

Rauschquellen von GHz bis nHz verstehen und kontrollieren



Ein EMV-Prüflabor

EMV in der Medizintechnik stellt sicher, dass medizinische Geräte störungsfrei arbeiten und andere Geräte nicht beeinträchtigen, gemäß der Norm IEC 60601-1-2. EMV ist somit ein Sicherheitsfaktor.

Grundlagen der EMV

Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) beschreibt die Fähigkeit eines Geräts, in einer elektromagnetischen Umgebung korrekt zu funktionieren, ohne andere Geräte zu stören (Störaussendung) oder selbst durch Störungen beeinträchtigt zu werden (Störfestigkeit). In der Medizintechnik ist dies besonders kritisch, da Fehlfunktionen lebensbedrohlich sein können, z. B. wenn ein Monitor oder ein Beatmungsgerät durch Handy-Strahlung gestört wird.

Normen und Anforderungen

Die zentrale Norm für EMV in der Medizintechnik ist IEC 60601-1-2, aktuell in der Edition 4.1 (DIN EN 60601-1-2:2016 + AMD 1). Sie gilt für medizinisch-elektrische Geräte (ME-Geräte) und Systeme, insbesondere für Anwendungsteile, die mit Patienten in Kontakt kommen. Auch elektrische Geräte in medizinischen Umgebungen, die keine Medizinprodukte sind, sollten die Norm erfüllen, um Störungen anderer Geräte zu vermeiden. Für Laborgeräte wie IVD-Produkte gilt hingegen die Norm IEC 61326-2-6.

Herausforderungen

Herausforderungen im Bereich der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) gehen selten auf eine einzelne fehlerhafte Komponente oder einen isolierten Konstruktionsfehler zurück. Vielmehr entstehen sie aus dem komplexen Zusammenspiel elektronischer Systeme über das gesamte Frequenzspektrum hinweg. Von HF-Emissionen im Gigahertz-Bereich bis hin zu Drift im Nanohertz-Bereich und Umgebungsstörungen – jedes Frequenzband bringt einzigartige Kopplungsmechanismen, Störquellen und Ausfallmodi mit sich.

Das Verständnis, wie die Frequenz das elektromagnetische Verhalten bestimmt, ist für den Aufbau zuverlässiger, konformer und robuster elektronischer Systeme unerlässlich. Hochfrequentes Rauschen kann zu Fehlern bei der abgestrahlten Emission führen, während niederfrequente Störungen die Messgenauigkeit oder die langfristige Systemstabilität unbemerkt beeinträchtigen können.

Dieser Leitfaden untersucht, wie die Frequenz das EMV-Verhalten grundlegend steuert, beleuchtet reale Störquellen vom GHz- bis hin zum Nanohertz-Bereich und skizziert praktische Strategien zur Störungsminde-

runge, die Ingenieure anwenden können, um Emissionskonformität, Störfestigkeit und langfristige Zuverlässigkeit sicherzustellen.

Warum die Frequenz das EMV-Verhalten steuert, zeigt das Bild Frequenzspektrumdiagramm.

Praktische Bedeutung der EMV für reale elektronische Systeme

Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) bezeichnet die Fähigkeit eines Systems, in seiner elektromagnetischen Umgebung korrekt zu funktionieren, ohne andere Geräte in unzumutbarer Weise zu stören. In der Praxis bedeutet dies, dass gesetzliche Emissionsgrenzwerte eingehalten, die Störfestigkeit gegenüber externem Rauschen gewahrt und ein stabiler Betrieb unter realen Bedingungen gewährleistet werden müssen.

Jedes elektronische Produkt erzeugt elektromagnetische Energie und reagiert darauf. Ob diese Energie zu Problemen führt, hängt weitgehend von der Frequenz ab. Dieselbe Spannungsstörung kann bei einer Frequenz harmlos sein, bei einer anderen jedoch katastrophale Folgen haben. Beim EMV-Design geht es daher im Wesentlichen darum, zu verstehen und zu steuern, wie sich Signale über die Frequenz hinweg ausbreiten, koppeln, abstrahlen und stören.

Warum Störungsprobleme grundsätzlich frequenzabhängig sind

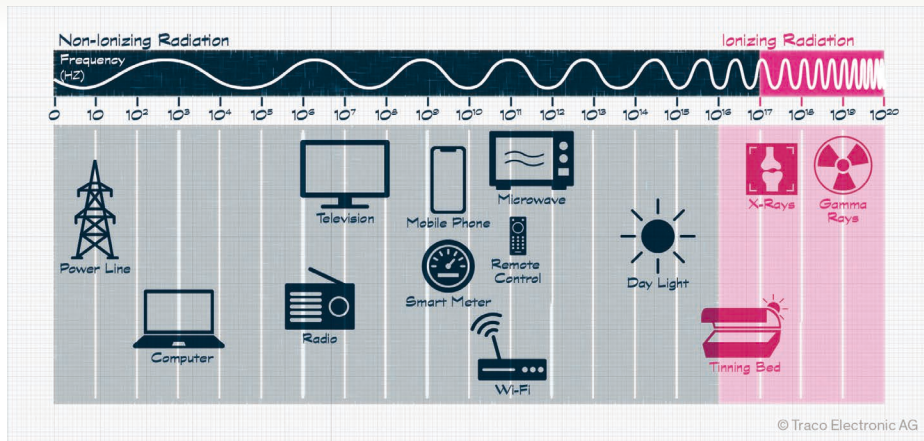
Die Frequenz bestimmt, wie sich Energie durch Leiter, Dielektrika und den freien Raum bewegt. Bei niedrigen Frequenzen folgen Ströme vorhersehbaren Pfaden, und die Kopplung wird von magnetischen und ohmschen Effekten dominiert. Mit steigender Frequenz bestimmen parasitäre Kapazitäten, Induktivitäten, Abstrahlung und Wellenausbreitung das Systemverhalten.

Hochfrequenzsignale nutzen unbeabsichtigte Kopplungswege wie Leiterbahnkapazität, Kabelinduktivität und Gehäuseöffnungen aus. Bei sehr niedrigen Frequenzen verfälschen langsame thermische und elektrische Drift unbemerkt Präzisionsmessungen. In beiden Fällen sind die Ausfallmechanismen direkt auf frequenzabhängige physikalische Phänomene zurückzuführen.

Wellenlänge, Hauttiefe und Kopplungseffizienz

Die Wellenlänge nimmt mit steigender Frequenz ab. Bei niedrigen Frequenzen können Wellenlängen kilometerlang sein, wodurch Leiterplattelemente elektrisch klein erscheinen. Bei hohen Frequenzen schrumpfen die Wellenlängen auf Zentimeter oder Millimeter, wodurch Leiterbahnen, Kabel und Steckverbinder sich wie Resonanzantennen verhalten.

Traco Electronic AG
www.tracopower.com



Frequenzspektrumdiagramm

Auch die Hauttiefe nimmt mit steigender Frequenz ab, wodurch Ströme gezwungen werden, näher an den Leiteroberflächen zu fließen. Dies erhöht den Widerstand, verändert die Impedanz und verstärkt die EMI-Kopplung durch Oberflächenströme.

Der Zusammenhang zwischen Emissionen, Störfestigkeit und Zuverlässigkeit

Emissionen und Störfestigkeit sind zwei Seiten derselben elektromagnetischen Medaille. Schaltungen, die stark abstrahlen, sind in der Regel sehr anfällig, während eine robuste Störunterdrückung oft auch die Störfestigkeit verbessert.

Im Laufe der Zeit können unkontrollierte Störungen die Zuverlässigkeit des Systems beeinträchtigen, indem sie Komponenten belasten, Daten verfälschen, Alterungsprozesse beschleunigen und zeitweise auftretende Fehler verursachen, die bekanntermaßen schwer zu diagnostizieren sind.

Hoch- bis Mittelfrequenzrauschen (GHz bis kHz): Digitale, HF- und Schaltstörungen

HF-Sender und Funkmodule

Absichtliche HF-Quellen wie WLAN, Bluetooth, Mobilfunk und Radarmodule erzeugen starke Emissionen im MHz- bis GHz-Bereich. Während diese Systeme sorgfältig auf eine effiziente Abstrahlung ausgelegt sind, müssen die umgebenden Schaltungen gegenüber hohen Feldstärken immun bleiben.

Eine schlechte Erdung, unzureichende Abschirmung oder unsachgemäße Isolierung kann dazu führen, dass HF-Energie in empfindliche analoge, digitale oder Stromversorgungsschaltungen eingekoppelt wird, was zu Datenverfälschungen, Jitter oder Latch-up-Ereignissen führt.

Schnelle digitale Flanken und Oberwellenbildung

Moderne Mikrocontroller, Prozessoren und FPGAs erzeugen extrem schnelle Flankenraten.

Eine Anstiegszeit von 1 ns enthält erhebliche Energie bis weit in den GHz-Bereich hinein, selbst wenn die Taktfrequenz nur bei einigen zehn Megahertz liegt.

Diese Oberwellen breiten sich entlang von Leiterbahnstrecken, Stromversorgungsflächen und Kabeln aus und verwandeln diese in unbeabsichtigte Antennen. Schlecht terminierte Leiterbahnen reflektieren Energie und erzeugen stehende Wellen, die Emissionen verstärken und die Signalintegrität beeinträchtigen.

Schaltnetzteile und DC/DC-Wandler

Schaltnetzteile und DC/DC-Wandler gehören zu den aggressivsten Störquellen in elektronischen Systemen. Ihre hohen di/dt-Schaltflanken erzeugen Breitbandrauschen, das sich von kHz bis in den Bereich von Hunderten von MHz erstreckt. Ohne sorgfältiges Layout, Filterung und Abschirmung koppeln Schalttransienten in Signalwege ein, regen Kabelresonanzen an und strahlen aus Gehäusen ab. Stromverteilungsnetze (PDNs) können bei bestimmten Frequenzen in Resonanz treten, wodurch Welligkeit verstärkt und Ground Bounce induziert wird.

Leiterbahnen, Kabel und Gehäuse als Antennen

Mit steigender Frequenz wird jede leitfähige Struktur zu einer Antenne. Leiterbahnstrecken verhalten sich wie Übertragungsleitungen, Kabel strahlen stark ab und Gehäusefugen lassen elektromagnetische Energie entweichen.

Selbst kurze Verbindungen können zu effizienten Strahlern werden, wenn ihre elektrische Länge sich einer Viertelwellenlänge nähert. Unsachgemäße Verlegung, unzureichende Rückwege und Unterbrechungen verschlechtern die Abstrahlung und die Störanfälligkeit erheblich.

Typische EMV-Fehler im Hochfrequenzbereich

Zu den häufigen Fehlermechanismen in diesem Frequenzbereich gehören:

- Abgestrahlte Emissionen, die die gesetzlichen Grenzwerte überschreiten

- Signalreflexionen, die zum Zusammenbruch des Augendiagramms führen
- Übersprechen zwischen benachbarten Leiterbahnen

Diese Probleme treten häufig bei Konformitätsprüfungen auf und können umfangreiche Neukonstruktionen erfordern, wenn EMV-Aspekte nicht frühzeitig berücksichtigt wurden.

Kerntechniken zur Störungsbekämpfung

Eine wirksame Minderung bei hohen und mittleren Frequenzen beruht auf mehrschichtigen Kontrollstrategien:

- **Impedanzkontrolliertes Routing:** Gewährleistet ein vorhersehbares Signalverhalten und minimiert Reflexionen.
- **Kurze Rückwege:** Reduzieren Schleifenflächen und begrenzen die Abstrahlung.
- **Via-Stitching und durchgehende Referenzflächen:** Bieten durchgehende Abschirmung und einen niederohmigen Stromrückweg.
- **Entkopplungsnetzwerke:** Lokale Bypass-Kondensatoren unterdrücken transiente Ströme, bevor sie sich ausbreiten.

Niederfrequente Störungen (kHz bis Hz): Strom- und Umgebungskopplung

Netzbrummen und harmonische Verzerrung

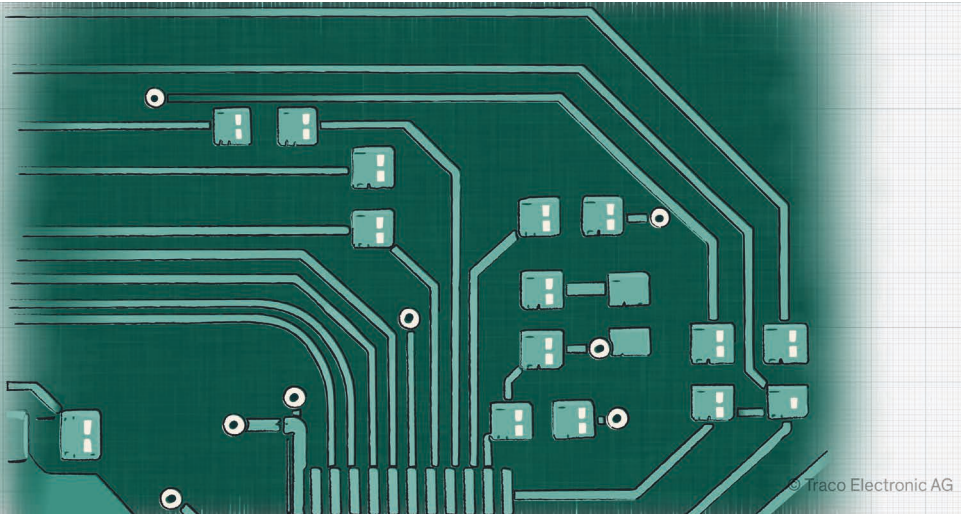
Netzstörungen bei 50 oder 60 Hz und deren Oberschwingungen gehören zu den hartnäckigsten EMV-Herausforderungen. Magnetische Kopplung von Transformatoren und Stromleitungen induziert Brummgeräusche in nahegelegenen analogen Schaltungen, Audio-Pfaden und Sensor-Schnittstellen.

Das Schalten von Gleichrichtern und nicht-lineare Lasten speisen Oberschwingungen ein, die bis in den Kilohertzbereich reichen, empfindliche Systeme stören und die Messgenauigkeit beeinträchtigen.

Erdschleifen und unbeabsichtigte Strompfade

Bei niedrigen Frequenzen wird eine unsachgemäße Erdung oft zum dominierenden Störmechanismus. Erdschleifen entstehen, wenn mehrere Rückleitungspfade zirkulierende Ströme ermöglichen, die durch kleine Spannungsunterschiede zwischen Erdungspunkten angetrieben werden.

Diese Schleifen führen zu Störspannungen in empfindlichen Schaltungen, insbesondere in Mess- und Instrumentierungssystemen, in denen eine Auflösung im Mikrovoltbereich erforderlich ist.



Geomagnetische Schwankungen und Umgebungsbelastungen

Extrem empfindliche Systeme, darunter geophysikalische Instrumente und wissenschaftliche Sensoren, können auf Schwankungen des Erdmagnetfelds und mechanische Vibrationen reagieren. Diese Effekte im Ultra-Niederfrequenzbereich erfordern fortschrittliche Schutzstrategien, die über herkömmliche EMV-Ansätze hinausgehen.

Abhilfemaßnahmen für extrem niedrige Frequenzen

Zu den wichtigsten Stabilisierungsstrategien gehören:

- **Chopper-stabilisierte Verstärker:** Unterdrückung von Flicker-Rauschen durch Modulationstechniken.
- **Wärmemanagement:** Gehäuse, Wärmeableitung und Isolierung reduzieren temperaturbedingte Drift.
- **Präzisionsspannungsreferenzen:** Minimieren langfristige Ausgangsschwankungen.
- **Magnetische Abschirmung:** Reduziert die Anfälligkeit gegenüber externen Magnetfeldern.
- **Algorithmen zur automatischen Kalibrierung:** Kompensieren langsame Systemdrift während des Betriebs.

Fazit: EMV-konformes Design über das gesamte Frequenzspektrum

EMV-Herausforderungen erstrecken sich über mehr als zwölf Größenordnungen an Frequenzen, von Gigahertz-HF-Emissionen bis hin zu Driften im Nanohertz-Bereich. Jeder Bereich weist spezifische physikalische Verhaltensweisen, Koppelpfade und Ausfallmechanismen auf, die maßgeschneiderte Designstrategien erfordern.

Frequenzbewusstes EMV-Design ist nicht mehr optional. Da moderne Elektronik immer höhere Geschwindigkeiten, stärkere Integration, niedrigere Spannungen und dichtere Bauformen anstrebt, reagieren Systeme zunehmend empfindlich auf elektromagnetische Wechselwirkungen.

Eine frühzeitige EMV-Planung reduziert Redesign-Zyklen, Zertifizierungsrisiken und langfristige Zuverlässigkeitsausfälle erheblich. Indem sie das elektromagnetische Verhalten bereits während der Architekturentwicklung berücksichtigen, können Ingenieure kostspielige Compliance-Überraschungen in späten Phasen und Zuverlässigkeitsprobleme im Feld vermeiden.

Mit jahrzehntelanger Erfahrung in der Leistungselektronik bietet Traco Power präzise entwickelte Stromversorgungslösungen, die eine robuste EMV-Leistung unterstützen und einen stabilen Betrieb, die Einhaltung gesetzlicher Vorschriften sowie eine zuverlässige Langzeitfunktionalität in kritischen Industrie-, Medizin- und Kommunikationsanwendungen gewährleisten. ◀

Leiterplattenlayout

Magnetische Streufelder und induktive Kopplung bei Transformatoren

Transformatoren erzeugen Streumagnetfelder, die leicht in benachbarte Leitungen einkoppeln. Niederfrequente magnetische Kopplung ist schwer abzuschirmen und erfordert oft eine sorgfältige physikalische Trennung, Ausrichtungskontrolle und durchdachte Anordnung.

Induktive Störaufnahmen in Sensorschleifen, Audioleitungen und langen Kabeln verursachen häufig Brummen und Basislinienabweichungen.

Auswirkungen auf Präzisionssysteme

Niederfrequente Störungen beeinträchtigen die Leistung in Anwendungen wie:

- Medizinische Geräte
- Präzise Datenerfassung
- Industrielle Sensorik und Steuerung
- Audio- und Akustikgeräte

Selbst geringe Rauschpegel können echte Signale überdecken, die Genauigkeit beeinträchtigen und Regelkreise destabilisieren.

Praktische Strategien zur Unterdrückung

Zu den wichtigsten Techniken zur Unterdrückung von Niederfrequenzstörungen gehören:

- **Stern-Erdung:** Verhindert Zirkulationsströme durch die Verwendung von Einpunkt-Rückleitungspfaden.
- **Differenzielle Signalübertragung:** Unterdrückt Gleichtaktstörungen und Masseversätze.
- **Verdrillte Doppeladern:** Reduziert magnetische Induktionsstörungen durch die Aufhebung induzierter Felder.

Sehr niedrige und extrem niedrige Frequenzen (Sub-Hz bis nHz): Drift und Langzeitinstabilität

Flicker-Rauschen (1/f) in Halbleiterbauelementen

Bei extrem niedrigen Frequenzen dominiert Flicker-Rauschen das Verhalten von Halbleitern. Dieser Rauschmechanismus verursacht langsame, zufällige Schwankungen der Transistorparameter und führt zu Drift in Verstärkern, Spannungsreferenzen und Präzisions-ADC-Systemen.

In Anwendungen, die eine Genauigkeit im Mikrovoltbereich oder lange Integrationszeiten erfordern, wird das 1/f-Rauschen zum primären begrenzenden Faktor.

Temperaturdrift und Alterung von Bauteilen

Temperaturschwankungen und Materialalterung führen zu allmählichen Veränderungen der elektrischen Eigenschaften. Widerstandswerte driften, Referenzspannungen wandern, und mechanische Belastungen verändern das Schaltungsverhalten.

Über Monate oder Jahre hinweg können diese Effekte zu Kalibrierungsfehlern, Messabweichungen und einer Verschlechterung der Leistung führen.

Rauschen und Referenzdrift aufgrund der Batteriechemie

Batteriebetriebene Systeme unterliegen langsame Spannungsschwankungen, die durch chemische Reaktionen, die Lastgeschichte und Temperaturänderungen verursacht werden. Präzisionsanalogsysteme haben oft Schwierigkeiten, ohne geregelte und gefilterte Referenzspannungen einen stabilen Betrieb aufrechtzuerhalten.