

Messtechnische Bestimmung der Polarisierbarkeit von Aperturen beliebiger Form

Hans A. Wolfsperger, Adolf J. Schwab

Institut für Elektroenergiesysteme und Hochspannungstechnik, Universität Karlsruhe,
Kaiserstraße 12, 76128 Karlsruhe.

E-mail: wolfsperger@ieh.etec.uni-karlsruhe.de

1. Einleitung

Die kapazitive und induktive Feldeinkopplung durch Öffnungen, deren Abmessungen klein im Vergleich zur Wellenlänge sind, kann mit Hilfe elektrischer und magnetischer Ersatzdipole bestimmt werden, [Beth 44], [Kad 59]. Deren Polarisierbarkeit, d. h. die Abhängigkeit des Dipolmoments vom anregenden Feld ist eine Größe, die nur von der Geometrie der Öffnung bestimmt wird. Sowohl auf analytischem als auch auf numerischem Wege wurden Polarisierbarkeiten verschiedener Aperturgeometrien bereits errechnet [Meu 77], [Okon 81]. Grundlegende Messungen wurden in den 50er Jahren von Cohn [Cohn 51] mit dem elektrolytischen Trog durchgeführt. Um Ergebnisse durch Messungen im tatsächlich betrachteten Frequenzbereich zu erhalten, wurde die am Institut für Elektroenergiesysteme und Hochspannungstechnik entwickelte Doppel-Koaxial-TEM-Zelle eingesetzt [Wo 99a], [Wo 99b]. Sie erlaubt die messtechnische Bestimmung der Polarisierbarkeit von Aperturen jeder Form in Materialien beliebiger Stärke über einem weiten Frequenzbereich.

2. Beschreibung der Feldeinkopplung durch Öffnungen mit Ersatzdipolen

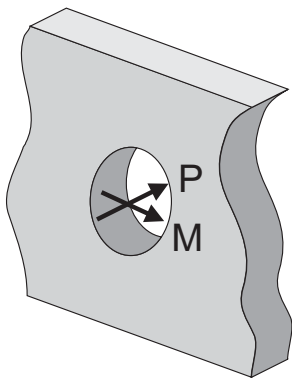


Abb. 1: Lage des elektrischen Dipols P und des magnetischen Dipols M in der Apertur.

Befindet sich in einer leitenden Wand eine Öffnung, deren Abmessungen klein im Verhältnis zur Wellenlänge sind, so setzt sich das resultierende Feld aus zwei Anteilen zusammen: Aus dem Feld, das sich einstellen würde, wenn keine Öffnung vorhanden wäre und den Feldern eines elektrischen und eines magnetischen Dipols. Die beiden Dipole befinden sich in der Mitte der Öffnung, der elektrische ist senkrecht zur Wand, der magnetische ist parallel zur Wand gerichtet, Abb. 1. Die Ausrichtung des letzteren in der Wandebene wird durch die Polarisationsrichtung des anregenden Magnetfeldes vorgegeben.

Die Polarisierbarkeit der Dipole, also die Abhängigkeit ihres Dipolmomentes von der Feldstärke des anregenden Feldes, hängt von der Größe und Form der Öffnung, sowie von der Materialstärke des Wandmaterials ab.

Um eine Vergleichbarkeit der Polarisierbarkeiten mit den vorliegenden Mess- und Rechenergebnissen zu ermöglichen, ziehen wir für die elektrische Polarisierbarkeit α_e und die magnetische Polarisierbarkeit α_m die Definition aus [Lee 86] heran:

$$\alpha_e = \frac{p}{2\epsilon E_0} \quad (1)$$

$$\alpha_m = \frac{m}{2H_0} \quad (2)$$

mit

p, m : elektrisches bzw. magnetisches Dipolmoment

E_0, H_0 : elektrische bzw. magnetische Feldstärke des anregenden Feldes am Ort der Öffnung, wenn diese nicht vorhanden wäre.

3. Die Doppel-Koaxial-TEM-Zelle zur Untersuchung der Aperturkopplung

3.1 Prinzip der Doppel-TEM-Zelle

Eine Doppel-TEM-Zelle (Abb. 2) besteht aus zwei einfachen TEM-Zellen die über ein gemeinsames Fenster miteinander gekoppelt sind. Üblicherweise besitzen diese TEM-Zellen einen rechteckigen Querschnitt. Zwischen den beiden Zellen wird in das gemeinsame Koppelfenster der Prüfling (z.B. eine Lochblende) eingesetzt, wobei mit sinkender Frequenz der Kontaktierung steigende Bedeutung zukommt. In eine der beiden Zellen (die sendende) wird HF-Leistung eingespeist, welche sich als TEM-Welle längs der Zelle ausbreitet und größtenteils vom Abschlusswiderstand absorbiert wird. Da jedoch die elektromagnetische Kopplung über den Prüfling in der zweiten (empfangenden) TEM-Zelle eine TEM-Welle anregt, wird ein kleiner Anteil der eingespeisten Leistung dem angeschlossenen Messgerät zugeführt. [Will 88].

Statt eines herkömmlichen Signalgenerators als HF-Quelle und einem Messempfänger als Messgerät kann auch ein Netzwerkanalysator verwendet werden, der beide Funktionen vereint. Die Spannungsmessung wird durch eine Messung des Transmissionsfaktors der gesamten Anordnung ersetzt. Dies hat zusätzlich noch den Vorteil, dass die Anpassung, d. h. der Reflexionsfaktor der beiden Zellen überprüft werden kann, zumindest wenn auf den Einsatz eines Verstärkers verzichtet wird.

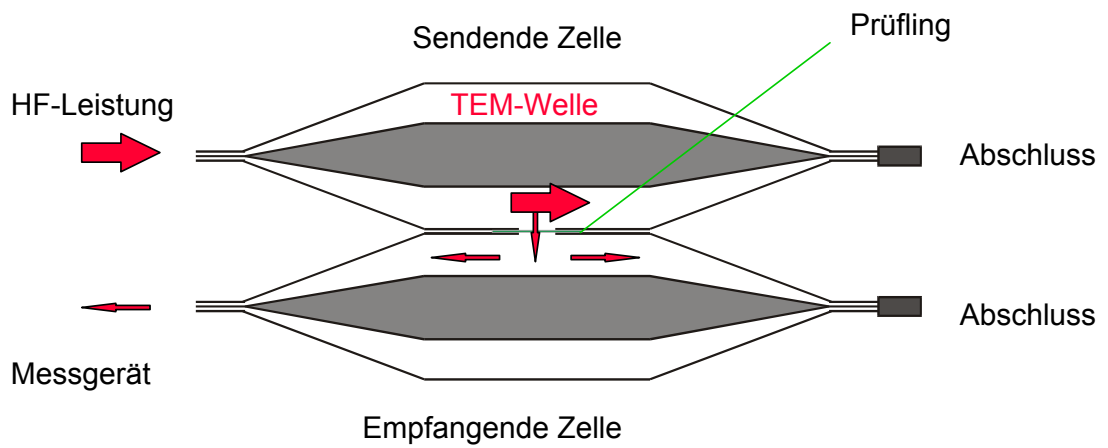


Abb. 2: Prinzip einer Doppel-TEM-Zelle. An der empfangenden Zelle können Messgerät und Abschlusswiderstand vertauscht werden.

3.2 Die Doppel-Koaxial-TEM-Zelle

Der Vorteil der neu entwickelten Doppel-Koaxial-TEM-Zelle (DK-TEM-Zelle, Abb. 3) ist neben eines erweiterten Frequenzbereichs (bis 810 MHz) die Möglichkeit, auf elementare Weise die Kopplung zu berechnen. Nach Kaden gilt für das Verhältnis p/E_0 bei parallelen Koaxialleitungen:

$$\frac{p}{E_0} = 2 \left(2\pi \frac{\epsilon_0}{C'} r_a \right)^2 C_{12} \quad (3)$$

und für das Verhältnis m/H_0 :

$$\frac{m}{H_0} = 2(2\pi r_a)^2 M_{12} \quad (4)$$

Hierin sind p und m die Dipolmomente, E_0 , H_0 die anregenden Feldstärken, r_a der Innenradius des Aussenleiters einer Koaxialleitung, C' deren Kapazitätsbelag, C_{12} die Koppelkapazität und M_{12} die Koppelinduktivität zwischen den Leitungen.

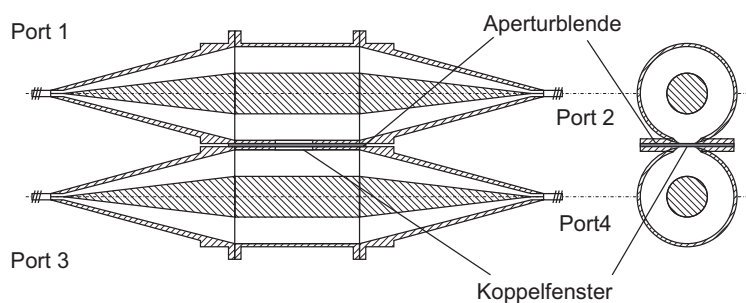


Abb. 3: Doppel-Koaxial-TEM-Zelle.

Da durch sendernahe und -ferne Messung die elektrische und die

magnetische Kopplung getrennt voneinander bestimmt werden kann [Wo 99a], ist es möglich, die Polarisierbarkeiten von Öffnungen beliebiger Form zu ermitteln. Wichtig hierbei: Im Gegensatz zu homogenen Schirmstrukturen, z. B. leitfähigen Kunststoffen, ist es nicht möglich, die Kopplung durch Öffnungen absolut durch Einfügungsdämpfungsmessungen zu bestimmen. Das Ergebnis der Referenzmessung, also der Messung ohne Probe im Koppelfenster ist nämlich abhängig von dessen Abmessungen. Wird anschließend eine Messung mit einer perforierten Probe durchgeführt und dann die Pegeldifferenz gebildet, so werden letztlich zwei Aperturen miteinander verglichen; die Einfügungsdämpfung ist abhängig von der Größe des Koppelfensters, d. h. von den Eigenschaften des Messgeländes.

3.3 Messaufbau

Den praktischen Messaufbau zeigt Abb. 4: Um eine ausreichende Messdynamik zu erreichen, war die Verwendung eines Verstärkers erforderlich.

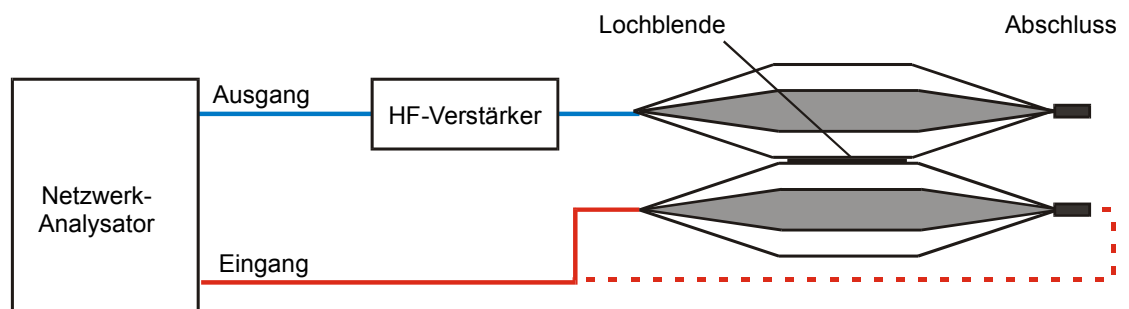


Abb. 4: Prinzip der Messanordnung

Um den Einfluss des Verstärkers und die Dämpfung der Anschlusskabel aus den Ergebnissen zu eliminieren, wurde der Frequenzgang des Verstärkers und der Kabel bestimmt. Mit diesem Frequenzgang wiederum wurden alle Messergebnisse korrigiert. Bei jeder untersuchten Apertur wurde sowohl sendernah als auch senderfern (gestrichelte Verbindung in Abb. 4) gemessen.

Die Prüflinge, d. h. die Lochblenden wurden aus Aluminiumfolie gefertigt; dies hat neben der Realisierung einer „sehr dünnen Wand“ den Vorteil der einfachen und preiswerten Herstellung. Es wurden Aperturgeometrien untersucht, die aus der Literatur bekannt sind, Abb. 5. Im konkreten Fall betrug die Länge $l = 20 \text{ mm}$.

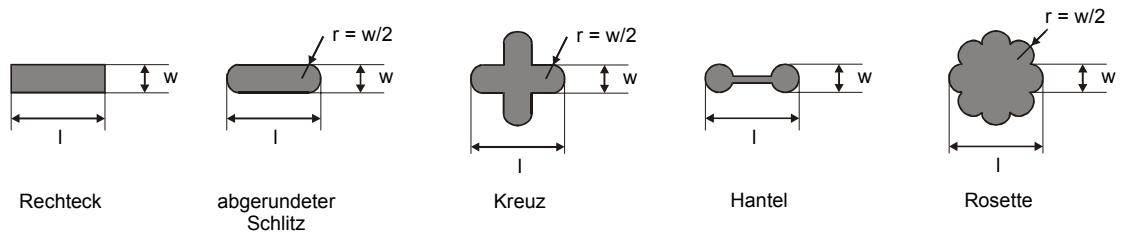


Abb. 5: Aperturgeometrien. Breite der „Hantelstange“: 0,1 l.

3.4 Ergebnisse

Den Vergleich gemessener und theoretischer Polarisierbarkeiten erlaubt Abb. 6:

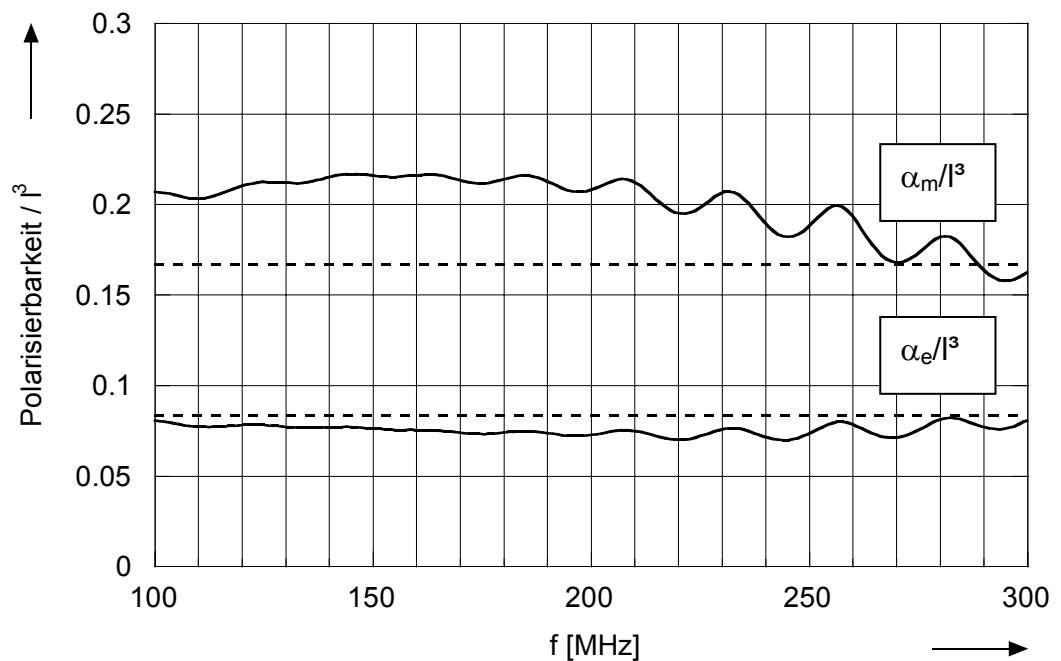


Abb. 6: Gemessene (durchgezogen) und errechnete (gestrichelt) Polarisierbarkeit einer kreisförmigen Öffnung.

Der wellige Verlauf über der Frequenz ist mit der Restwelligkeit des Verstärkers zu erklären, die durch die Korrektur mit dem Verstärkerfrequenzgang nicht völlig beseitigt werden konnte.

Einen Überblick über die Messergebnisse von rechteckförmigen Öffnungen und abgerundeten Schlitzten gibt Abb. 7, wobei letztere parallel zum Magnetfeld lagen (worst-case).

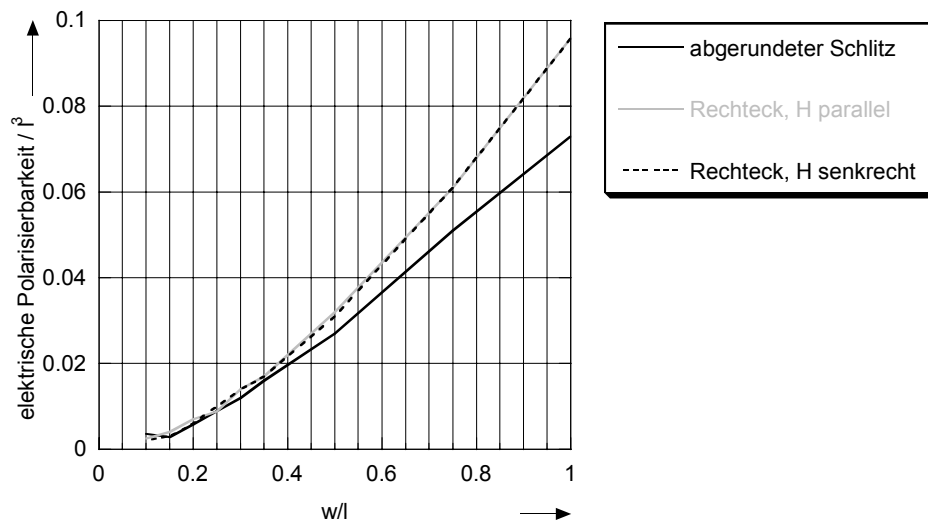


Abb. 7a: Elektrische Polarisierbarkeit, normiert auf l^3 .

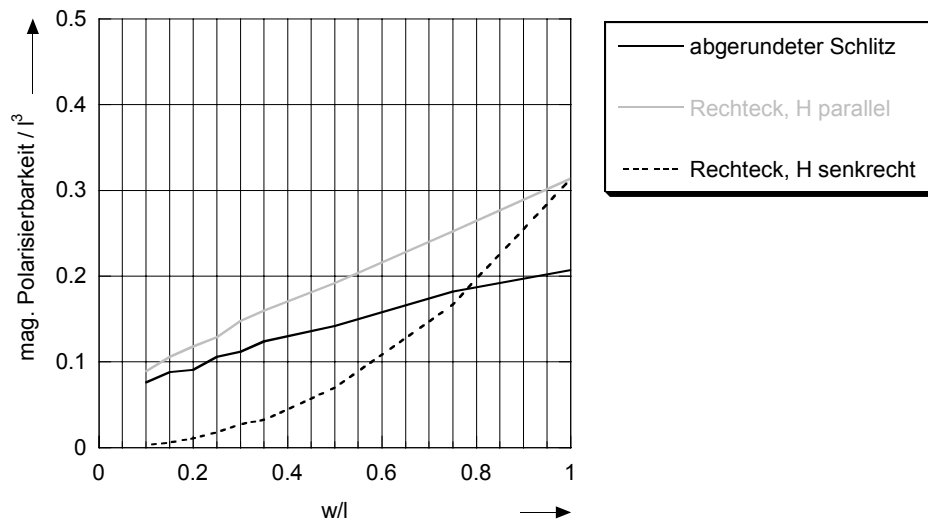


Abb. 7b: Magnetische Polarisierbarkeit, normiert auf l^3 .

Die elektrische Polarisierbarkeit ist in Abb. 7a unabhängig von der Ausrichtung des H-Feldes, wie es sein muss. In Abb. 7b ist jedoch zu erkennen, wie stark die Aperturkopplung im magnetischen Fall von der Lage des Schlitzes zum

Magnetfeld abhängt. Bei einem Verhältnis $w/l=1$ (Quadrat) entfällt die Richtungsabhängigkeit.

Sämtliche Messergebnisse sind in den Tabellen 1 und 2 aufgelistet:

w/l	abgerundeter Schlitz	Hantel	Kreuz	Rechteck, H parallel	Rechteck, H senkrecht	Rosette
0,1	0,004	0,002	0,002	0,003	0,002	0,007
0,15	0,003	0,002	0,006	0,004	0,003	0,017
0,2	0,006	0,003	0,011	0,007	0,006	0,023
0,25	0,009	0,004	0,016	0,009	0,010	0,043
0,3	0,012	0,005	0,021	0,014	0,014	0,052
0,35	0,016	0,008	0,031	0,017	0,017	
0,5	0,027	0,022	0,047	0,032	0,031	
0,75	0,051	0,049	0,067	0,061	0,061	
1	0,073	0,073	0,073	0,096	0,096	

Tabelle 1: Elektrische Polarisierbarkeit, normiert auf l^3

w/l	abgerundeter Schlitz	Hantel	Kreuz	Rechteck, H parallel	Rechteck, H senkrecht	Rosette
0,1	0,076	0,084	0,067	0,0895	0,003	0,125
0,15	0,088	0,085	0,086	0,106	0,006	0,152
0,2	0,091	0,095	0,101	0,118	0,011	0,158
0,25	0,106	0,111	0,107	0,129	0,018	0,167
0,3	0,112	0,118	0,120	0,148	0,027	0,168
0,35	0,124	0,124	0,134	0,162	0,033	
0,5	0,142	0,156	0,151	0,192	0,074	
0,75	0,182	0,173	0,19	0,252	0,167	
1	0,208	0,208	0,208	0,314	0,314	

Tabelle 2: Magnetische Polarisierbarkeit, normiert auf l^3

4. Zusammenfassung

Die elektrische und magnetische Polarisierbarkeit unterschiedlicher Aperturgeometrien wurde mit einer Doppel-Koaxial-TEM-Zelle messtechnisch bestimmt. Dabei zeigte sich eine gute Übereinstimmung mit theoretischen Werten sowie mit Ergebnissen aus Cohns Messungen im elektrolytischen Trog. Insgesamt lässt sich feststellen, dass die Form einer Öffnung, deren Abmessungen klein

gegenüber der Wellenlänge sind, nur eine unwesentliche Rolle spielt. Dies gilt insbesondere wenn man die Polarisierbarkeit nicht, wie in diesem Beitrag, auf die dritte Potenz der Aperturlänge l^3 , sondern auf $A^{3/2}$ (A: Aperturfläche) bezieht.

Wichtiger erscheint jedoch die Ausrichtung von Schlitzen, insbesondere bei einem kleinen Verhältnis w/l . Falls beispielsweise bei einem Gehäuseschirm die Ausrichtung des zu schirmenden Magnetfeldes bekannt ist, sollten Lüftungsschlitze unbedingt senkrecht dazu angebracht werden.

5. Literatur

- [Beth 44] H. A. Bethe, „Theory of Diffraction by small holes“, Physical Review, Nos.7 a. 8. 10/1944.
- [Cohn 51] S. B. Cohn, „Determination of aperture parameters by electrolytic tank measurements“, Proceedings of the IRE, vol. 39, pp.1416-1421, 1951.
- [Kad 51] H. Kaden, „Loch- und Schlitzkopplungen zwischen koaxialen Leitungssystemen“, Zeitschrift für angewandte Physik, III. Band, Heft 2, pp. 44 - 52, 1951.
- [Kad 59] H. Kaden, „Wirbelströme und Schirmung in der Nachrichtentechnik“, Springer-Verlag, 1959.
- [Koch 96] M. Koch, H. Garbe, „Geometrieabhängige Modenanalyse einer kompletten TEM-Zelle“, EMV '96 Karlsruhe, 5th International Exhibition and Congress, pp. 325 - 332, 1996.
- [Meu 77] F. de Meulenaere, J. van Bladel, „Polarizability of Some Small Apertures“, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, VOL AP-25, No. 2, 1977.
- [Okon 81] E. E. Okon e. a., „The Polarizabilities of Electrically Small Apertures of Arbitrary Shape“, IEEE Transactions on EMC, Vol. 23, No. 4, pp. 359-366, 1981.
- [Wil 88] P. F. Wilson e.a., „Techniques fo Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Materials: Part II:– Near-Field Source Simulation“, IEEE Transactions on EMC, Vol. 30, No. 3, 1988.
- [Wo 99a] H. A. Wolfspurger, H. Strehlow, A. J. Schwab, „A new Dual-Coaxial-TEM Cell“, EMC '99, Tokyo International Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp. 528 – 531, 1999.
- [Wo 99b] H. A. Wolfspurger, H. Strehlow, A. J. Schwab, „Measurement Techniques to determine electromagnetic Coupling through Apertures“, EMC MD '99, Magdeburg International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Symposium Record pp. 165 – 170, 1999.