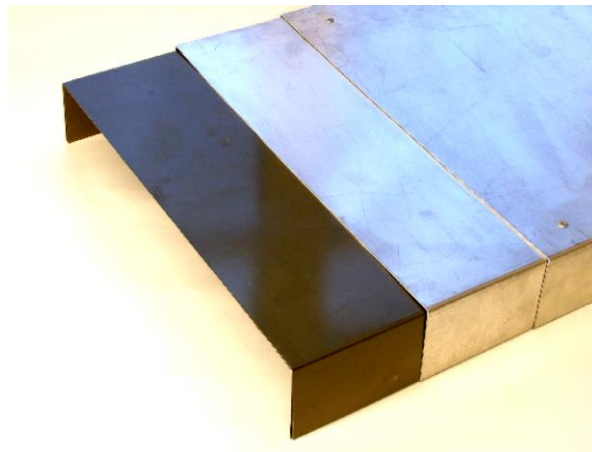


Uns ist dieses Effekt schon bekannt: der Effekt der Bündelung des magnetischen Flusses bei den Eisenkreisen in Transformatoren und anderen elektrischen Maschinen. Dort wird genau das gleiche Prinzip angewendet: Der magnetische Fluss wird im Wicklungskern aus Weicheisen, also einem Material mit sehr hoher Permeabilität geführt. Man spricht hier vom Hauptfluss, im Gegensatz zum Streufluss, der sich außerhalb des Kernes in der Luft befindet.

Der hochpermeable magnetostatische Schirm besitzt jedoch im Vergleich zum dielektrischen Schirm eine **wesentlich größere Bedeutung**: Zur Schirmung magnetischer Gleichfelder gibt es keinen physikalischen Effekt, der dem *Faraday'schen Käfig* entspricht. Dies liegt daran, dass es **keine** magnetischen Quellen (**magnetische Ladungen oder Monopole**) gibt, deren Verschiebung ein vorliegendes Magnetfeld kompensieren könnte. Zur Anwendung kommt der **dimagnetische** Schirm (nicht mit **diamagnetisch** verwechseln!) ebenfalls bei Bauwerken, darüber hinaus jedoch bei technischen Schirmhüllen, die aus hochpermeablem Material angefertigt werden. Die Anzahl hochpermeabler Werkstoffe ist wesentlich höher als die hochpermittiver: Ebenso sind die maximal erreichbaren, relativen Permeabilitätszahlen sind um Größenordnungen höher als die erreichbaren Dielektrizitätszahlen. Dies macht die Anwendung hochpermeabler Schirme eher wirtschaftlich. Insbesondere weichmagnetische Werkstoffe weisen sehr hohe Permeabilitäten auf. Oft angeführt wird in diesem Zusammenhang das Schirmmaterial **Mumetall®**, eine Eisenlegierung mit sehr hoher Permeabilität. Zu bedenken ist bei der Dimensionierung neben der Permeabilität in jedem Fall die Sättigung, das Hystereseverhalten und die Eigenschaften des Materials bei zunehmender Frequenz. Der Mechanismus des dimagnetischen Schirms wirkt auch bei veränderlichen Magnetfeldern; mit zunehmender Frequenz nimmt jedoch die Beweglichkeit der Domänen und somit die Permeabilität ab, die maximal erreichbare Schirmdämpfung wird geringer. Aufgrund des hohen Aufwandes und der vergleichsweise geringen Effizienz hochpermeabler Schirme stellt sich die Frage nach Alternativen. Bei der Schirmung statischer Felder kommt hier lediglich der im nächsten Abschnitt beschriebene aktive magnetostatische Schirm in Frage. Sobald es sich aber um ein veränderliches Magnetfeld (z. B. bei der energietechnischen Frequenz 50 Hz) handelt, bietet sich der elektrodynamische Schirm an der in weiterem Abschnitt beschrieben wird. Bei Verwendung von sowohl leitfähigen als auch hochpermeablen Materialien können die Wirkungsweisen beider Schirmmechanismen miteinander kombiniert werden (s. **Abb. unten**).

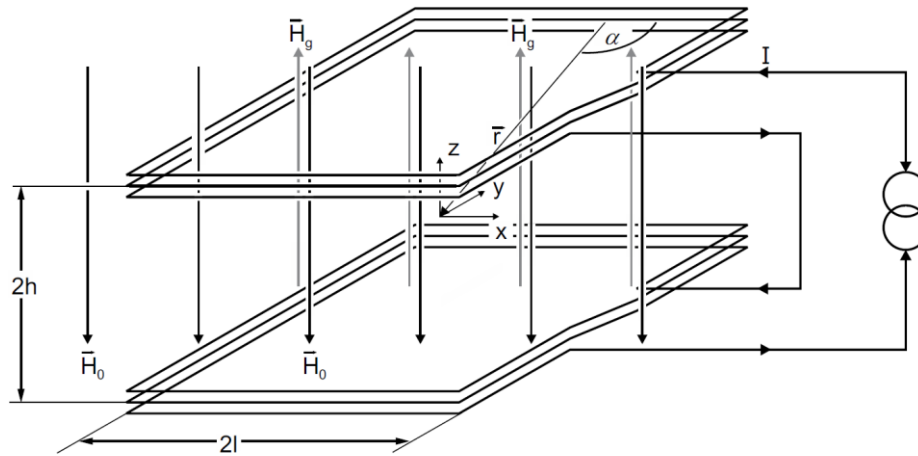


Hochpermeable Bleche zur Schirmung von Kabeln.

Aktiver magnetostatischer Schirm. Das Funktionsprinzip des aktiven magnetostatischen Schirms: **Feldauslöschung durch Erzeugung eines entgegengesetzt wirkenden Magnetfelds**, z.B. durch Erzeugung eines Gegenfeldes mit einer stromdurchflossenen Spule wird innerhalb eines bestimmten Bereichs das störende Magnetfeld verringert, s. **Abb. unten**. Um das äußere Feld H_0 zu kompensieren, ist ein Gegenfeld H_g nötig. Dieses wird von der Helmholtzspulen-Anordnung nach **Abb. unten** in Abhängigkeit vom Strom I erzeugt. H_g soll für den Mittelpunkt der Anordnung berechnet werden. Für das Magnetfeld des

quadratischen Helmholtzspulenpaars mit der Seitenabmessung $2l$, dem Abstand $2h$ zwischen Spulen und der Windungszahl n je Spule ist das Magnetfeld H_z im Zentrum der Anordnung

$$H_z = -(4/\pi)[I \cdot n \cdot l / (l^2 + h^2)] \cdot \arctan[l / (l^2 + h^2)^{1/2}].$$

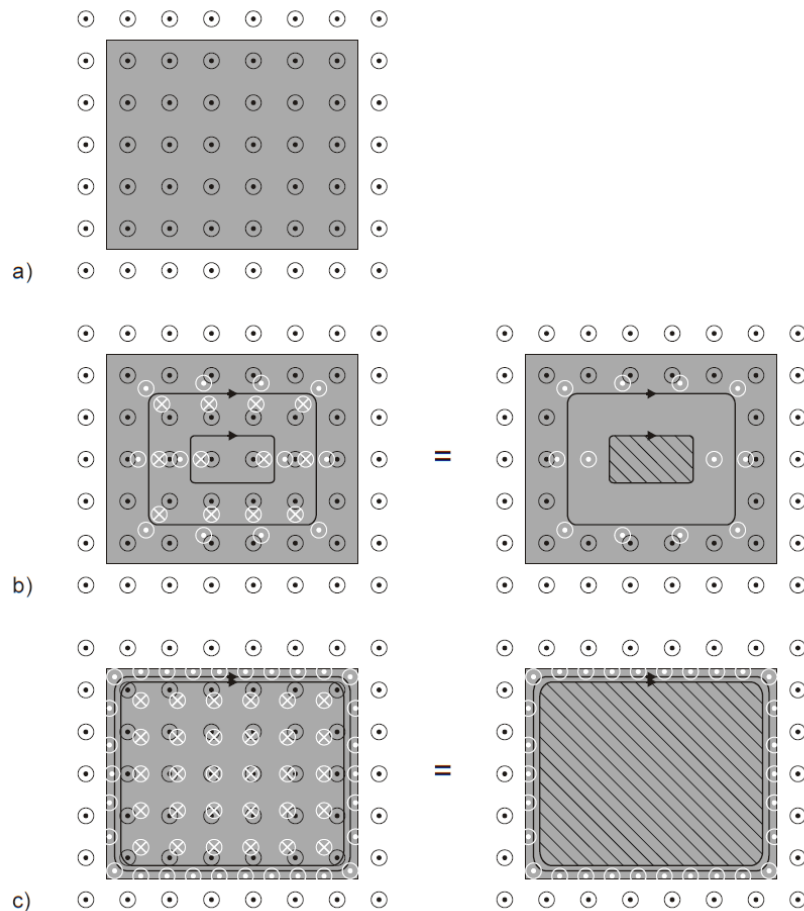


Prinzip eines aktiven Schirms: Eine Helmholtzspulen-Anordnung.

Das Magnetfeld der Helmholtzspulen ist weitgehend homogen. Wenn dies für das äußere Magnetfeld ebenfalls gilt, kann durch Überlagerung die Feldstärke innerhalb der Spule entsprechend reduziert werden. Um in der Praxis den Strom I geeignet einzustellen, ist entweder eine Regelung oder eine Kopplung an die äußere störende Feldursache (z. B. Transformator) erforderlich. Die Verwendung der aktiven magnetischen Schirmung bietet sich bei Gleichfeldern und bei Feldern mit Netz-Frequenz an. Schwierigkeiten ergeben sich aber bei der Einhaltung der EMV Grenzwerte, denn außerhalb des aktiv geschirmten Bereichs können sich je nach Spulenanordnung und Verlauf des äußeren Magnetfelds höhere Feldstärken ergeben. Effektiver als die Verwendung magnetostatischer Schirme ist für höhere Frequenzen der Einsatz eines *elektrodynamischen* Schirmes. Sein Funktionsprinzip wird in den nächsten Abschnitten eingehend beschrieben.

Das quasistationäre elektromagnetische Feld – der elektrodynamische Schirm. Wie oben gezeigt, bringt die Schirmung magnetostatischer Felder einen hohen konstruktiven Aufwand mit sich. Im Vergleich dazu ist die maximal erreichbare Schirmdämpfung oft nicht ausreichend. Dies gilt vor allem im Vergleich zum elektrischen Feld, das sich mit einem *Faraday'schen* Käfig einfach und hocheffizient schirmen lässt. Glücklicherweise ist jedoch die Schirmung von magnetischen Gleichfeldern eher die Ausnahme. Meist liegen veränderliche Felder vor. Diese sind in der Lage, elektrische Ströme in Metallen zu induzieren. Diese Ströme ihrerseits induzieren das Gegenmagnetfeld zum primären Magnetfeld. Dies wird zur Schaffung eines effektiveren Schirmes benutzt.

Betrachten wir einen massiven Block aus elektrisch leitfähigem Material mit Permeabilitätszahl 1. Er befindet sich in einem quasistationären Magnetfeld. Bei der Frequenz $f = 0$ wird der Block gleichmäßig vom Magnetfeld durchdrungen, eine Schirmung findet nicht statt, **Abb. unten „a“**. Was passiert mit zunehmender Frequenz? Nach dem Induktionsgesetz wird innerhalb des Blocks um die magnetischen Flusslinien herum ein wirbelförmiges elektrisches Feld induziert. Da der Block leitfähig ist, treibt dieses elektrische Feld konzentrische, ringförmige Ströme durch den Block, so genannte *Wirbelströme*, engl. *eddy currents*. Diese Wirbelströme fließen umso besser, je höher die Frequenz des Magnetfeldes und die Leitfähigkeit des Blocks sind. Die Wirbelströme erzeugen ein Magnetfeld, das so genannte *Rückwirkungsfeld*. Es ist im Inneren der Wirbel dem äußeren Magnetfeld entgegen gerichtet und schwächt es ab. Das ist die Wirkungsweise des elektrodynamischen Schirms.



Ein elektrisch leitfähiger Block im quasistationären Magnetfeld mit von a) nach c) zunehmender Frequenz. In den Abbildungen links ist äußeres Magnetfeld (schwarz) und Rückwirkungsfeld (weiß) dargestellt, in den Abbildungen rechts die Überlagerung, also das resultierende Feld.

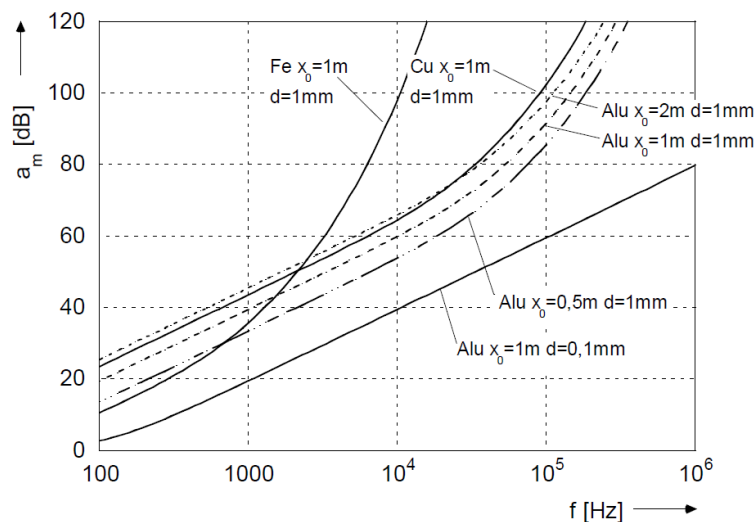
Da im Mittelpunkt des Blocks alle Stromwirbel einen Beitrag zum Rückwirkungsfeld liefern, ist dieser Punkt schon bei niedriger Frequenz feldfrei, d. h. äußeres Feld und Rückwirkungsfeld heben sich auf, **Abb. oben „b“**. Außerhalb der Stromwirbel überlagert sich das Rückwirkungsfeld konstruktiv. Mit ansteigender Frequenz wirkt die Induktion stärker, denn die Änderung des magnetischen Flusses wird größer. Schon eine geringere vom Magnetfeld durchsetzte Fläche reicht aus, um ausreichende Wirbelströme zu erzeugen. Da im Zentrum des Blocks kein magnetischer Wechselfluss mehr vorherrscht, werden dort keine Wirbelströme mehr induziert, umso mehr jedoch weiter außen. Die Stromdichte nimmt zum Rand des Blocks hin immer mehr zu, ebenso die magnetische Feldstärke, die sich aus äußerem Feld und Rückwirkungsfeld zusammensetzt. Dieser Vorgang wird *Stromverdrängung* genannt. Bei ausreichend hoher Frequenz fließt der Strom nur noch auf der Außenhaut des Blocks, weshalb man auch vom *Skineffekt* (engl. *skin*: Haut) spricht, **Abb. oben „c“**.

Da das Innere des Blocks strom- und feldfrei ist, können wir in diesem Gedankenexperiment den Block auch **aushöhlen**, ohne dass dies an den Verhältnissen etwas ändert: schraffierte Fläche in **Abb. oben „c“**. Die so entstandene leitfähige geschlossene Hülle ist der Prototyp des **elektrodynamischen Schirms**. Da sie eine möglichst hohe Leitfähigkeit besitzen muss, wirkt sie nicht nur als Schirm für magnetische Wechselfelder, sondern zugleich auch als *Faraday'scher Käfig*. Eine ideal leitfähige Hülle **ohne Öffnungen** schirmt elektrische und magnetische Wechselfelder sowie elektrische Gleichfelder. Ein wichtiger Begriff bei der Behandlung elektrodynamischer Schirme ist die *äquivalente Leitschichtdicke*, auch *Eindringtiefe* δ

(engl. *skin depth*) genannt. Sie beschreibt, in welcher Entfernung eine an der Schirmoberfläche vorhandene Feldstärke um den Faktor $1/e$ reduziert wird:

$$\delta = [2/(\omega\sigma\mu)]^{1/2}.$$

Eine dünnwandige Hohlkugel ist der einfachste Vertreter eines „dreidimensionalen“ Schirms, welcher sich leicht berechnen lässt. Praktische Bedeutung hat die Hohlkugel, da sie alle Schirmgeometrien annähert, die in allen drei Raumachsen ungefähr gleiche Abmessungen haben. Sie eignet sich so zur Dimensionierung quaderförmiger Schirmgehäuse. Der bei rechteckigen Geometrien auftretende „Eckeneffekt“, also die Überhöhung der Feldstärke in Raumkanten bleibt allerdings dabei unberücksichtigt. **Abb. unten** zeigt die magnetische Schirmdämpfung für einige Kugelschirme mit Radius x_0 aus Eisen, Kupfer und Aluminium (d – die Wandstärke der Kugel).



Magnetische Schirmdämpfung einiger Kugelschirme.

Die Schirmdämpfung der Kugelschirme aus Berechnungen zu **Abb. oben** ist in der Praxis gut brauchbar, um die Mindest-Materialstärke der Schirmwände zu ermitteln. Welche Schirmgeometrie zur Annäherung verwendet wird, ist dabei gar nicht so entscheidend. Der maximale Fehler, der bei anderen geometrischen Formen begangen werden kann, beträgt auch hier ca. 10 dB.

Die oben vorgestellten Betrachtungen beziehen auf **quasistationäre Magnetfelder**. Dies entspricht dem „Kilohertz-Bereich“ bei Abmessungen des Schirms im „Meter-Bereich“, also Schirmgehäuse, Schränke und geschirmte Räume. Die Schirmung des elektrischen Feldes muss in diesem Frequenzbereich nicht zusätzlich betrachtet werden – die leitfähige Hülle wirkt als nahezu idealer *Faraday*-Käfig, dessen elektrische Schirmdämpfung gegen unendlich geht. In der Praxis wird die Schirmdämpfung allerdings nicht nur von Material und Materialstärke, sondern auch von „Inhomogenitäten“, also Öffnungen, Materialverbindungsstellen usw. abhängen. Mit zunehmender Frequenz gilt dies umso mehr. Wenn zudem die **Wellenlänge des störenden Feldes** in die Größenordnung der Schirmabmessungen kommt, dann treten Resonanzerscheinungen im Schirm auf. Darüber hinaus besitzen elektromagnetische Wellen besondere Eigenschaften, die sie von quasistationären Feldern unterscheiden und die bei der Entwicklung von Schirmen benutzt werden.

Das elektromagnetische Wellenfeld – der elektrodynamische Schirm: Absorption, Reflexion und Transmission. Zuerst über **die Entstehung einer elektromagnetischen Welle**. Wir betrachten folgende Anordnung: Zwei Kugeln tragen die Ladung Q bzw. $-Q$, **Abb. unten „a“**). Diese Anordnung wird *Dipol* genannt. Zwischen den beiden Kugeln besteht ein elektrisches (Quellen-) Feld. Das elektrische Feld kann