

## Ethernet- und Industrieanwendungen schützen

Optimale Methoden zum Schutz von Ethernet- und Industrieanwendungen vor blitzschlagbedingten Überspannungs-Ereignissen.



© shutterstock\_1919725160

Gibt es eine einfache Möglichkeit, Ethernet-Systeme vor Schäden durch Blitzschlag zu schützen?

Wenn man über Kenntnisse der magnetischen Grundlagen und der Schaltungstheorie verfügt und gute Erdungs- und Abschirmungstechniken anwendet, ist Abhilfe tatsächlich möglich.

Blitzschlagbedingte Schäden an per Ethernet vernetzten Geräten lassen sich vermeiden, wenn man die richtigen Vorsichtsmaßnahmen anwendet. Traditionelle, auf Schutzbausteinen basierende Methoden sind dagegen unter Umständen nicht uneingeschränkt wirksam, solange sie nicht durch zusätzliche Maßnahmen ergänzt werden. Letztere setzen allerdings ein fundiertes Verständnis der Mechanismen voraus, die bei der Übertragung von Energie aus dem Blitzschlag-Ereignis in das Ethernet-Kabel und die angeschlossenen Geräte eine Rolle spielen. Genau um diesen Themenkomplex geht es in diesem Beitrag.



### Ausfälle durch Überspannungs-Ereignisse

Für Netzwerkadministratoren und alle anderen Personen, die für leistungsgebundene Ethernet-Verbindungen zuständig sind, stellen Ausfälle durch Überspannungs-Ereignisse, die meist durch Blitz-

schläge verursacht werden, ein ernstes Thema dar. Dies betrifft keineswegs nur Ethernet-Systeme, sondern jedes elektronische oder elektrische System mit großer physischer Ausdehnung, also beispielsweise elektrische Messungen über größere Distanzen, Stromversorgungs-Strukturen sowie industrielle Automatisierungssysteme, in denen sich die Messwertgeber nicht in unmittelbarer Nähe befinden. Traditionelle Lösungen beruhen auf dem Prinzip, die aus dem Ereignis resultierende Energie vor Ort so zu absorbieren oder zu klemmen, dass sie kein Risiko für die physischen Übertragungskomponenten darstellen. Problematisch an diesem Verfahren ist, dass die Energie natürlich ebenso wenig „weg“ ist wie der daraus resultierende elektrische Strom, der, wenn er sich durch einen induktiven Pfad fortpflanzt, hohe Spannungen hervorrufen kann, die potenziell schädlich sein können. Beim Erwägen komplexerer Abhilfemaßnahmen ist also zu fragen, welches Maß an Schutz benötigt wird und welcher Umfang an Zeit, Aufwand und Ressourcen in die Umsetzung investiert werden soll. Hinzu kommt, dass die angewandte Schutzmethode die Überspannung nicht nur aushalten, sondern auch überleben soll.

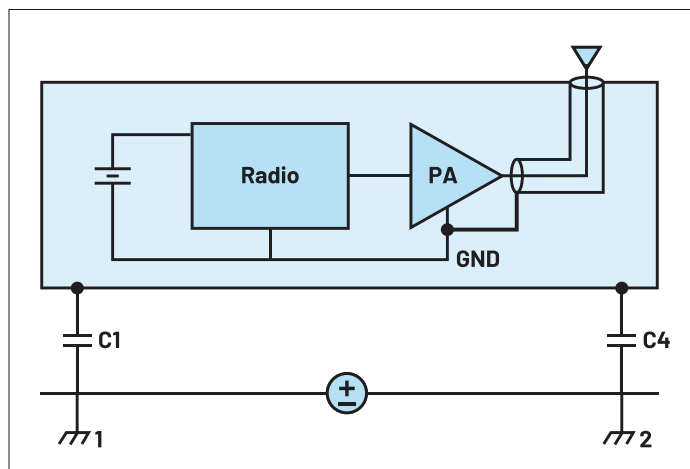
Blitzschläge können Energien freisetzen, die das erwartete Maß um mehrere Größenordnungen übersteigen. Für einen zuverlässigen und sicheren Betrieb bedarf es deshalb robuster Schutzmaßnahmen, die dieser Herausforderung standhalten.

### Welche Größenordnung hat die freigesetzte Energie?

Ethernet-Systeme müssen vor Überspannungs-Ereignissen geschützt werden, deren Ausmaß um viele Größenordnungen differieren kann. Zum Beispiel kann ein kilometerweit entfernter Blitzschlag eine Energiemenge freisetzen, die um fünf Größenordnungen geringer ist als ein Blitzeinschlag in unmittelbarer Nähe. Auch der Umfang eines Ethernet-Systems kann Einfluss darauf haben, wie gut es mit den unterschiedlichen Energiemengen fertig wird, und die Ausrichtung einer Schleife kann die Überspannungs-Beständigkeit eines Systems ebenfalls um drei Größenordnungen variieren lassen.

### Energiefreisetzung durch Blitzschlag

Welche Schäden durch ein Überspannungs-Ereignis entstehen, hängt von der freigesetzten Energie, dem Ort der Energiefreisetzung



**Bild 1:** Auch wenn ein System so klein ist, dass es in eine Hand passt, kann es von der Außenwelt beeinflusst werden. Im vorliegenden Fall ist die Massechleife sehr klein, und etwaige Störströme fließen in der Abschirmung anstatt in der Masse der Funkeinheit.

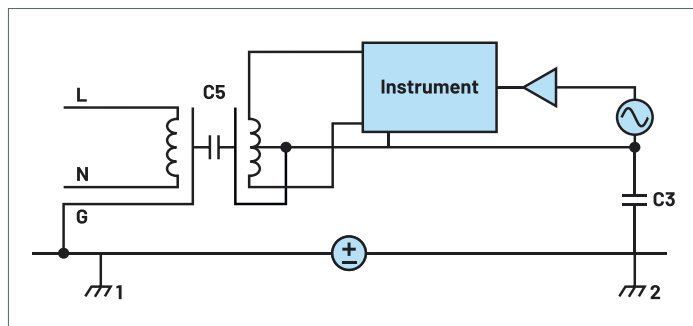
Autor:

James Niemann

Field Applications Engineer

Analog Devices

www.analog.com



**Bild 2:** Das hier gezeigte netzbetriebene Instrument weist eine Potenzialdifferenz zwischen den Chassismassen 1 und 2 auf. Die Masseschleife ist außerdem so groß, dass magnetisch gekoppelte Störgrößen in nicht vernachlässigbarer Höhe entstehen können. Störschleife und Instrumentenmasse teilen sich außerdem einen gemeinsamen Leiterzug.

sowie davon ab, wieviel Energie das System ohne Schaden aufnehmen kann.

Die aus einem Blitzschlag resultierende Energie wird in der Umgebung des Einschlags gespeichert (die Möglichkeit eines direkten Blitzschlags soll in diesem Beitrag unberücksichtigt bleiben). Das Hauptproblem bei Blitzschlägen ist, dass die Energie im Nahfeld gespeichert wird, wobei das Magnetfeld für diese niederimpedante Quelle die größte Bedeutung hat. Die Gesamtenergie des Magnetfelds lässt sich näherungsweise berechnen, indem man mithilfe der Länge des Blitzes die Gesamtinduktivität ermittelt und die Energiegleichung  $E = \frac{1}{2} L \times I^2$  anwendet. Die Stromstärke kann zwar variieren, aber bis zu 50.000 A betragen. In größerer Entfernung dürfte keine Energie vorhanden sein, die zu Bedenken Anlass gibt, sofern es nicht um den Bau von Funkempfängern geht.

### Im Vergleich

Unsere Sonne erzeugt eine Leistung von  $3,846 \times 10^{26}$  W. Auf der knapp 150 Millionen Kilometer entfernten Erde entspricht dies etwa 1.000 W pro Quadratmeter, denn die Sonne strahlt die besagte Leistung in alle Richtungen ab. Betrachten wir nun die Energie anstelle der Leistung. Um eine Energiemenge von 1.000 J zu empfangen, muss die Strahlung eine Sekunde lang einwirken (1 Watt entspricht einem Joule pro Sekunde). Das Volumen, auf das diese Energie entfällt, beträgt  $1 \text{ m}^2$  multipliziert mit der Strecke, die das Licht in einer Sekunde zurücklegt ( $3 \times 10^8 \text{ m}$ ), sodass wir auf ein

Gesamtvolumen von  $3 \times 10^8 \text{ m}^3$  kommen.

Um die nachfolgenden Abschnitte dieses Artikels besser verstehen zu können, muss das Konzept akzeptiert werden, dass sowohl abgestrahlte als auch statische Energie, nämlich magnetische Energie ( $B \times H$ ) und elektrostatische Energie ( $E \times D$ ) im Raum gespeichert werden. Das Poynting-Theorem beschreibt die Bewegung oder den Transfer von Energie. Bei jedem Transfer von Energie spielen sowohl magnetische als auch elektrische Felder eine Rolle. Da es innerhalb eines Leiters kein nennenswertes elektrisches Feld geben kann, wird hier auch keine Energie gespeichert. Ganz einfach ausgedrückt, wird in der Umgebung des Blitzschlag-Ereignisses sowohl nahe als auch ferne (abgestrahlte) Energie gespeichert. Das Konzept, dass Energie im Raum gespeichert wird, legt die folgende Lösung für das Überspannungsproblem nahe: wenn der Zugang zu dieser Energie eliminiert wird, wird damit auch das Überspannungs-Problem beseitigt.

Um Zugang zu der besagten Energie zu haben, muss eine Leitergeometrie (nämlich das Ethernet-Kabel) Zugang zu dem Raum haben, in dem diese Energieverlagerung stattfindet. Ebenso wie in dem eben angeführten Beispiel mit der Energieabstrahlung der Sonne spielt hier ebenfalls die Zeit eine Rolle, auch wenn wir uns im Nahfeld befinden. Da das differentielle Ethernet-Kabel selbst keine nennenswerte Schleifenfläche aufweist, dürfte es keine relevante Energie aus dem umgebenden Raum einkoppeln. Dies

gilt jedoch nicht für die Fläche zwischen dem Ethernet-Kabel und dem Massesystem.

Der aus der Überspannung resultierende, hochfrequente zirkulierende Strom fließt über die Chassismasse, und tatsächlich ist dieses Massesystem an allen realisierten Stromkreisen beteiligt. Im vorliegenden Kontext ist dies allerdings nur für große Stromkreise relevant. Bild 1 verdeutlicht, dass die Chassismasse zwar stets präsent ist, aber nur bei größeren Systemen bedeutsam wird. Außerdem wird erkennbar, weshalb nicht unbedingt die Erdung, sondern ein parasitärer Leiter etwas mit dem Problem zu tun hat. In den folgenden Abschnitten geht es um die zwei häufigsten Quellen von Stoßströmen.

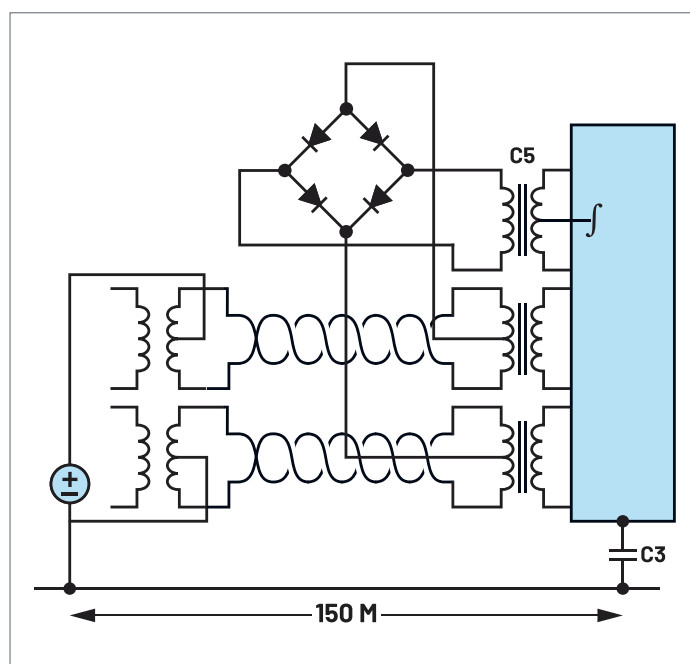
### Energie in der Masseschleife

Masseschleifen entstehen, wenn an zwei verschiedenen Punkten der Masse unterschiedliche Potenziale herrschen. Aus Bild 1 ist zu entnehmen, dass in jeder Schaltung ein zweiter Stromkreis existiert, nämlich die parasitäre Masseschleife. Diese Masseschleife ist galvanisch gekoppelt [1], weil die Masseschleife und der eigentlich gewollte Stromkreis einen gemeinsamen Leiterzug nutzen. Die Bilder 1 und 2 gehen diesbezüglich etwas mehr ins Detail. Auch wenn dieser sekundäre Stromkreis durch die Chassismasse

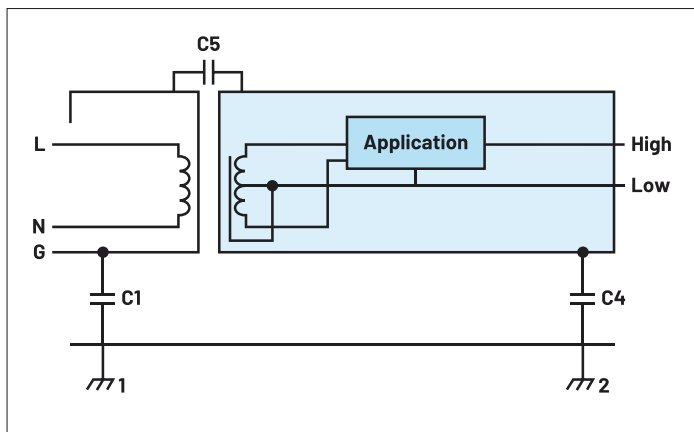
nicht so groß ist, ist er doch stets vorhanden. Generell gilt, dass mit den mechanischen Abmessungen eines Systems die Potenzialdifferenz zwischen diesen Massepunkten ebenso zunimmt wie die Induktivität und der ohmsche Widerstand zwischen diesen Punkten.

### Blitzschlag

Kommt es zu einem Blitzschlag in die Erde, breiten sich in alle Richtungen Ströme aus, die wiederum in den von ihnen durchflossenen Widerständen und Induktivitäten zu erheblichen Spannungsabfällen führen. Bei einigen Ethernet-Installationen kann diese Potenzialdifferenz das gesamte Ethernet-Kabel von einem Ende bis zum anderen umfassen und große Ströme hervorrufen. Dieser Effekt wird korrekterweise als Masseschleife kategorisiert. Darüber hinaus entstehen Masseschleifen auch durch Ströme, deren Ursprung in Instrumenten und elektrischen Maschinen liegt. Ein ordnungsgemäß geerdetes Gebäude weist einen einzigen Erdungsanschluss am Versorgungseinspeisepunkt auf. Hieraus lässt sich der Schluss ziehen, dass blitzschlagbedingte Masseschleifen innerhalb eines Gebäudes nicht die Hauptursache für Schäden an Anlagen sind. Selbstverständlich bezieht sich diese Aussage nicht auf Ethernet-Kabel außerhalb von



**Bild 3:** Diese exemplarische Ethernet-Schaltung weist keine Schutzvorkehrungen gegen Schäden durch Überspannungen auf.



**Bild 4:** Dieses Beispiel aus der Messtechnik verdeutlicht, wie Abschirmungen zur Unterdrückung von Stoßströmen in Anwendungsschaltungen dienen können.

Gebäuden oder zwischen verschiedenen Gebäuden.

Ungeachtet der jeweiligen Quelle kann die Spannung in der Masse zu Strömen im Ethernet-Kabel führen, auch wenn dieses nicht sehr lang ist und keine große Fläche umschließt. Die Faktoren, auf die es ankommt, sind die Potenzialdifferenz zwischen zwei Massepunkten, die Anstiegszeit und die Induktivität des Chassis zwischen den beiden Punkten.

## Blitzschlagbedingte magnetische Felder

Gemäß dem Faradayschen Induktionsgesetz können Blitzschläge durch magnetische Kopplung zu Spannungen in Leiterschleifen führen, und genau dies dürfte der problematischste Effekt sein, weil er auch Ethernet-Kabelzüge innerhalb von Gebäuden betrifft.

Blitzschlagbedingte Überspannungen durch Masseschleifen sind unbedingt von solchen Phänomenen zu unterscheiden, die durch magnetische Kopplung entstehen. In den nächsten Abschnitten werden Lösungen für beide Phänomene angesprochen. Die in Bild 3 dargestellte Ethernet-Verbindung enthält keine der in diesem Artikel vorgeschlagenen Abhilfemaßnahmen und dient somit als Referenz. Stromwege (infolge von Masseschleifen oder aufgrund des Faradayschen Induktionsgesetzes) durch die Schaltung und die Bezugsmasse, die ebenfalls Bestandteil des Stromkreises ist, sind die einzigen, über die Ströme fließen können. Konventionelle Lösungen basieren darauf, diese Ströme um empfindliche Bau-

teile herumzuleiten, jedoch können entlang des Stromwegs wegen  $V = L \times di/dt$  durchaus gefährliche Spannungsspitzen entstehen.

## Eine Lösung aus dem Lehrbuch

Eine lehrbuchmäßige Lösung für das Problem der aus Masseschleifen und magnetischen Effekten resultierenden Energie macht es notwendig, die gesamte Anwendung abzuschirmen. Diese Abschirmung minimiert die Kapazität zwischen der Anwendung und der Umgebung mit Ausnahme der Abschirmung selbst. Zur Verdeutlichung kann das in Bild 4 gezeigte vereinfachte Beispiel dienen, auch wenn dieses keinen spezifischen Ethernet-Bezug hat. Alle durch Masseschleifen fließenden oder magnetisch induzierten Ströme fließen durch das Metall der Abschirmung und überqueren die Isolationsbarriere über C5. Ströme in der Masseschleife können nicht in die von der Abschirmung umschlossene Applikation eindringen, und die Störfelder befinden sich in diesem Fall ausschließlich außerhalb der zur Applikation gehörenden Bauelemente. Diese lehrbuchmäßige Lösung deckt nicht nur beide Störquellen ab, sondern eliminiert auch sämtliche elektrostatischen Störeinflüsse. Bemerkenswert ist diese Lösung auch, weil sie selbst dann funktioniert, wenn C5 minimiert wird. Eine Kurzschlusswindung, wie sie weiter unten beschrieben wird, ist also nicht unbedingt erforderlich.

Diese Lösung funktioniert als einzige sowohl für Masseschleifen als

auch für induktiv eingekoppelte Energie. Da sie außerdem mehr leistet, als für die hier relevante Ethernet-Anwendung erforderlich ist, werden nachfolgend einige Vereinfachungen beschrieben, die eine praktisch umsetzbare Lösung für Ethernet-Anwendungen möglich machen.

## Wirkungsweise einer Kurzschlusswindung

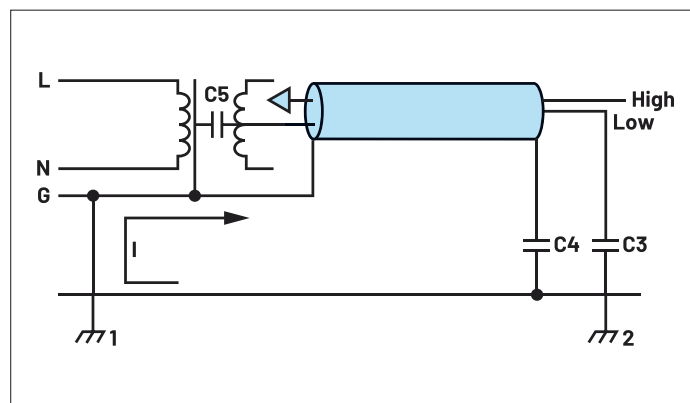
Die für die Beschädigung verantwortliche Energie resultiert aus dem vom Blitzschlag erzeugten Feld. Damit hieraus keine Energie in den Ethernet-Kabelzug gelangt, müssen wir das Feld beseitigen, und genau dies erreichen wir durch den Einbau einer Art Kurzschlusswindung in den „Transformator“, der aus dem Blitz (als Primärseite) und der Ethernet-Masseschleife (als Sekundärseite) gebildet wird. Wenn es gelingt, mit der Abschirmung des Ethernet-Kabels sowie geeigneten Flächen in der Anwendungsschaltung eine isolierte Kurzschlusswindung herzustellen, wobei die Masse als finaler Leiter die Kurzschlusswindung vervollständigt, dürfte sich die Energie wirksam eliminieren lassen. Nach der Realisierung dieser Kurzschlusswindung dürfte sich außerdem das Hinzufügen externer, schützender Bauteile deutlich einfacher gestalten.

Die zuvor erwähnte Vereinfachung lässt sich erreichen, indem man davon absieht, die linke und die rechte Hälfte des Systems komplett zu umschließen. Dies ist in Bild 5 zu sehen, während Bild 6 die entsprechende Ethernet-Konfiguration zeigt. Trotz ihrer Einfachheit kann diese Konfiguration durchaus effektiv sein, wenn man davon ausgeht, dass die Abschirmung als Kurzschlusswin-

dung fungieren kann und das Verhältnis zwischen C3 und C4 minimiert wird. Allerdings funktioniert diese einfachere Methode zum Eliminieren der Stoßstrom-Energie nur, wenn wir eine Kurzschlusswindung gegenüber dem isolierten Pfad herstellen können.

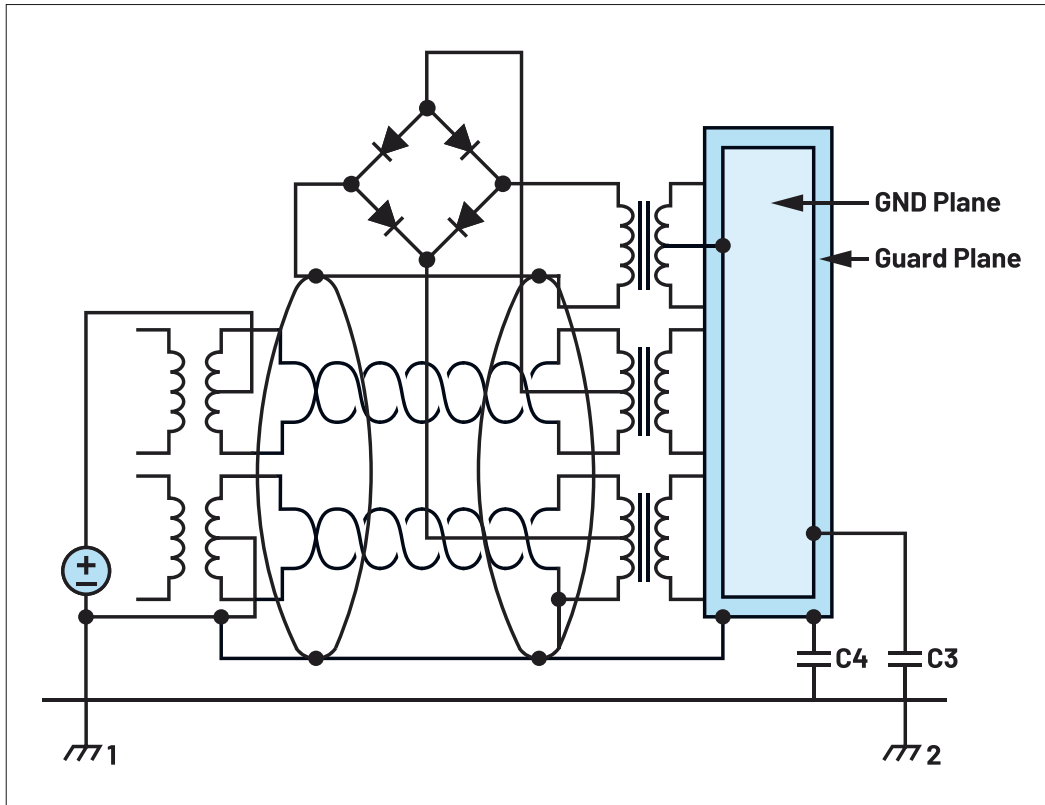
## Transformator-Analogie

Auf welche Weise aber eliminiert die Kurzschlusswindung die Energie für die Ethernet-Schleife? Um dieser Frage auf den Grund zu gehen, müssen wir etwas tiefer in die Transformator-Analogie eintauchen. Ein realer Transformator dient nicht zum Speichern, sondern zum Übertragen von Energie. Diese Aussage gilt unabhängig davon, ob der Transformator einen Eisenkern hat oder nicht. Damit in einem Transformator ohne Eisenkern („Luftkern-Transformator“) möglichst wenig Energie gespeichert wird, müssen die Wicklungen einen möglichst geringen Abstand haben, in dem Energie gespeichert werden könnte. Transformatoren mit Eisenkern übertragen Energie (abzüglich der Hysterese- und Wirbelstromverluste) auch dann von einer Wicklung zur anderen, wenn sich beide Wicklungen nicht direkt aufeinander befinden. Der Abstand zwischen den Wicklungen und dem Kern muss jedoch auch hier gering sein, damit möglichst wenig Energie gespeichert wird. Die Verwendung eines Kerns hat den zusätzlichen Vorteil, dass die Magnetisierungsströme geringer sind. Dies ergibt sich aus der höheren Induktivität als direkte Folge der hohen Permeabilität ( $\mu_r$ ). Unabhängig davon, ob ein Kern vorhanden ist oder nicht, bewirkt das Anlegen einer Spannung



**Bild 5:** In diesem vereinfachten Beispiel aus der Messtechnik dient die Abschirmung dazu, die Stoßstrom-Energie von den Anwendungsschaltungen fernzuhalten.





**Bild 6:** In diesem Ethernet-Beispiel werden Abschirmungen genutzt, um die Stoßstrom-Energie von den Anwendungsschaltungen fernzuhalten. Dabei ist  $C3 < C4$ .

an die Primärwicklung einen Stromfluss gemäß der weiter oben bereits angeführten Formel  $V = L \times di/dt$ , und hieraus resultiert wiederum eine Spannung an der Sekundärwicklung nach der Formel  $V = A \times dB/dt$  (A steht für die Fläche der Leiter-schleife). Das Vorhandensein von magnetischem Material wirkt sich also weder auf das primärseitige  $L \times di/dt$  noch auf das sekundärseitige  $A \times dB/dt$  und somit auch nicht auf die Spannungen am Transformator aus. Auf der Primärseite ist die Permeabilität  $\mu$ , eine Konstante. Je größer diese ist, umso höher wird die Induktivität und umso geringer wird dafür die kompensierende Komponente  $di/dt$ . Auf der Sekundärseite reduziert ein hoher  $\mu$ -Wert den Wert von  $A \times dB/dt$  (da das primärseitige  $di/dt$  geringer ist), während sich B um denselben konstanten Wert erhöht. Eine hohe Permeabilität verringert folglich nur den Magnetisierungsstrom infolge der größeren primärseitigen Induktivität.

Da der Transformator keine Energie speichert, wird bei starker Belastung der Sekundärseite ein höherer Strom von der niederimpedanten Spannungsquelle verlangt, die die Primärwicklung treibt, und der Pri-

märstrom nimmt entsprechend zu, um die benötigte Energie zu liefern.

Ein Blitz dagegen speichert sehr viel Energie in einem sehr großen Raum. Dabei ordnet sich die Energie stets so an, dass eine möglichst geringe Energiemenge gespeichert wird. Genau dies passiert im Innern unseres Transformators sowie am Übergang zur Sekundärwicklung, wo der Strom entgegengesetzt zu jenem in der Primärwicklung fließt. Diese gegenläufigen Ströme haben zur Folge, dass unter dem Strich kein externes magnetisches Feld existiert (und somit keine Energie gespeichert wird). In ganz allgemeiner Form kann dies als das Prinzip der kleinsten Wirkung bezeichnet werden, aber im vorliegenden Kontext kennt man diesen Sachverhalt als Lenzsche Regel. Es geht dabei um die Vorgänge in der Umgebung des Ethernet-Kabels und in der Chassis-Masse. Die Ethernet-Leiter-schleife (die man ebenfalls als Kurzschlusswindung betrachten kann) dient als Medium zum Verschieben oder Dissipieren dieser Energie, denn beides bietet eine Möglichkeit, die gespeicherte Energiemenge zu verringern. Ebenso wie im zuvor beschriebenen Transfor-

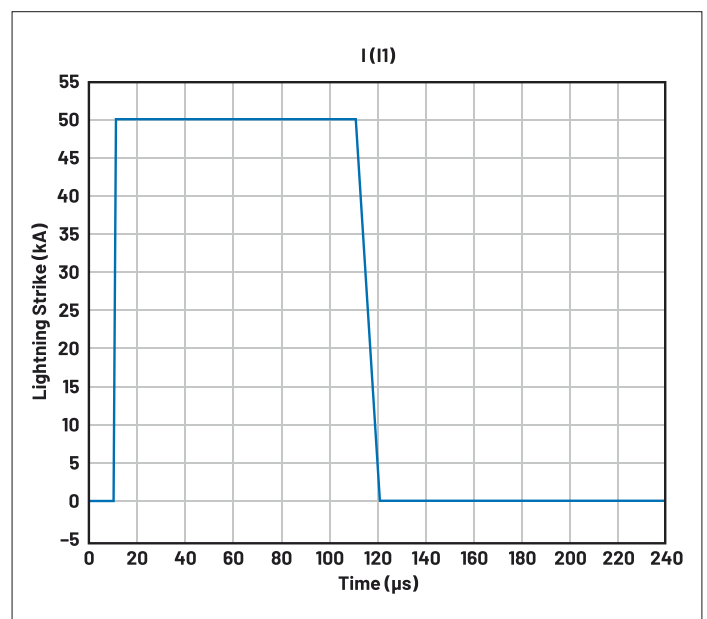
mator-Beispiel beträgt die induzierte Spannung auch hier  $V = A \times dB/dt$ , wenn auch ohne enge Kopplung zwischen Primärseite (Blitz) und Sekundärseite (Ethernet-Schleife). Diese mangelhafte Kopplung verhindert, dass dem Bereich eine unbegrenzte Energiequelle zugänglich ist. In der

Kurzschlusswindung nun fließt ein Strom, der die vom Blitz in diesem Raum gespeicherte Energie kompensiert bzw. dissipiert. Lasse sich die primärseitige Induktivität mit vorhandener Kurzschlusswindung messen, könnte man an ihrem geringeren Wert ablesen, dass weniger Energie gespeichert wird (die fehlende Energie würde zum Teil in der Kurzschlusswindung dissipiert). Anders ausgedrückt, hebt das aus der sekundärseitigen Last resultierende magnetische Feld das vom Blitz erzeugte Feld auf, sodass in der Ethernet-Schleife weniger Energie gespeichert wird.

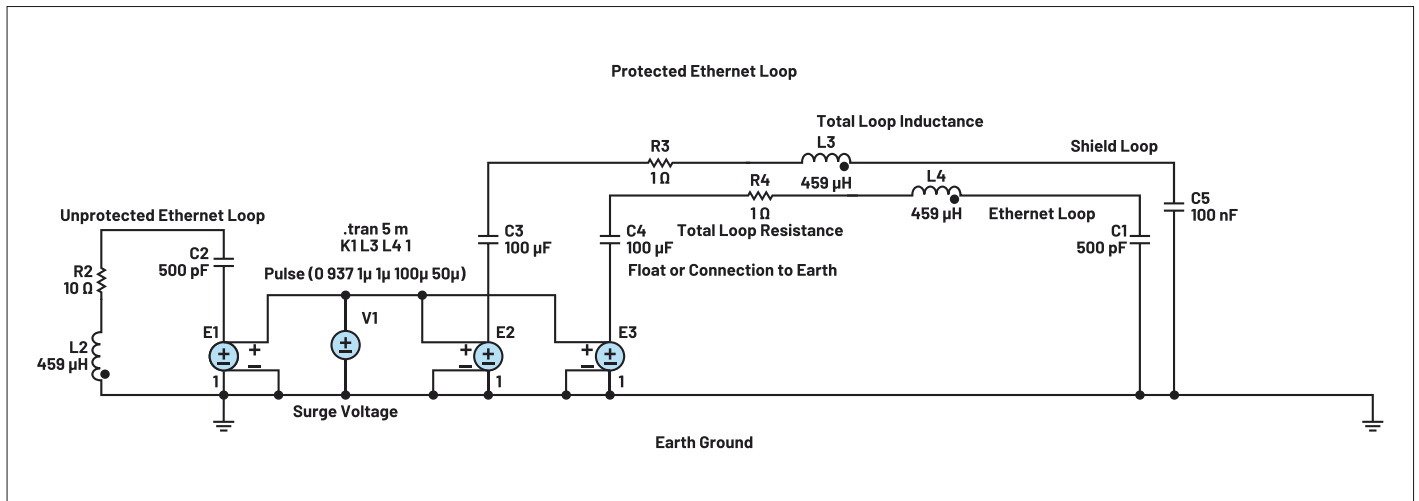
Nebenbei bemerkt, passiert genau dies auch in einem Transformator, wenn eine der Sekundärwicklungen kurzgeschlossen wird – wenn auch mit dem gravierenden Unterschied, dass in einem realen Transformator wegen der engen Kopplung die gesamte in der Primärwicklung enthaltene Energie in der Kurzschlusswindung dissipiert würde. Im Fall des Blitzes dagegen wird ausschließlich die in der Ethernet-Schleife gespeicherte Energie dissipiert.

## Ein Beispiel

Betrachten wir dazu noch einmal ein Beispiel. Die von einem Blitz erzeugte magnetische Feldstärke H beträgt  $I/2 \times \pi \times r$ . Geht man davon aus, dass der Blitzschlag in einer Entfernung von einer Meile (ca. 1.600 m) von unserem



**Bild 7:** Blitzschlag mit einer Anstiegszeit von  $1 \mu s$  und einer Abfallzeit von  $100 \mu s$



**Bild 8:** Dieses SPICE-Simulationsmodell veranschaulicht, wie sich der Stoßstrom mithilfe einer zweiten, eng mit der Ethernet-Schleife gekoppelten Kurzschlusswicklung reduzieren lässt.

Ethernet-Kabel erfolgt und dass die Stromstärke 50.000 A beträgt, errechnet sich eine magnetische Feldstärke von 4,97 A/m.

Die magnetische Flussdichte berechnet sich nach der Formel  $B = \mu \times H$ , also in diesem Fall  $(4\pi \times 10^{-7})(4,97) = 6,25 \times 10^{-6}$  Tesla. Die Fläche der Ethernet-Schleife (in 1.600 m Entfernung) beträgt  $1 \text{ m} \times 150 \text{ m} = 150 \text{ m}^2$ .

Als Stromanstiegszeit bei einem Blitzschlag kann man 1  $\mu\text{s}$  ansetzen, während die Abfallzeit ca. 100  $\mu\text{s}$  beträgt. Die sich in der Schleife auf-

bauende Spannung beträgt damit näherungsweise

$$V = A \times dB/dt = 150 \times (6,25 \times 10^{-6}) / 1 \mu\text{s} = 937 \text{ V.}$$

Den exakten Wert können wir mit einer Simulation ermitteln. In Bild 7 sind die Verhältnisse bei einem Blitzschlag mit 1  $\mu\text{s}$  Anstiegszeit und einer Abfallzeit von 100  $\mu\text{s}$  dargestellt.

### Faradaysches Induktionsgesetz

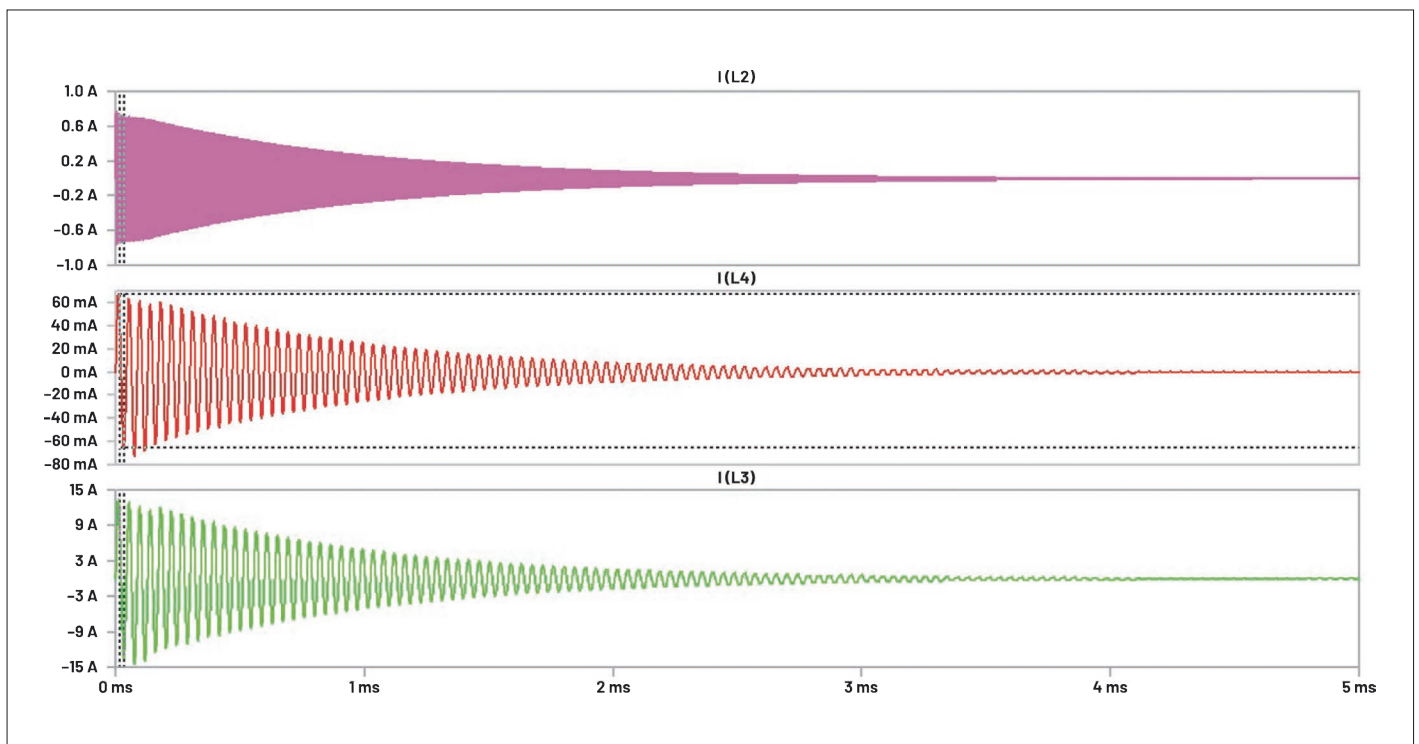
Nach dem Faradayschen Induktionsgesetz erzeugt dieser Strom die

Spannung V1 (siehe Bild 8). E1 stellt die Stoßspannung in einer ungeschützten Ethernet-Schleife dar. Bei den 459  $\mu\text{H}$  (L2) handelt es sich um die Induktivität der Ethernet-Schleife zusammen mit dem Chassis, und die Kapazität von 500 pF (C2) steht für die Netto-Serienkapazität der PSE- und PD-Seite der Ethernet-Verbindung zur Masse. Der 10- $\Omega$ -Widerstand R2 schließlich steht für den Serienwiderstand des Stromkreises. In der Simulation hat R2 keine wirklichen Auswirkungen auf die Spit-

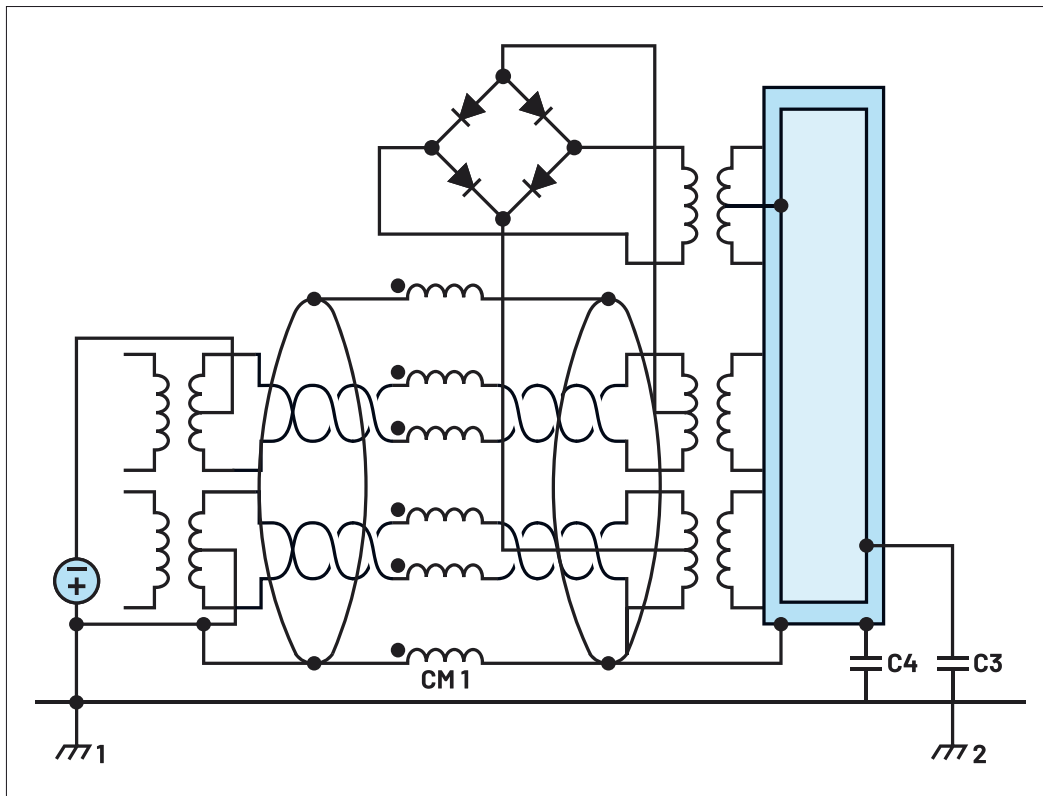
zenströme, sondern sorgt vielmehr dafür, dass die Hüllkurve der Wellenform schneller abfällt. Die günstigere L/R-Zeitkonstante nämlich dissipiert die Stoßenergie schneller in Form der in diesem verteilten Widerstand entstehenden Wärme.

### Stoßstrom

Der sich dabei ergebende Stoßstrom I (L2) kann aus Bild 9 entnommen werden. Wie man sieht, kann in der ungeschützten Schleife selbst bei einem 1,6 km entfernten Blitzschlag ein Stoßstrom von 1,6 A<sub>p,p</sub>



**Bild 9:** Stoßströme aus der exemplarischen Simulationsschaltung in Bild 8



**Bild 10:** Die Gleichakttdrossel CH1 stellt differenziellen Strömen eine geringe, Gleichaktströmen dagegen eine höhere Impedanz entgegen.

entstehen. Es ist leicht vorstellbar, um wieviel höher der Strom bei einem Blitzschlag in geringerer Entfernung wäre, und bereits der geringere Strom reicht aus, um Schäden anzurichten.

Jetzt zu dem Stoßstrom in einer geschützten Ethernet-Schleife, wie sie rechts in Bild 8 zu sehen ist (innere Schleife). Dieser Strom lässt sich weiter verringern, wenn man die Impedanz der Abschirmschleife reduziert (durch Erhöhen von C3 und C4) und eine gute magnetische Kopplung mit der Ethernet-Schleife gewahrt wird.

## Isolation

Als weitere Möglichkeit zum Eliminieren des Stoßstroms kann man eines oder beide Enden des Kabels isolieren. Um eine Anwendung auf diese Weise zu isolieren, ist im Idealfall eine bei allen Frequenzen wirksame Leitungsunterbrechung erforderlich. Diese wird meist mit einem Isolationsübertrager realisiert, was in einer Ethernet-Anwendung die Datenübertragung und die Stromversorgung umfasst (PoE). Tatsächlich eignen sich Übertrager hervorragend als Gleichstromsperre, während ihre Kapa-

zität zwischen Primär- und Sekundärseite für hohe Frequenzen kein Hindernis darstellt, sodass hochfrequente Stoßströme durchgelassen werden. Gäbe es aber Übertrager mit vernachlässigbar geringer Kapazität, hätte man es von vornherein mit keinen Stoßströmen zu tun, sodass dies nicht die Lösung sein kann. Dennoch trifft es zu, dass ein Absenken der Isolationskapazität die blitzschlagbedingten Stoßströme reduziert. Die hier vorgeschlagene Lösung allerdings ergibt bei hohen Frequenzen ein besser isoliertes System, obwohl die Kapazität der Isolationsbarriere größer ist. Weshalb aber spielt die Kapazität überhaupt eine Rolle, wenn sie doch nicht mit steilen Spannungsfanken ( $dv/dt$ ) konfrontiert wird?

## Was ist der Haken an der Sache?

Der Haken liegt darin, dass wir niemals eine perfekte Abschirmung um unsere Schaltungen bauen können und auch nicht in der Lage sind, mit unserer Kurzschlusswindung das Magnetfeld gänzlich zu eliminieren oder einen kapazitätsfreien Übertrager herzustellen. Was kann man also tun? Zum Verbessern der

Lösung müssen möglicherweise Schutzbausteine zum Ableiten der verbleibenden Stoßströme hinzugefügt werden. Dass die Ströme in der Kurzschlusswindung recht hoch sind, ist das geringste Problem, da diese nur aus Kupfer und Kondensatoren besteht. Eine letzte mögliche Verbesserung wäre es, die gesamte Ethernet-Verbindung wie in Bild 10 gezeigt mit einer Gleichakttdrossel zu versehen.

## Gleichakttdrossel

Auch ohne Kurzschlusswindung wirkt sich die Gleichakttdrossel günstig aus. Sie stellt eine Leitungsunterbrechung für hochfrequente Ströme dar und ergänzt damit die Sperrwirkung des Übertragers für Gleichströme und niederfrequente Ströme. Zusammen mit der Kurzschlusswindung aber liefert die Gleichakttdrossel beeindruckende Ergebnisse, denn sie minimiert das Verhältnis zwischen C3 und C4 weiter, indem sie eine Sperre für Ströme in der Masse-schleife darstellt.

## Zusammenfassung

Jede Anwendung, in der lange Kabelzüge vorkommen, kann anfällig

für blitzschlagbedingte Schäden sein. Ursächlich für diese Schäden können die Spannungsabfälle sein, die in der Masseimpedanz durch die mit dem Blitzschlag einhergehenden hohen Ströme (Masseschleifen) entstehen, oder aber die nach dem Faradayschen Induktionsgesetz entstehenden Spannungen (magnetische Kopplung). In bestimmten Anwendungen lässt sich dieses Problem durch den Einsatz von Bauteilen, die die schädlichen Ströme ableiten sollen, nicht beheben. In solchen Fällen kann eine niederimpedante Kurzschlusswindung, die in unmittelbarer Nähe des Ethernet-Kabels und der entsprechenden Schaltungen, d. h. mit guter Kopplung, platziert wird, eine deutliche Senkung der Stoßströme bewirken. Da diese Methode ausschließlich auf Kupfer und Kondensatoren basiert, stellen die in der Kurzschlusswindung möglicherweise auftretenden hohen Ströme kein Problem dar. Mit einer zusätzlichen Gleichakttdrossel am Ethernet-Kabel lassen sich die Stoßströme außerdem auf unkritische Werte reduzieren.

## Literatur

1. Alan Rich: „Shielding and Guarding How to Exclude Interference-Type Noise What to Do and Why to Do It - A Rational Approach.“ Analog Devices, Inc., 1983.
2. Niemann, Karl-Heinz: „Engineering Guideline Ethernet-APL,“ Version 1.14 19. September, 2022.
3. Feynman, Richard P., Robert B. Leighton und Matthew Sands: The Feynman Lectures on Physics, Vol. II: The New Millennium Edition: Mainly Electromagnetism and Matter. Basic Books, 2011.
4. Morrison, Ralph: Grounding and Shielding Techniques, Fourth Edition. John Wiley & Sons Publications, 1998.

## Über den Autor

James Niemann kam im März 2020 zu Analog Devices und ist zurzeit als Field Applications Engineer in Cleveland (Ohio/USA) tätig. Niemann, der Inhaber von 14 Patenten ist, verfügt über insgesamt 35 Jahre Erfahrung als Designer von Prüf- und Messsystemen sowie als FAE bei ADI. ◀