

5	Störungen in elektronischen Geräten	217
5.1	Ursachen der unerwünschten Verkopplung von Stromkreisen . . .	218
5.1.1	Galvanische Verkopplung	218
5.1.2	Kapazitive Verkopplung	220
5.1.3	Induktive Verkopplung	221
5.1.4	Elektromagnetische Verkopplung	223
5.2	Die Bedeutung von Bezugspotentialen	224
5.2.1	Empfehlungen für die Führung des Rückleiters zum Bezugspunkt	226
5.2.1.1	Digitale Signale	226
5.2.1.2	Analoge Signale	227
5.2.1.3	Erdschleifen	228
5.3	Schirmungen	229
5.3.1	Schirmung elektrischer Felder	229
5.3.2	Schirmung magnetischer Felder	231
5.3.2.1	Materialeigenschaften	231
5.3.2.2	Schirmung statischer Magnetfelder	234
5.3.2.3	Schirmung magnetischer Wechselfelder	236
5.3.3	Schirmung elektromagnetischer Felder	238
5.4	Elektrische Filter und Überspannungsableiter	242
5.4.1	Vorschriften für Funkstörungen	242
5.4.2	Entstörerschaltungen gegen Hf-Störungen	243
5.4.3	Maßnahmen gegen kurzzeitige Überspannungen	246
5.4.3.1	Bauelemente und Schaltungsmaßnahmen	248
5.4.3.2	Schutz von Schaltkontakten	250
5.5	Empfehlungen für den Aufbau von Schränken und Baugruppen	252
5.6	Empfehlungen für digitale Systeme	255
5.6.1	Störsicherheit integrierter digitaler Schaltkreise	256
5.6.2	Maßnahmen in der Stromversorgung	257
5.6.3	Eigenschaften von Übertragungsleitungen	259
5.6.3.1	Übersprechen	259
5.6.3.2	Reflexionen	262
5.6.4	Anschluß externer Geräte	265
5.7	Prüfliste	266

5 Störungen in elektronischen Geräten

Durch die zunehmende Verwendung von Geräten der Elektronik, der Datenverarbeitung, der Meßtechnik und der Nachrichtenübertragung in enger Nachbarschaft mit Anlagen und Leitungen der Starkstromtechnik stellt sich in steigendem Maße die Frage nach der gegenseitigen Verträglichkeit. Die empfindlichen elektronischen Schaltungen und Geräte haben gemeinsame Verbindungen und Strompfade und befinden sich in einer von magnetischen und elektrischen Störfeldern durchsetzten Umgebung.

Durch die systematische Untersuchung der Zusammenhänge und der erforderlichen Gegenmaßnahmen entstand die neue Disziplin EMV (Elektromagnetische Verträglichkeit), im englischen Sprachgebrauch mit EMC (electro magnetic compatibility) bezeichnet.

Unter «Störung» sei hier die ungewollte Beeinflussung von Schaltungsfunktionen verstanden, verursacht durch das Auftreten von unerwünschten Signalen an beliebigen Stellen in Geräten. Die Ursache liegt meist in der unbeabsichtigten Verkopplung von Stromkreisen, die ganz, teilweise oder auch gar nicht zum System gehören (Eigen- oder Fremdstörungen). Die Auswirkungen von Bauelementausfällen (Drift- oder Totalausfall) werden hier nicht erfaßt, da diese zum Bereich «Zuverlässigkeit» gehören (siehe Abschnitt 2).

Wegen der zunehmenden Bedeutung sollen auch die störenden Einflüsse der eigenen Geräte auf fremde Anlagen untersucht werden. Das Thema Störungen wird hier überwiegend unter dem Aspekt der Verhinderung durch konstruktive Maßnahmen behandelt. Für die Schaltungstechnik sei auf die umfangreiche Spezialliteratur sowie die Hinweise der Bauelementhersteller hingewiesen.

Da sich in größeren Geräten und Anlagen die Unterteilung in Eigen- und Fremdstörungen nicht immer eindeutig durchführen läßt, soll im folgenden diesen Begriffen keine besondere Bedeutung beigemessen werden.

Das Feststellen der Störungsquelle und ihre anschließende Ausschaltung bzw. Intensitätsminderung sollte im Vordergrund aller Maßnahmen stehen. Um die Störsignale und ihre Auswirkungen beseitigen zu können, muß bekannt sein,

- wodurch Störsignale entstehen,
- wie sie in ein System eindringen können,
- wie sie sich auf die verwendeten Schaltungen auswirken.

5.1 Ursachen der unerwünschten Verkopplung von Stromkreisen

Es sollen am Beispiel einer einfachen Verkopplung zweier Stromkreise die vier möglichen Fälle

- galvanische Verkopplung,
- kapazitive Verkopplung,
- induktive Verkopplung,
- elektromagnetische Verkopplung

untersucht werden. Es wird davon ausgegangen, daß beide Kreise aktiv sind, also Spannungsquellen besitzen. Zur Vereinfachung soll hier der Kreis (u_1) mit der höheren übertragenen Leistung als Störer definiert und seine Auswirkung auf den gestörten Kreis (u_2) untersucht werden. Da beide Stromkreise Quellen aufweisen, tritt selbstverständlich gegenseitiges Übersprechen auf.

5.1.1 Galvanische Verkopplung

In Bild 5.1 fließen die beiden Ströme i_1 und i_2 über die den beiden Stromkreisen gemeinsame Impedanz Z_k mit dem Leitungswiderstand R_k und der Leitungsinduktivität L_k . Der an der *Koppelimpedanz* Z_k entstehende Spannungsabfall u_k ist der Summe beider Ströme $i_1 + i_2$ proportional. Der Anteil der Fremdspannung bezogen auf den gestörten Kreis (u_2) entsteht jedoch nur durch i_1 . Daher beträgt die in den gestörten Kreis eingekoppelte Spannung

$$u_{k2} = R_k \cdot i_1 + L_k \cdot \frac{di_1}{dt} \quad (5.1)$$

u_{k2} : In den Kreis 2 eingekoppelte Störspannung in V.

di_1/dt : Zeitliche Änderung des Stromes im Kreis 1 in A/s.

R_k : Ohmscher Widerstand der den beiden Kreisen gemeinsamen Leitung in Ω .

L_k Induktivität der den beiden Kreisen gemeinsamen Leitung in H.

Die Spannung u_{k2} liegt in Reihe mit der Eingangsspannung u_2 . In elektronischen Geräten sind die Ströme im allgemeinen nicht größer als einige Ampere. Liegt R_k in der Größenordnung Milliohm, so kann der Anteil $R_k \cdot i_1$ oft vernachlässigt werden.

In digitalen Systemen unterliegen die Ströme schnellen zeitlichen Änderungen. Dadurch wird die Kopplungsinduktivität L_k schon bei relativ kleinen Strömen wirksam, sofern diese schnell ein- oder ausgeschaltet werden.

Zur *Verminderung der Kopplungsimpedanz* gibt es verschiedene Möglichkeiten. Grundsätzlich sollten getrennte Masse- und Versorgungsleitungen für Verbraucher mit hohen Strömen (Lampen, Relais, Leistungstristoren usw.) einerseits und Logikschaltungen oder analoge Verstärkerschaltungen andererseits verwendet werden.

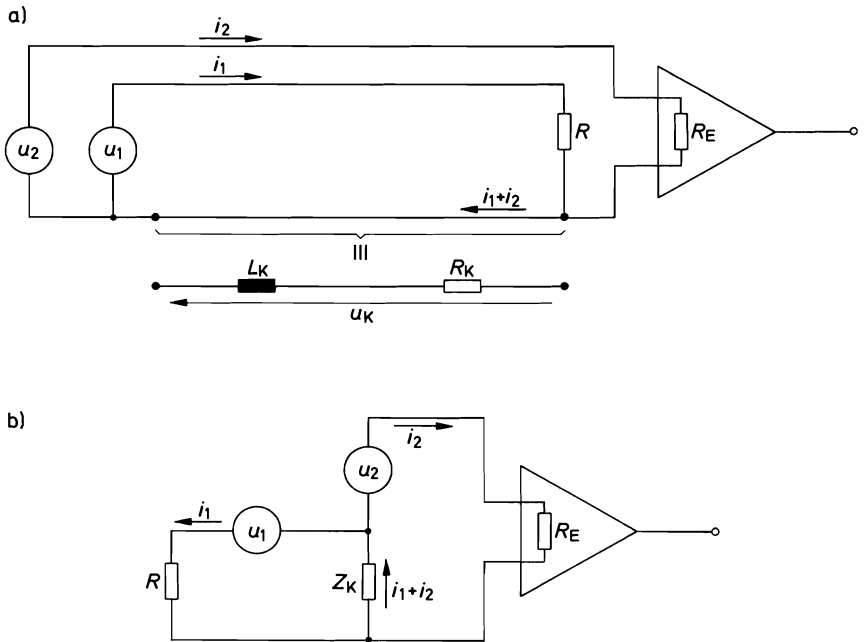


Bild 5.1 Galvanische Verkopplung von Stromkreisen (a) und Ersatzschaltbild (b)

Bezugs- bzw. Masseleiter sind nur in einem Punkt galvanisch miteinander zu verbinden. Da über diese eine Verbindung keine galvanischen Störströme fließen können, bleiben die Stromkreise *galvanisch entkoppelt* (Bild 5.2).

Die punktförmige Verbindung verschiedener Stromkreise ist immer günstig. Häufig wählt man eine sternförmige Verbindung. Ist die galvanische Entkopplung durch eine einzige Verbindung nicht möglich (häufig bei digitalen Geräten), müssen die Koppelimpedanzen klein gehalten werden. Der *ohmsche Widerstand* läßt sich durch ausreichende Querschnitte (Bild 3.4.5) und niedrige Übergangswiderstände an Klemmen und Steckern begrenzen. Die *Leitungsinduktivität* ist niedrig zu halten durch kurze Leiterlänge im gemeinsamen Strompfad, große Leiterbreite, geringen Abstand zwischen Hin- und Rückleiter sowie geradlinige Leitungsführung.

Auf schnelle Stromänderungen, wie sie z.B. bei Schaltvorgängen auftreten, hat man meist keinen direkten Einfluß. Spannungseinbrüche infolge kurzzeitiger Stromspitzen lassen sich jedoch durch an geeigneter Stelle angebrachte Kondensatoren (Abblocken) vermindern (siehe Abschnitt 5.6.2).

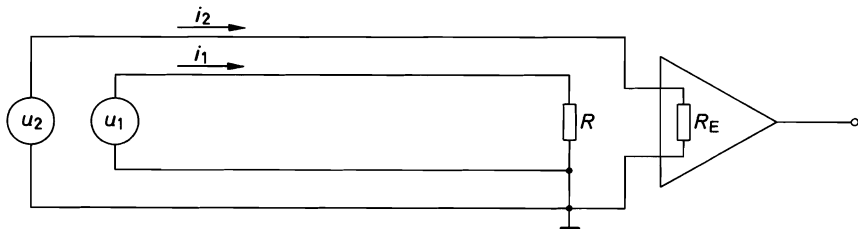


Bild 5.2 Getrennte Leitungsführung der Rückleiter zur Vermeidung der galvanischen Verkopplung

5.1.2 Kapazitive Verkopplung

Über die Kapazität von Leitung zu Leitung (Bild 5.3) fließen kapazitive Blindströme. Der zum ohmschen Eingangswiderstand R_E des Verstärkers gelangende Teilstrom erzeugt dort einen ohmschen Störspannungsabfall u_{k2} . Diese Störspannung ist proportional

$$\begin{aligned}
 u_{k2} &\sim i_k \cdot R_E \\
 u_{k2} &\sim C_k \cdot \frac{du_1}{dt} \cdot R_E
 \end{aligned}
 \tag{5.2}$$

u_{k2} : In den Kreis 2 eingekoppelte Störspannung am Ende der Leitung in V.

du_1/dt : Zeitliche Änderung der Spannung im Kreis 1 in V/s.

C_k : Leitungskapazität zwischen beiden Stromkreisen in F.

R_E : Abschlußwiderstand am Ende der Leitung 2 bzw. Eingangswiderstand des Verstärkers in Ω .

Sie wächst demnach mit der Leitungslänge und der Frequenz der Störquelle, so daß ungeschirmte Leitungen in NF- und HF-Anlagen großen kapazitiven Einstreuungen durch elektrische Felder anderer Stromkreise ausgesetzt sind. Auch das Ein- und Ausschalten von Gleichstromkreisen erzeugt auf die gleiche Weise Störspannungen. Die Störspannung sinkt mit kleiner werdendem Abschlußwiderstand am Anfang und am Ende der Leitung.

Digitale Signale stören durch kapazitive Verkopplung andere digitale Schaltkreise um so weniger, je kleiner der Signalhub und je größer die Anstiegs- und Abfallzeit der Schaltvorgänge ist. Bei gleichem Signalhub wird also eine «langsame Logik» weniger Störungen verursachen als eine «schnelle Logik».

Als Empfehlung zur *Verringerung der kapazitiven Verkopplung* läßt sich also ableiten:

Möglichst großer Abstand zwischen parallelen Signalleitungen. Auf Leiterplatten Entkopplung durch Schirmleiter (Bild 3.4.9). Keine signalführenden Leitungen in Kabelbäumen. Für Signalleitungen ist Punkt-zu-Punkt-Verdrahtung («Wildverdrahtung») besser. Signalleitungen mit zusätzlichen Masseleitungen verdrehen. Durch Leitungen mit geerdeter Schirmung erhält man eine vollständige Entkopplung. Die zusätzliche Kapazität (bei Koaxialleitungen 70 bis 100 pF/m) tritt jedoch

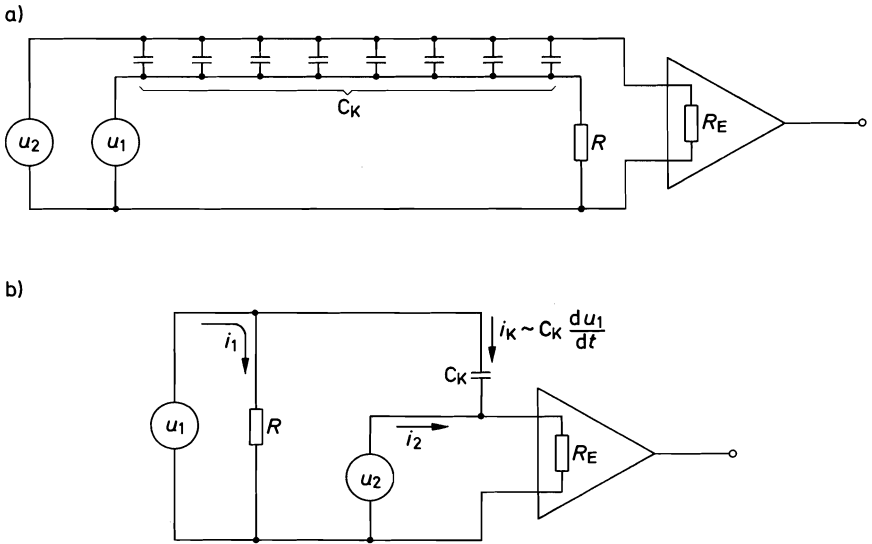


Bild 5.3 Kapazitive Verkopplung von Stromkreisen (a) und Ersatzschaltbild (b)

für die treibende Schaltung als Belastung auf und verringert die Schaltgeschwindigkeit bei digitalen Systemen.

Die Signalleitungen sollen niedrige Abschlußwiderstände besitzen. Auf die dabei auftretenden Anpassungsprobleme bzw. die schaltungstechnische Realisierung kann im Rahmen dieses Buches nicht eingegangen werden.

5.1.3 Induktive Verkopplung

Eine induktive Verkopplung von Stromkreisen entsteht, wenn ein Leiter vom Magnetwechselfeld eines anderen Leiters umschlossen wird. Die in Bild 5.4 konzentriert dargestellte Verkopplung ist selbstverständlich auf der gesamten Länge

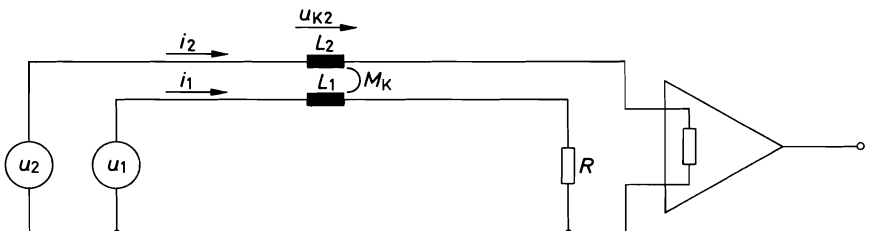


Bild 5.4 Induktive Verkopplung von Stromkreisen

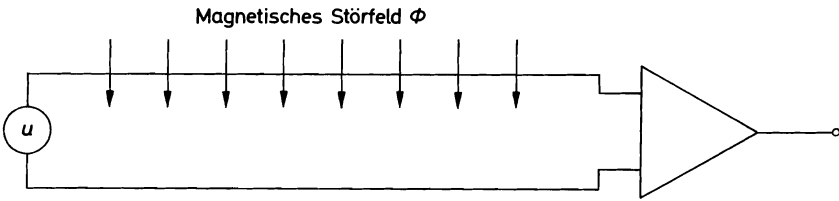


Bild 5.5 Induktive Verkopplung mit ausgedehnten Störfeldern

der Leitungen wirksam. Die in den gestörten Kreis eingekoppelte Spannung beträgt

$$u_{k2} = - M_k \cdot \frac{di_1}{dt} \quad (5.3)$$

mit
$$M_k = k \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2} \quad (5.4)$$

u_{k2} : In den Kreis 2 eingekoppelte Störspannung in V.

di_1/dt : Zeitliche Änderung des Stromes im Kreis 1 in A/s.

M_k : Gegeninduktivität der verkoppelten Leiter in H.

L_1, L_2 : Für die Verkopplung wirksame Teilinduktivitäten der Leiter 1 und 2 in H.

k : Kopplungsfaktor.

Zur Verringerung der induktiven Störspannung sind schnelle Stromänderungen möglichst zu vermeiden oder zu kompensieren. Der Kopplungsfaktor k läßt sich durch Abstandsvergrößerung zwischen den verkoppelten Leitungen verkleinern. Induktivitäten von Leiterschleifen sind am geringsten, wenn Hin- und Rückleiter möglichst dicht aneinander liegen. Verdrillt man die Leitung zusätzlich, so werden Störspannungen von äußeren Magnetfeldern weitgehend kompensiert (Bild 5.5 und 5.6). Dieses gilt besonders für ortsunabhängige Störfelder, wie z.B. in der Nähe größerer Transformatoren oder elektrischer Maschinen. Durch das Verdrillen wird auch die Wirkung des eigenen Magnetfeldes nach außen weitgehend aufgehoben.

Reichen derartige Maßnahmen nicht aus, muß zur Schirmung mit weichmagnetischen Werkstoffen gegriffen werden (siehe Abschnitt 5.3.2).

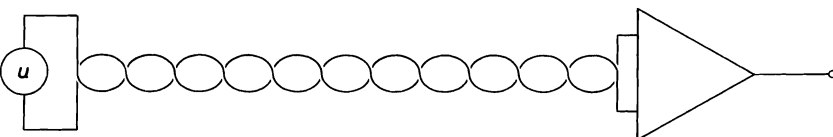


Bild 5.6 Kompensation magnetischer Störfelder durch Verdrillung

5.1.4 Elektromagnetische Verkopplung

Zunächst wurde die Verkopplung von Stromkreisen über elektrische und magnetische Felder getrennt behandelt. Beide Felder stellen jedoch Sonderfälle des elektromagnetischen Feldes dar, bei dem die elektrische und die magnetische Komponente über die Maxwell'schen Gleichungen miteinander verknüpft sind:

Befindet sich an irgendeinem Ort ein zeitlich veränderliches elektrisches Feld, so entsteht ein zeitlich veränderliches Magnetfeld, das das elektrische Feld umschließt. Dieses Magnetfeld hat wieder ein zeitlich veränderliches elektrisches Feld zur Folge, das das Magnetfeld umfaßt usw. Wenn das primäre Feld ein magnetisches war, ändert sich im Prinzip nichts. Die auslösende «Störung» breitet sich durch die Verkettung der elektrischen und magnetischen Felder im Raum aus, es entsteht eine freie elektromagnetische Welle.

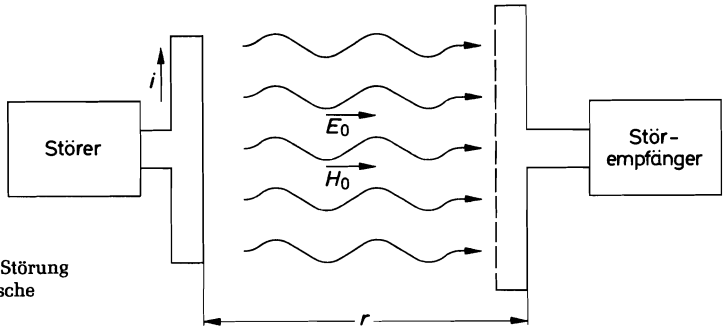


Bild 5.7 Prinzip der Störung durch elektromagnetische Strahlung

Eine getrennte Behandlung beider Felder ist zulässig und sinnvoll, wenn die Wellenlänge der Schwingungen groß ist gegenüber den räumlichen Abmessungen des betrachteten Systems. Dieses ist der Fall bei genügend langsamen Vorgängen.

Bei schnellen Vorgängen ist eine Energieabstrahlung bzw. -aufnahme über Leitungen und Bauelemente zu erwarten. Die technisch erzeugten Frequenzen erstrecken sich heute über einen Bereich von 10^{12} Hz. Das zu konstruierende Gerät kann diese Frequenzen sowohl erzeugen als auch aufnehmen (Bild 5.7).

Elektromagnetische Wellen können sowohl leitungsgebunden als auch durch Strahlung übertragen werden. Maßnahmen gegen die Störbeeinflussung durch elektromagnetische Wellen werden in den Abschnitten 5.3.3 und 5.4.2 beschrieben.

5.2 Die Bedeutung von Bezugspotentialen

Eingangs-, Ausgangs- und Betriebsspannungen in elektrischen Systemen werden auf ein bestimmtes Nullpotential bezogen. In den meisten Fällen wird der Bezugspunkt an einer Stelle geerdet (Systemerde). Ergänzend zum Abschnitt 5.1.1 soll an einem Beispiel untersucht werden, welche Einflüsse auf das Bezugspotential bestehen und wie diese sich auswirken.

Bild 5.8 zeigt drei verschiedene Schaltkreise S 1 bis S 3, die über Zuleitungen mit den Leitungsinduktivitäten L_1 bis L_6 an die Betriebsspannung U_B geschaltet sind. Die Schaltkreise (digitale Schaltungen, Verstärker, Leistungsstufen usw.) werden über die Eingangsspannungen u_1 bis u_3 angesteuert. Die Leitungswiderstände sind bei dieser Betrachtung vernachlässigt.

Tritt nun über die Änderung der Steuerspannung u_3 in S 3 eine kurzzeitige Stromänderung di_3/dt auf, so wird z.B. die Versorgungsspannung U_{B2} für S 2 um den Betrag

$$\Delta U_{B2} = (L_1 + L_2 + L_4 + L_5) \cdot \frac{di_3}{dt} \quad (5.5)$$

für die Dauer der Stromänderung verändert. Demzufolge wird der Fußpunkt des Schaltkreises S 2 um die Spannung

$$\Delta U_{O2} = (L_4 + L_5) \frac{di_3}{dt} \quad (5.6)$$

gegenüber dem Bezugspotential 0 V (Minusklamme von U_B) verschoben. Damit ändern sich wiederum die an den Eingängen von S 1 und S 2 wirksamen Potentiale, da sich zu den auf das Massepotential bezogenen Eingangsspannungen u_1 und u_2 die Spannungsabfälle an L_4 bzw. $L_4 + L_5$ addieren. Die resultierenden Eingangs-

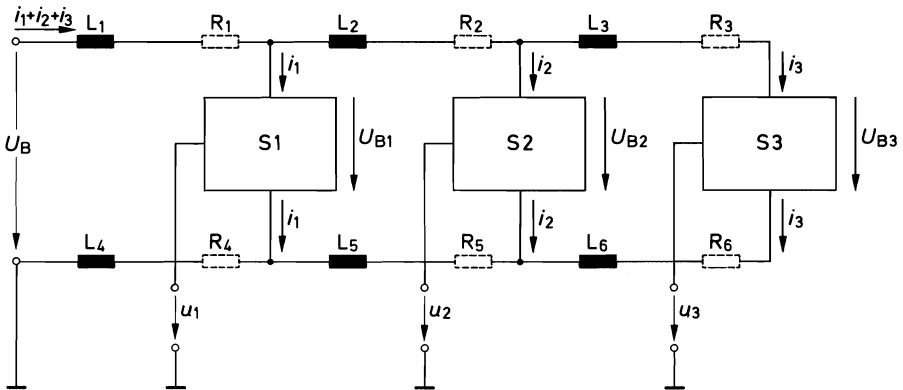


Bild 5.8 Beispiel für die Beeinflussung von Bezugspotentialen durch galvanische Verkopplung

spannungen lösen u.U. in S 1 und S 2 nicht vorgesehene Funktionen bzw. Ausgangssignale aus. Oft bewirkt die Veränderung der Versorgungsspannung auch für den eigentlichen Verursacher Fehlfunktionen. Ob die Versorgungsspannung für die Dauer der Stromänderung vergrößert oder verkleinert wird, hängt ab von der Richtung der Stromänderung (Einschalt- oder Ausschaltflanke).

Auf diese Problematik und ihre üblichen Gegenmaßnahmen wird im Abschnitt 5.6, im Zusammenhang mit digitalen Schaltungen, noch besonders eingegangen.

An dieser Stelle ist die Erkenntnis wichtig, daß durch Ströme auf der Bezugs-(Masse-)Leitung Spannungsabfälle auftreten, die durch Veränderung der wirksamen Eingangsspannungen Fehlfunktionen auslösen können. Bei kurzzeitigen Stromänderungen und hochfrequenten Wechselströmen wirkt sich überwiegend die Induktivität der Leitungen aus. Hohe Gleichströme führen auch zu einem nicht mehr vernachlässigbaren Spannungsabfall am ohmschen Anteil der Leitung.

Induktiv in die Bezugsleitung eingekoppelte Störspannungen stören ebenso wie die durch galvanische Verkopplungen entstehenden Störungen. Zur Vermeidung gilt das in Abschnitt 5.1.3 Gesagte.

Beispiel 5.1:

Ein Zahlenbeispiel soll die beschriebenen Vorgänge für den Bezugsleiter (Masse) verdeutlichen. Bild 5.8 sei das Ersatzschaltbild eines Teils der Leiterplatte nach Bild 5.40. Die Schaltkreise S_1 bis S_3 sind dort ebenfalls eingezeichnet. Die Länge der Leiterbahn zwischen dem Stecker und S_1 sowie zwischen den Schaltkreisen S_1 bis S_3 sei jeweils $l = 7$ cm. Die Breite der Leiterbahn beträgt 3 mm, ihre Dicke $70 \mu\text{m}$.

Nach Abschnitt 3.4.2.7 beträgt die Induktivität der Leiterbahn etwa $L' = 10 \text{ nH cm}^{-1}$. Der Widerstand läßt sich aus Bild 3.4.5 mit $R' = 85 \text{ m}\Omega \text{ m}^{-1} = 0,85 \text{ m}\Omega \text{ cm}^{-1}$ bei 20°C ablesen.

Wenn der Schaltkreis S_3 einen Strom von 20 mA in 5 ns schaltet, entsteht am Bezugsleiter (Steckeranschluß bis S_3) ein induktiver Spannungsabfall

$$\begin{aligned} \Delta u_{O3(L)} &= (l_1 + l_2 + l_3) \cdot L' \cdot \frac{di}{dt} \\ &= (7 \text{ cm} + 7 \text{ cm} + 7 \text{ cm}) \cdot \frac{10 \cdot 10^{-9} \text{ H}}{\text{cm}} \cdot \frac{20 \cdot 10^{-3} \text{ A}}{5 \cdot 10^{-9} \text{ s}} \\ &= 0,84 \text{ V} \end{aligned}$$

Der ohmsche Spannungsabfall

$$\begin{aligned} \Delta u_{O3(R)} &= (l_1 + l_2 + l_3) \cdot R' \cdot i \\ &= (7 \text{ cm} + 7 \text{ cm} + 7 \text{ cm}) \cdot 0,85 \cdot 10^{-3} \frac{\Omega}{\text{cm}} \cdot 20 \cdot 10^{-3} \text{ A} \\ &= 0,36 \text{ mV} \end{aligned}$$

kann dagegen vernachlässigt werden.

5.2.1 Empfehlungen für die Führung des Rückleiters zum Bezugspunkt

Es ist zwischen verschiedenen Anwendungen zu unterscheiden:

- Logische Signale kleiner Leistung.
- Schaltsignale größerer Leistung (z.B. für elektromechanische Schaltglieder).
- Analoge Signale.

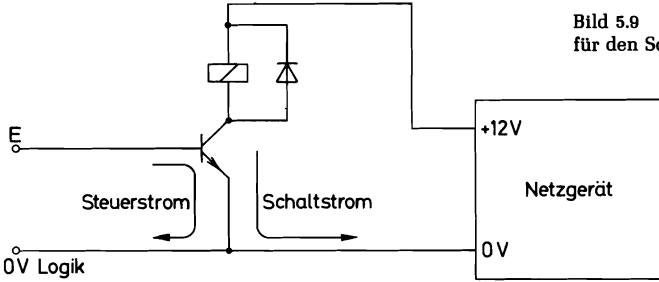


Bild 5.9 Getrennter Rückleiter für den Schaltstrom der Leistungsstufe

5.2.1.1 Digitale Signale

Sollen z.B. Relais oder Schütze von digitalen Signalen angesteuert werden, so ist zu verhindern, daß der Rückstrom der Leistungsverbraucher über die 0-V-Leitung der Logik fließt. Bild 5.9 zeigt das Prinzip.

Bei größeren Geräten empfiehlt sich die Verwendung je eines Netzgerätes für jede Funktionseinheit, da die gemeinsame Benutzung eines Netzteiles die häufigste

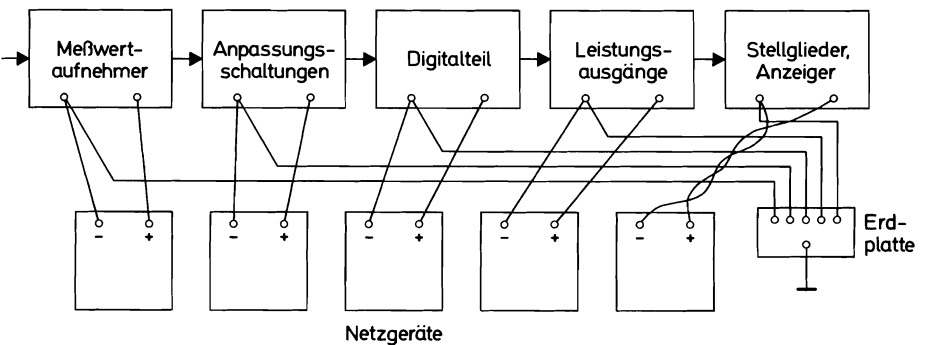


Bild 5.10 Stromversorgung eines elektronischen Systems ohne Verkopplungen über die Netzgeräte

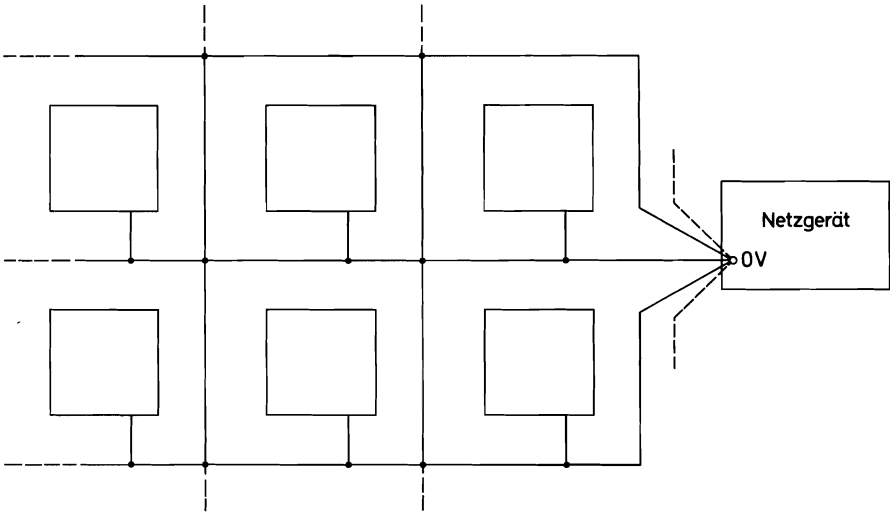


Bild 5.11 Maschennetz für eine induktivitätsarme Masseleitung eines Digitalteils

Ursache für das Verschleppen von Störungen ist. Bild 5.10 zeigt das Prinzipschaltbild eines elektrischen Steuerungssystems, bei dem durch getrennte Stromversorgungsgeräte und eine Erdung die gegenseitige Beeinflussung der Funktionsgruppen über die Stromversorgung ausgeschlossen ist. Die Zuleitungen zwischen den Netzgeräten und den Verbrauchern mit großen Strömen sollten zur Reduzierung magnetischer Felder verdreht werden.

Innerhalb des Digitalteils ist, wegen der schnellen Stromänderungen, eine möglichst geringe Induktivität erforderlich (siehe 5.2). Besonders geringe Induktivitätswerte bei gleichzeitig niedrigem Bahnwiderstand ergibt ein maschenförmiger Aufbau der Erdung (und evtl. der Spannungsversorgung) nach Bild 5.11. Die geringste Induktivität besitzen Flächenleiter. Der vermaschte Aufbau stellt eine gute Annäherung an die ideale Flächenform dar.

5.2.1.2 Analoge Signale

In Eingangsschaltungen analoger Verstärker haben Eingangssignale oft sehr geringe Werte, so daß Verkopplungen mit Störsignalen zu großen Fehlern führen können. Der richtige Entwurf analoger Kreise ist i.a. schwieriger als der digitaler Systeme. Häufig führen nur umfangreiche experimentelle Untersuchungen zu einem brauchbaren Ergebnis.

Zur Vermeidung galvanischer Verkopplungen werden die Bezugsleiter bei analogen Eingangskreisen sternförmig zum Bezugspunkt des Systems geführt (Bild 5.12). Sind mehrere Stromkreise in nur einem Punkt verbunden, so führt der ver-

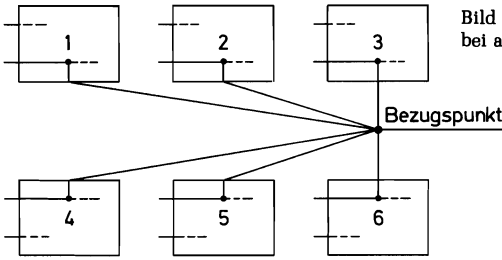


Bild 5.12 Sternförmige Verbindung der Rückleiter bei analogen Geräten

bindende Bezugsleiter keinen Strom. Dadurch sind die Potentiale der einzelnen Bezugspunkte zwangsläufig gleich.

Schirmungen (siehe 5.3.1) behandelt man als getrennte Leiter und verbindet sie auch mit dem Gerätebezugspunkt. Es ist unbedingt darauf zu achten, daß Schirme nur als elektrostatische Abschirmungen dienen und keine Ströme führen.

Besonders kritisch sind die Erdungs- und Schirmprobleme bei Hochfrequenzverstärkern, da hier zusätzlich über Verkopplungen Schwingneigung auftreten kann. Hier soll nur auf eine übliche Maßnahme gegen die Verkopplung durch Ströme in den Masseleitungen hingewiesen werden. Im Zwischenfrequenzverstärker nach Bild 5.13 ist durch die unterschiedliche Lage der Massepunkte der Eingangs- und Ausgangskreise dafür gesorgt, daß sich die hochfrequenten Ausgangs- und Eingangsströme nicht galvanisch miteinander verkopplern und dadurch evtl. eine Rückkopplung erzeugen.

5.2.1.3 Erdschleifen

Ein Spannungssystem darf grundsätzlich nur an einer Stelle geerdet werden. Im Erdreich können Ströme mit erheblicher Stärke fließen. Daraus ergeben sich Spannungsabfälle zwischen den verschiedenen Erdpunkten, wenn mehrfach geerdet wird. Diese «Erdspannungen», die meist von Netzwechselströmen hervorgerufen

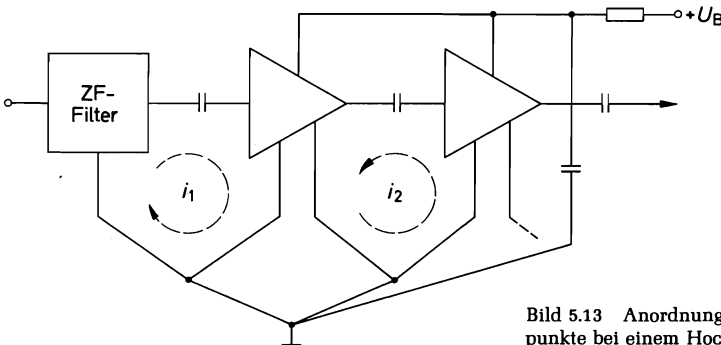
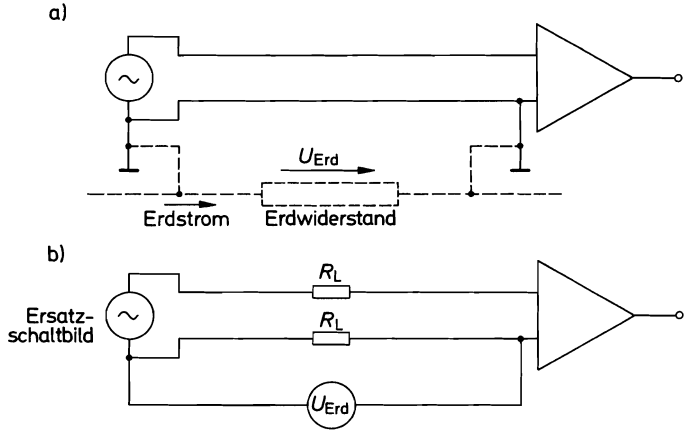


Bild 5.13 Anordnung der Massepunkte bei einem Hochfrequenz-Verstärker

Bild 5.14 Auswirkung einer Erdschleife



werden, würden sich im Falle einer Erdschleife den Nutzsignalen als Brummspannung überlagern. Der Widerstand des Erdreiches liegt dabei dem Leitungswiderstand R_L des Signalkückleiters parallel (Bild 5.14).

Ähnliche Verhältnisse liegen vor, wenn Gerätechassis oder Montagegestelle als Rückleiter für die Stromversorgung dienen.

5.3 Schirmungen

5.3.1 Schirmung elektrischer Felder

Im Abschnitt 5.1.2 wurde schon erwähnt, daß kapazitive Einstreuungen durch geerdete Schirme unterdrückt werden können. Die Wirkung von Schirmungen gegen elektrische Felder beruht auf der *Influenzierung von Ladungen* auf der Oberfläche leitender Körper. In Bild 5.15a ist eine elektrische Ladung (z.B. eine spannungsführende Leitung) von einem metallischen Schirm umgeben. Die Feld-

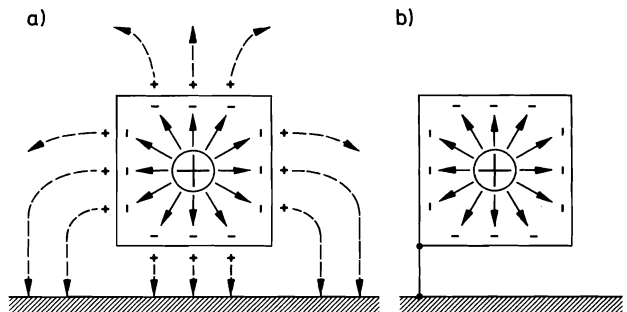


Bild 5.15 Schirmung elektrischer Felder

linien der positiven Ladung des Innenleiters enden auf negativen Ladungen auf der Innenwand des Schirmes. Von den durch Influenz auf die Außenwand verschobenen positiven Ladungen gehen neue Feldlinien in den Raum hinaus bis zu den entsprechenden Ladungen, z.B. auf dem Erdboden oder den umgebenden Wänden.

Wird die Schirmung geerdet (Bild 5.15b), so enden die Feldlinien des positiven Leiterpotentials ebenfalls an negativen Ladungen auf der Innenwand des Schirms, während die äußeren positiven Ladungen zur Erde abfließen. Leiter und Innenwand der Schirmung bilden ein abgeschlossenes System, von dem aus keine Feldlinien nach außen dringen, wenn der Schirm vollständig geschlossen ist.

Im Falle einer Wechselspannung erfolgt eine ständige Umpolung des inneren Feldes. Entsprechend werden die influenzierten Ladungen auf der Außenwand des Schirmes über die Erdleitung ausgetauscht. Die *Impedanz* des Schirmes und der Zuleitungen muß möglichst niedrig sein. Es ist auf ausreichenden Querschnitt sowie auf geringe Länge der Zuleitung zu den Bezugsleitern zu achten.

Bei äußeren elektrischen Feldern sind die Verhältnisse ähnlich. Hier stellt der Schirm ein abgeschlossenes System dar, das innen feldfrei ist. Der Schirmeffekt beruht auf der Überlagerung des äußeren elektrischen Feldes mit dem Feld, das durch die auf der Oberfläche (durch das äußere Feld) influenzierten Ladungen erzeugt wird. Schirme mit metallischen Wänden oder engmaschigen Metallgittern werden auch als *Faraday-Käfige* bezeichnet.

Durch einen Stromfluß über einen Schirm entsteht eine galvanische Verkopplung, die unbedingt vermieden werden muß (siehe *Kopplungsimpedanz*, Abschnitt 5.3.3). Die für die Koaxialleitung angegebenen Verhältnisse gelten sinngemäß auch für beliebig gestaltete Schirme. Prinzipiell kann entweder die Störquelle oder die vor Störungen zu schützende Einrichtung mit einem Schirm umgeben werden. Eine besonders gute Schirmwirkung wird mit der Anwendung beider Schirme erreicht.

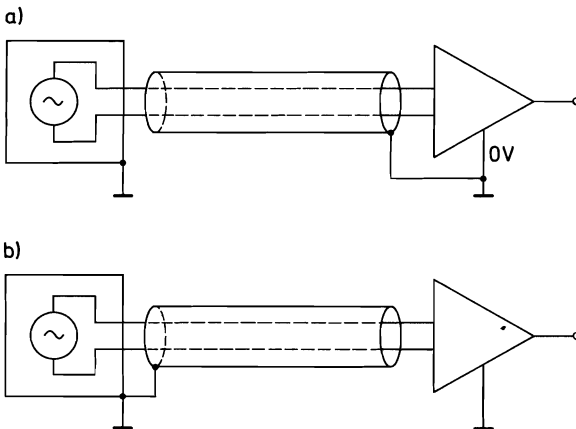


Bild 5.16 Getrennte Erdung von Schirmen entfernter Geräte

In einer Anlage können mehrere Schirme, die nicht miteinander verbunden sind, vorhanden sein. Das metallische Gerätegehäuse stellt auch einen Schirm dar. In weit verzweigten Anlagen kann dieser getrennt geerdet werden, wenn eine Trennung vom Spannungssystem externer Geräte sichergestellt ist (Bild 5.16a und b).

5.3.2 Schirmung magnetischer Felder

Nach dem *Induktionsgesetz*

$$u = - N \frac{d\Phi}{dt} = - L \frac{di}{dt} \quad (5.7)$$

N : Windungszahl

Φ : Magnetischer Fluß in Wb

L : Induktivität in H

i : Strom in A

erzeugt ein sich änderndes magnetisches Feld eine elektrische Spannung u in den Leiterschleifen und Spulen, die diesem Feld Φ ausgesetzt sind. Reichen die im Abschnitt 5.1.3 angesprochenen Maßnahmen nicht aus, so umgibt man die gegen induktive Störungen empfindlichen Schaltungsteile mit magnetisch hochwertigen Schirmgehäusen aus weichmagnetischen Metallen. Bei entsprechender Erdung wirken diese auch als Schirmung gegenüber elektrischen Feldern (siehe Abschnitt 5.3.1). Wie noch gezeigt wird, ist eine vollkommene Schirmung gegenüber magnetischen Feldern nicht möglich.

5.3.2.1 Materialeigenschaften

Ferromagnetische Materialien lassen sich grob in magnetisch «weich» und «hart» einteilen (Bild 5.17). Weichmagnetische Materialien zeichnen sich durch eine schmale Hystereseschleife mit geringer Remanenz R_a und Koerzitivfeldstärke K_a aus; man verwendet sie z.B. in geblechter Form in Transformatoren, elektrischen Maschinen und Elektromagneten sowie als magnetische Schirme. Hartmagnetische Werkstoffe werden für Dauermagnete und Magnetkernspeicher in der Datentechnik eingesetzt.

Die Fläche der Hystereseschleife ist ein Maß für die Arbeit, die die fortwährende Ummagnetisierung des Materials erfordert. Sie stellt einen Verlust an elektrischer Energie dar, der im Eisen als Wärme auftritt.

Die *Magnetisierungskurve*

$$B = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot H \quad (5.8)$$

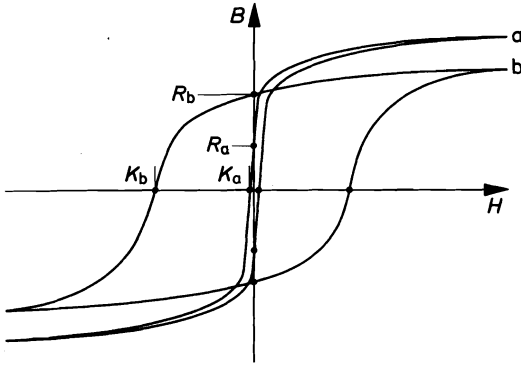


Bild 5.17 Magnetisierungskurve magnetisch weicher (a) und harter (b) Magnetwerkstoffe

B : Magnetische Flußdichte (Induktion) in T

μ_r : Permeabilitätszahl

μ_0 : $4 \pi \cdot 10^{-7} \text{ V} \cdot \text{s/A} \cdot \text{m}$ Magnetische Feldkonstante

H : Magnetische Feldstärke in A/m

kann nur durch Messungen ermittelt werden, da die Permeabilitätszahl μ_r wiederum eine Funktion der magnetischen Induktion B ist (Bild 5.18). $\mu_r = f(B)$ wird mit Hilfe der Gleichung (5.8) punktweise aus der Magnetisierungskurve des jeweiligen Materials ermittelt. Tabelle 5.1 gibt Größenordnungen für die Permeabilitätszahl einiger Stoffe an. Für magnetische Schirmzwecke werden häufig Mumetal und Vacoperm 100 verwendet.

Die Schirmwirkung magnetischer Materialien beruht darauf, daß der *magnetische Widerstand*

$$R_m = \frac{1}{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot A} \quad (5.9)$$

A : Querschnittsfläche in m^2

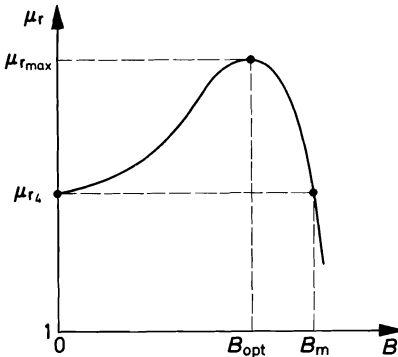


Bild 5.18 Abhängigkeit der Permeabilitätszahl μ_r von der magnetischen Induktion B (μ_{r_4} gemessen bei $H = 4 \text{ mA cm}^{-1}$)

