Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/Masterarbeit ist in der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt und zugänglich.
http://www.ub.tuwien.ac.at

The approved original version of this diploma or master thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology.
http://www.ub.tuwien.ac.at/eng

AUSTRIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY
TOMORROW TODAY

# Analyse des Gefährdungspotentials elektromagnetischer Waffen auf den Menschen

DIPLOMARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

**Diplom-Ingenieur**

im Rahmen des Studiums

**Biomedical Engineering**

eingereicht von

**Alexander Preinerstorfer**
Matrikelnummer 0626120

an der
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Wien

Betreuer:
Univ. Dozent Dipl.-Ing. Dr. techn. Heinrich Garn
ObRat Dipl.-Ing. Dr. techn. Walter Ehrlich-Schupita
Mitwirkung:
Dipl.-Ing. Dr. techn. Georg Neubauer

Wien, TT.MM.JJJJ

(Unterschrift Verfasser) (Unterschrift Betreuer)

INHALT

**1 Einleitung ... 11**
1.1 Begriffe ... 12
1.2 Zielsetzung und Aufgabenstellung ... 14
**2 Bedrohungen durch beabsichtigte elektromagnetische Interferenz ... 15**
2.1 Analyse der relevanten Signale im Zeit- und Frequenzbereich ... 19
2.1.1 Schmalband Signale ... 20
2.1.2 Breitband Signale ... 21
2.1.3 Gedämpfte Sinusschwingung ... 22
2.1.4 Jammer ... 22
2.2 Technische Realisierung von HPEM Quellen ... 24
2.2.1 Grundlagen von HPM Quellen ... 25
2.2.2 Grundlagen von Breitband Quellen ... 28
2.2.3 Ausgewählte Beispiele von Störquellen ... 28
2.3 Dokumentierte Bedrohungen durch elektromagnetische Waffen ... 38
2.3.1 Dokumentierte Ereignisse im zivilen Bereich ... 38
2.3.2 Dokumentierte Vorfälle im militärischen Bereich ... 39
**3 Wirkungen elektromagnetischer Felder und Wellen auf den Menschen ... 41**
3.1 Bewertungsgrößen ... 42
3.2 Biologische Effekte ... 44
3.3 Richtlinien und Normen ... 48
3.3.1 ICNIRP 1998 ... 49
3.3.2 IEEE C95.1 - 2005 ... 53
3.3.3 NATO STANAG 2003 ... 55
3.3.4 Zusammenfassung der Grenzwerte gepulste Felder ... 55
**4 Expositionsbeurteilung der analysierten elektromagnetischen Felder ... 57**
4.1 Szenario A – Tragbare HPM Quelle innerhalb des Gebäudes ... 64
4.2 Szenario B – HPM Quelle außerhalb des Gebäudes ... 78
4.3 Szenario C – DS Quelle ... 86
4.4 Szenario D – UWB Quelle ... 89
4.5 Effekte auf aktive und passive Implantate ... 91
**5 Schutzmaßnahmen ... 93**
**6 Zusammenfassung ... 95**
**Anhang - Übersicht IEMI Quellen ... 97**
**Abkürzungsverzeichnis ... 101**
**Literaturverzeichnis ... 103**

## Kurzbeschreibung

Die vorliegende Diplomarbeit beschäftigt sich mit dem Gefährdungspotential elektromagnetischer Waffen, die von Kriminellen oder Terroristen zur absichtlichen elektromagnetischen Störung oder Zerstörung von elektrischen/elektronischen Komponenten eingesetzt werden können. Im Zuge von Angriffen mittels derartiger Systeme treten energiereiche elektromagnetische Felder auf, die zur Gefährdung des Menschen führen können. Um die potentielle Gefahr beurteilen zu können wird im Rahmen dieser Diplomarbeit eine Analyse der existierenden Systeme anhand aktueller Literatur durchgeführt und diese nach Signalform und Herstellungsaufwand eingeteilt. Es wird eine Übersicht über gängige Personenschutznormen und Richtlinien gegeben, damit etwaige nachteilige, gesundheitliche Auswirkungen auf den Menschen untersucht werden können. Ausgehend von diesen Untersuchungen werden realistische Szenarien abgeleitet, in denen Personen dem elektromagnetischen Feld verschiedener Systeme ausgesetzt sind. Mittels einer 3-D Simulationsumgebung werden numerische Simulationen durchgeführt, um eine mögliche Grenzwertüberschreitung festzustellen.

## Abstract

In this master thesis, the hazard potential of electromagnetic weapons is investigated. These systems can be used by criminals or terrorists to disturb or destroy electric/electronic components by means of intentional electromagnetic interference. In the course of such attacks, electromagnetic fields with high-energy are observed which could led to detrimental effects on humans. To assess the potential hazard, an analysis of existing systems is done according to the current literature. The systems are classified towards their signal shape and the effort to build them. An overview about standards and guidelines of electromagnetic exposure is given to determine if adverse health effects may occur. Based on these investigations, realistic scenarios are derived among persons who are exposed by different types of electromagnetic fields. An exposure evaluation is done, to verify a possible exceedance of exposure limits, by numeric simulations using a 3-D simulation environment.

## Danksagung

Mein größter Dank geht an Dr. Georg Neubauer für die Möglichkeit diese Diplomarbeit innerhalb der Austrian Institute of Technology GmbH (AIT) durchzuführen, für die fortdauernde Unterstützung und die unzähligen Diskussionen die mich schließlich ans Ziel geführt haben.

Mein Dank geht auch an Univ. Dozent Dr. Heinrich Garn, Dr. Walter Ehrlich-Schupita und Andreas Weinfurter für die Teilnahme an meiner Arbeit und den Vorschlägen zum Inhalt der Arbeit.

Bedanken möchte ich mich auch bei meinen Kollegen von Seibersdorf Laboratories GmbH, besonders bei DI Stefan Cecil der mir hilfreiche Tipps bei der Expositionsbewertung gegeben hat und bei Dr. Kurt Lamedschwandner der immer ein offenes Ohr hatte.

Ein herzliches Dankeschön meiner Familie die mir während meines Weges stets ermutigend zur Seite gestanden sind.

Außerdem möchte ich meiner Lebenspartnerin Kristina danke sagen. Nicht nur weil sie Teile dieser Arbeit Korrektur gelesen hat, sondern auch weil sie mir während meiner Studienzeit immer eine große Stütze war.

# 1 Einleitung

Elektromagnetische Kriminalität und elektromagnetischer Terrorismus stellen seit Jahren eine Bedrohung kritischer Infrastrukturen dar. Dokumentierte Vorfälle reichen von Störungen der Alarmanlagen in Banken, Manipulation von Geldspielautomaten, Unterbrechung der Kommunikation in IT-Netzwerken bis hin zur Störung von Telekommunikationsnetzwerken durch elektromagnetische Waffen. Angriffe dieser Art beruhen auf der missbräuchlichen Verwendung von elektromagnetischen Quellen, die ihre Energie in Form elektromagnetischer Felder und Wellen, entweder zielgerichtet über Antennen abgestrahlt oder leitungsgebunden abgeben. Projekte über elektromagnetische Bedrohungen bzw. elektromagnetische Waffen wurden in den letzten Jahren ursprünglich im militärischen Bereich durchgeführt und werden nun zunehmend im zivilen Bereich in Europa und in den USA durchgeführt.

Tabelle 1-1 gibt eine Übersicht über Waffentechnologien, die grob in vier Kategorien eingeteilt werden können. Elektromagnetische Waffen hier bei den sogenannten „nicht-letalen“ Waffen finden und dienen prinzipiell der Störung und/oder Zerstörung von elektronischem Equipment. Durch Veränderungen der Bedrohungen und der Kriegsführung im 20. und 21.Jahrhundert gab und gibt es Bestrebungen von militärischen Streitkräften zusätzlich zu den existierenden letalen Waffen, Waffen mit verringerter Letalität sowie nicht-letale Waffen zu entwickeln. (Giri D. V., 2004)

Laut NATO (2006) werden nicht – letale Waffen wie folgt definiert: *„Nicht-letale Waffen werden explizit dafür entworfen und entwickelt um Personen kampfunfähig zu machen, deren Angriffe abzuwehren oder Equipment mit minimalen Folgen für die Umgebung zu stören. Die Wahrscheinlichkeit eine Person zu töten oder dauerhaft zu schädigen muss dabei gering sein.“*

| Waffengattung | Letal | Nicht letal |
|---|---|---|
| Konventionell | Maschinengewehr, Sturmgewehr, Mörser, … | Tränengas, Taser, Kunststoffgeschoße, Sprays, … |
| Unkonventionell | Biologische Toxine, Chemische Kampfstoffe, … | Akustische Waffen, Laserwaffen, **Elektromagnetische Waffen**, … |

Tabelle 1-1 Waffentechnologie Matrix mit ausgewählten Beispielen (Giri, 2004)

Angriffe die mit elektromagnetischen Waffen durchgeführt werden können möglicherweise zu Überschreitung von Expositionsgrenzwerten und auch zu gesundheitlichen Schäden durch nicht-

ionisierende Strahlung[1] (NIR) führen. Die dabei ausgelösten biologischen Wirkungen im menschlichen Gewebe sind laut ICNIRP[2] vor allem einerseits Reizwirkungen, die im Frequenzbereich bis zu 10 MHz auftreten und andererseits auf thermische Effekte die im Frequenzbereich über 100 kHz auftreten, zurückzuführen (ICNIRP, 2010). Im Zuge dieser Diplomarbeit wurde eine umfangreiche, auf frei zugängliche Quellen beschränkte Literaturrecherche durchgeführt. Verwendet wurden unter anderem auch internationale Normen und Richtlinien die für die Expositionsevaluierung herangezogen wurden.

## 1.1 Begriffe

Dieses Unterkapitel dient dem Leser dazu einen schnellen Überblick von, in dieser Diplomarbeit oft verwendeten, Begrifflichkeiten und Fachausdrücke zu erhalten. Außerdem soll es einen kurzen Einstieg in die Materie der elektromagnetischen Kriminalität und deren Auswirkungen geben.

Nach IEC (2004) versteht man unter einer „*elektromagnetischen Störung*“ jedes elektromagnetische Phänomen welches eine Verschlechterung der Performance eines Gerätes, Equipments oder Systems verursacht. Zusätzlich wird „*elektromagnetische Interferenz*“[3] als Leistungseinbruch eines Gerätes, eines Übertragungskanals oder Systems bezeichnet, dass durch eine elektromagnetische Störung hervorgerufen wird.

Laut Radasky et al. (2004) wurde der Begriff „*absichtliche elektromagnetische Interferenz*“[4] 1999 im Rahmen eines IEEE[5] Symposiums wie folgt definiert und gilt als weithin akzeptiert: „*Absichtlich, bösartig generierte elektromagnetische Energie die zur Einkopplung von Rauschen oder Signalen in elektrische und elektronische Systeme führt. Dies bewirkt Unterbrechung, Störung oder Beschädigung dieser Systeme und wird zu terroristischen oder kriminellen Zwecken durchgeführt*.“

In Mansson (2008) wird deutlich darauf hingewiesen, dass gewisse Elemente der Gesellschaft, wie z.B. Kriminelle die Sicherheitssysteme umgehen wollen, Angriffe heimlich durchführen und keine Aufmerksamkeit auf sich lenken möchten. Mit elektromagnetischen Störquellen kann dieses Ziel erreicht werden, indem die abgegebene Strahlung zielgerichtet Grenzflächen wie Wände

[1] Nicht ionisierende Strahlung bezeichnet alle elektromagnetischen Strahlungen und Felder die nicht genügend Energie besitzen um in Stoffen eine Ionisierung auszulösen. Die Energie eines Photons wird hier mit unter 12 eV, einer Wellenlänge von über 100 nm und Frequenzen unter $3 \cdot 10^{15}$ Hz betrachtet (ICNIRP, 2010).

[2] ICNIRP – International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. ICNIRP ist eine Kommission die aus unabhängigen Forschern besteht und Richtlinien über mögliche Gefahren durch nicht ionisierende elektromagnetische Strahlung veröffentlicht. Weblink: http://www.icnirp.org, abgerufen am 15.11.2015

[3] Engl. Electromagnetic Interference (EMI)

[4] Engl. Intentional Electromagnetic Interference (IEMI)

[5] IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers, Weblink: https://www.ieee.org, abgerufen am 14.11.2015

oder Fenster durchdringen kann. Ausgelöste Störungen oder Zerstörungen an elektrischen/elektronischen Komponenten können durch den unsichtbaren Charakter der elektromagnetischen Strahlung und den raren Detektionssystemen möglicherweise gar nicht identifiziert werden. Denkbare Ziele sind laut Mansson Telekommunikation, Radio- und TV- Funknetze, Energieversorgungsnetze, Flugüberwachung oder IT-Systeme im Bankenwesen. (Mansson, 2008)

Auch in den Berichten FEMA (2005) und Katastrophenhilfe (2006) werden IEMI Quellen als Waffen angesehen, die für kriminelle und terroristische Zwecke eingesetzt werden. Dabei liegt der Unterschied zu geprüftem Equipment darin, dass diese Störquellen unabhängig von jeglichen gesetzlichen Anforderungen für elektrische Geräte betrieben werden und Grenzwerte der elektrischen Feldstärke um ein Vielfaches überschritten werden können. Damit ist die Möglichkeit gegeben, den Ausfall von nicht oder schlecht geschirmten elektrische Geräten herbeizuführen zu können.

Für die Beschreibung von „elektromagnetischen Hochleistungsquellen“, die die bedrohlichste Art von Quellen für IEMI Attacken darstellen, wird das Akronym HPEM[6] verwendet. Grundsätzlich können Signale von HPEM-Quellen über Antennen abgestrahlt oder leitungsgebunden in elektrische/elektronische Komponenten einkoppeln. Für die Betrachtungen in dieser Diplomarbeit werden nur Quellen analysiert, die ihre elektromagnetische Energie über Antennen abgeben. Diese werden in Folge als „*feldgeführt*“ bezeichnet. Hochleistungs-bedingungen sind gegeben, wenn der Spitzenwert der elektrischen Feldstärke 100 V/m oder äquivalent dazu die Leistungsdichte einer ebenen Welle bei Freiraumausbreitung einen Wert von 26,5 W/m$^2$ übersteigt (IEC, 2005). Dies bedeutet, dass durch HPEM-Signale übliche genormte Grenzwerte der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) von wenigen 10 V/m weit überschritten werden und dadurch elektronische Bauteilen zerstört werden können (Mansson, 2008).

Im Zusammenhang mit IEMI werden für HPEM wesentlich zwei Kategorien von Störsignalen in der Literatur beschrieben. Zum einen sind das „*Hochleistungsmikrowellen*“[7] die ihre gesamte elektromagnetische Energie in einem schmalen Band des Frequenzspektrums abgeben, zum anderen zählen dazu Pulse mit extrem kurzen Anstiegszeiten die ihre Energie in einem weiten Bereich des Frequenzspektrums verteilen, sogenannte „*Ultra Breitband Pulse*“[8] (Radasky & Savage, 2010).

Nach Abschluss der Beschreibung der elektromagnetischen Störquellen in Kapitel 2 wird überwiegend auf mögliche biologische Effekte durch diese eingegangen. Dazu werden Begrifflichkeiten wie thermische und nichtthermische Effekte im Anschluss erklärt.

[6] Engl. High Power Electromagnetics (HPEM)
[7] Engl. High Power Microwaves (HPM)
[8] Engl. Ultra-Wide Band Pulses (UWB)

## 1.2 Zielsetzung und Aufgabenstellung

Im Zuge eines elektromagnetischen Angriffes kann es bei Personen, die sich im Hauptstrahl der elektromagnetischen Waffen oder in der näheren Umgebung aufhalten möglicherweise zu gesundheitlich nachteiligen elektromagnetischen Expositionen kommen. Um diese Auswirkungen zu untersuchen müssen im ersten Schritt die bekannten elektromagnetischen Waffen erhoben und deren Eigenschaften wie zum Beispiel Signalform oder Intensität analysiert werden. Im zweiten Schritt ist es erforderlich eine Übersicht über einschlägige Personenschutznormen für elektromagnetische Felder (EMF) und deren Beurteilungskriterien zu analysieren. Anschließend werden Expositions-Szenarien ausgewählt und die Exposition, die durch elektromagnetische Waffen hervorgerufen wird, untersucht. Im Rahmen dieser Diplomarbeit sollen also folgende Punkte evaluiert werden:

- Untersuchung der bestehenden Störsignale (z.B.: HPM) nach Spektrum, Intensität, Signalform und Energie
- Übersicht über Werkzeuge elektromagnetischer Bedrohungen
- Analyse von Normen und anderen Dokumenten nach Beurteilungskriterien der Exposition elektromagnetischer Felder mit Schwerpunkt auf gepulste Felder
- Untersuchung von ausgewählten Expositionsszenarien der obengenannten elektromagnetischen Felder
    a. Identifikation der Exposition
    b. Auswahl der Expositions-Szenarien
    c. Analyse der Exposition (Grenzwert Evaluierung mittels Simulationen)

# 2 Bedrohungen durch beabsichtigte elektromagnetische Interferenz

Das folgende Kapitel dient der Beschreibung der elektromagnetischen Quellen, die für IEMI eingesetzt werden können. In der frei zugänglichen Literatur wurden solche Quellen bis jetzt zum Großteil nur im Hinblick auf Störung von elektrischem/elektronischem Equipment behandelt, Untersuchungen über Wirkungen der Signale der Waffen auf Menschen sind nur in sehr geringem Ausmaß veröffentlicht worden. Durch die teilweise stark überhöhten elektrischen und magnetischen Feldstärken sind aber auch biologische Wirkungen auf den menschlichen Körper nicht auszuschließen. Um eine Analyse dieses Gefährdungspotentials durch elektromagnetische Waffen auf den Menschen durchführen zu können müssen zuerst die wichtigsten Parameter dieser IEMI Signale ermittelt werden. Es sollen u.a. die erzeugte Signalform (Schmalband- bis Breitbandbereich), elektromagnetische Spektren, die abgegebene elektrische Leistung bzw. Energie, die elektrische Feldstärke und Repetitionsraten bei gepulsten Quellen eruiert werden. Um das Risiko eines möglichen Angriffs mittels IEMI Quelle einschätzen zu können, werden Bauart und Größe als auch Aufwand und Know – how zur Herstellung dieser Störquellen bestimmt.

Viele technische Systeme, Komponenten oder Anlagen können durch IEMI bedroht und damit Anwendungen dieser Gerätschaften wie z.B. die schnelle und sichere Übertragung von Daten gestört werden. Diese spielt in unserer heutigen Gesellschaft eine außerordentlich wichtige Rolle. Als Beispiel soll der Ausfall eines komplexen Kommunikationssystems wie z.B. einem IT-Netzwerk dienen. Dies kann durch Datenverlust schnell zu einer kritischen Situation führen. Durch die steigende Zahl von selbst gebastelten elektromagnetischen Waffen steigt das Risiko eines Angriffes auf den eben angeführten Bereich (Brauer, Sabath, & Haseborg, 2009).

Laut Granatstein et al. (2005) besitzen IEMI Signale verschiedene Eigenschaften. Zum Beispiel werden verschiedene Signalformen wie UWB Pulse und gedämpfte Sinussignale eingesetzt um verschiedene Gerätearten zu stören. Der Frequenzbereich dieser Signale reicht von einigen MHz bis zu wenigen GHz mit Spitzenwerten der elektrischen Feldstärke von typisch einigen V/m bis zu mehreren 100 kV/m und Spitzenleistungen bis in den Gigawatt Bereich.

In der Fachliteratur werden drei Störsignalformen am häufigsten diskutiert. Dies sind sehr kurze Pulse im Zeitbereich die ein breitbandiges Frequenzspektrum aufweisen, gepulste Sinussignale die ein schmalbandiges Frequenzspektrum besitzen und gedämpfte Sinussignale. Eine Sonderform stellen sogenannte Jamming Signale dar die in Kapitel 2.1.4 kurz behandelt werden. Schmalbandige Störer geben ihre gesamte Energie in einem sehr schmalen Frequenzbereich ab, wodurch sie in der Lage sind Geräte effektiv zu stören, die ihre Arbeitsfrequenzen oder Resonanzfrequenzen in diesem Bereich aufweisen. Den Gegensatz zu schmalbandigen Signalen stellen breitbandige Störsignale dar, die ihre gesamte Energie über einen weiten Frequenzbereich (meist mehrere Dekaden) abgeben. Dadurch können Geräte mit verschiedensten Arbeitsfrequenzen und Resonanzfrequenzen mit verhältnismäßig weniger Energie gestört werden. Gedämpfte Sinussignale

besitzen Eigenschaften von beiden vorangegangen Signalen. Einerseits geben sie den Großteil ihrer Energie bei einer gewissen Frequenz ab und andererseits wird die Restenergie rund um diesen Bereich verteilt um benachbarte Arbeits- oder Resonanzfrequenzen von elektrischen/elektronischen Komponenten zu erreichen. Zusätzlich sollte noch erwähnt werden, dass IEMI Angriffe nicht auf diese Signalformen beschränkt sind. Der Großteil anderer Störsignale kann aber aus eben angeführten Signalen zusammengesetzt werden (Mansson, 2008).

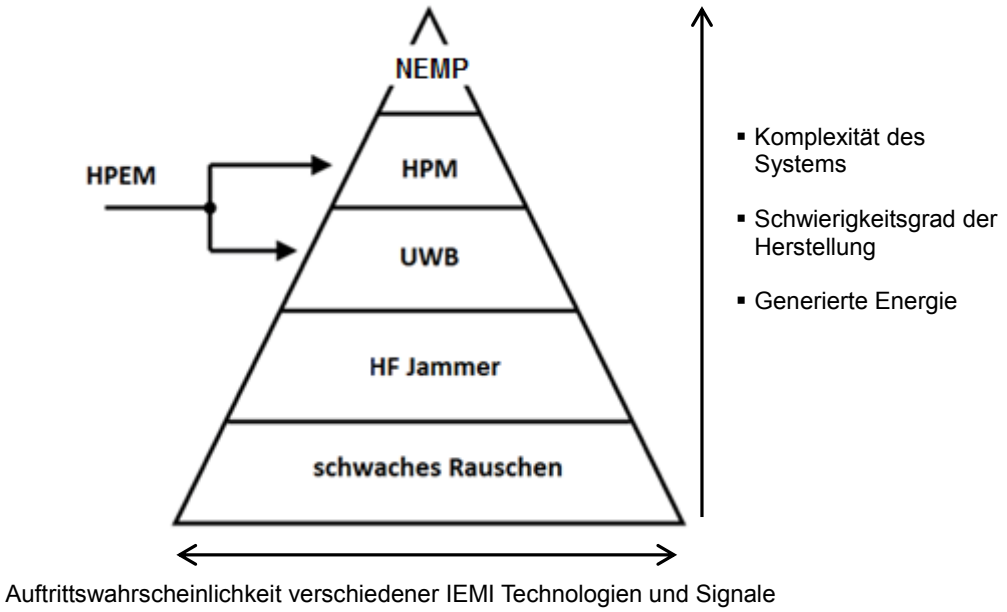


Abbildung 2-1 Sinkende Auftrittswahrscheinlichkeit verschiedener IEMI Technologien und Signale mit zunehmender Komplexität des Systems, Schwierigkeitsgrad der Herstellung und generierter Energie (Mansson, 2008), mit Änderungen

Laut Mansson (2008) steht die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines IEMI Angriffes in direktem Zusammenhang zur eingesetzten Technologie, sprich wie komplex ist das Angriffssystem, welcher Aufwand muss betrieben werden, um dieses herzustellen und wie hoch kann die abgegebene Energie sein. Daraus ergibt sich eine pyramidenförmige Einteilung wie sich in Abbildung 2-1 erkennen lässt. An der Basis der Pyramide findet sich schwaches Rauschen welches z.B. mit einem beliebigen Signalgenerator erzeugt und über eine Antenne abgegeben werden kann. Eine Stufe höher stehen Hochfrequenz Jammer[9], die z.B. zur Störung von GPS- oder GSM-Signalen eingesetzt werden können. Des Weiteren finden sich auf der Pyramide HPEM Quellen die UWB- oder HPM-Signale abgeben können. An oberster Stelle findet sich der sogenannte „Nukleare Elektromagnetische Puls (NEMP) und somit stellt dessen Eintreten die niedrigste Auftrittswahrscheinlichkeit dar. Vereinfacht gesagt wird nach IEC (2005) und Wilson (2008) ein NEMP bei einer nuklearen Explosion außerhalb der Erdatmosphäre (typischerweise mindestens 30km über der Erdoberfläche)

[9] HF Jammer tauchen auch immer wieder als Kommunikations Jammer auf.

ausgelöst. Dabei wird Gamma Strahlung produziert die mit der Atmosphäre wechselwirkt und elektromagnetische Pulse (EMP) auslöst, welche noch in Entfernungen von über 1000 km von der Detonation sehr hohe Amplituden der elektrischen Feldstärke aufweisen können. Im Jahre 1962 wurde von den Vereinigten Staaten von Amerika ein nuklearer Test über dem Pazifik, namens Starfish Prime, durchgeführt welcher die Auswirkungen des NEMP deutlich demonstrierte. Funkstationen und elektronisches Equipment wurden in Entfernungen von bis zu 1300 km gestört (Wilson, 2008). In der Literatur taucht auch immer wieder das Akronym HEMP[10] auf, das synonym zu NEMP zu verwenden ist (Department of Defense, 2010). Diese Art von elektromagnetischer Bedrohung wird wegen der minimalen Wahrscheinlichkeit seines Auftretens nicht weiter diskutiert. In dieser Arbeit wird der Fokus vielmehr auf HPEM Quellen gelegt. Diese setzen sich wie oben erwähnt aus UWB- und HPM- Quellen zusammen. Gedämpfte Sinussignale werden als Kombination dieser beiden Signale laut Brauer et al. (2009) auch zu HPEM gezählt. In Anlehnung an den Standard IEC 61000-2-13 (2005) und Adami et al. (2011) werden nachfolgend die häufigsten HPEM Signale nach Zeit- und Frequenzbereich spezifiziert:

- Gepulste hochfrequente Sinus Signale (HPM Quellen) im Frequenzbereich von 30 bis 3000 MHz und Pulsweiten von ungefähr 0,1 bis 10 µs
- Ultra Breitband Pulse (UWB) mit Anstiegszeiten und Pulsweiten von etwa 10 ps bis 1 ns, die einzeln oder repetitiv ausgesendet werden können. Diese Pulse weisen einen sehr hohen spektralen Gehalt auf.
- Einzelne oder repetitive breitbandige Pulse, auch gedämpfte Sinussignale etc.
- Dauerstrich Signale[11] mit Frequenzgehalt im Bereich von wenigen GHz.

[10] Engl. High Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP)
[11] Engl. Continuous Wave (CW)

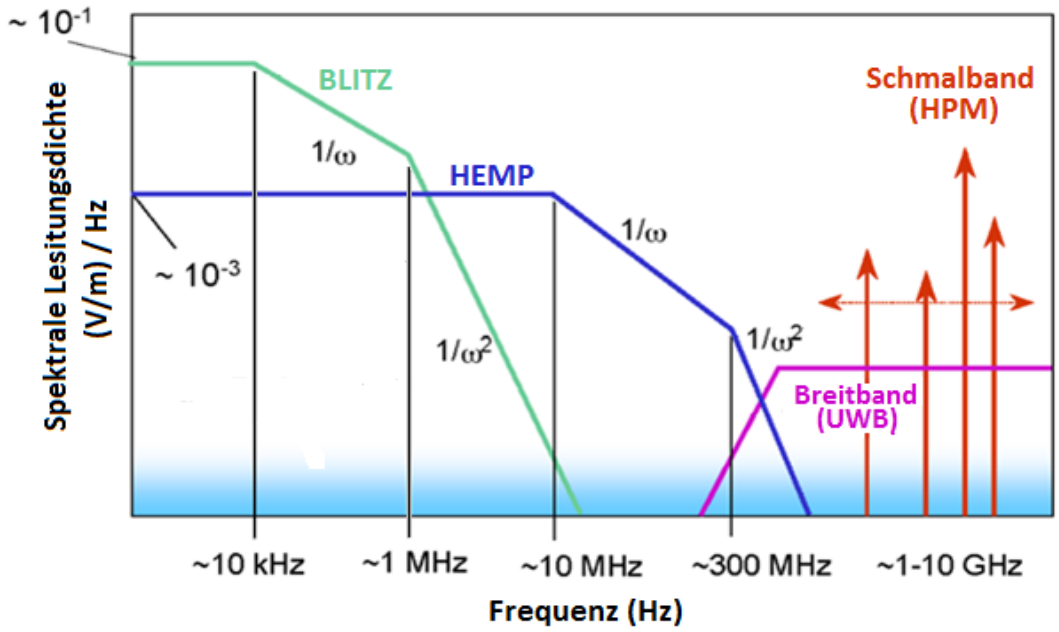


Abbildung 2-2 Spektrale Leistungsdichte verschiedener natürlicher und künstlicher elektromagnetischer Störquellen (Radasky & Savage, 2010), mit Änderungen

Um einen Eindruck des Gefährdungspotentials von elektromagnetischen Störquellen zu bekommen wird in der Literatur oft eine Darstellung der Leistungsdichtespektren verschiedener Quellen herangezogen. Abbildung 2-2 gibt hier einen qualitativen Vergleich von HPM und UWB Quellen mit den Spektren des HEMP und dem eines Blitzes[12]. Die Abbildung verdeutlicht die Größenordnungsunterschiede wobei man erkennen kann, dass sich das Spektrum eines UWB Pulses über einen weiten Frequenzbereich erstreckt. Dadurch ist eine höhere Wahrscheinlichkeit gegeben bei einer Resonanzfrequenz oder Arbeitsfrequenz von elektrischen/elektronischen Systemen einzukoppeln und damit das Gerät zu stören. HPM Quellen die Signale mit schmalbandigen Spektren aussenden, können hingegen leichter Zerstörungen von elektrischem/elektronischem Equipment verursachen, wenn sie auf die Resonanz- oder Arbeitsfrequenzen des Angriffsziels abgestimmt sind, da sie im Vergleich zu UWB Signalen bei gleicher Eingangsleistung in einem wesentlich schmaleren Frequenzband die Energie stärker bündeln. Dies wird in Kapitel 4 eine wichtige Rolle spielen um realistische Angriffsszenarien ableiten zu können. Im Anschluss an diesen generischen Überblick wird in Kapitel 2.1 genauer auf Faktoren zur Beschreibung der Störsignale wie Intensität, Signalform, Spektrum und Energie eingegangen. Kapitel 2.2 gibt eine Einführung über Grundlagen von Schmalband und Breitband Quellen. Zusätzlich werden in der öffentlich zugänglichen Literatur beschriebene Quellen diskutiert. Störquellen aus dem militärischen Bereich können nicht betrachtet werden, da deren spezifische Kennwerte als geheim klassifiziert werden und somit nicht zugänglich sind.

[12] Engl. Lightning Electromagnetic Pulse (LEMP)

## 2.1 Analyse der relevanten Signale im Zeit- und Frequenzbereich

Um IEMI Signale im Zeit- und Frequenzbereich systematisch analysieren zu können werden von Giri & Tesche (2004) sowie dem IEC Standard 61000-2-13 (2005) zwei Faktoren eingeführt. Dies ist einerseits der Begriff Frequenzband Verhältnis[13] und zum anderen die prozentuelle Bandbreite[14], mit deren Hilfe eine Bandeinteilung nach vier Kategorien möglich ist. Nachfolgend werden diese abgeleitet:

$$Bandbreite,\ BW = f_h - f_l \qquad 2\text{-}1$$

$$Mittenfrequenz,\ f_0 = \frac{f_h + f_l}{2} \qquad 2\text{-}2$$

$$Frequenzband\ Verhältnis,\ BR = \frac{f_h}{f_l} \qquad 2\text{-}3$$

$$Prozentuelle\ Bandbreite,\ PBW = \frac{BW}{f_0} \qquad 2\text{-}4$$

$$PBW = 200\left(\frac{BR-1}{BR+1}\right) \qquad 2\text{-}5$$

Dabei wird zuerst mit der Definition der Bandbreite in Formel 2-1 und der Mittenfrequenz in Formel 2-2 eines Signals begonnen. Das Band Ratio, Formel 2-3 stellt das Verhältnis aus oberer ($f_h$) zu unterer ($f_l$) Grenzfrequenz dar und gilt für flache Spektren. Bei Signalen mit Spitzen im Frequenzspektrum werden $f_l$ und $f_h$ so ausgewählt, dass zwischen diesen beiden Frequenzen 90 % der Gesamtenergie übertragen werden. Zusätzlich wird bei Frequenzspektren mit DC Anteil $f_l$ = 1 Hz festgelegt. Die prozentuelle Bandbreite PBW in Formel 2-4 drückt die Bandbreite des Signals als Prozentsatz der Mittenfrequenz $f_0$ aus. Aus oben angegebenen Formeln wird die in der Literatur am häufigsten erwähnte Definition für PBW abgeleitet und in Formel 2-5 in Prozent umgerechnet. Hier wird ersichtlich, dass der Maximalwert von PBW 200% beträgt, laut Mansson (2008) existieren viele Quellen die über 190% erreichen. Die angeführten Faktoren dienen nun zur Einteilung der IEMI Signale in vier Bänder mit denen häufige Signalformen beschrieben werden können.

| Frequenzband | Prozentuelle Bandbreite (PBW) | Frequenzband Verhältnis(BR) |
|---|---|---|
| Hypo Band / Schmalband | < 1% | < 1.01 |
| Meso Band | 1% < PBW ≤ 100% | 1.01 < BR ≤ 3 |
| Sub-Hyper Band | 100% < PBW ≤ 163.4% | 3 < BR ≤ 10 |
| Hyper Band | 163.4% < PBW < 200% | BR ≥ 10 |

Tabelle 2-1 Einteilung der Frequenzbänder von IEMI Signalen auf Basis der Bandbreite (Giri & Tesche, 2004)

[13] Engl. Band Ratio (BR)
[14] Engl. Percentage Band Width (PBW)

Wie oben schon erwähnt werden IEMI Signale in der Literatur häufig nach Tabelle 2-1 klassifiziert. Sie beruht auf der Bandbreite der jeweiligen Signale. Daraus entstehen vier Kategorien deren Spektren von Hypo- über Meso- und Sub-Hyper- bis hin zu Hyper Band immer breiter werden. In den anschließenden Kapiteln 2.1.1 bis 2.1.4 wird detaillierter auf die häufigsten IEMI Signale eingegangen. Kapitel 2.1.4 dient danach der Erläuterung der Hochfrequenz Jammer, die wahrscheinlich am häufigsten bei IEMI Angriffen zum Einsatz kommen, aber nur sehr geringe Energien abgeben können.

### 2.1.1 Schmalband Signale

Dieses Kapitel dient der Beschreibung von Schmalband Signalen, die nach Tabelle 2-1 auch als Hypo Band Signale bezeichnet werden können. Wie in Tabelle 2-1 ersichtlich weisen sie sehr kleine Bandbreiten auf mit einem PBW unter 1% oder einer Band Ratio von weniger als 1.01. Das bedeutet sie geben ihre Gesamtenergie in einem schmalen Frequenzbereich ab und haben dadurch das Potential dort eine sehr starke Wirkung zu zeigen. In der Literatur werden Schmalbandquellen, wie in Kapitel 1.1 schon erwähnt, meistens Hochleistungsmikrowellen oder High Power Microwave (HPM) Quellen genannt. Diese senden leistungsstarke Sinussignale aus. Abbildung 2-3 zeigt anschaulich das Prinzip einer HPM Quelle, dies beruht auf der Abgabe des größten Teils der Gesamtenergie in einem möglichst engen Frequenzbereich (Mansson, 2008).

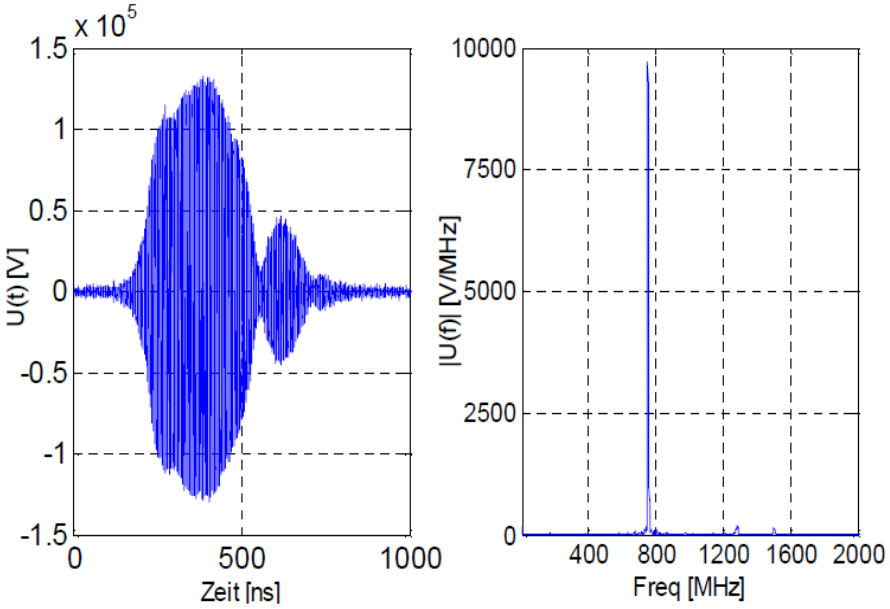


Abbildung 2-3 Signal einer HPM Quelle im Zeit- und Frequenzbereich, Nana et al. (2012)

Leistungsstarke HPM Pulse werden mit Parametern wie Impulsdauer, Feldstärkeamplitude und Mittenfrequenz beschrieben. Typische Kennwerte sind $t_{puls} = 50 - 500ns$, $E_{Max} = 1 - 100\ kV/m$ und $f_0 = 500\ MHz - 5\ GHz$. Ein Beispiel könnte hier mit $f_l$ = 499 MHz, $f_0$ = 500 MHz und

$f_h$ = 501 MHz angegeben werden. Dies würde in einer prozentuellen Bandbreite von PBW = 0,4 % resultieren. Solche Quellen werden dazu eingesetzt den maximalen Schaden in einem elektrischen/elektronischen System zu erzielen wenn Arbeits- oder Resonanzfrequenzen bekannt sind. Dies stellt meistens kein großes Problem dar, weil die Daten vieler Komponenten öffentlich zugänglich sind. Nana et al. (2012)

### 2.1.2 Breitband Signale

Breitband- oder Ultra Breitband Pulse (Ultra Wide Band, UWB) fallen nach Tabelle 2-1 in die Kategorie Sub-Hyper Band und Hyper Band. In der Literatur wird dies nicht immer einheitlich dargestellt. Der Unterschied zu Schmalbandquellen ist leicht ersichtlich. Mit einer PBW von über 163,4% oder einer BR von über 10 besitzen diese Signale ein viel breiteres Spektrum in denen die elektromagnetische Energie übertragen wird (IEC, 2005). Abbildung 2-4 zeigt einen UWB Puls mit zugehörigem Spektrum. Erreicht werden die hohen Bandbreiten durch die sehr kurzen Anstiegszeiten der Pulse. Laut Nana (2012) weisen diese Pulsdauern von einigen ns und Anstiegszeiten im Bereich von einigen 10 ps auf. Resultierende Bandbreiten können von einigen MHz bis zu einigen GHz reichen.

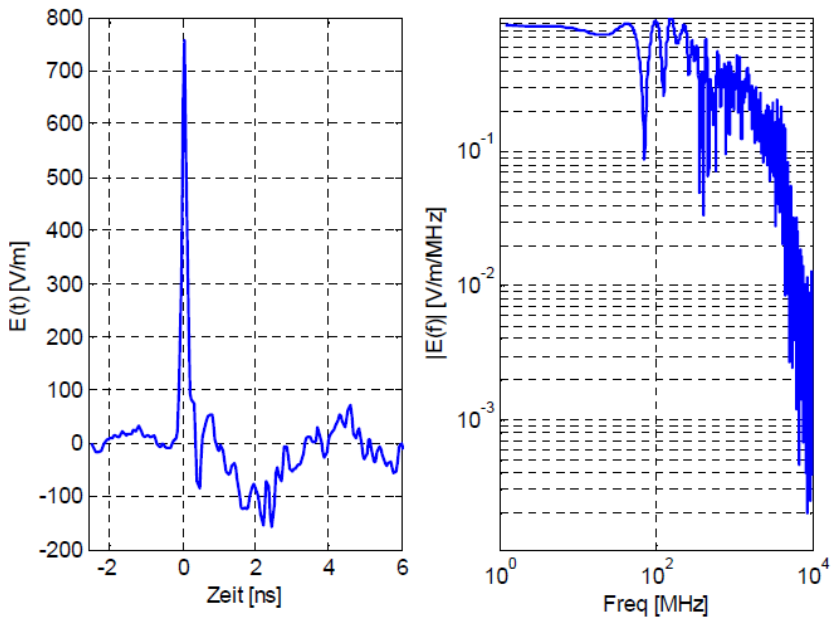


Abbildung 2-4 UWB Puls im Zeit- und Frequenzbereich Nana et al. (2012)

Da die Gesamtenergie auf einen weiten Bereich verteilt wird stellen die Energiedichten in den jeweiligen Frequenzabschnitten nur einen geringen Teil der Gesamtenergie dar. Um dem entgegenzuwirken wurden in der Vergangenheit Quellen gebaut, die ihre Pulse repetitiv minutenlang abgaben um die Energiedichten zu erhöhen (Radasky & Savage, 2010). Equipment für UWB Pulse ist frei erhältlich. Im Prinzip kann jeder sein eigenes System zusammenstellen und damit einen IEMI Angriff durchführen. Die Komponenten wie Antennensystem und Signalgeneratoren müssen nur aufeinander abgestimmt werden. Anleitungen dazu finden sich auch im Internet. Das gefährliche an diesen

Systemen ist, dass kein besonderes Wissen über Arbeits- und Resonanzfrequenzen von angegriffenen Infrastrukturen bzw. deren Komponenten bekannt sein muss da die Spektren der UWB Pulse weite Bereiche abdecken (Radasky, Baum, & Wik, 2004).

### 2.1.3 Gedämpfte Sinusschwingung

In diesem Kapitel werden gedämpfte Sinussignale behandelt, die dem Mesoband aus Tabelle 2-1 zuzuordnen sind. In zahlreichen Publikationen, wie in jener von wie Prather et al. (2004), zählen gedämpfte Sinussignale auch zu den Breitbandsignalen. Sie kombinieren die Vorteile von Schmalband- und Ultrabreitband, nämlich die kurzen Anstiegszeiten von UWB Pulsen mit den Mittenfrequenzen und höheren Energiegehalten von Sinussignalen. Sie geben den Großteil ihrer Energie in einem breiten Bereich um die Mittenfrequenz ab und sind sehr leistungsstark. Sie besitzen also ein breites Spektrum um Arbeits- oder Resonanzfrequenzen eines Systems zu erreichen, Nana et al. (2012). Abbildung 2-5 zeigt einen solchen Puls im Zeit- und Frequenzbereich.

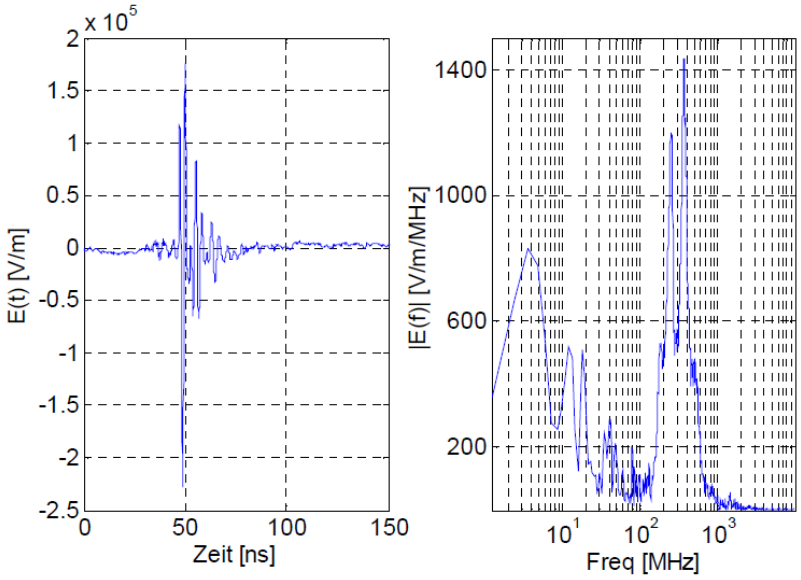


Abbildung 2-5 Gedämpfter Sinus Puls im Zeit- und Frequenzbereich der Quelle DS110 der Firma Diehl, 1m Entfernung Nana et al. (2012)

Zur Vereinfachung werden diese Quellen DS-Quellen[15] genannt.

### 2.1.4 Jammer

Signale von Kommunikations Störsendern stellen genauso wie oben angeführte Signale eine Bedrohung der Gesellschaft dar, falls sie für kriminelle Zwecke eingesetzt werden. Andererseits dienen

[15] Engl. Damped Sine (DS)

sie in Gefängnissen, Krisengebieten oder bei Staatsbesuchen dem Personenschutz bei der Unterdrückung von unerlaubter oder unerwünschter Kommunikation. Zusätzlich finden sie auch Verwendung um Fernzündungen von Bomben über Hochfrequenzsignale zu unterbinden (Diehl BGT Defence, 2013). Abbildung 2-6 zeigt einen über das Internet leicht beziehbaren Jammer der gleichzeitig in mehreren Frequenzbändern Störsignale aussendet. Dieser Typ stört im Bereich von 840 MHz bis 2180 MHz z.B. GSM 900, DAB, DECT, UMTS je nach Gegebenheiten in einem Umkreis von bis zu 10 m. Im Messlabor Seibersdorf wurde die durch den Jammer hervorgerufene elektrische Feldstärke mit einer breitbandigen Feldsonde vom Typ Narda SRM-3000 (100 kHz - 3 GHz, 1 MHz RBW) in einer Distanz von 1 m senkrecht zur Vorderseite des Jammers gemessen. Veränderungen der elektrischen Feldstärke durch Drehen des Jammers wurden nicht bemerkt. Leistungsangaben der Hersteller solcher Jammer basieren immer auf der Addition der Leistungen in den einzelnen Frequenzbändern, siehe Formel 2-6.

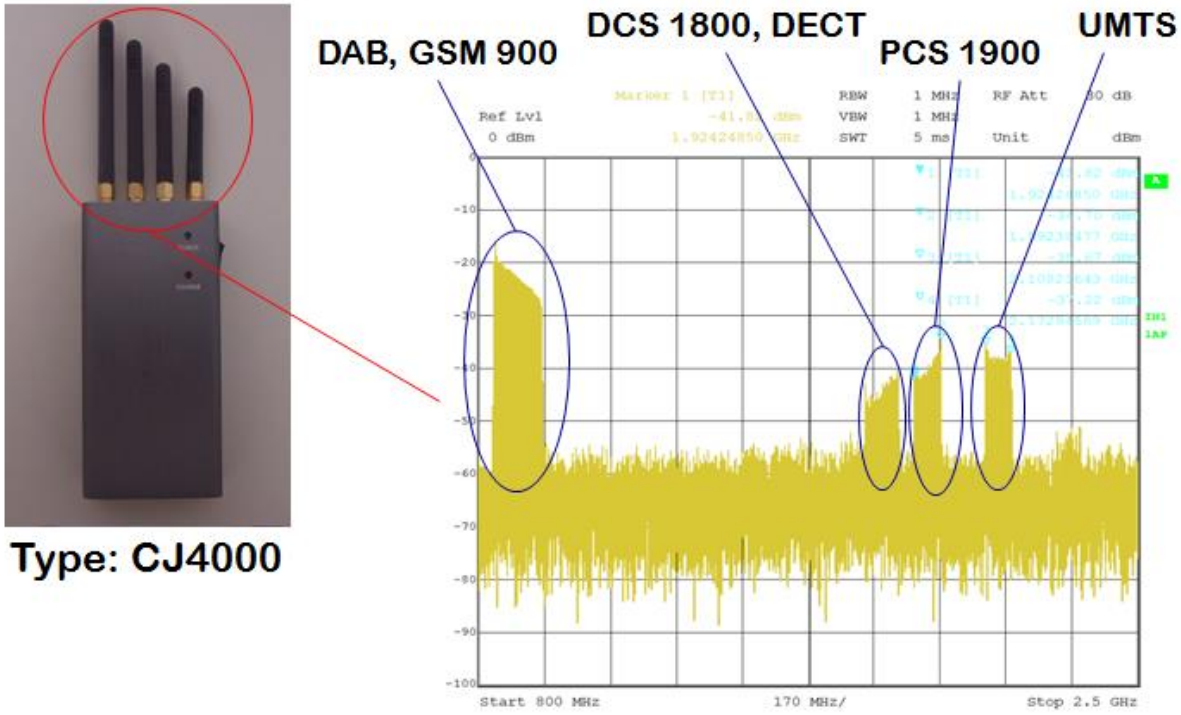


Abbildung 2-6 Messung der hervorgerufenen Feldstärke durch einen 2 Watt Kommunikations Jammer Typ CJ4000, Messung mittels Breitbandfeldsonde im Messlabor Seibersdorf

$$P_{Jammer} = P_{Band\ 1} + P_{Band\ 2} + \cdots + P_{Band\ n} \qquad 2\text{-}6$$

Jammer die beim Personenschutz zum Einsatz kommen haben meist viel höhere Leistungen, als der in Abbildung 2-6 gezeigte und sind nur Forschungseinrichtungen und staatlichen Institutionen wie Ministerien vorbehalten. Laut Herstellerangaben erzielen Jammer, die GSM, UMTS, WLAN und andere Kommunikationstechnologien stören Reichweiten von einigen Metern ($P_{Jammer} \sim 2W$) bis zu

400 m ($P_{Jammer} \sim 250W$). Höhere Störreichweiten (bis zu einigen km) werden mittels leistungsschwachen GPS Jammern erzielt. Da GPS Signale am Erdboden durch die Hohe Freiraumdämpfung[16] nur mehr sehr kleine Pegel besitzen, genügt es diese mit geringen Störsenderausgangsleistungen von einigen mW bis zu wenigen Watt zu beeinflussen (Jones, 2011).

Im Anschluss wird nun in Kapitel 2.2 auf die Grundlagen von HPEM Quellen und auf mögliche Antennensysteme, die in Verbindung mit HPEM Systemen oft verwendet werden eingegangen.

## 2.2 Technische Realisierung von HPEM Quellen

Um spätere Expositions Abschätzungen durchführen zu können ist es nötig einfache Grundlagen der Systeme, von denen eine Bedrohung (Überschreitung von Grenzwerten) ausgehen kann zu verstehen. Elektromagnetische Hochleistungsquellen (HPEM) beziehen ihre Primärenergie, nach Wilson (2008) und Sabath (2009), aus chemischen Reaktionen, Batterien, Explosionen oder von Dieselgeneratoren. Laut Giri (2004) werden HPEM Quellen vor allem nach Frequenzbereich, Ausgangsleistung, Pulsdauer, Repetitionsraten und Feldstärkeamplituden charakterisiert. Des Weiteren wird erwähnt, dass IEMI Quellen größtenteils Signale im Frequenzbereich von 200 MHz bis 5 GHz abgeben und Signaleinkopplungen in diesem Band leicht zu Stande kommen. In vielen Geräten führt dies dann zu Störungen oder sogar Zerstörungen. Antennensysteme in diesem Frequenzbereich bestehen meist aus elektromagnetischen Reflektor- oder Hornantennen (Giri D. V., 2004). Bei der Recherche in der frei zugänglichen Literatur wurden außerdem Spulen-, Helix- und impulsabstrahlende[17] Antennen erwähnt. Mehrere Faktoren führen dazu, dass Störquellen vor allem in dem oben erwähnten Frequenzbereich (Wellenlänge der Signale im Bereich von 6 cm bis 1,5 m) betrieben werden:

- Leitungen von Geräten oder Anlagen stellen aufgrund entsprechender gängiger Abmessungen Kopplungspfade (λ/4 bis λ-Antenne) für Signale im Frequenzbereich von 1 - 2 GHz dar
- Abmessungen von elektrischen Steckverbindungen zeigen in diesem Frequenzbereich Resonanz
- Öffnungen und Schlitze von elektrischem/elektronischem Equipment weisen Abmessungen (z.B. λ/10) auf die Resonanz in oben angeführtem Frequenzbereich zeigen. Dadurch sind sie für Einkopplungen sehr anfällig
- Die Wahrscheinlichkeit einer Signal Einkopplung in Antennen von Standard Geräten ist relativ hoch da sie oftmals in diesem Frequenzbereich betrieben werden.

[16] Die mittlere Entfernung von GPS Satelliten zur Erde beträgt ungefähr 20.200 km. Die abgeschwächten Signalpegel auf der Erde betragen durch die Freiraumdämpfung nur mehr -160 dBW ($10^{-16}$ Watt).
[17] Engl. Impulse Radiating Antenna (IRA)

In der Literatur wird unterschieden zwischen leitungs- und feldgeführten Störsignalen. In dieser Diplomarbeit werden für spätere Expositionsabschätzungen ausnahmslos feldgeführte Signale behandelt. In Kapitel 2.2.1 bis 2.2.3 werden nun HPEM Systeme und der Aufwand zur Herstellung dieser beschrieben. Grundlegendes zur Signalgenerierung, Signalauskopplung sowie Pulsformung werden diskutiert.

### 2.2.1 Grundlagen von HPM Quellen

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die Grundlagen der Quellen zur Erzeugung von Hochleistungsmikrowellen (HPM). Wie bereits erwähnt arbeiten diese in einem sehr schmalen Frequenzbereich, in dem sie ihre gesamte Energie abgeben. Betrieben werden diese mit gepulsten Spitzenleistungen von typischerweise 10 MW oder höher laut Granatstein et al. (2005). IEMI Quellen die auch im Schmalbandfrequenzbereich arbeiten, aber keine hohen Leistungen erzielen sind z.B. umgebaute Mikrowellenherde. Diese erzeugen ihre Mikrowellenstrahlung mithilfe des in der Literatur oft erwähnten Magnetrons. Sie werden auch in Radaranlagen mit sehr hohen Leistungen betrieben. Andere elektromagnetische Störquellen der Schmalband Kategorie sind nach ausführlicher Recherche das Klystron, Gyrotron und der Vircator, die weiter unten beschrieben werden. Allen aufgezählten Quellen ist gemein, dass diese sogenannte Laufzeitröhren sind. Das Prinzip der Generierung von Schmalbandsignalen ist in Abbildung 2-7 schematisch dargestellt. Eine Pulsquelle wird benötigt, die die Mikrowellenquelle speist. Vereinfacht wird die eingespeiste Energie in Mikrowellenstrahlung umgewandelt und über eine Antenne abgegeben.

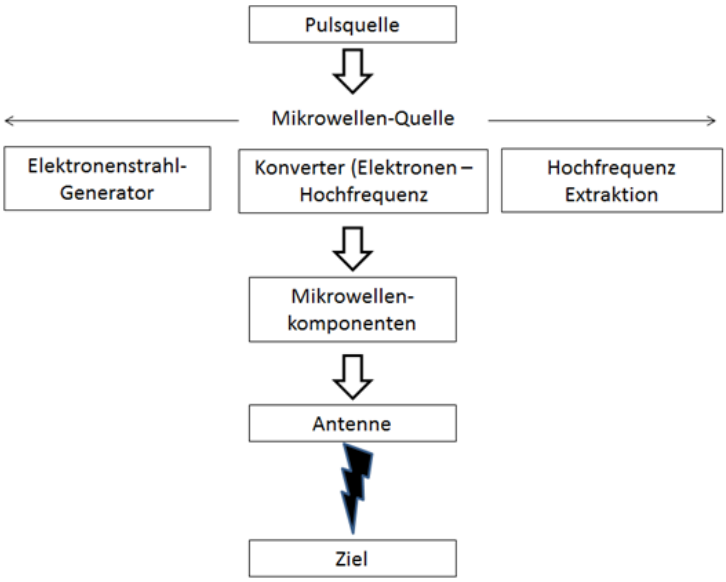


Abbildung 2-7 Aufbau eines HPM – Systems (Schamiloglu, 2005), mit Änderungen

Elektromagnetische Wellen mit Wellenlängen von 1 mm bis zu 30 cm breiten sich mit Frequenzen von 1 GHz bis zu 300 GHz aus. Diese werden oft als Mikro- und Millimeterwellen benannt.

Eine konsistente Bezeichnung findet sich in der Literatur nicht. Zur Beschreibung in diesem Dokument wird die Einteilung nach SCENIHR (2009)[18] herangezogen.

| Frequenzband | Frequenzbereich |
|---|---|
| Niederfrequenz (Extremely Low Frequency, ELF) | 0 Hz – 300 Hz |
| Zwischenfrequenz (Intermediate Frequency, IF) | 300 Hz – 100 kHz |
| Hochfrequenz (Radio Frequency, RF) | 100 kHz – 1 GHz |
| Mikrowellen (Microwaves) | 1 GHz – 300 GHz |

Tabelle 2-2 Einteilung der Frequenzbänder nach SCENIHR (2009)

Mikrowellen werden in der Radartechnik, zur drahtlosen Kommunikation, in Mikrowellenherden oder in Sensorsystemen eingesetzt. Im Falle von Hochleistungsmikrowellen werden Laufzeitröhren oder dichtegesteuerte Röhren verwendet, wobei letztere keine praktische Bedeutung mehr besitzen. In Abbildung 2-8 werden verschiedene Mikrowellenquellen den jeweiligen Laufzeitröhren (Linearstrahlröhren oder Kreuzfeldröhren) zugeteilt (Wolff, 2012). Nach Barker et al. (2005) stehen der Elektronenstrahl und das elektrische Feld in einer Linearstrahlröhre linear zueinander. Hingegen existiert in Kreuzfeldröhren ein zusätzliches starkes Magnetfeld welches senkrecht zum elektrischen Feld steht.

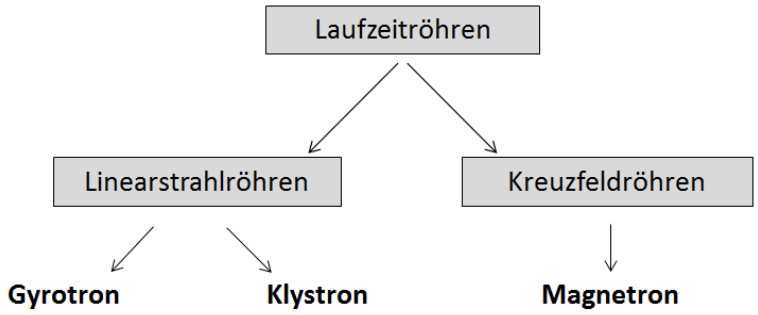


Abbildung 2-8 Unterteilung von Laufzeitröhren (Wolff, 2012)

Alle Laufzeitröhren haben gemeinsam, dass die Schwingungserzeugung in vier Phasen unterteilt ist:

- Elektronenstromerzeugung und Elektronenbeschleunigung
- Mittels hochfrequentem (HF) – Feld wird die Geschwindigkeit der Elektronen gesteuert

[18] SCENIHR - Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks, Weblink: http://ec.europa.eu/health/scientific_committees/emerging/index_en.htm, abgerufen am 01.11.2015

- Dichtemodulation der Elektronen auf Grund ihrer unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeit
- Energieabgabe an ein bremsendes elektrisches HF-Feld. (Wolff, 2012)

Da das Hauptaugenmerk dieser Diplomarbeit aber nicht den physikalischen Grundprinzipien der Erzeugung von Hochfrequenzfeldern dient, werden nachfolgend nur kurz mögliche Quellen für IEMI wie das Magnetron angeschnitten.

Wie oben schon erwähnt zählen Magnetrons zu den Laufzeitröhren und werden zur Erzeugung von elektromagnetischer Strahlung im Frequenzbereich der Mikrowellen verwendet. Diese besitzen einen hohen Wirkungsgrad (bis zu 80 %) und sind weit verbreitete Generatoren für hochfrequente Signale. Durch die Konstruktion können Leistung und Frequenz bestimmt werden. Man unterscheidet kontinuierlich arbeitende CW – Magnetrone und Impulsmagnetrone. Im Dauerstrichbetrieb können einige zehn kW und im Impulsbetrieb einige GW an Leistung erzielt werden (Bladel, 2004). Abbildung 2-9 zeigt ein Magnetron aus einem Mikrowellenherd. Die Sendeantenne ist an der Oberseite montiert. Magnetrone werden meist als strahlenförmige Schlitz-Magnetrone ausgeführt. Das Magnetron benötigt zur Funktion ein axiales Magnetfeld, welches meist mit Dauermagneten erzeugt wird. Um dieses Magnetron nun zu benutzen um einen feldgeführten IEMI Angriff zu realisieren wäre noch eine Adaption an ein Antennensystem und die elektrische Versorgung des Magnetrons nötig (Kreitlow & Rambousky, 2013).

Abbildung 2-9 Magnetron aus Mikrowellenherd[19]

Andere Quellen die HPM Signale erzeugen können sind nach (Giri, Tesche, & Baum, 2006) beispielsweise das Gyrotron, das Reltron, das Klystron und der Vircator. Diese werden aber nachfolgend nicht weiter behandelt, da die detaillierte technische Realisierung nicht Ziel dieser Diplomarbeit ist.

[19] Panasonic Magnetron, Weblink: http://www.mcmelectronics.com/product/PANASONIC-2M261-M32F-/P-2M261-M32F, abgerufen am 15.Dezember 2015

### 2.2.2 Grundlagen von Breitband Quellen

Das Prinzip von Breitbandquellen ist durch kurze Pulse mit steilen Flanken im Zeitbereich ein möglichst breites Frequenzspektrum zu erreichen. Dies wird schematisch in Abbildung 2-10 dargestellt. In Abbildung 2-10 oben wird ein Puls mittels Marx Generator[20] erzeugt der dann über ein Pulsformungsnetzwerk und anschließend über eine Antenne abgegeben wird. In Abbildung 2-10 unten ist eine ähnliche Schaltung schematisch abgebildet die kurze Hochleistungspulse mittels Tesla Transformator erzeugt. In beiden Fällen muss die Schaltung natürlich mit elektrischer Energie versorgt werden wie mit dem Element Primär Energie angedeutet wird.

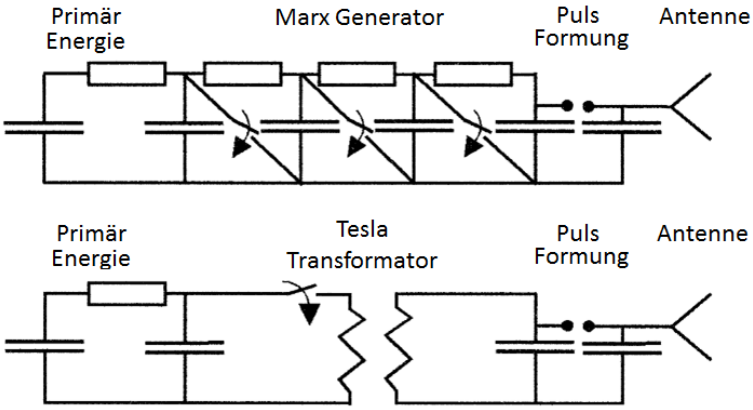


Abbildung 2-10 UWB Systeme, oben Marx Generator, unten Tesla Transformator jeweils mit Energieversorgung, Puls Formung und Antenne (Sabath, Nitsch, Jung, & Weise, 2002)

### 2.2.3 Ausgewählte Beispiele von Störquellen

Die Einteilung der Störquellen nach Frequenzbereich ist die am häufigsten angeführte Methode IEMI Quellen zu beurteilen. Es ist aber auch möglich diese nach Aufwand zum Bau oder Betrieb der Quelle zu unterteilen wie in Preinerstorfer et al. (2014) dargestellt:

„**Low-Tech Systeme**“: Günstige Komponenten, kann mit geringem Aufwand gefertigt werden, Größe: <Koffer

„**Medium-Tech Systeme**“: Teurere Komponenten, schwieriger zu fertigen als Low-Tech Systeme

Größe: >Koffer

„**High-Tech Systeme**“: Sehr teure Komponenten, technisch versiertes Personal z.B.: Forschungsgruppen, sehr hoher Aufwand, Größe: >Van

[20] Ein Marx Generator wird dazu verwendet kurze Hochleistungspulse zu erzeugen (Sabath, Nitsch, Jung, & Weise, 2002).

### 2.2.3.1 Low-Tech Systeme

IEMI Quellen mit einfachem Aufbau können laut Mansson (2008) mittels frei zugänglicher Anleitungen aus dem Internet und mit im Handel erhältlichen Komponenten selbst gebaut werden. Ein beliebtes Beispiel in der Literatur dazu ist der modifizierte Mikrowellenherd der in Abbildung 2-13 dargestellt wird. Teilweise ist es auch möglich fertige Low-Tech Quellen im Internet zu bestellen. HF-Jammer gehören in diese Kategorie da sie auf Internetplattformen ohne spezielle Anforderungen käuflich sind. Abbildung 2-11 stellt ein Low-Tech System dar, welches im Internet erworben werden kann. Hier wird ein Bausatz angeboten wobei die genauen Eigenschaften nicht verifiziert wurden.

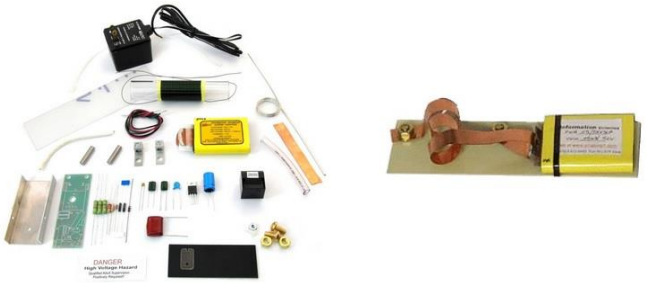

Abbildung 2-11 Low Power Pulse Gun Bausatz, Kosten bei Internetbestellung ca. 200$[21]

Doch im Internet gibt es auch Beschränkungen, zum Beispiel darf nachfolgendes System in Abbildung 2-12 nur an erfahrenes Personal ausgehändigt werden. Hier kann natürlich auch nicht verifiziert werden, wie genau diese Kontrolle durchgeführt wird. Wobei bei diesem System die Bauanleitung für jedermann bestellbar ist und somit in die Kategorie Low-Tech fällt.

Abbildung 2-12 Hochleistungspulsgenerator, mit Restriktionen bestellbar [22]

Das in der Literatur am öftesten erwähnte Beispiel für eine Low-Tech Quelle ist der modifizierte Mikrowellenherd. Dies kann von jedem im freien Handel gekauft werden. Darin befindet sich ein

[21] Weblink: http://www.amazing1.com/products/low-power-pulse-gun.html, abgerufen am 01.11.2015
[22] Weblink: http://www.amazing1.com/products/complete-emp-system-400j-60kv-75ka.html, abgerufen am 02.November 2015

Magnetron welches in Kapitel 2.2.1 kurz angesprochen wurde. In Giri (2004) wird beschrieben, wie ein Magnetron eines Mikrowellenherdes mittels Hohlleiter an verschiedene Antennentypen angekoppelt werden kann. Dadurch ist es möglich hohe Feldstärken bei 2,45 GHz zu erzeugen und gerichtet auf Objekte abzugeben. In Abbildung 2-13 wird dieser modifizierte Mikrowellenherd dargestellt. Der Umbau des Mikrowellenherdes stellt dar welch hohe elektrische Feldstärken mit der vergleichsweise einfachen Modifikation erreicht werden können.

Abbildung 2-13 Umgebauter Mikrowellenherd mit Reflektor Antenne (Giri, 2004)

Das System wurde hier von der abgeschirmten Kabine, Abbildung 2-13 rechts, gesteuert. Dabei wurde der Feldstärkeverlauf aufgenommen und eine maximale Feldstärke von 780 V/m in 6 m Abstand gemessen (Reflektor Durchmesser = 0,9 m). Die Versuchsanordnung wurde dann noch mit Objekten erweitert, die dem elektrischen Feld ausgesetzt wurden. Dabei kam das Ergebnis aus Tabelle 2-3 zustande.

| Objekt | Effekt |
|---|---|
| Uhr | Zerstörung |
| FM-Radiogerät | Thermische Zerstörung |
| Pilze | Verkohlen |
| Schwarzpulverkügelchen mit elektrischen Kontakten verbunden | Explosion |
| Elektrische Kontakte von Handheld Taschenrechnern | Thermische Zerstörung |

Tabelle 2-3 Objekte die dem elektrischen Feld der Versuchsanordnung ausgesetzt waren (Giri, 2004)

### 2.2.3.2 Medium-Tech Systeme

Auf Medium-Tech Systeme wird beispielsweise in der Norm IEC 61000-2-13 (2005) eingegangen. Dabei werden Anforderungen sowie Systemkomponenten aufgelistet. Grundsätzliche sind diese Systeme aus kommerziell erhältlichen Komponenten herzustellen. Im Gegensatz zu Low-Tech Systemen muss der Entwickler aber fortgeschrittene elektrotechnische Kenntnisse mit sich bringen. Laut

dieser Norm fallen ältere modifizierte Radaranlagen beispielsweise in diese Kategorie.[23] Diese Radaranlagen könnten dann zu IEMI Quellen umfunktioniert werden und damit großen Schaden anrichten. Als Beispiel gibt Nana (2012) das in Abbildung 2-14 gezeigte Radarsystem an. Hierbei handelt es sich um ein Suchradar welches ein Magnetron zur Mikrowellenerzeugung enthält. Die Spezifikationen werden nachfolgend in Tabelle 2-4 aufgelistet.

Abbildung 2-14 Radaranlage mit der Bezeichnung AN/FPS-71 (Nana, 2012)

| | |
|---|---|
| **Arbeitsfrequenz** | f = 1.285 GHz |
| **Ausgangsleistung (rms)[24]** | P = 2.5 MW |
| **Ausgangsleistung (Spitze)** | P = 5 MW |
| **Antennenapertur Fläche** | A = 93.5 $m^2$ |
| **Fernfeld Produkt** | $r \cdot E_f = ca. 6\ MV$ |

Tabelle 2-4 Eigenschaften des Radar Systems AN/FPS-71 nach IEC 61000-2-13

Das in Tabelle 2-4 eingeführte Fernfeld Produkt gibt Auskunft über die im Fernfeld erreichte Feldstärke. Wenn man das Produkt durch die Distanz dividiert, kann man eine Verteilung in verschiedenen Abständen berechnen. Dies wird nun in Tabelle 2-5 dargestellt, wobei die Angaben in Hauptsenderichtung gelten.

[23] Laut IEC 61000-2-13 (2005) können RADAR Systeme beispielsweise über Radio Research Instruments Co., Inc. Of Waterbury, CT bezogen werden. Die Anforderungen an den Käufer werden hier nicht erwähnt.

[24] Engl. Root Mean Square (RMS) = Quadratischer Mittelwert

| Entfernung | E-Feld ($A_{Apertur}$ = 93.5 $m^2$) | E-Feld ($A_{Apertur}$ = 9.35 $m^2$) |
|---|---|---|
| 300 m | 20 kV/m | 6.3 kV/m |
| 1 km | 6 kV/m | 1.9 kV/m |
| 10 km | 600 V/m | 190 V/m |

Tabelle 2-5 Elektrische Feldstärken im Fernfeld eines Medium Tech Systems für unterschiedliche Distanzen und Antennenflächen (Nana, 2012)

Tabelle 2-5 stellt Feldstärkewerte des beschriebenen Medium Tech Systems dar. Dabei ist auffällig, dass die Antennenfläche von 93.5 $m^2$ viel zu groß für einen kriminellen oder terroristischen Angriff ist, da dieses System aufgrund der Größe sehr schnell auffallen würde und auch nicht leicht zu transportieren ist. Aber verkleinert man diese Fläche um den Faktor 10, dann verringert sich die Feldstärke im Fernfeld nur um den Faktor $\sqrt{10}$. Dies bedeutet nun, dass Elektrotechnikingenieure mittels dieser Kenntnis ein kompakteres Medium-Tech System zusammenstellen könnten, welches annähernd gleich leistungsstark ist. In mehreren Kilometern Entfernung könnten damit noch so hohe Pegel erreicht werden, dass Störungen an elektrischen/elektronischen Geräten möglich sind. Dieses verkleinerte System könnte in einem LKW transportiert werden ohne dabei Aufsehen zu erregen.

Anschließend werden in Abbildung 2-15 bis Abbildung 2-17 Medium-Tech Systeme angeführt, über die publiziert wurde und als IEMI Quellen eingesetzt werden könnten (Radasky & Savage, 2010), (Sabath & Garbe, 2009).

Abbildung 2-15 Diehl DS 110, Medium-Tech (Sabath & Garbe, 2009)

In Abbildung 2-15 wird ein HPEM Generator in der Größe eines kleinen Koffers dargestellt. Dieser Koffer beinhaltet eine eingebaute Energieversorgung und ist für Regierungen bei DIEHL-BGT DEFENCE erhältlich. Er wird zum Beispiel für Anti-Terror Einsätze eingesetzt. Mit einem Gewicht von 30 kg und Abmessungen von 50 x 40 x 20 cm ist das DS100 sehr mobil. Das DS 110 enthält einen MARX-Generator (Pulsgenerator der hohe Spannungspulse erzeugen kann) und eine Spulenantenne um die elektromagnetischen Felder abzugeben (Prather, et al., 2004). In einer Publikationen des Unternehmens Diehl wird erwähnt, dass solche Systeme in der Lage sind Autos, Jet-Skis

und Motorboote zu stoppen oder Zugangsbeschränkungen von Gebäuden zu stören (Stark, et al., 2012).

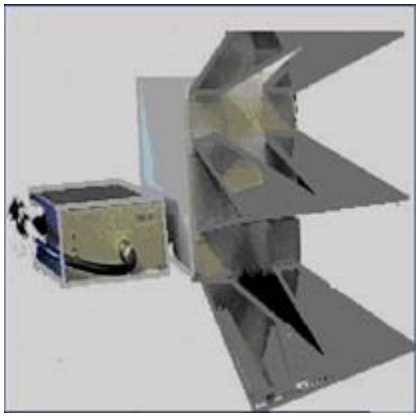

Abbildung 2-16 Labor Hyperband System aus Russland (Radasky & Savage, 2010)

In Abbildung 2-16 wird ein Labor Testsystem dargestellt, welches im Hyperband-Bereich arbeitet. Das System fällt in die Kategorie der Medium-Tech Quellen, da es von erfahrenem Personal in technischen Labors aufgebaut wurde. Informationen über Kosten, Energieversorgung und Transportfähigkeit wurden in der frei zugänglichen Literatur nicht gefunden.

Abbildung 2-17 Hochleistungs-Pulsgenerator mit Antenne und Energieversorgung[25]

Da Anleitungen und Bauteile über eine Internetplattform beziehbar sind, wurde das System aus Abbildung 2-17 der Kategorie Medium-Tech zugewiesen. Das Fertigstellen wird aber nur für qualifizierte Personen möglich sein. Laut Beschreibung beträgt das Gewicht der Quelle 90 kg und kann somit nicht mehr so einfach transportiert werden. Die Kosten dieser Quelle werden mit ca. 16000 $ angegeben.

#### 2.2.3.3 High-Tech Systeme

Sogenannte High-Tech IEMI Systeme stellen die Königsklasse der hier beschriebenen Systeme dar. Um diese zu fertigen bedarf es sehr spezifischen Wissens und hochentwickelter Komponenten. Die

[25] Weblink: http://www.amazing1.com/products/complete-emp-system-400j-40kv-45ka.html, abgerufen am 03.November 2015

nachfolgenden Beispiele wurden von qualifizierten Ingenieuren z.B. Forschungsgruppen gefertigt und zeigen, welche Möglichkeiten auf dem Gebiet der absichtlichen elektromagnetischen Interferenz gegeben sind.

High-Tech Systeme erzeugen Feldstärke Pegel die weit über den Störfestigkeitspegeln diverser Geräte liegen. Störungen oder Zerstörungen sind daher bei einem Angriff sehr wahrscheinlich. Abbildung 2-18 zeigt ein Beispiel eines Systems welches eine Spitzenfeldstärke von 4,6 kV/m in 300 m Entfernung erzeugen kann.

Abbildung 2-18 IRA II, High-Tech UWB System (Prather, Baum, Torres, Sabath, & Nitsch, 2004)

Ein ebenso sehr leistungsfähiges System wird in Abbildung 2-19 dargestellt. Das sogenannte JOLT System wurde in den 1990er Jahren am Air Force Research Laboratory in den USA entwickelt. Mit der Größe von 15 $m^3$ kann es nur auf einem Anhänger oder in einem großen LKW transportiert werden. Mittels Hochleistung Akku kann es auch für kurze Zeit bei einer Repetitionsfrequenz von 600 Hz betrieben werden. Dabei gibt es Pulse ab, deren Länge sich ungefähr im 100 ps Bereich bewegt. (Prather, Baum, Torres, Sabath, & Nitsch, 2004)

Abbildung 2-19 JOLT, High-Tech UWB System entwickelt in den Labors von Air Force Research USA (Prather, Baum, Torres, Sabath, & Nitsch, 2004)

### 2.2.3.4 Weitere Beispiele von IEMI Quellen

Wie oben schon erwähnt sind herkömmliche CW Quellen mit Leistungen im kW Bereich (rms) z.B.: Mikrowellenherde. Andere CW Quellen wie z.B. Radaranlagen können Ausgangsleistungen im MW Bereich aufbringen. Nachfolgende Tabelle 2-6 gibt Beispiele für typische Werte von CW Quellen.

| | |
|---|---|
| **Frequenzbereich** | f = 200 MHz - 5 GHz |
| **Wellenlänge** | λ = 150 cm - 6 cm |
| **CW Ausgangsleistung (rms)** | P = 1 kW (Mikrowellenherd) - 10 MW (Radaranlagen) |
| **CW Ausgangsleistung (Spitze)** | P = 2 kW – 20 MW (doppelter rms Wert für Sinusgrößen) |
| **Antennenapertur Fläche**[26] | A = bis zu 10 $m^2$ (kann in einem LKW versteckt werden) |
| **$E_{Spitze}$ an Apertur** | $E_a = \sqrt{P \cdot Z/A}$ |
| **$E_{Spitze}$ abgestrahlt** | $E_f = E_a \cdot A/(r \cdot \lambda)$ |

Tabelle 2-6 Eigenschaften von CW Quellen nach IEC 61000-2-13 (2005)

Aus dem Standard IEC 61000-2-13 (2005) geht hervor, dass die Quellen aus Tabelle 2-6 kommerziell erhältlich sind. Somit kann jede Person mit genügend Ausbildung und Ressourcen grundsätzlich einer dieser Quellen für IEMI einsetzen. Aus eben angeführter Tabelle kann die elektrische Feldstärke als Funktion der Frequenz und Reichweite abgeschätzt werden. Angenommen werden hier Fernfeldbedingungen (Feldwellenwiderstand Z = 377 Ohm). In Tabelle 2-7 wird nun dargestellt, welche elektrische Feldstärken auch noch in großen Distanzen möglich sind.

| Frequenz | Distanz | E-Feld ($A_{Apertur}$=10 $m^2$, $P_{Spitze}$=2 kW) | E-Feld ($A_{Apertur}$=10 $m^2$, $P_{Spitze}$=20 MW) |
|---|---|---|---|
| 500 MHz | 300m | 15,23 V/m | 1,52 kV/m |
| | 1km | 4,57 V/m | 457 V/m |
| 1 GHz | 300m | 30,43 V/m | 3,04 kV/m |
| | 1km | 9,13 V/m | 913 V/m |
| 2 GHz | 300m | 60,90 V/m | 6,09 kV/m |
| | 1km | 18,27 V/m | 1,83 kV/m |
| 3 GHz | 300m | 91,33 V/m | 9,13 kV/m |
| | 1km | 27,40 V/m | 2,74 kV/m |

Tabelle 2-7 E-Feld bei verschiedenen Frequenzen und Ausgangsleistungen IEC 61000-2-13 (2005)

Auch Radasky und Savage (2010) weisen darauf hin, dass ausrangiertes Militärequipment wie alte Radaranlagen für IEMI verwendet werden könnten. Dadurch ist es möglich in einem Abstand

[26] Apertur einer Antenne bezeichnet die freie Öffnung oder deren Durchmesser, durch welche die Radiowellen ausgesendet oder empfangen werden (Kark, 2012).

von einem Kilometer elektrische Feldstärken im kV/m Bereich zu erzielen. Diese Quellen würden in die Kategorie Medium- oder High-Tech fallen.

In dem Bericht des United States Department of Homeland Security (2005) werden unterschiedliche Beispiele von IEMI Systemen aufgezählt. Dabei werden die Merkmale nicht im Detail beschrieben. In Abbildung 2-20 werden die Größenverhältnisse anschaulich dargestellt. Je kleiner die Systeme gebaut sind umso mobiler sind sie, jedoch müssen die Angreifer eine geringere Reichweite in Kauf nehmen.

Abbildung 2-20 Verschiedene IEMI Quellen nach Größe (US Departement of Homeland Security, 2005)

Erreichbare Signalpegel durch IEMI können nach Radasky und Savage (2010) zusammengefasst je nach Distanz zum Angriffsobjekt und Aufwand der zum Bau dieser Systeme betrieben wird, bis zu mehrere 10 kV/m betragen. Die Autoren geben, dass auch mit kleineren Systemen (Größe eines Walkie-Talkies) Feldstärken im Bereich von ca. 100 V/m auf kurze Entfernung erreichbar sind.

In Tabelle 2-8 wird nun noch einmal die Vielfalt von verschiedenen Systemen anhand einiger Beispiel dargestellt. Dabei wurde wie schon in den Kapiteln zuvor auf frei verfügbare Literatur zurückgegriffen. Hierbei werden die unterschiedlichen Signalformen und Leistungsbereiche verdeutlicht, die je nach Anwendung stark variieren.

| IEMI Signalform | Signal Generierung | Typische Antenne | Typische Leistungen | Zeit- oder Frequenzbereich | Transport-Fähigkeit | Zusätzliche Informationen |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Schmalband** | Magnetron gepulst (Radaranlagen) | Reflektor, Horn | MW-GW | Fixe oder variable Frequenz | niedrig bis mittel | Pulsdauer: > 10 ns typ. |
| **Schmalband** | CW Magnetron (Mikrowellenherd) | Reflektor, Horn, | 800-1500 W | 2.45 GHz | mittel bis hoch | Einfach zu beschaffen |
| **UWB** | Pulsgeneratoren | IRA , Horn, Reflektor | MW-GW | Anstiegszeit: > 0.1 ns Pulsdauer:1-20 ns | niedrig bis mittel | kV/m in einigen 100 m Puls Rep.Rate: Hz bis kHz |
| **Gedämpfter Sinus** | Marx Generator + pulsformende Stufe | Horn, Reflektor, Spule | MW | MHz – GHz | hoch | kV/m in einigen 10 m typ. Puls Rep. Rate: Hz-kHz |
| **Jamming** | Rauschgenerator + Frequenzfilter | Kommunikat. Antennen | 0,5 W-2 kW | GSM, UMTS, GPS, WLAN | hoch bis mittel | Hochleistungs Jammer für Regierungen erhältlich |

Tabelle 2-8 Übersicht IEMI Quellen (IEC, 2005), (Mansson, 2008), (Giri D. , 2008) und (Schamiloglu, 2005)

Tabelle 2-8 fast die in der Literatur am öftesten erwähnten IEMI Systeme zusammen, wobei die Vollständigkeit, durch die große Vielfalt an Systemen, nicht gegeben sein kann. Im Zuge dieser Diplomarbeit wurde bei mehreren Unternehmen bezüglich Spezifikationen und Kosten von IEMI Systemen angefragt. Diese Befragungen führten aber zu keinem zusätzlichen Informationsgewinn, da die Unternehmen keine Informationen preisgeben wollten. Des Weiteren finden sich im Anhang zusätzliche Störquellen in tabellarischer Form.

#### 2.2.3.5 Kostenabschätzung der Systeme

Wie in den vorigen Kapiteln schon erwähnt sind Bauanleitungen für Low-Tech IEMI Systeme teilweise auf Internetplattformen frei bestellbar. Somit kann man für die gezeigten Low-Tech Systemen eine Abschätzung des Kostenaufwandes durchführen. Systeme in der Größe eines Koffers haben natürlich limitierte Reichweiten und können laut Wilson (2008) um weniger als 2.000 $ konstruiert werden. Weiters gibt Wilson an, dass nahezu jede Nation im Besitz solcher IEMI Systeme ist und vermutlich auch kriminelle oder terroristische Organisationen (2008).

Medium-Tech Quellen oder High-Tech Quellen können nur von erfahrenen Technikern oder von Forschungsgruppen mit hochentwickelten Komponenten erzeugt werden. Generell ist es schwierig in der Literatur Anhaltspunkte für Preise dieser Systeme zu finden. Sabath und Garbe (2009) geben in ihrer Publikationen für Medium-Tech Systeme eine Schätzung einer großen Preisspanne von 1.000 $ - 100.000 $ an. Für High-Tech Systeme geben die Autoren eine Spanne von 100.000 $ - 1.000.000 $ an. Die Abschätzung dieses Faktors ist größtenteils spekulativ und wird auch nicht einfach beantwortet werden können, da jeder sein eigenes Systeme mit ausgewählten Komponenten bauen kann.

## 2.3 Dokumentierte Bedrohungen durch elektromagnetische Waffen

Die Literaturrecherche in frei zugänglichen Veröffentlichungen hat gezeigt, dass in der Vergangenheit in unterschiedlichen Ländern zivile Infrastrukturen elektromagnetischen Angriffen ausgesetzt waren. Die Zahl der dokumentierten Vorfälle ist nicht sehr hoch, da Betreiber von angegriffenen Infrastrukturen meistens Stillschweigen bewahren wollen oder auch die Ursache eines Angriffes gar nicht erkannt haben. Im militärischen Bereich gibt es ebenso Vorfälle die sich aber nicht primär auf absichtliche Angriffe beziehen, sondern auf unabsichtlich ausgelöste elektromagnetische Interferenz durch HPEM. Die zivilen und militärischen Vorfälle werden nachfolgend behandelt. Diese sollen dem Leser ein Gefühl für das Bedrohungspotential von IEMI Attacken geben.

### 2.3.1 Dokumentierte Ereignisse im zivilen Bereich

In diesem Kapitel wird eine Übersicht über vergangene Angriffe im zivilen Bereich gegeben. Wie in Kapitel 2.2 schon erwähnt wurde, benötigt die Herstellung oder Beschaffung eines Low-Tech IEMI Systems nur geringe Fähigkeiten oder Kenntnisse. Hingegen ist die Herstellung von Hochleistungs IEMI Systemen mit einem hohen technischen und finanziellen Aufwand verbunden. Nachfolgend werden dokumentierte Angriffe aufgezählt:

- Im Jahr 1996 wurde durch einen Kriminellen in St. Petersburg das Sicherheitssystem eines Juweliers mittels HF Generator außer Kraft gesetzt. Der Schwierigkeitsgrad des Zusammenbaus des IEMI Systems kam dem eines Zusammenbaus einer Mikrowelle gleich. (Mansson, 2008)
- In Kisiljurt (Dagestan) 1996 wurde vom tschetschenischen Kommandant Salman Radueyev ein HF Jammer verwendet um während eines Raubes die Polizeikommunikation zu stören (Mansson, 2008)
- 2 Angehörige der kriminellen japanischen Organisation Yakuza wurden 1998 bei einer Spielautomaten Manipulation erwischt. Sie verwendeten dazu einen hochenergetischen Generator. (Mansson, 2008)
- Verbrecher haben mittels HF Jammer in europäischen Städten (z.B.: Berlin) Sicherheitssysteme von Limousinen deaktiviert. (Sabath, 2011)
- In Russland haben tschetschenische Rebellen ein IEMI System dazu verwendet ein Sicherheitssystem zu überlisten und Kontrolle über ein überwachtes Gelände zu erhalten (US Departement of Homeland Security, 2005)
- Ein Vorfall aus dem Finanzsektor ereignete sich in London, dabei wurde eine Bank das Ziel einer Erpressung. Die Verwendung eines IEMI Systems wurde der Bank angedroht. (Hoad & Sutherland, 2007)

- Ein anderer Angriff auf eine Bank ist aus den Niederlanden bekannt. Hierbei wurde das IT-Netzwerk der Bank unterbrochen. Zum Einsatz kam hier ein IEMI System in der Größe eines Aktenkoffers welches mittels Anleitung aus dem Internet zusammengestellt wurde. (Hoad & Sutherland, 2007)
- In Moskau wurde ein Spannungsimpuls in eine Vermittlungsstelle injiziert und somit eine Telefonleitung sprichwörtlich deaktiviert. An diesem Tag konnten 200000 Menschen in Moskau nicht telefonieren. (Fortov, Parfenov, Siniy, & Zdoukhov, 2006)
- Die Motivation hinter der Störung einer Fernsehübertragung bleibt offen. Hier haben Kriminelle die Funkverbindung der Übertragung gestört indem sie Jamming Signale zu einem Satelliten gesendet haben. (Wik, Gardner, & Radasky, 1999)

Eine große Rolle spielen natürlich Fähigkeiten und Knowhow eines Angreifers. Tabelle 2-9 gibt hier einen Überblick und eine Zuordnung der Attacken und technischen Fähigkeiten der Angreifer. Sabath (2011)

| | **Vorfall** | **Motivation** | **Fähigkeiten/Wissen** |
|---|---|---|---|
| 1 | Juwelierladen | Raub | Amateur - Techniker |
| 2 | Polizeifunk | Funkunterdrückung | Techniker |
| 3 | Spielautomat | Raub | Amateur/Internet |
| 4 | Auto Alarmanlage | Raub | Amateur/Internet |
| 5 | russisches Sicherheitssystem | Funkunterdrückung/Raub | Techniker |
| 6 | Bank in Großbritannien | Erpressung/Raub | Amateur - Techniker |
| 7 | Bank in den Niederlanden | Sachbeschädigung/Rache | Amateur/Internet |
| 8 | Telefon Moskau | Sachbeschädigung | unbekannt |

Tabelle 2-9 Dokumentierte IEMI Angriffe und Einteilung der Motivation und Fähigkeiten der Angreifer (Sabath, 2011)

Die in Tabelle 2-9 aufgelisteten Angriffe haben alle keine hohen Anforderungen an die Fähigkeiten der Angreifer gestellt. Die geringe Anzahl der Vorfälle im zivilen Bereich liegt neben Stillschweigen der Angegriffenen auch am Mangel der Detektoren für IEMI. Eine Vielzahl von Ereignissen kann somit gar nicht erkannt werden. Ein anderer Grund ist, dass viele Berichte der NATO und russischen Forschungsinstituten klassifiziert sind und somit nicht öffentlich zugänglich gemacht werden können.

### 2.3.2 Dokumentierte Vorfälle im militärischen Bereich

In der öffentlich zugänglichen Literatur finden sich einige dokumentierte Beispielen der unabsichtlichen elektromagnetischen Interferenz durch HPEM. Auf internationale Konferenzen (z.B.: EUROEM 2008) wurden Vorfälle dieser Art präsentiert. Nachfolgend wird eine Auswahl aufgelistet:

- Im Panama Kanal passierte 1992 ein Vorfall durch unbeabsichtigte elektromagnetische Interferenz. Dabei wurde das schiffseigene Radar-System nicht abgeschaltet und beim Vorbeifahren das Computersystem der Kanalzone zerstört. (Leach & Alexander, 1995)
- In München ereignete sich 1984 ein Unfall mit einem Kampfflugzeug. Das Flugzeug stürzte ab nachdem der Pilot zu nahe an einem Radiosender vorbeigeflogen ist und dadurch Störsignale vom Sender empfangen hatte (Leach & Alexander, 1995)
- Mehrere Nachrichtenagenturen berichteten 1998 von der Anfälligkeit des Helikopters UH-60 Black Hawk gegenüber elektromagnetischer Interferenz. In diesem Typ Hubschrauber kamen 22 Menschen um, wobei die Unfälle durch Missachtung der Sicherheitsabstände zu Radar Stationen verursacht wurden. (Giri D. , 2008)

Weitere Vorfälle sind sehr wahrscheinlich, jedoch durch Klassifizierung nicht zugänglich. Diese Tatsache wurde auch im KIRAS Projekt SEMB festgestellt.[27]

[27] KIRAS SEMB, „Sicherheit gegen elektromagnetische Bedrohungen“, Weblink: http://www.kiras.at/gefoerderte-projekte/detail/?tx_ttnews[tt_news]=281&cHash=6c262ca07bf17237e4b9f534cf535752, abgerufen am 15.06.2015

# 3 Wirkungen elektromagnetischer Felder und Wellen auf den Menschen

Um nun den Konnex zwischen elektromagnetischen Angriffen und gesundheitlichen Auswirkungen herzustellen wird in diesem Kapitel eine Übersicht über Wirkungen elektromagnetischer Felder und Wellen auf den Menschen gegeben. Die Bewertungsgrößen werden aufgezählt und zusätzlich wird auf internationale Standards und Richtlinien im Bereich der Expositionsbewertung eingegangen. Da die diskutierten elektromagnetischen Störquellen überwiegend im Hochfrequenzbereich arbeiten, wird diesem Bereich des elektromagnetischen Spektrums größere Aufmerksamkeit gewidmet.

Die gesundheitlichen Auswirkungen infolge Exposition durch elektromagnetische Strahlung im Hochfrequenzbereich auf Menschen oder Tiere, hängen von zahlreichen Faktoren ab. Einerseits ist dies die Modulationsart (CW oder gepulst) andererseits sind dies Faktoren wie die Intensität der einfallenden elektrischen und/oder magnetischen Feldstärke sowie die Frequenz des Feldes, die Einwirkungsdauer oder ob sich das bestrahlte Lebewesen im Nah- oder Fernfeld der elektromagnetischen Quelle befindet. Der Energieeintrag in das Gewebe wird durch die Stärke des elektrischen oder magnetischen Feldes, die Leistungsabgabe der Quelle, die Energieabsorption des Gewebes und die Verteilung und Penetration im biologischen Gewebe beeinflusst. Diese Größen und Einflussfaktoren hängen alle mit der physischen Konfiguration und den Abmessungen des biologischen Körpers zusammen. Die Bewertung der Exposition gestaltet sich dadurch noch komplizierter, dass auch noch zwischen einer Exposition des gesamten Körpers und Teilkörper Exposition unterschieden werden muss, da in den meisten Fällen unterschiedliche Effekte zu erwarten sind. (ICNIRP, 2009)

Die in Kapitel 2 angeführten elektromagnetischen Störquellen emittieren überwiegend gepulste elektromagnetische Felder. Für eine Expositionsbeurteilung werden in dieser Arbeit die drei häufigsten in der Literatur erwähnten Signale herangezogen. Einerseits sind dies leistungsstarke gepulste Sinussignale (HPM) die ihre gesamte elektromagnetische Energie gebündelt bei einer Frequenz abgeben und andererseits sind dies sehr kurze Pulse mit niedrigen Anstiegszeiten (UWB), die ihre Energie über einen weiten Bereich des elektromagnetischen Spektrums verteilen. Die dritte Signalart stellen gedämpfte Sinussignale dar, welche die Eigenschaften von HPM und UWB kombinieren. Um nun die Auswirkungen solcher „nicht – letalen“ Systeme auf die menschliche Gesundheit zu untersuchen, ist es notwendig die zugrunde liegenden Bewertungsgrößen und biologischen Effekte zu kennen. Diese werden in Kapitel 3.1 und Kapitel 3.2 diskutiert. Des Weiteren werden in Kapitel 3.3 gängige Schutzkonzepte, Standards, Normen und Regulierungen analysiert, um mögliche Grenzwertüberschreitungen aufzuzeigen und Ansätze für Verringerung der Exposition zu geben.

## 3.1 Bewertungsgrößen

Zur Beurteilung des elektromagnetischen Feldes im Hochfrequenzbereich werden die Größen elektrische Feldstärke E (V/m) und magnetische Feldstärke H (A/m) herangezogen. Im Fernfeld der Quelle wird das hochfrequente Feld auch oft durch die Leistungsflussdichte S ($W/m^2$) charakterisiert. Um eine Verbindung zur Expositionsbewertung und zum Strahlenschutz für biologisches Gewebe zu schaffen benötigt man weitere physikalische Größen um die Interaktion der nicht-ionisierenden Strahlung mit biologischem Gewebe z.B. absorbierte Energie im Gewebe zu beschreiben. Eine Auflistung von physikalischen Größen die zur Expositionsbewertung unabdingbar sind, wird in Tabelle 3-1 gegeben.

| Größe | Kürzel | Einheit |
|---|---|---|
| Spezifische Absorptionsrate | SAR | W/kg |
| Spezifische Absorption | SA | J/kg |
| Leistungsflussdichte | S | $W/m^2$ |
| Elektrische Feldstärke | E | V/m |
| Magnetische Feldstärke | H | A/m |
| Freiraumwellenwiderstand | $Z_0$ | Ω |
| Stromdichte | J | $A/m^2$ |
| Konduktivität | σ | $S/m^2$ |
| Permittivität | ε | A·s/V·m |

Tabelle 3-1 Physikalische Größen und Einheiten die zur Expositionsbewertung und Berechnung im Hochfrequenzbereich verwendet werden

Als eine wichtige dosimetrische Größe gilt die spezifische Absorptionsrate (SAR). Sie stellt das Maß für die absorbierte Leistung von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern in biologischem Gewebe dar. Diese Absorption führt zu Erwärmung des betrachteten Gewebes durch dielektrische Erwärmung[28], da polare Moleküle durch die elektrische Feldkomponente eine dynamische Orientierung im Feld erfahren können. Diese Umorientierung führt zu Reibungsverlusten, wobei die Zusatzbewegung der Molekularbewegung[29] überlagert ist und somit zu einer messbaren Erhöhung der Temperatur führt. Berechnen lässt sich dieser dielektrische Verlust über Formel 3-1, wobei über

[28] In der Literatur auch als dielektrische Verluste bezeichnet.

[29] Die Molekularbewegung wird auch als Brownsche Bewegung bezeichnet.

das Volumen V des betrachteten Gewebes integriert wird. Der Verlustwinkel δ tritt zwischen den Vektoren der elektrischen Feldstärke E (V/m) und der elektrischen Flussdichte D (A·s/m$^2$) auf wie in Abbildung 3-1 dargestellt wird.

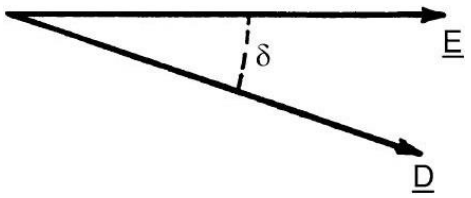


Abbildung 3-1 Verlustwinkel δ zwischen dem E-Feld Vektor und dem Vektor der elektrischen Flussdichte zur Verdeutlichung der dielektrischen Verluste

Nur im Fall, dass dieser Winkel ungleich null ist werden dielektrische Verluste im Gewebe produziert. Mithilfe der Kreisfrequenz *ω (2·π·f)* und der elektrischen komplexwertigen Permittivität $\underline{\varepsilon}$ ergibt sich:

$$P = \int_0^V |E|_{eff}^2 \cdot \varepsilon_0 \cdot \underline{\varepsilon} \cdot \omega \cdot \cos(90° - \delta) \cdot dV \qquad 3\text{-}1$$

(Pfützner, 2012).

Die SAR (W/kg) wird durch Formel 3-2 beschrieben, wobei diese Definitionsgleichung die zeitliche Ableitung des Eintrages der elektromagnetischen Energie dW (Joule) in das Gewebe darstellt, die pro Masseneinheit dm (kg) absorbiert wird und sich auf ein Volumenelement dV (m$^3$) mit der Dichte ρ (kg/m$^3$) bezieht.

$$SAR = \frac{d}{dt}\left(\frac{dW}{dm}\right) = \frac{d}{dt}\left(\frac{dW}{\rho \cdot dV}\right) \qquad 3\text{-}2$$

Zusätzlich kann man die SAR auch über die Temperaturerhöhung des Gewebes berechnen. Über die spezifische Wärmekapazität $c_{Gewebe}$ (J/kg·°C) und der Temperaturerhöhung *dT* (°C) ergibt sich folgende Gleichung 3-3.

$$SAR = c_{Gewebe} \cdot \frac{dT}{dt} \qquad 3\text{-}3$$

Eine weitere Möglichkeit besteht darin die SAR über die elektrische Stromdichte $J_{Gewebe}$ (A/m$^2$) und der elektrischen Feldstärke $E_{Gewebe}$ (V/m) zu berechnen. Mit der elektrischen Konduktivität σ (S/m) und der Beziehung $J = \sigma \cdot E$ ergeben sich die Gleichungen 3-4 und 3-5 in den drei Raumrichtungen:

$$SAR(x,y,z) = \frac{\sigma(x,y,z) \cdot |E(x,y,z)|_{Gewebe}^2}{\rho(x,y,z)} \qquad 3\text{-}4$$

$$SAR(x,y,z) = \frac{|J(x,y,z)|_{Gewebe}^2}{\sigma(x,y,z) \cdot \rho(x,y,z)} \qquad 3\text{-}5$$

(ICNIRP, 2009).

Eine andere wichtige Beurteilungsgröße zur Expositionsbewertung in gepulsten Feldern stellt die spezifische Absorption (SA) dar. Sie wird berechnet um abschätzen zu können, ob das sogenannte Mikrowellenhören auftreten kann, auf das in Kapitel 3.2 näher eingegangen wird. Die SA (J/kg) berechnet sich als das zeitliche Integral der spezifischen Absorptionsrate wie folgt:

$$\mathrm{SA} = \int_0^t \mathrm{SAR} \cdot \mathrm{dt} = \frac{\mathrm{dW}}{\mathrm{dm}} = \frac{\mathrm{dW}}{\rho \cdot \mathrm{dV}} \qquad 3\text{-}6$$

(IEEE, 2005).

Da hier Exposition durch gestrahlte und nicht durch leitungsgeführte elektromagnetische Felder evaluiert wird ist der Wellenwiderstand des freien Raumes im Fernfeld $Z_0$ ($120 \cdot \pi\ \Omega \sim 377\ \Omega$) auch eine wichtige Größe für Berechnungen. Er stellt den Zusammenhang zwischen E- und H-Feldern eindeutig dar, wenn Fernfeldbedingungen gegeben sind. Diese Größe kann zur Berechnung der Leistungsflussdichte im Fernfeld verwendet werden und wird nachfolgend dargestellt:

$$\mathrm{S} = \mathrm{E} \times \mathrm{H} = \frac{\mathrm{E}^2}{\mathrm{Z}_0} \qquad 3\text{-}7$$

Garn et al. (2013).

## 3.2 Biologische Effekte

Hochfrequente elektromagnetische Strahlung kann, durch Absorption im menschlichen Gewebe, zur Erhöhung der Körperkerntemperatur führen, wenn gewisse Schwellen von Expositionsparametern wie z.B. der elektrischen Feldstärke, der vom Körper aufgenommenen Energie und der Einwirkdauer überschritten werden. Genauer gesagt kann der menschliche Organismus bei Überschreitung dieser Schwellen die körpereigene Thermoregulation nicht mehr aufrechterhalten und es beginnt eine gesundheitsschädliche Erwärmung von Gewebe. Durch Studien wurde belegt, dass hochfrequente elektromagnetische Strahlung die im Körper eine absorbierte Leistung von weniger als 4 W/kg (Ganzkörper SAR) gemittelt über 6 Minuten verursacht, zu keinen gesundheitsschädlichen Effekten führt. Wird jedoch eine höhere Exposition durch solche Strahlung verursacht kann dies zu Überforderung der Thermoregulation im Körper führen und gesundheitsschädliche Folgen nach sich ziehen. Wobei in verschiedenen Geweben unterschiedliche Schwellen durch Frequenzabhängigkeit der Leistungsaufnahme auftreten. (Nitsch, Sabath, & Schenk, 2005)

Die Eindringtiefe elektromagnetischer Strahlung in den Körper hängt neben der Frequenz auch stark vom Wassergehalt des jeweiligen Gewebes ab. Wenn man Knochengewebe mit relativ geringem Wassergehalt betrachtet ist die Eindringtiefe höher als z.B. in Muskelgewebe mit höherem Wassergehalt. Dabei nimmt die Eindringtiefe mit zunehmender Frequenz ab. Beispielsweise beträgt die mittlere Eindringtiefe bei einer Frequenz von 0,5 GHz in Muskelgewebe ca. 17 mm, bei einer

Frequenz von 2,45 GHz (Mikrowellenherd) noch 6 mm und oberhalb von 10 GHz nur noch 0,2 mm oder weniger. (Kitchen, 2001)

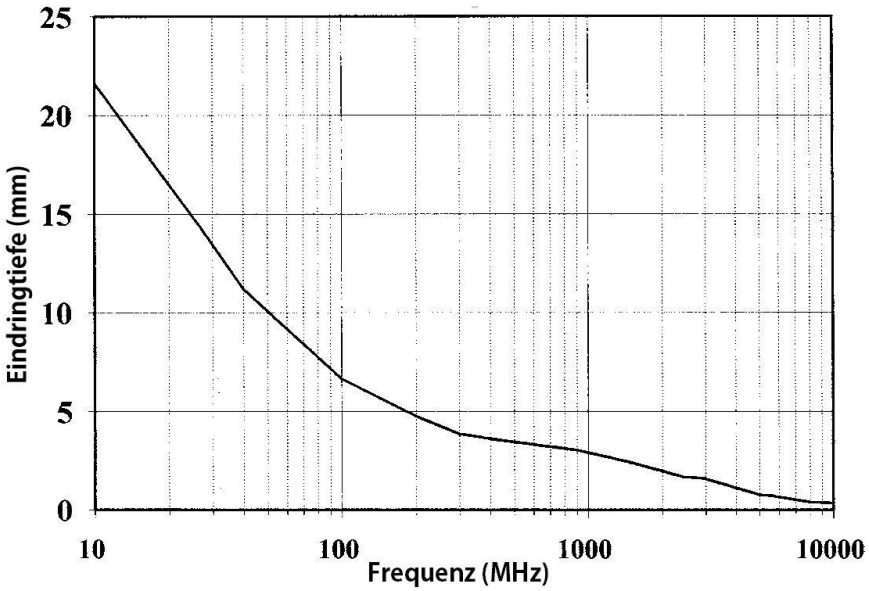


Abbildung 3-2 Eindringtiefe elektromagnetischer Strahlung in Gewebe mit hohem Wassergehalt (Kitchen, 2001)

Im Vergleich zu CW Strahlung wird die Expositionsberechnung durch gepulste Felder anderweitig behandelt, denn gepulste elektromagnetische Strahlung weist gegenüber CW Strahlung, mit der gleichen durchschnittlichen Rate an abgegebener Energie in Gewebe, generell eine höhere biologische Wirksamkeit auf. Insbesondere, wenn der biologische Effekt über einem wohl definierten Schwellwert ausgelöst wird ICNIRP (1996).

Generell herrscht ein Mangel an Untersuchungen zu biologischen Auswirkungen von gepulsten hochfrequenten elektromagnetischen Feldern. Eine Ausnahme stellt hier das Phänomen des Mikrowellenhörens dar. Dieser Effekt ist in vielen Studien behandelt worden und laut Lin (1999) der am besten untersuchte Effekt, der durch gepulste Mikrowellenstrahlung hervorgerufen werden kann. Er basiert auf einer Absorption elektromagnetischer Strahlung in Gewebe des Kopfes. Dabei entsteht eine thermoelastische Schalldruckwelle, die durch Knochenleitung in das Innenohr gelangt und dort die Cochlea Rezeptoren aktiviert, die beim Normalen Hören auch aktiviert werden. Dieses Phänomen wurde bei Menschen und Labortieren als Geräusch nachgewiesen. Es wird oft als klickender, knackender oder summender Ton beschrieben (ICNIRP, 1998).

Wie von der WHO in einem Faktenblatt[30] erwähnt, emittieren Radaranlagen gepulste Signale. Zur Generierung ihrer Hochfrequenzsignale verwenden sie Magnetrone, welche in Kapitel 2 behandelt wurden. Diese elektromagnetische Strahlung von Radaranlagen kann im menschlichen Körper

[30] WHO…World Health Organisation – Weltgesundheitsorganisation, Weblink: http://www.who.int/peh-emf/publications/facts/fs226/en/, abgerufen am 11.November 2015

biologische Effekte hervorrufen, die auf Erwärmung von Gewebe beruhen. Üblicherweise arbeiten Radaranlagen im Frequenzbereich von 300 MHz bis 15 GHz und somit im Hochfrequenzbereich. In diesem Teil des elektromagnetischen Spektrums interagieren elektromagnetische Felder und Wellen unterschiedlich mit dem menschlichen Körper. Hochfrequenzfelder unter 10 GHz dringen in das exponierte Gewebe ein und erzeugen Erwärmung infolge von Energieabsorption. Dabei ist die Eindringtiefe proportional zu 1/f, 1/μ und 1/ σ [31]. Die Absorption von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern in biologischem Gewebe wird mit den Messgrößen spezifische Absorptionsrate (SAR) und spezifische Absorption (SA) bestimmt, worauf in Kapitel 3.1 eingegangen wurde. Felder über 10 GHz hingegen werden größtenteils an der Hautoberfläche absorbiert, wobei nur ein geringer Anteil der Energie in die tiefer liegenden Gewebe eindringt. Die wesentliche Messgröße hierfür ist die elektrische Leistungsdichte S ($W/m^2$), die laut WHO ab 1000 $W/m^2$ zu negativen gesundheitlichen Auswirkungen führen kann (WHO, 2013). Da HPM – Quellen überwiegend mit Magnetronen betrieben werden haben ihre Ausgangssignale den gleichen Charakter wie Signale von Radaranlagen. Durch diese Ähnlichkeit der Pulsung, Pulsdauer und des Frequenzbereichs der Signale werden Wirkungen dieser elektromagnetischen Felder und Wellen für die Expositionsbeurteilung von HPM – Quellen relevant sein, die auch bei Studien über Radaranlagen gefunden wurden. Effekte die hier auftreten können sind auf Gewebeerwärmung zurückzuführen.

Bei UWB – Pulsen ist die Frage der auftretenden Effekte nicht trivial zu beantworten. Pulse dieser Art können sehr hohe elektrische Feldstärken im Bereich von mehreren 100 kV/m in sehr kurzer Zeit (ps bis ns) erreichen. Biologische Effekte auf den Menschen sind nicht gänzlich erforscht, da in diesem Bereich die Anzahl der durchgeführten Studien rar ist. Die Klassifizierung von Forschungsergebnissen spielt hier auch eine wichtige Rolle, da die im militärischen Bereich erzielten Resultate meistens klassifiziert werden und somit einer breiten Öffentlichkeit nicht zugänglich gemacht werden (Murphy & Merrit, 1999). Bei Pulsen dieser Art wird die gesamte Energie über einen weiten Frequenzbereich in extrem kurzer Zeit abgegeben und dadurch entsteht ein sehr breitbandiges Frequenzspektrum dies bei einer Interaktion mit biologischem Gewebe zur Kombination von verschiedenen Effekten führen kann. Laut Lin (1999) könnte hier prinzipiell das Konzept der gleichzeitigen Exposition durch Felder mit mehreren Frequenzen angewandt werden. Dieses ist z.B. in ICNIRP (1998) beschrieben und wird in Kapitel 3.3.1 angeführt.

Andere Effekte als Gewebeerwärmung, die durch gepulste Hochfrequenzstrahlung ausgelöst wurden sind in der Literatur beschrieben, jedoch ist nicht gesichert wodurch diese ausgelöst wurden. Zum Beispiel wurden durch Mikrowellenstrahlung hervorgerufene Körperbewegungen und Schreckreaktionen bei Mäusen (Brown , Lu, & Elson, 1994) und Ratten (Raslear, et al., 1992) beobachtet. Andere Studien berichteten von Krampfanfällen und Betäubung, die bei Ratten durch gepulste Mikrowellenstrahlung aufgetreten sind (Guy & Chou, 1982). Diese Effekte könnten auch thermische

[31] f....Frequenz des elektromagnetischen Feldes (Hz), μ…Permeabilität des Gewebes (H/m), σ…elektrische Leitfähigkeit des Gewebes (S/m), (Prechtl, 1994)

Ursachen haben. Tabelle 3-2 stellt einen Auszug von Studien über biologische Effekte durch gepulste elektromagnetische Strahlung im Hochfrequenz – und Mikrowellenbereich dar. Humanstudien und Tierstudien sind gleichermaßen aufgelistet, da biologische Effekte auch bei Tieren dokumentiert wurden. Die Expositionsbedingungen beim Mikrowellenhören waren stets so, dass gezielt der Kopf des Menschen oder des Tieres bestrahlt wurde. Die Tabelle konnte nicht vollständig ausgefüllt werden, da in der Literatur nicht immer die gleichen Parameter angeführt wurden.

| Biologischer Effekt | Spezifische Absorption | Leistungsflussdichte | Pulsdauer | Zusatzinfo |
|---|---|---|---|---|
| **Mikrowellenhören** | 16 mJ/kg | - | 10 µs | Mensch exponiert bei 2,45 GHz |
| | - | 2,3 – 40 µJ/cm² | 1 - 32 µs | Mensch exponiert bei 2,45 GHz und 3 GHz |
| | 0,6 – 180 mJ/kg | 1,5 – 1240 µJ/cm² | 1 - 32 µs | Exposition verschiedener Tierarten (Ratten, Katzen, Hunde) bei 918 MHz und 8,6 GHz |
| **Bewusstlosigkeit** | 28 kJ/kg | - | 1 µs - 360 ms | Ratte exponiert bei 915 MHz |
| **Körperbewegungen/ Schreckreaktionen** | 290 J/kg | - | 50 – 200 ms | Ratten und Mäuse, Expositionsfrequenz 1,25 GHz |
| | 900 J/kg | - | - | Nagetier, Expositionsfrequenz 1,25 GHz |
| **Verhaltensänderungen nach der Exposition** | 0.58 J/kg | 12.8 mJ/cm² | 80 ns | Nagetier, 200 Pulse bei 3 GHz |
| **Veränderungen an Synapsen** | 1,48 kJ/kg | - | 0,5 – 2 µs | Gefrierschnitt durch den Hippocampus eines Rattenhirns, 9,3 GHz |

Tabelle 3-2 Ausgelöste biologische Effekte durch HPM Pulse (Lin, 1999), (Elder & Chou, 2003) , (Seaman, 2009)

Wie oben beschrieben sind Effekte wie Schreckreaktionen von Tieren auf Basis solcher Studien dokumentiert. Die zugrunde liegenden Effekte sind aber noch nicht geklärt. Teilweise wird eine Verbindung mit dem Mikrowellenhöreffekt vermutet. Weltweit wird kontrovers über solche Effekte, sogenannte „nicht-thermische“ und „Niedrigdosiseffekte“ diskutiert. Im Hochfrequenzbereich gelten einzig und allein thermische Wirkungen (Gewebeerwärmung) und der Mikrowellenhöreffekt, der auf

thermoelastische Expansion im Innenohr zurückzuführen ist, als gesichert. Dabei entsteht die Erwärmung durch Wechselwirkung hochfrequenter elektromagnetischer Strahlung mit biologischen Systemen. Der Effekt kann durch lokale, Teilkörper oder Ganzkörper Exposition auftreten. Über die komplexe Permittivität und die elektrische Leitfähigkeit werden elektrische Felder und Ströme im Körper induziert. (ICNIRP, 2009), (Schmid, Cecil, Petric, Neubauer, & Pérez , 2008)

Bei UWB Pulsen mit Pulsweiten im Bereich von 1 – 10 ns und sehr kurzen Anstiegszeiten von mehreren hundert ps wird die Energie über einen weiten Frequenzbereich verteilt. Dies bedeutet z.B. eine Energieverteilung von einigen 10 kHz bis zu wenigen GHz. Der Spitzenwert der elektrischen Feldstärke kann dabei sehr hohe Werte erreichen und ist durch die Durchbruchspannung in Luft begrenzt. Daraus resultieren eine sehr hohe Energieabsorption pro abgegebenem Puls und eine sehr niedrige durchschnittliche SAR (abhängig von der Puls Repetitionsrate). Die Beziehung des Spitzenwertes der SAR zur durchschnittlichen SAR ist viel größer als es bei HPM Pulsen der Fall ist und wirft die Frage auf, ob derartige Pulse überhaupt biologische Effekte in Gewebe hervorrufen (ICNIRP, 2009). Auf diese Frage wird in Kapitel 4.4 genauer eingegangen.

## 3.3 Richtlinien und Normen

Um nun die in Kapitel 3.2 angedeuteten nachteiligen Auswirkungen in biologischem Gewebe durch (gepulste) hochfrequente elektromagnetische Strahlung zu begrenzen haben mehrere Kommissionen und Organisationen Richtlinien und Standards eingeführt. In diesen Dokumenten werden Grenzwerte beschrieben, bei deren Einhaltung, nach derzeitigem wissenschaftlichen Stand, keine gesundheitsschädigenden Auswirkungen durch nicht ionisierende Strahlung zu erwarten sind. Ausgehend von einer umfangreichen Literaturrecherche werden die drei wichtigsten Dokumente über Grenzwert Konzepte im Bereich biologischer Effekte gepulster elektromagnetischer Felder ausgewählt und nachfolgend diskutiert. Dies sind für diese Arbeit einerseits die Richtlinie von ICNIRP aus dem Jahre 1998 (ICNIRP, 1998), der Standard C95.1 von IEEE (IEEE, 2005) und der NATO Standard STANAG 2345 aus dem Jahre 2003 (NATO, 2003). Diese drei Dokumente stellen auch die Basis für andere in der Literaturrecherche gefundenen Empfehlungen, Normen und Standards dar. Im Folgenden werden sie behandelt, um die Grenzwert Bildung zu verstehen.

Aus der derzeitigen Sicht der Wissenschaft können keine Langzeiteffekte als Basis der Grenzwerte solcher Dokumente herangezogen werden. In Summe betrachtet gibt es bis heute keine Evidenz, dass nichtionisierende Strahlung Langzeiteffekte wie beispielsweise Krebs auslösen. Die Grenzwerte der oben angeführten Dokumente dienen daher nur dazu, einen Schutz vor gesicherten Effekten zu bieten. (WHO, 2006)

### 3.3.1 ICNIRP 1998

Die ICNIRP Richtlinien sind von den meisten europäischen Ländern berücksichtigt worden und in nationalen Umsetzungen eingeflossen. Das Dokument „Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz)“ wurde im Jahre 1998 von ICNIRP veröffentlicht. Es basiert auf einer umfangreichen Auswertung veröffentlichter und frei zugänglicher Studien von biologischen Effekten durch nicht-ionisierende Strahlung und einer Evaluation von Gesundheitsrisiken durch Exposition mit nicht-ionisierender Strahlung. Das Hauptziel dieser Veröffentlichung war es Expositionsgrenzwerte festzulegen die Schutz vor bekannten gesundheitsgefährdenden Effekten geben sollen. Dabei wurden nur etablierte biologische Kurzzeit – Effekte wie Stimulation von peripheren Nerven und Muskeln, Schocks und Verbrennungen durch Angreifen von leitenden Objekten und Temperaturerhöhung durch Absorption von Energie während einer Exposition von elektromagnetischer Strahlung für die Grenzwertbestimmung herangezogen. Dies bedeutet, dass von ICNIRP Langzeiteffekte wie ein erhöhtes Krebsrisiko durch elektromagnetische Wellen überprüft wurden, aber als nicht geeignet für die Grenzwertbestimmung von ICNIRP eingestuft wurden, da diese Effekte als nicht gesichert gelten. (ICNIRP, 1998)

Allgemein unterscheidet ICNIRP zwischen Expositionsgrenzwerte Klassen, dies sind einerseits die Klasse der Allgemeinbevölkerung und andererseits der beruflich exponierte Personen[32]. Die Grenzwerte für die allgemeine Bevölkerung sind strenger ausgelegt. Zusätzlich unterteilt ICNIRP in zwei Grenzwertkategorien den sogenannten Basisgrenzwerten und Referenzwerten wie nachfolgend erläutert wird.

**Basisgrenzwerte**: Diese Grenzwerte gelten für zeitliche – veränderliche elektrische, magnetische oder elektromagnetische Felder und basieren auf gesicherten biologischen Effekten. Abhängig von der Frequenz werden die Größen spezifische Absorptionsrate SAR (W/kg), Stromdichte J ($A/m^2$), die Leistungsflussdichte S ($W/m^2$) und die spezifische Absorption SA (J/kg) bei gepulsten Feldern verwendet. Von den genannten physikalischen Größen kann nur die Leistungsflussdichte in Luft, außerhalb des Körpers, gemessen werden. Die anderen Größen werden meist mit numerischen Simulationen berechnet, da diese nicht direkt zugänglich sind. Zum Schutz vor gesicherten negativen gesundheitlichen Auswirkungen durch elektromagnetische Strahlung müssen die Basisgrenzwerte eingehalten werden. (ICNIRP, 1998)

**Referenzwerte**: Die Kategorie Referenzwerte dient dazu eine Expositionsabschätzung in der Praxis durchführen zu können und zu analysieren, ob Basisgrenzwerte eventuell überschritten sind, da die Größen SAR und Stromdichte wie schon erwähnt nicht direkt im Körper messbar sind. Diese

[32] Beruflich exponierte Personen stellen in diesem Zusammenhang Erwachsene dar die unter ihnen bekannten Bedingungen bestrahlt werden. Durch ihre Ausbildung sind sie im Stande Schutzmaßnahmen einzuleiten. Im Gegensatz dazu sind sich Personen der Allgemeinbevölkerung (Personen jeden Alters) meistens ihrer Exposition durch EMF nicht bewusst. Zudem können in der Bevölkerung vulnerable Personengruppen wie Schwangere, Kinder oder Kranke sein. (ICNIRP, 1998)

Referenzwerte sind aus den Basisgrenzwerten abgeleitet und sollen sicherstellen, dass bei Einhaltung dieser auch die Basisgrenzwerte in jedem Fall eingehalten werden. Eine Überschreitung der Referenzwerte ist im Gegenzug nicht gleichbedeutend mit einer Verletzung der Basisgrenzwerte. In diesem Fall muss mittels detaillierter Analyse z.B. Computersimulation festgestellt werden, ob auch eine Überschreitung der Basisgrenzwerte auftritt oder diese eingehalten werden. Abgeleitete Referenzwerte sind die elektrische Feldstärke E (V/m), die magnetische Flussdichte B (T), die magnetische Feldstärke H (A/m), die äquivalente Leistungsflussdichte $S_{eq}$ (W/m$^2$) und Ströme die durch die Extremitäten fließen $I_L$ sowie Kontaktströme $I_C$ die mit Wahrnehmung oder anderen indirekten Effekten zusammenhängen. Tabelle 3-3 fasst diese Größen noch einmal zusammen. (ICNIRP, 1998)

| Basisgrößen | Referenzgrößen |
|---|---|
| J (A/m$^2$), SAR (W/kg), SA(J/kg), S (W/m$^2$) | E (V/m), H (A/m), B (T), $S_{eq}$ (W/m$^2$), $I_L$ (A), $I_C$ (A) |

Tabelle 3-3 Basisgrenzwerte und Referenzwerte zur Beurteilung der Exposition durch elektromagnetische Strahlung (ICNIRP, 1998)

Hohe Luftfeuchtigkeit, hohe Umgebungstemperaturen oder körperliche Aktivität tragen dazu bei, die Kernkörpertemperatur ansteigen zu lassen. Bei einer zusätzlichen Exposition durch hochfrequente elektromagnetische Wellen über ein bestimmtes Ausmaß hinausgehend können thermoregulatorische Prozesse im Körper nicht mehr zuverlässig arbeiten, es können sowohl belästigende als auch gesundheitsschädigende Effekte wie Gewebeüberhitzung auftreten. Um diesem Umstand entgegenzuwirken wurden in dieser Richtlinie der ICNIRP Sicherheitsfaktoren eingeführt die für die Allgemeinbevölkerung strengere Grenzwerte als für berufliche exponierte Personen vorsieht. Um genauer zu sein wurde, der in Kapitel 3.2 erwähnte Wert von 4 W/kg, für beruflich exponierte Personen um einen Faktor 10 verringert und Grenzwerte für die Allgemeinbevölkerung noch einmal um den Faktor 5. (Nitsch, Sabath, & Schenk, 2005)

Tabelle 3-4 listet nun die SAR Basisgrenzwerte im Hochfrequenzbereich für die Allgemeinbevölkerung und berufliche exponierte Personen auf. $SAR_{GK}$ (Ganzkörper) bezeichnet die SAR gemittelt über den ganzen Körper. Die Teilkörper SAR gemittelt über 10 g zusammenhängendes Gewebe (Kopf und Rumpf) wird mit $SAR_{10g}$ bezeichnet und die Teilkörper SAR in den Gliedmaßen trägt die Bezeichnung $SAR_{10gL}$ (Limbs). Alle SAR Werte sind auf eine Expositionsdauer von 6 Minuten anzuwenden. (ICNIRP, 1998)

| Frequenzbereich | Grenzwertklasse | $SAR_{GK}$ (W/kg) | $SAR_{10g}$ (W/kg) | $SAR_{10gL}$ (W/kg) |
|---|---|---|---|---|
| 100 kHz – 10 GHz | Allgemeinbevölkerung | 0,08 | 2 | 4 |
| | Beruflich exponiert | 0,4 | 10 | 20 |

Tabelle 3-4 Basisgrenzwerte für die Allgemeinbevölkerung und beruflich exponierte Personen für zeitlich veränderliche elektromagnetische Felder im Frequenzbereich von 100 kHz bis 10 GHz (ICNIRP, 1998)[33]

Über 10 GHz bis 300 GHz gibt ICNIRP dann als Basisgrenzwerte die Leistungsflussdichte S wie in Tabelle 3-5 angeführt an:

| Frequenzbereich | Grenzwertklasse | S (W/m) |
|---|---|---|
| 10 GHz – 300 GHz | Allgemeinbevölkerung | 10 |
| | Beruflich exponiert | 50 |

Tabelle 3-5 Basisgrenzwert für die Leistungsflussdichte im Frequenzbereich von 10 GHz – 300 GHz (ICNIRP, 1998)[34]

Tabelle 3-6 und Tabelle 3-7 listen eine Auswahl von der von ICNIRP empfohlenen Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung und beruflich exponierte Personen auf. Die äquivalente Leistungsflussdichte $S_{eq}$ für ebene Wellen kann mit Formel 3-7 im Fernfeld über die elektrische Feldstärke und den Freiraumwellenwiderstand berechnet werden.

| Frequenzbereich | E-Feld (V/m) | H-Feld (A/m) | $S_{eq}$ (W/m$^2$) |
|---|---|---|---|
| 1 – 10 MHz | $87 / f^{(1/2)}$ | 0,73 / f | - |
| 10 – 400 MHz | 28 | 0,073 | 2 |
| 0.4 – 2 GHz | $1{,}375 \cdot f^{(1/2)}$ | $0{,}0037 \cdot f^{(1/2)}$ | f / 200 |
| 2 – 300 GHz | 61 | 0,16 | 10 |

Tabelle 3-6 Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung für zeitlich veränderliche elektromagnetische Felder im Frequenzbereich von 1 MHz – 300 GHz (ICNIRP, 1998)[35]

[33] Für gepulste Felder gilt hier, dass die anzuwendende Ersatzfrequenz über die Pulsdauer berechnet wird mit f=1/(2 Pulsdauer). Zusätzlich wird im Frequenzbereich von 0,3 – 10 GHz, für Expositionen den Kopf betreffend um das oben erwähnte Mikrowellenhören zu vermeiden, eine Beschränkung der spezifischen Absorption auf 2 mJ/kg für die Allgemeinbevölkerung und 10 mJ/kg für berufliche exponierte Personen festgelegt.

[34] Über 10 GHz beträgt die Mittelungsdauer $68/f^{1,05}$ min (f in GHz). Gilt auch für Tabelle 3-6 und Tabelle 3-7.

[35] Die abgeleiteten Grenzwerte (Referenzwerte) sind so berechnet, dass die Basisgrenzwerte auch bei ungünstigsten Bedingungen eingehalten werden. Feldstärke und Leistungsdichtewerte sind Effektivwerte und bis 10 GHz jeweils über ein Intervall von 6 Minuten zu mitteln. Bei gepulsten elektromagnetischen Feldern gilt eine zusätzliche Begrenzung der Spitzenwerte der Feldstärken auf das 32-fache der Referenzwerte und der Leistungsflussdichtewerte, gemittelt über die Pulsdauer, auf das 1000-fache der Referenzwerte. Dies gilt auch für Tabelle 3-7. (ICNIRP, 1998)

| Frequency Range | E-Field (V/m) | H-Field (A/m) | $S_{eq}$ (W/m$^2$) |
|---|---|---|---|
| 1 – 10 MHz | 610 / f | 1,6 / f | - |
| 10 – 400 MHz | 61 | 0,16 | 10 |
| 0.4 – 2 GHz | $3 \cdot f^{(1/2)}$ | $0{,}008 \cdot f^{(1/2)}$ | f / 40 |
| 2 – 300 GHz | 137 | 0,36 | 50 |

Tabelle 3-7 Referenzwerte für beruflich exponierte für zeitlich veränderliche elektromagnetische Felder im Frequenzbereich von 1 MHz – 300 GHz (ICNIRP, 1998)

Da die oben beschrieben elektromagnetischen Quellen hauptsächlich gepulste Felder abgeben werden, die in ICNIRP beschriebenen Verfahren für gepulste Felder in Kapitel 4 angewandt. Cavagnaro et al. (2012) sowie De Santis et al. (2010) weisen ausdrücklich in ihren Publikationen darauf hin, dass bei gepulsten Feldern die spezifische Absorption von besonderer Bedeutung ist. Die Begrenzung der SA sorgt dafür, das oft zitierte Mikrowellenhören zu unterdrücken. Wobei man hier zwischen Einzelpulsen und mehreren Pulsen, die in einem 6 Minuten Zeitintervall abgegeben werden, unterscheiden muss.

In Bezug auf Interaktion mit biologische Gewebe könnte laut Lin (1999) bei einer Exposition gegenüber sehr kurzen energiereichen Einzelpulsen (UWB Pulse) mit breitem Frequenzspektrum eine Ähnlichkeit zur kombinierten Exposition gegenüber mehrere Quellen unterschiedlicher Frequenz bestehen. In diesem Fall ist es möglich die Auswirkung der biologischen Effekte mithilfe der Analyse einer Summierung multipler Frequenzen zu kalkulieren. ICNIRP gibt hierzu Formeln an die die Summierung durch eine Exposition in elektromagnetischen Feldern mit mehreren Frequenzen an. Für additive Wirkung von mehreren Frequenzen im Hochfrequenzbereich wird die folgende Formel 3-9 angewandt, wobei hier die SAR und die Leistungsdichte S zur gewichteten Summierung beitragen. Die folgende Formel beinhaltet die Terme $SAR_i$ (hervorgerufene SAR bei einer bestimmten Frequenz), $SAR_L$ (SAR Grenzwert), $S_i$ (Leistungsflussdichte bei einer bestimmten Frequenz) und $S_L$ (Leistungsflussdichte Grenzwert).

$$\sum_{i=100\ \mathrm{kHz}}^{10\ \mathrm{GHz}} \frac{SAR_i}{SAR_L} + \sum_{i>10\ \mathrm{GHz}}^{300\ \mathrm{GHz}} \frac{S_i}{S_L} \leq 1 \qquad 3\text{-}8$$

Das gleiche Konzept wird auch für Referenzwerte verwendet wobei für die Summierung der Komponenten der elektrischen Feldstärke die Formeln 3-9 und 3-10 gelten. Die angegebenen Größen sind Referenzwerte[36]. Die folgende Formel beinhaltet die Terme $E_i$ (die elektrische Feldstärke bei einer gewissen Frequenz), $E_{Li}$ (Grenzwert der elektrischen Feldstärke) und a (610 V/m bei beruflicher Exposition und 87 V/m für die Allgemeinbevölkerung).

[36] Referenzwerte sind abgeleitet von den Basisgrenzwerten ICNIRP

$$\sum_{i=1\,Hz}^{1\,MHz} \frac{E_i}{E_{L,i}} + \sum_{i>1\,MHz}^{10\,MHz} \frac{E_i}{a} \leq 1 \qquad 3\text{-}9$$

Die folgende Formel beinhaltet wie oben die Terme Ei und $E_{Li}$ sowie c (610/f V/m für berufliche Exposition und $87/f^{1/2}$ V/m für die Allgemeinbevölkerung).

$$\sum_{i=100\,kHz}^{1\,MHz} \left(\frac{E_i}{c}\right)^2 + \sum_{i>1\,MHz}^{300\,GHz} \left(\frac{E_i}{E_{L,i}}\right)^2 \leq 1 \qquad 3\text{-}10$$

Pulse ohne Trägerfrequenz z.B. UWB Pulse können mit exponentiellen Funktionen dargestellt werden. Dabei ist es möglich den Puls durch seine Anstiegszeit, seiner Pulsdauer und der Abklingzeit zu beschreiben. Mithilfe der Fourier Transformation könnte man dann das Frequenzspektrum des Pulses berechnen und die Komponenten der elektrischen Feldstärke aufsummieren (Lin, 1999). Diese Signale werden in Bezug auf Grenzwertüberschreitungen in Kapitel 4.4 .

### 3.3.2 IEEE C95.1 - 2005

Wie bei ICNIRP basieren die Grenzwerte auch in diesem von IEEE eingeführten Dokument namens „IEEE C95.1 – Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz “ aus dem Jahre 2005 auf einer umfassenden Literaturrecherche und basieren auf Effekten, die als wissenschaftlich gesichert gelten. In mehreren Punkten stimmen die Dokumente der beiden Organisationen überein, IEEE verfolgt auch wie ICNIRP das Konzept der Unterteilung in Grenzwertklassen und Kategorien. Wie bei ICNIRP ist hier auch von Basisgrenzwerten[37] und Referenzwerten[38] die Rede. Bei IEEE werden Schutzniveaus in bestimmten räumlichen Bereichen eingeführt, welche für beruflich exponierte Personen (Controlled Environment) und die Allgemeinbevölkerung (General Public) gelten. Kleine Unterschiede zu ICNIRP bestehen in den Referenzwerten, siehe auszugsweise Tabelle 3-8 und Tabelle 3-9. Auch in diesem Standard kommt größtenteils die 6 Minuten Mittelung zur Expositionsbewertung zum Tragen, Ausnahmen dieser Mittelungszeit werden hier wegen Nichtverwendung bei der späteren Berechnung der Szenarien nicht diskutiert. Auch in diesem Standard gilt wie bei ICNIRP, dass die Einhaltung der Referenzwerte mit einer Einhaltung der Basisgrenzwerte einhergeht.

[37] Engl. Basic Restrictions
[38] Engl. Maximum Permissible Exposure (MPE)

| Frequenzbereich | E-Feld (V/m) | H-Feld (A/m) | S (W/m²) |
|---|---|---|---|
| 1 – 30 MHz | 1842 / f | 16,3 / f | - |
| 30 – 100 MHz | 61,4 | 16,3 / f | - |
| 100 – 300 MHz | 61,4 | 0,163 | 10 |
| 300 – 3000 MHz | - | - | f / 30 |
| 3 – 300 GHz | - | - | 100 |

Tabelle 3-8 Referenzwerte für beruflich exponierte Personen für zeitlich veränderliche elektromagnetische Felder im Frequenzbereich von 1 MHz – 300 GHz (IEEE, 2005)

| Frequenzbereich | E-Feld (V/m) | H-Feld (A/m) | $S_{eq}$ (W/m²) |
|---|---|---|---|
| 1 – 30 MHz | 823,8 / f | 16,3 / f | - |
| 30 – 100 MHz | 27,5 | $158,3 / f^{1,668}$ | - |
| 100 – 400 MHz | 27,5 | 0,0729 | 2 |
| 400 – 2000 MHz | - | - | f / 200 |
| 2 – 100 GHz | - | - | 10 |

Tabelle 3-9 Referenzwerte für beruflich exponierte Personen für zeitlich veränderliche elektromagnetische Felder im Frequenzbereich von 1 MHz – 300 GHz (IEEE, 2005)

Die SAR Basisgrenzwerte sind ident mit den ICNIRP Grenzwerten aus Tabelle 3-4 jedoch auf einen Frequenzbereich von 100 kHz bis 3 GHz beschränkt. Unterschiede werden auch bei der Bewertung von gepulsten elektromagnetischen Feldern deutlich. IEEE C95.1 listet hier 2 wesentliche Kriterien auf für gepulste elektromagnetische Felder im Frequenzbereich von 100 kHz bis 300 GHz:

- Der Spitzenwert (temporär) des Referenzwertes der elektrischen Feldstärke für einen Einzelpuls ist auf 100 kV/m begrenzt, dies entspricht einem Spitzenwert der einfallenden Leistungsflussdichte von 26, 5 MW/m²
- Der zeitlich gemittelte Referenzwert wird bei gepulsten Feldern um einen Faktor 5 reduziert, wenn die Dauer eines Einzelpulses 100 ms nicht überschreitet. Dies bedeutet, dass die spezifische Absorption (betrachtet über ein 6 Minuten Intervall) einen Wert von 28,8 J/kg (beruflich exponiert) und einen Wert von 5,76 J/kg (Allgemeinbevölkerung) nicht überschreiten darf.

Murphy (2009) und Lin (1999) weisen in diesem Zusammenhang auf den beträchtlichen Unterschied der spezifischen Absorption (SA) zwischen beiden Dokumenten (ICNIRP und IEEE) hin der immerhin einen Größenunterschied vom Faktor 3000 aufweist. Es ist offensichtlich, dass ICNIRP und IEEE gepulste elektromagnetische Felder differenziert betrachten, obwohl beide Organisationen

ihre Grenzwerte nach wissenschaftlich gesicherten Effekten erhoben haben. Beide Autoren sehen in der Bewertung von kurzen Pulsen noch eine Lücke, die es mithilfe von biologischen Studien, neuen Modellierungsverfahren und Simulationen zu schließen gilt.

### 3.3.3 NATO STANAG 2003

Ein von der NATO publiziertes Dokument mit dem Titel „NATO STANAG 2345 - Evaluation and Control of Personnel Exposure to Radio Frequency Fields – 3 kHz to 300 GHz“ aus dem Jahre 2003 dient dem Schutz, vor gesundheitsschädigenden Wirkungen die durch elektromagnetische Strahlung verursacht werden können, von Personen, die in NATO Missionen im Einsatz sind. Die Grenzwerte dieses Standards basieren wie bei ICNIRP (1998) und IEEE (2005) auf Tierstudien und Beobachtungen am Menschen. Der Haupteffekt der auch in diesem Dokument zur Festlegung der Grenzwerte im Hochfrequenzbereich herangezogen wurde, ist die Erwärmung von biologischem Gewebe. Die Mittelungszeit zur Berechnung der Grenzwerte beträgt 6 Minuten. Im Gegensatz zu ICNIRP und IEEE existiert in diesem Dokument nur eine Kategorie von Grenzwerten, sogenannte Permissible Exposure Levels (PEL). In Bezug auf gepulste Felder wird im NATO STANAG 2345 erwähnt, dass der Spitzenwert der elektrischen Feldstärke in einem Einzelpuls 200 kV/m nicht übersteigen darf. (NATO, 2003)

Im Vergleich zu ICNIRP und IEEE gibt es bei der Grenzwertbetrachtung einen Unterschied bei der Teilkörper SAR. Hier liegt der Wert bei 8 W/kg und wird über 1g Körpergewebe gemittelt wie Tabelle 3-10 zu entnehmen ist.

| Frequenzbereich | $SAR_{GK}$ (W/kg) | $SAR_{1g}$ (W/kg) | $SAR_{10gL}$ (W/kg) |
|---|---|---|---|
| 100 kHz – 10 GHz | 0,4 | 8 | 20 |

Tabelle 3-10 PELs NATO STANAG im Frequenzbereich von 100 kHz – 6 GHz

Die PEL Werte für die elektrische Feldstärke, magnetische Feldstärke und Leistungsflussdichte sind ident mit den Grenzwerten von IEEE (beruflich exponiert) aus Tabelle 3-8.

### 3.3.4 Zusammenfassung der Grenzwerte gepulste Felder

Tabelle 3-11 gibt noch einmal einen kurzen Überblick über die in Kapitel 3.3.1 bis 3.3.3 beschriebenen Grenzwerte der betrachteten Dokumente. Dabei werden bei gepulsten Feldern jeweils Angaben zu der maximal zulässigen Feldstärke und der äquivalenten Leistungsflussdichte gegeben. ICNIRP und IEEE machen auch Angaben zur spezifischen Absorption die sich auf eine Expositionsdauer von 6 Minuten bezieht und auf eine Gewebemittelung von 10 g. Die SAR Grenzwerte müssen natürlich auch immer eingehalten werden, dazu gibt es aber keine gesonderte Aussage wie diese bei gepulsten Feldern zu berücksichtigen sind.

| Bewertungsgröße | ICNIRP 1998 | IEEE C95.1 | NATO STANAG 2345 |
|---|---|---|---|
| **Feldstärke** | $E_{Spitze} = 32 * E_{RMS}$ | $E_{Spitze} = 100$ kV/m | $E_{Spitze} = 200$ kV/m |
| **Leistungsflussdichte** | $S_{eq_Spitze} = 1000 * S_{eq_RMS}$ | $S_{eq_Spitze} = 26{,}5$ MW/m$^2$ | $S_{eq_Spitze} = 106$ MW/m$^2$ |
| **Spezifische Absorption** | • 10 mJ/kg beruflich<br>• 2 mJ/kg Bevölkerung | • 28,8 J/kg beruflich<br>• 5,76 J/kg Bevölkerung | keine Angabe |

Tabelle 3-11 Zusammenfassung der Grenzwerte für gepulste Felder

In einem anderen Dokument mit dem Titel „DOD 6055.11-Protecting Personnel from Electromagnetic Fields" aus dem Jahre 2009 wird ein Vergleich mit dem NATO Standardization Agreement 2345 (2003) gezogen. Hier wird die Begrenzung des Spitzenwerts der elektrischen Feldstärke im NATO STANAG auf 200 kV/m erwähnt. Laut den Autoren gibt es eine steigende Anzahl von Forschungsergebnissen und Studien die auf keine gesundheitlich nachteiligen Effekte bei der Exposition mit Spitzenwerten der elektrischen Feldstärke von 500 kV/m bis zu 1 MV/m zu erwarten sind. Jedoch wird der Grenzwert der elektrischen Feldstärke in diesem Dokument auch bei 200 kV/m festgelegt. (Department of Defense, 2009)

In der Literaturrecherche wurden weltweit keine Richtlinien oder Standards gefunden, welche explizit Hochleistungspulse wie HPM und UWB behandeln. In einer aktuellen Publikation von Bieth et al. (2013) wird diese Lücke in der frei zugänglichen Literatur bekräftigt. Auch Nitsch und Kollegen (2005) weisen darauf hin, dass der Bereich zur Beurteilung von elektromagnetischen Pulsen im Nanosekundenbereich bisher nicht entsprechend berücksichtigt wurde und somit eine Beurteilung nach geltenden Bestimmungen zum Arbeits- und Immissionsschutz nur schwierig möglich ist. Deshalb werden die oben behandelten Dokumente zur nachfolgenden Expositionserhebung herangezogen.

# 4 Expositionsbeurteilung der analysierten elektromagnetischen Felder

Da sich im Zuge eines Angriffes auf elektronische Geräte oder Systeme von Infrastrukturen mit IEMI Signalen auch Menschen in der näheren Umgebung der abstrahlenden Quellen aufhalten können, ist die Auswirkung dieser abgegebenen elektromagnetischen Strahlung grundsätzlich zu untersuchen. Wie in Kapitel 2 beschrieben kommen durchaus starke elektromagnetische Felder zum Einsatz, d.h. Grenzwertüberschreitungen nach gängigen Richtlinien sind durchaus möglich. Auch Lambrecht (2010) weist in seiner Dissertation auf diesen Punkt hin und gibt an, dass im Zuge von IEMI Attacken durch die hohen Spitzenfeldstärken eine Gefährdung von Menschen möglich ist. Bladel (2004) widmet diesem Thema auch einen Abschnitt und weist auf das Risiko hin. Um nun die in Kapitel 2 behandelten Signale, die bei IEMI Attacken zum Einsatz kommen, mit den in Kapitel 3 behandelten gesundheitlichen Auswirkungen auf den menschlichen Körper zu verknüpfen, ist es nötig Bedrohungsszenarien zu betrachten. Um ein reales Szenario darzustellen sind reale Bedingungen so gut wie möglich abzubilden. Um dies zu erreichen werden die Szenarien einerseits aus der Fachliteratur erhoben und andererseits werden Teile davon abgeschätzt. Dies wird durch die Klassifizierung[39] von Informationen begrenzt.

Während der Erstellung dieser Diplomarbeit wurden Experten auf dem Gebiet der absichtlichen elektromagnetischen Interferenz befragt. Einer dieser Experten, namens Frank Sabath, ist bei der deutschen Bundeswehr (Wehrwissenschaftliches Institut für Schutztechnologien und ABC-Schutz, WIS[40]) beschäftigt. Dieser bestätigte mir im Zuge eines Telefonats, dass Angriffe auf verschiedene Unternehmen stattgefunden haben und die Bedrohung auch weiterhin bestehen bleibt. Detailliertere Informationen bezüglich vergangener Attacken werden aber von Betreibern dieser Infrastrukturen nicht veröffentlicht, da sie einen ökonomischen und politischen Nachteil mit sich bringen würden. Ein anderer Experte der sich seit vielen Jahren mit der Materie beschäftigt ist Daniel Mansson. Er ist an der schwedischen königlichen technischen Hochschule (KTH[41]) beschäftigt und bestätigte mir auch in persönlicher Korrespondenz, dass Angriffe mit IEMI Systemen auf Unternehmen stattgefunden haben und auch davon auszugehen ist, dass diese in Zukunft stattfinden werden. Überdies wurden auf internationalen Konferenzen wie der AMEREM 2006 oder der EUROEM 2008 Vorfälle mit IEMI angeführt.

Ein weiterer Hinweis auf die steigende Bedrohung durch Attacken mit IEMI Quellen ist die wachsende Anzahl an entwickelten IEMI Detektionssystemen. Diese können an allen Seiten von Gebäuden installiert werden um mögliche Angriffe mit IEMI nachzuweisen. Zu diesen Systemen ist

---

[39] Viele der gefunden Studien zum Thema IEMI wurden klassifiziert bzw. wurden Ergebnisse nur unvollständig veröffentlicht.

[40] Wehrwissenschaftliches Institut für Schutztechnologien - ABC-Schutz (WIS), Weblink: http://www.baainbw.de/portal/a/baain/!ut/p/c4/04_SB8K8xLLM9MSSzPy8xBz9CP3I5EyrpHK9pMTE-zDy9lMzUvOKSYr3yzGL9gmxHRQAPpsfO/, abgerufen am 13. Dezember 2014

[41] KTH – Daniel Mansson, https://www.kth.se/profile/manssond/, abgerufen am 13.Dezember 2014

ein Anstieg an öffentlich publizierten Artikeln in den letzten Jahren zu beobachten. Die Vermutung liegt nahe, dass auch hier klassifizierte Dokumente existieren und die Anzahl der Detektionssysteme weit höher ist. Das deutsche Fraunhofer-Institut für Naturwissenschaftlich-Technische Trendanalysen INT[42], die Unternehmen Montena[43], Emprimus[44] und QINETIQ[45] haben bereits marktreife IEMI Detektoren um hier nur einige zu nennen.

Ein oft diskutiertes Problem auf dem Gebiet der elektromagnetischen Kriminalität stellt die Risiko Abschätzung und das Schadenspotential der IEMI Quellen auf elektronische Geräte dar. Dabei wurden schon Konzepte eingeführt die die Verwundbarkeit von Systemen gegenüber Angriffen mit IEMI definieren sollen wie in Abbildung 4-1 angedeutet. Abbildung 4-1 a) zeigt den sogenannten ASC-Würfel aus Mansson et al. (2009) der die Punkte Zugänglichkeit (engl. **A**ccessibility), die Suszeptibilität (engl. **S**usceptibility) und die Konsequenzen (engl. **C**onsequence) aus dem Angriff auf den Würfelachsen aufgetragen hat. Der Ursprung des Würfels befindet sich im linken, unteren und vorderen Eck. Systeme die sich nahe dem Ursprung befinden weisen eine geringe Verwundbarkeit (Vulnerabilität) gegen IEMI Attacken auf, wobei Systeme die vom Ursprung weit entfernt sind eine hohe Vulnerabilität aufweisen. Abbildung 4-1 b) zeigt den von Sabath und Garbe (2009) erarbeiteten HPEM Risikobeurteilungswürfel der die Punkte Bedrohungslevel (engl. Threat Level), Mobilität (engl. Mobility) und die technologische Herausforderung (Technological Challenge) darstellt. Das niedrigste Risiko eines Systems gegenüber einem IEMI Angriff befindet sich in diesem Würfel im linken, hinteren und unteren Eck.

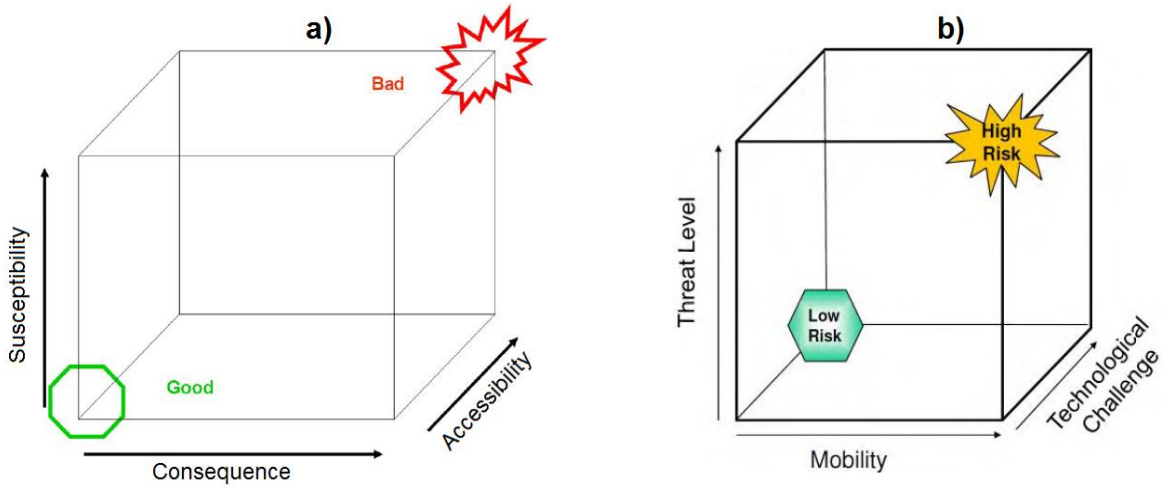


Abbildung 4-1 a)ASC-Risikobewertungswürfel nach Mansson et al. (2009), b)HPEM-Risiko Beurteilungswürfel nach Sabath & Garbe (2009)

[42] Fraunhofer INT, Weblink: http://www.int.fraunhofer.de/de/geschaeftsfelder/elektromagnetischeeffekteund-bedrohungen.html, abgerufen am 27.Dezember 2014
[43] Montena Technology, Weblink: http://www.montena.com, abgerufen am 27.Dezember 2014
[44] Emprimus, Weblink: http://www.emprimus.com/emp-iemi_products/threat-detection-systems.php, abgerufen am 28.Dezember 2014
[45] Qinetiq Detector, Weblink: http://www.interferencetechnology.com/wp-content/uploads/2012/12/Fig43.jpg, abgerufen am 28.Dezember 2014

Für den Zweck dieser Diplomarbeit wird dieses Konzept modifiziert und auf IEMI Attacken umgelegt bei denen sich Menschen im Umfeld von IEMI Quellen und dem Angriffsziel befinden. In Abbildung 4-2 wird ein Würfel dargestellt, der den Grad der elektromagnetischen Exposition andeuten soll, welcher ein Mensch während einer Attacke ausgesetzt sein kann. Abhängig von der Expositionsdauer (spielt bis 6 Minuten eine Rolle), des Abstandes zur Quelle und zur Leistung der Quelle ergibt sich vereinfacht dargestellt der Grad der Exposition. Zusätzlich müssten noch Faktoren wie Polarisation und Modulationsart des Signals und die exponierte Gewebeart berücksichtigt werden, um eine genauere Aussage treffen zu können.

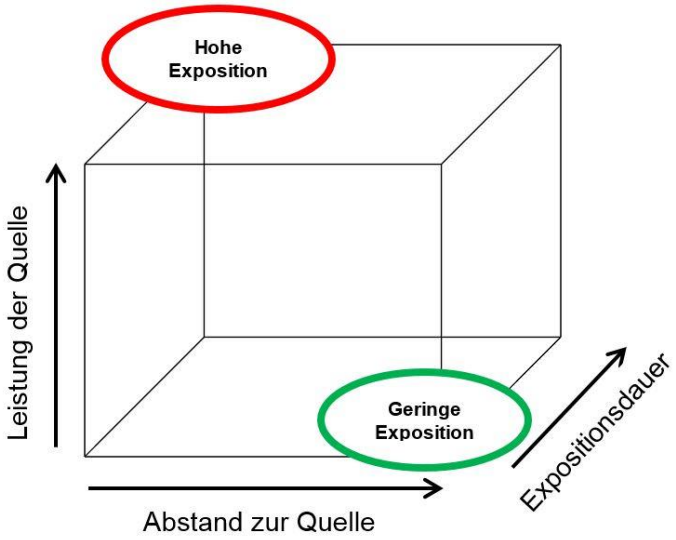


Abbildung 4-2 IEMI Expositionswürfel, im Zuge einer IEMI Attacke kann es zur Exposition von Menschen durch elektromagnetische Strahlung im Hochfrequenzbereich kommen

Um nun die Wahrscheinlichkeit einer IEMI Attacke abschätzen zu können müssen mögliche Ziele definiert werden. In dieser Diplomarbeit werden terroristische oder kriminelle Angriffe auf solche Ziele aus dem österreichischen Programm zum Schutz kritischer Infrastrukturen namens APCIP[46] aus einem Dokument des Bundeskanzleramtes (2008) abgeleitet, welches an das europäische Programm zum Schutz kritischer Infrastrukturen namens EPCIP[47] angelehnt ist. Wobei kritische Infrastrukturen wie folgt definiert sind:

*„Kritische Infrastrukturen sind Anlagen, Systeme und Dienste, die eine wesentliche Bedeutung für die Aufrechterhaltung wichtiger gesellschaftlicher Funktionen haben und deren Störung oder Zerstörung erhebliche Auswirkungen auf die Gesundheit, Sicherheit oder das wirtschaftliche oder soziale*

[46] Austrian Program for Critical Infrastructure Protection (APCIP), Weblink: https://www.bka.gv.at/site/3422/default.aspx, abgerufen am 12.Dezember 2015
[47] European Program for Critical Infrastructure Protection (EPCIP), Weblink: http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2006:0786:FIN:EN:PDF, abgerufen am 13.Dezember 2015

*Wohlergehen der Bevölkerung sowie auch auf die Regierungsarbeit haben könnte*." (Bundeskanzleramt, 2008)

Ein Angriff auf kritische Infrastrukturen birgt somit erhebliches Bedrohungspotential für die Bevölkerung. In APCIP finden sich folgende kritische Infrastrukturen[48], dabei bedeuten die in den Klammern angeführten Ziffern die Anzahl der in Österreich als kritische Infrastruktur identifizierten Objekte laut Mikl-Leitner (2015). Wobei offensichtlich im Bereich Lebensmittel und chemische Industrie bisher keine kritischen Infrastrukturen in Österreich identifiziert wurden.

- Energieanlagen (49)
- Kommunikationseinrichtungen und Informationstechnologien (46)
- Finanzwesen (20)
- Wasser, z.B. Stau-, Speicher- und Aufbereitungsanlagen (5)
- Lebensmittel
- Verkehr und Transport (13)
- Staatliche Einrichtungen und Öffentliche Sicherheit (35)
- Gesundheitswesen (23)
- Chemische Industrie
- Forschungseinrichtungen (1).

Nachfolgend werden Szenarien diskutiert, in denen eine kritische Infrastruktur als Angriffsziel gewählt wurde die in das oben beschriebene Schema der kritischen Infrastrukturen passt. Dabei wird näher auf die kritische Infrastruktur Verkehr und Transport eingegangen, wobei das Szenario am Beispiel Flughafen erörtert wird. Bei der Diskussion dieser Szenarien fließen Ergebnisse aus Genender (2012) ein, welcher in seiner Dissertation spezifisch auf Auftrittswahrscheinlichkeiten und Risikomodellierung im Zusammenhang mit IEMI Quellen eingegangen ist. Diese Ergebnisse leiten sich z.B. im Bereich Mobilität der IEMI Quelle, technologische Herausforderung oder dem Bedrohungsrad ab. Dazu wird nachfolgend ein Konzept beschrieben, welches Ähnlichkeiten zum Zonenkonzept aus dem Bereich der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) aufweist. Wobei in diesem Konzept die Zonen über die Mobilität der IEMI Quellen spezifiziert werden. Je mobiler eine Quelle, ist desto tiefer kann sie in das Gesamtsystem einfach und unerkannt eindringen. Wie in Abbildung 4-3 zu erkennen ist wird derjenigen Zone, die nur mit einer sehr mobilen[49] IEMI Quelle erreicht werden kann, auch die höchste Zonen Nummer zugewiesen. In dieser Abbildung wäre das Zone 4 die nur mit einer kleinen und tragbaren IEMI Quelle zu passieren wäre. Zusätzlich sind in der innersten

[48] DER SOLDAT-Ausgabe Nr. 4/2011, Weblink: http://www.dersoldat.at/schutz-kritischer-infrastrukturen, abgerufen am 30.Dezember 2015

[49] Mobilität wird in dieser Publikation als Sammelbegriff für Aspekte wie Gewicht, Dimension oder besondere Energieversorgung verwendet. Dabei gilt eine Skala von 1 bis 5, nicht mobil = 1 und sehr mobil = 5.

Zone im System auch Sicherheitskontrollen oder Identitätsfeststellungen üblich und somit können diese Zonen nicht von jedem betreten werden. Umgekehrt verhält es sich mit Zone 1. Diese kann von jedem betreten werden ohne Aufmerksamkeit zu erregen. Sie könnte sich in einem nebenstehenden Gebäude befinden oder wie in Abbildung 4-3 in einem nahegelegenen Waldstück. Zone 1 zeichnet sich also dadurch aus, dass diese von Angreifern mit großen und schweren IEMI Quellen nur schwer überschritten werden kann ohne entdeckt zu werden. IEMI Quellen deren Mobilitätszahl gleich bewertet werden können besitzen folglich auch die gleiche Auftrittswahrscheinlichkeit in diesem Zonenkonzept. (Genender, Garbe, & Sabath , 2014)

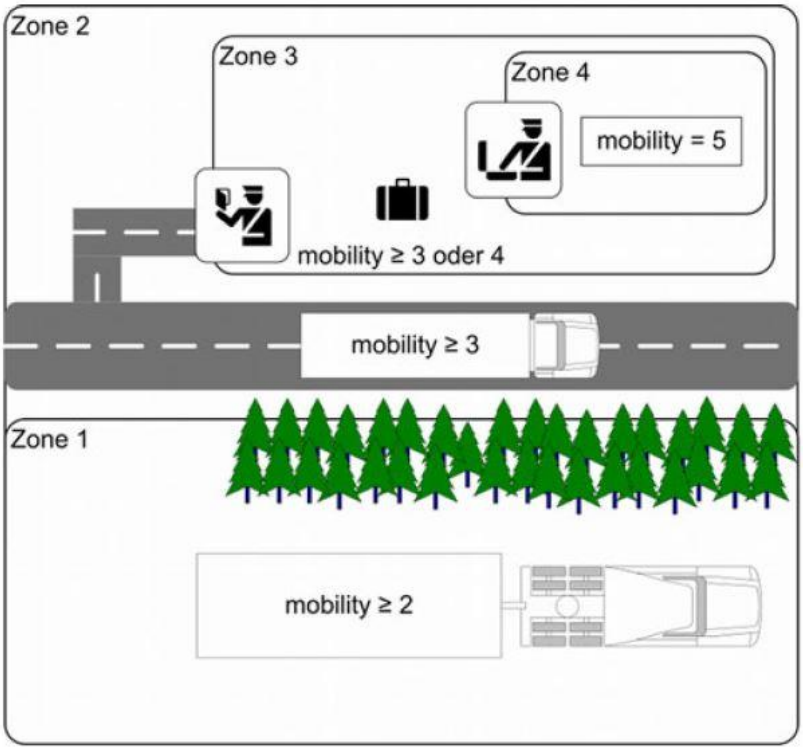


Abbildung 4-3 Zonenkonzept für die Zugänglichkeit von bedrohten Infrastrukturen von Angreifern mit IEMI Quellen (Genender, Garbe, & Sabath , 2014)

## Szenario – Flughafen

In nachfolgendem Szenario wird auf die kritische Infrastruktur Verkehr und Transport anhand des Beispiels Flughafen eingegangen, da diese Infrastruktur für Terroristen oder Kriminelle hohes Angriffspotential bietet. Zum Beispiel adressiert die Empfehlung von IEEE ***"Recommended Practice for Protecting Publicly Accessible Computer Systems from Intentional Electromagnetic Interference"*** (IEEE, 2015) Computersysteme auf Flughäfen als potentielles Angriffsziel für IEMI. Motivation für IEMI Attacken auf Flughäfen könnten zum Beispiel folgende sein:

(1) Kriminelle wollen erleichtertes Passieren von Grenzkontrollen an Flughäfen erreichen. Durch das gezielte Stören von elektronischen Grenzkontrollsystemen (z.B.: elektronische Passlesegeräte) könnte das bewerkstelligt werden,

(2) Kriminelle wollen durch Störung von elektronischen Geräten die Betreiber der Infrastrukturen erpressen,

(3) Terroristen wollen den Betrieb der kritischen Infrastruktur Flughafen durch gezielte Angriffe mit mehreren IEMI Quellen an verschiedenen Orten behindern,

(4) Es gibt auch das Phänomen der durch Neugierde motivierten Angriffe, gewisse Individuen in der Gesellschaft wollen Chaos verursachen und sehen in der Manipulation/Störung von Geräten eine Herausforderung. (Preinerstorfer, et al., 2014)

Mehrere Veröffentlichungen adressieren diese Thematik. In der Publikation von Ianoz und Wipf (2000) gehen die Autoren überwiegend auf mögliche IEMI Angriffe auf Flugzeuge ein. Im Abschlussbericht des Projektes „Elektromagnetischer Schutz von Verkehrsinfrastrukturen (EMSIN)“[50] wird die gesamte Infrastruktur Flughafen als potenzielles Ziel gesehen. Dabei wird zwischen landseitigem Angriff und luftseitigem Angriff unterschieden. In dieser Studie wurde versucht Detektionsmöglichkeiten zu entwickeln, um eine IEMI Attacke erfolgreich zu erkennen und Angreifer aufzuspüren (Rohe & Koch, 2013). Auch in Stojilovic et al. (2014) wird auch auf möglichen Terrorismus auf Flughäfen durch IEMI Quellen hingewiesen.

Serafin und Dupouy (2005) diskutieren in ihrer Publikation eine IEMI Attacke auf einem Flughafen. Laut den Autoren ist dies, durch die hohe Dichte an elektronischen Geräten, ein durchaus mögliches Szenario für elektromagnetischen Terrorismus. Folgende gefährdete Bereiche am Flughafen werden in dieser Publikation definiert:

- Flughafen Terminal inklusive Registrierungs- und Transit Bereiche
- Verkehrskontroll-Tower
- Parkflächen der Flugzeuge
- Landebahnen.

Potentielle Ziele in diesen Bereichen sind z.B.: Kommunikationssysteme und Computer Netzwerke. In dieser Diplomarbeit wird zur Vereinfachung nur die Exposition im Bereich innerhalb des Terminals in Betracht gezogen. Wobei IEMI Quellen innen, in der Nähe eines Registrierungsbereiches, oder außerhalb des Terminals platziert sein können. Nachfolgend werden Störungen durch IEMI Angriffe in der Nähe von Check-In Schaltern, Gepäckprüfanlagen und Datenverarbeitungssystemen diskutiert da diese im Zuge einer Risikoanalyse des Forschungsprojektes EMSIN aus Deutschland als

[50] EMSIN: Elektromagnetischer Schutz von Verkehrsinfrastrukturen, Weblink: http://www.sifo.de/de/emsin-elektromagnetischer-schutz-von-verkehrsinfrastrukturen-1871.html, abgerufen am 12.November 2015

besonders kritisch angesehen wurden. Dabei könnten zum Beispiel Systeme wie in Abbildung 4-4 durch IEMI beeinträchtigt werden, sodass die Betreiber des Flughafens auf Handkontrolle umsteigen müssten. Dies würde zu erheblichen Verzögerungen und möglicherweise zu leichterem Passieren von Passagieren durch die Kontrolle führen.

Abbildung 4-4 Personen und Gepäckkontrolle am Flughafen (Verkehrsflughäfen, 2014)

Im Zuge dieses Szenarios sind Personen, die sich in der Nähe des attackierten Bereiches befinden, erhöhter elektromagnetischer Strahlung ausgesetzt. Diese Exposition wird im Folgenden anhand von Sub-Szenarien nach internationalen Richtlinien und Normen analysiert. Dabei wird die schematische Abbildung 4-5 als Anhaltspunkt herangezogen, in der verschiedene Bereiche auf Flughäfen dargestellt werden.

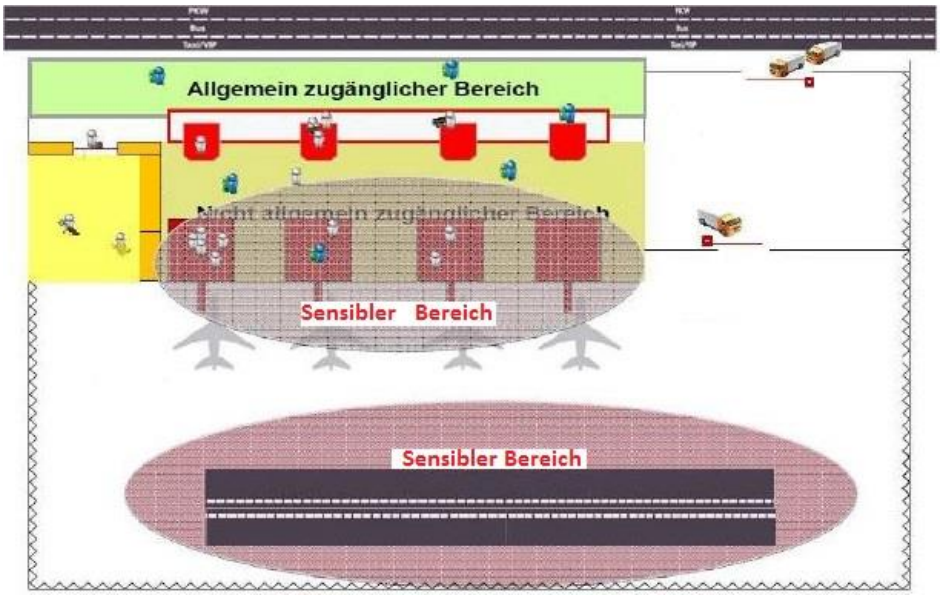


Abbildung 4-5 Verschiedene Bereiche auf Flughäfen, mit Änderungen (Rohe & Koch, 2013)

Abgeleitet aus Abbildung 4-5 kommen folgende Sub-Szenarien in Frage. Einerseits wird zuerst unterschieden welche IEMI Quelle im Einsatz ist und andererseits wird in Abbildung 4-6 für

Szenario A und B unterschieden ob sich der Angreifer innerhalb oder außerhalb des allgemein zugänglichen Bereiches am Flughafen befindet. Szenario C und D bilden die restlichen Szenarien in denen die Bewertung von Breitbandquellen durchgeführt wird. Die Vermutung liegt nahe, dass HPM-Quellen, durch die Abgabe ihrer Energie in einem schmalbandigen Bereich, von den diskutierten IEMI Quellen die höchste Exposition im menschlichen Körper auslösen. Daher werden HPM-Quellen einer detaillierteren Analyse als Breitbandquellen unterzogen und numerische Simulationen durchgeführt. Daraus ergibt sich, dass für Breitbandquellen keine numerischen Simulationen durchgeführt werden da diese den Aufwand dieser Diplomarbeit übersteigen würden.

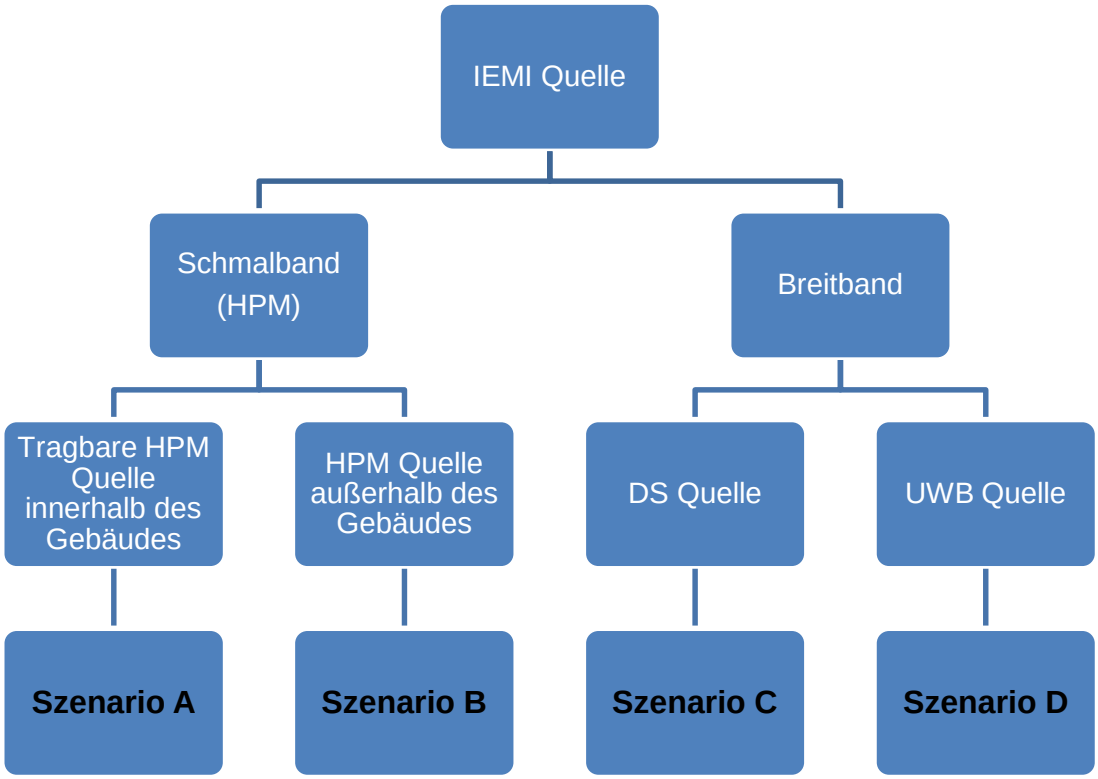


Abbildung 4-6 Identifizierung der Expositionsszenarien am Flughafen

## 4.1 Szenario A – Tragbare HPM Quelle innerhalb des Gebäudes

In diesem Sub-Szenario befindet sich der Angreifer mit einer IEMI Quelle direkt im Gebäude und somit werden die emittierten elektromagnetischen Wellen nicht durch Außenmauern gedämpft[51]. Natürlich kann es auch im Innenbereich zu lokalen Dämpfungen durch Hindernisse kommen. Diese werden aber in dieser Arbeit aus Vereinfachung nicht behandelt. Verglichen mit Abbildung 4-5 wäre der Angreifer im allgemein zugänglichen Bereich oder verglichen mit Abbildung 4-3 wären dies Zone 1 oder Zone 2 da hier noch keine Identitätskontrolle notwendig ist. Der Angreifer kann sich also

[51] Die Dämpfung elektromagnetischer Felder und Wellen entspricht einer Reduzierung ihrer Magnitude durch Absorption und Streuung im zu durchdringenden Medium. (IEC, 2005)

unbemerkt mit einer kompakten und sehr mobilen IEMI Waffe in diesem Bereich bewegen. Hier könnten zum Beispiel ein Handkoffer oder ein Reisekoffer als Tarnung zum Einsatz kommen ohne dabei Aufmerksamkeit auf dem Flughafen zu erregen.

Als Beispiel dienen hier zwei IEMI Quellen mit den folgenden Spezifikationen die nachfolgend in Tabelle 4-1 aufgelistet sind. Sie unterscheiden sich nur durch die Signalfrequenz. Die Werte sind aus Bäckström (1999) abgeleitet und durchaus realistisch für tragbare IEMI Schmalbandquellen. Dabei wird eine Parabolantenne mit einem Durchmesser von d = 0,5 m angenommen woraus sich mithilfe von Formel 4-1 (Kark, 2012) der Gewinn G dieser Antenne errechnen lässt. In dieser Berechnung wird der Gewinn bei zwei verschiedenen Frequenzen (915 MHz und 2,8 GHz) ermittelt. Mit der Annahme aus Kark (2012), dass die Apertur Effizienz für Parabolantennen bis zu $n_{eff} = 0{,}8$ betragen kann ergibt sich ein maximaler Gewinn der beiden Antennen wie folgt, wobei der Antennengewinn in dBi angegeben wird[52]:

$$G = \left(\frac{d*\pi}{\lambda}\right)^2 * n_{eff} \qquad \text{4-1}$$

<u>bei 915 MHz</u>:

$$\mathrm{G} = \left(\frac{\mathrm{d}*\pi}{\lambda_{915\ \mathrm{MHz}}}\right)^2 * \mathrm{n_{eff}} = \left(\frac{0{,}5\ \mathrm{m}*\pi}{0{,}328\ \mathrm{m}}\right)^2 * 0{,}8 = 18{,}37 = 12{,}64\ \mathrm{dBi} \qquad \text{4-2}$$

<u>bei 2,8 GHz</u>:

$$\mathrm{G} = \left(\frac{\mathrm{d}*\pi}{\lambda_{2{,}8\ \mathrm{GHz}}}\right)^2 * \mathrm{n_{eff}} = \left(\frac{0{,}5\ \mathrm{m}*\pi}{0{,}107\ \mathrm{m}}\right)^2 * 0{,}8 = 172{,}41 = 22{,}37\ \mathrm{dBi} \qquad \text{4-3}$$

| $P_{Spitze}$ | $Gewinn_{Antenne}$ | Frequenz | Pulslänge | Repetitionsfrequenz |
|---|---|---|---|---|
| 100 kW | 12,64 dBi | 0,915 GHz | 5 µs | 200 Hz |
| 100 kW | 22,37 dBi | 2,8 GHz | 5 µs | 200 Hz |

Tabelle 4-1 Spezifikationen einer kompakten und tragbaren HPM Quelle aus Bäckström (1999)

Überdies wird für die leichtere Berechnung im Szenario vorausgesetzt, dass Fernfeldbedingungen gegeben sind und somit ein direkter Zusammenhang zwischen elektrischer und magnetischer Feldkomponente über den Feldwellenwiderstand des freien Raumes $Z_0$ besteht. In Abbildung 4-7 soll

[52] Gewinn über dem Isotropen Strahler: Als isotroper Strahler oder Kugelstrahler wird jene verlustlose (hypothetische) Antenne bezeichnet, die gleichmäßig in alle Raumrichtungen abstrahlt bzw. laut dem Reziprozitätstheorem gleichmäßig aus allen Raumrichtungen empfängt. Der Antennengewinn über dem isotropen Strahler beschreibt nun, dass sich die ausgesandte Leistung nicht auf einen kugelförmigen Bereich verteilt, sondern sich auf den durch die Antennenrichtwirkung "gebündelten" Bereich konzentriert. Die Angabe dBi bezeichnet dabei ein einheitsloses Verhältnismaß. (Kark, 2012)

verdeutlicht werden, dass die Feldverteilung umso homogener wird, je weiter sich die exponierte Person von der Antenne befindet. (Roach , 2009)

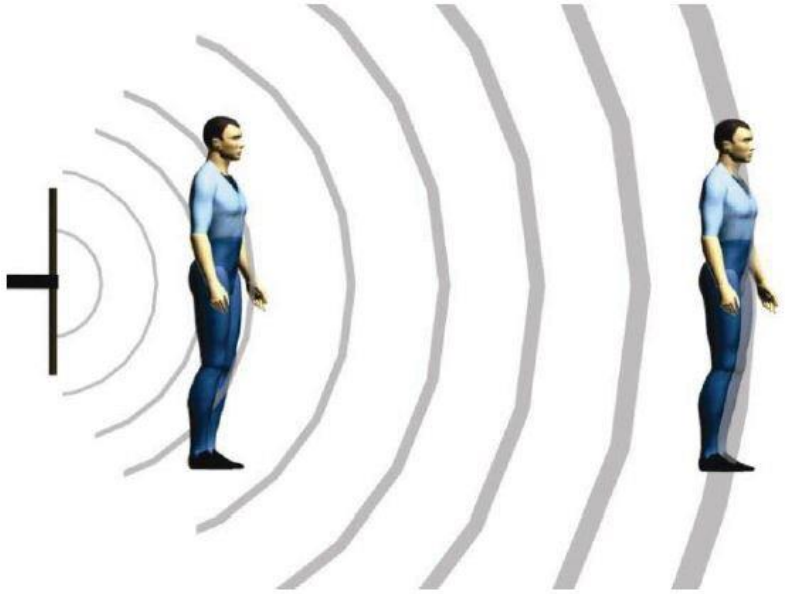

Abbildung 4-7 Vereinfachte Darstellung der Veränderung der Exposition in Abhängigkeit zur Entfernung von einer Antenne, Person links befindet sich im Nahfeld der Antenne wobei sich Person rechts annähernd im Fernfeld der Antenne befindet (Roach , 2009)

Wobei wie in Garn et al. (2013) erläutert wird, hat nachfolgende Formel im Fernfeld Gültigkeit:

$$S = \frac{P_{Spitze} * G}{4 \cdot \pi \cdot R^2} \qquad 4\text{-}4$$

Dabei stellt $P_{Spitze}$ die von der Sendeantenne aufgenommene Spitzenleistung dar, G bezeichnet den Gewinn der Antenne und R die Entfernung des Zielobjektes zur Antenne. Mit Hilfe von Formel S= $\mathrm{E \times H} = \frac{\mathrm{E}^2}{\mathrm{Z}_0}$ $\left(E = \sqrt{S \cdot Z_0}\right)$ lässt sich nun die elektrische Spitzen Feldstärke im Fernfeld berechnen. Wobei das Fernfeld bei diesen Antennen nach Garn et al. (2013) ab folgender Distanz beginnt:

<u>bei 915 MHz</u>:

$$R_{Fernfeld} > \frac{2 \cdot D^2}{\lambda_{915\ MHz}} = \frac{2 \cdot (0{,}5\ m)^2}{0{,}328\ m} = 1{,}525\ m \qquad 4\text{-}5$$

<u>bei 2,8 GHz</u>:

$$R_{Fernfeld} > \frac{2 \cdot D^2}{\lambda_{2{,}8\ GHz}} = \frac{2 \cdot (0{,}5\ m)^2}{0{,}107\ m} = 4{,}66\ m \qquad 4\text{-}6$$

Diese Ergebnisse werden in nachfolgenden Abbildung 4-8 und Abbildung 4-9 dargestellt wobei der entfernungsabhängige Feldstärkeverlauf der HPM Quellen in blau dargestellt ist. Zusätzlich sind in

den beiden Abbildungen Grenzwerte der elektrischen Feldstärken bei gepulsten Feldern der in Kapitel 3.3 beschriebenen Dokumente eingezeichnet (für ICNIRP wurden die Grenzwerte der Allgemeinbevölkerung herangezogen). In diesem Fall ergeben sich diese zu:

- IEEE C95.1: $E_{Spitze} = 100 \frac{kV}{m}$
- NATO STANAG 2345: $E_{Spitze} = 200 \frac{kV}{m}$
- ICNIRP 1998: $E_{Spitze} = 32 * Grenzwert(bei\ 0{,}915\ GHz) = 32 * 41{,}6\ V/m = 1331{,}2\ V/m$
- ICNIRP 1998: $E_{Spitze} = 32 * Grenzwert(bei\ 2{,}8\ GHz) = 32 * 61\ V/m = 1952\ V/m.$

Dabei ist ersichtlich, dass mit diesen tragbaren HPM-Quellen Grenzwertüberschreitungen der elektrischen Feldstärke nach den Standards von IEEE C95.1 (IEEE, 2005) und dem NATO Standard (NATO, 2003) nicht erreichbar sind. Jedoch kann der Grenzwert der ICNIRP Richtlinien (ICNIRP, 1998) bei der Signalfrequenz von f = 915 MHz in Distanzen bis ~5,5 m und bei der Signalfrequenz f = 2,8 GHz in Distanzen bis ~11,5 m überschritten werden.

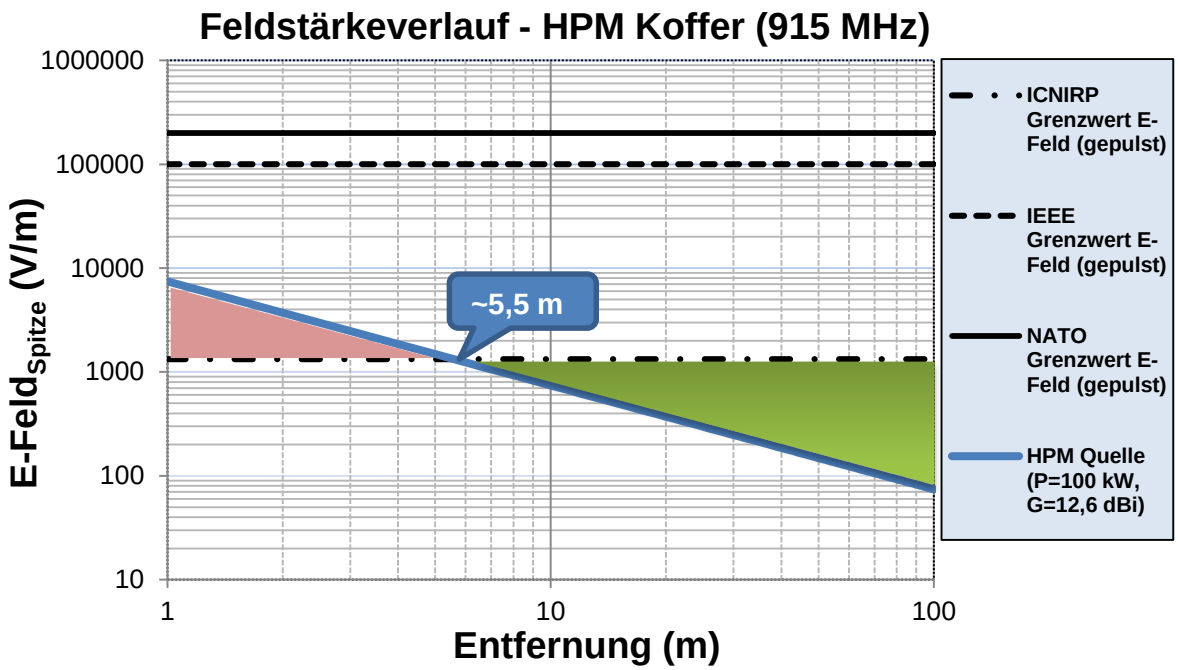


Abbildung 4-8 E-Feldstärkeverlauf einer HPM Quelle (Spitzenleistung = 100 kW), System mit Parabolantenne (Durchmesser = 0,5 m; Gewinn = 12,64 dBi) betrieben bei 915 MHz Signalfrequenz

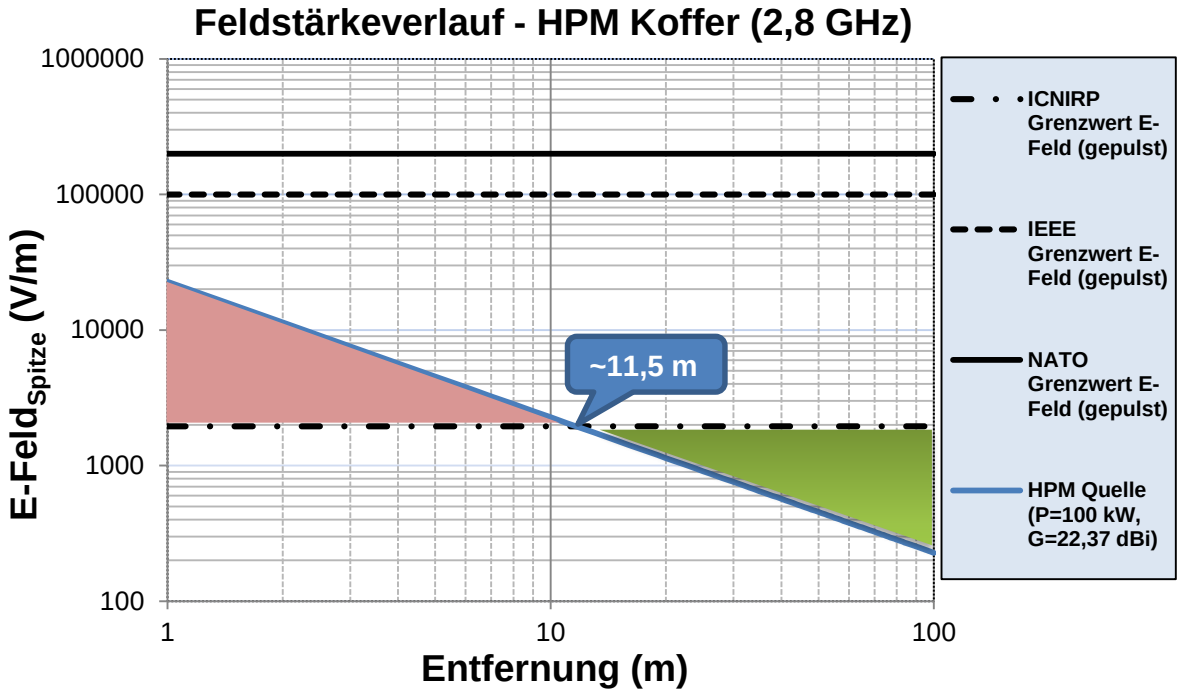


Abbildung 4-9 E-Feldstärkeverlauf einer HPM Quelle (Spitzenleistung = 100 kW), System mit Parabolantenne (Durchmesser = 0,5 m; Gewinn = 22,37 dBi) betrieben bei 2,8 GHz Signalfrequenz

Ein anderes Kriterium welches mittels ICNIRP Richtlinie überprüft werden kann ist die Bilanz der Leistungsflussdichte in einem Zeitintervall von 6 Minuten. Diese bedeutet, dass die über 6 Minuten gemittelte Leistungsflussdichte die Grenzwerte ebenso nicht überschreiten darf. Obwohl eine Grenzwertüberschreitung der E-Felder vorliegt wird hier auch der Vergleich mit den Leistungsflussdichte Grenzwerten als Zusatz durchgerechnet. Dabei wird im Folgenden die Expositionsdauer[53] in Formel 4-9 mit Hilfe des Tastverhältnisses[54] berechnet:

$$Tastverhältnis = \frac{Pulsdauer}{Periodendauer} = \frac{5\ \mu s}{\frac{1}{Repetitionsfrequenz}} = \frac{5\ \mu s}{\frac{1}{200\ Hz}}$$

$$\text{Tastverhältnis} = \frac{5\ \mu\text{s}}{0{,}005\ \text{s}} = 0{,}001 = 0{,}1\ \%$$

Dies bedeutet, dass Personen nur in 0,1 % des betrachteten Intervalls tatsächlich exponiert werden. Daher ergibt sich die Expositionsdauer im 6 Minuten Intervall zu:

$$Expositionsdauer = Tastverhältnis \cdot 6\ min = \underline{0{,}36\ s}$$

[53] Expositionsdauer ist jene Zeit in der die Person tatsächlich durch elektromagnetische Strahlung exponiert wird

[54] Das Tastverhältnis bezeichnet das Verhältnis von Pulsdauer zu Periodendauer und gibt somit an wieviel

Mit dieser Information und den ICNIRP Grenzwerten für die äquivalente Leistungsflussdichte kann nun die Bilanz der Leistungsflussdichte berechnet werden. Die Grenzwerte ergeben sich in diesem Fall zu:

- ICNIRP 1998: $S_{eq} = Grenzwert(bei\ 0{,}915\ GHz) = 4{,}575\ W/m^2$
- ICNIRP 1998: $S_{eq} = Grenzwert(bei\ 2{,}8\ GHz) = 10\ W/m^2.$

Nachfolgend werden die Bilanzen der Leistungsflussdichte bei den zwei Frequenzen errechnet:

$$\frac{Leistungsflussdichte \cdot Expositionsdauer}{6 \cdot 60\ s} > 4{,}575 \frac{W}{m^2} (915\ MHz)$$

$$\frac{Leistungsflussdichte \cdot Expositionsdauer}{6 \cdot 60\ s} > 10 \frac{W}{m^2}\ (2{,}8\ GHz)$$

So lange die gemittelte Leistungsflussdichte kleiner als der Leistungsflussdichtegrenzwert bleibt gilt die Einhaltung der Grenzwerte. Die folgenden Berechnungen dieses Szenarios für 915 MHz (Abbildung 4-10) und 2,8 GHz (Abbildung 4-11) zeigen, dass die Grenzwerte auch mit diesen Berechnungen überschritten werden.

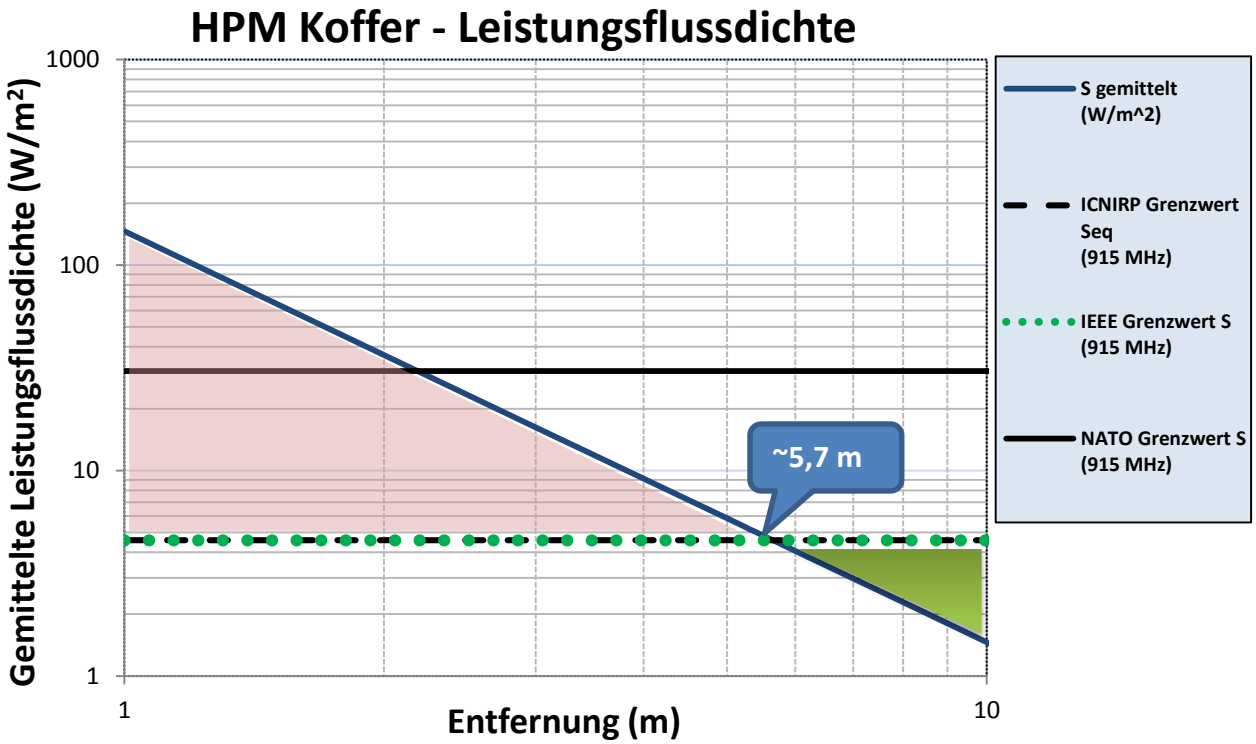


Abbildung 4-10 Verlauf der gemittelten Leistungsflussdichte einer HPM Quelle (Spitzenleistung = 100 kW), System mit Parabolantenne (Durchmesser = 0,5 m; Gewinn = 12,64 dBi) betrieben bei 915 MHz

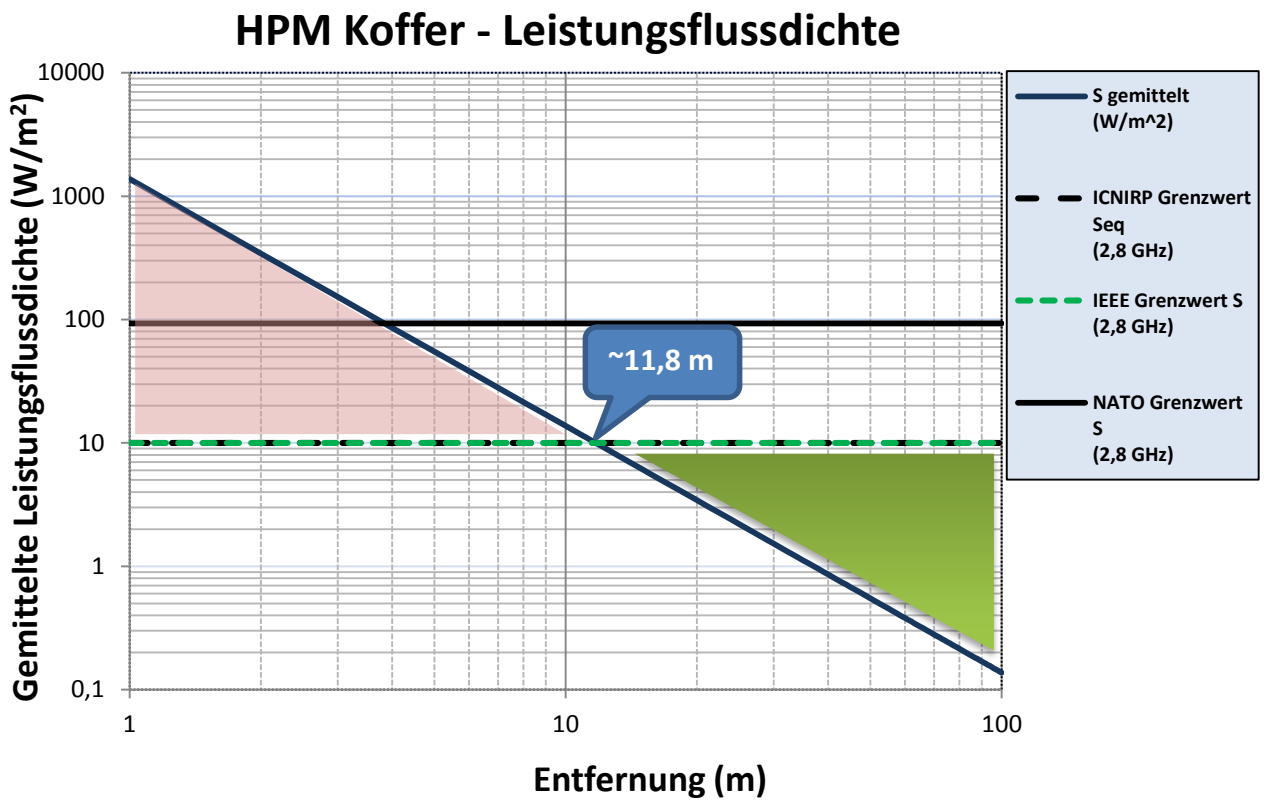


Abbildung 4-11 Verlauf der gemittelten Leistungsflussdichte einer HPM Quelle (Spitzenleistung = 100 kW), System mit Parabolantenne (Durchmesser = 0,5 m; Gewinn = 22,37 dBi) betrieben bei 2,8 GHz

ICNIRP Referenzwerte der Allgemeinbevölkerung sowie maximal erlaubte Grenzwerte für die Allgemeinbevölkerung von IEEE werden in diesem Beispiel in Distanzen bis zu 5,7 m (bei 915 MHz) und 11,8 m (bei 2,8 GHz) überschritten.

Da es normalerweise nicht möglich ist die elektromagnetische Feldverteilung in-vivo[55] zu messen und damit auch nicht die Basisgrenzwerte mit den erzeugten Feldern der HPM-Quellen im Menschen zu vergleichen, sind numerische Simulationen notwendig (Visveswaran, 2008). Basierend auf diesen Ergebnissen werden im Anschluss Simulationen mit der Software SEMCAD X[56] durchgeführt. Die Simulationsplattform SEMCAD X ist eine 3-D Simulationsumgebung die vom Unternehmen Schmid & Partner Engineering (SPEAG) entwickelt wurde. Es basiert auf dem Algorithmus der finiten Differenzen Methode (FDTD). Dabei werden partielle Differentialgleichungen mittels numerischer Verfahren gelöst. Die FDTD-Methode wird vielfältig eingesetzt zur Berechnung/Lösung bioelektromagnetischer Probleme (Clemens, et al., 2012). Mithilfe von SEMCAD X ist es nun möglich Simulationen durchzuführen und sich die elektromagnetische Feldverteilung und die SAR im menschlichen Körper ausrechnen zu lassen. Zur Ausführung dieser Simulationen werden Körpermodelle benötigt die aus der Virtual Population, von der IT'IS Foundation, herangezogen werden

[55] In-vivo bezeichnet Prozesse die im lebendigen Organismus ablaufen

[56] SEMCAD X, Weblink: http://www.speag.com/products/semcad/solutions/, abgerufen am 01.Februar 2015

(Christ, et al., 2010). Jedes der Modelle[57] ist aus einem hochauflösenden Magnetresonanztomographie (MRT) Scan aus gesunden Freiwilligen entstanden. Die Modellierung der Körpermodelle wird mithilfe eingetragener Werte aus der IT'IS Datenbank durchgeführt. Diese Datenbank ist aus einer umfassenden Literaturrecherche entstanden und beinhaltet alle benötigten Parameter (Gewebe[58],-Flüssigkeits- und Gasparameter[59]). Die Anzahl der Modelle ist mittlerweile repräsentativ für einen umfassenden Bereich der Bevölkerung. Körpermodelle wurden jeweils aus den MRT Scans zu einem dreidimensionalen CAD[60] Modell rekonstruiert. Ein Auszug der Virtual Population findet sich in Abbildung 4-12. Hier wird die Virtual Family bestehend aus zwei männlichen und zwei weiblichen Körpermodellen dargestellt. Charakteristika dieser Modelle finden sich in Tabelle 4-2.

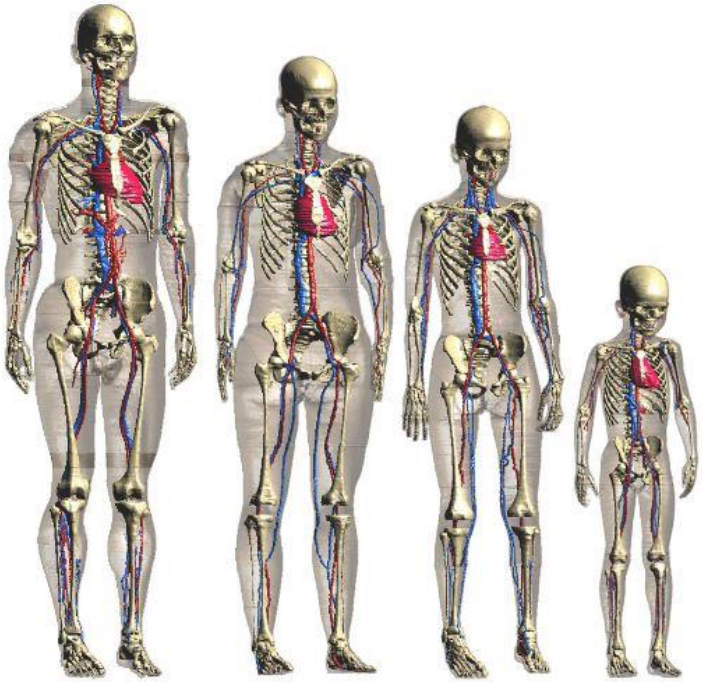

Abbildung 4-12 Virtual Family: v. l. n. r. Duke, Ella, Billie, Thelonious (Christ, et al., 2010)

[57] Diese Körpermodelle wurden ursprünglich nur für die Verwendung im akademischen Bereich angedacht. Mittlerweile gibt es auch schon Modelle die für kommerzielle Zwecke verfügbar sind. Weblink: http://www.i-tis.ethz.ch/assets/Downloads/VirtualPopulation/1302-virtual-population.pdf, abgerufen am 12.August 2015

[58] Gewebeparameter, Weblink: http://www.itis.ethz.ch/assets/Downloads/TissueDb/Files20150113/tissue_references_20150113.pdf, abgerufen am 14.August 2015

[59] Gasparamter, Weblink: http://www.itis.ethz.ch/assets/Downloads/TissueDb/Files20150113/fluid_references_20150113.pdf, abgerufen am 14.August 2015

[60] Engl. Computer Aided Design (CAD), rechnerunterstütztes Konstruieren

| Name | Alter (Jahre) | Geschlecht | Größe (m) | Gewicht (kg) |
|---|---|---|---|---|
| Duke | 34 | Männlich | 1,74 | 70 |
| Ella | 26 | Weiblich | 1,60 | 58 |
| Billie | 11 | Weiblich | 1,46 | 36 |
| Thelonious | 6 | Männlich | 1,17 | 20 |

Tabelle 4-2 Eigenschaften der Körpermodelle aus der Virtual Family (Christ, et al., 2010)

Die nachfolgenden Berechnungen wurden für eine einfallende ebene Welle[61] von vorne und von der Seite in verschiedenen Richtungen durchgeführt wie in Abbildung 4-13 angedeutet wird. In diesem Schema findet sich eine tragbare HPM Waffe durch die eine Person exponiert wird. Für die Simulationen wurde das Körpermodell Louis aus der Virtual Population gewählt, wobei sich die Charakteristika von Louis in Tabelle 4-3 finden. Im Sinne einer worst-case Betrachtung wurde das Körpermodell Louis ausgewählt, weil durch die Körperabmessungen des Modells eine höhere SAR in den Berechnungen zustande kommt als bei anderen Modellen.

| Name | Alter (Jahre) | Geschlecht | Größe (m) | Gewicht (kg) |
|---|---|---|---|---|
| Louis | 14 | Männlich | 1,68 | 49,7 |

Tabelle 4-3 Eigenschaften des Körpermodells Louis aus der Virtual Population

Die Exposition findet in den Simulationen in mehreren Raumrichtungen statt um das Szenario wirklichkeitsgetreu darzustellen. Dabei wird die einfallende elektromagnetische Welle zuerst von vorne und dann von der Seite jeweils in 30° Schritten abgestrahlt. Da die Simulationen mit SEMCAD X aufwendig sind und die gesamte Simulationsdauer proportional zu den simulierten Raumrichtungen ist, wurde ein repräsentativer Ausschnitt gewählt der einem Viertelkreis in Abbildung 4-13 entspricht. Angedeutet wird die Bestrahlungsrichtung auch in Abbildung 4-14, wobei der elektrische Feldvektor parallel zur Längsachse (vertikale Polarisation) des Körpers steht und somit worst-case Bedingungen gegeben sind.

[61] Engl. Plane Wave

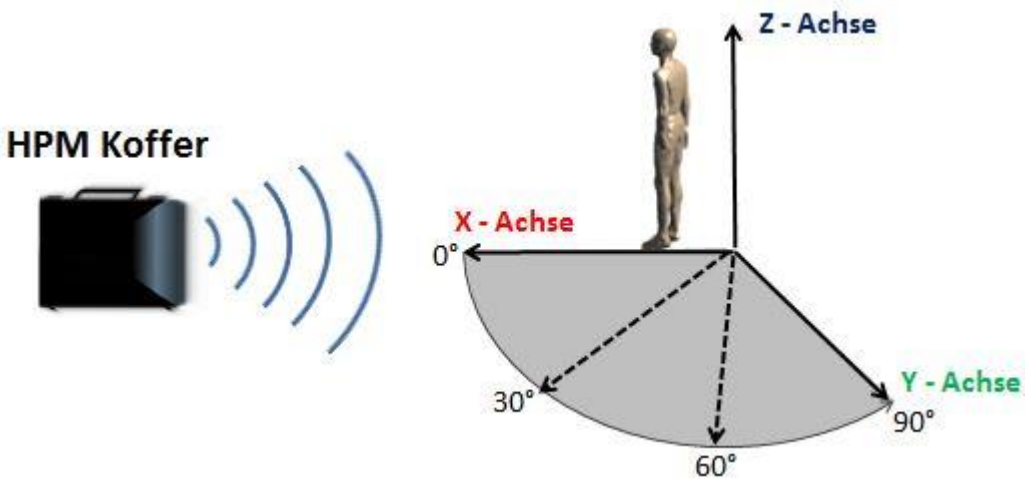


Abbildung 4-13 Exposition einer freistehenden Person durch einen HPM Koffer in mehreren Raumrichtungen, als Körpermodell wurde Louis aus der Virtual Population[62] ausgewählt

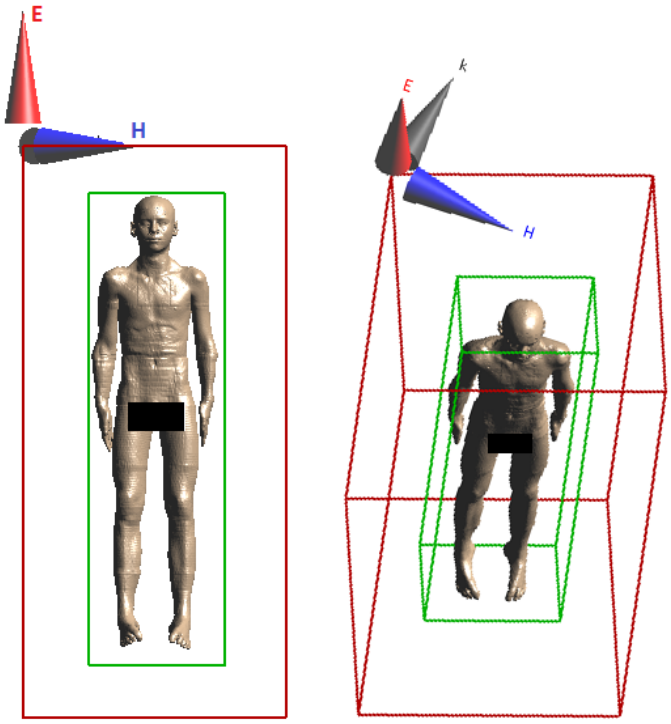


Abbildung 4-14 Körpermodell extrahiert aus SEMCAD X, links: Orientierung der Quelle=frontal (0°), rechts Orientierung der Quelle=30°

Nachfolgend werden die Simulationsergebnisse der Exposition durch eine einfallende ebene Welle im Fernfeld bei den Frequenzen 915 MHz und 2,8 GHz des HPM Koffers ausgewertet. In den Simulationen in Szenario A und Szenario B wurde kein reflektierender Boden hinzugefügt. Dies wäre

[62] Virtual Population, Weblink: www.itis.ethz.ch/vip, abgerufen am 13.August 2015

durch zusätzliche Simulationen zu ergänzen, wurde jedoch in dieser Diplomarbeit als zu hoher Aufwand angesehen.

| Expositions-richtung | E-Feld$_{Spitze}$ (V/m) in 1,5 m Distanz | SAR$_{GK}$ (W/kg) Duty Cycle = 0,1 % | SAR 10g-Max (W/kg) Duty Cycle = 0,1 % |
|---|---|---|---|
| **Frontal 0°** | 4867 | 0,45 | 4,76 |
| **Horizontal 30°** | 4867 | 0,44 | 5,79 |
| **Horizontal 60°** | 4867 | 0,40 | 4,46 |
| **Horizontal 90°** | 4867 | 0,38 | 5,35 |

Tabelle 4-4 Darstellung der Ganzkörper- und Teilkörper SAR hervorgerufen durch einen HPM Koffer bei 915 MHz in verschiedenen Expositionsrichtungen in der Entfernung von 1,5 m von der exponierten Person

In Tabelle 4-4 werden die hervorgerufenen Ganzkörper- und Teilkörper SAR Werte in Bezug auf die Exposition durch den HPM Koffer bei verschiedenen Expositionsrichtung dargestellt. Die Auswertung wurde bei einer Signalfrequenz von f = 915 MHz vorgenommen. Die SAR Werte in Tabelle 4-4 ergeben sich bei einer Distanz von 1,525 m (ab dieser Distanz beginnt das Fernfeld der Quelle) zwischen Quelle und der exponierten Person. Die Ganzkörper SAR ($SAR_{GK}$) und die Teilkörper SAR ($SAR_{10g}$) wurden für ein 6-Minuten Intervall errechnet. Das zugehörige Tastverhältnis von 0,1 % wurde hierbei schon in der Berechnung berücksichtigt. Die Expositionsquotienten (EQ)[63] wurden mithilfe der ICNIRP Basisgrenzwerte mit Formel 4-12 berechnet und werden in Tabelle 4-5 dargestellt:

$$EQ = \frac{Expositionswert}{Grenzwert} \qquad 4\text{-}12$$

| Expositions-richtung | EQ$_{GK}$ Duty Cycle = 0,1 % | EQ$_{Lokal}$ Duty Cycle = 0,1 % | Maximale Expositionsdauer$_{GK}$ | Maximale Expositionsdauer$_{Lokal}$ |
|---|---|---|---|---|
| **Frontal 0°** | 5,62 | 2,38 | **64,02 s** | 151,34 s |
| **Horizontal 30°** | 5,55 | 2,90 | 64,90 s | 124,26 s |
| **Horizontal 60°** | 4,97 | 2,23 | 72,49 s | 161,37 s |
| **Horizontal 90°** | 4,79 | 2,68 | 75,09 s | 134,50 s |

Tabelle 4-5 Expositionsquotienten der in Tabelle 4-4 dargestellten SAR Berechnungen in Bezug auf ICNIRP Basisgrenzwerte der Allgemeinbevölkerung

[63] Der Expositionsquotient gibt die Exposition in Relation zum ICNIRP Grenzwert an. Bei einem EQ > 1 liegt eine Grenzwertüberschreitung vor.

Dabei lässt sich deutlich aus Tabelle 4-5 ablesen, dass die ICNIRP Basisgrenzwerte der Allgemeinbevölkerung für Ganzkörper und Teilkörper deutlich überschritten werden, wenn die exponierte Person in diesem Setting für 6 Minuten exponiert wird. Da ein Expositionsquotient > 1 angibt um welchen Faktor der Grenzwert überschritten wurde kann man mit folgender Formel auch errechnen wie lange die Exposition dauern dürfte um den Grenzwert einzuhalten:

$$maximale\ Expositionsdauer = \frac{360\ s}{EQ} \qquad 4\text{-}13$$

Deswegen wird in der letzten beiden Spalten von Tabelle 4-5 die maximale Expositionsdauer für Ganz- und Teilkörper Exposition angegeben. Um worst-case Bedingungen zu betrachten wurde hier das Minimum aus allen Zeitwerten für die maximale Expositionsdauer herangezogen. Das bedeutet eine Expositionsdauer die kürzer als 64,02 s ist, würde zu keiner Überschreitung der Basisgrenzwerte in diesem Szenario führen.

Betrachtet man die Verteilung der elektrischen Feldstärke als Ergebnis der Simulationen in Abbildung 4-15 kann man auf Anhieb feststellen, dass die elektrische Feldstärke innerhalb und außerhalb des Körpermodells starke Unterschiede aufweist. Das elektromagnetische Feld wird stark abgeschwächt, wenn es in den menschlichen Körper eindringt. Dennoch zeigen die Simulationen relativ hohe Werte in diesem Frequenzbereich im Körpermodell auf. Zur Veranschaulichung der Grenzwertüberschreitung nach ICNIRP wird in Abbildung 4-16 auch noch die Verteilung der SAR dargestellt.

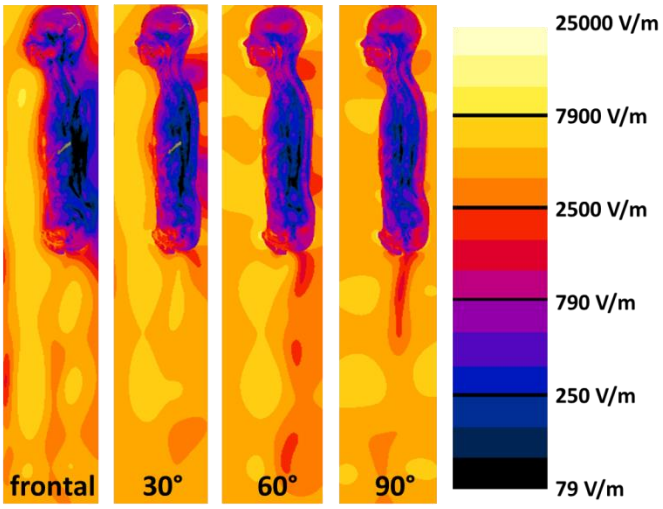


Abbildung 4-15 E-Feld Verteilung außerhalb und innerhalb des Körpers bei Exposition mit 915 MHz, Bestrahlung von vorne und seitlich in 30° Schritten

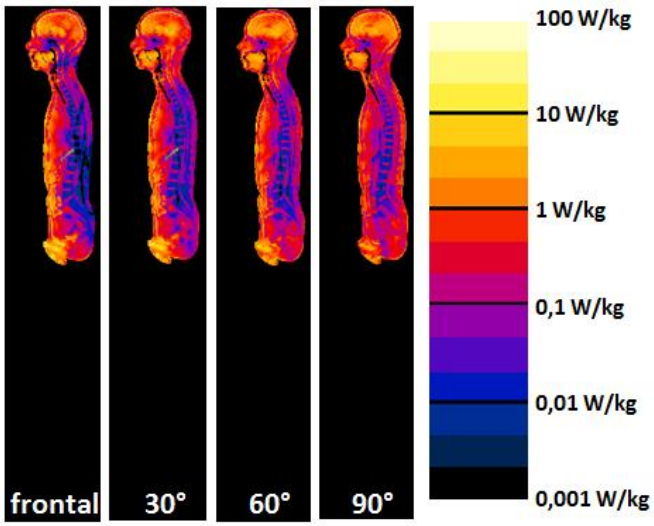


Abbildung 4-16 SAR Verteilung bei Exposition mit 915 MHz, Bestrahlung von vorne und seitlich in 30° Schritten

Nachfolgend werden nun die Berechnungen mit der zweiten Signalfrequenz f = 2,8 GHz des HPM Koffers dargestellt.

| Expositions-richtung | E-Feld$_{Spitze}$ (V/m) in 4,66m Distanz | SAR$_{GK}$ (W/kg) | SAR 10g-Max (W/kg) |
|---|---|---|---|
| **Frontal 0°** | 4883 | 0,44 | 5,91 |
| **Horizontal 30°** | 4883 | 0,42 | 5,36 |
| **Horizontal 60°** | 4883 | 0,35 | 5,28 |
| **Horizontal 90°** | 4883 | 0,28 | 4,28 |

Tabelle 4-6 Darstellung der Ganzkörper und Teilkörper SAR hervorgerufen durch einen HPM Koffer bei 2,8 GHz in verschiedenen Expositionsrichtungen in der Entfernung von 4,66 m von der exponierten Person

In Tabelle 4-4 werden die hervorgerufenen Ganzkörper- und Teilkörper SAR Werte in Bezug auf die Exposition durch den HPM Koffer bei verschiedenen Expositionsrichtung dargestellt. Die Auswertung wurde bei einer Signalfrequenz von f = 2,8 GHz vorgenommen. Die SAR Werte in Tabelle 4-6 ergeben sich bei einer Distanz von 4,66 m (ab dieser Distanz beginnt das Fernfeld der Quelle) zwischen Quelle und der exponierten Person. Die Ganzkörper SAR (SAR$_{GK}$) und die Teilkörper SAR (SAR$_{10g}$) wurden für ein 6-Minuten Intervall errechnet. Das zugehörige Tastverhältnis von 0,1 % wurde hierbei schon in der Berechnung berücksichtigt. Die Expositionsquotienten werden in Tabelle 4-7 dargestellt:

| Expositions-richtung | $EQ_{GK}$ Duty Cycle = 0,1 % | $EQ_{Lokal}$ Duty Cycle = 0,1 % | Maximale Expositionsdau-er$_{GK}$ | Maximale Expositionsdauer$_{Lokal}$ |
|---|---|---|---|---|
| **Frontal 0°** | 5,46 | 2,96 | **65,96 s** | 151,34 s |
| **Horizontal 30°** | 5,28 | 2,68 | 68,24 s | 124,26 s |
| **Horizontal 60°** | 4,37 | 2,64 | 82,44 s | 161,37 s |
| **Horizontal 90°** | 3,51 | 2,14 | 102,52 s | 134,50 s |

Tabelle 4-7 Expositionsquotienten der in Tabelle 4-6 dargestellten SAR Berechnungen in Bezug auf ICNIRP Basisgrenzwerte der Allgemeinbevölkerung

Tabelle 4-7 zeigt ein ähnliches Bild wie Tabelle 4-5. Die ICNIRP Basisgrenzwerte werden auch hier überschritten, wenn die Expositionsdauer von 6 Minuten erreicht wird. Die letzten beiden Spalten in Tabelle 4-7 geben wieder die maximale Expositionsdauer bei Ganz- und Teilkörperexposition an. Als worst-case Betrachtung wird hier das Minimum der Zeitwerte für die maximale Expositionsdauer angegeben. Wenn dieser Wert 65,96 s nicht übersteigt werden die Basisgrenzwerte von ICNIRP nicht überschritten. Ein anderer Weg die Exposition zu verringern wäre den Abstand zur Quelle zu vergrößern, was sich schwierig gestaltet, weil der Ort der Quelle ja unbekannt ist und die IEMI Quelle nicht ohne Detektion erkannt werden kann.

Nachfolgend wird die Verteilung der elektrischen Feldstärke bei Exposition durch den HPM Koffer bei 2,8 GHz in Abbildung 4-17 dargestellt. Dabei kann man erkennen, dass das elektrische Feld im Gegensatz zur Exposition mit 915 MHz nicht so tief in das Körpermodell eindringt. Abbildung 4-18 zeigt wieder die SAR Verteilung im Körper, wobei es auch hier zu Grenzwertüberschreitungen bei 6 Minuten Exposition nach ICNIRP kommt.

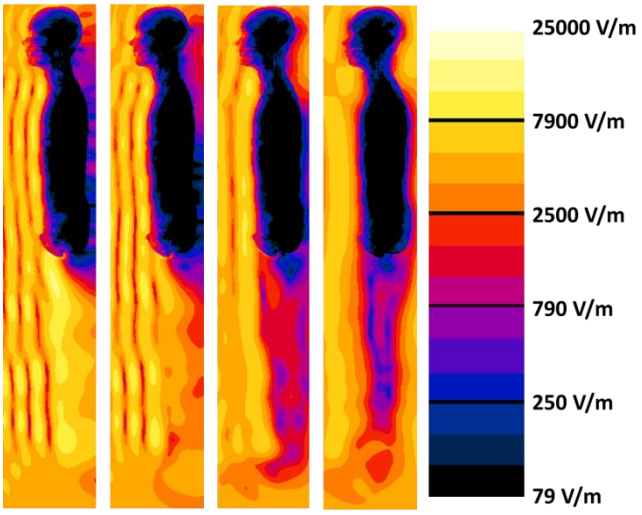


Abbildung 4-17 E-Feld Verteilung außerhalb und innerhalb des Körpers bei Exposition mit 2,8 GHz, Bestrahlung von vorne und seitlich in 30° Schritten

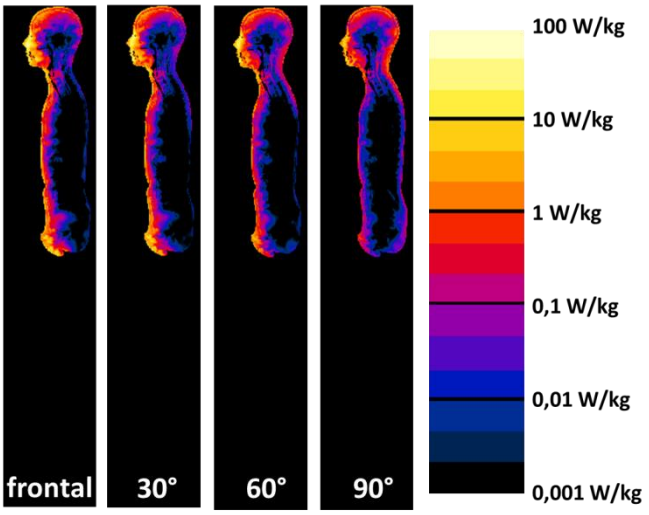


Abbildung 4-18 SAR Verteilung bei Exposition mit 2,8 GHz MHz, Bestrahlung von vorne und seitlich in 30° Schritten

## 4.2 Szenario B – HPM Quelle außerhalb des Gebäudes

In diesem Sub-Szenario befindet sich der Angreifer mit einer IEMI Waffe außerhalb des Gebäudes und somit werden die ausgesandten elektromagnetischen Wellen durch Außenmauern gedämpft bis sie ins Innere des Terminals gelangen. Verglichen mit Abbildung 4-5 wäre der Angreifer außerhalb des allgemein zugänglichen Bereiches oder verglichen mit Abbildung 4-3 wäre er entweder in Zone 1 oder Zone 2. Der Angreifer ist weiter entfernt als in Szenario A und muss daher eine leistungsstärkere IEMI Quelle einsetzen um vergleichbare Effekte zu erreichen. Hier könnten zum Beispiel die Ladefläche eines Pick-ups (mit einer Plane umhüllt) oder ein Van als Tarnung zum Einsatz kommen. Dabei könnte der Angreifer das Fahrzeug mit der IEMI Quelle auf einem Parkplatz abstellen, sich vom Fahrzeug entfernen und die IEMI Quelle mit einer Fernsteuerung aktivieren ohne dabei Aufmerksamkeit vor dem Flughafen zu erregen.

In Anlehnung zu Szenario A dienen hier wieder zwei IEMI Quellen als Beispiel die sich durch ihre Signalfrequenzen (915 MHz und 2,8 GHz) unterscheiden. Ihre Spezifikationen sind Tabelle 4-8 zu entnehmen. Erkennbar ist die deutlich höhere Spitzenleistung ($P_{Spitze}$ = 10 MW) der Quelle gegenüber der Quelle in Szenario A. Die Werte in Tabelle 4-8 sind aus Bäckström & Lövstrand (2004) abgeleitet und durchaus realistisch für IEMI Schmalbandquellen die in einem größeren Transportfahrzeug versteckt werden können. Der Gewinn der Antenne lässt sich in diesem Fall wieder nach Formel 4-1 berechnen. Dabei wird eine Parabolantenne mit einem Durchmesser von d = 1 m angenommen. Der Gewinn wird dabei bei den zwei bereits oben erwähnten Frequenzen wie folgt berechnet und in Formel 4-14 und Formel 4-15 angegeben:

bei 915 MHz:

$$G = \left(\frac{d*\pi}{\lambda_{915\ \mathrm{MHz}}}\right)^2 * n_{eff} = \left(\frac{1\ \mathrm{m}*\pi}{0{,}328\ \mathrm{m}}\right)^2 * 0{,}8 = 73{,}4 = 18{,}66\ \mathrm{dBi} \qquad 4\text{-}14$$

bei 2,8 GHz:

$$G = \left(\frac{d*\pi}{\lambda_{2{,}8\ \mathrm{GHz}}}\right)^2 * n_{eff} = \left(\frac{1\ \mathrm{m}*\pi}{0{,}107\ \mathrm{m}}\right)^2 * 0{,}8 = 689{,}4 = 28{,}38\ \mathrm{dBi} \qquad 4\text{-}15$$

| $P_{Spitze}$ | $Gewinn_{Antenne}$ | Frequenz | Pulslänge | Repetitionsfrequenz |
|---|---|---|---|---|
| 10 MW | 18,66 dBi | 0,915 GHz | 5 µs | 1000 Hz |
| 10 MW | 28,38 dBi | 2,8 GHz | 5 µs | 1000 Hz |

Tabelle 4-8 Spezifikationen einer HPM Quelle aus (Backstrom & Lovstrand, 2004)

Die beschriebene Quelle könnte wie in Abbildung 4-19 konzipiert sein mit der Ausnahme, dass in diesem Szenario eine Parabolantenne eingesetzt wird. Das Tastverhältnis wird auch hier wieder mit 0,1 % angenommen. Die Pulslänge beträgt 5 µs wie in Szenario A, wobei die Repetitionsfrequenz in diesem Szenario mit 1000 Hz angesetzt wird, da die Energieversorgung im Van größer ausfallen kann als im Reisekoffer und damit eine höhere Anzahl an Pulsen im gleichen Zeitraum möglich ist.

Abbildung 4-19 HPM Quelle (Spitzenausgangsleistung = 10 MW) versteckt in einem Van (Granatstein, Rodgers, Anlage, & Goldsman, 2005)

Um das Szenario deutlicher zu veranschaulichen wird dieses in Abbildung 4-20 dargestellt. Dabei ist ersichtlich, dass sich der Angreifer nicht in unmittelbarer Nähe des Terminals befinden muss um einen Angriff durchzuführen. Zusätzlich muss das Signal der IEMI Quelle die Außenmauern des Terminals durchdringen.

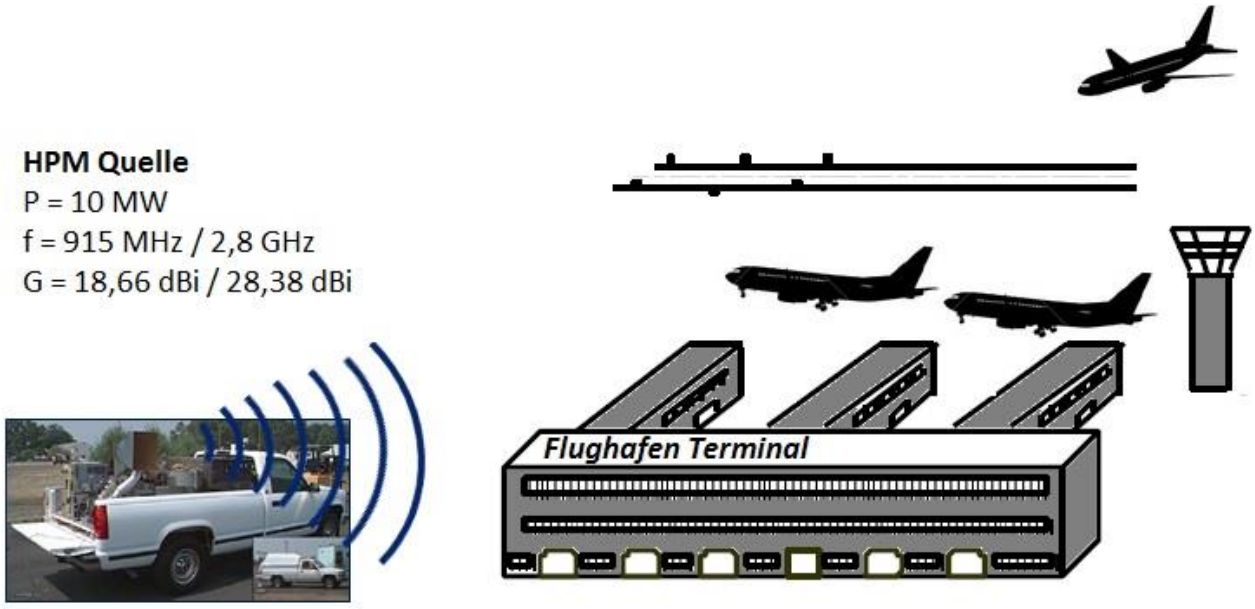


Abbildung 4-20 IEMI Attacke auf einen Flughafen Terminal mittels HPM Quelle (Serafin & Dupouy, 2005), mit Änderungen

Die Berechnung wird wieder unter Fernfeldbedingungen durchgeführt um die Berechnung zu erleichtern. Das Fernfeld beginnt bei diesen Quellen in folgenden Entfernungen.

<u>bei 915 MHz</u>:

$$R_{Fernfeld} > \frac{2 \cdot D^2}{\lambda_{915\ MHz}} = \frac{2 \cdot (1\ m)^2}{0{,}328\ m} = 6{,}1\ m \qquad 4\text{-}16$$

<u>bei 2,8 GHz</u>:

$$R_{Fernfeld} > \frac{2 \cdot D^2}{\lambda_{2{,}8\ GHz}} = \frac{2 \cdot (1\ m)^2}{0{,}107\ m} = 18{,}7\ m \qquad 4\text{-}17$$

Wie oben schon erwähnt wird das Signal der IEMI Quelle im Zuge dieses Szenarios durch die Außenmauern des Flughafenterminals gedämpft. Dabei ist die Abschwächung der elektromagnetischen Wellen abhängig von der Signalfrequenz und der Gebäudeart insbesondere vom Material, von der Konstruktion und der Stockwerkhöhe. Savage und Radasky (2012) geben in ihrer Publikation Dämpfungsrichtwerte für verschiedene Materialien an. Dabei beziehen sie sich auf Messungen die sie in verschiedenen Gebäudearten durchgeführt haben. Die Autoren führen auch noch zusätzliche Faktoren an die für die Dämpfung der elektromagnetischen Felder und Wellen zum Tragen kommen. Dies sind Öffnungen wie Türen und Fenster welche die Gebäudedämpfung kompromittieren. Nichtsdestotrotz geben die Autoren eine durchschnittliche Dämpfung im betrachteten Frequenzbereich (915 MHz und 2,8 GHz) für mehrere Materialien wie Holz, Betonziegel oder Beton an. Für das Szenario wird angenommen, dass das Flughafengebäude Großteils aus Beton besteht. Laut Savage und Radasky (2012) ist somit eine Dämpfung von 15 dB im betrachteten Frequenzbereich

(sprich für beide Frequenzen) im Erdgeschoß als realistisch anzunehmen. Dies stimmt auch gut mit der Publikation von Siwiak & Bahreini (2007) überein. Diese Annahme ist natürlich eine Vereinfachung und kann in Wirklichkeit je nach Gebäude stark variieren.

Nachfolgend wird der Feldstärkeverlauf der vorher beschriebenen Quellen in Abbildung 4-21 und Abbildung 4-22 dargestellt wobei der Verlauf der HPM Quellen in blau dargestellt ist. Die Feldstärke errechnet sich dabei nach Berücksichtigung der Gebäudedämpfung nach Granatstein et al. (2005) mit folgender Formel.

$$S = \frac{P_{Spitze} * G}{4 \cdot \pi \cdot R^2 * Dämpfung_{Gebäude}} \qquad 4\text{-}18$$

Wie in Szenario A sind auch hier den beiden Abbildungen die Grenzwerte der elektrischen Feldstärken bei gepulsten Feldern der in Kapitel 3.3 beschriebenen Dokumente eingezeichnet (für ICNIRP wurden die Grenzwerte der Allgemeinbevölkerung herangezogen). Diese ergeben sich wie in Szenario A zu:

- IEEE C95.1: $E_{Spitze} = 100 \frac{kV}{m}$
- NATO STANAG 2345: $E_{Spitze} = 200 \frac{kV}{m}$
- ICNIRP 1998: $E_{Spitze} = 32 * Grenzwert(bei\ 0{,}915\ GHz) = 32 * 41{,}6\ V/m = 1331{,}2\ V/m$
- ICNIRP 1998: $E_{Spitze} = 32 * Grenzwert(bei\ 2{,}8\ GHz) = 32 * 61\ V/m = 1952\ V/m.$

Gegenüber Szenario A ist klar ersichtlich, dass mit stärkeren HPM-Quellen (z.B.: versteckt in einem Van) weitaus höhere Feldstärken erzeugt werden können. Diese führen im Fernfeld auch nicht zu Grenzwertüberschreitungen der elektrischen Feldstärke nach den Standards von IEEE C95.1 (IEEE, 2005) und dem NATO Standard (NATO, 2003). Hier kann jedoch der Grenzwert der ICNIRP Richtlinien (ICNIRP, 1998) bei der Signalfrequenz von f = 915 MHz in Distanzen bis ~20 m und bei der Signalfrequenz f = 2,8 GHz in Distanzen bis ~40 m überschritten werden wie in Abbildung 4-21 und Abbildung 4-22 dargestellt. In den Abbildungen wurde schon eine Gebäudedämpfung von 15 dB eingerechnet. Würde man hier keine dämpfende Wand vorfinden wäre eine Grenzwertüberschreitung bis ~100 m bei 915 MHz respektive ~200 m bei 2,8 GHz möglich.

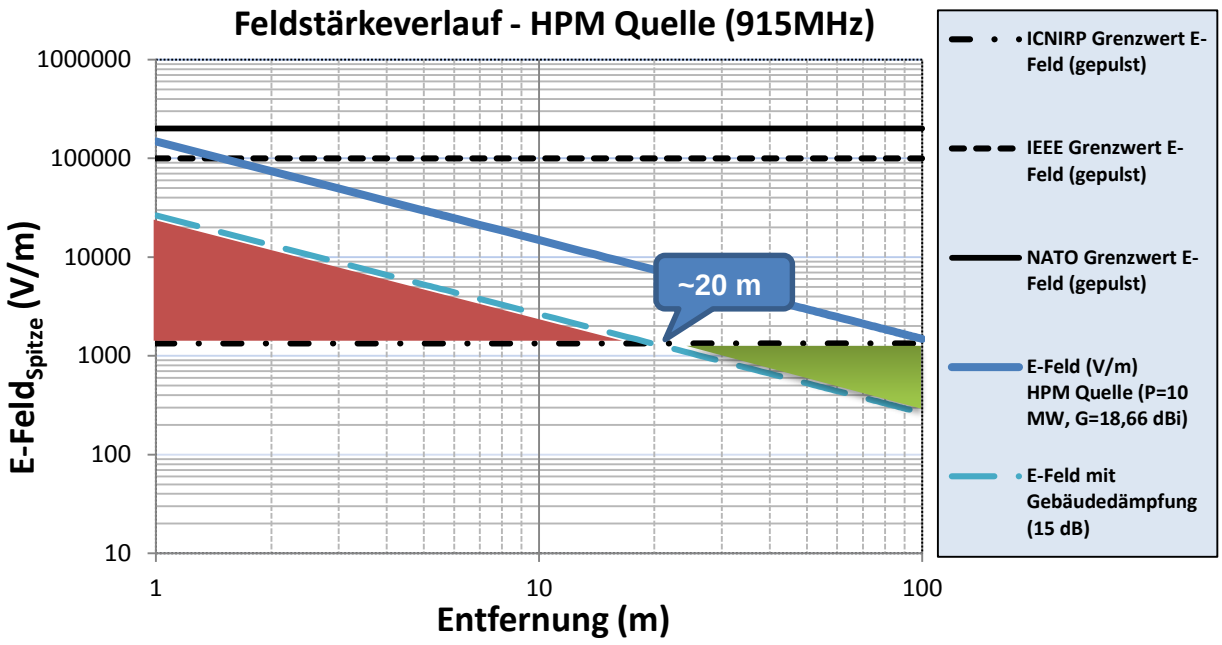


Abbildung 4-21 E-Feldstärkeverlauf einer HPM Quelle (Spitzenleistung = 10 MW), System mit Parabolantenne (Durchmesser = 1 m; Gewinn = 18,66 dBi) betrieben bei 915 MHz

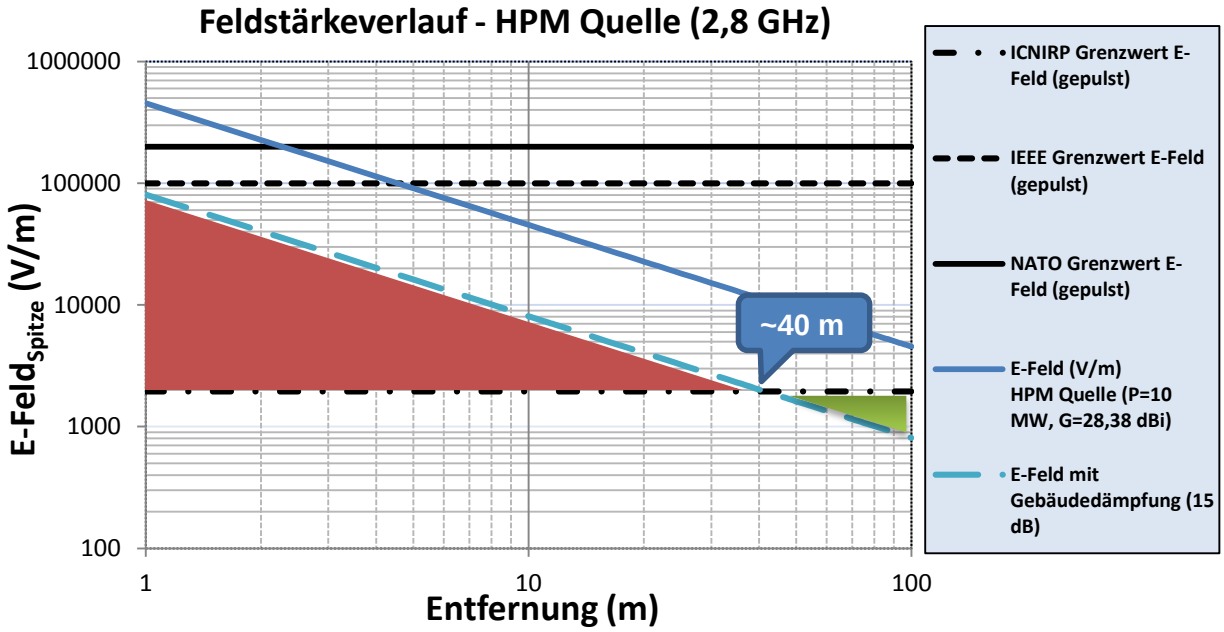


Abbildung 4-22 E-Feldstärkeverlauf einer HPM Quelle (Spitzenleistung = 10 MW), System mit Parabolantenne (Durchmesser von 1 m und einem Gewinn von 28,38 dBi) betrieben bei 2,8 GHz

In diesem Szenario wird das Kriterium der Bilanz der Leistungsflussdichte aus Vereinfachung ausgelassen und sofort zur Simulation mit SEMCAD X übergegangen, um eine mögliche Überschreitung der Basisgrenzwerte zu überprüfen. Dazu müssen im Vorfeld wieder das Tastverhältnis und die Expositionsdauer bestimmt werden:

$$Tastverhältnis = \frac{Pulsdauer}{Periodendauer} = \frac{5\ \mu s}{\frac{1}{Repetitionsfrequenz}} = \frac{5\ \mu s}{\frac{1}{1000\ Hz}} \qquad 4\text{-}19$$

$$\text{Tastverhältnis} = \frac{5\ \mu\text{s}}{0{,}001\ \text{s}} = 0{,}005 = 0{,}5\ \% \qquad 4\text{-}20$$

Dies bedeutet, dass Personen nur in 0,5 % der Zeit tatsächlich exponiert werden. Daher ergibt sich die Expositionsdauer im 6 Minuten Intervall zu:

$$Expositionsdauer = Tastverhältnis \cdot 6\ min = \underline{1{,}8\ s} \qquad 4\text{-}21$$

Wie in Szenario A werden die nachfolgenden Berechnungen für eine einfallende ebene Welle von vorne und von der Seite in verschiedenen Richtungen durchgeführt wie in Abbildung 4-23 veranschaulicht. Hier wird schematisch die HPM Quelle, die Außenmauer des Flughafenterminals und die exponierte Person betrachtet. Für die Simulationen wurde wieder das Körpermodell Louis aus der Virtual Population gewählt.

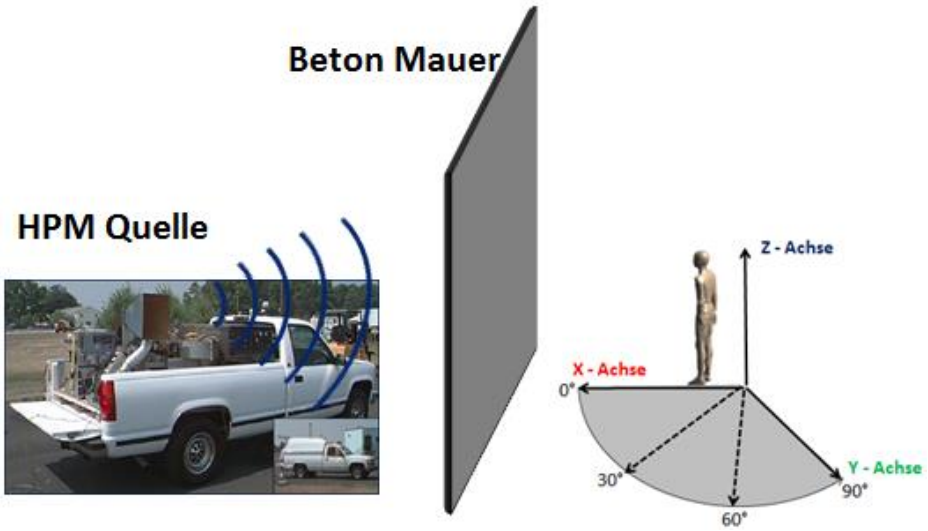


Abbildung 4-23 Exposition einer Person (die sich in einem Flughafenterminal befindet) durch eine HPM Quelle in mehreren Raumrichtungen, als Körpermodell wurde Louis aus der Virtual Population ausgewählt

Nachfolgend werden die Simulationsergebnisse der Exposition durch eine einfallende ebene Welle im Fernfeld bei den Frequenzen 915 MHz in Tabelle 4-9 und 2,8 GHz in Tabelle 4-11 der HPM Quelle in einem Van ausgewertet. Es werden wieder die Feldstärkewerte herangezogen ab der Distanz, in welcher das Fernfeld beginnt. Dies sind einerseits Werte bei 6,1 m (915 MHz) bzw. bei 18,7 m (2,8 GHz).

| Expositions-richtung | E-Feld$_{Spitze}$ (V/m) in 6,1 m Distanz | SAR$_{GK}$ (W/kg) Duty Cycle = 0,5 % | SAR 10g-Max (W/kg) Duty Cycle = 0,5 % |
|---|---|---|---|
| **Frontal 0°** | 4327 | 1,78 | 18,80 |
| **Horizontal 30°** | 4327 | 1,75 | 22,90 |
| **Horizontal 60°** | 4327 | 1,57 | 17,63 |
| **Horizontal 90°** | 4327 | 1,52 | 21,16 |

Tabelle 4-9 Darstellung der Ganzkörper- und Teilkörper SAR hervorgerufen durch die HPM Quelle im Van bei 915 MHz in verschiedenen Expositionsrichtungen in der Entfernung von 6,1 m von der exponierten Person, mit Gebäudedämpfung

In Tabelle 4-9 werden die hervorgerufenen Ganzkörper- und Teilkörper SAR Werte in Bezug auf die Exposition durch die HPM Quelle im Van bei verschiedenen Expositionsrichtungen dargestellt. Die SAR Werte in Tabelle 4-9 ergeben sich bei einer Exposition von 6 Minuten in dem vorgegebenen Setting. Als Abstand zur Quelle wurde hier der geringste Abstand gewählt, in dem das Fernfeld beginnt. Der Van mit der versteckten Quelle könnte hier beispielsweise in der Nähe des Eingangs geparkt werden ohne Aufmerksamkeit zu erregen. Als Beispiel einer exponierten Person wäre ein Passant der sich direkt beim Eingang des Flughafenterminals aufhält anzuführen. Die Ganzkörper SAR ($SAR_{GK}$) und die Teilkörper SAR ($SAR_{10g}$) wurden für ein 6-Minuten Intervall errechnet. Das zugehörige Tastverhältnis von 0,5 % wurde hierbei schon in der Berechnung berücksichtigt. Die Expositionsquotienten (EQ) wurden mithilfe der ICNIRP Basisgrenzwerte mit Formel 4-12 berechnet und werden in Tabelle 4-10 dargestellt.

| Expositions-richtung | EQ$_{GK}$ Duty Cycle = 0,5 % | EQ$_{Lokal}$ Duty Cycle = 0,5 % | Maximale Expositionsdau-er$_{GK}$ | Maximale Expositionsdauer$_{Lokal}$ |
|---|---|---|---|---|
| **Frontal 0°** | 22,22 | 9,40 | **16,20 s** | 38,29 s |
| **Horizontal 30°** | 21,92 | 11,45 | 16,42 s | 31,44 s |
| **Horizontal 60°** | 19,63 | 8,82 | 18,34 s | 40,83 s |
| **Horizontal 90°** | 18,95 | 10,58 | 19,00 s | 34,03 s |

Tabelle 4-10 Expositionsquotienten der in Tabelle 4-9 dargestellten SAR Berechnungen in Bezug auf ICNIRP Basisgrenzwerte der Allgemeinbevölkerung, mit Gebäudedämpfung

Dabei lässt sich deutlich aus Tabelle 4-10 ablesen, dass die ICNIRP Basisgrenzwerte der Allgemeinbevölkerung für Ganz- und Teilkörper deutlich überschritten werden, wenn die exponierte Person in dieser Konfiguration für 6 Minuten exponiert wird. Die letzten beiden Spalten in Tabelle 4-10

geben die maximale Expositionsdauer die mit Formel 4-13 an. Auch hier wird wieder als worst-case Betrachtung das Minimum aller Zeitwerte für die maximale Expositionsdauer herangezogen. Das bedeutet eine Expositionsdauer die kürzer als 16,20 s ist, würde zu keiner Überschreitung der Basisgrenzwerte in diesem Szenario führen.

Wie oben erwähnt wird in Tabelle 4-11 die Auswertung der SAR bei der zweiten Signalfrequenz f = 2,8 GHz der HPM Quelle im Van dargestellt.

| Expositions-richtung | E-Feld$_{Spitze}$ (V/m) in 18,7 m Distanz | SAR$_{GK}$ (W/kg) Duty Cycle = 0,5 % | SAR 10g-Max (W/kg) Duty Cycle = 0,5 % |
|---|---|---|---|
| **Frontal 0°** | 4322 | 1,71 | 23,15 |
| **Horizontal 30°** | 4322 | 1,65 | 20,99 |
| **Horizontal 60°** | 4322 | 1,37 | 20,69 |
| **Horizontal 90°** | 4322 | 1,10 | 16,77 |

Tabelle 4-11 Darstellung der Ganzkörper- und Teilkörper SAR hervorgerufen durch die HPM Quelle im Van bei 2,8 GHz in verschiedenen Expositionsrichtungen in der Entfernung von 18,7 m von der exponierten Person, mit Gebäudedämpfung

Tabelle 4-11 zeigt die hervorgerufenen Ganz- und Teilkörper SAR Werte in Bezug auf die Exposition durch die HPM Quelle im Van bei verschiedenen Expositionsrichtungen bei Exposition bei 2,8 GHz, im Abstand von 18,7 m, hinter der Betonmauer und einer Dauer von 6 Minuten. Der Van könnte in der Nähe des Terminals geparkt sein ohne Aufmerksamkeit zu erregen. Das zugehörige Tastverhältnis von 0,5 % wurde hierbei schon in der Berechnung berücksichtigt. Die Expositionsquotienten (EQ) wurden mithilfe der ICNIRP Basisgrenzwerte mit Formel 4-12 berechnet und werden in Tabelle 4-12 dargestellt.

| Expositions-richtung | EQ$_{GK}$ Duty Cycle = 0,5 % | EQ$_{Lokal}$ Duty Cycle = 0,5 % | Maximale Expositionsdauer$_{GK}$ | Maximale Expositionsdauer$_{Lokal}$ |
|---|---|---|---|---|
| **Frontal 0°** | 21,38 | 11,58 | 16,84 s | 31,10 s |
| **Horizontal 30°** | 20,66 | 10,49 | 17,42 s | 34,31 s |
| **Horizontal 60°** | 17,11 | 10,35 | 21,05 s | 34,80 s |
| **Horizontal 90°** | 13,76 | 8,38 | 26,17 s | 42,94 s |

Tabelle 4-12 Expositionsquotienten der in Tabelle 4-11 dargestellten SAR Berechnungen in Bezug auf ICNIRP Basisgrenzwerte der Allgemeinbevölkerung, mit Gebäudedämpfung

Die Ergebnisse aus Tabelle 4-12 zeigen eine ähnliche maximale Expositionsdauer wie in Tabelle 4-10 aufgelistet. Der Unterschied ist hier aber doch sehr bedeutsam, da ähnliche Resultate errechnet wurden, wenngleich aus einem wesentlich größeren Abstand exponiert wurde.

## 4.3 Szenario C – DS Quelle

Um nun näher auf ein anderes Expositions Szenario einzugehen wird im Anschluss eine Bewertung der Quelle aus Abbildung 2-15 aus Kapitel 2.2.3 durchgeführt. Bei dieser Bewertung werden wie eingangs erwähnt aus Gründen des zu hohen Aufwandes keine numerischen Simulationen durchgeführt und Werte aus der Literatur herangezogen. Im Gegensatz zu den Szenarien A und B in denen sich die Expositionsbewertung auf jeweils eine Frequenz bezogen hat, verteilt sich in diesem Fall die Energie auf größere Teile des Frequenzspektrums.

Die oft in der Literatur erwähnte HPEM Quelle DS 110 des Unternehmens Diehl BGT Defence aus Deutschland, wurde in Kapitel 2.2.3 der Kategorie Medium-Tech Systeme zugeordnet. Die Quelle ist sehr mobil einsetzbar und kann per Fernsteuerung aktiviert werden. Diese Quelle könnte ein Angreifer in einem Rollkoffer verstecken und den Flughafenterminal betreten, ohne damit Aufmerksamkeit zu erregen. Das Zeitsignal und das Frequenzspektrum der Quelle wurden schon in Kapitel 2.1.3 dargestellt. Ein vom Unternehmen Diehl BGT Defence publiziertes Dokument namens „White Paper on HPEM Technology“ aus dem Jahre 2013 (Diehl BGT Defence, 2013) beschreibt, dass durch die niedrige emittierte Durchschnittsenergie keine Gefahr für Menschen besteht und die Quelle alle Standards, Empfehlungen und Sicherheitsrichtlinien bezüglich Exposition einhält. In dieser Publikation werden die Dokumente (ICNIRP, 1998), (IEEE, 2005) und (NATO, 2003) angeführt.

Um zu evaluieren, ob mit der Quelle DS 110 Grenzwertüberschreitungen möglich sind haben Kubacki und Kollegen von der technischen militärischen Universität Warschau[64] in einer Reihe von Publikationen eine in-vitro Versuchsreihe durchgeführt und anschließend mit numerischen Simulationen kombiniert. In ihrer Publikation (Kubacki & Lamari, 2014) beschreiben die Autoren, dass die Signale der Diehl Quelle als Breitbandsignale zu betrachten sind da das resultierende Frequenzspektrum einen Bereich von 150 MHz bis 650 MHz überdeckt. Der wesentliche Faktor ist in diesem Fall die Permittivität (Real- und Imaginärteil) die nach (Gabriel, Lau, & Gabriel, 1996) über diesen weiten Frequenzbereich stark variiert und in Abbildung 4-24 dargestellt wird. Daher muss hier laut Kubacki und Lamari (2014) eine andere Methodik als bei Schmalbandsignalen angewandt werden. Die Autoren stellen auch infrage ob die SAR eine zuverlässige Größe für die Bewertung dieser Signale darstellt.

Anknüpfend an das Erwähnte wird in Kubacki et al. (2014) die in-vitro Versuchsreiher vorgestellt um die Bewertung durchzuführen. Dabei haben die Autoren eine häufig verwendete 90 mm

[64] Militärische Universität Warschau, Weblink: http://www.wat.edu.pl/, abgerufen am 18.November 2015

Petri Schale verwendet und diese mit menschlichem Blut gefüllt. Danach wurden Pulse der DS 110 Quelle in einem echoarmen Raum appliziert, wobei der E- und H-Vektor parallel zur Petri Schale standen. Um schließlich die SAR zu errechnen wird eine Bewertungsmethode vorgestellt mit welcher das Signal der DS 110 Quelle (gedämpfter Sinus) als eine Serie von Harmonischen im Frequenzbereich aufbereitet wird. Dies wird erreicht, indem die Autoren das Signal mithilfe der Fourier Transformation in seine Frequenzteile aufspalten. Daraus wird für jede Harmonische Frequenz eine spezifische SAR errechnet. Die Methode wurde angewandt um die Bewertung von Breitbandsignalen zu verbessern, dabei wurde ein Programm namens CST Microwave Studio verwendet, welches auf dem FDTD Verfahren beruht.

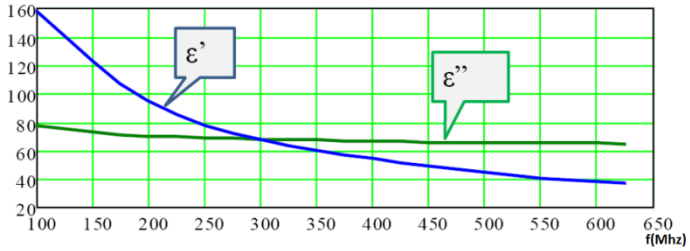


Abbildung 4-24 Komplexwertige Permittivität von menschlichem Blut (Kubacki & Lamari, 2015)

Schließlich haben Kubacki und Kollegen in einer weiteren Publikation zu diesem Thema Ergebnisse veröffentlicht (Kubacki & Lamari, 2015). In diesem Dokument beschreiben sie die Bewertung und Dosimetrie der breitbandigen Pulse der Quelle DS 110. Des Weiteren erwähnen die Autoren, dass diese Quelle kommerziell erhältlich ist und Pulse emittiert werden können, welche eine Spitzenfeldstärke von 200 kV/m erreichen. Die Pulsbreite kann dabei bei einer typischen Pulsrepetitionsrate von 10 Hz von 4 ns bis 100 ns variieren. Die Expositionsbewertung wird dabei nach dem Standard IEEE C95.1 (IEEE, 2005) durchgeführt. Die Autoren beziehen sich auf ein ebenes Plattenmodel, siehe Abbildung 4-25, welches von IEEE empfohlen wird und in abgeänderter Form (andere Abmessungen) verwendet wurde.

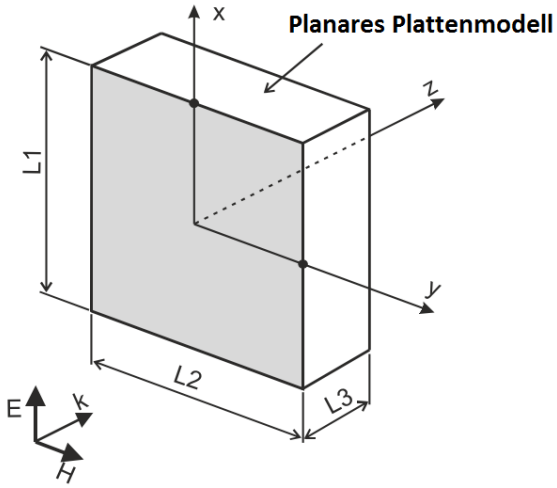


Abbildung 4-25 Planares homogenes Plattenmodell mit einfallender elektromagnetischen Welle, L1 x L2 = 0,47 m², L3 = 15 cm, (Kubacki & Lamari, 2015)

Das in Abbildung 4-25 gezeigte Modell ist ein sogenanntes homogenes Modell und wurde nur mit menschlichem Blut berechnet. Alle anderen Schichten wie Haut, Muskelgewebe, Fett oder Knochen wurden vernachlässigt. Warum die Autoren Blut ausgewählt haben wurde in dieser Publikation nicht erwähnt.

Die Autoren gehen wie folgt vor um die einfallenden elektromagnetischen Pulse zu bewerten:

- Umrechnung der Pulse aus dem Zeitbereich in den Frequenzbereich mittels Fourier Transformation, damit lassen sich die Amplituden der Harmonischen berechnen.
- Berechnung der SAR gemittelt über 10g des planaren homogenen Modells. Für jede Harmonische wurde hier eine eigene ebene Welle simuliert. Dabei wurden die in Abbildung 4-24 angeführten Werte der Permittivität von Blut bei der jeweiligen Frequenz berücksichtigt.
- Berechnung der SA für Einzelpulse und einer Serie von Pulsen. (Kubacki & Lamari, 2015)

In Abbildung 4-26 werden die Werte der SAR gemittelt über 10g für jede Harmonische im Frequenzbereich zwischen 100 MHz und 650 MHz dargestellt. Die Autoren geben auch eine totale SAR an, die sich als Summe der SAR Werte der einzelnen Harmonischen aus Abbildung 4-26 zu $SAR_{TOT}$ = 110 kW/kg errechnet. Laut Kubacki und Lamari (2015) ist dieser Wert extrem hoch, der aber durch die kurzen Pulsdauern relativiert werden muss. Daher sollte ihrer Meinung nach die spezifische Absorption (SA) zur Beurteilung herangezogen werden.

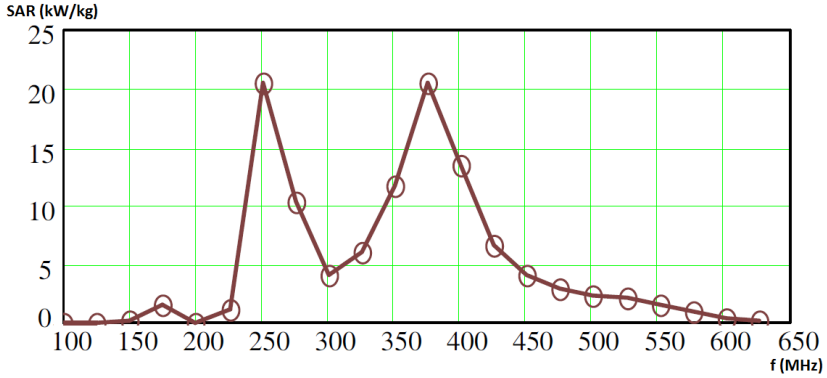


Abbildung 4-26 SAR gemittelt über 10 g für alle Harmonischen im betrachteten Frequenzbereich (Kubacki & Lamari, 2015)

Für einen Einzelpuls errechnet sich laut Autoren eine spezifische Absorption von $SA_{EINZELPULS}$ = ~0,5 mJ/kg und für eine Reihe von Pulsen im 6 Minuten Intervall (Pulswiederholrate = 10 Hz) ergibt sich eine $SA_{PULSREIHE}$ = ~1,9 J/kg. Somit haben die Autoren gezeigt, dass Pulse mit der Quelle DS 110 nach ihren Berechnungen keine Grenzwertüberschreitung der SA Basisgrenzwerte nach IEEE C95.1 (2005) hervorrufen können. Diese Grenzwerte liegen bei $SA_{Beruf}$ = 28,8 J/kg für beruflich exponierte Personen und $SA_{Allgemein}$ = 5,76 J/kg für die Allgemeinbevölkerung.

Ob diese Pulse zum Beispiel den Effekt des Mikrowellenhörens verursachen könnten wird von den Autoren nicht thematisiert. Ein Vergleich mit den Grenzwerten von ICNIRP zeigt aber, dass dies durchaus möglich wäre wenn man die zugrundeliegenden Ergebnisse der Autoren heranzieht. Natürlich müsste noch weiter in dieser Richtung evaluiert werden und realistischeres Modell (Mehrschichtenmodell) verwendet werden. Warum die Autoren die Methodik zur Summierung multipler Frequenzen aus Kapitel 3.3.1 mit Formel 3-9 nicht verwendet haben bleibt offen. Die Quelle war in dieser Studie sehr nahe am Untersuchungsobjekt, diese kurzen Distanzen würden in einem realen Szenario mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht auftreten. Daher müssten die Werte der SAR und SA für einen größeren Abstand noch angepasst werden.

## 4.4 Szenario D – UWB Quelle

Um die Expositionsbewertung von HPEM Signalen abzuschließen wird nun auf sehr kurze Pulse, sogenannte Ultra Breitband Pulse (UWB), eingegangen. Ähnlich wie in Szenario C verteilt sich bei dieser Art von Pulsen auch über einen weiten Teil des Frequenzspektrums. Doch zum Unterschied zu Szenario C wird hier ein viel größerer Bereich abgedeckt, der zu einer geringeren durchschnittlichen Energie im Frequenzspektrum führt.

Im Gegensatz zur Expositionsbewertung von HPM Signalen die nahezu ihre gesamte Energie bei einer Frequenz abgeben, ist die Bewertung von UWB Pulsen im Nanosekundenbereich weitaus schwieriger da sich hier die Energie über weite Teile des Frequenzspektrums aufteilt. Als Energieinhalt dieser Pulse wird meistens der Milli-Joule Bereich angegeben, als Gegensatz dazu wird die Leistung meist im Megawatt-Bereich abgegeben. Für diese Form der Expositionsbewertung bieten die zuvor erwähnten Richtlinien und Standards keine konkrete Vorgehensweise. (Nitsch, Sabath, & Schenk, 2005)

Laut Schmid et al. (2008) bieten gängige FDTD-Simulationstools wie SEMCAD X auch nicht die Möglichkeit die SA oder die SAR aus den Zeitbereichs Ergebnissen auszurechnen. Daher müsste man sich anderer Methoden oder Tools bedienen um diese Größen zu berechnen, dies würde aber den Rahmen dieser Diplomarbeit sprengen und wird deshalb nur methodisch diskutiert.

Einige Publikationen haben sich schon mit dieser Thematik der Expositionsbewertung von Pulsen im Bereich von Nano- oder Pikosekunden beschäftigt. Wie in Kapitel 3.3 schon erwähnt gibt es hier auch beträchtliche Unterschiede in der Bewertung zwischen den Dokumenten von ICNIRP (1998) und IEEE (2005). Auch die Autoren Tattersall, Mifsud & Scott (2009) und Hansen et al. (2010) sind der Meinung, dass die gängigen Dokumente bzw. deren Grenzwerte, die auf zeitlich - gemittelten Erwärmungseffekte basieren, nicht geeignet sind eine Bewertung für Pulse mit sehr hohen Spitzenleistungen und niedrigen Durchschnittleistungen durchzuführen. Dieses Problem wird auch in Simicevic (2008) auf. Er beschreibt, dass die Anwendung der gängigen Grenzwertfestlegung bei UWB Pulsen ihre Eindeutigkeit verliert. Dies wird auch durch die Publikation von Murphy & Merritt

(2001) bestätigt in der die Autoren ebenfalls zu dem Ergebnis kommen, dass mit gängigen und leistungsstarken UWB Pulsen nach derzeitiger wissenschaftlicher Lage keine schädlichen Effekte für Menschen auftreten können.

Simicevic (2007) gibt in seiner Publikation ein Beispiel eines leistungsstarken UWB Pulses an, welcher in einem verwendeten Körpermodell eine Überschreitung der SAR über 4 W/kg erreicht (ohne 6 Minuten Mittelung). In diesem Fall wurde ein Gaußscher Impuls mit 150 ps Pulslänge simuliert der eine Amplitude von 2500 V/m aufweist. Durch die sehr kurze Pulsdauer errechnete sich für die dadurch hervorgerufene SA ein Wert von $4 \cdot 10^{-10}$ J/kg und ist somit weit unter dem Grenzwert von ICNIRP. Der Autor vernachlässigt hier aber auch die Mittelung der SAR über 6 Minuten was auch in Schmid et al. (2008) hinterfragt wird. Außerdem ist noch zu beachten, dass UWB Störsender wie sie von Kriminellen und Terroristen eingesetzt werden mehrere Pulse abgeben können.

Laut Nitsch, Sabath & Schenk (2005) haben bisherige Studien gezeigt, dass durch UWB Pulse keine schädlichen Auswirkungen auf Menschen beobachtet werden konnten. Die Autoren führen hier beispielhaft die Studie von Jauchem et al. (2001) welche keine schädlichen Wirkungen durch Pulse dieser Art finden konnte. Eine aktuellere Studie kommt zu dem Ergebnis, dass die übertragene Energie durch starke UWB Pulse nicht ausreicht um Temperaturerhöhungen in menschlichem Gewebe zu verursachen Schunck et al. (2014). Diese Veröffentlichung wurde mittels systematischer Literaturrecherche mit ausgewählten Suchbegriffkombinationen wie z.B.: „ultra-wideband“ und „biological“ durchgeführt. Dabei wurden34 aus 98 Studien nach gewissen Ausschlusskriterien[65] als Datenbasis ausgewählt.

Nichtsdestotrotz wird nun in dieser Diplomarbeit eine mögliche Expositionsbewertung einer realen leistungsstarken UWB Quelle auf Basis einer in der Literatur gefundenen Berechnung ansatzweise beschrieben. Dazu wird nachfolgend eine Methode diskutiert die im Jahr 2006 vom Wehrwissenschaftliches Institut für Schutztechnologien aus Deutschland entwickelt wurde (Schenk, Sabath, & Bausen , 2006). Das Ziel war hier die Sicherheit des Personals, beim Betrieb von transportablen EMP Simulatoren[66] nach Regeln des Arbeitsschutzes zu gewährleisten. Die Autoren gehen hier näher auf einen leistungsstarken EMP Simulator ein, der Pulse im Nanosekunden Bereich abgeben kann. Die Amplitude kann dabei bis zu 50 kV/m betragen. Simuliert wurde mithilfe eines Programmes namens CONCEPT[67] (entwickelt an der technischen Universität Hamburg-Harburg). Dazu wurde das Frequenzspektrum der UWB Pulse errechnet und mithilfe eines simplifizierten Modells eines Menschen ($\varepsilon_r = 50$, $\sigma = 1{,}2$ S/m) die SAR und SA evaluiert. Die Autoren errechnen für einen einzelnen Puls eine Ganzkörper SAR von $SAR_{WB} = 0{,}0107$ mW/kg. In einem Zeitintervall von

[65] Ausschlusskriterien: a) Sprache anders als Deutsch oder Französisch, b)Nur Artikel die sich mit HPM/UWB beschäftigen und c)Abstracts oder Buchkapitel wurden ausgeschlossen

[66] EMP Simulatoren werden grundsätzlich dazu eingesetzt um elektrische/elektronische Komponenten auf ihre Widerstandsfähigkeit gegenüber elektromagnetischen Pulsen zu testen.

[67] Simulationsprogramm CONCEPT, Weblink: http://www.tet.tuhh.de/concept/, abgerufen am 01.Dezember 2015

6 Minuten ergibt sich für diese Quelle eine $SAR_{WB}$ = 0,128 mW/kg. Die Exposition die durch den EMP Simulator hervorgerufen wird liegt damit weit unter den Grenzwerten die von ICNIRP vorgegeben sind. Abschließend errechneten die Autoren auch noch die spezifische Absorption im Kopfbereich des Modells. Diese ergab sich im Maximum zu $SA_{Kopf}$ = 0,0569 mJ/kg und liegt somit auch weit unter den ICNIRP Grenzwerten.

Zusammengefasst lässt sich zur Expositionsbewertung von sehr kurzen breitbandigen Pulsen sagen, dass die wissenschaftliche Gemeinschaft noch keine einheitliche Sicht auf dieses Thema hat. Aus der heutigen Sicht gibt es keine Anzeichen dafür, dass UWB Pulse zu schädlichen Effekten auch mit sehr hohen Feldstärken führen können. In einer aktuellen Studie von Schunck et al. (2014) wird auch darauf hingewiesen, dass die übertragene Energie durch diese Art von Pulsen auch bei hohen Repetitionsraten sehr gering ist. Die Autoren schließen in ihrer Überblicksarbeit auch daraus, dass die Energie dieser Pulse nicht ausreicht um signifikante Temperaturerhöhungen im menschlichen Gewebe zu erreichen. Die Autoren schließen Effekte auf den menschlichen Organismus aufgrund der niedrigen Anzahl der Veröffentlichungen auf diesem Gebiet nicht zur Gänze aus. Laut Murphy (2009) ist klar ersichtlich, dass im Bereich der Expositionsbewertung von sehr kurzen Pulsen im Nano- oder Pikosekunden noch zusätzliche Forschung notwendig ist um realitätsnahe Voraussagen durch bessere Modellierung bewerkstelligen zu können.

## 4.5 Effekte auf aktive und passive Implantate

Die durchgeführte Literatur Recherche hat ergeben, dass es derzeit keine Dokumente gibt, die sich mit der Grenzwertlegung auf aktive und passive Implantate im Zusammenhang mit High Power Microwave (HPM), Damped Sine (DS) oder UWB (Ultra Wide Band) Signalen beschäftigen.

Generell wurde hier deutlich, dass nur Referenzwerte existieren welche im Falle von Herzschrittmachern anzuwenden sind. Zudem enthalten Standards wie DIN VDE 0848-3-1 (2002) oder EN 50527-2-1 (2012) Grenzwerte bis einige MHz, aber nicht für höhere Frequenzen wie sie bei einem Angriff mit einer IEMI Quelle auftreten können. Auch der amerikanische Standard ANSI/AAMI PC69-2000 (2007) liefert keine Expositionsgrenzwerte in diesem Frequenzbereich.

In dieser Diplomarbeit können keine Aussagen über die Beeinflussung von aktiven oder passiven Implantaten getroffen werden, da diese Untersuchungen den Aufwand dieser Diplomarbeit übersteigen würden.

# 5 Schutzmaßnahmen

Generell lassen sich Maßnahmen zum Schutz gegenüber elektromagnetischen Feldern nach Garn et al. (2013) in technische, administrative und organisatorische Maßnahmen unterteilen. Darin wird erläutert, dass technische Maßnahmen primär zu realisieren sind. Organisatorische- sowie administrative Maßnahmen spielen hierbei eine ergänzende Rolle falls die technischen Maßnahmen nicht ausreichen. Wie auch in dem Merkblatt 666 aus dem Jahre 2010 (AUVA, 2010) von der AUVA erwähnt wird sollen technische Maßnahmen zur Verringerung der Exposition vorrangig ergriffen werden. Wie dies beispielsweise zu bewerkstelligen ist wird nachfolgend aufgezählt:

- Erhöhung der Distanz zwischen exponierter Person und elektromagnetischer Quelle
- Verringerung oder Vermeidung der Emission
- Abschirmmaßnahmen ergreifen. (AUVA, 2010)

In Garn et al. (2013) werden zusätzlich noch die Verringerung der Aufenthaltsdauer und die Beschränkung der Expositionsdauer als technische Maßnahmen beschrieben. Reichen die technischen Maßnahmen nicht aus müssen wie oben schon erwähnt organisatorische und/oder administrative Maßnahmen ergriffen werden. In ICNIRP (1998) werden zum Beispiel folgende Maßnahmen aufgezählt:

- Zugangsbeschränkungen (administrative Kontrolle)
- Verwendung von Warneinrichtungen (hör- und sichtbar)
- Einhaltungen von Sicherheitsabständen. (ICNIRP, 1998)

Bei den in dieser Diplomarbeit beschriebenen Szenarien können die angeführten technischen, administrativen und organisatorischen Maßnahmen für den Schutz von Personen nur sehr beschränkt erfolgen. Bewusstseinsbildung für Betreiber kritischer Infrastrukturen gegenüber Angriffen mit IEMI Quellen ist unabdingbar. Danach könnten gewissen Maßnahmen wie Zugangsbeschränkungen z.B.: Umzäunung getroffen werden. Da IEMI Angriffe aber nicht nur kritische Infrastrukturen betreffen müssen ist die Zahl der potentiellen Ziele schier endlos.

# 6 Zusammenfassung

Der Einsatz von sehr starken elektromagnetischen Quellen, sogenannten HPEM Systemen, ist heutzutage nicht mehr auf den militärischen Bereich beschränkt. Eine Zunahme der Vorfälle durch absichtliche elektromagnetische Interferenz (IEMI) im zivilen Bereich mit HPEM Systemen oder auch leistungsschwächeren Systemen wird von Experten beobachtet und ist auch in der frei verfügbaren Literatur hinreichend dokumentiert. Das bedeutet diese Quellen werden für kriminelle, terroristische oder sonstige aggressive Zwecke eingesetzt. In dieser Diplomarbeit wurden zuerst Begrifflichkeiten und danach Systeme beschrieben, mit denen es möglich ist jene Art von Angriffen durchzuführen. Dabei wurden die Systeme nach erzeugter Signalform (Schmal- bis Breitband) aber auch nach Aufwand (Low-Tech bis High-Tech) zum Bau dieser Systeme kategorisiert. Die Diskussion wurde angestoßen welche Kosten aufzuwenden sind um Systeme dieser Art zu bauen oder auch zu erwerben.

In dieser Diplomarbeit wurden Szenarien herausgearbeitet in denen Menschen im Zuge der Angriffe mit elektromagnetischer Strahlung exponiert werden. Deshalb wurden auch biologische Effekte behandelt die durch Exposition mit elektromagnetische Wellen auftreten können. Dazu sind Richtlinien und Normen von internationalen Organisationen bzw. Kommissionen analysiert worden. Die Szenarien beschreiben im Wesentlichen Angriffe mit leistungsstarken IEMI Quellen, in denen Personen in den Bereich zwischen Quelle und Angriffsziel geraten. Zuerst wird in den Szenarien auf Angriffe mit sogenannten Hochleistungsmikrowellen (HPM) Systeme, die schmalbandige Signale abgeben, eingegangen. Danach werden Expositionsszenarien mit breitbandigen Signalen diskutiert, die überwiegend durch gedämpfte Sinussignale (DS) oder durch Ultrabreitband Pulse (UWB) erzeugt werden.

Die Szenarien wurden realitätsnahe und mit Informationen aus der öffentlich zugänglichen Literatur erstellt. Dabei wurde Rücksicht auf das österreichische Programm für kritische Infrastrukturen (APCIP) genommen und die kritische Infrastruktur Verkehr und Transport als Angriffsziel betrachtet, da kritische Infrastrukturen in der Literatur als potentielle Angriffsziele für Kriminelle oder Terroristen häufig erwähnt werden. Die Szenarien wurden am Beispiel Flughafen erstellt in dem sich praktisch zu jeder Tag- und Nachtzeit Personen aufhalten können. Abgeleitet aus in der Literatur verwendeten Risikoabschätzungen wurde in Kapitel 4 eine Darstellung namens „Expositionswürfel“ präsentiert, welches den Sachverhalt zwischen hoher und niedriger Exposition in Verhältnis zu Expositionsdauer, Leistung der Quelle und dem Abstand zur Quelle darstellt. Im nächsten Schritt wurde auf die Mobilität von verschiedenen IEMI Systemen eingegangen und dadurch die Wahrscheinlichkeit eines Angriffs abgeschätzt.

Im Zuge der Berechnungen konnte gezeigt werden, dass Referenzwerte und Basisgrenzwerte von ICNIRP in einem realistischen Angriffs Szenario mit HPM überschritten werden können und somit schädliche Wirkungen auf den Menschen nicht ausgeschlossen sind. Jedoch muss auch

erwähnt werden, dass in die Berechnungen keine Unsicherheitsbetrachtungen eingeflossen sind. Nichtsdestotrotz wurden die getroffenen Betrachtungen mit einer gängigen FDTD Simulationssoftware untersucht und anschaulich dargestellt. Des Weiteren wurden für Szenarien mit HPM maximale Expositionsdauern errechnet. Für DS und UWB Signale konnten aufgrund der Komplexität keine numerischen Simulationen durchgeführt werden. Die Bewertung der Breitbandsignale erfolgte mit Berechnungen mit Werten aus der Literatur. Grenzwertüberschreitungen konnten für diese Szenarien nicht gefunden werden. Im Bereich der Bewertung von Breitbandsignalen wurde generell ein Mangel an öffentlich zugänglicher Literatur gefunden, der die Bewertung dieser Signale deutlich erschwerte und nicht hundertprozentig eindeutig ausfallen ließ.

Am Ende dieser Diplomarbeit wird auf Schutzmaßnahmen eingegangen die in technische, administrative und organisatorische Maßnahmen unterteilt werden können. Dabei wird ersichtlich, dass umfassender Schutz für den Menschen gegen Angriffe mit leistungsstarken, schmalbandigen IEMI Systemen kaum realisierbar ist durch die buchstäblich unendliche Anzahl an Expositionsszenarien. Durchführbar wäre zum Beispiel der Schutz von kritischen Infrastrukturen die eine überschaubare Anzahl an Einrichtungen darstellen.

Im Zuge der Erstellung dieser Diplomarbeit wurden Beiträge zu dem nationalen KIRAS Projekt SEMB[68] und zu dem EU FP7 Projekt Aeroceptor[69] geliefert. In SEMB wurde zur Übersicht über elektromagnetische Bedrohungen beigetragen und in AEROCEPTOR wurde die Methode der Expositionsevaluierung übernommen.

[68] KIRAS SEMB, „Sicherheit gegen elektromagnetische Bedrohungen“, Weblink: http://www.kiras.at/gefoerderte-projekte/detail/?tx_ttnews[tt_news]=281&cHash=6c262ca07bf17237e4b9f534cf535752, abgerufen am 15.06.2015

[69] EU FP7 AEROCEPTOR, „UAV Based Innovative Means for Land and Sea Non-Cooperative Vehicles Stop“, Weblink: http://aeroceptor.eu/, abgerufen am 16.06.2015

## Anhang - Übersicht IEMI Quellen

Die nachfolgenden Tabellen geben einen Überblick von einigen in der frei zugänglichen Literatur gefundenen IEMI Quellen. Da diese unterschiedliche Merkmale aufweisen, sind Eigenschaften gewisser Quellen nicht in der Literatur gefunden worden und fehlen somit in der Tabelle.

Wie in nachfolgender Tabelle angegeben wird im militärischen Bereich am meisten geforscht in Bezug auf elektromagnetische Störquellen. Detailliertere Informationen können zu diversen militärischen Quellen nicht gegeben werden, da diese klassifiziert sind. Daraus folgt, dass manche Tabelleneinträge leer sind.

| Bezeichnung | Spitzen Leistung | Frequenz Bereich | Gewicht/ Größe/ Volumen | Preis [€ oder $] | Einsatzbereich |
|---|---|---|---|---|---|
| AFRL[70] Vircator (DART) | 400 MW | 325 - 820 MHz | 100 - 350 kg | | Militär, Medizinische Anwendung |
| AFRL MILO | 1,5-3 GW | 1,3 GHz | Ca. 100 kg | | Militär |
| Umgebauter Mikrowellenherd | MW-GW | 2,45 GHz | Ca. 30 kg | 200– 500 € | Kriminalität, Terrorismus |
| Marxgenerator + Pulsformende Stufe | MW | MHz - GHz | Unterschiedlich je nach Leistungsklasse | Je nach Leistungs-klasse | Kriminalität, Terrorismus |
| Hochleistungs-Pulsgenerator mit Antenne | 300 MW | | 90 kg | Ca. 10.000 $ | Militär |
| Hyperband Quelle JOLT | Fernfeld Produkt: 5,3 MV | 50 MHz - 4 GHz | 15 m³ | 100.000-1.000.000 $ | Militär |
| Maxwell Vircator | 1 GW/ 75 J | 2-10 GHz | 20 - 100 kg | | Militär, Medizin, Materialprüfung |
| LANL[71] L.O. Gyrotron | 260 W/3 J | 8,2 GHz | 2 kg | | Militär, Material-technik |
| SLAC[72] Klystron | 50-150 MW | 3 - 11 GHz | 110 - 450 kg | | Militär (Radar) |

Übersicht über ausgewählte Störquellen (Barker, Booske, Luhmann, & Nusinovich, 2005), (Schamiloglu, 2005), (Prather, Baum, Torres, Sabath, & Nitsch, 2004)

[70] AFRL – Air Force Research Laboratory, Ohio, USA
[71] LANL - Los Alamos National Laboratory, New Mexiko, USA
[72] SLAC – National Accelerator Laboratory, US Energieministerium

Die folgende Tabelle listet am Markt verfügbare Jammer exemplarisch auf. Dazu werden Preiskategorien angeführt um ein Gefühl dafür zu bekommen, wie groß die Ausgaben für diverse IEMI Quellen sind. Im Zuge der Internetrecherche zeigte sich, dass sehr viele Anbieter eine Vielzahl von Geräten verkaufen. Die grob geschätzte Anzahl an käuflich erwerbbaren Typen von unterschiedlichen Herstellern geht in die Hunderte.

| Bezeichnung | $P_{Jammer}$ | Frequenzbereich | Gewicht/Größe | Preis |
|---|---|---|---|---|
| GJ 4000[73] | 2.5 W | GPS L1, L2 | 0.25 Kg | 145 € |
| CT – 1066[74] | 6 W | GPS L1, L2, L3, L4, L5 | 1,2 kg / 175 x 70 x 35mm | 50 € |
| Mobile Phone Jammer[75] | 45 W | CDMA, GSM, DCS, PHS, 3G | 12 Kg | 660 € |
| Man Pack Backpack Jammer[76] | 60 W | GSM, 3G | 28 x 38 x 18 cm | 6200 € |
| TSJ-210W-Outdoor[77] | 210 W | CDMA, GSM, 3G | 60 x 36 x 20cm | 8900 $ |
| JAMKIT[78] | 350 W | GSM, VHF/UHF,WLAN | - | Transportierbar mit Kleinbus |
| Jam-Ranger[79] | 1650 W | 8 Kanäle im Frequenzbereich 420MHz-2.5GHz | - | Transportierbar mit Van |
| JAMX Military Shelter[80] | 2000 W | 33 Bänder im Frequenzbereich 20MHz-3GHz | - | Transportierbar mit HUMVEE |

Übersicht über ausgewählte Jammer aus dem Internet

[73] GPS Jammer GJ4000, Weblink: http://www.jammer-store.com/gp4000-mini-gps-jammer-blocker.html, abgerufen am 15.Dezember 2015
[74] GPS Jammer CT-1066, Weblink: http://storsender.com/product/ct-1066-gps-plus-l1-l2-l3-l4-l5-wifi-6w-6-antennas-jammer-up-to-30m/, abgerufen am 15.Dezember 2015
[75] Kommunikationsjammer 3502, Weblink: http://www.nuvolashop.com/de/mobile-phone-jammers/3502-mobile-phone-jammer-high-power-50m-bis-100m-abschirmung-radius-40w-high-output-leistung.html, abgerufen am 16.Dezember 2015
[76] Kommunikationsjammer, Weblink: http://www.thesignaljammer.com/products/Man-Pack-Backpack-Jammer.html, abgerufen am 16.Dezember 2015
[77] Kommunikationsjammer für Gefängnis, Weblink: http://www.thesignaljammer.com/products/210W-Outdoor.html, abgerufen am 21.Dezember 2015
[78] Hochleistungsjammer, Weblink: http://www.sesp.com/VehicleMountedJammerKits.asp, abgerufen am 14.Dezember 2015
[79] Anti Riot Jammer, Weblink: http://www.sesp.com/Anti-Riot-Jamming.asp, abgerufen am 27.Dezember 2015
[80] Military Convoy Protection Jammers, Weblink: http://www.sesp.com/MilitaryConvoyProtection.asp, abgerufen am 17.Dezember 2015

Die nachfolgende Tabelle listet Beispiele von einigen HPM Quellen auf die in der Literatur gefunden wurden.

| Bezeichnung | Spitzenleistung | Frequenzbereich | Pulsweite | Energie | Repetitionsrate | Gewicht [kg] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Maxwell (PI) Vircator | 1 GW | 400-800 MHz | 75-125 ns | 100 J | Einzelpuls | 100 |
| AFRL Vircator (DART) | 400 MW | 325-407 MHz | ≤140 ns | ≤56 J | Einzelpuls | ~340 |
| AFRL Vircator (DART) | 400 MW | 435-544 MHz | ≤140 ns | ≤56 J | Einzelpuls | ~230 |
| AFRL Vircator (DART) | 400 MW | 660-820 MHz | ≤140 ns | ≤56 J | Einzelpuls | ~110 |
| NRL RKA (Friedman) | 15 GW | 1.3 GHz | 90 ns | 1.35 kJ | Einzelpuls | groß |
| AFRL MILO | 3 GW | 1.1 GHz | 80 ns | 240 J | Einzelpuls | groß |
| AFRL MILO | 2 GW | 1.3 GHz | 200 ns | 400 J | Einzelpuls | 90 |
| AFRL RKO | 1.5 GW | 1.3 GHz | 120 ns | 180 J | Einzelpuls | ~540 |
| Maxwell (PI) Vircator | 1 GW | 0.8-2 GHz | 75-125 ns | 100 J | Einzelpuls | 10 |
| LANL Reditron | 1.6 GW | 2.4 GHz | 30 ns | 50 J | Einzelpuls | - |
| NRL RKA (Friedman) | 1 GW | 3.5 GHz | 180 ns | 180 J | Einzelpuls | - |
| Maxwell (PI) Vircator | 1 GW | 2-4 GHz | 75-125 ns | 100 J | Einzelpuls | 100 |
| Maxwell (PI) Orion Magnetron | 800 MW | 2.8 GHz | 40 ns | 30 J | 100 Hz | groß |
| Maxwell (PI) Vircator | 1 GW | 8-10 GHz | 25-75 ns | 75 J | Einzelpuls | 20 |

Übersicht über ausgewählte HPM Quellen (Barker & Schamiloglu, 2001)

Die nachfolgende Tabelle listet Beispiele von einigen Breitband Quellen auf die in der Literatur gefunden wurden.

| Bezeichnung | Spitzen-leistung | Pulsweite/ Anstiegszeit | Spektrum | Fernfeld-produkt $r \cdot E_f$ | Rep. Rate | Gewicht/ Größe | Zusätzliche Information |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Matrix AFRL | Einige 100 MW | - | 180-600 MHz | 90 kV | - | 15 m3 | High-Tech, Gedämpfter Sinus, Mesoband |
| BAE Systems NLTL | - | 30 ns | 100 MHz-2 GHz | 50 kV | 1 kHz | - | Gedämpfter Sinus Mesoband |
| HRR 32 Diehl | 7 kW | 4 ns/100 ps | - | 2 kV | 600 Hz | Kaffeekanne | Gedämpfter Sinus Mesoband |
| H-2 AFRL | - | 1.5-2 ns/250 ps | 100-400 MHz Maximum bei 150 MHz | 430 kV | - | - | Forschergruppe Sub-Hyperband |
| IRA II AFRL | - | 20 ns/100 ps | 200 MHz-3 GHz | 1.4 MV | 400 Hz | Durchmesser-Ant.=4 m | Forschergruppe Hyperband |
| JOLT AFRL | - | 100 ps | 50 MHz-2 GHz | 5.3 MV | 600 Hz | 15 $m^3$ | High-Tech System, Forschergruppe Hyperband |
| Half-IRA WIS und Rheinmetall Germany | - | 650 ps/100 ps | - | mehrere 100 kV | - | Ähnlich wie JOLT | 100 kV Marx Generator + Antenne Hyperband |
| SM-3NS | - | 6-10 ns/2 ns | - | 400 kV | 0.1-2 kHz | - | Radan Research Group |

Übersicht über ausgewählte Breitband Quellen Prather et al. (2004), Sabath & Garbe (2009)

## Abkürzungsverzeichnis

| | |
|---|---|
| AIT | Austrian Institute of Technology |
| APCIP | Austrian Programme for Critical Infrastructure Protection – Österreichisches Programm zum Schutz kritischer Infrastruktur |
| AÖV | Arbeitsgemeinschaft österreichischer Verkehrsflughäfen |
| BR | Band Ratio |
| COTS | Commercial off the Shelf |
| CW | Continuous Wave |
| DECT | Digital Enhanced Cordless Telecommunications |
| DS | Damped Sine |
| EM | Elektromagnetisch |
| EMI | Elektromagnetische Interferenz (engl. Electromagnetic interference) |
| EMF | Elektromagnetische Felder |
| EMP | Elektromagnetischer Puls |
| EMSIN | Elektromagnetischer Schutz von Verkehrsinfrastrukturen |
| EMV | Elektromagnetische Verträglichkeit |
| GSM | Global System for Mobile Communications |
| HEMP | High Altitude Electromagnetic Pulse |
| HERF | High Energy Radiated Fields |
| HIRF | High Intensity Radiated Fields |
| HF | Hochfrequenz (engl. Radio frequency, RF) |
| HPEM | High Power Electromagnetics |
| HPM | High Power Microwave |
| IEC | International Electrotechnical Commission |
| IEEE | Institute of Electrical and Electronics Engineer |
| IEMI | Intentional Electromagnetic Interference |
| ICNIRP | International Comission on Non-Ionizing Radiation Protection |
| IRA | Impulse Radiating Antenna |
| LEMP | Lightning Electromagnetic Pulse |
| NATO | North Atlantic Treaty Organization |
| NIR | Nicht – ionisierende Strahlung |
| NEMP | Nuklearer elektromagnetischer Puls |
| NLW | Nicht – letale Waffen (engl. nonlethal – weapons) |
| NNEMP | Nicht nuklearer elektromagnetischer Puls |
| PBW | Percent Bandwidth |
| PEL | Permissible Exposure Level |

| | |
|---|---|
| RF | Radio frequency |
| RMS | Root Mean Square |
| SAR | Specific Absorption Rate – Spezifische Absorptionsrate |
| UHF | Ultra-High Frequency - Dezimeterwelle |
| UMTS | Universal Mobile Telecommunications System |
| UWB | Ultra-Wide Band |
| VHF | Very High Frequency |
| WHO | World Health Organization – Weltgesundheitsorganisation |

## Literaturverzeichnis


Adami, C., Braun, C., Clemens, P., Suhrke, M., Taenzer, H. J., & Rieter-Barrell, Y. (2011). *EMC Europe 2011 York - Detection of High Power Microwaves: 26 - 30 Sept. 2011, York, United Kingdom: Detection of High Power Microwaves.* Piscataway and NJ: IEEE.

ANSI/AAMI . (2007). Active implantable medical devices-Electromagnetic compatibility-EMC test protocols for implantable cardiac pacemakers and implantable cardioverter defibrillators. In *ANSI/AAMI PC69.*

AUVA. (2010). *Elektromagnetische Felder beim Schweißen.* Merkblatt 666, Wien.

Bäckström, M. (1999). HPM Testing of a Car: A Representative Example of the Susceptibility of Civil Systems. *Workshop W4, 13th International Zurich Symposium and Technical Exhibitionon EMC*, (pp. 189-190). Zürich.

Backstrom, M., & Lovstrand, K. (2004). Susceptibility of electronic systems to high-power microwaves: summary of test experience. *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on , vol.46, no.3,*, pp. 396-403.

Barker, R. J., & Schamiloglu, E. (2001). *High Power Microwave Sources and Technologies.* New York: IEEE Press.

Barker, R. J., Booske, J. H., Luhmann, N. C., & Nusinovich, G. S. (2005). *Modern Microwave and Millimeter-Wave Power Elektronics.* IEEE Press.

Bernhardt, J. H. (1999). Known Mechanisms of Pulsed RF Field Interaction. Italien.

Bieth, F., Schunck, T., Pinguet, S., Bischoff, R., & Delmote, P. (2013). Biological and Sanitary Effects of High Power Micorwave Ultra Wide Band (HPM/UWB) Signals.

Bladel, A. J. (2004). *Analysis into Intentional Electromagnetic Interference of Electronic Systems.* Eindhoven.

Brauer, F., Sabath, F., & Haseborg, J. t. (2009). Susceptibility of IT network systems to interferences by HPEM. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility* (pp. 237-242). Austin, Texas: IEEE.

Brown , D. O., Lu, S. T., & Elson, E. C. (1994). Characteristics of microwave evoked body movements in mice. In *Bioelectromagnetics* .

Bundeskanzleramt. (2008). *Das österreichische Programm zum Schutz kritischer Infrastrukturen, Masterplan APCIP.* Wien.

Cavagnaro, M., Pisa, S., & Pitella, E. (2012). Safety Aspects of Human Exposure to Ultra Wideband Radar Fields. *International Symposium on Electromagnetic Compatibility.* Rom.

Christ, A., Kainz, W., Hahn, E. G., Honegger, K., Zefferer, M., Neufeld, E., . . . Kuster, N. (2010). The Virtual Family - development of surface-based anatomical models of two adults and two children for dosimetric simulations. *Physics in Medicine and Biology 55(2)*, pp. 23-38.

Clayton, R. (2006). *Introduction to Electromagnetic Compatibility.* Hoboken, New Jersey: Wiley.

Clemens, M., Dickmann, S., El Ouardi, A., Hansen, V., Schaarschmidt, M., Streckert, J., & Zhou, Y. (2012, February). Numerical Dosimetry Schemes for the Simulation of Human Exposure to Pulsed High-Power Electromagnetic-Field Sources. *IEEE Transactions on Magnetics*, p. Vol.48.

De Santis, V., Feliziani, M., & Maradei, F. (2010, August). Safety Assesment of UWB Radio Systems for Body Area Network by the FDDTD Method. *IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 46, No.8.*

Department of Defense. (2009). *Instruction-Protecting Personnel from Electromagnetic Fields.* USA.

Department of Defense. (2010). *MIL-STD-464C - Electromagnetic Environmental Effects Requirements for Systems.* USA.

Diehl BGT Defence. (2013). *White Paper on HPEM Technology.* Deutschland: Roethenbach/Pegnitz.

DIN EN. (2012). Verfahren zur Beurteilung der Exposition von Arbeitnehmern mit aktiven implantierbaren medizinischen Geräten (AIMD) gegenüber elektromagnetischen Feldern - Teil 2-1: Besondere Beurteilung für Arbeitnehmer mit Herzschrittmachern; Deutsche Fassung EN 50527-. In *DIN EN 50527-2-1:2012-05.*

DIN VDE. (2002). Sicherheit in elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern - Teil 3-1: Schutz von Personen mit aktiven Körperhilfsmitteln im Frequenzbereich 0 Hz bis 300 GHz. In *DIN VDE 0848-3-1:2002-05.*

Elder, J. A., & Chou, C. K. (2003). Auditory Response to Pulsed Radiofrequency Energy. *Bioelectromagnetics Suppl, 6, S162-S173.*

Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2005). *Risk Assessment- A How-To Guide to Mitigate Potential Terrorist Attacks Against Buildings.* Department of Homeland Security.

Fortov, V., Parfenov, Y., Siniy, L., & Zdoukhov, E. (2006). Russian Research of Intentional Electromagnetic over the past 10 years. *AMEREM 2006.* Albuquerque, New Mexico.

Gabriel, S., Lau, R. W., & Gabriel, C. (1996). The dielectric properties of biological tissues: III. Parametric models for the dielectric spectrum of tissues. *Physics in Medicine and Biology, Vol.41(11):2271-93*.

Garn, H., Neubauer, G., Ehrlich-Schupita, W., & Lamedschwandner, K. (2013). Elektromagnetische Felder und Wellen, Vorlesungsskriptum Technische Universität Wien.

Genender, E. (2012). *Risikoanalyse von Systemen bei elektromagnetischer Störbeaufschlagung.* Leibniz Universität Hannover: Shaker Verlag.

Genender, E., Garbe, H., & Sabath , F. (2014). Probabilistic Risk Analysis Technique of Intentional Electromagnetic Interference at System Level. *IEEE TRANSACTIONS ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, VOL. 56, NO. 1*.

Giri, D. (2008). Documented Electromagnetic Effects (EME). *Proceedings of the EUROEM.* Lausanne, Schweiz.

Giri, D. V. (2004). High - Power Electromagnetic Radiators Nonlethal Weapons and Other Applications. Harvard University Press.

Giri, D. V., & Tesche, F. M. (2004). Classification of Intentional Electromagnetic Environments (IEME). *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*.

Giri, D. V., Tesche, F. M., & Baum, C. E. (2006). *An Overview of High-Power Electromagnetic (HPEM) Radiating and Conducting.*

Granatstein, V., Rodgers, J., Anlage, S., & Goldsman, N. (2005). High Power Microwave Technology and Effects. *A University of Maryland Short Course*. Redstone Arsenal, Alabama.

Guy, A. W., & Chou, C. K. (1982). Effects of high-intensity Microwave Pules Exposure of Rat Brain. *Radio Science* .

Hansen, V., El Ouardi, A., Streckert, J., Zhou., Y., Dickmann, S., & Clemens, M. (2010). Human Exposure to High-Power Electromagnetic Signals – Exemplary Numerical Dosimetry. *32nd Meeting of Bioelectromagnetics Society (BEMS 2010).* Seoul, Süd Korea.

Hoad, R., & Sutherland, I. (2007). The Forensic Utility of Detecting Disruptive Electromagnetic Interference. *ECIW 2007 - The 6th European Conference on Information Warfare and Security.* Shrivenham, Großbritanien.

Ianoz, M., & Wipf, H. (2000). Modelling and Simulation Methods to Assess EM Terrorism Effects. *Asia-Pacific Conference Proceedings on Environmental Electromagnetics.* Shanghai, China.

ICNIRP. (1996). Health issues related to the use of hand-held radiotelephones. *Health Physics 70:587–593;*.

ICNIRP. (1998). Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (up to 300GHz). *Health Physics, Vol. 74(4)*, pp. 383-387.

ICNIRP. (2009). *Exposure to high frequency electromagnetic fields, biological effects and health consequences (100 kHz-300 GHz) - Review of the Scientific Evidence and Health Consequences.* München.

ICNIRP. (2010). Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields

(1Hz - 100kHz). *Health Physics, Vol. 99(6)*, pp. 818-836.
IEC. (2004). IEC/TR 61000-1-5. *Eelectromagnetic Compatibility (EMC) - Part 1-5: General - High Power Electromagnetic (HPEM) Effects on Civil Systems*. Genf, Schweiz.
IEC. (2005). IEC 61000-2-13. *High-Power Electromagnetic (HPEM) Environments-Radiated and Conducted*.
IEC TR 61000-5-6. (2002, June). *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 5-6: Installation and mitigation guidelines - Mitigation of external EMV influences*. Geneva, Switzerland: IEC.
IEEE. (2005). *C95.1 - IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz.* Paris.
IEEE. (2015). Recommended Practice for Protecting Publicly Accessible Computer Systems from Intentional Electromagnetic Interference (IEMI). *IEEE Std 1642-2015 , vol., no., pp.1,39*.
Jauchem, J. R., Ryan, K. L., Frei, M. R., Dusch, S. J., Lehnert, H. M., & Kovatch, R. M. (2001). Repeated exposure of C3H/HeJ mice to ultra-wideband electromagnetic pulses: lack of effects on mammary tumors. *Radiation Research Society*, pp. 369-377.
Jones, M. (2011, März/April). The Civilian Battlefield Protecting GNSS Receivers from Interference and Jamming. *InsideGNSS*.
Kark, K. W. (2012). Antennen und Strahlunsgfelder-Elektromagnetische Wellen auf Leitungen, im Freiraum und ihre Abstrahlung. Bad Wurzach: Vieweg Teubner Verlag.
Katastrophenhilfe, B. f. (2006). *Dritter Gefahrenbericht der Schutzkommission beim Bundesminister des Inneren.*
Kitchen, R. (2001). *RF and Microwave Radiation Safety Handbook - Second Edition.* Newnes.
Kreitlow, M., & Rambousky, R. (2013). Empfindlichkeitsuntersuchungen an IT-Netzwerken bei elektromagnetischen Bedrohungen und Erarbeitung von Schutzkonzepten. *Elektromagnetischer Schutz für Verkehrsinfrastrukturen (EMSIN)-Abschlussbericht*.
Kreth, A., Genender, E., Doering, O., & Garbe, H. (2012). Identifying Electromagnetic Attacks against Airports. *ESA Workshop on Aerospace EMC.* Venedig.
Kubacki, R., & Lamari, S. (2014). Technique of High Power Microwave Pulses Dosimetry of Living Systems. *Proceedings of Progress In Electromagnetics Research Symposium.* Guangzhou, China.
Kubacki, R., & Lamari, S. (2015). The Exposure Level of High Power Microwave Pulses. *Proceedings of Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS).* Prag.
Kubacki, R., Cwalina, E., Lamari , S., & Sobiech, J. (2014). Dosimetry for Biological Tissues Exposed to Ultra-Wideband Microwave Signals. *IEEE 20th International Conference on Microwaves, Radar, and Wireless Communication (MIKON).* Danzig, Polen.
Lambrecht, A. (2010). *True-Time-Delay Beamforming für ultrabreitbandige Systeme hoher Leistung.* Karlsruhe: KIT Scientific Publishing.
Leach, R., & Alexander, M. (1995). *Electronic Systems Failures and Anomalies Attributed to Electromagnetic Interference.* Washington: NASReport 1374, National Aeronautics and Space Administration.
Lin, J. C. (1999). Summary of key pulsed RF health effects. *Biological Effects, Health Consequences and Standards for Pulsed Radiofrequency Fields. Proceedings of the International Seminar on Biological Effects, Health Consequences and Standards for Pulsed Radiofrequency Fields.* Erice.
Mansson, D. (2008). Intentional Electromagnetic Interference (IEMI) Susceptibility investigations and classification of civilian systems and equipment. Uppsala, Schweden.
Mansson, D., Bäckström, M., & Thottappillil, R. (2009). Classifying Facilities with respect to Intentional EMI. *IEEE Transactions for Elelctromagnetic Compatibility*, (pp. 249-254).
Mikl-Leitner, J. (2015). Anfragebeantwortung durch die Bundesministerin für Inneres Mag. Johanna Mikl-Leitner zu der schriftlichen Anfrage (3028/J) der Abgeordneten Mag. Nikolaus Alm, Kolleginnen und Kollegen an die BMI betreffend kritische Infrastrukturen. *Parlamentarische Anfrage 3028/J*.
Murphy, M. R. (2009). Exposure Standards for Radio Frequency Pulses. *Progress in*

*Electromagnetics Research Symposium Abstracts.* Beijing, China.
Murphy, M. R., & Merrit, J. H. (1999). The biological effects of high peak power, short pulse width electromagnetic fields. *Biological Effects, Health Consequences and Standards for Pulsed Radiofrequency Fields. Proceedings of the International Seminar on Biological Effects, Health Consequences and Standards for Pulsed Radiofrequency Fields*. Italien.
Murphy, M. R., & Merritt, J. H. (2001). Bioeffects Research for Emerging RF Technologies. *Proceedings of the Eastern European Regional EMF Meeting and Workshop-Measurements and Criteria for Standards Harmonization in the Field of EMF Exposure*. Varna, Bulgarien.
Nana, R. K. (2012). Störeinkopplung ultrabreitbandiger elektromagnetischer Felder in komplexe Systeme. Hamburg.
Nana, R. K., Kranzpiller, W., Sonnenberg, N., & Tsamo, R. N. (2012). Signalparameter zur Ortung von HPEM-Quellen. *Advances in Radio Science*.
NATO. (2003). *STANAG - Evaluation and Control of Personnel Exposure to Radio Frequency Fields - 3 kHz to 300 GHz.*
NATO. (2003). *Standardization Agrement (STANAG) Evaluation and Control of Personnel Exposure to Radio Frequency Fields - 3 kHz to 300 GHz.* Paris.
NATO. (2006). *The Human Effects of Non-Lethal Technologies.* Paris.
NATO. (2011). *AECTP 250 Electrical And Electromagnetic Environmental Conditions.*
Nitsch, D., & Sabath, F. (2006). Exposure Assessment on Short Pulse EM Fields. *American Electromagnetics Sympsoium (AMEREM).* Albuquerque, USA.
Nitsch, D., Sabath, F., & Schenk, U. (2005). Anwendung der Bestimmungen zum Arbeits- und Immissionsschutz auf elektromagnetische Impulse mit Halbwertsbreiten im Nanosekundenbereich. *Symposium Elektromagnetische Effekte.* Mannheim.
Pfützner, H. (2012). *Angewandte Biophysik.* Wien: Springer.
Prather, W. D., Baum, C. E., Torres, R. J., Sabath, F., & Nitsch, D. (2004). Survey of Worldwide High-Power Wideband Capabilities. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility,Vol.46 (3)*.
Prechtl, A. (1994). Vorlesungen über die Grundlagen der Elektrotechnik Band 2. Wien.
Preinerstorfer, A., Adami, C., Jöster, M., Pusch, T., Suhrke, M., Bumerl-Lexa, R., . . . Neubauer, G. (2014). Investigation of the Impact of Various IEMI Sources to Electronic Passport Readers. *Future Secuity 2014.* Berlin, Deutschland: Fraunhofer Verlag.
Radasky, W. A., Baum, C. E., & Wik, M. W. (2004). Introduction to the Special issue on High-Power Electromagnetics (HPEM) and Intentional Electromagnetic Interference (IEMI). *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 46(3)*.
Radasky, W., & Savage, E. (2010). Intentional Electromagnetic Interference (IEMI) and Its Impact on the U.S. Power Grid. *Meta-R-323*.
Raslear, T. G., Akyel, Y., Lu, S. T., Swearengen, J. R., Varle, D., DeAngelis, M. L., & Seaman, R. L. (1992). CW Microwave Fields evoke Body Movements in bilaterally cochleotomized Rats. *14th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society.* Paris.
Roach , W. P. (2009). *Radio Frequency Radiation Dosimetry Handbook (Fifth Edition).* Brooks, Texas: Air Force Research Laboratory-Directed Energy Bioeffects Division.
Rohe, M., & Koch, M. (2013). Elektromagnetischer Schutz von Verkehrsinfrastrukturen (EMSIN). *BMBF-Fachworkshop „Sicherheit im Luftverkehr“.* Düsseldorf.
Sabath, F. (2011). What can be learned from documented Intentional Electromagnetic Interference (IEMI) Attacks? *XXXth URSI General Assembly and Scientific Symposium* .
Sabath, F., & Garbe, H. (2009). Risk Potential of Radiated HPEM Environments . IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2009. EMC 2009.
Sabath, F., Nitsch, D., Jung, M., & Weise, T. H. (2002). Design and Setup of a Short Pulse Simulator for Susceptibility Investigations. *IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, VOL. 30*(NO. 5).
Savage, E., & Radasky, W. (2012). Overview of the threat of IEMI (intentional electromagnetic

interference). *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC).* Pittsburgh.
SCENIHR. (2009). *SCENIHR (Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks). Health Effects of Exposure to EMF.*
Schamiloglu, E. (2005). High Power Microwave Sources and Technologies.
Schenk, U., Sabath, F., & Bausen , A. (2006). Transportable EMP-Simulatoren für Systemtests an Flugzeugen. *Internationale Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit*, (pp. 547-554). Düsseldorf.
Schmid, G., Cecil, S., Petric, B., Neubauer, G., & Pérez , L. A. (2008). *Bestimmung der Exposition durch Ultra-Wideband Technologien.* Abschlussbericht, Seibersdorf.
Schunck, T., Bieth, F., Pinguet, S., & Delmote, P. (2014). Penetration and propagation into biological matter and biological effects of high-power ultra-wideband pulses: a review. *Electromagnetic Biology and Medicine*.
Seaman, R. L. (2009). *Review of Literature on High Power Microwave Pulse Biological Effects.* Texas.
Security Folder der Flughäfen-Sicherheit auf Österreichs Flughäfen. (2014). In A. ö. Verkehrsflughäfen. Österreich: Bundesministerium für Inneres.
Serafin, D. J., & Dupouy, D. (2005). Potential IEMI Threats against Civilian Air Traffic. *Proceedings of the XXVIIIth URSI General Assembly.* Neu Delhi, Indien.
Simicevic, N. (2007). Exposure of biological material to ultra-wideband electromagnetic pulses: dosimetric implications. *Health Physics, Vol 92(6)*, pp. 574-583.
Simicevic, N. (2008). FDTD Computation of Human Eye Exposure to Ultra-wideband Electromagnetic Pulses. *Physics in Medicine, 53(6)*, pp. 1795-809.
Simunic, D. (2001). *Measurement of RF Near and Far Fields.* Zagreb.
Siwiak, K., & Bahreini, Y. (2007). *Radio wave propagation and antennas for personal communication third edition.* Norwood: ARTECH HOUSE INC.
Stojilovic, M., Menssen, B., Flintoft, I., Garbe, H., Dawson, J., & Rubinstein, M. (2014). TDoA-Based Localisation of Radiated IEMI Sources. *Proceedings of the International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe 2014).* Göteburg, Schweden.
Tattersall, J. E., Mifsud, N. C., & Scott, I. R. (2009). Effects of Localised Pulsed Heating on Electrophysiological Responses in Brain Slices. *Progress In Electromagnetics Research Symposium.* Peking.
US Departement of Homeland Security. (2005). *The Threat of Radio Frequency Weapons to Critical Infrastructure Facilities.* TSWG & DETO Publication.
Visveswaran, I. (2008). Hazards of Radiation to Personel (HERP). *10th International Conference on Electromagnetic Interference & Compatibility.* Bangalore.
WHO. (2006). Retrieved from http://www.who.int/peh-emf/about/WhatisEMF/en/index4.html
WHO. (2013). Retrieved Juli 21, 2014, from http://www.who.int/peh-emf/publications/facts/fs226/en/
Wik, M., Gardner, R., & Radasky, W. (1999). Electromagnetic Terrorism and Adverse Effects of High Power Electromagnetic Environments. *Workshop W4, 13th International Zurich Symposium and Technical Exhibition on EMC.* Zürich, Schweiz.
Wilson, C. (2008). High Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) and High Power Microwave (HPM) Devices: Threat Assessments. *CRS Report for Congress*. Retrieved from http://www.fas.org/sgp/crs/natsec/RL32544.pdf
Wolff, C. (2012). *Radartutorial-Grundlagen der Radartechnik*. Von http://www.radartutorial.eu/druck/ abgerufen