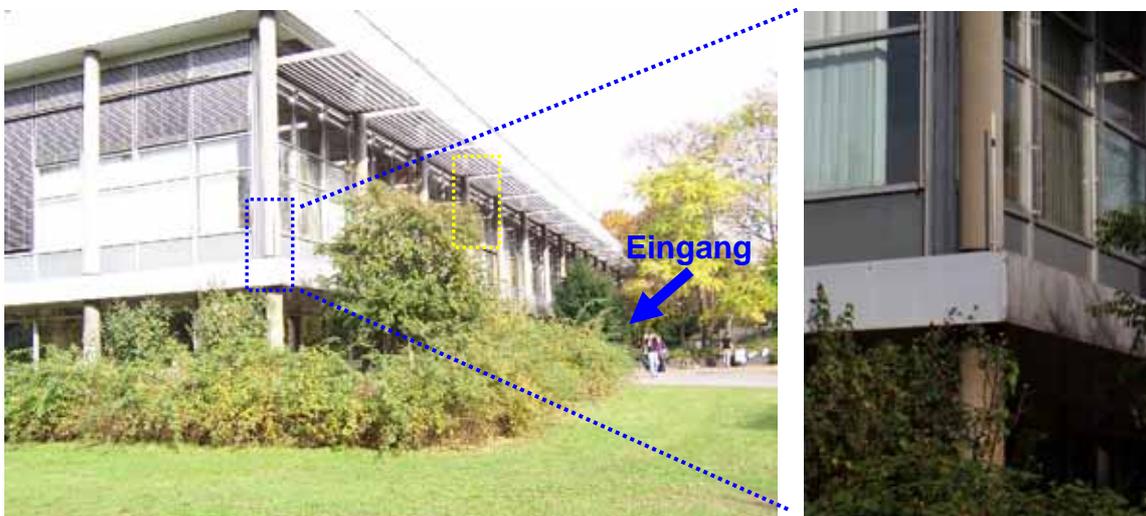


Abbildung 6-2: WLAN Antenne für Kanal 1.



Abbildung 6-3: Eingangsbereich der Universitätsbibliothek in Stuttgarter Innenstadt.

Gemäß Betreiber arbeiten die beiden Access Points mit einer Sendeleistung von 50 mW (17 dBm). Über die Kabeldämpfung zwischen Access Points und Antennen konnten seitens des Betreibers keine Angaben gemacht werden. Für die numerische Modellierung wird von einer Antenneneingangsleistung von 14,85 dBm (bei 5,15 dBi Antennengewinn ausgegangen).

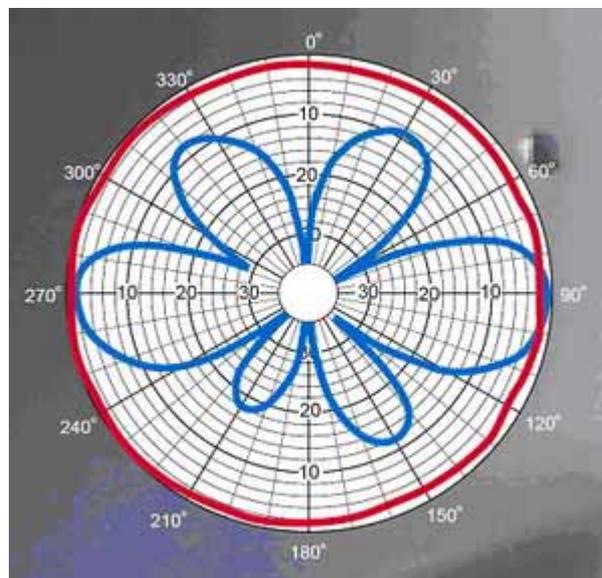
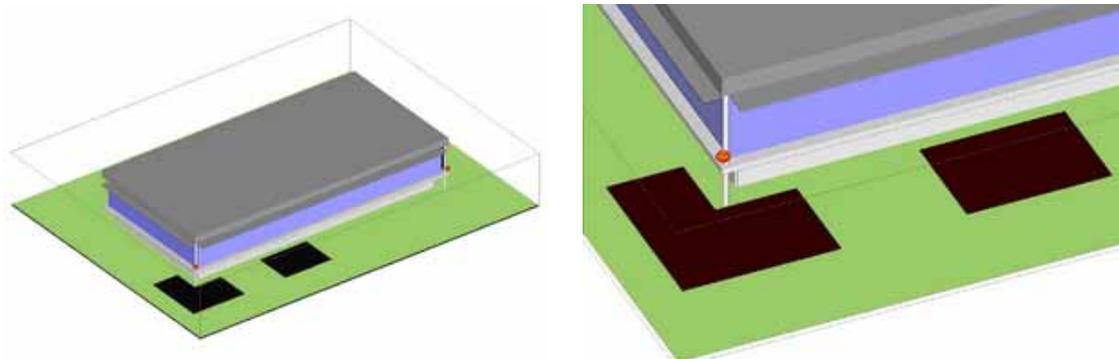


Abbildung 6-4: Horizontales (rot) und vertikales (blau) Pattern der Access Point Antennen (aus dem Datenblatt entnommen).

Hinsichtlich der Exposition der Bevölkerung sind vor allem der Bereich vor dem Haupteingang (Abbildung 6-3), sowie die Wiese im Bereich der Gebäudeecke mit der auf Kanal 1 betriebenen Access Point Antenne (Vordergrund in Abbildung 6-2) interessant, da hier wesentlich größere Annäherung an die Antenne möglich ist, als im Fall der auf Kanal 11 betriebenen Antenne.

### 6.1.1.1 Numerische Immissionsbestimmung

Abbildung 6-5 zeigt das numerische Modell des Universitätsgebäudes. Die Vegetation wurde für die Berechnungen vernachlässigt, die Grasfläche wurde als „trockener Erdboden“ modelliert. Die Dachkonstruktion des Gebäudes wurde als Metall (dunkelgrau), die Gebäudefronten als Glas (blau) und der Gebäudesockel, sowie die Säulen als Stahlbeton (hellgrau) modelliert. Die in der Abbildung dunkel markierten Flächen markieren jene Bereiche in denen die Immissionen der Access Points, jeweils in zwei unterschiedlichen Höhen (Horizontalebene) berechnet wurden. Im Bereich nahe der Gebäudeecke (Wiese) wurden Horizontalebene in einer Höhe von 50 cm und 100 cm betrachtet, da sich in diesem Bereich (gemäß Lokalausgang) vermehrt Kinder bzw. auf dem Boden sitzende Erwachsene aufhalten. Im Bereich vor dem Haupteingang erfolgten die Immissionsberechnungen in 100 cm und 175 cm Höhe.



**Abbildung 6-5:** Wireless Insite Modell der Universitätsbibliothek, links: Gesamtansicht, rechts: vergrößertes Detail. Die dunklen Flächen markieren jene Bereiche in denen die Immissionen, jeweils in zwei unterschiedlichen Höhen berechnet wurden.

Um die ausgeprägten Nebenzipfel der Access Point Antennen anzunähern, wurde ein Lineardipol mit einer Länge  $> \lambda/2$  verwendet (Abbildung 6-6).



**Abbildung 6-6:** Modelliertes 3D Pattern der Antenne.

Tabelle 6-1 fasst die wichtigsten Berechnungsparameter für das Szenario zusammen.

Berechnungsparameter für Berechnung Universitätsbibliothek Stuttgart		
Ray Spacing	0,2°	
Collection Surface Radius	2,5 cm	
Anzahl Reflexionen, Transmissionen, Beugungen	3 Reflexionen, 1 Transmissionen, 1 Beugung	
Materialparameter	Glas	$\epsilon=19, \quad \sigma=13,3 \text{ mS/m}$
	Metall	PEC
	Stahlbeton	$\epsilon=9, \quad \sigma=120,0 \text{ mS/m}$
	Trockener Erdboden	$\epsilon=4, \quad \sigma=1,0 \text{ mS/m}$
Access Point Antenne 1	2,412 GHz, Sendeleistung 14,85 dBm, Linear-Dipol 5,15 dBi	
Access Point Antenne 2	2,462 GHz, Sendeleistung 14,85 dBm, Linear- Dipol 5,15 dBi	

Tabelle 6-1: Berechnungsparameter für das Szenario vor der Universitätsbibliothek Stuttgart

Abbildung 6-7 zeigt die Einzelbeiträge (zeitlich unskaliert, d.h., entsprechend der Burst-Spitzenwerte) der beiden Access Points zur Feldverteilung in den untersuchten Bereichen. Abbildung 6-8 zeigt die summierte mittlere Feldverteilung in diesen Ebenen für den Fall, dass keine aktiven Clients vorhanden sind (beide Access Points senden nur den Beacon).

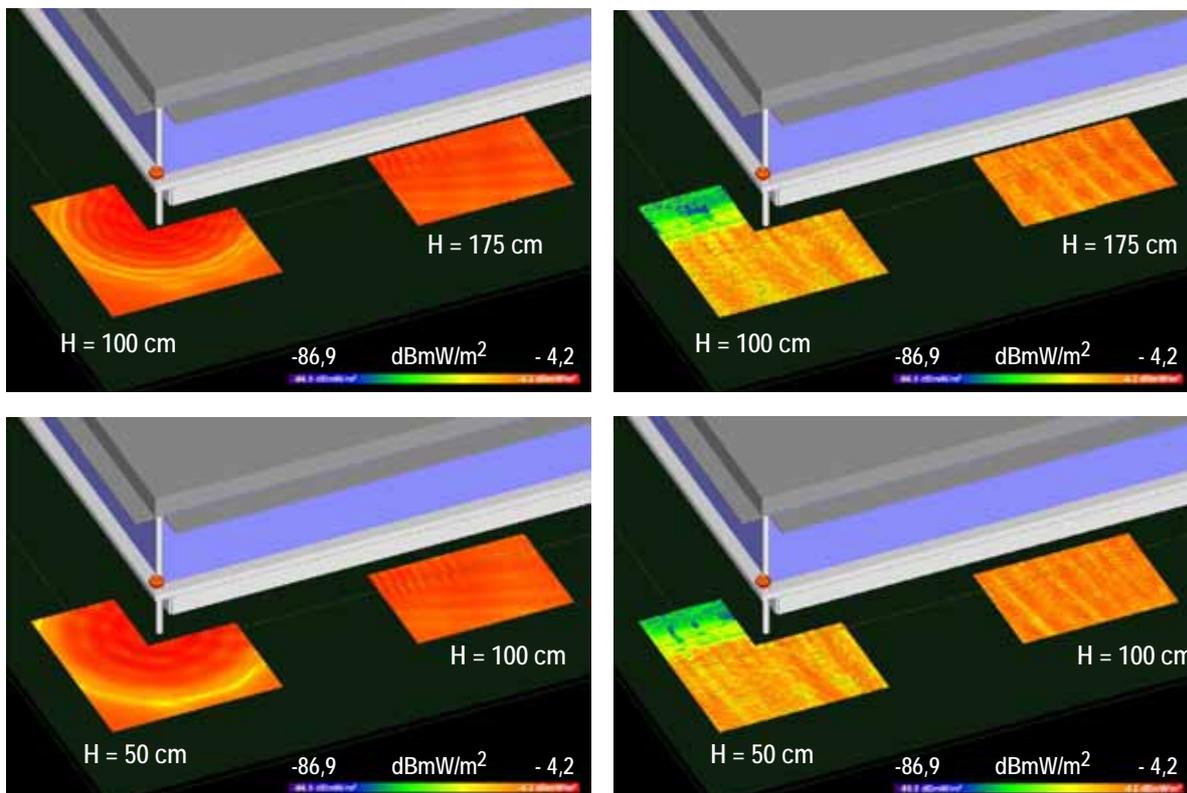


Abbildung 6-7: Einzel-Immissionsbeiträge der Access Points in unterschiedlichen Höhen (bei Annahme kontinuierlicher Abstrahlung). Linke Spalte: Access Point Kanal 1, rechte Spalte: Access Point Kanal 11.

Abbildung 6-9 und Abbildung 6-10 zeigen die Beiträge (zeitlich unskaliert, d.h., entsprechend der Burst-Spitzenwerte) der einzelnen Quellen in den messtechnisch untersuchten Messpositionen MP1 bis MP3.

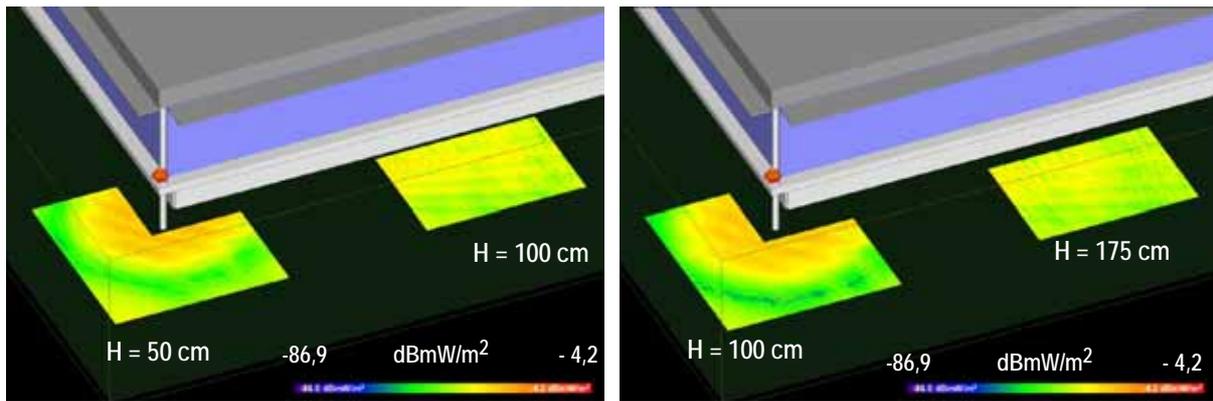


Abbildung 6-8: Mittlere Summenimmission der beiden Access Points in unterschiedlichen Höhen ohne aktive Clients (d.h., beide Access Points senden jeweils nur den Beacon aus).

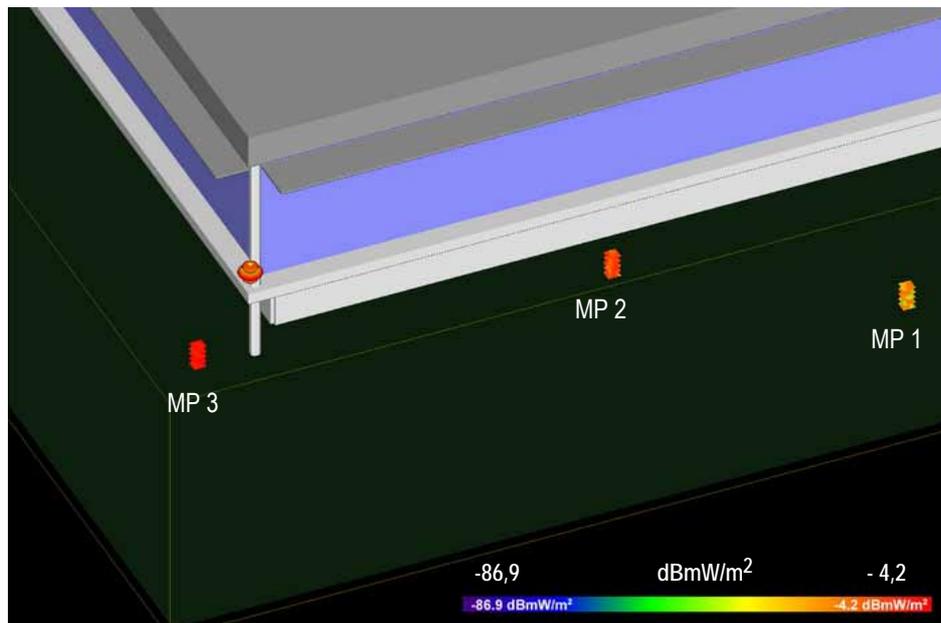


Abbildung 6-9: Immissionsbeitrag des Access Point Kanal 1 (unter Annahme kontinuierlicher HF Abstrahlung) in 5 unterschiedlichen Höhen an den betrachteten Messpositionen MP1 bis MP3.

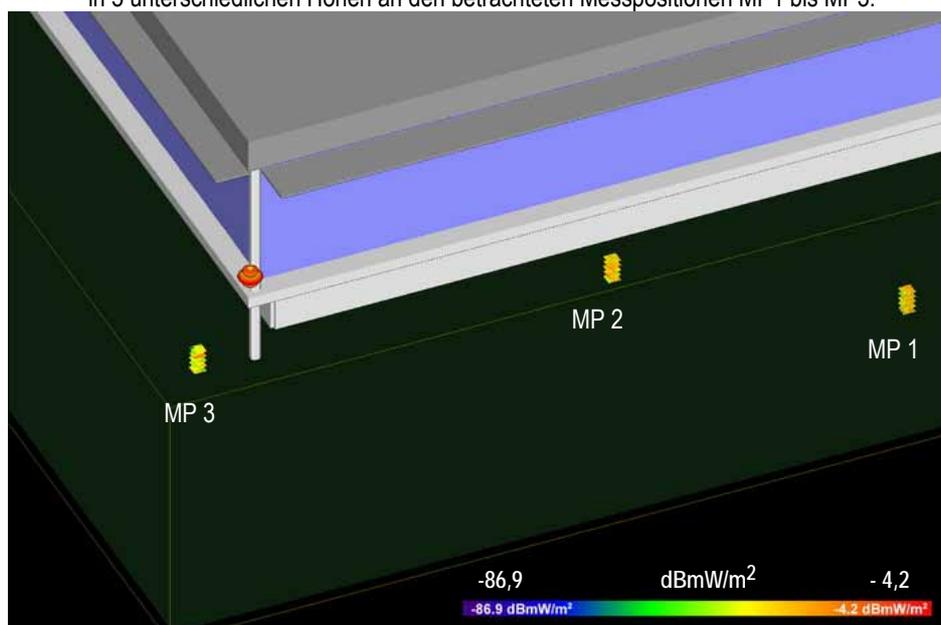


Abbildung 6-10: Immissionsbeitrag des Access Point Kanal 11 (unter Annahme kontinuierlicher HF Abstrahlung) in 5 unterschiedlichen Höhen an den betrachteten Messpositionen MP1 bis MP3

Tabelle 6-2 fasst die Berechnungsergebnisse in den einzelnen Messpositionen für unterschiedlich angenommene effektive Duty Cycles (Datenverkehrs-Situationen) zusammen. Der obere Teil der Tabelle („Einzel-Immissions-Spitzenwerte“) stellt keine realistische Situation dar, soll jedoch zur Orientierung über das Verhältnis der Einzelbeiträge (Burst-Spitzenwerte) in den unterschiedlichen Messpositionen dienen. Situation 4 entspricht etwa den Verhältnissen, ohne Clients im Netzwerk (nur Aussendung des Beacons durch die Access Points). Für diesen Fall ist die summierte Feldverteilung in unterschiedlichen Horizontalebene in 50 cm, 100 cm und 175 cm Höhe (Kopfhöhe) in Abbildung 6-8 dargestellt.

	effektiver Duty Cycle		Immission in mW/m <sup>2</sup>		
			MP1	MP2	MP3
Einzel-Immissions-Spitzenwerte	AP1: 1.0	räumlicher Mittelwert	0.0032	0.0285	0.2080
		räumliches Maximum	0.0163	0.0975	0.3577
	AP2: 1.0	räumlicher Mittelwert	0.0017	0.0014	0.0002
		räumliches Maximum	0.0148	0.0163	0.0047
Situation 1 mittlere summierte Immission	AP1: 0.005	räumlicher Mittelwert	0.0004	0.0004	0.0011
	AP2: 0.2	räumliches Maximum	0.0030	0.0036	0.0020
Situation 2 mittlere summierte Immission	AP1: 0.7	räumlicher Mittelwert	0.0034	0.0210	0.1457
	AP2: 0.7	räumliches Maximum	0.0164	0.0690	0.2504
Situation 3 mittlere summierte Immission	AP1: 0.1	räumlicher Mittelwert	0.0005	0.0030	0.0208
	AP2: 0.1	räumliches Maximum	0.0023	0.0099	0.0358
Situation 4 mittlere summierte Immission	AP1: 0.005	räumlicher Mittelwert	0.0001	0.0001	0.0010
	AP2: 0.005	räumliches Maximum	0.0001	0.0005	0.0018

Tabelle 6-2: Berechnungsergebnis in Form einer Zusammenstellung der Einzelimmissionsbeiträge und der mittleren summierten Immission für unterschiedliche Datenverkehrs-Situationen in den betrachteten Messpositionen MP1 bis MP3.

### 6.1.1.2 Messtechnische Immissionsbestimmung

Es wurden insgesamt drei Messpositionen untersucht, wobei sich zwei im Bereich des Eingangs der Bibliothek befanden und eine dritte auf der Wiese vor dem Access Point Kanal 1, da sich in diesen Bereichen Personen aufhalten bzw. unter Umständen in der Wiese sitzen. Aus diesem Grund wurde auch eine Ebene in 50 cm Höhe gewählt. Die Abbildung 6-11 zeigt die drei Messpositionen mit Blick auf den sich in der Nähe befindlichen Access Point, sowie die verwendete Messsonde.



Abbildung 6-11: Messpositionen MP1, MP2 und MP3 vor dem Eingang der Bibliothek (MP1 und MP2) sowie am Rasen (MP3).

Die Messungen erfolgten im Zero Span Modus des Spektrumanalysators mit RMS Detektor und bei 100 kHz Auflösebandbreite. Tabelle 6-3 fasst die gemessenen und bezüglich der Auflösebandbreite korrigierten Burst-Spitzenwerte in den Messpositionen MP1 bis MP3 zusammen.

Messposition	Höhe [cm]	Messwert S [mW/m <sup>2</sup> ]	räumlicher Mittelwert S [mW/m <sup>2</sup> ]
		AP	AP
MP1	75	<b>0.00093</b>	0.0010
	100	<b>0.00094</b>	
	125	<b>0.00067</b>	
	150	<b>0.00055</b>	
	175	<b>0.00173</b>	
MP2	75	<b>0.00488</b>	0.0051
	100	<b>0.00699</b>	
	125	<b>0.00213</b>	
	150	<b>0.00913</b>	
	175	<b>0.00226</b>	
MP3	75	<b>0.00079</b>	0.0013
	100	<b>0.00154</b>	
	125	<b>0.00134</b>	
	150	<b>0.00130</b>	
	175	<b>0.00145</b>	

Tabelle 6-3: Messergebnisse (Burst-Spitzenwerte) in den Messpositionen MP1bis MP3.

### 6.1.2 Vergleich von numerischer Berechnung und Messung

Aufgrund der Tatsache, dass die Messungen im Realbetrieb durchgeführt wurden und aufgrund der praktischen Unüberschaubarkeit des Szenarios ist ein direkter Vergleich von Mess- und Berechnungsergebnissen hier nur schwer zu bewerkstelligen. In den

Messpositionen MP 1 und MP 2 stimmen die Mess- und Berechnungsergebnisse (räumliche Mittelwerte) im Rahmen der zu erwartenden Unsicherheiten gut überein (Abweichungen bis zu 4 - 6 dB). In Messposition MP 3 ergaben sich Abweichungen zwischen Messung und Berechnung von über 20 dB. Die Ursachen dafür werden einerseits darin gesehen, dass sich die für die numerischen Berechnungen nur näherungsweise nachgebildete Antennencharakteristik aufgrund der Nähe der Messposition zu Antenne hier als besonders großer Unsicherheitsfaktor bemerkbar machen könnte. Andererseits könnte die im numerischen Modell vernachlässigte, sich teilweise im direkten Ausbreitungspfad befindende Bepflanzung vor allem im unteren Bereich der Messposition MP3 (Höhen 75 cm – 150 cm) zu einer Überschätzung der Immissionen in der Berechnung führen (vgl. Abbildung 6-11).

### 6.1.3 Immissionsbeurteilung im Hinblick auf die Grenzwerte

Unter Beachtung der Ausführungen in Kapitel 5.1.5 hinsichtlich der normgerechten Interpretation von räumlich und zeitlich gemittelten Immissionswerten wird auch für die hier untersuchten Szenarien veranschaulicht, dass die **typisch** zu erwartenden WLAN Immissionen um 5 Zehnerpotenzen **deutlich unterhalb des Referenzwertes** nach [16] liegen.

Höhere Werte können naturgemäß bei starker Annäherung an die Antennen erreicht werden, jedoch werden auch in diesem Fall die Referenzwerte bzw. Basisgrenzwerte nach [16] nicht überschritten (vgl. hierzu Kapitel 5.1.5).

### 6.1.4 Vergleich der Immissionswerte mit bisher publizierten Daten

Ein Vergleich der hier ermittelten Immissionswerte mit anderen publizierten Daten hinsichtlich Outdoor WLAN-Messungen ([9],[18]) zeigt, dass die hier (unter realistischen Bedingungen) ermittelten Ergebnisse um mehrere Größenordnungen unterhalb der in [9] und [18] angegebenen Werte liegen. Gründe für die Abweichungen zu den in [18] publizierten Daten können aufgrund der dort praktisch nicht dokumentierten Messmethode keine genannt werden. Die Unterschiede zu den in [9] angeführten Immissionswerten begründen sich hauptsächlich durch die Tatsache, dass dort teilweise in (unrealistisch) geringen Entfernungen zu Außenantennen gemessen wurde. Weiters wurde in [9], soweit aus dem Dokument nachzuvollziehen, zumindest teilweise von Access Points mit wesentlich mehr als 100 mW EIRP ausgegangen (vgl. dazu auch [1]). Bei Angaben relativ zu Referenz- bzw. Grenzwerten ist dabei weiters zu beachten, dass in einigen Arbeiten lokale Burst-Spitzenwerte mit den Referenz- bzw. Grenzwerten verglichen werden, was nach den meisten Grenzwert definierenden Dokumenten (z.B. [16]) nicht korrekt ist (zeitliche und räumliche Mittelung!).

### 6.1.5 Mögliche Maßnahmen zur Immissionsminderung

Wenn aufgrund der sehr geringen Immissionen überhaupt notwendig, erscheinen Überlegungen hinsichtlich einer Immissionsminderung nur für den leicht zugänglichen Bereich um den Access Point Kanal 1 auf der Wiese relevant zu sein. Eine Annäherung bis auf einige Meter zum Access Point ist möglich, jedoch, wie gesagt völlig unkritisch, da selbst im Nahbereich der Antennen die Grenzwerte nach [16] nicht überschritten werden. Eine Sendeleistungsminderung oder die Montage höher an der Fassade könnten geeignete Wege sein, die Immission zu mindern.

## 6.2 Europaplatz, Kiel

### Beschreibung des Szenarios und technische Kenndaten

Auf dem Europaplatz in Kiel sollen die umliegenden Wohnungen mittels einer Rundstrahlantenne versorgt werden. Dies erfolgt über eine Access Point Antenne auf einem Geschäftslokal unterhalb der Metall-Dachkonstruktion. Laut Betreiber handelt es sich bei der mit 15 dBm Leistung versorgten Antenne um das Modell CXL 2400-3 von der Firma Procom (5 dBi Gewinn). Abbildung 6-12 bis Abbildung 6-14 veranschaulichen die Situation vor Ort. Abbildung 6-15 zeigt das Pattern der eingesetzten Access Point Antenne.

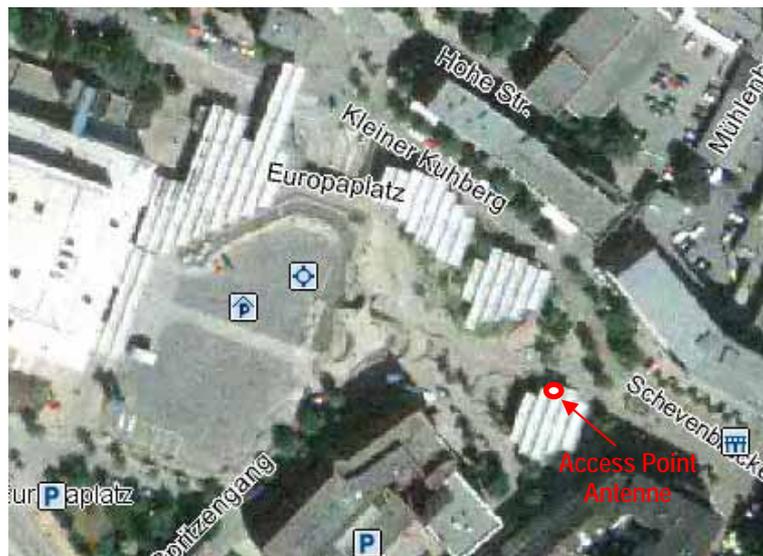


Abbildung 6-12: Luftaufnahme des Europaplatzes mit Lage der Access Point Antenne.



Abbildung 6-13: Access Point Antenne auf Geschäftslokal unter Dachkonstruktion, links: Gesamtansicht, rechts: Detail.



Abbildung 6-14: Blick vom Geschäftslokal mit AP-Antenne in Richtung Europaplatz.

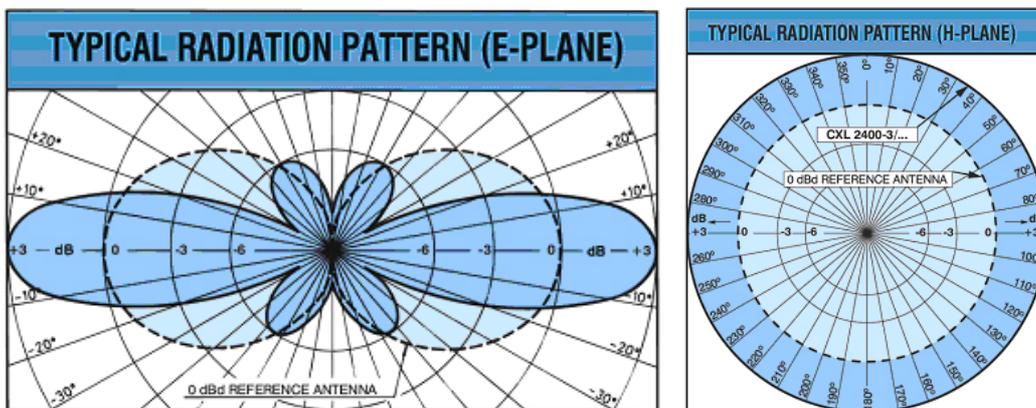


Abbildung 6-15: Vertikales (links) und horizontales (rechts) Pattern der eingesetzten Antenne.

Abbildung 6-16 bis Abbildung 6-18 zeigen das numerische Berechnungsmodell des Szenarios in unterschiedlichen Ansichten.

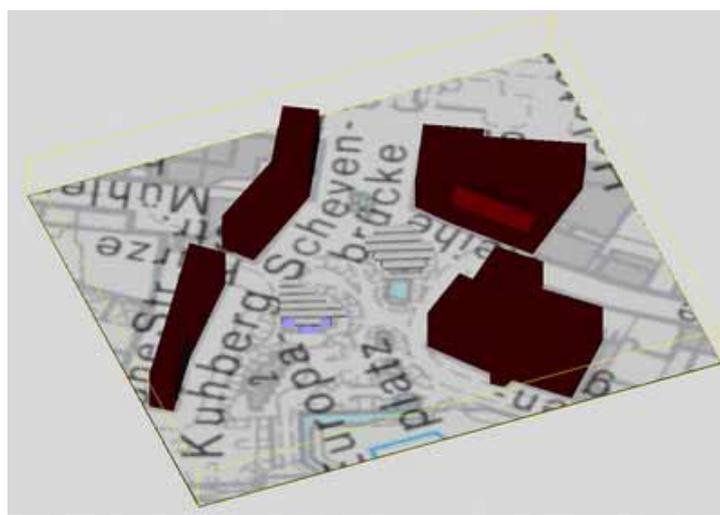


Abbildung 6-16: Wireless Insite Modell des Szenarios Europaplatz in einer Gesamtansicht.

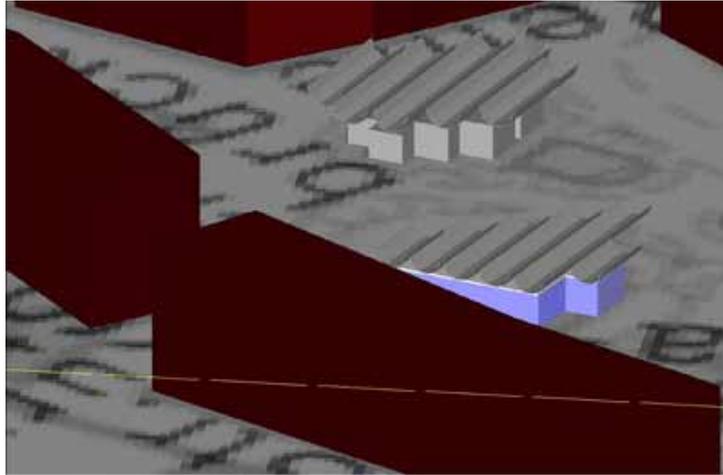


Abbildung 6-17: Ansicht über den Gebäudeblock zwischen Hohe Straße und Kleiner Kuhberg in Richtung zum Access Point.

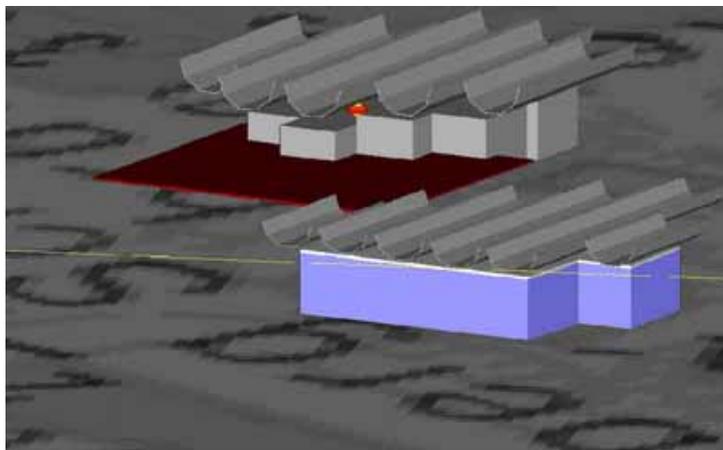


Abbildung 6-18: Detailansicht der dem Access Point (Antenne durch rotes Pattern dargestellt) nächstgelegenen Gebäude. Die flächenhafte dunkelrote Markierung kennzeichnet den für die Immissionsberechnungen betrachteten Bereich.

### 6.2.1.1 Numerische Immissionsbestimmung

Die Ergebnisse der Immissionsberechnung in 2 unterschiedlichen Ebenen (100 cm und 175 cm, siehe Abbildung 6-19) liefern zunächst die Immissionen der Quelle unter der Annahme kontinuierlicher Aussendung. Diese Immission kann dann entsprechend dem tatsächlichen effektiven Duty Cycle skaliert und als zeitlich gemittelte Immission in den betrachteten Empfängerpunkten dargestellt werden (siehe Abbildung 6-20). Als Empfängerpunkte wurden einerseits ein Empfängerpunktraster in 100 cm und 175 cm Höhe über den gesamten Raumbereich vor dem Access Point definiert und andererseits räumlich höher aufgelöste Empfängerpunktraster in den messtechnisch untersuchten Raumbereichen MP1 bis MP5 betrachtet (50 cm x 50 cm Raster in 5 unterschiedlichen Höhen von 75 cm bis 175 cm), dargestellt in Abbildung 6-21.

Tabelle 6-4 fasst die wesentlichsten Berechnungsparameter zusammen. *Ray Spacing*, *Collection Surface Radius* und Anzahl berücksichtigter *Reflexionen*, *Transmissionen* und *Beugungen* wurden entsprechend den Ausführungen in Kapitel 3.3.1.1 gewählt.

Berechnungsparameter für Berechnung Kiel - Europaplatz		
Ray Spacing	0,1°	
Collection Surface Radius	2,5 cm	
Anzahl Reflexionen, Transmissionen, Beugungen	4 Reflexionen, 2 Transmissionen, 1 Beugung	
Materialparameter	Glas	$\epsilon=19$ , $\sigma=13,3$ mS/m
	Metall	PEC
	Stahlbeton	$\epsilon=9$ , $\sigma=120,0$ mS/m
	Ziegel	$\epsilon=4$ , $\sigma=53,3$ mS/m
Access Point Antenne	2,437 GHz, Sendeleistung 15 dBm, Linear-Dipol 5 dBi	

Tabelle 6-4: Berechnungsparameter für das Szenario Europaplatz (Kiel).

Abbildung 6-19 zeigt die Beiträge (zeitlich unskaliert, d.h., entsprechend der Burst-Spitzenwerte) durch den Access Point zur großflächigen Feldverteilung in der Horizontalebene in 100 cm und 175 cm Höhe. Abbildung 6-20 zeigt die mittlere Feldverteilung in den beiden Ebenen (Access Point sendet nur den Beacon). Abbildung 6-21 zeigt die Beiträge (zeitlich unskaliert, d.h., entsprechend der Burst-Spitzenwerte) in den fünf messtechnisch untersuchten Messpositionen MP1 bis MP5.

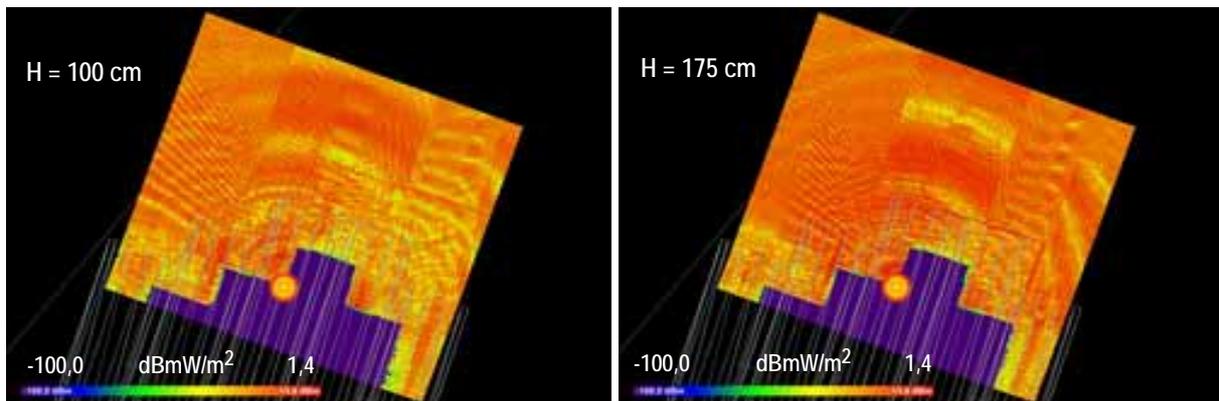


Abbildung 6-19: Immission durch den Access Point in unterschiedlichen Höhen (bei Annahme kontinuierlicher Abstrahlung).

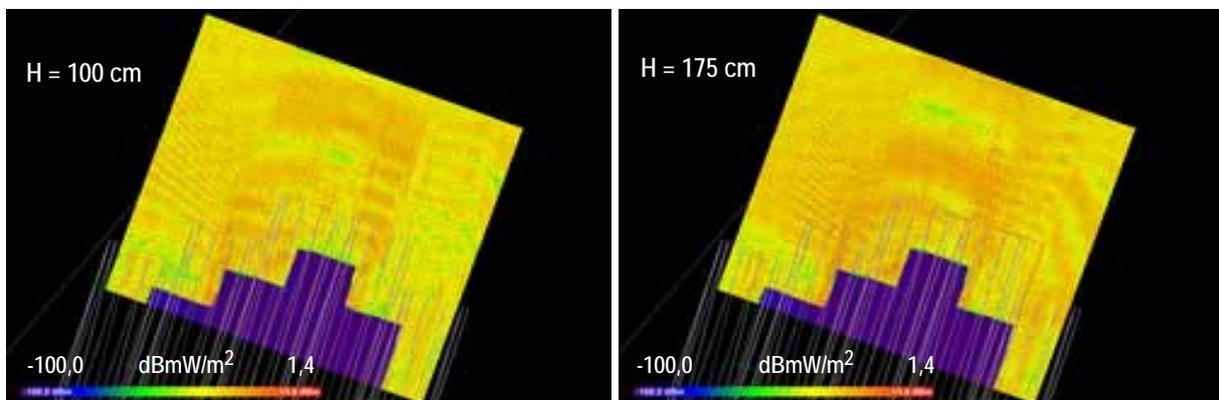
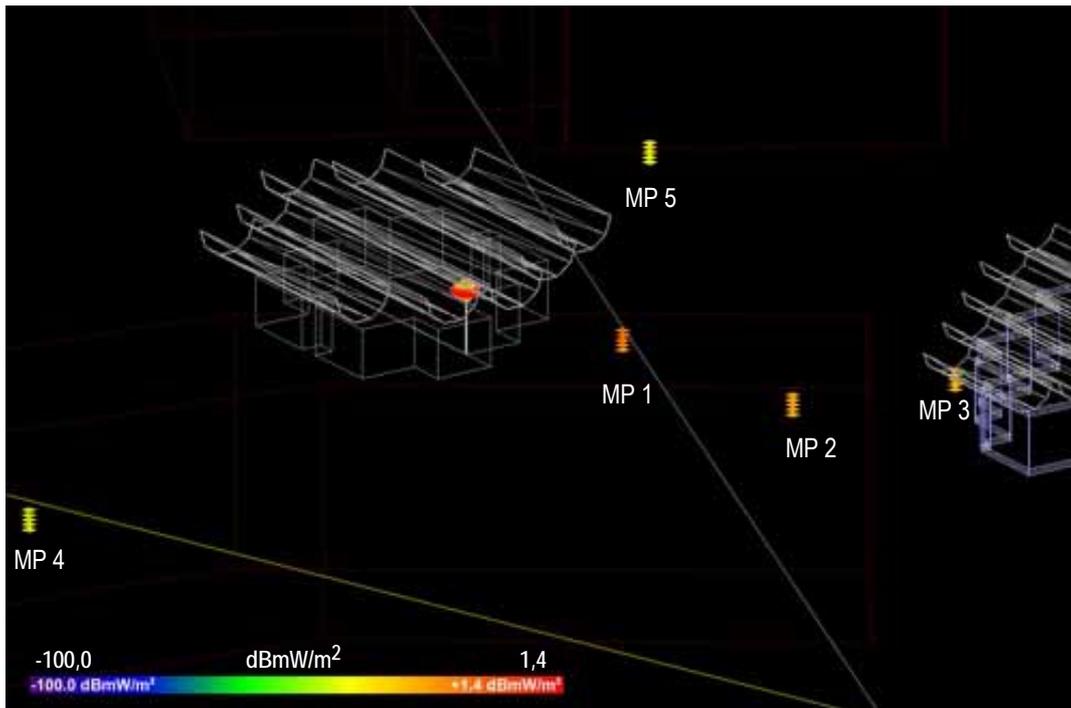


Abbildung 6-20: Mittlere Immission des Access Points in unterschiedlichen Höhen ohne aktive Clients im Netzwerk (d.h., der Access Point sendet nur den Beacon aus).



**Abbildung 6-21:** Immissionsbeitrag des Access Points (unter Annahme kontinuierlicher HF Abstrahlung) in 5 unterschiedlichen Höhen an den betrachteten Messpositionen MP1 bis MP5.

Tabelle 6-5 fasst die Berechnungsergebnisse in den einzelnen Messpositionen für unterschiedlich angenommene effektive Duty Cycles (Datenverkehrs-Situationen) zusammen. Der obere Teil der Tabelle („Immissions-Spitzenwerte“) stellt keine realistische Situation dar, soll jedoch zur Orientierung über Beiträge (Burst-Spitzenwert) in den unterschiedlichen Messpositionen dienen. Situation 1 entspricht etwa den Verhältnissen, ohne Clients im Netzwerk (nur Aussendung des Beacons durch den Access Point). Weiters sind zwei Situationen mit unterschiedlichen Duty Cycles von 0,7 und 0,1 dargestellt. Für den Fall, dass nur der Beacon ausgesendet wird ist die Feldverteilung in zwei Horizontalebene in 100 cm und 175 cm Höhe (Kopfhöhe) in Abbildung 6-20 dargestellt.

	effektiver Duty Cycle		Immission in mW/m <sup>2</sup>				
			MP1	MP2	MP3	MP4	MP5
Immissions- Spitzenwerte	AP1: 1.0	räumlicher Mittelwert	0.102261	0.016631	0.021263	0.004744	0.004935
		räumliches Maximum	0.337680	0.068780	0.042914	0.019717	0.053539
Situation 1 mittlere Immission	AP1: 0.005	räumliches Maximum	0.000511	0.000083	0.000106	0.000024	0.000025
		räumliches Maximum	0.001688	0.000344	0.000215	0.000099	0.000268
Situation 2 mittlere Immission	AP1: 0.7	räumlicher Mittelwert	0.071583	0.011642	0.014884	0.003321	0.003455
		räumliches Maximum	0.236376	0.048146	0.030040	0.013802	0.037477
Situation 3 mittlere Immission	AP1: 0.1	räumlicher Mittelwert	0.010226	0.001663	0.002126	0.000474	0.000494
		räumliches Maximum	0.033768	0.006878	0.004291	0.001972	0.005354

Tabelle 6-5: Berechnungsergebnis in Form einer Zusammenstellung der Immission für unterschiedliche Datenverkehrs-Situationen in den betrachteten Messpositionen MP1 bis MP5

### 6.2.1.2 Messtechnische Immissionsbestimmung

Die Messungen wurden an fünf Positionen rund um den Access Point durchgeführt. Abbildung 6-22 zeigt die fünf unterschiedlichen Messpositionen mit der verwendeten Messsonde, der Access Point ist mittels eines roten Kreises gekennzeichnet. Es herrschte mit Ausnahme von MP5 immer direkte Sicht. MP5 befand sich an der Rückseite des Gebäudes auf dem sich der Access Point befindet.

Die Messungen erfolgten grundsätzlich im Zero Span Modus des Spektrumanalysators mit RMS Detektor und bei 100 kHz Auflösebandbreite.

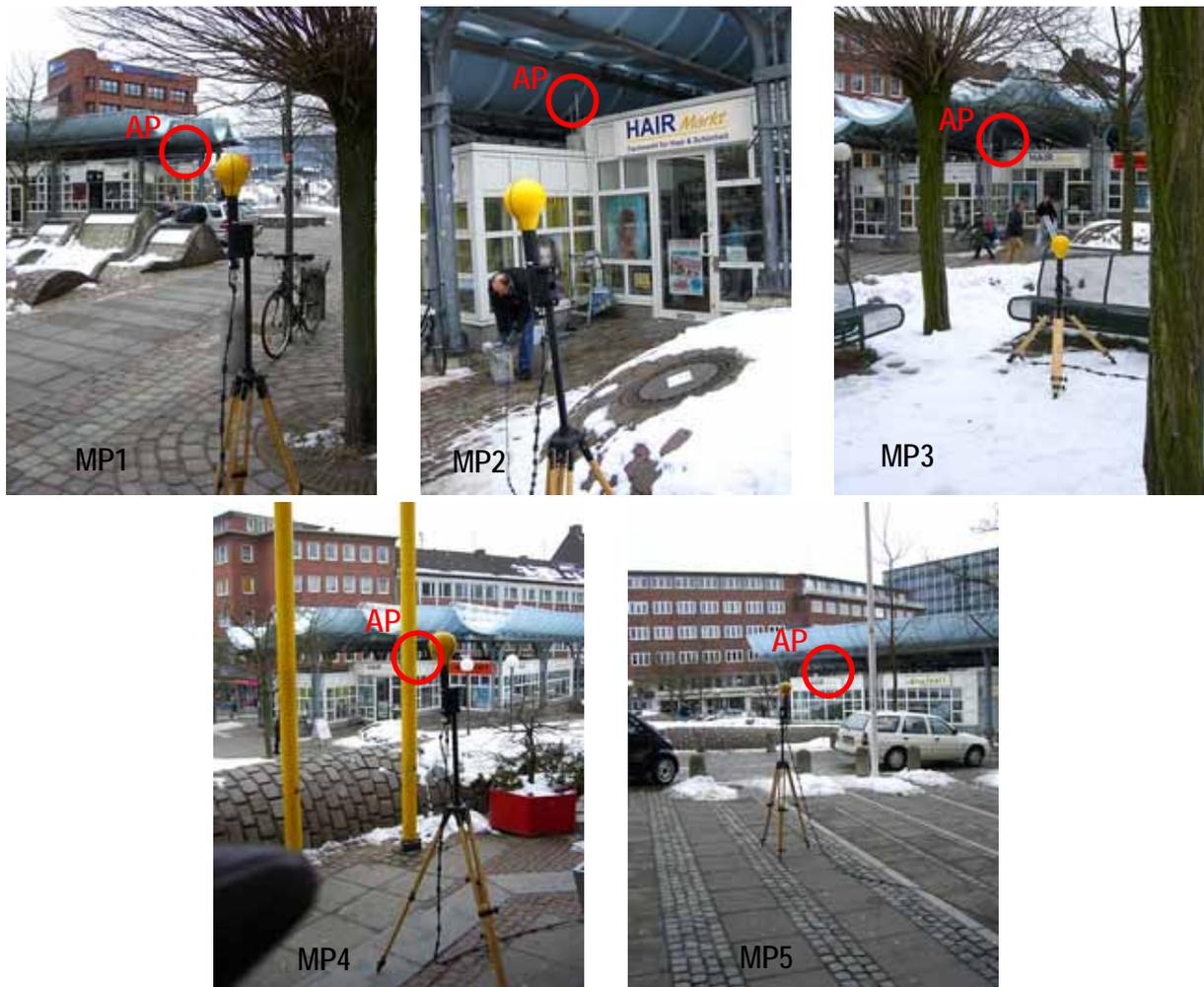


Abbildung 6-22: Messpunkte MP1, MP2, MP3, MP4 und MP5. Der Access Point ist in jedem Foto mit einem Roten Kreis gekennzeichnet.

Tabelle 6-6 fasst die gemessenen und bezüglich der Auflösungsbreite korrigierten Burst-Spitzenwerte in den Messpositionen MP1 bis MP5 zusammen.

### 6.2.2 Vergleich von numerischer Berechnung und Messung

Aufgrund der Tatsache, dass die Messungen im Realbetrieb durchgeführt wurden und aufgrund der praktischen Unüberschaubarkeit des Szenarios sowie der nicht exakten Nachbildbarkeit des Szenarios mit Wireless Insite ist ein direkter Vergleich von Mess- und Berechnungsergebnissen hier nur schwer zu bewerkstelligen. Die Messergebnisse liegen jedoch jedenfalls in dem durch die Berechnung vorhergesagten Bereich möglicher Immissionen. Die geringsten Abweichungen zur Simulation sind in den Messpunkten MP2 und MP4. Mögliche Gründe für die etwas größeren Abweichungen (bis zu ca. 9 dB) in den anderen Messpositionen sind die Umgebungsbeschaffenheit des Szenarios. Der Europaplatz zeichnet sich durch ein Gefälle sowie bauliche Unebenheiten in mehreren Bereichen aus (künstlerisch gestaltete wellenförmige Ausbildung des Bodens). Ebenso wurde die Antenne mittels eines Linearen Dipols nachgebildet was sich in Unterschieden zu den gemessenen Werten bemerkbar machen kann.

Messposition	Höhe [cm]	Messwert S [mW/m <sup>2</sup> ]	räumlicher Mittelwert S [mW/m <sup>2</sup> ]
		AP	AP
MP1	75	<b>0.01758</b>	<b>0.01485</b>
	100	<b>0.01421</b>	
	125	<b>0.01010</b>	
	150	<b>0.00962</b>	
	175	<b>0.02273</b>	
MP2	75	<b>0.01915</b>	<b>0.01013</b>
	100	<b>0.01348</b>	
	125	<b>0.00260</b>	
	150	<b>0.00744</b>	
	175	<b>0.00797</b>	
MP3	75	<b>0.00275</b>	<b>0.00272</b>
	100	<b>0.00259</b>	
	125	<b>0.00247</b>	
	150	<b>0.00356</b>	
	175	<b>0.00220</b>	
MP4	75	<b>0.00294</b>	<b>0.00341</b>
	100	<b>0.00429</b>	
	125	<b>0.00706</b>	
	150	<b>0.00138</b>	
	175	<b>0.00134</b>	
MP5	75	<b>0.00079</b>	<b>0.00086</b>
	100	<b>0.00107</b>	
	125	<b>0.00072</b>	
	150	<b>0.00085</b>	
	175	<b>0.00085</b>	

Tabelle 6-6: Messergebnisse (Burst-Spitzenwerte) in den Messpositionen MP1bis MP5.

### 6.2.3 Immissionsbeurteilung im Hinblick auf die Grenzwerte

Unter Beachtung der Ausführungen in Kapitel 5.1.5 hinsichtlich der normgerechten Interpretation von räumlich und zeitlich gemittelten Immissionswerten wird auch für die hier untersuchten Szenarien veranschaulicht, dass die **typisch** zu erwartenden WLAN Immissionen **deutlich unterhalb von 0,01 Promille des Referenzwertes** nach [16] liegen.

Höhere Werte können naturgemäß bei starker Annäherung an die Antennen erreicht werden, jedoch werden auch in diesem Fall die Referenzwerte bzw. Basisgrenzwerte nach [16] nicht überschritten (vgl. hierzu Kapitel 5.1.5).

### 6.2.4 Vergleich der Immissionswerte mit bisher publizierten Daten

Ein Vergleich der hier ermittelten Immissionswerte mit anderen publizierten Daten hinsichtlich Outdoor WLAN-Messungen ([9],[18]) zeigt, dass die hier (unter realistischen Bedingungen) ermittelten Ergebnisse um mehrere Größenordnungen unterhalb der in [9],[18] angegebenen (in [18] als worst case bezeichneten) Werte liegen. Gründe für die Abweichungen zu den in [18] publizierten Daten können

aufgrund der dort praktisch nicht dokumentierten Messmethode keine genannt werden. Die Unterschiede zu den in [9] angeführten Immissionswerten begründen sich hauptsächlich durch die Tatsache, dass dort teilweise in (unrealistisch) geringen Entfernungen zu Außenantennen gemessen wurde. Weiters wurde in [9], soweit aus dem Dokument nachzuvollziehen, zumindest teilweise von Access Points mit wesentlich mehr als 100 mW EIRP ausgegangen (vgl. dazu auch [1]). Bei Angaben relativ zu Referenz- bzw. Grenzwerten ist dabei weiters zu beachten, dass in einigen Arbeiten lokale Burst-Spitzenwerte mit den Referenz- bzw. Grenzwerten verglichen werden, was nach den meisten Grenzwert definierenden Dokumenten (z.B. [16]) nicht korrekt ist (zeitliche und räumliche Mittelung!).

### 6.2.5 Mögliche Maßnahmen zur Immissionsminderung

Die Anbringung des Access Points unmittelbar über dem Eingang zu einem Geschäftslokal und direkt unter dem großflächigen Metalldach scheint nicht optimal zu sein. Nach Kommunikation mit den Betreibern soll dieser Access Point zur Versorgung der umliegenden Wohnungen genutzt werden und nicht um den Bereich bei den Parkbänken zu versorgen. Daraus lässt sich schließen, dass eine Verlegung des Access Points auf das Dach erfolgen wird, dies führt wiederum zu einer Vergrößerung des Abstandes zu dem Eingangsbereich des Geschäftslokals sowie zu den Parkbänken und somit zu einer Verringerung der Immission. Weiteres Minimierungspotential lässt sich demnach hier nicht ableiten.

## 6.3 Schulstrasse, Kiel

### Beschreibung des Szenarios und technische Kenndaten

Abbildung 6-23 zeigt das in Wireless Insite generierte Modell des Szenarios in der Schulstrasse in Kiel. Ein sich am Dach eines Hauses befindlicher Access Point mit Antennen Pattern ist in einer vergrößerten Abbildung dargestellt. Die Berechnungsparameter sind in Tabelle 6-7 gelistet. Das Antennen Pattern der eingesetzten Antenne von Pacific Wireless Model PAWOD24 zeigt Abbildung 6-24. Es handelt sich hierbei um eine omnidirektionale Antenne mit 12 dBi Gain, daraus ergibt sich eine zugeführte Sendeleistung von 8 dBm wenn man von maximal 20 dBm EIRP ausgeht. Aufgrund des großen Feldbereichs ergibt sich ein extrem kleiner Wert für das Ray Spacing, was sich in einer deutlichen Erhöhung der Simulationszeit bemerkbar machte.

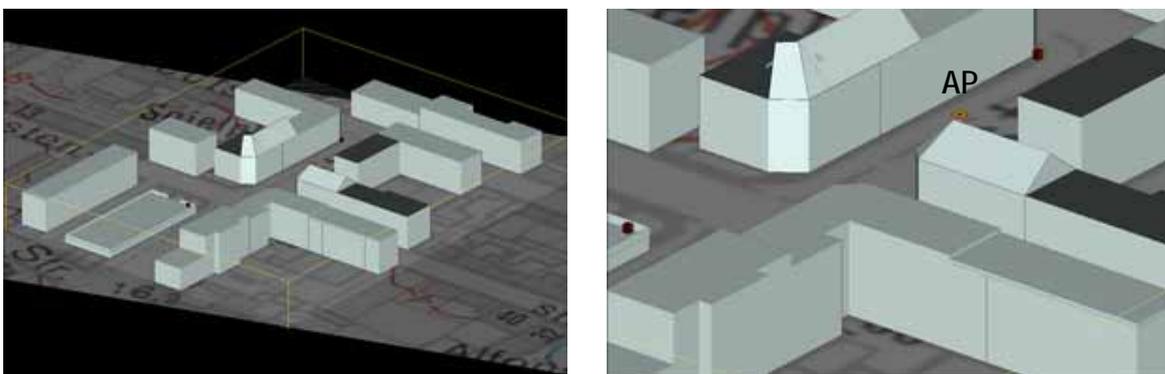


Abbildung 6-23: Wireless Insite Modell für das Szenario Schulstrasse (Kiel). Rechts: Access Point mit Antennen Pattern.

### 6.3.1.1 Numerische Immissionsbestimmung

Die Ergebnisse der Immissionsberechnung der Quelle unter der Annahme kontinuierlicher Aussendung in einer weiträumigen Ebene in einer Höhe von 175cm ist in Abbildung 6-25 dargestellt. Der Beitrag kann anschließend entsprechend dem tatsächlichen effektiven Duty Cycle skaliert und zur zeitlich gemittelten Immission in den betrachteten Empfängerpunkten dargestellt werden (siehe Abbildung 6-26). Als Empfängerpunkte wurden einerseits ein Empfängerpunktraster in 175cm Höhe entlang der Straßenzüge in der Umgebung des Access Points definiert und andererseits räumlich höher aufgelöste Empfängerpunktraster in den messtechnisch untersuchten Raumbereichen MP1 bis MP4 betrachtet (50 cm x 50 cm Raster in 5 unterschiedlichen Höhen von 75 cm bis 175 cm).

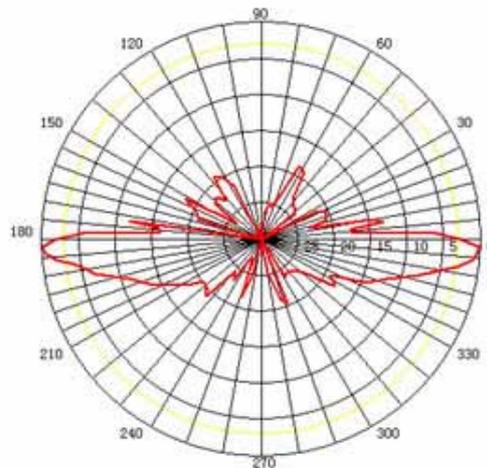


Abbildung 6-24: Antennenpattern der eingesetzten Antenne (PAWOD24 von Pacific Wireless).

Tabelle 6-7 fasst die wesentlichsten Parameter der Berechnung zusammen. *Ray Spacing*, *Collection Surface Radius* und Anzahl berücksichtigter *Reflexionen*, *Transmissionen* und *Beugungen* wurden entsprechend den Ausführungen in Kapitel 3.3.1.1 gewählt.

Berechnungsparameter für Berechnung Kiel - Schulstrasse		
Ray Spacing	0,026°	
Collection Surface Radius	2,5 cm	
Anzahl Reflexionen, Transmissionen, Beugungen	4 Reflexionen, 1 Transmissionen, 1 Beugung	
Materialparameter	Glas	$\epsilon=19, \quad \sigma=13,7 \text{ mS/m}$
	Stahlbeton	$\epsilon=9, \quad \sigma=123,2 \text{ mS/m}$
	Ziegel	$\epsilon=4, \quad \sigma=54,7 \text{ mS/m}$
	Ziegeldach	$\epsilon=4, \quad \sigma=27,4 \text{ mS/m}$
Access Point Antenne	2,463 GHz, Sendeleistung 8 dBm, Omnidirectional 12 dBi	

Tabelle 6-7: Berechnungsparameter für das Szenario Schulstrasse (Kiel).

Abbildung 6-25 zeigt die Beiträge (zeitlich unskaliert, d.h., entsprechend der Burst-Spitzenwerte) des Access Points zur großflächigen Feldverteilung in der Horizontalebene in 175 cm Höhe. Abbildung 6-26 zeigt die mittlere Feldverteilung in

der Ebene (Access Point sendet nur den Beacon). Abbildung 6-27 zeigt die Beiträge (zeitlich unskaliert, d.h., entsprechend der Burst-Spitzenwerte) in den vier messtechnisch untersuchten Messpositionen MP1 bis MP4.

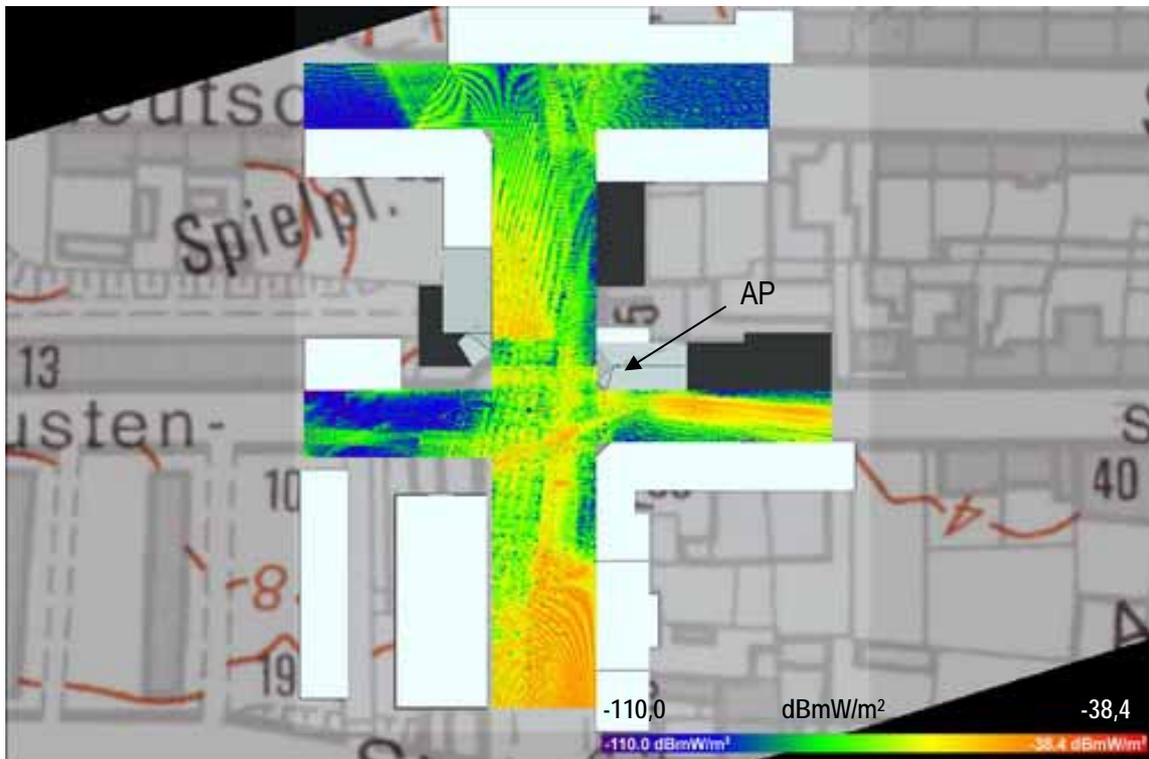


Abbildung 6-25: Immissionen des Access Points in einer Ebene in der Höhe von 175cm (bei Annahme kontinuierlicher Abstrahlung).

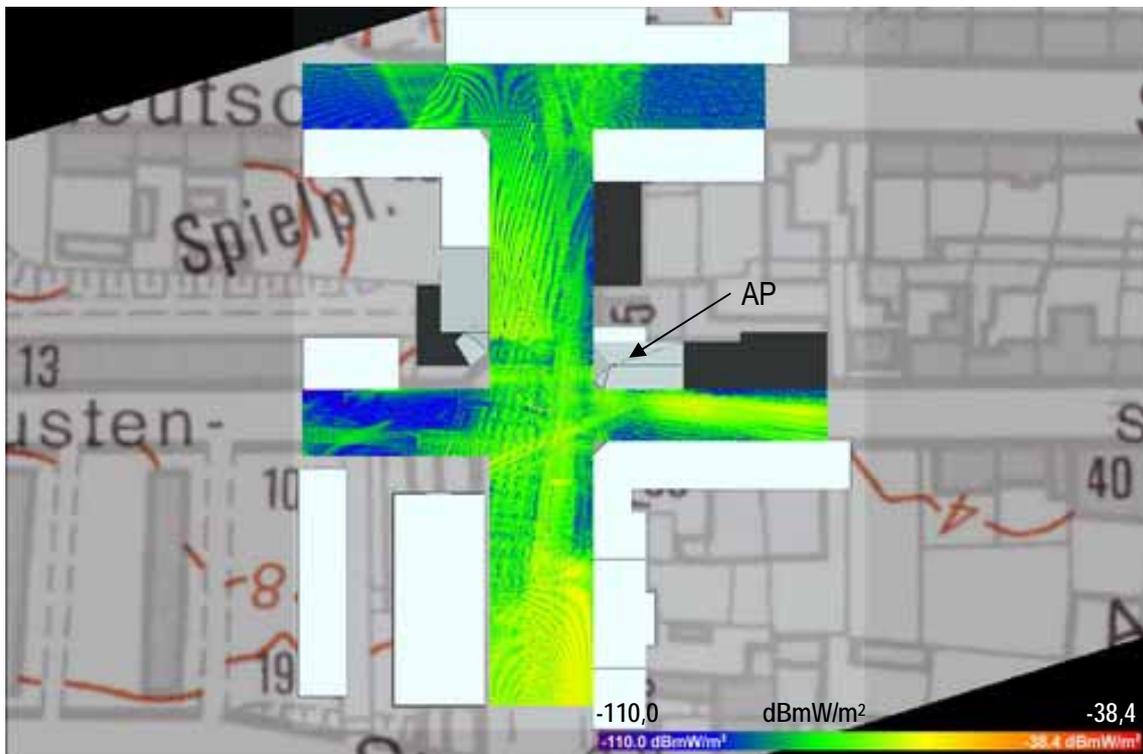
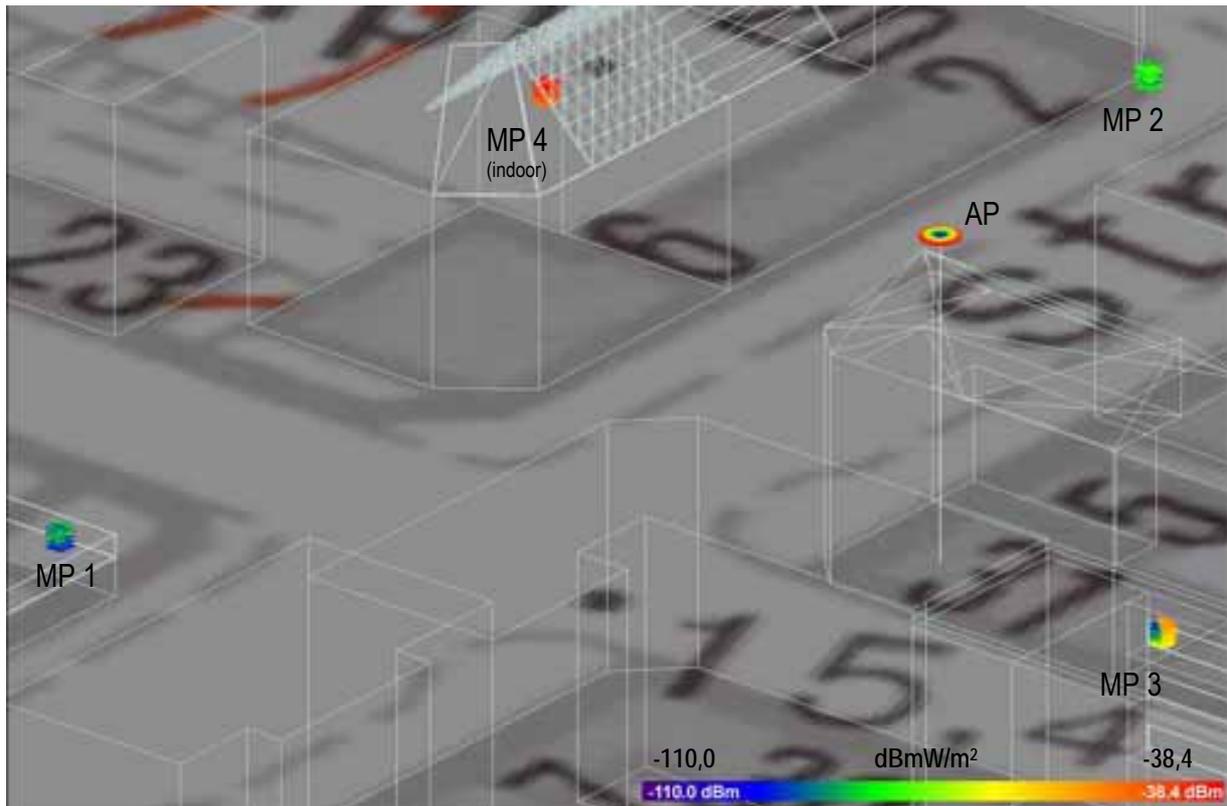


Abbildung 6-26: Mittlere Immission des Access Points in einer Ebene in der Höhe von 175 cm ohne aktive Clients im Netzwerk (d.h., der Access Point sendet nur den Beacon aus).



**Abbildung 6-27:** Immissionen des Access Points (unter Annahme kontinuierlicher HF Abstrahlung) in 5 unterschiedlichen Höhen an den betrachteten Messpositionen MP1 bis MP4.

Tabelle 6-8 fasst die Berechnungsergebnisse in den einzelnen Messpositionen für unterschiedlich angenommene effektive Duty Cycles (Datenverkehrs-Situationen) zusammen. Am Beginn der Tabelle („Immissions-Spitzenwerte“) ist eine nicht reale Situation dargestellt, dies soll jedoch zur Orientierung über das Ausmaß der Burst-Spitzenwerte in den unterschiedlichen Messpositionen dienen. Situation 1 entspricht etwa den Verhältnissen, ohne Clients im Netzwerk (nur Aussendung des Beacons durch den Access Point). Weiters sind zwei Situationen mit unterschiedlichen Duty Cycles von 0,7 und 0,1 dargestellt. Für den Fall, dass nur der Beacon ausgesendet wird ist die Feldverteilung in der Horizontalebene 175 cm über dem Boden (Kopfhöhe) in Abbildung 6-26 dargestellt.

	effektiver Duty Cycle		Immission in mW/m <sup>2</sup>			
			MP1	MP2	MP3	MP4
Immissions-Spitzenwerte	AP1: 1.0	räumlicher Mittelwert	0.00000034	0.00000092	0.00018928	0.00000663
		räumliches Maximum	0.00000299	0.00000291	0.00047223	0.00004389
Situation 1 mittlere summierte Immission	AP1: 0.005	räumliches Maximum	0.0000000017	0.0000000046	0.0000009464	0.0000000332
		räumliches Maximum	0.0000000150	0.0000000145	0.0000023612	0.0000002195
Situation 2 mittlere summierte Immission	AP1: 0.7	räumlicher Mittelwert	0.00000024	0.00000065	0.00013250	0.00000464
		räumliches Maximum	0.00000210	0.00000204	0.00033056	0.00003072
Situation 3 mittlere summierte Immission	AP1: 0.1	räumlicher Mittelwert	0.00000003	0.00000009	0.00001893	0.00000066
		räumliches Maximum	0.00000030	0.00000029	0.00004722	0.00000439

**Tabelle 6-8:** Berechnungsergebnis in Form einer Zusammenstellung der Immission für unterschiedliche Datenverkehrs-Situationen in den betrachteten Messpositionen MP1 bis MP4.

### 6.3.1.2 Messtechnische Immissionsbestimmung

Die Messungen wurden an vier Positionen rund um den Access Point durchgeführt. Abbildung 6-28 zeigt die vier unterschiedlichen Messpositionen mit der verwendeten Messsonde, der Access Point ist mittels eines roten Kreises gekennzeichnet. Es herrschte in allen Messpunkten direkte Sicht auf die Sendeantenne. Messpunkt MP4 lag im Dachgeschoss eines Amtsgebäudes.

Die Messungen erfolgten grundsätzlich im Zero Span Modus des Spektrumanalysators mit RMS Detektor und bei 100 kHz Auflösungsbreite.

Tabelle 6-9 fasst die gemessenen und bezüglich der Auflösungsbreite korrigierten Burst-Spitzenwerte in den Messpositionen MP1 bis MP4 zusammen.



Abbildung 6-28: Messpositionen MP1 bis MP4. Die Messposition MP4 befand sich im Dachgeschoss eines Amtsgebäudes.

Messposition	Höhe [cm]	Messwert S [mW/m <sup>2</sup> ]	räumlicher Mittelwert S [mW/m <sup>2</sup> ]
		AP	AP
MP1	75	<b>0.00017</b>	0.000301
	100	<b>0.00021</b>	
	125	<b>0.00031</b>	
	150	<b>0.00044</b>	
	175	<b>0.00038</b>	
MP2	75	<b>0.00010</b>	0.000090
	100	<b>0.00006</b>	
	125	<b>0.00015</b>	
	150	<b>0.00005</b>	
	175	<b>0.00008</b>	
MP3	75	<b>0.00057</b>	0.000925
	100	<b>0.00049</b>	
	125	<b>0.00113</b>	
	150	<b>0.00088</b>	
	175	<b>0.00155</b>	
MP4	75	<b>0.00079</b>	0.000990
	100	<b>0.00077</b>	
	125	<b>0.00109</b>	
	150	<b>0.00136</b>	
	175	<b>0.00094</b>	

Tabelle 6-9: Messergebnisse (Burst-Spitzenwerte) in den Messpositionen MP1bis MP4.

### 6.3.2 Vergleich von numerischer Berechnung und Messung

Da die Messungen im Realbetrieb durchgeführt wurden und aufgrund der praktischen Unüberschaubarkeit des Szenarios sowie der nicht exakten Nachbildbarkeit des Szenarios mit Wireless Insite ist ein direkter Vergleich von Mess- und Berechnungsergebnissen hier nur schwer zu bewerkstelligen. Die geringsten Abweichungen zur Simulation sind im Messpunkt MP3 (ca. 7dB). Unter der Voraussetzung, dass die Access Points die maximal zulässige Sendeleistung von 100 mW EIRP nicht überschreiten, sind die Umgebungsbeschaffenheit des Szenarios und die Möglichkeit, dass andere, nichtsichtbare Quellen (z.B., Clients in der Umgebung der Messpositionen) zur Immission beitragen, denkbare Gründe für die deutlich größeren Abweichungen (bis zu ca. 30 dB) in den anderen Messpositionen.

### 6.3.3 Immissionsbeurteilung im Hinblick auf die Grenzwerte

Unter Beachtung der Ausführungen in Kapitel 5.1.5 hinsichtlich der normgerechten Interpretation von räumlich und zeitlich gemittelten Immissionswerten wird auch für die hier untersuchten Szenarien veranschaulicht, dass die **typisch** zu erwartenden WLAN Immissionen um acht Zehnerpotenzen **deutlich unterhalb dem Referenzwerte** nach [16] liegen.

Höhere Werte können naturgemäß bei starker Annäherung an die Antennen erreicht werden, jedoch werden auch in diesem Fall (unter realistischen Annahmen) die

Referenzwerte bzw. Basisgrenzwerte nach [16] nicht überschritten (vgl. hierzu Kapitel 5.1.5).

#### **6.3.4 Vergleich der Immissionswerte mit bisher publizierten Daten**

Ein Vergleich der hier ermittelten Immissionswerte mit anderen publizierten Daten hinsichtlich Outdoor WLAN-Messungen ([9],[18]) zeigt, dass die hier (unter realistischen Bedingungen) ermittelten Ergebnisse um mehrere Größenordnungen unterhalb der in [9],[18] angegebenen (in [18] als worst case bezeichneten) Werte liegen. Gründe für die Abweichungen zu den in [18] publizierten Daten können aufgrund der dort praktisch nicht dokumentierten Messmethode keine genannte werden. Die Unterschiede zu den in [9] angeführten Immissionswerten begründen sich hauptsächlich durch die Tatsache, dass dort teilweise in (unrealistisch) geringen Entfernungen zu Außenantennen gemessen wurde. Weiters wurde in [9], soweit aus dem Dokument nachzuvollziehen, zumindest teilweise von Access Points mit wesentlich mehr als 100 mW EIRP ausgegangen (vgl. dazu auch [1]). Bei Angaben relativ zu Referenz- bzw. Grenzwerten ist dabei weiters zu beachten, dass in einigen Arbeiten lokale Burst-Spitzenwerte mit den Referenz- bzw. Grenzwerten verglichen werden, was nach den meisten Grenzwert definierenden Dokumenten (z.B. [16]) nicht korrekt ist (zeitliche und räumliche Mittelung!).

#### **6.3.5 Mögliche Maßnahmen zur Immissionsminderung**

Aufgrund der Montage des Access Points am Dachgiebel des Gebäudes und der damit verbundenen hohen Abstände zu den nächsten der Öffentlichkeit zugänglichen Stellen scheint eine Reduktion der Immission nur durch Reduktion der Sendeleistung möglich zu sein.

### **6.4 Medusastrasse, Kiel**

#### **Beschreibung des Szenarios und technische Kenndaten**

Abbildung 6-29 zeigt das in Wireless Insite modellierte Szenario mit den Antennen Pattern der beiden Access Points an dem lang gestreckten Gebäude. Access Point 1 (AP1) besitzt einen Rundstrahler mit 12 dBi Gewinn was zu einer Sendeleistung von 8 dBm führt unter der Annahme von 20 dBm EIRP und Access Point 2 (AP2) mit einer Sektorantenne mit 20 dBi Gewinn und somit 0 dBm Sendeleistung mit ca. 15° mechanischem Downtilt (mechanische Neigung der Antenne Richtung Boden). Die beiden Antennen sind in Abbildung 6-30 dargestellt. Das Antennen Pattern des Rundstrahlers ist in Abbildung 6-24 dargestellt, das vertikale und horizontale Antennen Pattern der Sektorantenne von HyperLink Technologies Model HG2420P-120 ist in Abbildung 6-31 dargestellt. Es wurden messtechnisch fünf Positionen untersucht, die in der Abbildung durch dunkle Punkte markiert sind (MP1 bis MP5). Zwei der fünf Messpunkte befanden sich innerhalb von Gebäuden.

Die wesentlichen Berechnungsparameter des Szenarios sind in Tabelle 6-10 zusammengefasst. *Ray Spacing*, *Collection Surface Radius* und Anzahl berücksichtigter *Reflexionen*, *Transmissionen* und *Beugungen* wurden entsprechend den Ausführungen in Kapitel 3.3.1.1 gewählt.

Berechnungsparameter für Berechnung Kiel - Medusastrasse			
Ray Spacing	0,05°		
Collection Surface Radius	2,5 cm		
Anzahl Reflexionen, Transmissionen, Beugungen	3 Reflexionen, 1 Transmissionen, 1 Beugung		
Materialparameter	Glas einfach	$\epsilon=8,9$	$\sigma=17,8$ mS/m
	Glas 3-fach	$\epsilon=19,$	$\sigma=13,3$ mS/m
	Stahlbeton	$\epsilon=9,$	$\sigma=123,0$ mS/m
Access Point Antenne 1	2,42 GHz, Sendeleistung 8 dBm, Omnidirectional 12 dBi		
Access Point Antenne 2	2,42 GHz, Sendeleistung 0 dBm, Directional 20 dBi		

Tabelle 6-10: Berechnungsparameter für das Szenario Medusastrasse (Kiel).

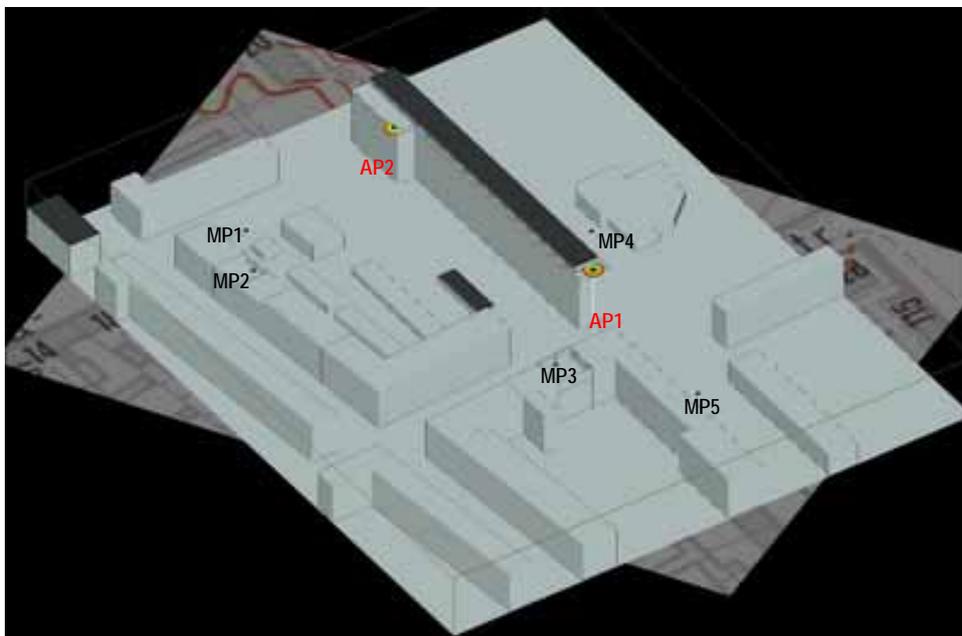


Abbildung 6-29: Wireless Insite Modell für das Szenario Medusastrasse mit den Antennen Pattern der beiden Access Points. Die sichtbaren dunklen Punkte zeigen die Messpositionen MP1 bis MP5.



Abbildung 6-30: Access Point Antennen. Rundstrahler (linkes Bild – AP1) und Sektor Antenne (rechtes Bild – AP2).

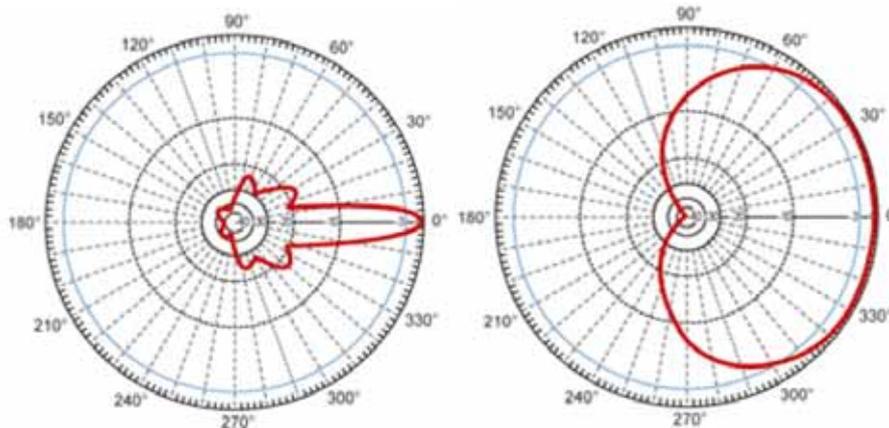


Abbildung 6-31: Vertikales und Horizontales Antennen Pattern der Sektorantenne von HyperLink Technologies (Model HG2420P-120).

#### 6.4.1.1 Numerische Immissionsbestimmung

Die Ergebnisse der Immissionsberechnungen liefern zunächst die einzelnen Immissionsbeiträge der einzelnen Quellen unter der Annahme kontinuierlicher Aussendung. Diese Einzelbeiträge können dann entsprechend dem tatsächlichen effektiven Duty Cycle skaliert und zur zeitlich gemittelten Gesamtimmission in den betrachteten Empfängerpunkten überlagert werden. Als Empfängerpunkte wurden einerseits ein Empfängerpunktraster in 175 cm Höhe (über Straßenniveau) über den gesamten Raumbereich des Simulationsszenarios definiert und andererseits räumlich höher aufgelöste Empfängerpunktraster in den messtechnisch untersuchten Raumbereichen MP1 bis MP5 betrachtet (50 cm x 50 cm Raster in 5 unterschiedlichen Höhen von 75 cm bis 175 cm über dem Boden).

Abbildung 6-32 zeigt die Einzelbeiträge (zeitlich unskaliert, d.h., entsprechend der Burst-Spitzenwerte) der beiden Access Points zur großflächigen Feldverteilung in der Horizontalebene in 175 cm Höhe. Abbildung 6-33 zeigt die summierte mittlere Feldverteilung in dieser Ebene (beide Access Points senden nur den Beacon). Abbildung 6-34 zeigt die Beiträge (zeitlich unskaliert, d.h., entsprechend der Burst-Spitzenwerte) in den fünf messtechnisch untersuchten Messpositionen MP1 bis MP5.

Tabelle 6-11 fasst die Berechnungsergebnisse in den einzelnen Messpositionen für unterschiedlich angenommene effektive Duty Cycles (Datenverkehrs-Situationen) zusammen. Am Beginn der Tabelle („Immissions-Spitzenwerte“) ist eine nicht reale Situation dargestellt, dies soll jedoch zur Orientierung über das Ausmaß der Burst-Spitzenwerte in den unterschiedlichen Messpositionen dienen. Situation 4 entspricht etwa den Verhältnissen, ohne Clients im Netzwerk (nur Aussendung des Beacons durch den Access Point). Weiters sind drei Situationen mit unterschiedlichen Duty Cycles dargestellt. Für den Fall, dass nur der Beacon ausgesendet wird ist die Feldverteilung in der Horizontalebene 175 cm über dem Boden (Kopfhöhe) in Abbildung 6-33 dargestellt.

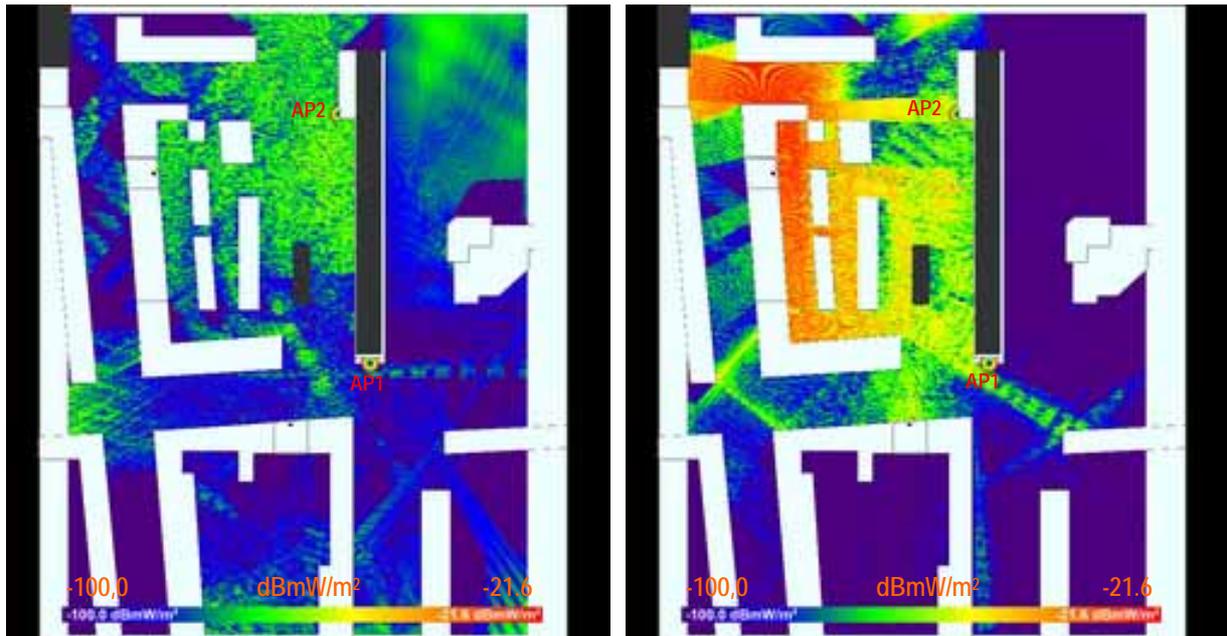


Abbildung 6-32: Immissionsbeitrag des Access Point 1 (linkes Bild - Rundstrahler) und des Access Point 2 (rechtes Bild – Sektorantenne) in einer Ebene in der Höhe von 175 cm (bei Annahme kontinuierlicher Abstrahlung).

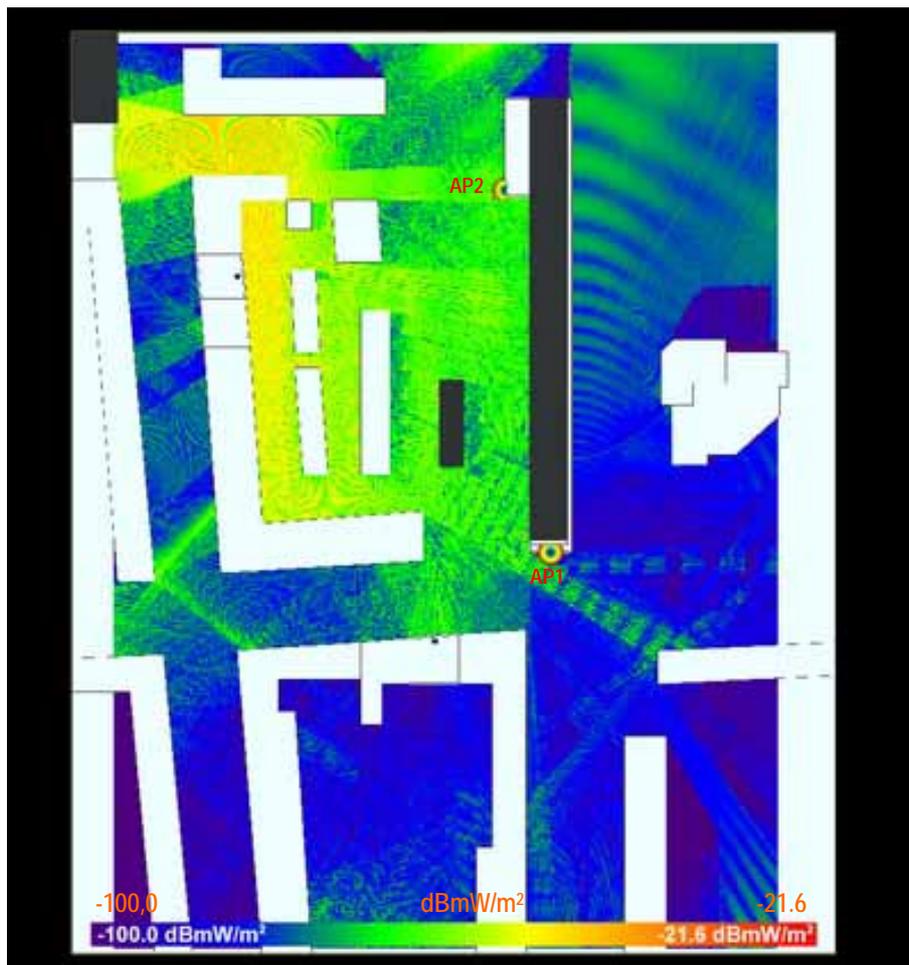


Abbildung 6-33: Mittlere Immission der beiden Access Points in einer Ebene in der Höhe von 175 cm ohne aktive Clients im Netzwerk (d.h., die Access Points senden nur den Beacon aus).

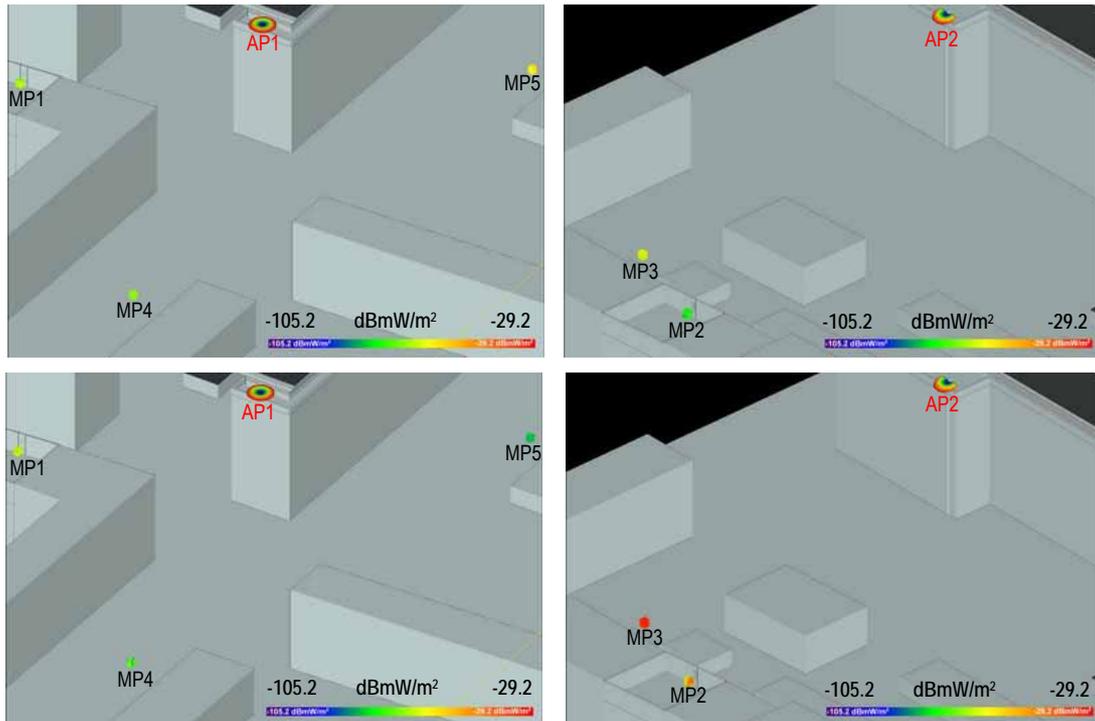


Abbildung 6-34: Immissionen der Access Points (unter Annahme kontinuierlicher HF Abstrahlung) in 5 unterschiedlichen Höhen an den betrachteten Messpositionen MP1 bis MP5. In den beiden oberen Darstellungen ist Access Point 1 (Rundstrahlantenne) aktiv, in den unteren Darstellungen der Access Point 2 (Sektor Antenne).

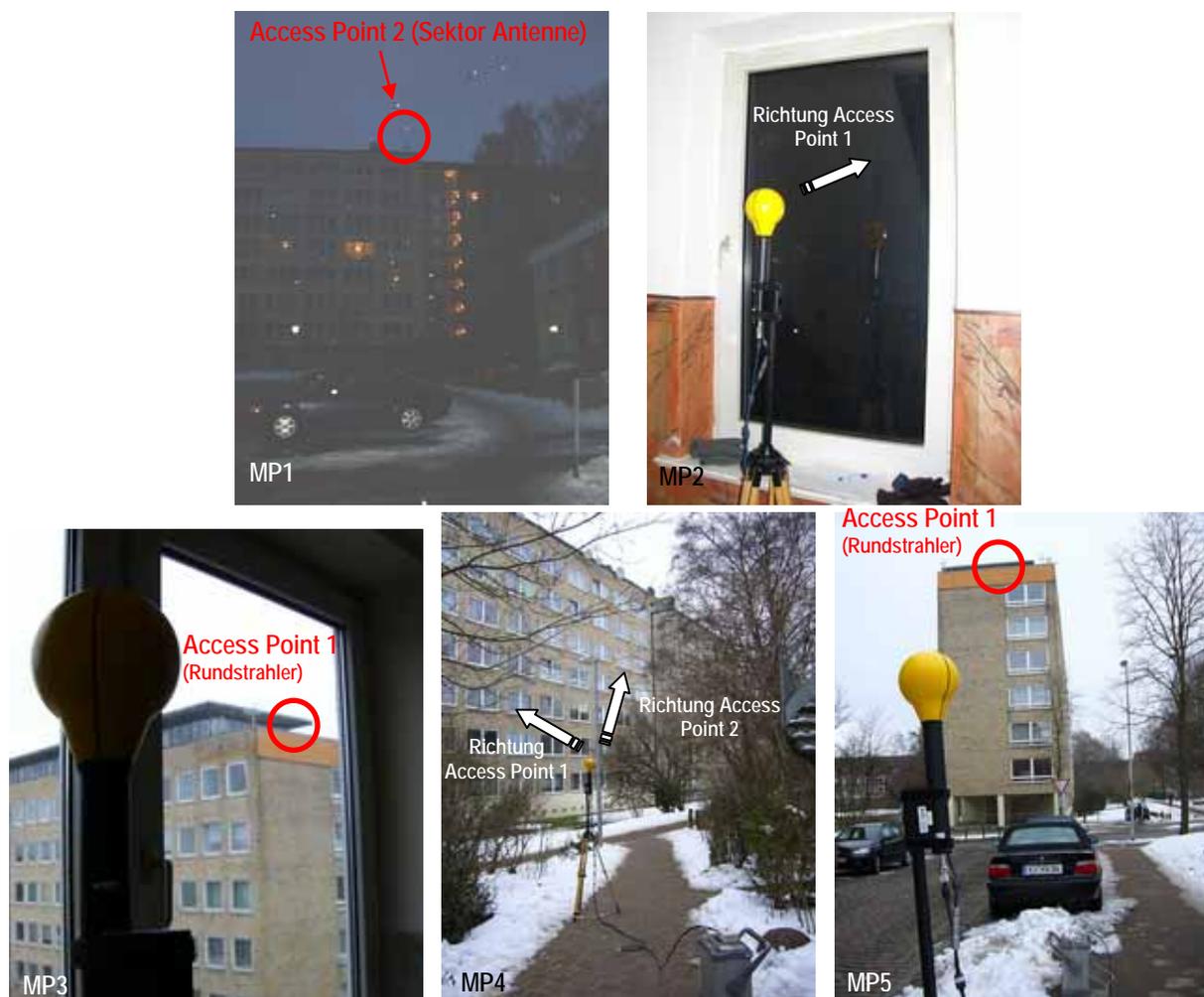
	effektiver Duty Cycle		Immission in mW/m <sup>2</sup>				
			MP1	MP2	MP3	MP4	MP5
Einzel-Immissions-Spitzenwerte	AP1: 1.0	räumlicher Mittelwert	1.23E-07	1.47E-08	6.70E-07	6.48E-08	1.03E-06
		räumliches Maximum	9.15E-07	1.51E-06	7.10E-06	1.28E-07	1.74E-06
	AP2: 1.0	räumlicher Mittelwert	8.35E-07	5.10E-05	4.06E-04	5.98E-08	4.02E-09
		räumliches Maximum	7.24E-06	2.55E-04	1.38E-03	2.97E-07	3.87E-08
Situation 1 mittlere summierte Immission	AP1: 0.005	räumlicher Mittelwert	1.68E-07	1.02E-05	8.12E-05	1.23E-08	5.94E-09
	AP2: 0.2	räumliches Maximum	1.45E-06	5.11E-05	2.76E-04	5.98E-08	1.20E-08
Situation 2 mittlere summierte Immission	AP1: 0.7	räumlicher Mittelwert	6.70E-07	3.57E-05	2.85E-04	8.72E-08	7.21E-07
	AP2: 0.7	räumliches Maximum	5.29E-06	1.79E-04	9.65E-04	2.80E-07	1.22E-06
Situation 3 mittlere summierte Immission	AP1: 0.1	räumlicher Mittelwert	9.58E-08	5.10E-06	4.07E-05	1.25E-08	1.03E-07
	AP2: 0.1	räumliches Maximum	7.56E-07	2.55E-05	1.38E-04	4.00E-08	1.74E-07
Situation 4 mittlere summierte Immission	AP1: 0.005	räumlicher Mittelwert	4.79E-09	2.55E-07	2.03E-06	6.23E-10	5.15E-09
	AP2: 0.005	räumliches Maximum	3.78E-08	1.28E-06	6.89E-06	2.00E-09	8.71E-09

Tabelle 6-11: Berechnungsergebnis in Form einer Zusammenstellung der Immission für unterschiedliche Datenverkehrs-Situationen in den betrachteten Messpositionen MP1 bis MP5.

### 6.4.1.2 Messtechnische Immissionsbestimmung

Die Messungen wurden an fünf Positionen rund um das Gebäude an dem die Access Points montiert sind durchgeführt. Abbildung 6-35 zeigt die fünf unterschiedlichen Messpositionen mit der verwendeten Messsonde, der jeweilige Access Point auf den unter Umständen direkte Sicht besteht ist mittels eines roten Kreises gekennzeichnet. Zwei der insgesamt fünf Messpositionen lagen im Stiegenhaus zweier verschiedener Häuser, wobei bei MP2 direkte Sicht zur Sektorantenne (AP2) bestand und bei MP3 direkte Sicht zu dem Rundstrahler (AP1). MP 4 hatte keine direkte Sicht auf einen der Access Points.

Die Messungen erfolgten grundsätzlich im Zero Span Modus des Spektrumanalysators mit RMS Detektor und bei 100 kHz Auflösebandbreite.



**Abbildung 6-35:** Messposition MP1 bis MP5. Messposition 2 und 3 befanden sich im Stiegenhaus zweier Häuser, MP2 mit Sicht auf den Access Point 2 (Sektorantenne) und MP3 mit Sicht auf den Access Point 1 (Rundstrahler).

Tabelle 6-12 fasst die gemessenen und bezüglich der Auflösebandbreite korrigierten Burst-Spitzenwerte in den Messpositionen MP1 bis MP5 zusammen.

Messposition	Höhe [cm]	Messwert S [mW/m <sup>2</sup> ]	räumlicher Mittelwert S [mW/m <sup>2</sup> ]
		AP	AP
MP1	75	<b>0.00018</b>	0.00020
	100	<b>0.00016</b>	
	125	<b>0.00020</b>	
	150	<b>0.00014</b>	
	175	<b>0.00032</b>	
MP2	75	<b>0.00032</b>	0.00044
	100	<b>0.00023</b>	
	125	<b>0.00044</b>	
	150	<b>0.00071</b>	
	175	<b>0.00051</b>	
MP3	75	<b>0.00103</b>	0.00129
	100	<b>0.00064</b>	
	125	<b>0.00179</b>	
	150	<b>0.00143</b>	
	175	<b>0.00158</b>	
MP4	75	<b>0.00093</b>	0.00096
	100	<b>0.00095</b>	
	125	<b>0.00090</b>	
	150	<b>0.00102</b>	
	175	<b>0.00101</b>	
MP5	75	<b>0.00122</b>	0.00099
	100	<b>0.00099</b>	
	125	<b>0.00071</b>	
	150	<b>0.00074</b>	
	175	<b>0.00130</b>	

Tabelle 6-12: Messergebnisse (Burst-Spitzenwerte) in den Messpositionen MP1bis MP5.

#### 6.4.2 Vergleich von numerischer Berechnung und Messung

Da die Messungen im Realbetrieb durchgeführt wurden und aufgrund der praktischen Unüberschaubarkeit des Szenarios sowie der nicht exakten Nachbildbarkeit des Szenarios mit Wireless Insite ist ein direkter Vergleich von Mess- und Berechnungsergebnissen hier nur schwer zu bewerkstelligen. Die geringsten Abweichungen zur Simulation ist im Messpunkt MP3 (ca. 5dB). Unter der Voraussetzung, dass die Access Points die maximal zulässige Sendeleistung von 100 mW EIRP nicht überschreiten, sind die Umgebungsbeschaffenheit des Szenarios und die Möglichkeit, dass andere, nicht sichtbare Quellen (z.B., Clients in der Umgebung der Messpositionen) zur Immission beitragen, denkbare Gründe für die deutlich größeren Abweichungen (bis zu ca. 40 dB) in den anderen Messpositionen.

### 6.4.3 Immissionsbeurteilung im Hinblick auf die Grenzwerte

Unter Beachtung der Ausführungen in Kapitel 5.1.5 hinsichtlich der normgerechten Interpretation von räumlich und zeitlich gemittelten Immissionswerten wird auch für die hier untersuchten Szenarien veranschaulicht, dass die **typisch** zu erwartenden WLAN Immissionen um acht Zehnerpotenzen **deutlich unterhalb dem Referenzwerte** nach [16] liegen.

Höhere Werte können naturgemäß bei starker Annäherung an die Antennen erreicht werden, jedoch werden auch in diesem Fall (unter realistischen Annahmen) die Referenzwerte bzw. Basisgrenzwerte nach [16] nicht überschritten (vgl. hierzu Kapitel 5.1.5).

### 6.4.4 Vergleich der Immissionswerte mit bisher publizierten Daten

Ein Vergleich der hier ermittelten Immissionswerte mit anderen publizierten Daten hinsichtlich Outdoor WLAN-Messungen ([9],[18]) zeigt, dass die hier (unter realistischen Bedingungen) ermittelten Ergebnisse um mehrere Größenordnungen unterhalb der in [9],[18] angegebenen (in [18] als worst case bezeichneten) Werte liegen. Gründe für die Abweichungen zu den in [18] publizierten Daten können aufgrund der dort praktisch nicht dokumentierten Messmethode keine genannte werden. Die Unterschiede zu den in [9] angeführten Immissionswerten begründen sich hauptsächlich durch die Tatsache, dass dort teilweise in (unrealistisch) geringen Entfernungen zu Außenantennen gemessen wurde. Weiters wurde in [9], soweit aus dem Dokument nachzuvollziehen, zumindest teilweise von Access Points mit wesentlich mehr als 100 mW EIRP ausgegangen (vgl. dazu auch [1]). Bei Angaben relativ zu Referenz- bzw. Grenzwerten ist dabei weiters zu beachten, dass in einigen Arbeiten lokale Burst-Spitzenwerte mit den Referenz- bzw. Grenzwerten verglichen werden, was nach den meisten Grenzwert definierenden Dokumenten (z.B. [16]) nicht korrekt ist (zeitliche und räumliche Mittelung!).

### 6.4.5 Mögliche Maßnahmen zur Immissionsminderung

Aufgrund der großen Distanz zu den umliegenden Gebäuden scheint eine Immissionsminderung nur durch Sendeleistungsreduktion möglich zu sein. Da die Antennen der beiden Access Points am Dach zugänglich sind (zumindest für Bewohner des Hauses, vgl. Abbildung 6-30), wäre die Montage am Dach des Aufbaus im obersten Stock sinnvoll, da dann zumindest ein direkter Zugang bis unmittelbar vor die Antennen nicht möglich ist. Eine Anbringung von Hinweisschildern, wäre im jetzigen Zustand sinnvoll.

## 7 CeBit 2006

Die geplanten Immissionsmessungen in einer mit WLAN versorgten Halle auf der CeBit 2006 in Hannover wurden durchgeführt. Ziel dieser Messungen war es, die von WLAN-Geräten stammenden Immissionen mit den Immissionen anderer gängiger Funkdienste zu vergleichen. Dazu wurden drei Messpositionen in Halle 26 (Ausstellungshalle der Mobilfunkbetreiber) untersucht, in denen die Immissionen im Frequenzbereich von 80 MHz bis 2.485 GHz mittels quasi-isotroper Messung in 175 cm Höhe über dem Boden gemessen wurden. Die betrachteten Messpositionen wurden dabei nicht zufällig gewählt, sondern bewusst mit Sichtverbindung zu den nächstgelegenen an der Deckenkonstruktion montierten Access Point Antennen gewählt (möglichst im Hauptstrahlrichtung). Abbildung 7-1 zeigt eine Außenaufnahme der Halle 26 sowie einen Hallengrundriss mit den installierten Access Points sowie die genutzten Kanäle. Hinsichtlich der von anderen Funkdiensten verursachten Immissionen sind die gewählten Messpositionen als „zufällig ausgewählt“ zu betrachten. Weiters bestand während den Messungen keine Kontrolle bzw. Information bezüglich der Positionen etwaiger aktiver WLAN Clients.



Abbildung 7-1: Halle 26 von außen (links) und Hallengrundriss mit Access Point und genutzten Kanälen (rechts).

Abbildung 7-2 zeigt die Aufstellung der Messantenne in den Messpositionen. Abbildung 7-3, Abbildung 7-4 und Abbildung 7-5 zeigen die Immissionsfrequenzspektren in den drei Messpositionen.



**Abbildung 7-2:** Messpositionen (MP1, MP2 und MP3) in Halle 26. MP1 direkt bei einem Eingang, MP2 auf der Rückseite eines Messestandes und MP3 direkt bei einem Infoschalter eines Mobilfunkbetreibers.

Nicht jede Abbildung zeigt ein kontinuierliches Spektrum da in Frequenzbereichen ohne am Spektrumanalysator sichtbare Immission keine Daten aufgezeichnet wurden. Aus diesem Grund ist in Abbildung 7-3 und Abbildung 7-4 zwischen 960 MHz und 1700 MHz, zwischen 1,9 GHz und 2,1 GHz und zwischen 2,2 GHz und 2,4 GHz eine Lücke. In Abbildung 7-5 ist der Bereich zwischen 960 MHz und 1700 MHz aufgezeichnet worden und darum auch dargestellt.

Alle Messungen wurden mit einer Auflösebandbreite von 100 kHz mit RMS Detektor und im MAXHOLD Betrieb (ca. 30 Sekunden Beobachtungszeit) durchgeführt. Um einen anschaulichen Vergleich der Immissionen der unterschiedlichen Funkdienste zu ermöglichen, sind die in Abbildung 7-3, Abbildung 7-4 und Abbildung 7-5 dargestellten Frequenzspektren bezüglich ihrer spektralen Spitzenwerte entsprechend dem Verhältnis von Auflösebandbreite und der unterschiedlichen Signalbandbreiten der unterschiedlichen Funkdienste korrigiert (durch einfache Ordinaten-Verschiebung der Messkurve in den einzelnen Frequenzintervallen). Deutlich zu sehen sind die Rundfunksignale, der Uplink (890-915MHz) und der Downlink (935-960MHz) des GSM 900 Frequenzbandes, der Uplink (1710-1795MHz) und der Downlink (1805-1880MHz) des DCS 1800 Frequenzbandes, das DECT-Frequenzband (1880-1900MHz), UMTS (1,9-2,2GHz) und im Bereich von 2,4GHz – 2,485GHz das WLAN-Frequenzband. Zu UMTS ist zu bemerken, dass während der Messungen in den betrachteten Messpositionen keine messbaren (d.h. über der Rauschgrenze liegenden) Immissionen im Uplink-Frequenzbereich vorhanden waren. Ebenfalls nicht oder nur in nicht mess- bzw. zuordenbaren Ausmaß waren Immissionen von Bluetooth vorhanden, wobei hier angemerkt werden muss, dass eine klare Unterscheidung zwischen Bluetooth und WLAN Immissionen nur anhand der Erscheinungsform des Spektrums (in MAXHOLD aufgezeichnet) getroffen werden konnte. Die als WLAN-Immissionen ausgewiesenen Immissionsanteile wurden aus den gemessenen, für WLAN typischen Spektren auf spezifizierten WLAN-Kanälen berechnet. Zwischen diesen WLAN-Kanälen liegende, eventuell von Bluetooth verursachte Spektralanteile wurden während der Messungen nicht festgestellt. Nicht ausgeschlossen werden kann allerdings, dass zeitlich kurz auftretende Bluetooth Anteile innerhalb der WLAN-Kanäle lagen, daher von WLAN „überdeckt“ wurden und daher nicht identifiziert werden konnten. Wenn solche „verdeckten“ Bluetooth Immissionen vorhanden waren, lagen diese jedoch, hinsichtlich ihrer maximalen Spitzenwerte mit Sicherheit unterhalb oder höchstens in der gleichen Größenordnung

wie die WLAN-Spitzenwerte. Andernfalls hätten „Bluetooth“-Spitzen innerhalb der WLAN-Spektren auffallen müssen.

Der Vergleich der Immissionen der unterschiedlichen Funkdienste in den betrachteten Messpositionen zeigt, dass die WLAN-Spitzenimmissionswerte, je nach Messposition, etwa im Bereich ( $\pm 20$  dB) der anderen Funkdienste wie Rundfunk, GSM900, DCS1800, UMTS und DECT liegen. Da obige Abbildungen mit MAXHOLD gemessen wurden, ist im Hinblick auf die mittleren Immissionen jedoch zu bedenken, dass die in den Abbildungen dargestellten WLAN-Immissionswerte entsprechend dem tatsächlich auftretenden effektiven Duty Cycles zu reduzieren sind, während beispielsweise die gemessenen Rundfunk-Immissionen kontinuierlich vorliegen. Auch bei GSM900 und DCS1800 liegen im Downlink-Bereich kontinuierliche Immissionen, zumindest durch die BCCHs vor. Hinsichtlich der teilweise relativ hohen Immissionen im Uplink von GSM900 und DCS1800 wird angemerkt, dass diese die tatsächliche zeitlich gemittelte Immissionssituation wahrscheinlich deutlich überschätzen, da sie von nahe den Messpositionen befindlichen einzelnen Mobiltelefonen (nur 12,5% Duty Cycle) verursacht werden können. In diesem Sinne müssen auch die in den Tabellen 7-1 bis 7-3 zusammengefassten Immissionswerte bzw. Verhältnisse relativiert werden.

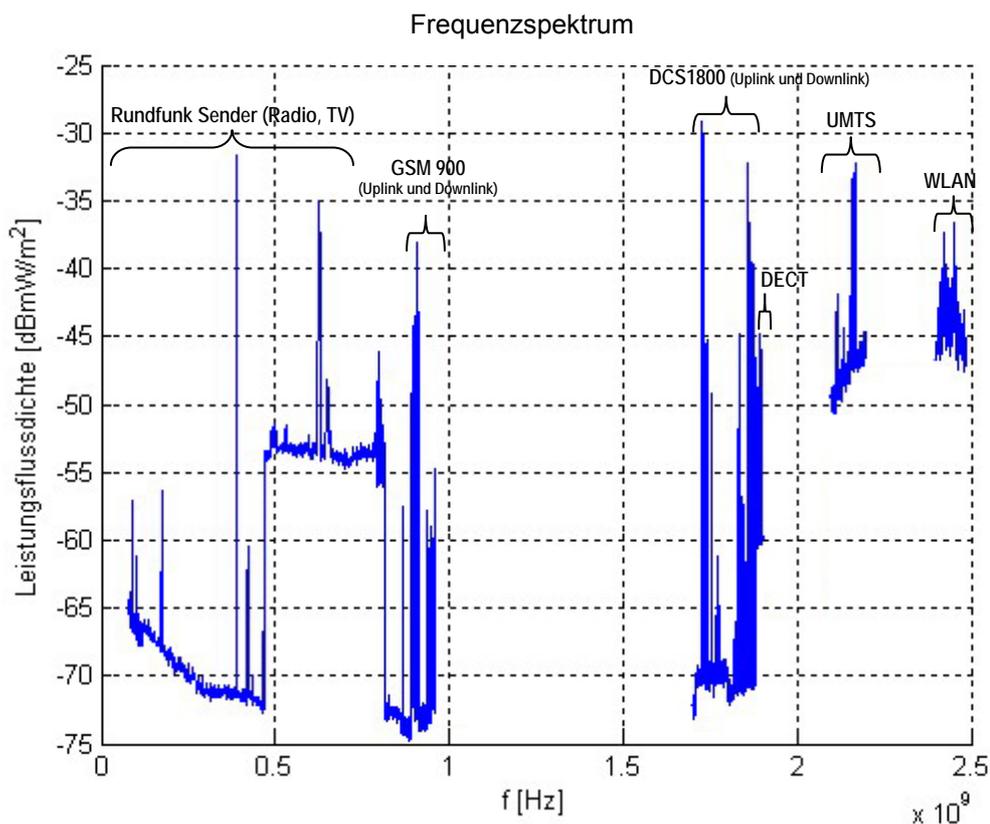
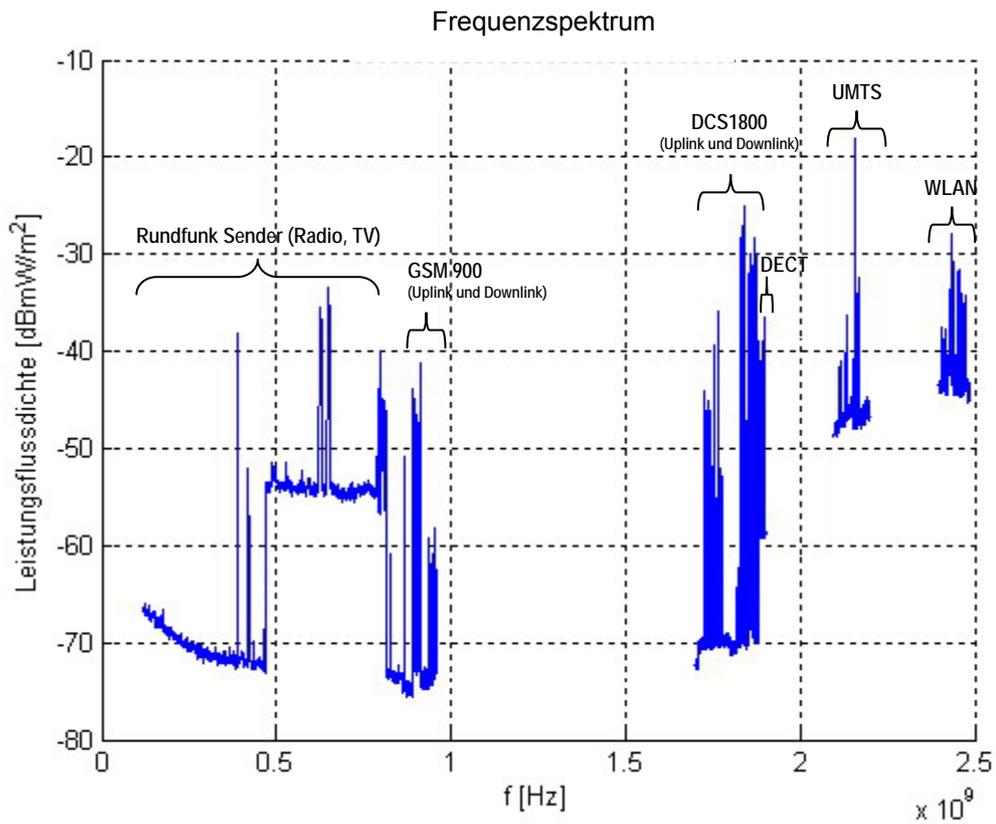
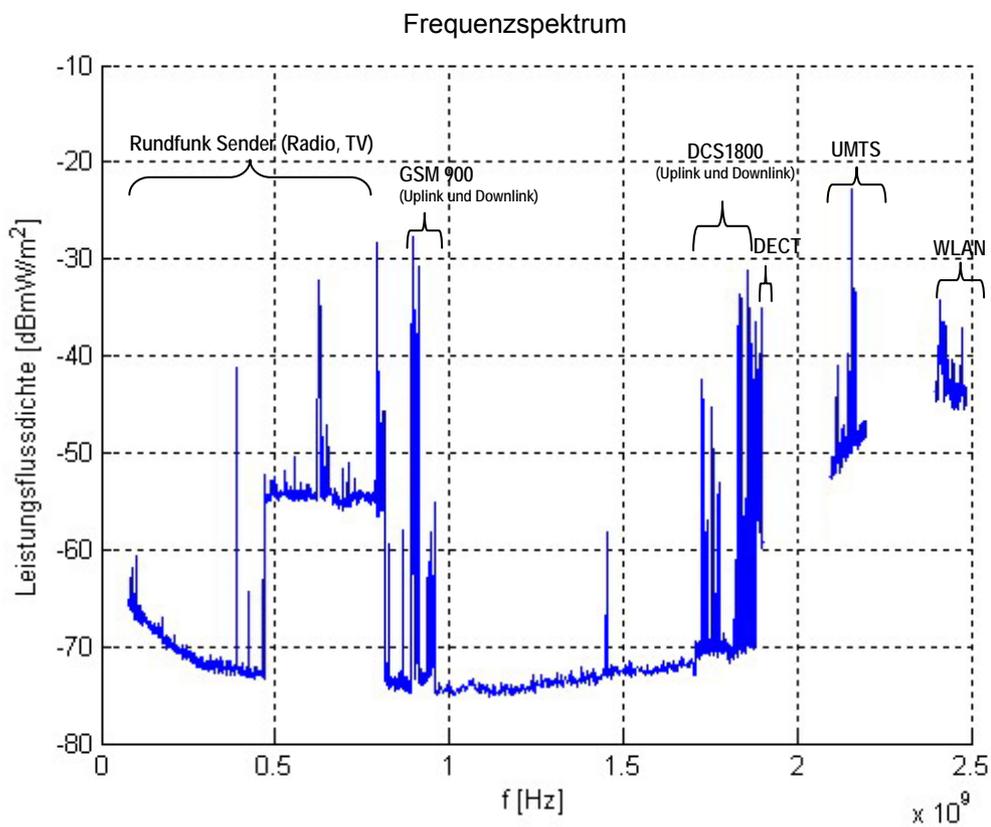


Abbildung 7-3: Frequenzspektrum von 0 bis 2.5GHz am Messpunkt 1 in Halle 26.



**Abbildung 7-4:** Frequenzspektrum von 0 bis 2.5GHz am Messpunkt 2 in Halle 26.



**Abbildung 7-5:** Frequenzspektrum von 0 bis 2.5GHz am Messpunkt 3 in Halle 26.

Die folgenden Tabellen (Tabelle 7-1, Tabelle 7-2 und Tabelle 7-3) zeigen die einzelnen Beiträge aufgeschlüsselt nach Diensten bezogen auf den jeweiligen der Frequenz entsprechenden Grenzwert, sowie den prozentuellen Anteil der Summe aller Beiträge für die drei untersuchten Messpunkte. Für WLAN wurden jeweils die Immissionen für drei effektive Duty Cycles von 20%, 50% und 80% angegeben. Die in den Tabellen für GSM 900 und DCS 1800 angegebenen Werte verstehen sich als auf Volllast hochgerechnete Immissionswerte, d.h. diese Werte sind mit den WLAN-Immissionen mit 80% effektivem Duty Cycle (näherungsweise Volllast bei WLAN) vergleichbar. Hinsichtlich der Immissionsanteile von GSM900 und DCS1800 muss an dieser Stelle angemerkt werden, dass die angegebenen Werte die tatsächlich vorliegende Situation wahrscheinlich überschätzt, da die in den Tabellen dargestellten Werte auf MAXHOLD Messungen basieren. Ein einzelnes Mobiltelefon (im Sprechmodus mit maximal 12,5% effektivem Duty Cycle) in der Nähe der Messposition kann daher zu den in den Tabellen angeführten relativ hohen Uplink-Immissionsanteilen führen. Diese Werte würden nur dann Gültigkeit besitzen, wenn gleichzeitig 8 Gespräche auf dem jeweiligen Frequenzkanal mit gleicher Sendeleistung und in ähnlicher (hinsichtlich der Wellenausbreitung) Relativposition zum Messpunkt stattfänden. Die in den Tabellen angegebenen Werte für den Uplink von GSM900 und DCS1800 stellen daher, für die vorliegende Situation während der Messungen eine theoretische Obergrenze dar. Tatsächlich werden die zugehörigen, zeitlich gemittelten Immissionswerte zwischen 12.5% und 100% der angegebenen Werte liegen.

<b>Messpunkt 1:</b>	<b>% vom</b>	<b>% von</b>	<b>% vom</b>	<b>% von</b>	<b>% vom</b>	<b>% von</b>
<b>Dienst</b>	<b>Grenzwert</b>	<b>Summe</b>	<b>Grenzwert</b>	<b>Summe</b>	<b>Grenzwert</b>	<b>Summe</b>
Rundfunk	1.37E-07	0.067	1.37E-07	0.067	1.37E-07	0.066
TV	2.21E-05	10.792	2.21E-05	10.772	2.21E-05	10.708
GSM 900 (uplink)	2.31E-05	11.282	2.31E-05	11.261	2.31E-05	11.194
GSM 900 (downlink)	1.74E-06	0.849	1.74E-06	0.848	1.74E-06	0.843
DCS 1800 (uplink)	8.98E-05	43.798	8.98E-05	43.718	8.98E-05	43.458
DCS 1800 (downlink)	2.62E-05	12.762	2.62E-05	12.739	2.62E-05	12.663
DECT	1.77E-06	0.863	1.77E-06	0.861	1.77E-06	0.856
UMTS	3.08E-06	1.501	3.08E-06	1.498	3.08E-06	1.489
Summe aller sonstigen Funkanwendungen unterschiedlicher Frequenzen	3.68E-05	17.962	3.68E-05	17.929	3.68E-05	17.823
WLAN	<b>Duty Cycle 20%</b>		<b>Duty Cycle 50%</b>		<b>Duty Cycle 80%</b>	
CH 1	6.28E-08	0.031	1.57E-07	0.077	2.51E-07	0.122
CH 5	7.61E-08	0.037	1.90E-07	0.093	3.04E-07	0.147
CH 9	8.94E-08	0.044	2.23E-07	0.109	3.58E-07	0.173
CH 13	2.36E-08	0.012	5.90E-08	0.029	9.43E-07	0.457
<b>SUMME WLAN</b>	<b>2.52E-07</b>	<b>0.123</b>	<b>6.30E-07</b>	<b>0.307</b>	<b>1.86E-06</b>	<b>0.899</b>
<b>SUMME</b>	<b>2.05E-04</b>		<b>2.05E-04</b>		<b>2.07E-04</b>	

Tabelle 7-1: Prozentuelle Auflistung der unterschiedlichen im Frequenzspektrum vorkommenden Dienste für Messpunkt 1.

<b>Messpunkt 2:</b>	% vom	% von	% vom	% von	% vom	% von
<b>Dienst</b>	<b>Grenzwert</b>	<b>Summe</b>	<b>Grenzwert</b>	<b>Summe</b>	<b>Grenzwert</b>	<b>Summe</b>
TV	8.42E-05	9.001	8.42E-05	8.984	8.42E-05	8.968
GSM 900 (uplink)	3.30E-05	3.527	3.30E-05	3.520	3.30E-05	3.514
GSM 900 (downlink)	1.30E-06	0.139	1.30E-06	0.139	1.30E-06	0.139
DCS 1800 (uplink)	3.92E-05	4.187	3.92E-05	4.179	3.92E-05	4.171
DCS 1800 (downlink)	6.65E-04	71.110	6.65E-04	70.978	6.65E-04	70.846
DECT	8.81E-06	0.942	8.81E-06	0.941	8.81E-06	0.939
UMTS	3.50E-05	3.739	3.50E-05	3.732	3.50E-05	3.725
Summe aller sonstigen Funkanwendungen unterschiedlicher Frequenzen	6.76E-05	7.229	6.76E-05	7.216	6.76E-05	7.202
WLAN	Duty Cycle 20%		Duty Cycle 50%		Duty Cycle 80%	
CH 1	7.13E-08	0.008	1.78E-07	0.019	2.85E-07	0.030
CH 5	6.52E-07	0.070	1.63E-06	0.174	2.61E-06	0.278
CH 9	2.86E-07	0.031	7.15E-07	0.076	1.14E-06	0.122
CH 13	1.56E-07	0.017	3.89E-07	0.041	6.22E-07	0.066
<b>SUMME WLAN</b>	<b>1.16E-06</b>	<b>0.124</b>	<b>2.91E-06</b>	<b>0.311</b>	<b>4.66E-06</b>	<b>0.496</b>
<b>SUMME</b>	<b>9.35E-04</b>		<b>9.37E-04</b>		<b>9.39E-04</b>	

Table 7-2: Prozentuelle Auflistung der unterschiedlichen im Frequenzspektrum vorkommenden Dienste für Messpunkt 2.

<b>Messpunkt 3:</b>	% vom	% von	% vom	% von	% vom	% von
<b>Dienst</b>	<b>Grenzwert</b>	<b>Summe</b>	<b>Grenzwert</b>	<b>Summe</b>	<b>Grenzwert</b>	<b>Summe</b>
Rundfunk	3.18E-08	0.005	3.18E-08	0.005	3.18E-08	0.005
	4.30E-08	0.007	4.30E-08	0.007	4.30E-08	0.007
TV	1.07E-04	16.660	1.07E-04	16.651	1.07E-04	16.632
GSM 900 (uplink)	3.84E-04	59.891	3.84E-04	59.858	3.84E-04	59.791
GSM 900 (downlink)	1.17E-06	0.182	1.17E-06	0.182	1.17E-06	0.182
DCS 1800 (uplink)	7.75E-06	1.209	7.75E-06	1.209	7.75E-06	1.207
DCS 1800 (downlink)	5.37E-05	8.376	5.37E-05	8.371	5.37E-05	8.361
DECT	1.38E-05	2.152	1.38E-05	2.151	1.38E-05	2.148
UMTS	1.26E-05	1.962	1.26E-05	1.961	1.26E-05	1.959
Summe aller sonstigen Funkanwendungen unterschiedlicher Frequenzen	6.09E-05	9.501	6.09E-05	9.495	6.09E-05	9.485
WLAN	Duty Cycle 20%		Duty Cycle 50%		Duty Cycle 80%	
CH 1	1.55E-07	0.024	3.88E-07	0.060	6.20E-07	0.097
CH 5	8.48E-08	0.013	2.12E-07	0.033	3.39E-07	0.053
CH 9	3.79E-08	0.006	9.46E-08	0.015	1.51E-07	0.024
CH 13	8.11E-08	0.013	2.03E-08	0.003	3.24E-07	0.051
<b>SUMME WLAN</b>	<b>3.59E-07</b>	<b>0.056</b>	<b>7.14E-07</b>	<b>0.111</b>	<b>1.44E-06</b>	<b>0.224</b>
<b>SUMME</b>	<b>6.41E-04</b>		<b>6.41E-04</b>		<b>6.42E-04</b>	

Table 7-3: Prozentuelle Auflistung der unterschiedlichen im Frequenzspektrum vorkommenden Dienste für Messpunkt 3.

Die Ergebnisse zeigen, dass unter den gegebenen Bedingungen die Immissionsbeiträge von WLAN, selbst bei hohem Datenverkehrsaufkommen (effektiver Duty Cycle 80%), nicht mehr als ca. 1% der Gesamtmission im Frequenzbereich zwischen 30 MHz und 3 GHz ausmachen.

## 8 WLAN-IMMISSIONEN IM VERGLEICH MIT DEN IMMISSIONEN ANDERER FUNKDIENSTE

Wie die voranstehenden Kapitel gezeigt haben, sind die von WLAN Installationen in öffentlichen Bereichen verursachten elektromagnetischen Immissionen relativ gering. Selbst unter ungünstigen Annahmen (nahe WLAN-Geräten) betragen räumliche und zeitliche Spitzenwerte von WLAN-Immissionen kaum mehr als ca. 1% des Referenzwertes nach EU-Ratsempfehlung 1999/519/EC. Unter üblichen Bedingungen liegen die zeitlich gemittelten WLAN-Immissionen mehrere Zehnerpotenzen unterhalb dieses Wertes.

Im Hinblick auf ein Gesamtbild über die alltäglich zu erwartenden HF-Immissionen erscheint ein Vergleich von WLAN-Immissionen mit den Immissionen anderer Funkdienste interessant, wenngleich ein direkter Vergleich von Messergebnissen aus der Literatur, aufgrund unterschiedlicher verwendeter Messprotokolle und Beurteilungsmethoden teilweise schwierig ist.

Aus den Ergebnissen eines umfangreichen Projektes [20], im Zuge dessen im Zeitraum 2001-2003 an insgesamt 895 Einzelpunkten in Baden-Württemberg die HF-Immissionen im gesamten derzeit für Funkanwendungen interessanten Frequenzbereich durchgeführt wurden, lässt sich erkennen, dass die durchschnittlichen HF-Immissionen (Summenwert aller Funkdienste) bei ca. 1% des oben genannten Referenzwertes liegen. Diese grenzwertbezogene Gesamtimmission wird dabei zu 15% von UKW-Sendern, zu 18% von TV-Sendern, zu 47% von Langwellen, Mittelwellen und Kurzwellensendern (LMK) und zu 20% von Mobilfunksendern (GSM900 und GSM1800) verursacht.

In der Nähe zu Sendeanlagen können naturgemäß auch wesentlich höhere, als die oben genannten durchschnittlichen Immissionen auftreten. Insbesondere können sich die Verhältnisse der Beiträge der einzelnen Funkanwendungen zueinander stark verschieben, je nach dem, welchem Sendertyp man sich nähert. Weitere umfassende Daten bezüglich der Exposition der Bevölkerung durch UMTS-Sendeanlagen und digitale Rundfunk- und TV-Sender dürfen aus [21] und [22] erwartet werden, liegen jedoch derzeit leider noch nicht vor.

In einer vom Schweizer Bundesamt für Kommunikation (BAKOM) 2001 durchgeführten Messkampagne, bei der die Mobilfunkimmissionen in der Umgebung von 13 GSM-Senderstandorten erfasst wurden, ergaben sich Immissionswerte (Summenimmission aller Netzbetreiber, hochgerechnet auf maximale Anlagenauslastung) bis zu ca.  $40 \text{ mW/m}^2$  (entspricht 0,4% des Referenzwertes). In den meisten Fällen lagen die Immissionen jedoch im Bereich zwischen  $1 \text{ mW/m}^2$  und  $10 \text{ mW/m}^2$  (entsprechend 0.01% bis 0.1% des Referenzwertes).

Will man die im Rahmen des vorliegenden Vorhabens ermittelten Immissionsdaten für WLAN mit diesen, oben genannten Immissionswerten anderer Funkdienste vergleichen, so gilt es zunächst fest zu halten, dass es sich bei den oben angeführten Immissionen anderer Funkdienste um Immissionen von fest installierten (ortsfesten) Anlagen handelt. Die oben gemachten Angaben für den Mobilfunk beziehen sich beispielsweise nur auf die Immissionen, verursacht durch Basisstationen und nicht durch Mobiltelefone, wenngleich es aus physikalischer Sicht sehr leicht möglich ist, dass die Exposition zufolge eines in unmittelbarer Nähe betriebenen Mobiltelefons (eine andere telefonierende Person in der Umgebung) wesentlich höher ist, als die Exposition zufolge der nächstgelegenen Basisstation. In diesem Sinne mit den oben zitierten Daten vergleichbar sind daher nur die WLAN-Immissionen durch öffentliche Access Points und nicht die Immissionen durch Clients in der Umgebung der

betrachteten Immissionsorte. Unter diesem Gesichtspunkt können aus den Mess- und Berechnungsergebnissen der vorliegenden Arbeit für die in Kapitel 3.2 (Flughafen) und in Kapitel 4 (Outdoor) betrachteten Szenarien maximale Immissionswerte (zeitliche Spitzenwerte) im Bereich von ca.  $1 \mu\text{W}/\text{m}^2$  (großräumige Outdoor-Szenarien mit Access Point Antennen auf Hausdächern) bis ca.  $1 \text{mW}/\text{m}^2$  (großräumige Indoor-Szenarien mit Access Point an der Decke) abgeleitet werden. Im Vergleich mit den oben angeführten, beispielsweise von GSM-Basisstationen verursachten Immissionswerten ergeben sich WLAN-Immissionen um ca. ein Faktor  $\geq 40$  geringer als vergleichbare Immissionen von GSM. Dies ist auch insofern plausibel, als die maximale Sendeleistung von WLAN Access Points (100 mW EIRP, bei IEEE 802.11 b,g) um eben zirka einen solchen Faktor geringer ist, als die typische Sendeleistung von vergleichbaren (den innerstädtischen Bereich versorgenden) Mobilfunk-Basisstationen (üblicherweise einige Watt). Der Vergleich mit anderen Funkdiensten auf Basis der Daten von [20] ergibt damit Faktoren von ca.  $\geq 35$ ,  $\geq 30$  und  $\geq 95$  zwischen den erhobenen WLAN-Immissionen und den Immissionen verursacht von TV-, UKW- und LMK-Sendern.

Ausnahmen können WLAN-Szenarien darstellen, bei denen eine unmittelbare Annäherung an den Access Point (bis auf unter 1 m) möglich ist, wie dies in Kapitel 3.1 am Beispiel eines kleinräumigen Indoor Szenarios mit äußerst ungünstig platziertem Access Point gezeigt ist. In solchen Fällen können die maximalen, von WLAN verursachten Immissionswerte lokal den Bereich von ca.  $100 \text{mW}/\text{m}^2$  (entsprechend 1% des Referenzwertes), oder sogar etwas darüber erreichen und damit wesentlich höher als die Immissionen anderer Funkdienste sein.

## 9 LITERATUR

- [1] IEEE Std 802.11 -1999, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications
- [2] IEEE Std 802.11a -1999, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, High -speed Physical Layer in the 5 GHz Band
- [3] IEEE 802.11b -1999, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, Higher -Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band
- [4] IEEE 802.11g -1999, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, Amendment 4: Further Higher Data rate Extension in the 2.4 GHz Band
- [5] IEEE 802.11h - 2003, Part 11: Wireless MAC and PHY Specifications - Spectrum and Transmit Power Management Extensions in the 5 GHz Band in Europe 2003
- [6] Büllingen F, Gries C-I, Stamm P: Der Markt für Public Wireless LAN in Deutschland; WIK Diskussionsbeiträge, Wissenschaftliches Institut für Kommunikationsdienste, Mai 2004
- [7] <http://www.hotspots-in-deutschland.de/>
- [8] Nova-Institut für Ökologie und Innovation: Gutachten zur Feststellung der Belastung durch hochfrequente elektromagnetische Strahlung durch Funk-Netzwerke an der Universität Bremen; Sachverständigengutachten vom 22.10.2001.
- [9] Nova-Institut für Ökologie und Innovation: Gutachten zur Feststellung der Belastung durch hochfrequente elektromagnetische Strahlung durch Funk-Netzwerke an der Universität Bremen vom 29. Oktober 2004.  
<http://www.personalrat.uni-bremen.de/public/Thema%20Elektrosmog/GutachtenFunknetz2004.pdf>
- [10] Myhr Johan: Measurement method for the exposure to electromagnetic field strength from WLAN systems, Master of Science Thesis, Department of Electromagnetics, Chalmers University, Göteborg, Sweden 2004
- [11] Schmid G, Lager D, Preiner P; Bestimmung der Exposition bei Verwendung kabelloser Übermittlungsverfahren in Haushalt und Büro. Abschlussbericht, Juli 2005, Projekt im Rahmen des Deutschen Mobilfunk Forschungsprogramms,  
[http://www.emf-forschungsprogramm.de/forschung/dosimetrie/dosimetrie\\_abges/dosi\\_030\\_AB.pdf](http://www.emf-forschungsprogramm.de/forschung/dosimetrie/dosimetrie_abges/dosi_030_AB.pdf)
- [12] Wi-Fi Alliance Homepage; <http://www.wi-fi.org/>

- [13] Ihmig M, Kaindl M: Grundlagen von High-Speed Wireless LAN am Beispiel von IEEE 802.11; Hauptseminar Mobilkommunikation und Codierung; Vortrag vom 27.11.2003.
- [14] Rauscher C., Janssen V., Minihold R., „Grundlagen der Spektrumanalyse“, Rohde & Schwarz GmbH & Co KK, 1. Auflage, 2000
- [15] Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post: Reg TP MV 09/EMF/3 Messvorschrift für bundesweite EMVU-Messreihen der vorhandenen Umgebungsfeldstärken;  
<http://www.bundesnetzagentur.de/media/archive/571.pdf>
- [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] Kramer A, Kuehn S, Lott U, Kuster N; Assessment of human exposure by electromagnetic radiation from wireless devices in home and office environment. Platform Presentation at the BioEM 2005, June 20.-24., 2005, Dublin, Ireland, Abstract Book pp. 29-31
- [18] Ökotest, Ausgabe November 2002: WLAN-Funkanlagen: ‚Es hat gefunkt‘  
<http://www.oekotest.de/cgi/ot/otqs.cgi?suchtext=&doc=28851&pos=1&splits=0:1639:3051:4587:6424>
- [19] Baudirektion des Kantons Zürich, Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft: Informationsblatt über Immissionen von DECT- oder WLAN-Installationen  
[http://www.baugesuche.zh.ch/internet/bd/bd\\_gs/bd\\_bg/de/bewilligungen\\_und/ba\\_uverfahrensverordnung/1.SubContainerList.SubContainer1.ContentContainerList.0025.DownloadFile.pdf](http://www.baugesuche.zh.ch/internet/bd/bd_gs/bd_bg/de/bewilligungen_und/ba_uverfahrensverordnung/1.SubContainerList.SubContainer1.ContentContainerList.0025.DownloadFile.pdf)
- [20] Bochtler U., Eidher R., Wuschek M. 2003: Großräumige Ermittlung von Funkwellen in Baden-Württemberg. Ergebnisse des Funkwellenmessprojekts 2001-2003. <http://www2.lfu.baden-wuerttemberg.de/lfu/abt3/funkwellen/pdf/gesamt.pdf>
- [21] Bornkessel C., Schubert M., Wuschek M: Bestimmung der Exposition der Bevölkerung in der Umgebung von digitalen Rundfunk- und Fernsehsendern. Berichte zum Forschungsvorhaben im Rahmen des deutschen Mobilfunkforschungsprogramms: <http://www.emf-forschungsprogramm.de/forschung/dosimetrie>
- [22] Bornkessel C., Schubert M., Wuschek M: Bestimmung der realen Feldverteilung von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern in der Umgebung von UMTS-Sendeanlagen. Berichte zum Forschungsvorhaben im Rahmen des deutschen Mobilfunkforschungsprogramms: <http://www.emf-forschungsprogramm.de/forschung/dosimetrie>