

# Bestimmung der transienten Schirmeffektivität für HPM- und UWB-Signale sowie des Einflusses von Absorbern und Beladung innerhalb des Schirms

Dipl.-Ing. Stefan Parr, M.Sc. Hamed Karcoon, Univ.-Prof. Dr.-Ing Stefan Dickmann.  
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg

Dr.-Ing. Ronald Rambousky.  
Wehrwissenschaftliches Institut für Schutztechnologien - ABC-Schutz (WIS), Munster

## 1 Einleitung

Die herkömmliche Definition der elektrischen bzw. magnetischen Schirmeffektivität (SE) ist gegeben durch [1] :

$$SE_{el} = 20 \cdot \log_{10} \frac{|\vec{E}_{unshield}|}{|\vec{E}_{shield}|} \text{ dB} \quad (1)$$

$$SE_{mag} = 20 \cdot \log_{10} \frac{|\vec{H}_{unshield}|}{|\vec{H}_{shield}|} \text{ dB} \quad (2)$$

Für quaderförmige, metallische Schirme mit kleinen Aperturen ist diese ab der ersten Resonanz stark frequenzabhängig, da solche Schirme Resonatoren hoher Güte darstellen. Daher ist bei der Bestimmung der SE entscheidend, welcher Frequenzbereich untersucht, und welche Frequenzabtastung gewählt wird. Um eine Aussage über die Stöempfindlichkeit von Systemen treffen zu können, die Räume bzw. Gehäuse beinhalten, ist der Frequenzbereich des Störsignals also entscheidend.

In dieser Untersuchung wird die Definition der transienten SE,  $SE_t$  nach Klinkenbusch [1] verwendet. Diese bezieht sich auf die Leistung bzw. Energie, die bei einem gegebenen Störsignal von einer verschwindend kleinen Last im geschirmten bzw. ungeschirmten Fall absorbiert wird. Sie kann als ein über einem bestimmten Frequenzbereich gemittelter Wert der SE betrachtet werden, wobei die einzelnen Frequenzanteile mit der spektralen Amplitudendichte des Störsignals gewichtet werden. Damit liefert sie eine einzige Kennzahl und ermöglicht somit Vergleiche zwischen verschiedenen Schirm-Setups.  $SE_t$  wurde bereits von Herlemann et al. für eine Tasche aus leitfähigem Textil bestimmt [2]. In dieser Untersuchung wird die Anwendung auf einen metallischen, quaderförmigen Schirm erweitert und für verschiedene Störsignale ausgewertet: Ultra-wideband (UWB) und High-power microwave (HPM) Pulse. Für die Bestimmung werden Mess- sowie Simulationsergebnisse verwendet. Des Weiteren wird der Einfluss von Absorber und Beladung auf  $SE_t$  bestimmt.

## 2 Definition der transienten SE

Die Definition der transienten SE [1] bezieht sich auf eine einfallende (engl.: incident) TEM-Welle mit dem Poynting Vektor  $S^{inc}(t)$  und der spektralen Amplitudendichte  $S^{inc}$ . Da  $SE_t$  innerhalb eines geschirmten Raums inhomogen ist, wird sie in einem Punkt  $q$  bestimmt:

Tabelle 1: Verwendete Messgeräte.

Pulsgenerator	Kentech PBG3	$V_{peak} = 13 \text{ kV}$ , $t_r = 100 \text{ ps}$ , $t_{fwhm} = 2.5 \text{ ns}$
D-Dot Sensor	Prodyn AD-80	$f_g = 5.5 \text{ GHz}$
B-Dot Sensor	Prodyn B-90	$f_g = 10 \text{ GHz}$
Balun für die Sensoren	Prodyn BIB-100G	$f_g = 10 \text{ GHz}$
Oszilloskop	LeCroy Wavepro 7300A	20 GS/s

$$SE_t = 10 \log_{10} \frac{2 \int_0^{\infty} |S^{inc}|^2 \omega d\omega}{\int_0^{\infty} |S^{inc}|^2 \left[ \frac{|\vec{E}^{shield}|_q^2}{|\vec{E}^{unshield}|_q^2} + \frac{|\vec{H}^{shield}|_q^2}{|\vec{H}^{unshield}|_q^2} \right] \omega d\omega} \text{ dB.} \quad (3)$$

mit  $\vec{E}^{unshield}$  und  $\vec{H}^{unshield}$ : elektrische und magnetische Feldstärke in Abwesenheit des Schirms;  $\vec{E}^{shield}$  und  $\vec{H}^{shield}$ : elektrische und magnetische Feldstärke mit Schirm.

Die Quotienten im Nenner aus den Größen  $\vec{E}^{shield}$ ,  $\vec{E}^{unshield}$ ,  $\vec{H}^{shield}$  und  $\vec{H}^{unshield}$  beinhalten dabei Informationen über die SE des Raumes. Sie können entweder aus Messung oder Simulation bestimmt werden.

### 3 Messtechnische Aufnahme eines UWB-Pulses

#### 3.1 Messaufbau

Um  $SE_t$  zu bestimmen, muss zunächst  $S^{inc}(t)$  eines Störsignals ermittelt werden. Hierfür wird zunächst ein UWB Puls ausgewählt, der durch einen Pulsgenerator in Form eines doppelt exponentiellen Pulses erzeugt wird. Die messtechnische Aufnahme erfolgt in einer Absorberhalle, um unerwünschte Reflexionen zu vermindern. Für die Abstrahlung des Pulses wird eine Hornantenne verwendet. Für die Messung des elektrischen und magnetischen Feldes werden D-Dot und B-Dot Sensoren eingesetzt, die die Ableitung des Feldes messen. Durch sie wird mithilfe eines Oszilloskops mit hoher Abtastrate die Auflösung des kurzen Pulses ermöglicht. Um unerwünschte Reflexionen auf der 50 Ohm Messleitung zu verhindern, wird der Eingangswiderstand des Oszilloskops ebenfalls zu 50 Ohm gewählt. Eine Übersicht über die verwendeten Messgeräte liefert Tabelle 1.

#### 3.2 Auswertung im Zeit- und Frequenzbereich

Aus den vom Oszilloskop gemessenen Ausgangsspannungen  $u_E(t)$  bzw.  $u_H(t)$  des D-Dot bzw. B-Dot Sensors können die entsprechenden Felder durch Integration berechnet werden. Hierzu werden zunächst die Gleichanteile der Signale subtrahiert, um einen möglichen Offset zu eliminieren:

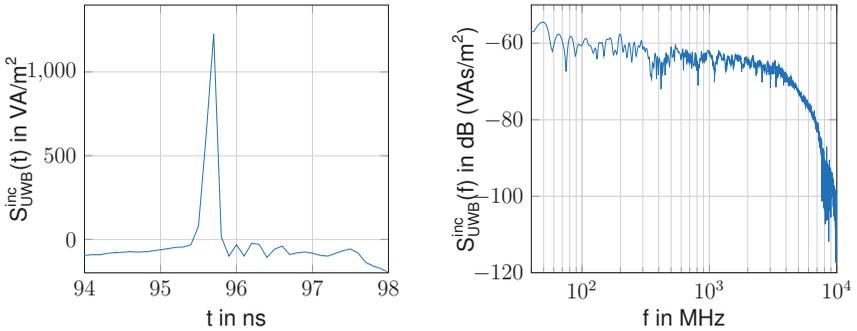


Abbildung 1: Zeitlicher Verlauf und spektrale Amplitudendichte des abgestrahlten UWB-Pulses.

$$u_{E\sim}(t) = u_E(t) - \overline{u_E(t)} \quad (4)$$

$$u_{H\sim}(t) = u_H(t) - \overline{u_H(t)} \quad (5)$$

$$(6)$$

Die elektrische bzw. magnetische Feldstärke berechnet sich zu:

$$E_{UWB}(t) = \frac{1}{\varepsilon_0 R A_{eq}} \int u_{E\sim}(t) dt \quad (7)$$

$$H_{UWB}(t) = \frac{1}{\mu_0 A_{eq}} \int u_{H\sim}(t) dt \quad (8)$$

mit  $R$ : Lastwiderstand,  $A_{eq}$ : äquivalente Sensorfläche.  $S^{inc}(t)$  berechnet sich zu

$$S_{UWB}^{inc}(t) = E_{UWB}(t) \cdot H_{UWB}(t) \quad (9)$$

unter der Annahme, dass E- und H-Feld senkrecht aufeinander stehen. Die spektrale Amplitudendichte von  $S^{inc}$  wird mithilfe der Fouriertransformation in Matlab berechnet. Die Ergebnisse für  $S_{UWB}^{inc}(t)$  und  $S_{UWB}^{inc}(f)$  sind in Abb. 1 dargestellt.

## 4 Berechnungen zur transienten SE

### 4.1 Vergleich der transienten SE für verschiedene Störsignale

Für die Berechnung von  $SE_t$  werden zusätzlich zu  $S^{inc}$  die Felder  $\vec{E}^{shield}$ ,  $\vec{E}^{unshield}$ ,  $\vec{H}^{shield}$  und  $\vec{H}^{unshield}$  bestimmt. Die magnetische und elektrische Feldrichtung innerhalb des geschirmten Raums hängt von der betrachteten Resonanz ab. Daher müssen alle drei Raumrichtungen berücksichtigt werden, was die messtechnische Bestimmung von  $\vec{E}^{shield}$  und

$\vec{H}^{\text{shield}}$  aufwändig macht. Außerdem ist die Platzierung der E-Dot und B-Dot Sensoren im Schirm kritisch. Aus diesen Gründen wird die Ermittlung der Feldstärken im Schirm durch numerische Berechnung mit einer Kombination der Finite-Elemente- (FEM) und Momentenmethode (MoM) im Frequenzbereich bevorzugt (FEKO).

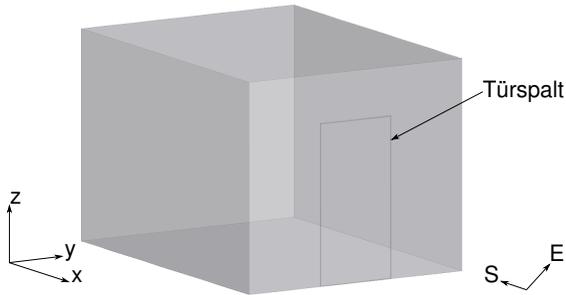


Abbildung 2: Geschirmter Raum mit einfallender TEM Welle.

Als Schirmmodell wird ein metallischer Raum mit den Abmessungen 4 m x 3 m x 2,6 m mit einem durchgehenden Türspalt als Apertur verwendet (siehe Abb. 2). Die Bestimmung der Feldstärke innerhalb des Raums erfolgt durch eine örtliche Mittelung über 240 äquidistante Messpunkte, um die starke Ortsabhängigkeit des Feldes an den Resonanzfrequenzen zu berücksichtigen [3]. Die elektrische und magnetische SE nach (1) und (2) sind in Abb. 3 dargestellt.

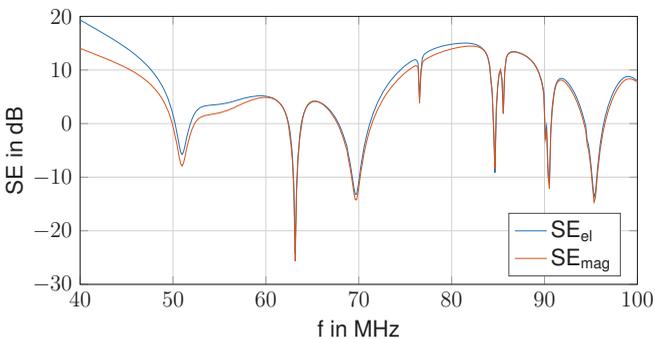


Abbildung 3: Berechnete elektrische und magnetische SE des Raums.

Um  $SE_t$  nach (3) für den UWB-Puls berechnen zu können, müssen die Frequenzstützstellen von  $S^{\text{inc}}$  (Abtastung: 5 MHz) und  $\vec{E}^{\text{shield}}$ ,  $\vec{E}^{\text{unshield}}$ ,  $\vec{H}^{\text{shield}}$  sowie  $\vec{H}^{\text{unshield}}$  (Abtastung: 150 kHz) angepasst werden. Hierzu werden zunächst an  $S^{\text{inc}}(t)$  Nullen angehängt, um die Frequenzschrittweite der Fourier-Transformation auf 150 kHz anzugleichen (zero-padding). Anschließend erfolgt eine Interpolation von  $S^{\text{inc}}(f)$ . Die Integration nach (3) erfolgt im Frequenzbereich von 40 bis 100 MHz und liefert ein Ergebnis für  $SE_t$  von -2.49 dB.

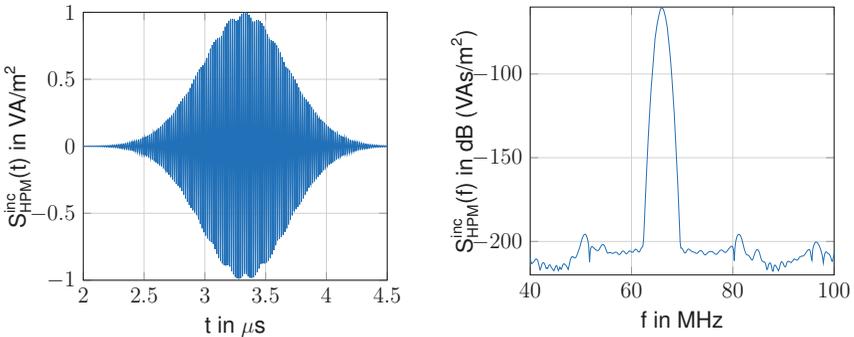


Abbildung 4: Zeitlicher Verlauf und spektrale Amplitudendichte des HPM-Signals mit einer Pulsbreite von 1  $\mu$ s und einer Mittenfrequenz von 66 MHz.

Tabelle 2:  $SE_t$  des Raums mit Türspalt für UWB- und HPM-Puls mit Bandbreite von 1 MHz. Auswertung im Frequenzbereich von 40 bis 100 MHz.

	UWB	HPM $f_0=63$ MHz	HPM $f_0=66$ MHz
$SE_t$	-2.49 dB	-17.8 dB	3.68 dB

Als nächstes wird  $SE_t$  für ein anderes Störsignal, nämlich einen schmalbandigen Puls in Form einer mit einer Gaußfunktion modulierten Kosinusfunktion (HPM-Puls) ermittelt. Die analytische Beschreibung dieses Pulses ist gegeben durch:

$$S_{\text{HPM}}^{\text{inc}}(t) = S_{\text{HPM},0}^{\text{inc}} \cdot \cos(2\pi f_0(t - t_s)) \cdot e^{-\left(\frac{2 \cdot (t - t_s)}{\alpha}\right)^2} \quad (10)$$

mit  $S_{\text{HPM},0}^{\text{inc}}$ : Pulsamplitude,  $t_s$ : Zeit der Pulsmitte,  $\alpha$ : Pulsbreite und  $f_0$ : Mittenfrequenz.

In Abb. 4 ist ein derartiger Puls dargestellt mit einer Pulsbreite von 1  $\mu$ s und einer Mittenfrequenz von 66 MHz. Die spektrale Amplitudendichte des Signals ergibt eine 3 dB Bandbreite von 1,05 MHz. Die Auswertung von  $SE_t$  erfolgt ebenfalls im Frequenzbereich von 40 bis 100 MHz.

Die transiente SE für UWB- und HPM-Pulse mit Mittenfrequenzen von 63 und 66 MHz sind in Tabelle 2 dargestellt. Die beiden Mittenfrequenzen sind dabei bewusst so gewählt, dass sie auf einer Resonanz bzw. zwischen zwei Resonanzen liegen. Daraus ist ersichtlich, dass die minimale SE auftritt, wenn das System mit einem schmalbandigen Störsignal angeregt wird, dessen Bandbreite eine Resonanzfrequenz beinhaltet. Ein sehr breitbandiges Störsignal, wie der UWB-Puls, resultiert in einer mittleren  $SE_t$ . Die transiente SE für ein schmalbandiges Störsignal, das keine Resonanz trifft, ist erwartungsgemäß am höchsten.

In Abb. 5 ist  $SE_t$  für den HPM-Puls bei verschiedenen Pulsbreiten in Abhängigkeit von der Mittenfrequenz  $f_0$  gezeigt. Daraus ist ersichtlich, dass die transiente SE als eine gemittelte SE betrachtet werden kann, wobei die einzelnen Frequenzanteile mit der spektralen Amplitudendichte des Störsignals gewichtet werden. Für eine große Pulsbreite, das heißt

ein schmalbandiges Störsignal, nähert sich  $SE_t$  der klassischen Definition in Abb. 3 an.

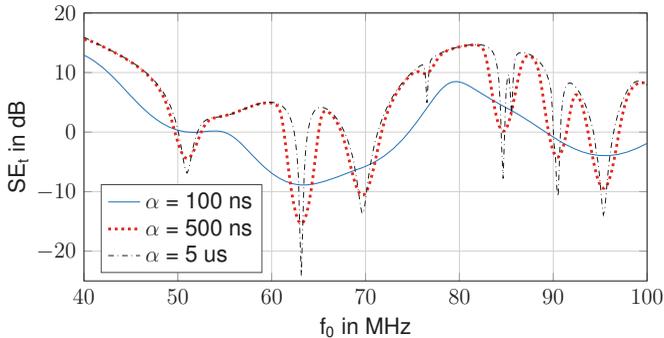


Abbildung 5:  $SE_t$  in Abhängigkeit von Mittenfrequenz und Pulsbreite des HPM-Pulses.

#### 4.2 Einfluss von Absorbermaterial

In [3] wurde bereits der Einfluss von plattenförmigem Polyurethan-Kohlenstoff Absorber verschiedener Dicke an der Rückwand auf die SE bestimmt. Nun erfolgt die gleiche Untersuchung unter Verwendung von  $SE_t$ . Das hierbei zu Grunde gelegte Störsignal ist der UWB-Puls. Die Werte für  $SE_t$  für die unterschiedlichen Absorberdicken sind in Tabelle 3 gezeigt. Wie zu erwarten nimmt  $SE_t$  mit zunehmender Absorberdicke zu.

Tabelle 3:  $SE_t$  des Raums mit Türspalt und Absorber für unterschiedliche Absorberdicken und UWB-Puls

Dicke	0 cm	5 cm	10 cm	20 cm
$SE_t$ in dB	-2.49	-0.58	0.91	2.64

#### 4.3 Einfluss von dielektrischer und metallischer Beladung

Der Einfluss von dielektrischer und metallischer Beladung auf die transiente SE wird ebenfalls für den UWB-Puls untersucht. In Abb. 6 ist das verwendete Modell mit quaderförmigen metallischen Strukturen, hier Terminals genannt, gezeigt. Aus den Ergebnissen für  $SE_t$  in Tabelle 4 ist eine Verschlechterung der SE durch metallische Strukturen im Raum ersichtlich.

Tabelle 4: Einfluss von metallischen Strukturen auf die transiente SE des Raums.

Anzahl Terminals	keins	eins	zwei
$SE_t$ in dB	-2.49	-8.10	-3.23

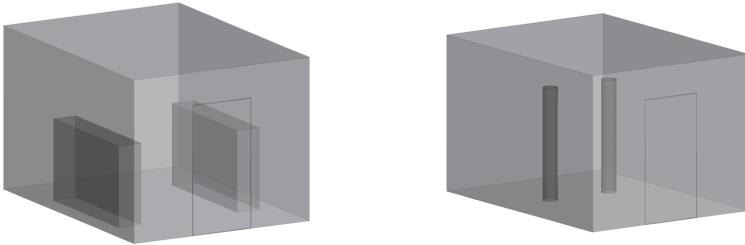


Abbildung 6: Geschirmter Raum mit metallischen (links) und dielektrischen Strukturen (rechts).

In dem rechten Modell in Abb. 6 sind Menschen modelliert durch säulenförmige Dielektrika mit der entsprechenden Permittivität. In Tabelle 5 sind die Ergebnisse für  $SE_t$  gezeigt. Daraus ist eine leichte Verbesserung von  $SE_t$  ersichtlich, was mit Absorption zu begründen ist.

Tabelle 5: Einfluss von dielektrischen Strukturen auf die transiente SE des Raums.

Anzahl Personen	keine	eine	zwei
$SE_t$ in dB	-2.49	-1.02	-2.48

## 5 Zusammenfassung

Die Definition von  $SE_t$  bietet den Vorteil, dass sie Aussagen über die Störempfindlichkeit eines Systems gegenüber einem gegebenen transienten Störsignal ermöglicht. Außerdem sind Vergleiche von verschiedenen Schirm-Setups leicht möglich. In dieser Untersuchung wird  $SE_t$  für einen quaderförmigen metallischen Schirm für unterschiedliche Störsignale (UWB und HPM) bestimmt und verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass die schlechteste transiente SE für HPM-Signale vorliegt, in deren Bandbreite eine Raumresonanz zu finden ist. Des Weiteren wird der Einfluss von Absorber und metallischen bzw. dielektrischen Strukturen innerhalb des Raums auf  $SE_t$  im Fall des UWB-Pulses quantifiziert. Während  $SE_t$  durch Absorber und Dielektrika im Raum verbessert wird, verschlechtert sie sich durch metallische Strukturen.

## Literatur

- [1] KLINKEBUSCH, L.: On the shielding effectiveness of enclosures. In: *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on* 47 (Aug.), Nr. 3, S. 589–601. <http://dx.doi.org/10.1109/TEMC.2005.853162>. – DOI 10.1109/TEMC.2005.853162. – ISSN 0018–9375
- [2] HERLEMANN, H. ; KOCH, M.: Measurement of the transient shielding effectiveness of enclosures using UWB pulses inside an open TEM waveguide. In: *Advances in Radio Science* 5 (2007), 75–79. <http://dx.doi.org/10.5194/ars-5-75-2007>. – DOI 10.5194/ars-5-75-2007
- [3] PARR, S. ; KARCOON, H. ; DICKMANN, S. ; RAMBOUSKY, R.: Verbesserung der Schirmeffektivität eines metallisch geschirmten Raums an den Resonanzfrequenzen mithilfe von Absorbermaterial. In: *EMV-Düsseldorf* (2014)