

# **Untersuchung der Abschirmbarkeit hochfrequenter elektromagnetischer Wellen**



**Philip Pohl (14)**  
**Wettbewerb „Schüler experimentieren“ 2017**

Arbeitsgemeinschaft „Jugend Forscht“ des  
Christian Gymnasium Hermannsburg  
Betreuung: StD Thomas Biedermann

## Inhalt

1. Zielsetzung .....	3
2. Grundlagen.....	3
2.1 Erläuterung elektromagnetische Wellen: .....	3
2.2 Faraday'scher Käfig .....	4
2.3 Dezibel.....	4
2.4. Versuchsaufbau.....	4
2.4.1. Messungen mit Spektrumanalysator .....	5
2.4.2. Messungen mit Netzwerkanalysator.....	6
3. Messungen.....	7
3.1 Messreihen mit Spektrumanalysator .....	7
3.2. Messreihen mit dem NWA.....	8
3.3. Auffälligkeiten .....	9
3.4. Interpretation.....	9
4. Zusammenfassung .....	10
5. Quellen.....	10
6. Verwendete Software .....	10

## 1. Zielsetzung

Ziel dieses Projektes ist es, herauszufinden, wie es möglich ist, einen Raum mit möglichst wenig Material- und Kostenaufwand möglichst gut gegen hochfrequente elektromagnetische Wellen zu schützen. Dabei soll verhindert werden, dass starke Wellen den Raum verlassen und z.B. das Handynetz stören, oder dass Präzisionsversuche durch äußere Störstrahlung beeinflusst werden. Hierzu ist es entscheidend, zu verstehen, wie sich eine elektromagnetische Welle verhält, da man sie sonst nicht richtig abschirmen kann. Ein Faraday'scher Käfig dient hierbei als Hilfsmittel, da er elektromagnetische Wellen bei geeigneter Maschengröße abschirmt.

## 2. Grundlagen

### 2.1 Erläuterung elektromagnetische Wellen:

Eine elektromagnetische Welle ist grundlegend mit einer „Wasserwelle“ vergleichbar: Sie bewegt sich ebenfalls wellenförmig durch den Raum und transportiert Energie.

Allerdings kann man sie (mit Ausnahme von Licht) ohne technische Hilfsmittel nicht wahrnehmen. Sie bewegen sich im Vakuum mit  $3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$ , was der Lichtgeschwindigkeit entspricht. Elektromagnetische Wellen gelten als hochfrequent, wenn ihre Frequenz über 30 kHz liegt (über 30.000 mal in einer Sekunde schwingt).

Eine Welle lässt sich anhand ihrer Periodenlänge, Periodendauer und ihrer Frequenz bestimmen (siehe Skizze).

Wenn man auf der X-Achse die Strecke angibt, so erhält man die Periodenlänge  $\lambda$ .

Gibt man stattdessen die Zeit an, so erhält man die Periodendauer  $T$  der Welle.

Diese sind exakt die Distanz zwischen dem Beginn und dem Ende des sich wiederholenden Teils der Welle.

Die Frequenz  $f$  ist der Kehrwert der Periodendauer:

$$f = \frac{1}{T} \quad (1)$$

Für die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer elektromagnetischen Welle gilt:

$$v_c = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f \quad (2)$$

Beispiel (gesucht ist die Wellenlänge bei 900 MHz):

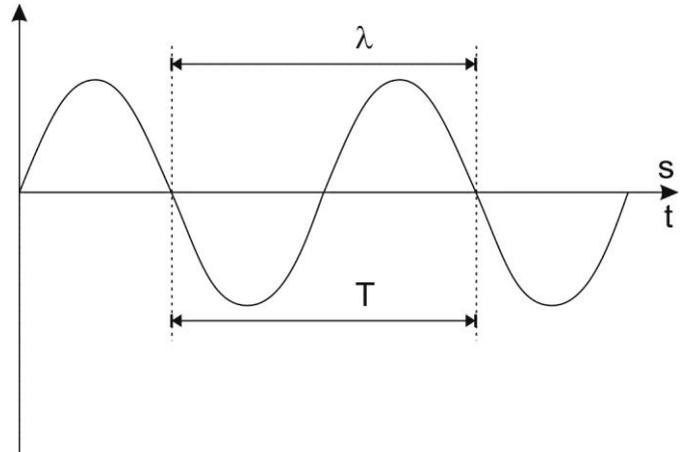
Durch Auflösen von (2) nach  $\lambda$  erhält man

$$\lambda = \frac{v_c}{f} \quad (3)$$

Durch Einsetzen der Zahlenwerte ergibt sich daraus die Wellenlänge

$$\lambda = \frac{3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}}{900 \cdot 10^6 \text{ Hz}} = \frac{1}{3} \text{ m} = 0,333 \text{ m}$$

Dipole wandeln elektrische Signale in elektromagnetische Wellen um und umgekehrt.



Ein Dipol ist für eine Wellenlänge „passend“, wenn die Länge  $l$  eines Dipolstabes ein ganzzahliges Vielfaches von  $\frac{\lambda}{4}$  ist:

$$l = n \cdot \frac{\lambda}{4}, n \in \mathbb{N} \quad (4)$$

Bei 900 MHz (GSM-Mobilfunknetz) erhält man also für  $n = 1$

$$l = 1 \cdot \frac{0,333 \text{ m}}{4} = 0,0825 \text{ m} = 8,25 \text{ cm}$$

Also muss die Länge des Dipols 8,25 cm betragen, damit er für die Frequenz 900 MHz „passend“ ist, da er bei dieser Frequenz das Signal am besten abstrahlt oder empfängt. Die von mir verwendeten Dipole (5,6 cm) sind nicht optimal, da sie für 1340 MHz ausgelegt sind.

## 2.2 Faraday'scher Käfig

Ein Faraday'scher Käfig ist eine allseitig geschlossene Hülle, die aus miteinander verbundenen elektrischen Leitern besteht und den inneren Bereich von und nach außen gegen elektrische Felder und elektromagnetische Wellen schützt. Er erhielt seinen Namen vom britischen Wissenschaftler Michael Faraday, der diese Eigenschaft im Jahre 1823 entdeckte [1, S. 128].

## 2.3 Dezibel

Alle Ergebnisse der Abschirmung werden in Dezibel (dB) angegeben. Hierbei handelt es sich um eine logarithmische Größe, die zur Kennzeichnung von Pegeln verwendet wird [2, S. 2]. In meinem Fall zeigt sie an, wie gut die Abschirmung funktioniert. Ist  $P_1$  die Bezugsleistung und  $P_2$  die gemessene Leistung, ergibt sich die Dämpfung (oder Verstärkung)  $g$  über die folgende Formel:

$$g[\text{dB}] = 10 \cdot \log\left(\frac{P_2}{P_1}\right) \quad (5)$$

Ist dagegen die Dämpfung  $g$  gegeben, ergibt sich der Quotient  $k$  der Leistungen zu:

$$k = \frac{P_2}{P_1} = 10^{\frac{g}{10}} \quad (6)$$

Für die gemessene Leistung gilt dann entsprechend

$$P_2 = P_1 \cdot 10^{\frac{g}{10}} \quad (7)$$

Wurde beispielsweise ein Signal um -15 dB abgeschwächt, so beträgt seine Leistung nur noch 3,16 % der ursprünglichen Leistung.

## 2.4 Versuchsaufbau

Für meine Messungen standen mir zwei verschiedene Messgeräte zur Verfügung:

- Spektrumanalysator Aaronia Spectran HF-60105 V4 X
- Netzwerkanalysator (Jugend-Forscht-Arbeit 2014)

Der Spektrumanalysator analysiert das seinem Eingang zugeführte Frequenzgemisch und bestimmt die Intensität der verschiedenen Frequenzen. Diese Daten sendet er an eine Software, welche sie graphisch darstellt.

Der Netzwerkanalysator erzeugt in einem vorgegebenem Intervall nacheinander verschiedene Frequenzen, die an ein DUT (Device under Test) ausgegeben werden. Gleichzeitig misst er das Signal, das er vom DUT zurückerhält. Die Änderung der Signalamplitude in Abhängigkeit von der Frequenz wird graphisch dargestellt.

### 2.4.1. Messungen mit Spektrumanalysator

Bei der Messung mit dem Spektrumanalysator befand sich ein Sender (Mobiltelefon) in einem Faraday'schen Käfig und sendete elektromagnetische Wellen. Diese wurden über eine Messantenne vom Spektrumanalysator erfasst und dargestellt. Der zweite Sender (Mobilfunkmast) erhielt dieses Signal und sendete ein eigenes zurück. Auch dies wurde vom Spektrumanalysator erfasst und dargestellt. Gemessen wurden also zeitgleich zwei Sender, von denen aber nur tatsächlich einer abgeschirmt werden konnte.

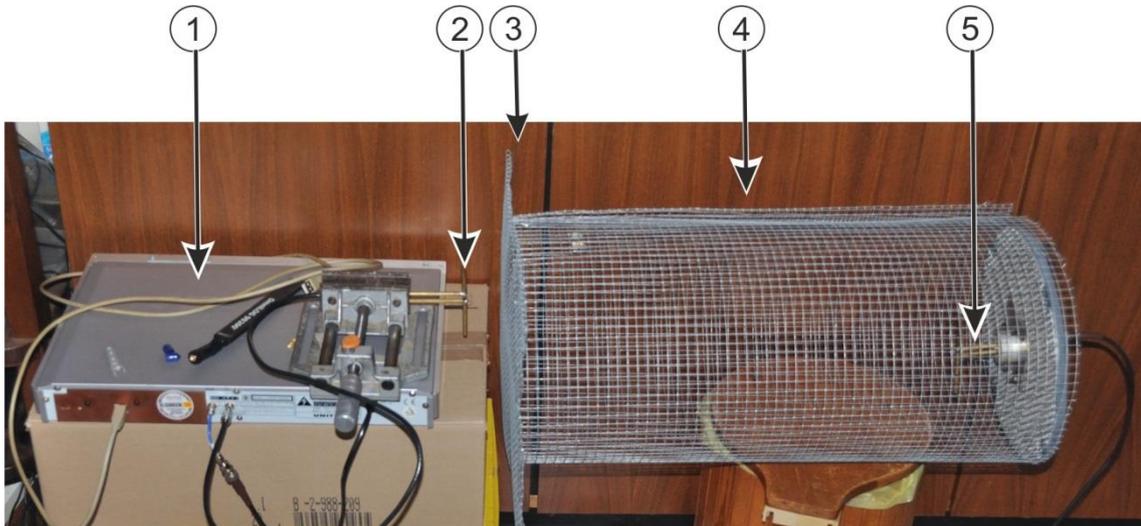


Der Spektrumanalysator stellt die empfangenen Messwerte wie folgt graphisch dar:

- (1): Die Hochachse zeigt den Signalpegel in dB in Abhängigkeit von der Frequenz (→ (2)) an
- (2): Auf der Rechtsachse ist die Frequenz in MHz aufgetragen
- (3): Dies sind die Bereiche, in denen die verschiedenen Mobilfunkanbieter im GSM-Netz senden und empfangen
- (4): Die grüne Linie stellt die aktuelle Messung dar, das Grundrauschen liegt bei ca. -87 dB
- (5): Hier erkennt man beim aktuellen Sweep im ersten Band eine Anhebung des Signals um ca. 7 dB (auf -80 dB), dort wird gerade etwas übertragen
- (6): Die einzelnen Bänder sind 10 MHz breit, darin eingebettet sind 200 Kanäle mit einer Bandbreite von jeweils 50 kHz, die man hier aber nicht sehen kann (die kleinen senkrechten Striche in (3) deuten diese an)

(7): Die rote Linie zeigt die Maximalwerte, die bei der Aufnahme mehrerer Sweeps gemessen wurden. Der Höchstwert liegt bei ca. -62 dB und damit 25 dB über dem Grundrauschen, was heißt, dass hier die Leistung um das fast 316-fache angestiegen ist.

## 2.4.2. Messungen mit Netzwerkanalysator

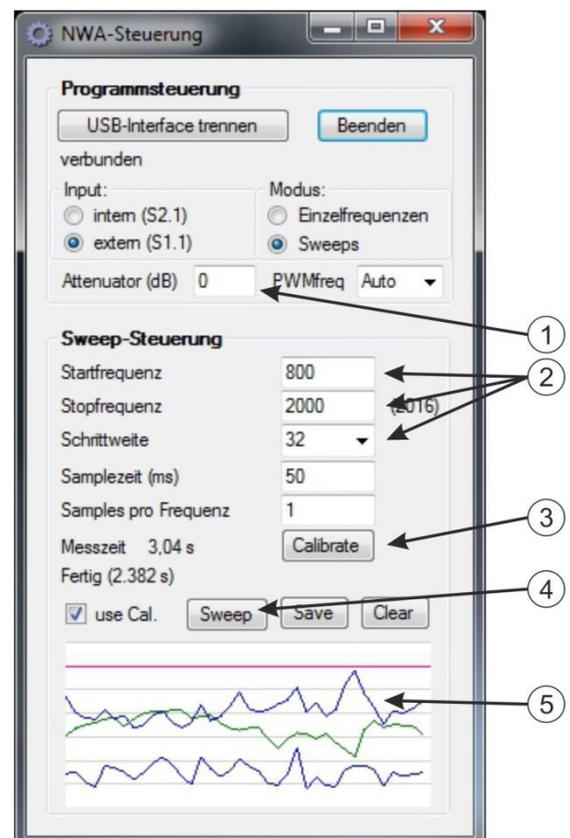


- (1): Netzwerkanalysator (verbunden mit 2 und 5)
- (2): Empfangsantenne (Dipol)
- (3): abnehmbare Gitterabdeckung (mit Kontakt zu 4)
- (4): Faraday'scher Käfig
- (5): Sendeantenne (Dipol)

Bei der Messung mit dem Netzwerkanalysator (1) befand sich der Sendedipol (5) in einem Faraday'schen Käfig (4), dem die Abdeckung (3) fehlte. Ihm gegenüber befand sich ein passender Empfangsdipol (2), der das Signal erhielt. Zum Abschirmen der elektromagnetischen Wellen wurde der Faraday'sche Käfig mit einem Drahtgitterdeckel (3) verschlossen.

Das Bild rechts zeigt die Benutzeroberfläche der NWA-Software:

- (1): Einstellung des Abschwächers für die Leistung des Sendedipols
- (2): Einstellung für Start- und Stoppfrequenz sowie Schrittweite für die automatische Aufnahme einer Messreihe (hier mit 32 MHz Schrittweite)
- (3) Schaltfläche zum Aufnehmen der Kalibrierungsdatei, damit kann bei den weiteren Sweeps die Differenz der Signale automatisch bestimmt werden, wenn das Kästchen bei „use Cal.“ angeklickt ist



(4) Schaltfläche zum Aufnehmen eines Sweeps (das ist eine komplette Messreihe über alle Frequenzen)

(5) Graphikfenster zur Voransicht der aufgenommenen Messwerte (die genauere Auswertung erfolgt dann mit Excel). Die rosafarbene Linie kennzeichnet 0 dB, Die grauen Linien haben jeweils einen Abstand von 10 dB, der Messbereich liegt hier also zwischen +10 dB (oben) und -50 dB (unten).

### 3. Messungen

Es wurden Messungen sowohl mit dem Spektrumanalysator als auch mit dem Netzwerkanalysator (NWA) aufgenommen. Sie unterscheiden sich darin, dass nur der NWA in der Lage ist, ein eigenes Messsignal zu erzeugen.

#### 3.1 Messreihen mit Spektrumanalysator

Wie man der Abbildung auf S. 5 entnehmen kann, ändert sich das Signal bei eingeschaltetem Mobiltelefon bei mehreren der überwachten Frequenzbänder. Leider lässt sich so aber nicht feststellen, von welcher Quelle (Mobiltelefon, Mobilfunkmast) das jeweilige Signal stammt, außerdem ist das Mobiltelefon in der Lage, automatisch seine Sendeleistung je nach Empfangsqualität zu regulieren. So kann man lediglich feststellen, dass in einigen Bändern eine Änderung erfolgt, die jedoch qualitativ erfasst werden kann. Die maximale Änderung gegenüber dem Grundrauschen liegt bei 25 dB.

Die nachfolgende Tabelle zeigt die Messwerte bei verschiedenen Betriebsarten. Die Mittelwerte in der zweiten Spalte wurden über alle Kanäle im untersuchten Frequenzbereich gebildet. Die angegebenen Abweichungen in der dritten Spalte beziehen sich auf den Ruhewert (-85 dB). Die relativen Werte in der fünften Spalte geben an, wie sich das Signal durch die Abschirmung im Vergleich zum nicht abgeschirmten Handy verändert hat, in der letzten Spalte ist die zugehörige prozentuale Restleistung angegeben:

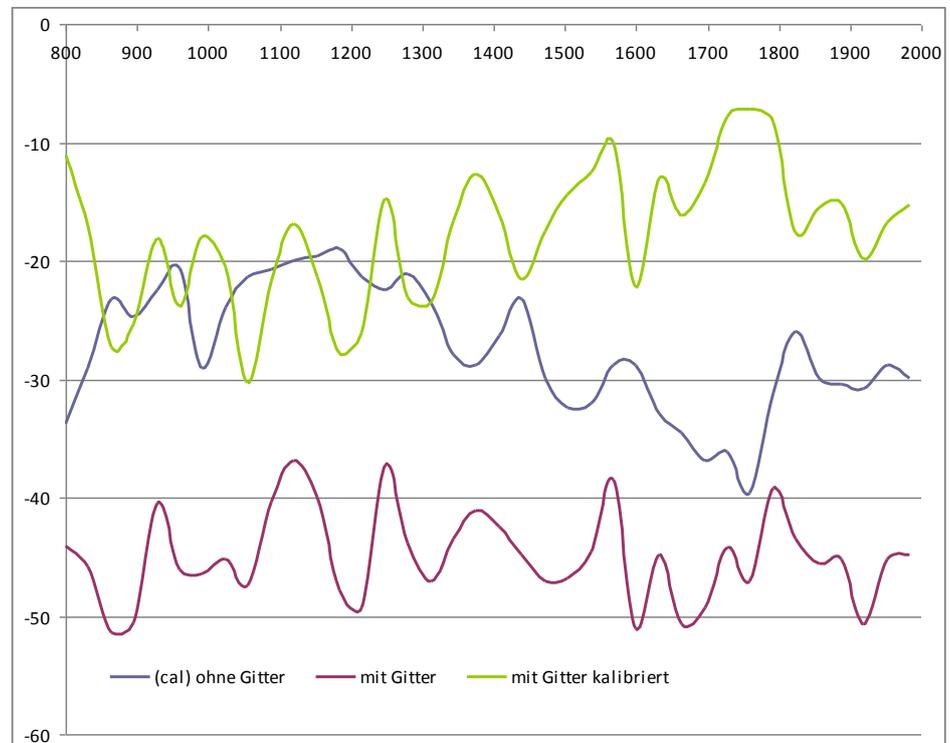
Betriebsart:	Mittelw.: (dB)	Abw.: (dB)	Abschirmung:	relativ: (dB)	Leistung
Handy frei in der Hand, nicht aktiviert	<b>-85,00</b>	<b>0,00</b>	-	-	-
Handy frei in der Hand, aktiviert	<b>-71,96</b>	<b>13,04</b>	keine	<b>0,00</b>	100,0%
Handy in Drahtgitterabschirmung, aktiviert	<b>-63,49</b>	<b>21,51</b>	hoch	<b>-8,47</b>	14,2%
Handy auf Drahtgitterboden ohne Zylinder, aktiviert	<b>-68,39</b>	<b>16,61</b>	klein	<b>-3,57</b>	44,0%
Handy in Metalldose mit geschlossenem Deckel	<b>-85,00</b>	<b>0,00</b>	sehr hoch		0,0%
Handy in Metalldose ohne Deckel, Öffnung nach unten	<b>-66,00</b>	<b>19,00</b>	mittel	<b>-5,96</b>	25,3%
Handy in Metalldose ohne Deckel, Öffnung nach oben	<b>-71,08</b>	<b>13,93</b>	klein	<b>-0,89</b>	81,5%

Man erkennt deutlich, dass nur eine vollständig geschlossene Umhüllung (geschlossene Metalldose) die Strahlung vollständig abschirmt, während der Gitterkäfig im günstigsten Fall (-8,47 dB) lediglich einen Rückgang um 86 % auf 14 % der ursprünglichen Leistung bewirkt.

### 3.2. Messreihen mit dem NWA

Die graphische Darstellung rechts aus Ergebnissen des Netzwerkanalysators zeigt, wie gut der Drahtgitterkäfig die elektromagnetischen Wellen abschirmt.

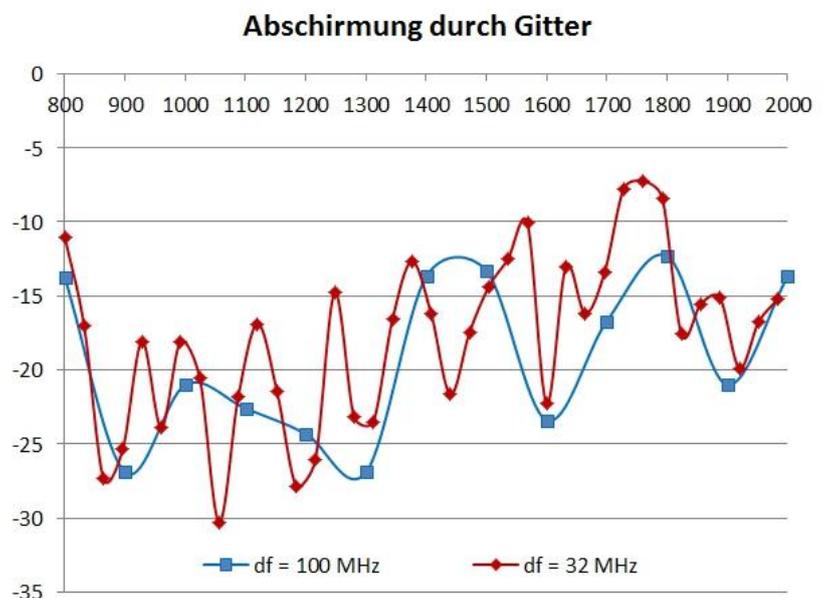
Gemessen wurde bei Frequenzen zwischen 800 und 2000 MHz in Intervallen von je 32 MHz mit Dipolen, deren Seitenlänge 56 mm beträgt.

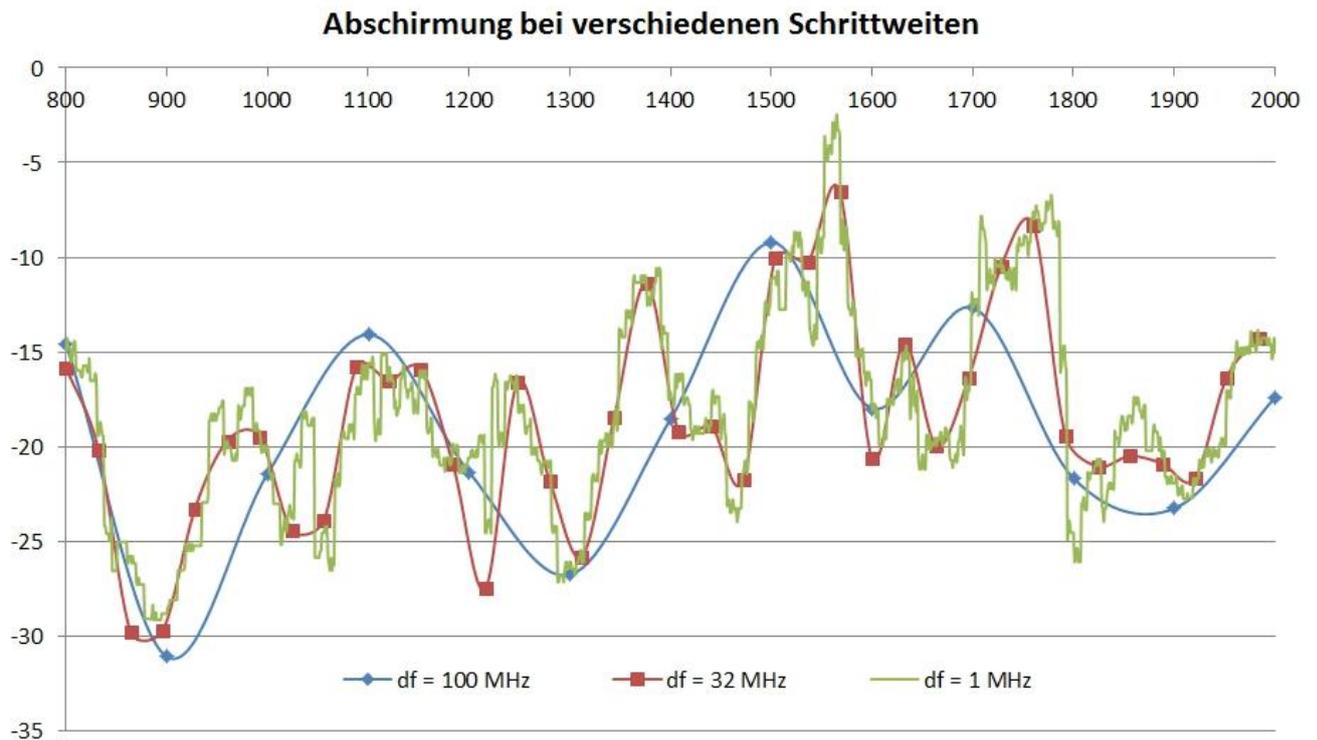


Es gibt drei verschiedene Messungen:

- 1.: Die Kalibrierungsmessung ohne Abschirmung in dB (blau)
- 2.: Die Messung mit Abschirmung in dB (rot)
- 3.: Die daraus resultierende Effizienz der Abschirmung (grün, Differenz zwischen 1. und 2.)

Diese graphische Darstellung des Netzwerkanalysators zeigt die Unregelmäßigkeiten bei der Abschirmung elektromagnetischer Wellen im Bereich zwischen 800 und 2000 MHz bei zwei verschiedenen Schrittweiten von 100 und 32 MHz. Hier wird deutlich, dass die Anzahl der Maxima und Minima bei kleinerer Schrittweite noch weiter zunimmt. Dargestellt wurden hier der Übersicht halber nur die Differenzwerte zur Kalibrierungsmessung.





Hier wurde mit einer weiteren Messung bei einer Schrittweite von 1 MHz (grüne Linie) überprüft, ob sich noch weitere Maxima nachweisen lassen. Dies scheint nicht der Fall zu sein. Die feineren Unregelmäßigkeiten sind eher auf Rauschen zurückzuführen.

### 3.3. Auffälligkeiten

Auffällig ist, dass die Abschirmung von elektromagnetischen Wellen nicht gleichmäßig verläuft, sondern je nach Frequenz stark variiert. Dies ist eventuell auf die Maschengröße des Faraday'schen Käfigs zurückzuführen: Wenn die Wellenlänge ein ganzzahliges Vielfaches der Maschengröße ist, dann wirkt das Käfiggitter wie ein Dipol und leitet das Signal trotzdem weiter. Je mehr Maschengrößen diese Funktion erfüllen, desto schlechter ist die Abschirmung. Da zu jeder Frequenz eine andere Wellenlänge gehört, ergeben sich je nach Frequenz sehr unterschiedliche Abschirmwerte.

Auffällig ist auch, dass im Bereich von 800 bis 2000 MHz die Abschirmung bei steigender Frequenz insgesamt abnimmt.

### 3.4. Interpretation

Die Effizienz der Abschirmung elektromagnetischer Wellen im untersuchten Bereich variiert sehr stark, weshalb es sich empfiehlt, die Maschengröße an die Frequenz anzupassen.

Bei den Messungen mit dem Spectran (siehe Seite 5 und Seite 7) ergab sich, dass ein Mobiltelefon in einem Drahtgitterkäfig eine um 8,4 dB geringere Sendeleistung erbringt und somit etwa 14 % Restleistung verbleiben. Aktiviert man es nur auf einem Drahtgitterboden, so werden 3,57 dB abgeschirmt und die verbleibende Restleistung liegt bei 44 %. In einem vollständig geschlossenem Faraday'schen Käfig (Metallkasten) ist das Mobiltelefon unfähig, ein Signal zu senden, weshalb 0 % Restleistung verbleiben. Wenn man den Deckel des Kastens entfernt und ihn über das Mobiltelefon stülpt, schirmt dieser 5,96 dB ab, sodass die

Restleistung 25,3 % beträgt. Legt man das Mobiltelefon allerdings in den nach oben geöffneten Kasten, dann schirmt er nur noch 0,89 dB ab und die Restleistung beträgt 81,5 %.

Diese Ergebnisse sind aber nur begrenzt zuverlässig, da nur einer der beiden Sender abgeschirmt wurde und das Mobiltelefon je nach Empfangsqualität seine Sendeleistung anpasst.

Die Versuche mit dem Netzwerkanalysator ergaben, dass die maximale Abschirmung bei einem Faraday'schen Käfig mit einer Maschengröße von 10 mm bei einer Frequenz von ca. 900 MHz - 30 dB beträgt. Das bedeutet, dass außerhalb des Käfigs nur 0,1 % der Leistung verbleiben.

Die minimale Abschirmung bei einer Frequenz von ca. 1570 MHz beträgt -3 dB, sodass immerhin noch 50 % der Leistung verbleiben.

#### **4. Zusammenfassung**

Grundsätzlich scheint es sehr schwierig zu sein, einen Raum komplett vor hochfrequenten elektromagnetischen Wellen zu schützen. Ein Faraday'scher Käfig ohne Maschen, z.B. unter Verwendung einer Metallfolie, ist bei weitem am effizientesten. Für einen möglichst geringen Materialaufwand empfehlen sich Käfige, deren Maschengrößen an die verwendete Frequenz angepasst sind. Das bedeutet, dass möglichst wenige Maschen bei einer bestimmten Frequenz zusammen wie ein Dipol wirken und das Signal deshalb in das Innere des Käfigs gelangen lassen. Da dies allerdings nur für jeweils einen schmalen Frequenzbereich effizient ist, empfiehlt es sich, dies nur in den Fällen anzuwenden, bei denen dauerhaft die gleiche Frequenz verwendet wird. Für Versuchsanordnungen, die mit verschiedenen Frequenzen arbeiten, kommt nur ein vollständig abgeschirmter Käfig in Frage.

#### **5. Quellen**

- [1] Roman Sexl, Ivo Raab, Ernst Streeruwitz: „Der Weg zur modernen Physik“, Band 2, Diesterweg, Frankfurt 1980
- [2] Simon Haase, Tim Rambousky: „Selbstgebauter skalarer Netzwerkanalysator“, Jugend-forscht-Arbeit 2014

#### **6. Verwendete Software**

Spektrum-Analysator:	Aaronia AG MCS Version 2.1.0, Sept. 2015
Netzwerk-Analysator:	Simon Haase, Tim Rambousky, erstellt in C#, siehe auch: [2]
Auswertung:	Microsoft Excel 2003 / 2010
Dokumentation:	Microsoft Word 2003 / 2010
Graphiken:	CorelDraw X6