

Teil 2

EMV – Was ist das?

Norbert Ludwig, Springe

zum Autor

Norbert Ludwig,
Leiter des
Elektro-, Meß-
und Regel-
laboratoriums
in der Nord-
deutschen
Kälte-Fach-
schule, Springe



Während der erste Teil dieses Artikels den Leser für die Problematik der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) sensibilisieren und die Materie erläutern sollte, wird im zweiten Teil das Thema anhand von Erläuterungen spezieller Bauteile, ihrer Funktion und praktischer Beispiele mit Problemen und Lösungen noch einmal aufge-
rollt.

Es sei daran erinnert, daß die Probleme elektromagnetischer Unverträglichkeit auf der Erzeugung, Ab- und Einstrahlung **hoher Frequenzen** beruhen. Dazu müssen wir zunächst noch einmal die Theorie bemühen. Wodurch entstehen in elektrischen und elektronischen Schaltungen solche Störspektren?

1) Sie werden, weil benötigt, bewußt erzeugt:

- Durch **Oszillatoren** (Schwingungserzeuger; erzeugen z. B. Taktfrequenzen für Mikrocomputer oder Meßsignale)

2) Sie entstehen automatisch bei nicht-sinusförmigen Strom- und Spannungsverläufen:

- Durch empirisches (z. B. Schütz) oder periodisches (z. B. Phasenanschnittsteuerung) **Schalten** von Spannungen und Strömen (verursacht durch Be- und Entlastung eine Abweichung von der Sinusform bei Strömen und Spannungen)

- Durch **Nichtlinearitäten** von Strom-Spannungs-Kennlinien der verwendeten Bauteile (z. B. Transformatoren und Spulen im Überlastbereich)

sinusförmigen Teilschwingungen wie in Abb. 2 gezeigt:

- Grundschiwingung (1. Harmonische) mit $A = 1$ und $f = 50$ Hz (100 % Amplitude und Grundfrequenz)

- 2. Oberwelle (3. Harmonische) mit $A = \frac{1}{3}$ und $f = 150$ Hz (33 % Amplitude und dreifacher Grundfrequenz)

- 4. Oberwelle (5. Harmonische) mit $A = \frac{1}{5}$ und $f = 250$ Hz (20 % Amplitude und fünffacher Grundfrequenz)

u.s.w.

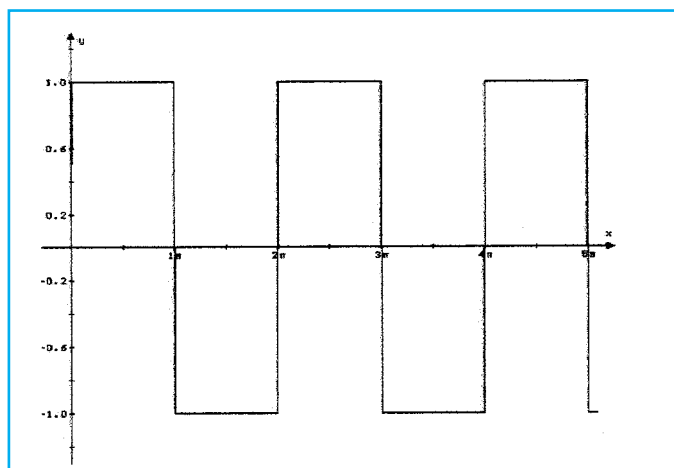


Abb. 1 Rechteckschwingung

Ein wenig Fourier – ganz einfach

Während Punkt (1) sofort verständlich ist, können wir zur Erklärung von (2) die Fourier-Analyse heranziehen. Dieser Mathematiker hat erkannt, daß sich nicht-sinusförmige in sinusförmige Signale mit unterschiedlichen Amplituden und Frequenzen zerlegen (Analyse) oder auch umgekehrt wieder zusammensetzen lassen (Synthese). Da diese relativ komplizierte Mathematik den Praktiker nur wenig interessiert, möge hier die vielbenötigte Rechteckschwingung als praktisches Beispiel dienen. Der Verlauf einer solchen Schwingung ist in Abb. 1 dargestellt. Sie setzt sich nach Fourier zusammen aus

Man sieht zweierlei: Es treten alle ungeradzahigen Harmonischen bis in das Unendliche, also auch höchste Frequenzanteile auf, deren Amplitude und somit Energie allerdings mit steigender Frequenz abnimmt. Die Synthese aus 1. bis 5. Harmonischer ist in Abb. 2, die aus 1. bis 21. Harmonischer in Abb. 3 und die aus 1. bis 99. Harmonischer in Abb. 4 dargestellt (die Kurven sind theoretisch berechnet). Bereits in Abb. 2 sieht man, wie die Summe weniger Harmonischer die Rechteckform annähert.

Abb. 2 Fourier-Synthese einer Rechteckschwingung aus 1., 3. und 5. Harmonischer

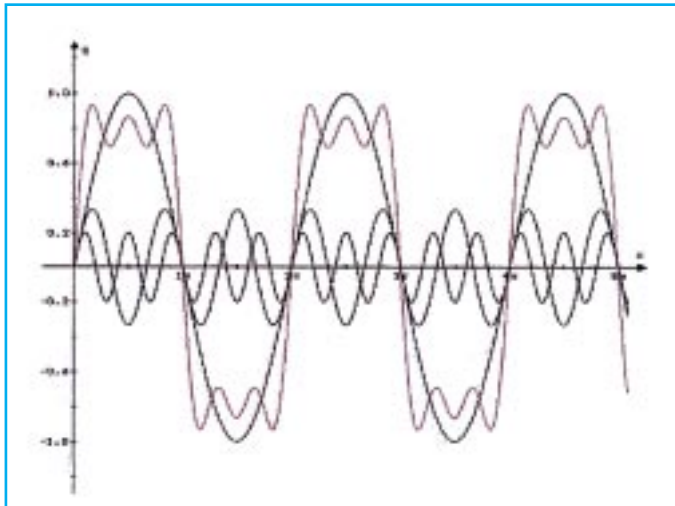


Abb. 3 Fourier-Synthese einer Rechteckschwingung aus 1. bis 21. Harmonischer

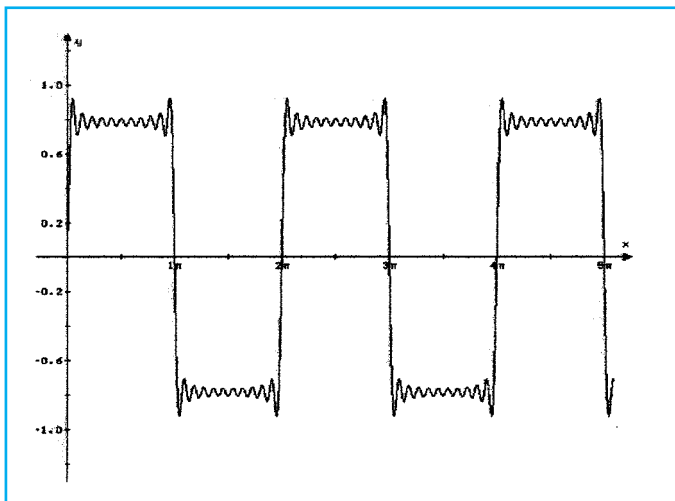
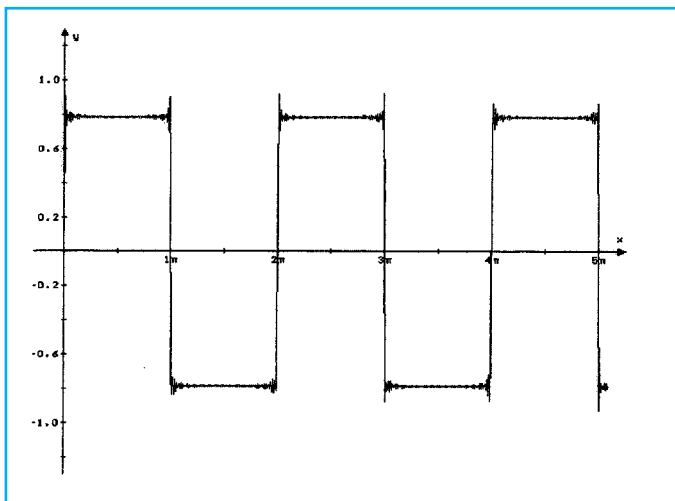


Abb. 4 Fourier-Synthese einer Rechteckschwingung aus 1. bis 99. Harmonischer



Wie leicht zu erkennen ist, werden die Flanken der Rechteckschwingung um so steiler, je höherfrequente Harmonische dazukommen; der Umkehrschluß zeigt also, daß **steile Flanken**, wie sie beispielsweise beim Schalten von Spannungen und Strömen erzeugt werden, **hohe Frequen-**

zen und somit viel Störpotential beinhalten! Und genau hier müssen Entstörmaßnahmen ansetzen.

Passive und aktive Entstörung

Grundsätzlich kann passiv entstört werden. Als passive Bauelemente kommen dafür Widerstände, Kondensatoren und Spulen (Drosseln) in Betracht. Die sinnvolle Kombination dieser Bauteile, die auch als Filter komplett lieferbar sind, hat zwei Ziele:

- **Vernichtung** der hochfrequenten Energie (Umsetzen in Wärme) mit Widerständen
- **Abblocken** der Störungen durch Ableiten nach Masse (Kondensatoren) oder **Sperren** von Leitungen für Hochfrequenz (Drosseln)

Dabei macht man sich in jedem Fall die Frequenzabhängigkeit der Blindwiderstände von Kondensator und Spule zu nutze. Für die idealen Bauteile gilt

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$$

und

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$$

Der Widerstand der Spule steigt also mit der Frequenz an, während der des Kondensators abnimmt (Abb. 5). Im Idealfall stellen also Spulen für hohe Frequenzen Unterbrechungen dar, während Kondensatoren für sie wie Kurzschlüsse wirken. Allerdings gilt das nur für ideale Bauteile, und die gibt es bekanntlich nicht. Daher müssen Spulen und Kondensatoren zur Entstörung sorgfältig ausgewählt werden. Die Industrie liefert hier geeignete Komponenten, auf die zurückgegriffen werden kann. Was ist zu beachten?

Widerstände:

- Induktionsarme Widerstände (keine gewendelten wegen der hohen Eigeninduktivität) verwenden, s. Kondensatoren
- Wert und Belastbarkeit beachten
- Einsatzbereich beachten, s. Kondensatoren
- Ausführungsform und Montage beachten (Kohlewiderstände sind impulsfest, erzeugen aber bei Überlastung offene Glut!)

Kondensatoren:

- Induktionsarme „stirnkontaktierte“ Kondensatoren der Größenordnung 10 nF bis 1 µF verwenden (gewickelte Kondensatoren haben eine hohe Induktivität, die den Effekt des geringen Widerstandes für HF zunichte macht!)

- Spannungsfestigkeit und Einsatzbereiche (Temperatur, Klima, Impulsfestigkeit usw.) beachten

Spulen:

- Hochfrequenztaugliche Spulen verwenden (Luftspulen oder solche mit Ferritkernen)
- Drosseln entstehen auch durch Aufziehen von Ferritperlen auf Drähte oder mit-

- Schirmungen gegen Magnetfelder aus Mumetall (Werkstoff mit hoher Permeabilitätszahl)

Aktive Entstörung:

- Neuerdings werden elektronische Schaltungen wie Schaltnetzteile oder Phasenanschnittsteuerungen auch durch zusätzliche aufwendige Maßnahmen so gestaltet, daß ihre Stromaufnahme von vorn-

herein sinusförmig erfolgt. Damit werden rückwärts in das Netz wirkende Störungen genauso vermieden wie unnötige Blindleistungsaufnahme („power factor controlling“). Hier gibt es in der Regel seitens des Anwenders nichts zu verbessern.

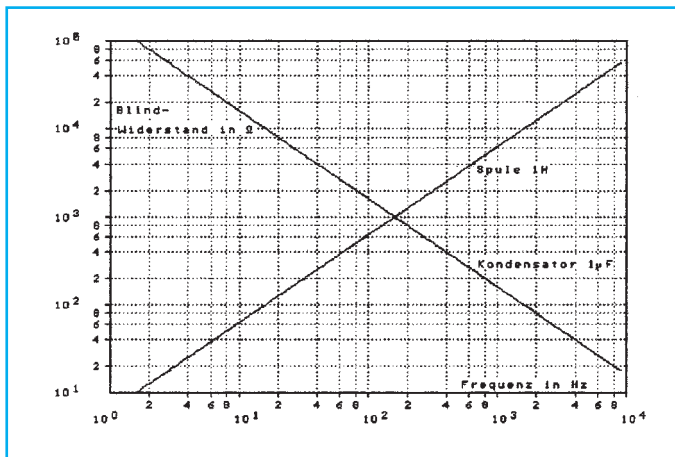
Wirkung von Filtern

Ob zur Entstörung nun einzelne oder Kombinationen aus mehreren Bauteilen verwendet werden, entstehen doch stets Filter. Sie sind frequenzselektiv, d. h. sie behandeln verschiedene Frequenzen unterschiedlich. Hier differenzieren wir vier Möglichkeiten (Abb. 6):

- Tiefpaß: Läßt niedrige Frequenzen durch
- Hochpaß: Dito für hohe Frequenzen
- Bandpaß: Läßt einen Frequenzbereich (Band) durch
- Bandsperre: Läßt einen Frequenzbereich nicht durch

Die Sperrtiefe für unerwünschte Frequenzen wird dabei in Dezibel (dB) angegeben. 0 dB bedeutet dabei ein ungeschwächt durchgelassenes Signal, -20 dB zeigt, daß

Abb. 5 Blindwiderstand von Spule und Kondensator in Abhängigkeit von der Frequenz



tels Durchführung von Leitungen durch Ferritkerne

- Die Industrie gibt für Ferritkerne den Induktivitätsfaktor A_L an. Durch die einfache Formel

$$N = \sqrt{\frac{L}{A_L}}$$

kann die erforderliche Windungszahl leicht errechnet werden. Es lohnt sich häufig, eine Spule mit wenigen Windungen selbst anzufertigen!

- Strombelastbarkeit des Drahtes und Einsatzbereich beachten

Filter:

- Werden für den spezifischen Anwendungsfall, falls verfügbar, ausgewählt, z. B. als Netzfilter
- Einsatzbereich, Strom- und Spannungsbelastbarkeit beachten

Abschirmungen:

- Gegen HF- und elektrostatische Felder z. B. Aluminium- oder Kupferfolien (auch selbstklebend lieferbar)
- HF-dichte Gehäuse aus Weißblech (leicht wechlötbar) anfertigen

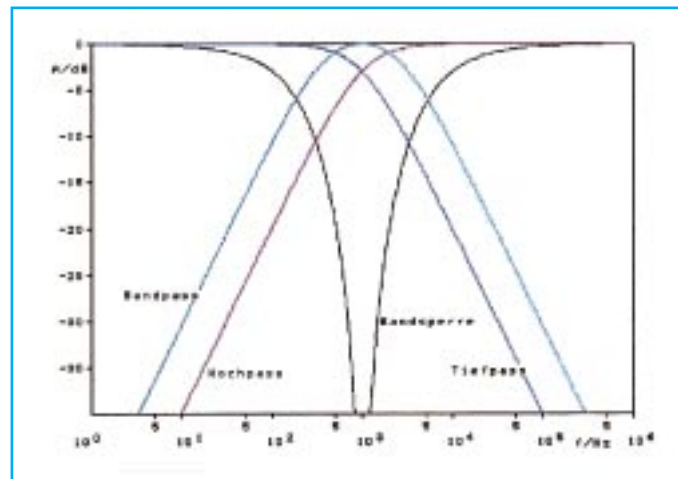


Abb. 6 Durchlaßkurven von Filtern

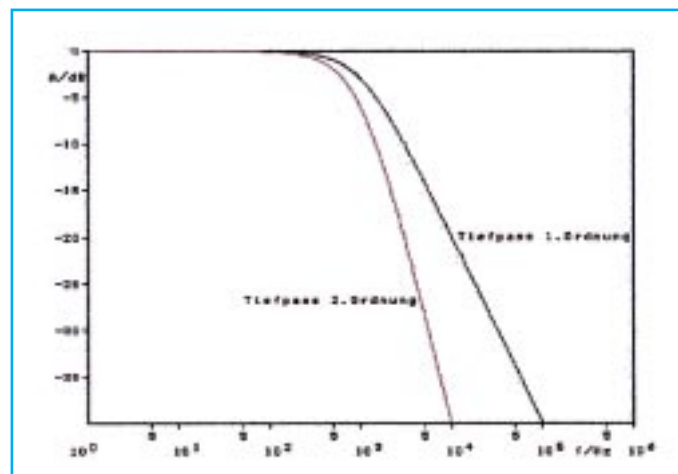


Abb. 7 Durchlaßkurven von Tiefpaßfiltern verschiedener Ordnung

$\frac{1}{10}$ des Signals durchkommt, -40 dB entspricht $\frac{1}{100}$ usw. Bei -3 dB wird bei Filtern 1. Ordnung (s. u.) die Grenzfrequenz f_G zwischen Durchlaß- und Sperrbereich angegeben, was einer Schwächung des Signals um ca. 29 % entspricht. Die Filterordnungszahl gibt bei passiven Filtern die Anzahl der verwendeten Energiespeicher (Spulen und Kondensatoren) an. Grundsätzlich gilt dabei: Je höher die Ordnung, desto steiler der Übergang vom Durchlaß zum Sperrbereich (Abb. 7), wobei die Skalierung der Frequenzachse für diese Beispiele willkürlich gewählt wurde (Grenz-

Beispiele für Störungen und ihre Beseitigung

1) Die Zahlen einer digitalen Temperaturanzeige sprangen so, daß genaues Ablesen unmöglich war.

Ursache: Die abgeschirmte Leitung zum Widerstandsfühler nimmt im Schaltschrank neben Energieleitungen Störungen auf.

Abhilfe: Da ein Umlegen der Leitung keinen Erfolg brachte, half ein einfaches Tiefpaßfilter am Eingang der Auswertelektronik. Es wurde gebildet aus dem Wi-

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot f_G} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 1,8 \text{ k}\Omega \cdot 20 \text{ Hz}} = 4,4 \mu\text{F}$$

Ein Exemplar mit 4,7 μF war lieferbar und beseitigte das Problem dauerhaft (Abb. 8).

2) Das gleiche Problem mit einem elektronischen Drucktransmitter, dessen Leitung hochfrequente Störungen einer Phasenanschnittsteuerung empfing.

Ursache: Leitungslänge.

Abhilfe: Da die eingestrahelten Frequenzen sehr hoch waren, genügte es hier völlig, den Leiter unmittelbar am Eingang der Elektronik einige Male um einen Ferritkern zu wickeln. Das Strom-Einheitssignal des Gebers wurde so nicht beeinträchtigt (Abb. 9).

3) Ein Kühlstellenregler „stürzte ab“, wenn andere Verbraucher ein- oder ausschalteten.

Ursache: Netzspannungsspitzen („Flicker“ oder Transienten).

Abhilfe: Einbau eines handelsüblichen Netzfilters unmittelbar vor dem Netzeingang der Elektronik (Abb. 10).

4) Die Computersteuerung einer Verbundanlage setzte wegen Spannungsspitzen in Verbindung mit größeren Netzspannungsschwankungen aus.

Ursache: Instabiles Netz (regional bedingt).

Abhilfe: Einbau eines magnetischen Spannungskonstanthalters (handelsüblich, Prinzip Spezialtrafo, passiv), weil wegen

Abb. 8 Entstörung mit Kondensator

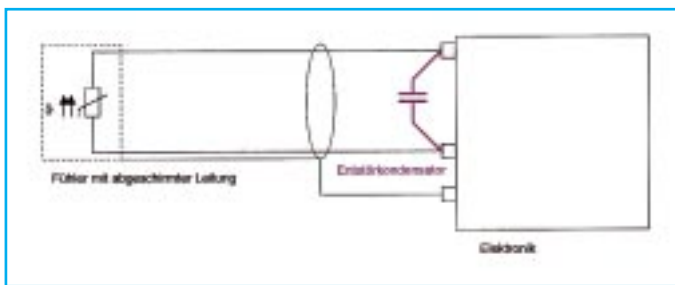
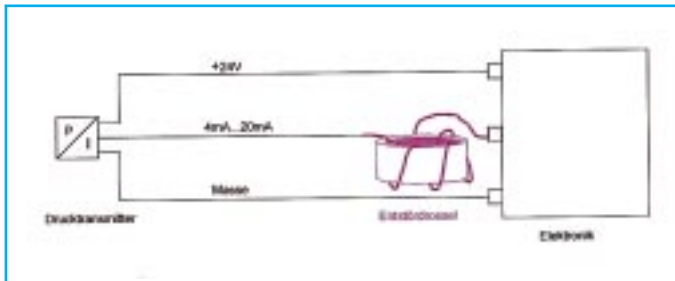


Abb. 9 Entstörung mit Spule



frequenzen bei Tief- und Hochpaßfilter bzw. Bandmittenfrequenzen bei Bandpaß und Bandsperre hier 1 kHz), weil die tatsächlichen Frequenzen nur durch die Bauteilgrößen bestimmt werden. Filter 1. Ordnung erreichen eine Steilheit von 20 dB pro Dekade (Frequenzverzehnfachung), was 6 dB pro Oktave (Frequenzverdoppelung) entspricht. Die Berechnung von Filtern höherer Ordnung ist relativ kompliziert, daher seien hier nur einige der einfachen Beispiele für den Leser rechnerisch nachvollzogen.

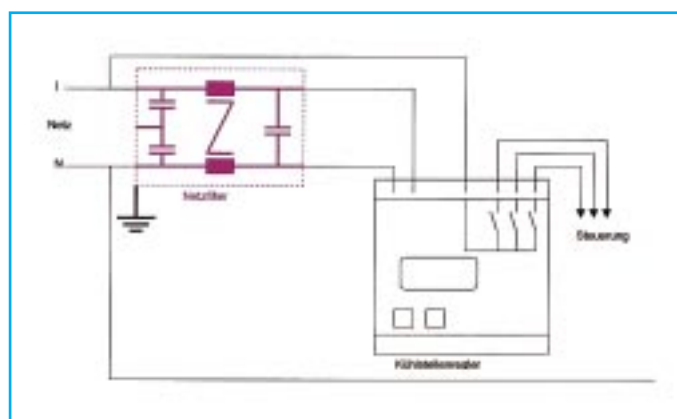


Abb. 10 Netzfilter vor Kühlstellenregler

derstand des Fühlers (hier je nach Temperatur etwa 1,8 k Ω) und einem parallel zum Eingang geschalteten Kondensator. Weil sich das Sensorsignal nur langsam ändert, konnte die Grenzfrequenz mit 20 Hz sehr niedrig gewählt werden. Die Rechnung ergab für den erforderlichen Kondensator

Abb. 11 Magnetischer Spannungskonstanthalter

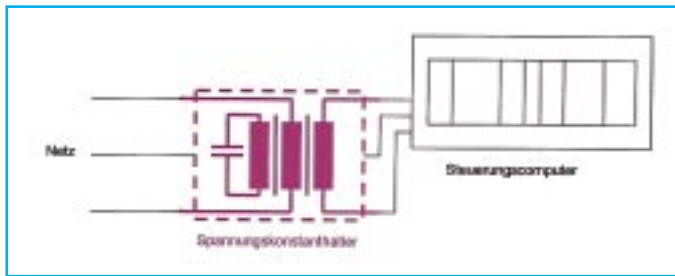
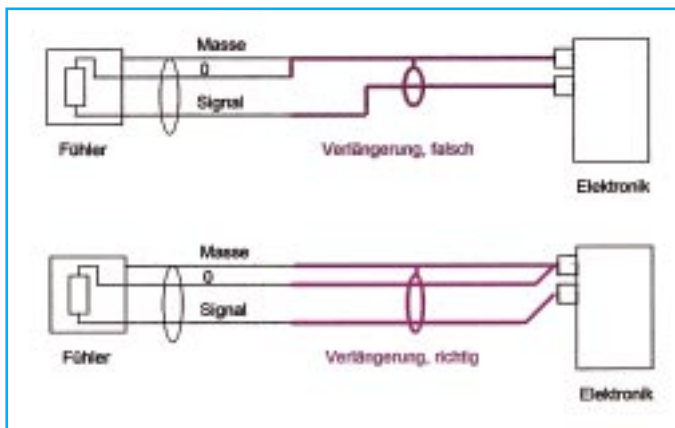


Abb. 12 Verlängerung mit und ohne Brummschleife



größerer Spannungsschwankungen allein mit Filtern nichts ausgerichtet werden konnte. Gleichzeitig wird so die Kurvenform der Netzspannung harmonisiert (Sinusform), d. h. Spitzen haben keine Chance (Abb. 11).

5) Das Signal eines Außentemperaturfühlers war nicht auszuwerten.

Ursache: Unsachgemäße Verlängerung der abgeschirmten Leitung, wodurch eine Brummschleife entstand.

Abhilfe: Vermeidung von Mantelströmen durch Verwendung einer separaten Ader als „Masse“ ohne doppelte Masseverbindung (Abb. 12).

6) Gestörte Kommunikation eines Bus-Systems über eine „twisted-pair“-Leitung.

Ursache: Fehlende Abschlußwiderstände am Ende der Leitung. In Folge wurde hochfrequente Energie am Leitungsende reflektiert, lief auf der Leitung zurück und überlagerte sich mit hinlaufenden Informationen.

Abhilfe: Leitung mit ihrem Wellenwiderstand abschließen (evtl. Anfrage beim Hersteller) (Abb. 13).

7) Der Ferneinsteller einer Regeleinrichtung störte den Rundfunkempfang.

Ursache: Hochfrequenzanteile gelangten aus der Regeleinrichtung auf diese Leitung, die außerhalb des Schaltschranks als Sendeantenne arbeitete.

Abhilfe: Weil der Ferneinsteller regulär mit einer höheren Taktfrequenz arbeitete,

tiometer mit 500 W relativ niederohmig war, genügte eine Spule mit geringer Induktivität für eine Grenzfrequenz von 100 kHz. Sie berechnete sich zu

$$L = \frac{R}{2 \cdot \pi \cdot f_G} = \frac{500 \Omega}{2 \cdot \pi \cdot 100 \text{ kHz}} = 0,8 \text{ mH.}$$

Ein Ringkern mit einem Induktivitätsfaktor $A_L = 25 \mu\text{H}$ erlaubte das Aufwickeln von

$$N = \sqrt{\frac{L}{A_L}} = \sqrt{\frac{0,8 \text{ mH}}{25 \mu\text{H}}} \approx 6 \text{ Windungen}$$

der Leitung direkt vor der Elektronik (Abb. 14).

Ergebnis

Die ausgewählten Beispiele mögen dem Praktiker verdeutlichen, wie vielschichtig die EMV-Problematik sein kann, obwohl die aufgeführten Probleme und ihre Behebung natürlich nur die Spitze des gesamten Eisbergs darstellen. Dennoch hofft der Verfasser, dem interessierten Leser einen Einblick in die Erzeugung und Unterdrückung von Störungen vermittelt zu haben, und vielleicht auch den einen oder anderen Denkanstoß für Probleme, die ihm in der beruflichen Praxis hier und da schon einmal über den Weg gelaufen sind. Denn eines ist sicher: Man kann den Feind um so besser bekämpfen, je genauer man ihn kennt. □

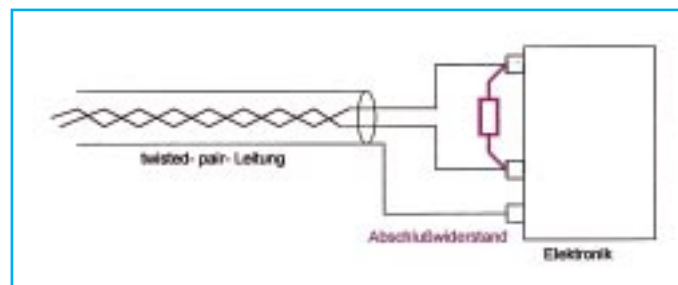


Abb. 13 Abschlußwiderstände am Ende von Datenleitungen

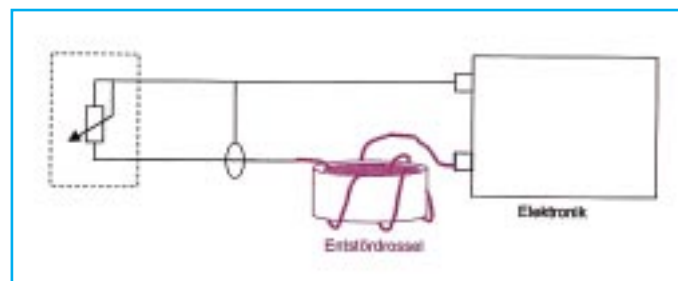


Abb. 14 Verdrosselung einer Signalleitung

kam die Kurzschlußmethode mit einem Kondensator aus Beispiel 1) nicht in Frage. Hier bot sich eine Verdrosselung bei gleichzeitiger Verwendung einer abgeschirmten Leitung an. Da das Fernpoten-