



Schirmung extrem niederfrequenter elektromagnetischer Felder – Betrachtungen und Lösungen

17.12.2007

AS-H-171207-02

AST



Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	3
2. Theoretische Betrachtungen.....	4
2.1. Schirmdämpfung bei Nahfeldern	7
2.1.1. Absorptionsverlust.....	7
2.1.2. Reflexionsverlust.....	8
2.1.3. Korrekturfaktor für Mehrfachreflexionen	8
2.2. Zusammenfassung	9
3. Praktische Herangehensweise	10
3.1. Passive Schirmung durch Feldschwächung	11
3.2. Schirmung durch Abschwächung mittels Gegenfeld.....	11
3.3. Vergleichstabelle	12
3.4. Beispiel.....	15
4. Ergebnisse.....	16

1. Einleitung

Die Bezeichnung Schirm bezieht sich üblicherweise auf eine allseitig geschlossene metallische Hülle um ein elektronisches Gerät oder einen Teil dieses Geräts.

Der Schirm stellt folglich konzeptionell eine Grenzfläche gegen den Durchtritt elektromagnetischer Felder dar. Die Effektivität eines Schirms, die Schirmdämpfung, kann betrachtet werden als das Verhältnis der Feldstärke eines auf den Schirm einfallenden elektrischen (magnetischen) Feldes zur Feldstärke des elektrischen (magnetischen), die Schirmung transmittierenden Feldes.

Ziel elektromagnetischer, elektrischer und magnetischer Schirmung ist zum einen, die Wirkung einfallender Felder auf empfindliche Schaltkreise aufzuheben oder zumindest die Feldstärke signifikant zu reduzieren, zum anderen, die Abstrahlung der Bauteile nach außerhalb der Grenzfläche zu verhindern. Die grundlegende Herangehensweise sieht vor, eine Grenzfläche aus einem elektrisch leitfähigen oder magnetischen Material zwischen der Feldquelle und dem Schaltkreis einzubringen.

2. Theoretische Betrachtungen

Die Schirmdämpfung kann beschrieben werden als durch den Schirm hervorgerufene Reduktion der magnetischen, elektrischen oder elektromagnetischen Feldstärke. Die Dämpfung eines Schirms hängt dabei vom Schirmmaterial als auch von den Eigenschaften des einfallenden Feldes (Fern- oder Nahfeld) ab, das bestimmt wird durch die Distanz zwischen Störquelle und Störsenke.

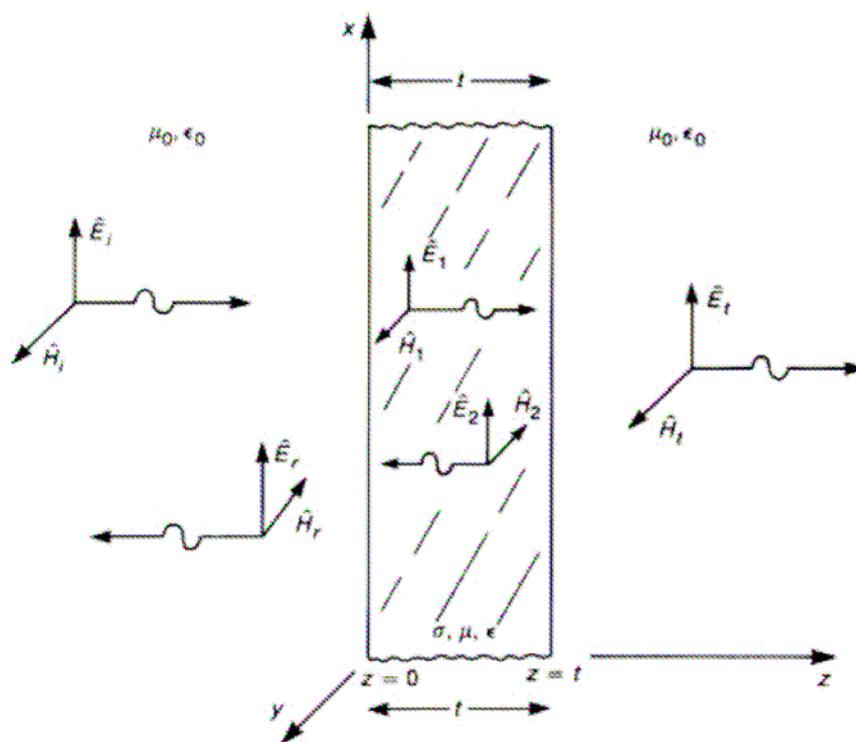
Zur Quantifizierung dieser Angaben betrachten wir das Standardproblem einer metallischen Grenzfläche der Dicke t , Leitfähigkeit σ , relativen Permittivität (dielektrischen Leitfähigkeit) $\epsilon_r=1$ und relativen Permeabilität (magnetischen Leitfähigkeit) μ_r . An dieser Grenzfläche fällt eine elektromagnetische Welle ein. Die Welle wird zum Teil reflektiert, zu einem anderen Teil durch die Grenzfläche transmittiert. Die Schirmdämpfung (SE) der Grenzfläche für das elektrische Feld wird in Dezibel definiert als:

$$SE = 20 \log_{10} \left| \frac{\hat{E}_i}{\hat{E}_t} \right|$$

In Bezug auf das magnetische Feld kann die Schirmdämpfung definiert werden als:

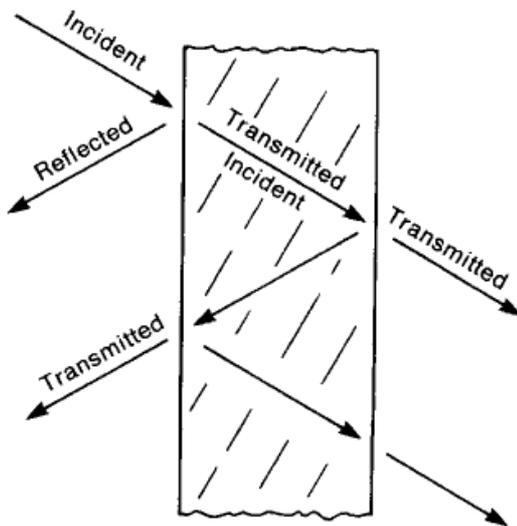
$$SE = 20 \log_{10} \left| \frac{\hat{H}_i}{\hat{H}_t} \right|$$

(Kaden, 1959).



Ist das einfallende Feld eine ebene Welle und sind die Medien beiderseitig der Grenzfläche identisch, sind auch die beiden durch die Gleichungen beschriebenen Definitionen identisch, da elektrische und magnetische Felder über die intrinsische Impedanz miteinander in Beziehung stehen. Bei Nahfeldern und/oder unterschiedlichen Medien auf den beiden Seiten der Grenzfläche sind die beiden Definitionen nicht äquivalent. Trotzdem wird oft die Definition der Schirmdämpfung für elektrische Felder als Standard für beide Situationen herangezogen.

Diverse Phänomene tragen zur Reduktion der Feldstärke des einfallenden Feldes bei, während es durch die Grenzfläche transmittiert. Die folgende Abbildung verdeutlicht diese Effekte. Zunächst einmal wird das einfallende Feld an der linken Oberfläche der Grenzfläche reflektiert. Der reflektierte Anteil des einfallenden Feldes wird durch den Reflexionskoeffizienten dieser Oberfläche bestimmt.



Der Wellenanteil, der die Oberfläche der Grenzfläche transmittiert, wird als Absorptionsverlust bezeichnet.

Die gegebene Schirmdämpfung kann als Summe dreier Terme definiert werden, die den Reflexionsverlust, den Absorptionsverlust und die Mehrfachreflexion repräsentieren. Diese Summanden ergeben in Dezibel:

$$SE = A + R + C \quad |$$

wobei A für den Absorptionsverlust der durch die Grenzfläche propagierenden Welle steht, R für den Reflexionsverlust durch Reflexionen an der linken und rechten Oberfläche und C für die zusätzlichen Effekte durch Mehrfachreflexionen und -durchtritt.

2.1. Schirmdämpfung bei Nahfeldern

Als Bedingung für ebene Wellen wird angenommen, dass das Feld voll ausgebildet ist ($E/H = Z_0 = 377\Omega$), was bei ausreichendem Abstand von der Strahlungsquelle zutrifft. Dieser Bereich wird Fernfeldbereich genannt. Die Amplitude des E-Feldes bzw. des H-Feldes verringert sich im Fernfeldbereich jeweils um $1/r$, d.h. das E- bzw. H-Feld wird um 20 dB (bzw. 10 dB) reduziert, wenn der Abstand r sich verzehnfacht (bzw. um den Faktor 3,3 vergrößert).

Im Nahfeldbereich hingegen ist das Verhältnis von E und H komplex und variiert mit der Entfernung zur Störquelle. Hier muss die Schirmdämpfung für die elektrischen und die magnetischen Felder separat betrachtet werden. Diese Situation ist bei der Schirmung von Versorgungsleitungen, Netzkabeln, elektronischen und Elektrogeräten gegeben.

Wie im vorigen Absatz beschrieben, kann die Schirmdämpfung als Summe dreier Terme definiert werden, die den Reflexionsverlust, den Absorptionsverlust und die Mehrfachreflexion repräsentieren. Diese Summanden ergeben in Dezibel:

$$SE_{dB} = R_{dB} + A_{dB} + C_{dB}$$

2.1.1. Absorptionsverlust

Im Niederfrequenzbereich bestimmen die Absorptionskomponenten den Grundmechanismus der Schirmung. Wenn die magnetische Komponente des Nahfelds überwiegt und die Welle senkrecht zur Schirmoberfläche propagiert, entsprechen die Absorptionsverluste denen bei einem Fernfeld. Die Absorptionsverluste innerhalb des Materials können wie folgt berechnet werden:

$$A = 131.4 \cdot r \cdot \sqrt{f \cdot \mu_r \cdot \sigma_r} \quad |$$

wobei t die Wandstärke des Schirms (in mm) ist, f die Frequenz (in MHz), μ_r die relative magnetische Leitfähigkeit und σ_r die relative Leitfähigkeit des Materials (ausgedrückt als Prozentsatz des International Annealed Copper Standard IACS, nach dem Leitkupfer den Wert 1 erhält).

2.1.2. Reflexionsverlust

Die Reflexion elektromagnetischer Felder tritt an den Grenzflächen zwischen unterschiedlichen Medien auf, z.B. an der Grenzfläche Luft-Schirmung oder Schirmung-Luft.

Wenn die magnetische Komponente des Nahfelds überwiegt und die Welle senkrecht zur Schirmoberfläche propagiert, unterscheidet sich der Reflexionsverlust von dem der Fernfeld-Gleichung und kann näherungsweise ausgedrückt werden als:

$$R = 14.57 - \left(10 \cdot \log \frac{\sigma_r \cdot f \cdot r^2}{\mu_r} \right)$$

wobei r in Metern angegeben wird.

2.1.3. Korrekturfaktor für Mehrfachreflexionen

Für die Berücksichtigung der Mehrfachreflexionen gilt folgende Gleichung:

$$C = 20 \cdot \log (1 - e^{-2t/\delta})$$

Wenn die Absorptionsverluste allerdings 9 dB überschreiten, wird der Korrekturfaktor C als vernachlässigbar eingestuft, und Mehrfachreflexionen müssen nicht berücksichtigt werden.

2.2. Zusammenfassung

Für Fernfeld-Störquellen ist der Reflexionsverlust der vorherrschende Schirmungsmechanismus im Niederfrequenzbereich, während der Absorptionsverlust bei höheren Frequenzen als Schirmungsmechanismus vorherrscht.

Für magnetische Nahfeld-Störquellen aller Frequenzen stellt eher der Absorptionsverlust den vorherrschenden Schirmungsmechanismus dar. Allerdings sind sowohl Reflexions- als auch Absorptionsverlust in niederfrequenten magnetischen Nahfeld-Störquellen ausgesprochen gering.

Hinweis: In solchen Fällen ist die Schirmdämpfung durch Absorption abhängig von $(\mu_r \cdot \sigma_r)^{1/2}$ und von der Wandstärke des Schirms.

3. Praktische Herangehensweise

Elektrische Felder strahlen von ungeschirmten Versorgungsleitungen, Netzkabeln, elektronischen und Elektrogeräten ab. Die elektrische Feldstärke wird in Volt pro Meter (V/m) gemessen. Daher finden sich unter Hochspannungsleitungen (230 bis 500 kV) elektrische Felder sehr großer Feldstärke. Diese können durch geerdete Objekte und Materialien wie Metallrohre, Bäume und Gebäude abgeleitet werden.

Außerdem werden von ungeschirmten Versorgungsleitungen, Netzkabeln, elektronischen und Elektrogeräten magnetische Felder abgestrahlt. Die magnetische Feldstärke wird in Ampère pro Meter (A/m) gemessen und verhält sich proportional zum Laststrom. Inwieweit ein Mensch oder Objekt einem magnetischen Feld ausgesetzt ist, wird anhand der magnetischen Flussdichte in Milligauss (mG) oder in Mikrottesla (μT) gemessen, wobei $1 \text{ mG} = 0,1 \mu\text{T}$. Menschen spüren leider nicht die Anwesenheit von Magnetfeldern hoher Feldstärke, deren Schirmung sich sehr aufwendig gestaltet.

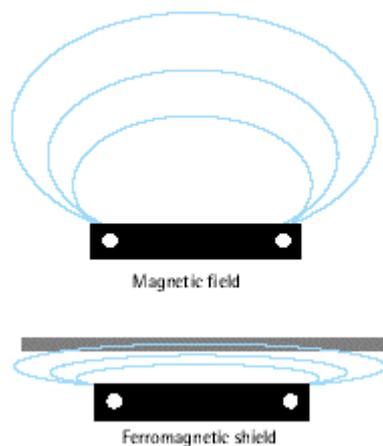
Derzeit ist die Schirmung gegen magnetische Felder ein äußerst schwieriges Unterfangen für besonders ausgebildete Fachleute, besonders wenn große Bereiche gegen multiple magnetische Störquellen hoher Feldstärke geschirmt werden sollen. Es existieren noch keine verlässlichen Formeln für die Planung oder EMF-Simulationsprogramme, die Konstrukteuren praktische Hilfen für die magnetische Schirmung solcher großen Bereiche an die Hand geben würden.

In der Praxis werden zwei Typen von magnetischen Schirmungen im Frequenzbereich 50 bis 60 Hz verwendet: passive Schirmung durch Feldschwächung und Schirmung durch Abschwächung mittels Gegenfeld.

3.1. *Passive Schirmung durch Feldschwächung*

Diese Art der Schirmung wird durch den Aufbau mit ferromagnetischen hochpermeablen Materialien erreicht. Die auf den Schirm einfallenden Magnetfeldlinien bevorzugen im Idealfall den Durchtritt durch das hochpermeable Material und suchen sich innerhalb des Materials den Pfad des geringsten magnetischen Widerstandes (R), statt in den geschützten (geschirmten) Bereich einzudringen.

Passive shielding by flux shunting

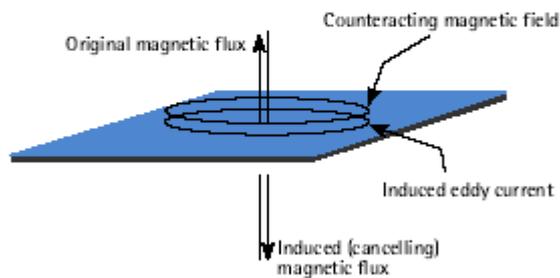


3.2. *Schirmung durch Abschwächung mittels Gegenfeld*

Diese Art der Schirmung basiert auf Wirbelstromverlusten, die innerhalb (elektrisch) hochleitfähiger Materialien auftreten.

Wird ein elektrisch leitfähiges Material einem zeitlich veränderlichen (50 bis 60 Hz) Magnetfeld ausgesetzt, induziert dieses eine Spannung. Aufgrund der spezifischen Leitfähigkeit werden innerhalb des Materials Ringströme (Wirbelströme) senkrecht zum induzierenden Magnetfluss hervorgerufen. Nach dem Lenzschen Gesetz erzeugen diese Wirbelströme wiederum ein Magnetfeld, das dem induzierenden Magnetfeld entgegengesetzt wirkt. Auf diese Weise schwächen die durch die Wirbelströme erzeugten Magnetfelder das stärkere induzierende Magnetfeld an der Außenseite der leitenden Oberfläche und bewirken dadurch einen Schirmeffekt.

Eddy current cancellation



3.3. Vergleichstabelle

Art, Wandstärke und elektromagnetische Eigenschaften des für die Konstruktion des Schirms verwendeten Metalls bestimmen den Grad der Schutzwirkung. Spannungsverlust durch Aperturen und Unterbrechungen in der Hülle reduzieren die gewünschte Schutzwirkung und müssen daher in der Entwurfsphase minimiert werden. Außerdem muss die magnetische Sättigung des Schirmmaterials berücksichtigt werden, die ebenfalls den Schutz verringern kann.

Üblicherweise ist der Absorptionsverlust der wichtigste Faktor bei der Konstruktion von Schirmhüllen. Er diktiert die Auswahl der Art und Wandstärke des zu verwendenden Materials, mit dem eine angemessene Schirmdämpfung erreicht werden kann. Wichtig hierbei ist folgender Sachverhalt: Der Absorptionsverlust ist eine Funktion des Produkts $(\mu_r \cdot \sigma_r)^{1/2}$, während der Reflexionsverlust eine Funktion des Verhältnisses σ_r/μ_r darstellt. Die folgende Tabelle führt die entsprechenden Werte für verschiedene Materialien auf.

Material	Relative Permeabilität (μ_r)	Relative Leitfähigkeit (σ_r)	Magnetische Sättigung (T)	$(\mu_r \cdot \sigma_r)^{1/2}$
Mu-Metall	70000	0,029	0,75	45
Permalloy	92000	0,027	0,77	49,8
SMART SHIELD*	3900	0,633	1,90	49,7

* Das Material des Smart Shield von AST setzt sich zusammen aus dem AST-AXX-Material (bei dem $\mu_r = 3900$ und $\sigma_r = 0,041$) und dem AST-SHIG-Material (bei dem $\mu_r = 1$ und $\sigma_r = 0,633$).

Magnetische Schirme wie solche aus Mu-Metall werden für die niederfrequente magnetische Schirmung eingesetzt, wobei Mu-Metall ein sehr empfindlicher Werkstoff ist, der schnell große Einbußen an seiner Permeabilität erleiden kann.

Die Schirmdämpfung von Mu-Metall ist sehr schockanfällig. Weichgeglühte Mu-Metall-Hüllen, die später verformt, fallengelassen, bearbeitet oder sonstwie mechanischem Schock ausgesetzt werden, müssen für den Erhalt der Schirmdämpfungswirkung erneut weichgeglüht werden.

Um optimale magnetische Eigenschaften zu erhalten, muss das Mu-Metall nach Abschluss sämtlicher Verarbeitungsschritte weichgeglüht werden. Verunreinigungen durch Sauerstoff, Schwefel oder Kohlenstoff müssen während des Weichglühens verhindert werden. In Fällen, in denen aus physikalischen Gründen bestimmte Teile nicht vollständig weichgeglüht werden können, ist u.U. eine alternative Behandlung angezeigt. Nichtsdestotrotz wird das nicht vollständige Weichglühen in jedem Fall zu suboptimalen magnetischen Eigenschaften führen.

Aus diesen Gründen und wegen der enormen Kosten des Mu-Metalls hat AST eine Lösung mit sehr gutem Preis-Leistungs-Verhältnis entwickelt.

Die Schirmungslösung von AST besteht in einer hybriden Schirmungstechnologie. Dank der Kombination von hochpermeablen und hochleitfähigen Materialien wird ein doppelter Effekt auf elektromagnetische Felder erzeugt, der die Remanenz minimiert:

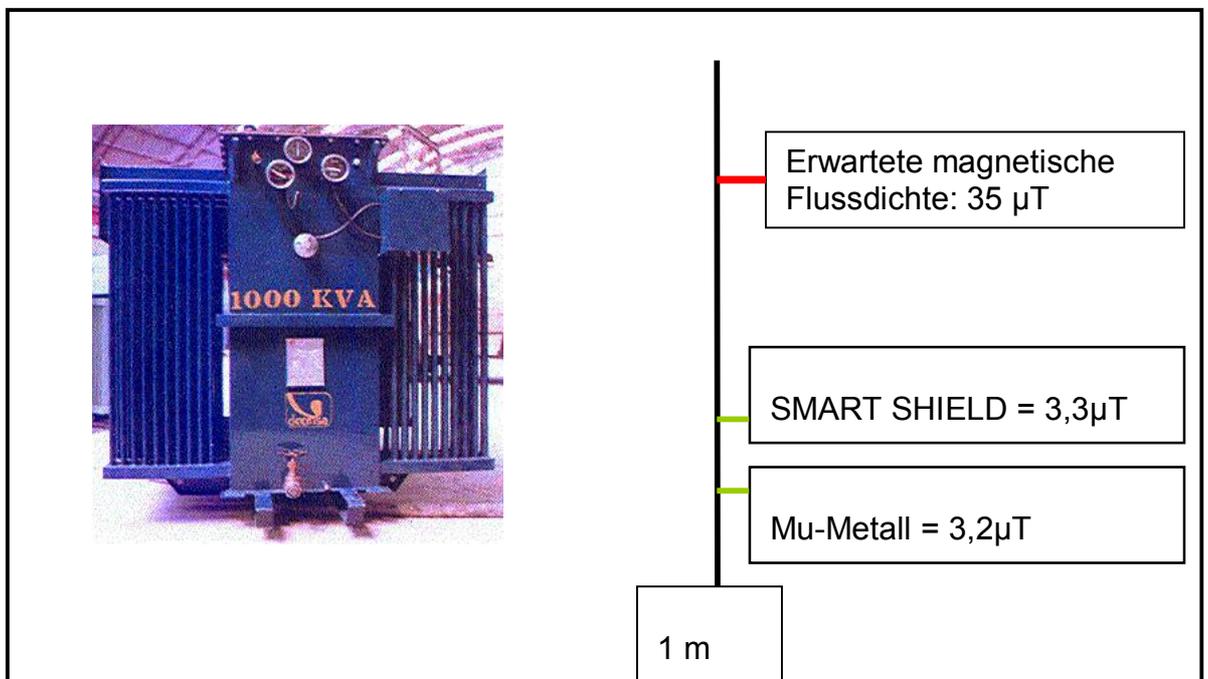
Schirmung durch Absorption: Das AST-AXX-Material weist wegen seines sehr guten $(\mu_r \cdot \sigma_r)^{1/2}$ -Faktors gute Eigenschaften für die passive Schirmung durch Feldschwächung auf.

Schirmung durch Wirbelstromverluste: Das AST-SHIG-Material weist wegen seiner hohen Leitfähigkeit gute Eigenschaften für die Schirmung durch Abschwächung mittels Gegenfeld auf.

Bei Verwendung der Materialien von AST wurden die Anforderungen der Norm EN 61000-4-8 mit dem besten Preis-Leistungs-Verhältnis erfüllt.

3.4. Beispiel

Im praktischen Anwendungsfall eines 1000 kVA-Transformators ist in 1 Meter Entfernung eine magnetische Flussdichte von $35 \mu\text{T}$ zu erwarten. Sowohl SMART SHIELD als auch Mu-Metall erfüllen die Anforderungen der Norm EN 61000-4-8 und bewirken eine Reduzierung des Werts auf weniger als $3,75 \mu\text{T}$.



SMART SHIELD weist jedoch gegenüber Mu-Metall einige Vorteile auf: Es muss nicht weichgeglüht werden, die Schirmdämpfung ist widerstandsfähiger gegen mechanischen Schock, und es ist ein besseres Preis-Leistungs-Verhältnis gegeben.

4. Ergebnisse

Derzeit ist die Schirmung gegen magnetische Felder ein äußerst schwieriges Unterfangen für besonders ausgebildete Fachleute, besonders wenn große Bereiche gegen multiple magnetische Störquellen hoher Feldstärke geschirmt werden sollen. Es existieren noch keine verlässlichen Formeln für die Planung oder EMF-Simulationsprogramme, die Konstrukteuren praktische Hilfen für die magnetische Schirmung solcher großen Bereiche an die Hand geben würden.

Die von AST eingesetzte Schirmungstechnologie ist das Ergebnis jahrelanger Erfahrungen und von mehr als 500 erfolgreichen Installationen, die uns das Know-How für die Standardisierung hochperformanter EMF-Schirmungsprodukte lieferten.

Die Schirmungslösung von AST besteht in einer hybriden Schirmungstechnologie. Dank der Kombination von hochpermeablen und hochleitfähigen Materialien wird ein doppelter Effekt auf elektromagnetische Felder erzeugt, der die Remanenz minimiert.

Bei Verwendung der Materialien von AST wurden die Anforderungen der Norm EN 61000-4-8 mit dem besten Preis-Leistungs-Verhältnis erfüllt.

Agustín Sánchez
Leiter Abteilung Schirmung
Advanced Shielding Technologies S.L.
Telefon: +34 93 475 14 81
Mobil: +34 629 11 20 21
Fax: +34 93 377 28 80
E-Mail: agustin.sanchez@ast-global.com