Fach-Didaktik
Informationstechnologie und Elektrotechnik

Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)

Ein Puzzle

Gruppenunterricht zum Thema:	Elektromagnetische Verträglichkeit
Fach:	Elektrotechnik
Ausbildungsinstitution:	Technische Hochschule
Voraussetzungen:	Fundiertes Grundwissen im Fach Elektrotechnik oder abgeschlossenes Grundstudium
Bearbeitungsdauer:	200 min.
Autoren:	Jon Riatsch Rainer Schmidt
Betreuer:	Prof. Dr. Jean Weiler
Fassung:	September '94, rev. 2003 (Glf)

Elektromagnetische Verträglichkeit EMV

Voller Stolz haben Sie eine elektrische Schaltung mit einigen Operationsverstärkern und Logikbausteinen aufgebaut. Im Betrieb sehen Sie, dass Ihre Schaltung zwar prinzipiell funktioniert, aber zwischendurch plötzliche, unerklärliche Störfälle auftreten. Sie messen einige Signale nach und bemerken, dass dem Nutzsignal Störungen überlagert sind. Was nun?
Meist liegen die Ursachen solcher Störungen in der unzureichenden Elektro-Magnetischen-Verträglichkeit (EMV) Ihrer Schaltung. Diese Lektion soll aufzeigen, was EMV umfasst und Ihnen einige konkrete Tips mitgeben, wie Sie eine Schaltung EMV-gerecht aufbauen können.

Unsere Zielsetzungen

Nach dem Unterricht werden Sie Antworten auf folgende Fragen kennen:

EMV-Ursachen

- Was sind Störquellen?
- Wie breiten sich Störsignale aus?
- Wie gelangen Störsignale auf Ihre Nutzsignale?

Schutzmassnahmen

- Was beinhaltet ein gutes Print-Layout einer gedruckten Schaltung?
- Wie können trotz gestörten Umfelds empfindliche Signale sicher übertragen werden?

Experimentelle Überprüfung

- Wie stark können Störsignale auf Leiterbahnen einkoppeln?

Begründung:

- Wenn nicht ein Mindestmass an EMV-Grundregeln berücksichtigt wird, so erfüllen komplexe Schaltungen in der Regel ihre Funktion nicht.
- Oft arbeiten unterschiedliche elektrische Einrichtungen auf engstem Raum nebeneinander. Die Gefahr einer gegenseitigen Störung ist gross. Erst das Einhalten der EMV-Grundsätze ermöglicht den Betrieb ohne gegenseitige Störungen.
- Elektromagnetische Verträglichkeit ist kein Modetrend oder Werbetrick, sondern ein immer wichtiger werdendes Qualitätsmerkmal elektrischer Einrichtungen. Bereits heute existieren verbindliche, gesetzliche Vorschriften für EMV.

Arbeitsweise

Sie arbeiten nach der Puzzle-Methode. Dazu wird der Stoff in vier Teilgebiete unterteilt.

1. Zuerst arbeiten Sie in einer Gruppe an einem Teilgebiet. Am Ende dieser ersten Runde sind Sie Experte auf diesem Gebiet. Daher nennen wir diesen Teil **Expertenrunde**.
2. Jetzt werden neue Gruppen gebildet. In jeder Gruppe ist mindestens ein Experte aus jedem Teilgebiet vertreten. Die Experten unterrichten sich nun gegenseitig den Stoff Ihres Fachgebietes. Wir nennen diese Phase **Unterrichtsrunde**.
3. In einem praktischen Versuch wenden Sie das Gelernte an.
4. Als Lernkontrolle füllen Sie zuhause einen Fragebogen aus.

Inhaltsverzeichnis

Allgemeine Arbeitsanleitung 5

Übersicht und Umfeld von EMV
- Arbeitsanleitung 7
- Lernstoff 9
- Persönliche Lernkontrolle 16
- Antworten auf die persönliche Lernkontrolle 17

Kapazitive Kopplung
- Arbeitsanleitung 21
- Lernstoff 22
- Persönliche Lernkontrolle 26
- Antworten auf die persönliche Lernkontrolle 28

Magnetische Kopplung
- Arbeitsanleitung 32
- Lernstoff 33
- Persönliche Lernkontrolle 37
- Antworten auf die persönliche Lernkontrolle 39

Impedanzkopplung
- Arbeitsanleitung 43
- Lernstoff 44
- Persönliche Lernkontrolle 49
- Antworten auf die persönliche Lernkontrolle 51

Allgemeine Unterlagen für alle
- Elektromagnetische Beeinflussung 57
- Mini-Didaktik 58

Praktischer Versuch 59

Fragebogen zur EMV

Serie A 64
- Fragebogen 64
- Antworten 68

Serie B 73
- Fragebogen 73
- Antworten 77

Quellenverzeichnis 83

Anhang *(als separates file)*

Informationen für die Lehrperson
- Was wir als Verfasser dieses Puzzles erreichen möchten A-2
- Praktischer Versuch A-3
  - Messresultate der Kapazitiven Kopplung A-5
  - Messresultate der Magnetischen Kopplung A-6
  - Fotografie der Versuchsschaltung A-7
  - Printlayout - Vorlage A-8

Allgemeine Arbeitsanleitung

In der Puzzle-Methode arbeiten Sie zuerst in der Expertenrunde und anschliessend in der Unterrichtsrunde. In der folgenden Skizze ist die Organisation des Puzzles mit vier Teilgebieten (A ... D) dargestellt.

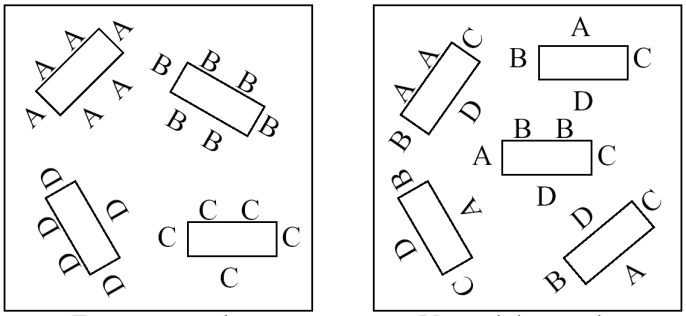


Bild 1: Arbeitsweise beim Puzzle

1. Expertenrunde

An Ihrem Arbeitsplatz finden Sie die Unterlagen zur Expertenrunde. Auf den Unterlagen finden Sie neben der Gruppenangabe noch einen Farbpunkt. Bilden Sie jetzt zusammen mit ihren Kollegen gleicher Gruppennummer die Expertengruppe. Innerhalb der Gruppe erledigen Sie der Reihe nach folgende Aufgaben:

1.1 Selbststudium

1. Erarbeiten Sie sich in Einzelarbeit den Stoff. Wie Sie genau vorgehen müssen, steht in der Anleitung zur Expertenrunde.
2. Anschliessend sollen Sie anhand der persönlichen Lernkontrolle überprüfen, was Sie bereits gut beherrschen und welche Teile des Stoffes Sie nochmals etwas genauer anschauen sollten. Die Fragen dienen allein Ihnen als persönliche Lernkontrolle. Niemand beurteilt, wie gut und wie schnell Sie die Aufgaben lösen können.

1.2 Diskussion und Unterrichtsvorbereitung

1. Versuchen Sie innerhalb Ihrer Expertengruppe, alle noch verbliebenen Unklarheiten aus dem Selbststudium zu klären. Das Entscheidende ist, dass Sie sich nach der Diskussion mit Ihren Experten-Kollegen auf Ihrem Spezialgebiet sicher fühlen und es Ihren Kollegen in der Unterrichtsrunde beibringen können.
2. Falls Sie innerhalb der Gruppe nicht alle stofflichen Unklarheiten ausräumen konnten, wenden Sie sich nun an Ihren Lehrer.
3. Jetzt, da Sie den Stoff beherrschen, gilt es noch, die Unterrichtsrunde zu planen. Überlegen Sie sich, wie Sie den Stoff Ihren Kameraden aus den anderen Expertenrunden am besten beibringen können. Einige nützliche Tips dazu finden Sie in der Mini-Didaktik.

Ziele der Expertengruppe

- Am Schluss der Expertenrunde sind Sie in der Lage, Ihren Kollegen den gelernten Stoff zu vermitteln.
- Sämtliche Vorbereitungen für die Unterrichtsrunde sind abgeschlossen.

2. Unterrichtsrunde

2.1 Wissensaustausch

1. Nun bilden wir die Unterrichtsrunde. Sie setzen sich jetzt mit denjenigen Experten der anderen Teilgebiete zusammen, die denselben Farbpunkt wie Sie auf dem Deckblatt ihrer Unterlagen besitzen.
2. Tauschen Sie dann Ihr Expertenwissen untereinander aus.

2.2 Praktische Überprüfung

1. Wechseln Sie nun zu Ihrem Gruppenarbeitsplatz im Labor. Auch er ist mit demselben Farbpunkt versehen wie Ihre Unterlagen.
2. Studieren Sie zuerst die Versuchsanleitung.
3. Führen Sie anschliessend die in der Anleitung beschriebenen Versuche durch.

Ziele der Unterrichtsrunde

1. Jeder von Ihnen kennt nach dem Wissensaustausch die Koppelmechanismen und die daraus abgeleiteten Massnahmen zur Verminderung von EMV-Störungen.
2. Sie wissen nach dem Versuch, welche Leiterbahnanordung bei bekanntem Koppelmechanismus zu bevorzugen ist.

3. Zeitplan

Expertenrunde

- 30 min Selbststudium mit persönlicher Lernkontrolle
- 30 min Diskussion und Stoffvorbereitung für die Unterrichtsrunde

Unterrichtsrunde

- 90 min Informationsaustausch
- 15 min Versuchsanleitung durchlesen
- 30 min Versuchsdurchführung

Expertenrunde A
Übersicht und Umfeld von EMV

Arbeitsanleitung

Übersicht

Elektromagnetische Verträglichkeit ist ein interdisziplinäres Fach. Es umfasst so unterschiedliche Gebiete wie:

- Art und Modellierung von EMV-Phänomenen
- Recht und Haftung
- Beziehungen von EMV zu anderen Disziplinen
- Kosten und Entwicklungsaufwand von EMV
- Ziele der EMV-Arbeit in der Entwicklung eines elektrotechnischen Produktes.

Diese Expertenrunde bietet einen guten Überblick über die oben aufgeführten Themenkreise.

Aus der allgemeinen Arbeitsanleitung sind Ihnen die übergeordneten Ziele sowie der Zeitplan für die Expertenrunde bekannt. Die fachlichen Ziele und das genaue Vorgehen folgen jetzt.

Fachliche Ziele

- Sie kennen die wichtigsten Normen und Normierungsgremien im Bereich Elektrotechnik sowie den Unterschied zwischen EMC, EMI und EMS. Sie können diese Begriffe Dritten erläutern.
- Sie verstehen die Berührungspunkte der EMV zu anderen Disziplinen.
- EMV fliesst direkt in die Entwicklungskosten und -zeiten eines Gerätes ein. Sie kennen diese Zusammenhänge.
- Sie können mindestens sechs Störquellen aufzählen und kennen die verschiedenen Ausbreitungspfade.

Vorgehen

1. Machen Sie sich zuerst mit dem EMV-Beeinflussungsmodell vetraut. Lesen Sie dazu das Kapitel "Elektromagnetische Beeinflussung" aus Ihren Unterlagen.
2. Lesen Sie anschliessend das Kapitel "Übersicht und Umfeld von EMV". Machen Sie sich dabei Notizen und überlegen Sie sich, welche Fragen Sie in der ganzen Runde mit Ihren Expertenkollegen besprechen wollen.
3. Führen Sie die "Persönliche Lernkontrolle" durch.
4. Versuchen Sie innerhalb Ihrer Expertengruppe, die noch ungeklärten Fragen über den Stoff zu beantworten. Falls Sie zu einzelnen Fragen keine Lösung finden, können Sie sich an den Lehrer wenden.
5. Jetzt, da Sie den Stoff beherrschen, müssen Sie sich noch überlegen, wie Sie ihn Ihren Kollegen vermitteln wollen. Einige Tips dazu finden Sie im Kapitel "Mini-Didaktik".
   Beachten Sie, dass Ihre Vorbereitungen vor Beginn der Unterrichtsrunde abgeschlossen sein müssen!

Lernstoff

Als potentielle Störquellen müssen alle Einrichtungen, Teile von ihnen und Ereignisse betrachtet werden, bei denen eine elektromagnetische Energieumsetzung erfolgt. Bei der Planung und dem Aufbau einer Schaltung oder eines Systems ist daher eine sorgfältige Untersuchung der elektromagnetischen Umgebung hinsichtlich relevanter Störgrössen und Störquellen erforderlich.

Störungsrelevante Parameter einer Störquelle sind:

- die Änderungsgeschwindigkeit, d.h. die Anstiegs- und Abfallgeschwindigkeit bzw. die Frequenz der Störgrösse.
- der Scheitelwert der Störgrösse.

Die Kopplung von der Quelle zur Senke erfolgt nach den Gesetzen der Energieübertragung im elektromagnetischen Feld. Für praktische Betrachtungen können aufgrund der Wellenlängen der Störgrössen zwei Bereiche unterschieden werden:

Wellenlänge sehr viel grösser als die charakteristischen Abmessungen von Quelle und Senke

Für diesen Bereich darf die Kopplung durch ein konzentriertes, lineares Koppelelement modelliert werden. Man unterscheidet dabei zwischen:

- der galvanischen Kopplung über gemeinsame Impedanzen der sich beeinflussenden Stromkreise,
- der kapazitiven Kopplung über ein elektrisches Feld,
- der magnetischen Kopplung über ein Magnetfeld.

Wellenlänge in der Grössenordnung oder kleiner als die Abmessungen von Quelle und Senke

Für diesen Bereich ist die Modellierung mit konzentrierten Elementen nicht zulässig. Sie muss über die Wellenlehre erfolgen. Die Kopplung erfolgt direkt über elektromagnetische Wellen. Man unterscheidet zwischen:

- Wellenkopplung über Wellenausbreitung auf Leitungen,
- Strahlungskopplung über Wellenausbreitung im freien Raum.

Wellenkopplung auf Leitungen

Quelle der Wellenkopplung ist eine auf dem Hin- und Rückleiter fortschreitende elektromagnetische Welle. Sie wird von einem elektrischen und einem magnetischen Feld begleitet. Die kritische Leitungslänge, unterhalb der mit dem Phänomen der Wellenbeeinflussung gerechnet werden muss, hängt von der Störgrössenfrequenz ab:

$$\text{Leitungslänge}_{\text{kritisch}} = \frac{c}{f} \quad \text{wobei} \quad c = \text{Lichtgeschwindigkeit} \approx 300'000\,\text{km/s}$$
$$f = \text{Frequenz}$$

Strahlungskopplung im freien Raum

Die Ursache der Strahlungskopplung sind elektromagnetische Wellen, welche sich von den Stromkreisen ablösen und sich mit Lichtgeschwindigkeit im Raum ausbreiten. Zwischen der

Wellenlänge λ und der Frequenz f der Wellen besteht die Beziehung:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Das Strahlungsfeld ist ebenfalls durch die elektrischen und magnetischen Felder gekennzeichnet. Gestrahlte Störgrössen werden über als Antenne wirkende Teile abgestrahlt oder empfangen. Dabei ist der Begriff der Antenne sehr weit zu fassen. Leiterbahnen, Drähte, isolierte Metallteile im Feld, Schlitze usw. können alle für bestimmte Frequenzen als Sender oder als Empfänger wirken. Auf diese Weise können Störungen durch Rundfunksender oder andere elektrische Einrichtungen und Geräte in Schaltkreise eingestrahlt werden. Die dadurch verursachten Störungen können weitgehend mit den Modellvorstellungen der kapazitiven und der magnetischen Kopplung behandelt werden. Deshalb soll hier nicht weiter darauf eingegangen werden. Unser Hauptaugenmerk wird sich daher auf die Koppelmechanismen richten, bei denen die Wellenlängen der Störgrössen grösser sind als die charakteristischen Abmessungen von Quelle oder Senke.

Übertragungswege von EMV-Störungen

Hinsichtlich der Übertragungswege für die Störgrössen auf die Störsenken wird zwischen gestrahlten und leitungsgeführten Störgrössen unterschieden. In Bild 2 sind die Übertragungswege der Störgrössen in einer Übersicht dargestellt.

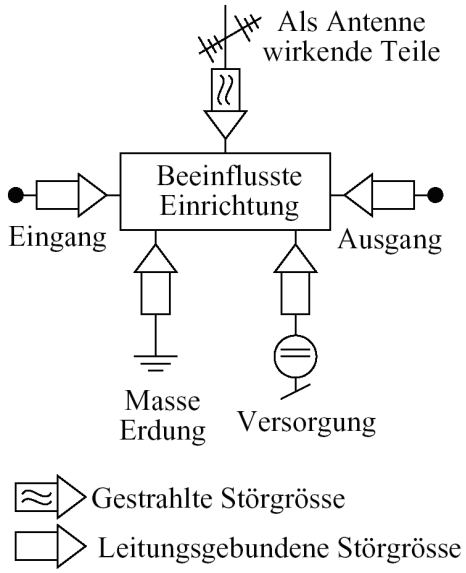


Bild 2: Übertragungswege von EMV-Störungen

Begriffe wie EMV, EMC, EMI und EMS

Was heisst verträglich? Was ist EMV?

- *Umgangssprachlich* signalisiert das Wort "verträglich" Eigenschaften wie bekömmlich, friedfertig, nicht aggressiv, kompromissbereit, Bereitschaft zu Rücksichtnahme und Toleranz. In Verbindung mit Individuen versteht man unter "verträglich" deren Fähigkeit, sich relativ problemlos in bestimmte soziale Umfelder einzuordnen.
- *Fachsprachlich,* eingeschränkt auf die Phänomenwelt der Elektrotechnik, charakterisiert das Wort "verträglich" ganz ähnlich die Fähigkeit elektrotechnischer Betriebsmittel in ihrer elektromagnetischen Umgebung zufriedenstellend zu arbeiten, ohne diese Umgebung und andere sich darin befindlichen Einrichtungen elektromagnetisch unzulässig zu belasten.

Daraus lässt sich folgende Definition für die *Elektromagnetische Verträglichkeit EMV* herleiten:

1. EMV stellt die Eigenschaft einer elektrischen Einrichtung in ihrer elektromagnetischen Umgebung zufriedenstellend zu funktionieren dar.
2. EMV beinhaltet ferner, dass andere in dieser Umgebung befindlichen elektrischen Einrichtungen nicht unzulässig stark elektromagnetisch belastet werden.

Elektromagnetische Verträglichkeit ist somit kein Modetrend oder Werbetrick, sondern eine notwendige, quantitativ beschreibbare und gesetzlich verankerte Produkteigenschaft. Sie repräsentiert somit in erster Linie ein Qualitätsmerkmal für elektrische Einrichtungen, das im wesentlichen durch drei EMV-Kenngrössen charakterisiert werden kann:

- Eigenstörfestigkeit
- Fremdstörfestigkeit
- Störaussendungs- oder Störemissionsgrad

Die Eigenstörfestigkeit beschreibt die Funktionsbeständigkeit gegen eigene und die Fremdstörfestigkeit jene gegen fremde Störungen. Mit dem Störaussendungsgrad werden die von der Einrichtung nach aussen hin erzeugten elektromagnetischen Störungen quantitativ erfasst.

Häufig werden englische Begriffe zur Beschreibung der EMV-Phänomene verwendet. Sie werden daher an dieser Stelle kurz eingeführt:

EMC Electromagnetic Compatibility

EMC entspricht der Fähigkeit einer elektrischen Einrichtung, in einer vorgegebenen elektromagnetischen Umgebung einwandfrei zu funktionieren und dabei alle sich in dieser Umgebung befindlichen Einrichtungen nicht unzulässig zu beeinflussen. EMC entspricht dem deutschen Begriff EMV.

EMS Electromagnetic Susceptibility

EMS beschreibt die Fähigkeit einer elektrischen Einrichtung in stark gestörter elektromagnetischen Umgebung einwandfrei zu funktionieren. Es stellt somit ein Mass für die Immunität der Einrichtung gegen elektromagnetische Beeinflussungen dar.
Der deutsche Begriff für EMS heisst "elektromagnetische Störfestigkeit".

EMI Electromagnetic Interference

EMI beschreibt die elektromagnetische Störbeeinflussung einer elektrischen Einrichtung auf andere benachbarte Einrichtungen.
Der deutsche Begriff für EMI heisst "elektromagnetische Störbeeinflussung" und wird mit dem Störemissionsgrad quantitativ erfasst.

Arten von Störquellen

Die Störquellen lassen sich in verschiedene Gruppen einteilen. Bekannt ist Ihnen bereits die Unterscheidung zwischen systemeigenen, internen und systemfremden, externen Störquellen.

Bei den *externen Störquellen* kann zwischen natürlichen und künstlichen Störquellen unterschieden werden.

- *Natürliche Störquellen*

  Zu den relevanten *natürlichen Störquellen* zählen im wesentlichen die atmosphärischen und die elektrostatischen Entladungen. Unter den atmosphärischen Entladungen fallen die Blitzentladungen. Elektrostatische Aufladungen entstehen, wenn feste Stoffe aneinander gerieben werden.

  Beispiele für elektrostatische Spannungsquellen sind:

  - lackierte, gewachste oder plastikbeschichtete Arbeitsstühle oder -tische
  - Bekleidung und Fussböden aus synthetischen Stoffen
  - ungeerdete Werkzeuge

  Elektrostatische Entladungen oder Funkenentladungen treten dann auf, wenn eine elektrostatische Spannungsquelle mit einem Gerät oder einem Gerätegehäuse in Berührung kommt.

- *Künstliche Quellen*

  Unter den *künstlichen Quellen* fallen alle normal betriebsmässig und alle unvorhergesehen, im Störungsfall ablaufenden elektrophysikalischen Vorgänge.
  Betroffen davon sind Einrichtungen:

  1. der Energieerzeugung, -übertragung -verteilung, -umwandlung und -anwendung
  2. Anlagen der feld- oder leitungsgebundenen Informationsverarbeitung und Informationsübertragung

  Beispiele künstlicher Störquellen sind:

  - Fernseh-, Radio- oder Mobilfunksender
  - Navigations- und Antriebssysteme
  - Schweissanlagen, Leuchtstofflampen, Schaltnetzteile
  - Takt- und Zündsysteme für Motoren

  Diese Aufzählung kann noch erweitert werden durch alle Anlagen, bei denen periodische oder zeitlich zufällige aperiodische Schaltvorgänge auftreten wie leistungselektronische Systeme oder Hochspannungsanlagen.

Bei den *internen Störquellen* handelt es sich um funktionsbedingte Abläufe innerhalb der elektrischen Einrichtung wie:

- Schaltvorgänge
- Auf- und Entladevorgänge magnetischer und kapazitiver Bauelemente
- Signalwechsel auf Daten- und Steuerleitungen
- Rauschen und Wellenphänomene

Beziehungen von EMV zu anderen Disziplinen

Der EMV kommt eine interdisziplinäre Bedeutung bei der Planung, Entwicklung, Herstellung und Nutzung elektrotechnischer Erzeugnisse zu.

Neue Geräte, Systeme oder Anlagen werden entwickelt mit der Zielsetzung:

- eine beabsichtigte Funktion auszuführen. *Arbeitsaufgabe*
- unter gegebenen Einsatzbedingungen und während eines angemessenen Nutzungszeitraumes verlässlich zu funktionieren. *Zuverlässigkeit*

Dabei dürfen solche Anlagen ihre Umgebung und andere sich darin befindlichen Einrichtungen während des normalen Betriebes nicht :

- in unzulässiger Weise belasten *Verträglichkeit*
- gefährden *Arbeitssicherheit, Schutz der Gesundheit*
- im Havariefall bedrohen *Technische Sicherheit, Brandschutz*

In der nachfolgenden Darstellung sind die Beziehungen des Fachgebietes EMV zu den wichtigsten benachbarten Disziplinen aufgeführt.

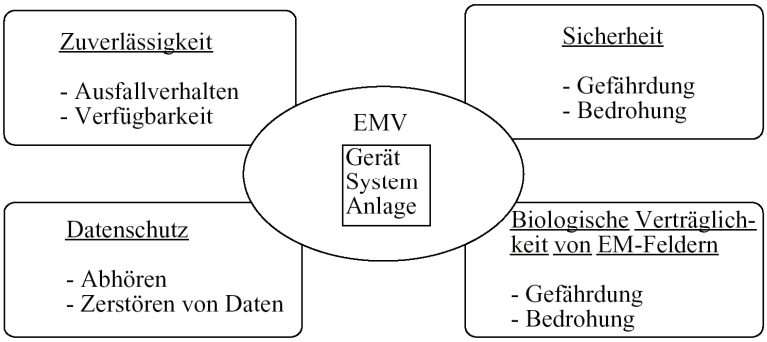


Bild 3: Beziehungen des Fachgebietes EMV zu anderen Disziplinen

Recht und Haftung

Hersteller und Importeure von Elektrogeräten sind dem Gesetzgeber gegenüber verantwortlich, dass ein von ihnen auf den Markt gebrachtes Produkt elektromagnetisch verträglich ist. Um die elektromagnetische Verträglichkeit eines Produktes als wesentliches Qualitätsmerkmal effektiv planen, realisieren, prüfen und ausweisen zu können, bedarf es einer Reihe verbindlicher Festlegungen, die als Normen festgehalten sind. Weil es nicht ganz einfach ist, sich einen Überblick in der Normenvielfalt zu verschaffen, möchten wir an dieser Stelle die wichtigsten Normierungsgremien und die verschiedenen Arten von Normen in einer kurzen Übersicht vorstellen:

"- *Normierungsgremien*

- **IEC** (International Electrotechnical Commission)
  IEC-Normen beruhen auf internationalen Vereinbarungen. Sie stellen für die einzelnen Mitgliedstaaten Empfehlungen dar und müssen nicht gesetzlich befolgt werden.
- **CENELEC** (Commission Européenne de Normalisation Electrotechnique)
  CENELEC-Normen beruhen auf einer europäischen Übereinkunft; jedes CENELEC-Mitglied ist verpflichtet, diese Norm unverändert als nationale Norm zu übernehmen.
- **SEV** (Schweizerischer Elektrotechnischer Verein)
  SEV-Normen sind rein schweizerische (nationale) Normen ohne Wirkung nach aussen. Von der Schweiz übernommene CENELEC-Normen haben Priorität vor den nationalen.

- *Arten von Normen*

- **Basic Standards**
  beschreiben die grundlegenden Phänomene und Messverfahren zum Nachweis der EMV und des Einhaltens der geforderten Grenzwerte.
- **Generic Standards**
  beschreiben die Anforderungen bezüglich Störaussendung und Störfestigkeit unter Berücksichtigung einer bestimmten Umgebungsart wie Industrie, Wohnbereich und anderen mehr.
- **Product Standards**

schreiben die besonderen Anforderungen an eine bestimmte Produktegruppe vor. Sie müssen sich an die Basic und Generic Standards anlehnen.

" (Weiler J. 1994, 1-6)

Normen sind ein geeignetes Mittel um sicherzustellen, dass neben den unterschiedlichen Einzelinteressen auch die Interessen der Allgemeinheit gewahrt bleiben. Sie sorgen darüber hinaus für gleiche Konkurrenzbedingungen für alle Anbieter.

Kosten und Entwicklungsaufwand von EMV

Elektromagnetische Verträglichkeit ist aufwendig und mit Kosten verbunden. Sie ist daher bereits beim Systementwurf als wichtiges Anliegen mitzuberücksichtigen. EMV muss wie alle anderen Qualitätsmerkmale geplant und ihre Verwirklichung im Zuge der Realisierung eines Projektes durch die Qualitätssicherung erfasst und durchgesetzt werden. Je später die Notwendigkeit von Massnahmen für die EMV im Ablauf des Projektes erkannt wird, desto schwieriger und weiter von der Ideallösung entfernt können sie realisiert werden. Nachbesserungen, Nachrüstungen oder sogar Nachentwicklungen am fertigen Objekt sind darüber hinaus sehr kostspielig. Überschlagsmässig nimmt die relative Kostensteigerung bei zu spätem Einbringen von EMV-Massnahmen exponentiell zu.

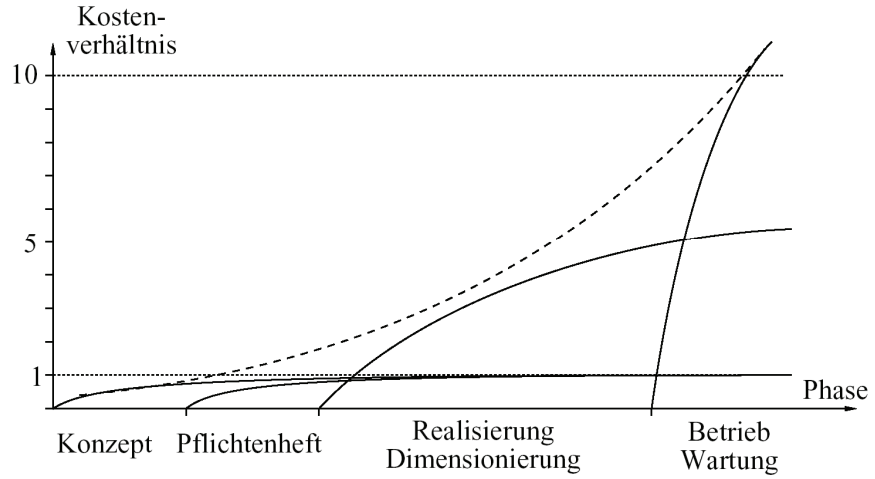
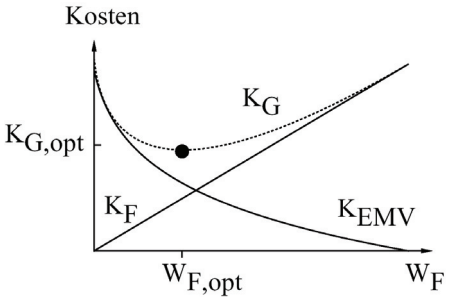


Bild 4: Kosten der EMV-Massnahmen in Funktion des Startzeitpunktes

Konkret geht es bei der optimalen Wahrnehmung der EMV-Anliegen darum, systemeigene Störeinflüsse auszuschliessen oder zumindest sicher zu beherrschen. Den systemfremden Störungen muss mit jeweils gerechtfertigtem Aufwand durch Schirmung, Filterung, Wahl von Konzepten mit erhöhter Störsicherheit usw. begegnet werden. In bezug auf den Störemissionsgrad müssen die bestehenden Vorschriften und Normen eingehalten werden.

Gerechtfertigter Aufwand bedeutet, dass die Gesamtkosten möglichst gering sein sollen. Die Gesamtkosten für EMV-Aufwendungen sind die Summe aus den störfestigkeitsfördernden Massnahmen in der Entwicklung und den Kosten, welche im Fehlerfall für die Nachbesserung, Nachrüstung, Nachentwicklung und für allfällige Schadensersatzforderungen anfallen. Bei kostenmässig optimal gestalteten EMV-Massnahmen streben die Gesamtkosten einem Minimum zu.
In Abbildung 5 sind die Gesamtkosten in Funktion der Fehlerwahrscheinlichkeit bei elektromagnetischer Unverträglichkeit dargestellt.



W_F: Unverträglichkeitsbedingte Fehlerwahrscheinlichkeit

K_F: Kosten, die durch fehlerhafte EMV-Systemarbeit entstehen

K_{EMV}: Kosten, die durch störsicherheitsfördernde Massnahmen anfallen

$K_G = K_{EMV} + K_F$; Gesamtkosten

Bild 5: Prinzipieller Zusammenhang zwischen Kosten und Fehlerwahrscheinlichkeit

Neben den Kosten darf auch der zeitliche Aspekt nicht vernachlässigt werden. Bei immer kürzer werdenden Entwicklungs- und Innovationszyklen kommt dem Zeitpunkt der Markteinführung immer grössere Bedeutung zu. Über Erfolg und Misserfolg eines Produktes am Markt entscheidet nicht zuletzt die Frage, ob und wie lange es vor der Konkurrenz die Marktreife erlangt hat. In Bild 6 werden die Investitionskosten in Funktion der Lebenszeit eines Produktes am Markt gezeigt. Muss nun ein Produkt beispielsweise wegen mangelnder EMV nachgebessert werden, geht dabei wertvolle Zeit verloren. Dadurch kann die Rentabilitätsschwelle erst später oder im schlimmsten Fall gar nie erreicht werden. Dies ist vor allem dann der Fall, wenn die Konkurrenz in der Zwischenzeit das grosse Geschäft bereits getätigt hat.

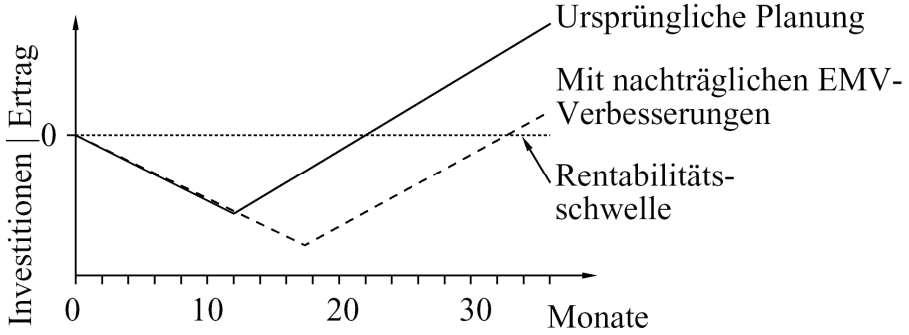


Bild 6: Investitionskosten und Ertrag eines Produktes am Markt

Ziele der EMV-Arbeit

Das Ziel aller EMV-Massnahmen besteht darin, durch zielgerichtete Anwendung technischer und organisatorischer Massnahmen eine gute EMV-Qualität im Endprodukt sicherzustellen. Erste Hinweise, wie dies technisch erreichbar ist, sind:

- *Entstehung von Störgrössen unterdrücken* durch Massnahmen direkt am Entstehungsort. Darunter versteht man beispielsweise die Anwendung emissionsarmer Schaltungen und Konstruktionskonzepte. Auch das Beschalten stark störender Bauelemente oder Geräte wie Leistungsschalter und Stromrichter trägt zur Störgrössenunterdrückung bei.

- *Abschwächen und Unterdrücken der Ausbreitung von Störgrössen* durch Filtern, Schirmen, räumliches Trennen, galvanisches und elektromagnetisches Entkoppeln und durch EMV-gerechtes Erden.

- *Erhöhen der Störfestigkeit* jener Geräte- und Anlagenteile, welche einer starken Störbeeinflussung ausgesetzt sind. Dies erfolgt durch Wahl eines geeigneten Informationsverarbeitungskonzeptes, durch den Einsatz von Filtern, durch Schirmung, Potentialtrennung, Stabilisierung der Versorgungsspannung und durch geeignete Erdung.

In der Praxis werden alle drei Möglichkeiten gleichzeitig eingesetzt, um die Ziele der EMV zu erreichen.

Persönliche Lernkontrolle

Frage 1: **Elektromagnetische Verträglichkeit EMV als Qualitätsmerkmal**
Sie wollen einer Bank eine Unterbruchfreie Stromversorgung verkaufen. Ihre Entwicklungsabteilung sagt Ihnen, dass sich Ihr Produkt durch eine sehr gute elektromagnetische Verträglichkeit auszeichnet. Als Verkaufsleiter wollen Sie diesen Vorzug gegenüber der Konkurrenz als Verkaufsargument voll ausschöpfen.

a) Erklären Sie den Bankverantwortlichen, was EMV bedeutet. Die Definition des Begriffs genügt als Antwort an dieser Stelle. (K1)

b) Der Preis allein ist für den Kaufentscheid der Bank nicht von entscheidender Bedeutung. Überlegen Sie sich, welche Argumente für die Bankleute noch grösseres Gewicht haben könnten. Sie sollten in der Lage sein, mindestens drei Argumente aufzuzählen, die für Ihre EMV-gerechte Anlage spricht. (K3)

Frage 2: **Elektromagnetische Verträglichkeit EMV in der Produkteentwicklung**
Sie müssen einen Betrieb sanieren, der in finanziellen Schwierigkeiten steckt. Bei Ihrer Problemanalyse entdecken Sie, dass das Unternehmen der EMV bisher keine Beachtung geschenkt hat. Durch dauernde Nachbesserungen und Nachentwicklungen entstanden dem Unternehmen hohe Verluste. Die Geschäftsleitung erteilt Ihnen den Auftrag, sofort ein EMV-Qualitätssicherungskonzept auszuarbeiten.

a) Nach welchen Grundsätzen bauen Sie Ihr EMV-Qualitätssicherungskonzept auf? Sie sollen sich dabei zuerst auf Massnahmen im organisatorischen Bereich des Unternehmens und im Projektablauf beschränken. Nennen Sie mindestens drei wesentliche Merkmale Ihres Konzeptes. (K5)

b) Formulieren Sie drei Zielsetzungen im technischen Bereich Ihres EMV-Konzeptes. Nennen Sie zu jeder Zielsetzung mindestens zwei konkrete Massnahmen, wie sie das Konzept technisch verwirklichen. (K4)

Frage 3: **Elektromagnetische Störquellen**
Sie unterrichten an einer FH allgemeine Elektrotechnik. Ein Schüler zeigt Ihnen eines Tages folgende Figur aus einem Buch. Im Buch sind die Begriffe leider nicht erläutert. Der Schüler fragt Sie, was er sich unter den Begriffen konkret vorzustellen hat.

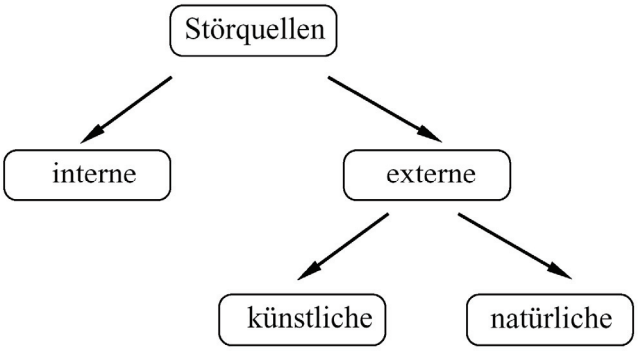


Bild 7: Arten von Störquellen

a) Erklären Sie dem Schüler die Begriffe "interne, externe, natürliche und künstliche Störquelle" mit eigenen Worten. (K2)

b) Ergänzen Sie Ihre Erklärung noch mit einigen praktischen Beipielen. Zu jedem Begriff sollten Sie mindestens ein Beispiel kennen. Falls Sie insgesamt zehn Beispiele aufzählen können, kennen Sie sich auf dem Gebiet der elektromagnetischen Störquellen sehr gut aus. (K1)

Antworten auf die persönliche Lernkontrolle

Antwort 1: **Elektromagnetische Verträglichkeit EMV als Qualitätsmerkmal**

a) EMV repräsentiert ein gesetzlich vorgeschriebenes Qualitätsmerkmal für elektrische Einrichtungen, das durch zunehmend genauere Vorschriften geregelt wird. Im wesentlichen umfasst die elektromagnetische Verträglichkeit EMV folgende Eigenschaften:

1. EMV stellt die Eigenschaft einer elektrischen Einrichtung dar, in ihrer elektromagnetischen Umgebung zufriedenstellend zu funktionieren.
2. EMV beinhaltet ferner, dass andere in dieser Umgebung befindlichen elektrischen Einrichtungen nicht unzulässig stark elektromagnetisch belastet werden.

b) Ein hohes Mass an elektromagnetischer Verträglichkeit hat zur Folge, dass:

1. die Anlage sehr robust ist gegen interne und externe Störungen.
2. empfindliche und wichtige Einrichtungen in der Umgebung nicht gestört werden.

Dies wirkt sich auf folgende Gebiete positiv aus:

1. Zuverlässigkeit
2. Datenschutz
3. Sicherheit

Hohe Zuverlässigkeit bedeutet geringe Ausfallwahrscheinlichkeit und somit hohe Verfügbarkeit. Guter Datenschutz hat Abhörsicherheit und effizienten Schutz der Daten vor Verlust und Zerstörung zur Folge. Ein hohes Mass an Sicherheit vermindert die Gefährdung und Bedrohung der Mitarbeiter und der Infrastruktur.

Falls Ihre Antwort auf die Frage 1 so ausführlich ausfiel, können Sie getrost zur nächsten Frage übergehen. Hatten Sie bei einzelnen Fragen Schwierigkeiten, empfehlen wir Ihnen, die Abschnitte *"Begriffe wie EMV, EMC, EMI und EMS ...."* und *"Beziehungen von EMV zu anderen Disziplinen"* nochmals etwas genauer anzuschauen.

Antwort 2: **Elektromagnetische Verträglichkeit EMV in der Produkteentwicklung**

a) Das EMV-Qualitätssicherungssystem beruht beispielsweise auf drei der folgenden Grundsätze:

- EMV muss im Projektablauf von Beginn weg mitberücksichtigt werden. Falls die Notwendigkeit von Massnahmen für die EMV erst im Verlaufe des Projektes Beachtung finden, verursacht dies grosse, zusätzliche Kosten. In Bild 5 sind die gravierenden Nachteile bei zu später Berücksichtigung der EMV-Anliegen deutlich erkennbar.
- EMV muss wie alle anderen Qualitätsmerkmale geplant und ihre Verwirklichung im Zuge der Realisierung eines Projektes durch die Qualitätssicherung erfasst und durchgesetzt werden.
- Die Mitarbeiter müssen im EMV-Bereich besser ausgebildet werden. In der Konzept-Phase eines neuen Produktes werden aus Unwissenheit viele Chancen zur Erhöhung der elektromagnetischen Verträglichkeit verpasst.
- Die Einsatzbedingungen eines neuen elektrotechnischen Erzeugnisses müssen im voraus genau erfasst werden. Für die EMV sind insbesondere die geforderte Störfestigkeit EMS sowie die maximal zulässige Störbeeinflussung EMI von Bedeutung. Existierende Normen in diesen Bereichen müssen ebenfalls beachtet werden.

- EMV muss in der Vermarktung eines Produktes einen höheren Stellenwert erlangen. Sie muss als Qualitätsmerkmal angepriesen werden. Findet Sie beim Kunden angemessene Beachtung, so steigt auch die Investitionsbereitschaft in diesem Bereich.

b) Aufgrund des Beeinflussungsmodells lässt sich die elektromagnetische Verträglichkeit technisch auf folgende drei Arten verbessern:

- Entstehung von Störgrössen direkt am Entstehungsort unterdrücken.
- Abschwächen und Unterdrücken der Ausbreitung von Störgrössen.
- Erhöhen der Störfestigkeit an der Senke.

Technisch sollte ein gutes EMV-Konzept daher als Zielsetzungen sowohl Massnahmen an der Störquelle, am Übertragungsweg oder an der Kopplung sowie an der Störsenke vorsehen.

Konkrete technische Massnahmen sind:

- an der *Quelle*
  - Anwendung emissionsarmer Schaltungen
  - Beschalten stark störender Bauelemente wie Leistungsschalter
  - Begrenzung der Flankensteilheit durch die Ansteuerung bei Stromrichtern
- an der *Kopplung:*
  - Filtern und Schirmen
  - Räumliches Trennen
  - galvanisch und elektromagnetisch Entkoppeln
  - EMV-gerechtes Erden
- an der *Senke:*
  - Wahl eines geeigneten Informationsverarbeitungskonzeptes
  - Stabilisierung der Versorgungsspannung
  - Filtern und Schirmen
  - Potentialtrennung

Falls Sie in der Lage waren, die Frage 2 vollständig zu beantworten, können wir Sie nur beglückwünschen. Sie haben damit gezeigt, dass Sie mit dem Gelernten und Ihrer Kreativität etwas Neues anzufangen wissen. Fiel Ihre Antwort noch etwas unvollständig aus, empfehlen wir Ihnen die Abschnitte *"Kosten und Entwicklungsaufwand von EMV"* und *"Ziele der EMV-Arbeit"* nochmals genau durchzulesen.

Antwort 3: **Elektromagnetische Störquellen**

a) Als potentielle Störquellen müssen alle Einrichtungen sowie Ereignisse von ihnen betrachtet werden, bei denen eine elektromagnetische Energieumsetzung erfolgt. Die Störquellen lassen sich in folgende verschiedene Gruppen einteilen:

- *Interne Störquellen*
  Als interne Störquellen werden die im System selbst erzeugten Störungen bezeichnet. Oft wird auch von systemeigenen Störungen gesprochen.
- *Externe Störquellen*
  Die externen Störquellen sind die systemfremden Störungen. Sie gelangen daher von aussen ins System. Bei den externen Störquellen kann zwischen natürlichen und künstlichen Störquellen unterschieden werden.
- *Natürliche Störquellen*
  Zu den relevanten natürlichen Störquellen zählen im wesentlichen die atmosphärischen und die elektrostatischen Entladungen.
- *Künstliche Störquellen*

Unter den künstlichen Quellen fallen alle normal betriebsmässig und alle unvorhergesehenen, im Störungsfall ablaufenden elektrophysikalischen Vorgänge.

b) Konkrete Beispiele zu den genannten Störquellen sind:

- *Interne Störquellen*
  - Schaltvorgänge in leistungselektronischen Systemen
  - Signalwechsel auf Daten- und Steuerleitungen
  - Rauschen von integrierten Bausteinen und Schaltkreisen
- *Externe natürliche Störquellen*
  - Blitze als atmosphärische Entladungen
  - Elektrostatische Entladungen durch Berührung mit Kleidern und Fussböden aus synthetischen Stoffen, mit lackierten oder plastikbeschichteten Möbeln oder mit ungeerdeten Werkzeugen
- *Externe künstliche Störquellen*
  - Hochspannungseinrichtungen
  - Fernseh- und Radiosender
  - Mobil- und Polizeifunkanlagen
  - Schweissanlagen
  - Leuchtstofflampen
  - Schaltnetzteile
  - Umrichtergespeiste Antriebssysteme

Wenn Sie in der Lage waren, die geforderten Begriffe mit eigenen Worten zu erklären und insgesamt zehn Beispiele aufzuzählen, kennen Sie sich auf dem Gebiet der elektromagnetischen Störquellen sehr gut aus. Andernfalls können Sie Ihre Wissenslücken durch nochmaliges Durchlesen des Abschnitts *"Arten von Störquellen"* schliessen.

Nach erfolgreicher persönlicher Lernkontrolle sind Sie gut vorbereitet für die Diskussion innerhalb Ihrer Expertenrunde und die anschliessende Unterrichtsrunde.
Nutzen Sie jetzt die noch verbleibende Zeit bis alle Ihre Kollegen für die Diskussion bereit sind, um sich nochmals jene Abschnitte im Stoff einzuprägen, in denen Sie sich noch nicht so sattelfest fühlen.

Expertenrunde B:
Kapazitive Kopplung

Arbeitsanleitung

Übersicht

Beeinflussen sich Schaltungen über elektrische Felder, so sprechen wir von kapazitiver Kopplung. In diesem Fall gilt für Strom und Spannung die Gleichung der Kapazität. Die Koppelkapazitäten entstehen zwangsläufig durch die räumliche Anordnung elektrischer Schaltungen. In dieser Expertenrunde werden folgende Themenkreise behandelt:

- Kapazitiver Koppelmechanismus
- Erkennen von kapazitiv eingekoppelten Störungen
- Abhilfemassnahmen gegen kapazitiv eingekoppelte Störungen

Aus der allgemeinen Arbeitsanleitung sind Ihnen die übergeordneten Ziele sowie der Zeitplan für die Expertenrunde bekannt. Die fachlichen Ziele und das genaue Vorgehen folgen jetzt.

Fachliche Ziele

- Sie sind im Stande, die kapazitive Kopplung und die dafür massgebende Ersatzschaltung Ihren Kollegen zu erklären.
- Sie kennen mindestens vier Möglichkeiten zur Verringerung von kapazitiv eingekoppelten Störungen.
- Sie wissen, wie Sie kapazitive Störeinflüsse in Ihrer Schaltung nachweisen können.

Vorgehen

1. Machen Sie sich zuerst mit dem EMV-Beeinflussungsmodell vetraut. Lesen Sie dazu das Kapitel "Elektromagnetische Beeinflussung" aus Ihren Unterlagen.
2. Lesen Sie anschliessend das Kapitel "Kapazitive Kopplung". Machen Sie sich dabei Notizen und überlegen Sie sich, welche Fragen Sie in der ganzen Runde mit Ihren Expertenkollegen besprechen wollen.
3. Führen Sie die "Persönliche Lernkontrolle" durch.
4. Versuchen Sie innerhalb Ihrer Expertengruppe, die noch ungeklärten Fragen über den Stoff zu beantworten. Falls Sie zu einzelnen Fragen keine Lösung finden, können Sie sich an den Lehrer wenden.
5. Jetzt, da Sie den Stoff beherrschen, müssen Sie sich noch überlegen, wie Sie ihn Ihren Kollegen vermitteln wollen. Einige Tips dazu finden Sie im Kapitel "Mini-Didaktik".
   Beachten Sie, dass Ihre Vorbereitungen vor Beginn der Unterrichtsrunde abgeschlossen sein müssen!

Lernstoff

Koppelmechanismus

Bei der kapazitiven Kopplung wird die Störgrösse über das elektrische Feld in den Nutzkreis übertragen. Ursache für kapazitive Beeinflussungen sind parasitäre, d.h. schaltungstechnisch nicht beabsichtigte Kapazitäten zwischen Leitern oder leitfähigen Anordnungen, welche zu verschiedenen Stromkreisen gehören.
Aus Bild 8 ist der kapazitive Koppelmechanismus ersichtlich. Der Nutzkreis ist über die parasitäre Koppelkapazität C_k mit dem Störkreis verbunden. Die Spannungsquelle $u_{Stör}$ stellt die Störgrösse dar.

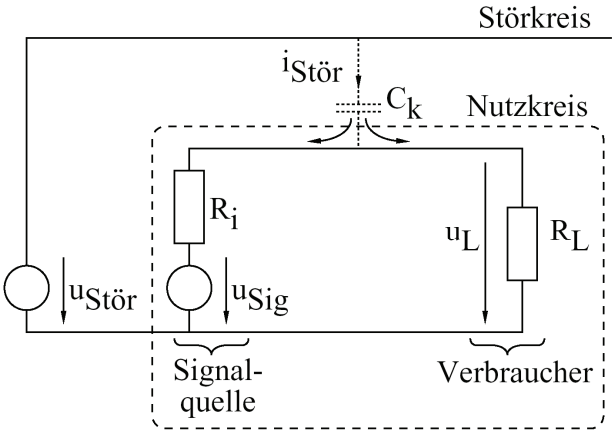


Bild 8: Durch kapazitive Einkopplung gestörter Nutzkreis

Die Spannung u_L an der Last enthält durch den kapazitiv eingekoppelten Störstrom $i_{Stör}$ einen Störanteil. Die Lastspannung beträgt:

$$u_L = \underbrace{\frac{R_L}{R_i + R_L} \cdot u_{Sig}}_{\text{Nutzanteil}} + \underbrace{\frac{R_L \cdot R_i}{R_i + R_L} \cdot i_{Stör}}_{\text{Störanteil}}$$

$$u_L = \frac{R_L}{R_i + R_L} \cdot \left(u_{Sig} + R_i \cdot i_{Stör}\right)$$

Für den Fall, dass die Impedanz der Koppelkapazität gegenüber der resultierenden Gesamtimpedanz des Nutzkreises dominiert, ist der Störstrom nur vom Störkreis und der Koppelkapazität abhängig. Mathematisch ausgedrückt bedeutet dies:

$$\text{Für} \quad \frac{1}{\omega C_k} >> \left(R_i // R_L\right) = \frac{R_i \cdot R_L}{R_i + R_L} \quad \text{gilt:} \quad i_{Stör} \approx C_k \cdot \frac{du_{Stör}}{dt}$$

Für den Störanteil $u_{LStör}$ der Spannung u_L am Verbrauchereingang gilt

- im *Zeitbereich*:

$$u_{LStör} = \frac{R_L \cdot R_i}{R_i + R_L} \cdot i_{Stör}$$

$$i_{Stör} \approx C_k \cdot \frac{du_{Stör}}{dt}$$

- im *Frequenzbereich*:

$$\underline{U}_{LStör} = \frac{R_L \cdot R_i}{R_i + R_L} \cdot \underline{I}_{Stör}$$

$$\underline{I}_{Stör} \approx j\omega C_k \cdot \underline{U}_{Stör}$$

Die Höhe des Störstromes $i_{Stör}$ hängt also ab von

1. der Grösse der Koppelkapazität C_k zwischen der störenden und der gestörten Anordnung.
2. der Änderungsgeschwindigkeit, der Amplitude und der Frequenz der Störspannung $u_{Stör}$.

Die Koppelkapazität C_k wird wesentlich durch die Topologie der Leiter- oder der Leiterbahnanordnungen bestimmt.

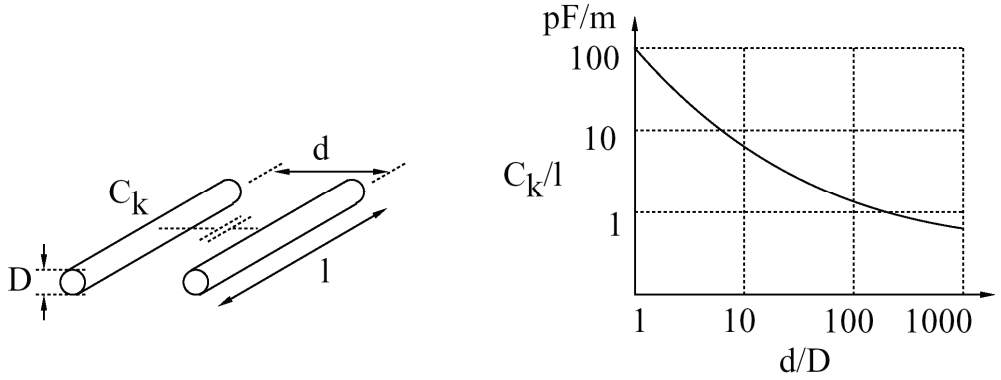


Bild 9: Kapazitätsbelag bei runden parallelen Leitern

Für den einfachsten Fall runder, parallel verlaufender Leiter nach Bild 9 gilt für die Koppelkapazität:

$$C_k = \frac{\pi \cdot \varepsilon_o \cdot \varepsilon_r \cdot l}{\ln\left[\frac{d}{D} + \sqrt{\left(\frac{d}{D}\right)^2 - 1}\right]}$$

Reale Werte für den Kapazitätsbelag C/l liegen in der Grössenordnung von 5 ... 100 pF/m.

Nachweis kapazitiv eingekoppelter Störungen

Der Störanteil an der Lastspannung u_L ist:

- im *Zeitbereich*:

$$u_{LStör} = \frac{R_i \cdot R_L}{R_i + R_L} \cdot i_{Stör} \approx \frac{R_L \cdot R_i}{R_i + R_L} \cdot C_k \cdot \frac{du_{Stör}}{dt}$$

- im *Frequenzbereich*:

$$\underline{U}_{LStör} \approx j\omega C_k \cdot \frac{R_i \cdot R_L}{R_i + R_L} \cdot \underline{U}_{Stör}$$

Er kann, wie in Bild 10 dargestellt, durch eine Seriespannungsquelle $i_{Stör}$ R_i modelliert werden.

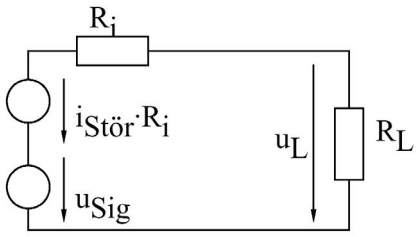


Bild 10: Ersatzschaltbild des kapazitiv gestörten Nutzkreises

Für die Spannung u_L am Verbrauchereingang erhält man die bekannte Beziehung:

$$\begin{aligned} u_L &= \frac{R_L}{R_i + R_L} \cdot u_{Sig} + \frac{R_L \cdot R_i}{R_i + R_L} \cdot i_{Stör} \\ &= \frac{R_L}{R_i + R_L} \cdot \left(u_{Sig} + R_i \cdot i_{Stör}\right) \\ &= u_{LNutz} + u_{LStör} \end{aligned}$$

Bei kapazitiver Kopplung ist der Störspannungsanteil $u_{LStör}$ an der Last abhängig von den Widerständen im Nutzkreis. Zur Diagnose kann deshalb die Signalspannungsquelle durch einen Kurzschluss ersetzt werden. Die Störspannung $u_{LStör}$ muss dann bei der kapazitiven Kopplung wegen $R_i = 0$ verschwinden!

Abhilfemassnahmen

Kapazitiv eingekoppelte Störungen lassen sich durch folgende Massnahmen herabsetzen:

- Koppelkapazitäten möglichst gering halten durch:
  - kurze Verbindungsleitungen
  - grossen Abstand zwischen zwei sich störenden Leitungen
  - Vermeiden von paralleler Leitungsführung bei stark beeinflussungsgefährdeten Leitungen
- Verwenden einer Signalspannungsquelle mit möglichst geringem Innenwiderstand R_i .
- Verringern der Spannungsanstiegsgeschwindigkeit du/dt der Störspannung $u_{Stör}$. Bei hochfrequenten Störspannungen kann dies beispielsweise mit einem einfachen RC-Tiefpass-Filter erfolgen.
- Möglichst niederohmige Ausführung der Impedanzen von kopplungsgefährdeten Stromkreisen. Der Störanteil $u_{LStör}$ der Spannung u_L am Verbrauchereingang wird umso geringer, je kleiner R_i und R_L sind.
- Schirmen der beeinflussungsgefährdeten Leitungen und Stromkreise durch:
  - abgeschirmte Leitungen
  - Schirmleiterbahnen auf Printplatten
  - Schirmwände zwischen einzelnen Leiterplatten oder Systemeinheiten

Im Bild 11 ist der geschirmte Nutzkreis und die dazugehörige Ersatzschaltung dargestellt. Die Schirmung bewirkt, dass der von der Störquelle $u_{Stör}$ getriebene Störstrom über den Schirm und nicht über den Verbraucher abgeleitet wird. Durch die Schirmung wird die wirksame Koppelkapazität $C_k=C_{S1}+C_{S2}$ vom Störkreis auf den Nutzkreis reduziert auf die Kapazität C_{S2}

zwischen Schirm und Nutzkreis. Dies hat bei gleicher Amplitude und du/dt-Belastung der Störquelle eine Verminderung der eingekoppelten Störspannung $u_{LStör}$ am Verbraucher zur Folge.

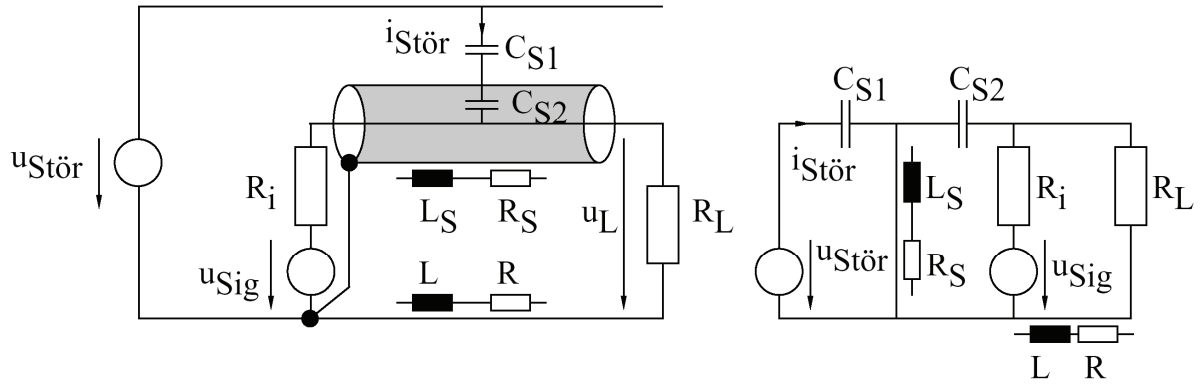


Bild 11: Abschirmung von Leitungen

Dieselbe Wirkung kann auch bei gedruckten Schaltungen durch Einfügen einer Schirmleiterbahn erzielt werden. In Bild 12 ist dies an der identischen Ersatzschaltung deutlich erkennbar.

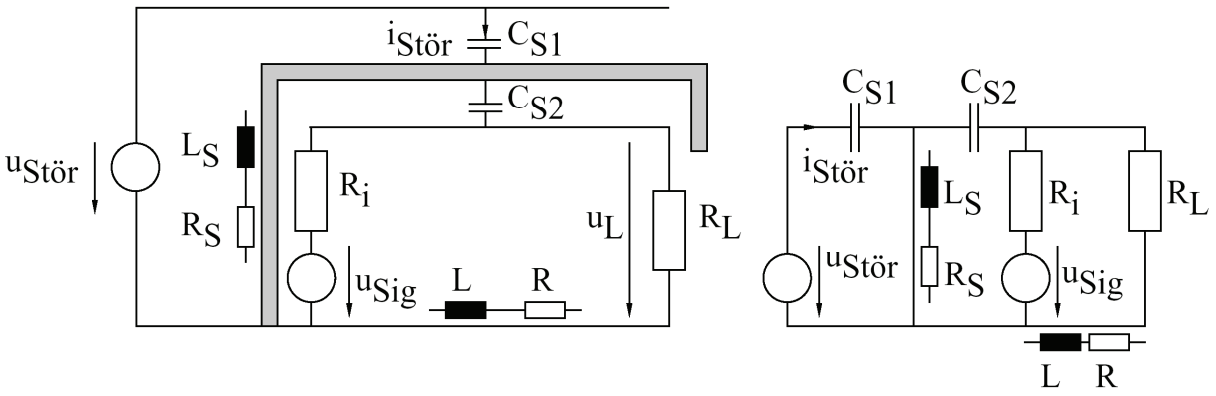


Bild 12: Schirmleiterbahn auf Leiterplatten

Der Schirm muss jeweils aus gut leitendem Material bestehen, damit der über ihn abfliessende Strom keinen nennenswerten Spannungsabfall über der Schirmimpedanz $Z_S=R_S+j\omega L_S$ erzeugt.

In besonders kritischen Fällen bietet sich folgendes an:

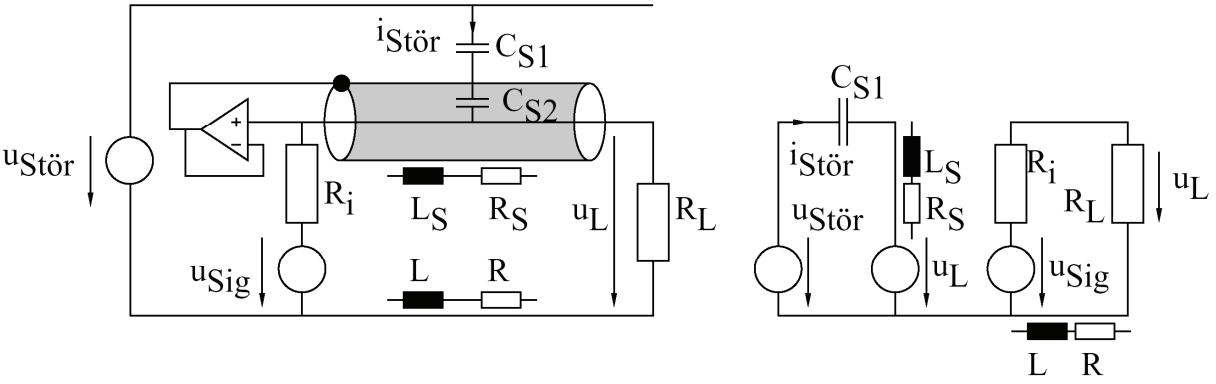


Bild 13: Driven Guard für kritische Fälle

Die Schirmleitung wird über einen Spannungsfolger auf dem gleichen Potential wie das Nutzsignal gehalten. C_{S2} in Abbildung 11 und 12 spielt dann keine Rolle mehr, da die fehlende Potentialdifferenz zwischen Leiter und Schirm keinen kapazitiven Strom über C_{S2} treiben kann. Diese Anordnung nennt man Driven Guard. Der Operationsverstärker muss dabei genügend schnell sein und auch den kapazitiven Störstrom von C_{S1} verkraften können.

Persönliche Lernkontrolle

Frage 1: **Kapazitiver Koppelmechanismus**

Im Rahmen der innerbetrieblichen Weiterbildung bekommen Sie den Auftrag, den kapazitiven Koppelmechanismus zu erklären. Sie verwenden dazu einen Messkreis, bestehend aus der Serieschaltung einer mit dem Innenwiderstand R_i behafteten Spannungsquelle u_{Nutz} und eines Oszillographen. Das Messgerät kann durch seinen Eingangswiderstand R_E modelliert werden. Die Messanordnung wird durch einen zweiten Stromkreis kapazitiv gestört. Die Störquelle kann als Spannungsquelle $u_{Stör}$ modelliert werden.

a) Zeichnen Sie die Anordnung bestehend aus Messkreis, Störquelle und Kopplung. (K2)

b) Berechnen Sie den zeitlichen Verlauf der Eingangsspannung u_E am Oszilographen in Funktion der Nutzspannung u_{Nutz} und der Störspannung $u_{Stör}$. Nehmen Sie für die Berechnung des Störstromes $i_{Stör}$ an, dass die Impedanz der Koppelkapazität gegenüber der resultiereden Gesamtimpedanz des Nutzkreises dominiert. (K2)

c) Wie gross ist der Störanteil $u_{EStör}$ an der gemessenen Spannnung? (K1)

d) Kann durch Massnahmen an der Spannungsquelle u_{Nutz} der Störanteil am Eingang des Oszillographen verringert werden?
Begründen Sie Ihre Antwort mit ein bis zwei Sätzen. (K3)

Frage 2: **Kapazitiv gestörte Datenübertragung**

In den Kabelschächten moderner Dienstleistungsunternehmen verlaufen Datenübertragungsleitungen oft über längere Distanzen parallel. Sie sind als Techniker verantwortlich für die Wartung und den technischen Unterhalt der Kommunikationsanlagen. Eines Tages werden Sie dringend gerufen, weil auf einer wichtigen Leitung die Datenübertragung aufgrund starker Störungen nicht mehr funktioniert.

a) Aufgrund der parallelen Leiterführung vermuten Sie, dass sich zwei Datenleitungen gegenseitig kapazitiv beeinflussen. Wie können Sie dies nachweisen? (K3)

b) Nun stellt sich die Frage, welche der anderen Datenleitungen die Störquelle ist. Sie senden über die gestörte Datenleitung ein reines Sinussignal. Am anderen Ende empfangen Sie folgendes Signal.

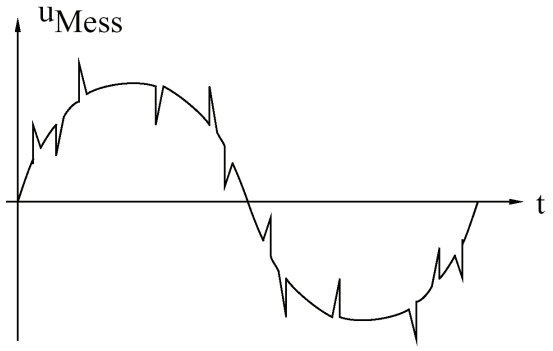


Bild 14: Am Leitungsende empfangenes Signal

Wie sieht der qualitative Spannungsverlauf des störenden Signals aus? Zeichnen Sie den Verlauf unter der Annahme, dass es sich dabei um ein bipolares Signal mit einer Amplitude von ±15V handelt. (K4)

Frage 3: **Schirmung störungsgefährdeter Leitungen**

In einem Postamt wird der Zahlungsverkehr vollautomatisiert. Die Datenübertragung und die elektrische Energieversorgung müssen aus Platzgründen im selben Leitungsschacht durchgeführt werden. Zur Verbesserung der kapazitiven Abschirmung der Datenübertragung sollen sowohl das beeinflussende Energiekabel als auch die beeinflussungsgefährdeten Signalleitungen geschirmt werden. In Bild 15 sind zwei denkbare Anordnungen dargestellt. Überlegen Sie sich, welche der zwei Schirmungen zweckmässiger ist.

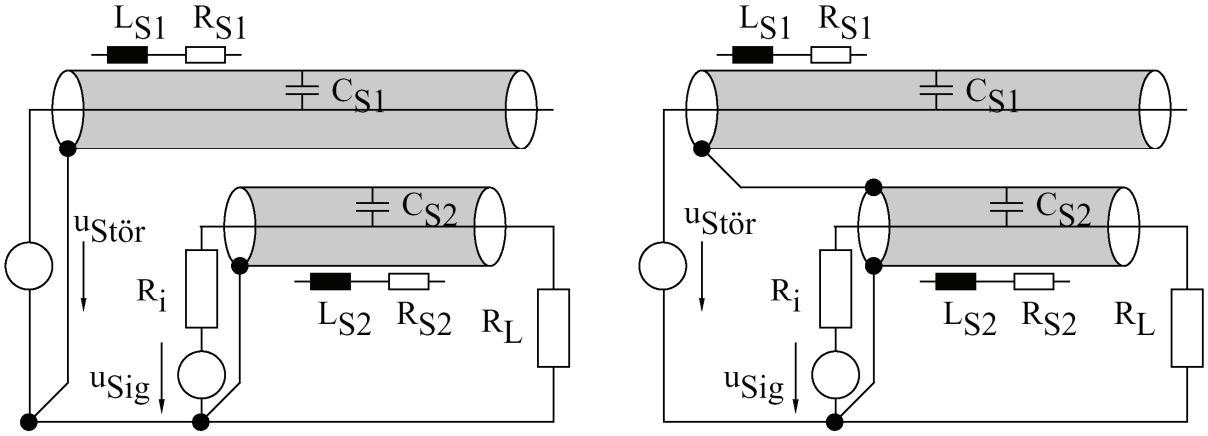


Bild 15: Schirmung des Nutz- und des Störleiters

a) Zeichnen Sie zuerst sowohl für die Anordnung links als auch für jene rechts die Ersatzschaltung unter Berücksichtigung der Schirmimpedanzen $Z_{Si} = R_{Si} + j\omega L_{Si}$. (K3)

b) Beurteilen Sie anhand der Ersatzschaltungen, bei welcher der beiden Anordnungen die kapazitiv eingekoppelten Störungen beim Verbraucher am Ende der Signalleitung geringer sind. Begründen Sie Ihre Antwort mit ein paar wenigen Sätzen. (K4)

Antworten auf die persönliche Lernkontrolle

Antwort 1: **Kapazitiver Koppelmechanismus**

a) Die kapazitiv beeinflusste Messanordnung sieht wie folgt aus:

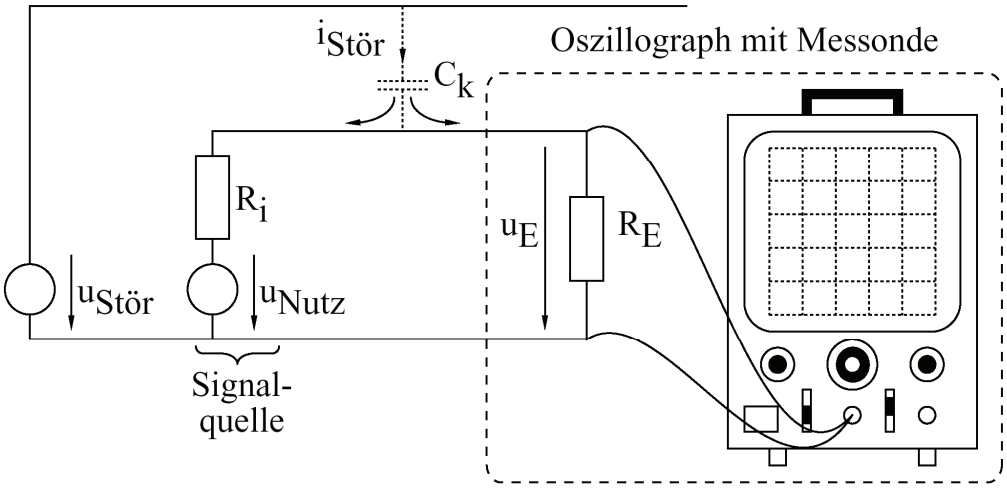


Bild16: Durch kapazitive Einkopplung gestörter Messkreis

b) Die Eingangsspannung u_E am Oszillographen berechnet sich aus dem Gleichungssystem zu:

$$\left| \begin{array}{lcl} u_{Nutz} & = & i_1 \cdot R_i + u_E \\ u_E & = & R_E \cdot (i_1 + i_{Stör}) \end{array} \right|$$

$$\Rightarrow \quad u_E = \frac{R_E}{R_i + R_E} \cdot u_{Nutz} + \frac{R_i \cdot R_E}{R_i + R_E} \cdot i_{Stör}$$

Ist die Impedanz der Koppelkapazität gross gegenüber der Gesamtimpedanz des Nutzkreises, so wird der Störstrom nur vom Störkreis und der Koppelkapazität bestimmt. Mathematisch ausgedrückt bedeutet dies:

$$\text{Für } \frac{1}{\omega C_k} >> (R_i // R_E) = \frac{R_i \cdot R_E}{R_i + R_E} \text{ gilt: } i_{Stör} \approx C_k \cdot \frac{du_{Stör}}{dt}$$

Daraus resultiert die Eingangsspannung u_E am Oszillographen als:

$$\underline{\underline{u_E \approx \frac{R_E}{R_i + R_E} \cdot u_{Nutz} + \frac{R_i \cdot R_E}{R_i + R_E} \cdot C_k \cdot \frac{du_{Stör}}{dt}}}$$

c) Der Störanteil $u_{EStör}$ an der gemessenen Spannung beträgt:

$$\underline{\underline{u_{EStör} \approx \frac{R_i \cdot R_E}{R_i + R_E} \cdot C_k \cdot \frac{du_{Stör}}{dt}}}$$

d) Der Störanteil $u_{EStör}$ am Eingang des Oszillographen kann über den Innenwiderstand R_i der Spannungsquelle beeinflusst werden. Im Falle einer idealen Spannungsquelle wird der Störanteil sogar zu null!

Wenn Sie in der Lage waren, die Frage 1 vollständig zu lösen, haben Sie den Mechanismus der kapazitiven Kopplung sehr gut verstanden und können getrost zur nächsten Aufgabe übergehen. Falls Sie noch nicht alles verstanden haben, empfehlen wir Ihnen, den Abschnitt *"Koppelmechanismus"* nochmals zu studieren.

Antwort 2: **Kapazitiv gestörte Datenübertragung**

a) Bei kapazitiver Kopplung ist der Störspannungsanteil abhängig von den Widerständen im Nutzkreis. Bei der in Bild 8 dargestellten allgemeinen Anordnung eines kapazitiv beeinflussten Nutzkreises beträgt der Störanteil an der Ausgangsspannung:

$$u_{LStör} = \frac{R_i \cdot R_L}{R_i + R_L} \cdot i_{Stör}$$

Da der Störanteil $u_{LStör}$ von den Widerständen im Nutzkreis abhängt, kann zur Diagnose die Signalspannungsquelle durch einen Kurzschluss ersetzt werden. In diesem Fall wird $R_i = 0$ und der Störanteil muss verschwinden!

In unserem konkreten Fall muss die Datenleitung auf der Eingangsseite kurzgeschlossen werden. Im Falle kapazitiv eingekoppelter Störungen müssen die Störungen am Ausgang dadurch verschwinden.

b) Das Signal, das am Ende der Leitung empfangen wird, ist eine Überlagerung von Nutz- und Störanteil. Der Störanteil beträgt:

$$u_{LStör} = \frac{R_i \cdot R_L}{R_i + R_L} \cdot i_{Stör} \approx \frac{R_i \cdot R_L}{R_i + R_L} \cdot C_k \cdot \frac{du_{Stör}}{dt}$$

Die Störungsspitzen im empfangenen Signal rühren von den Signalflanken der Störspannung her. Sie berechnet sich zu:

$$u_{Stör} = \frac{1}{C_k} \cdot \frac{R_i + R_L}{R_i \cdot R_L} \int (u_{LStör})\ dt$$

Aus den Angaben in der Aufgabenstellung lässt sich der Verlauf des Störsignals wie folgt rekonstruieren:

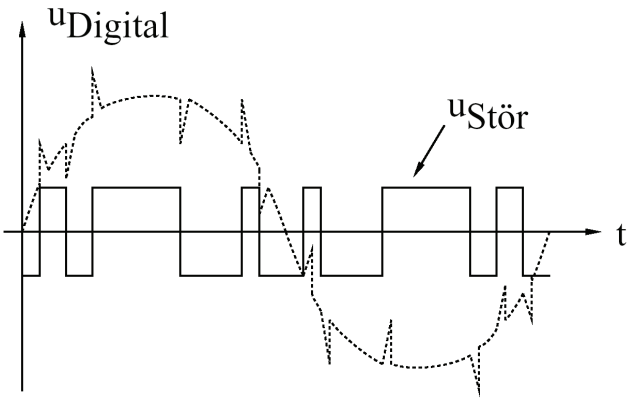


Bild 17: Verlauf des Störsignals

Wenn Sie in der Lage waren, den Nachweis der kapazitiven Kopplung zu führen und anhand der gemessenen Störung auf das Störsignal zu schliessen, gratulieren wir Ihnen herzlich. Sie haben damit gezeigt, dass Sie in der Lage sind, das Gelernte anzuwenden und das zugrundeliegende Prinzip zu erkennen. Hatten Sie bei einigen Fragen noch vereinzelt Schwierigkeiten, empfehlen wir Ihnen die Abschnitte *"Koppelmechanismus"* und *"Nachweis kapazitiv eingekoppelter Störungen "* nochmals etwas genauer anzuschauen.

Antwort 3: **Schirmung störungsgefährdeter Leitungen**

a) Auf der linken Seite des folgenden Bildes ist die Ersatzschaltung für die Anordnung von Bild 15 links und auf der rechten jene für die Anordnung von Bild 15 rechts dargestellt.

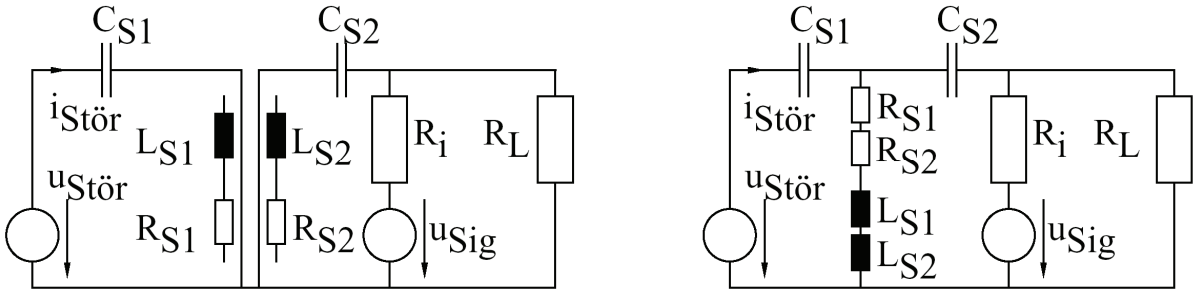


Bild 18: Ersatzschaltungen für die beiden Schirmungs-Anordnungen

b) Werden sowohl der beeinflussende als auch der beeinflusste Leiter geschirmt, so sind beide Schirme S1 und S2 wie in der Anordnung auf Bild 15 links quellenseitig mit dem Bezugsleiter zu verbinden. Eine direkte Verbindung der einzelnen Schirme untereinander wie in der Anordnung rechts ist unzulässig, da über C_{S1}, L_S und R_S ein Serieresonanzkreis entsteht, dessen Resonanzspannung über C_{S2} zu einer Störspannung $u_{LStör}$ an der Last führt, die ein Mehrfaches der Störspannung $u_{Stör}$ betragen kann.
In der Anordnung nach Bild 15 links ist der Nutz- viel besser vom Störkreis entkoppelt als in der Anordnung 15 rechts.

Falls Sie in der Lage waren, die Frage 3 vollständig zu beantworten, haben Sie das Prinzip der kapazitiven Schirmung gut begriffen. Damit sind Sie in der Lage, verschiedene Arten von Schirmungen zu analysieren und miteinander zu vergleichen. Hatten Sie vereinzelt noch Schwierigkeiten, empfehlen wir Ihnen, die Abschnitte *"Koppelmechanismus"* und *"Abhilfemassnahmen"* nochmals etwas genauer anzuschauen.

Nach erfolgreicher persönlicher Lernkontrolle sind Sie gut vorbereitet für die Diskussion innerhalb Ihrer Expertenrunde und die anschliessende Unterrichtsrunde.
Nutzen Sie jetzt die noch verbleibende Zeit bis alle Ihre Kollegen für die Diskussion bereit sind, um sich nochmals jene Abschnitte im Stoff einzuprägen, in denen Sie sich noch nicht so sattelfest fühlen.

Expertenrunde C:
Magnetische Kopplung

Arbeitsanleitung

Übersicht

Beeinflussen sich Schaltungen über magnetische Felder, so sprechen wir von magnetischer Kopplung. In diesem Fall gilt für den Zusammenhang zwischen Strom und Spannung die Gleichung der Induktivität. Die magnetische Kopplung entsteht zwangsläufig durch die räumliche Anordnung elektrischer Schaltungen. In dieser Expertenrunde werden folgende Themenkreise behandelt:

- Magnetischer Koppelmechanismus
- Erkennen von magnetisch eingekoppelten Störungen
- Abhilfemassnahmen gegen magnetisch eingekoppelte Störungen

Aus der allgemeinen Arbeitsanleitung sind Ihnen die übergeordneten Ziele sowie der Zeitplan für die Expertenrunde bekannt. Die fachlichen Ziele und das genaue Vorgehen folgen jetzt.

Fachliche Ziele

- Sie sind im Stande, die magnetische Kopplung und die dafür massgebende Ersatzschaltung Ihren Kollegen zu erklären.
- Sie kennen mindestens vier Möglichkeiten zur Verringerung von magnetisch eingekoppelten Störungen.
- Sie wissen, wie Sie magnetische Störeinflüsse in Ihrer Schaltung nachweisen können.

Vorgehen

1. Machen Sie sich zuerst mit dem EMV-Beeinflussungsmodell vetraut. Lesen Sie dazu das Kapitel "Elektromagnetische Beeinflussung" aus Ihren Unterlagen.
2. Lesen Sie anschliessend das Kapitel "Magnetische Kopplung". Machen Sie sich dabei Notizen und überlegen Sie sich, welche Fragen Sie in der ganzen Runde mit Ihren Expertenkollegen besprechen wollen.
3. Führen Sie die "Persönliche Lernkontrolle" durch.
4. Versuchen Sie innerhalb Ihrer Expertengruppe, die noch ungeklärten Fragen über den Stoff zu beantworten. Falls Sie zu einzelnen Fragen keine Lösung finden, können Sie sich an den Lehrer wenden.
5. Jetzt, da Sie den Stoff beherrschen, müssen Sie sich noch überlegen, wie Sie ihn Ihren Kollegen vermitteln wollen. Einige Tips dazu finden Sie im Kapitel "Mini-Didaktik".
   Achten Sie darauf, dass Ihre Vorbereitungen vor Beginn der Unterrichtsrunde abgeschlossen sein müssen!

Lernstoff

Koppelmechanismus

Bei der magnetischen Kopplung wird die Störgrösse über das magnetische Feld in den Nutzkreis übertragen. Ursache für magnetische Beeinflussungen ist das Magnetfeld stromdurchflossener Leiter, welches bei einer Stromänderung in benachbarten Leiterschleifen Spannungen induziert.

Aus Bild 19 ist der magnetische Koppelmechanismus ersichtlich. Der Strom $i_{Stör}$ stellt die Störgrösse dar. Er erzeugt eine magnetische Induktion $B(i_{Stör})$ und damit einen magnetischen Fluss $\phi(i_{Stör})$. Der Fluss durchsetzt die in Bild 19 dargestellte Masche des Nutzkreises. Eine von $i_{Stör}$ hervorgerufene Flussänderung induziert eine Störspannung $u_{Stör}$ in die Masche des Nutzkreises.

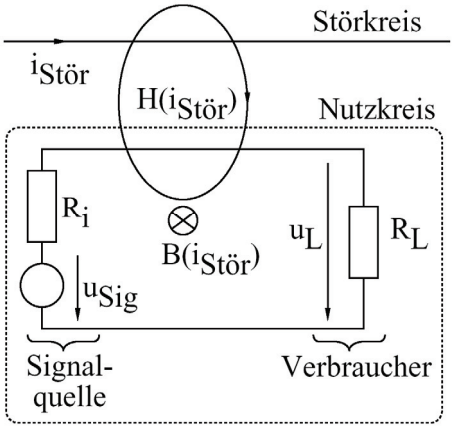


Bild 19: Durch magnetische Kopplung gestörter Nutzkreis

Die induzierte Störspannung $u_{Stör}$ kann durch eine Spannungsquelle modelliert werden.

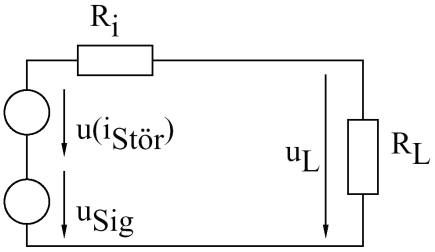


Bild 20: Modell des gestörten Nutzkreises

Die Gegeninduktivität M zwischen Stör- und Nutzkreis bestimmt die magnetische Kopplungsstärke. Die in den Nutzkreis eingekoppelte Störspannung ergibt sich aus:

$$u_{Stör} = M \cdot \frac{di_{Stör}}{dt}$$

Die Lastspannung u_L enthält durch die magnetisch eingekoppelte Störspannung $u_{Stör}$ einen Störanteil. Die Lastspannung beträgt:

$$u_L = \underbrace{\frac{R_L}{R_i + R_L} \cdot u_{Sig}}_{\text{Nutzanteil}} + \underbrace{\frac{R_L}{R_i + R_L} \cdot u_{Stör}}_{\text{Störanteil}}$$

$$u_L = \frac{R_L}{R_i + R_L} \cdot \left(u_{Sig} + u_{Stör}\right)$$

Der Störanteil $u_{L\,Stör}$ der Spannung u_L am Verbrauchereingang beträgt

- im *Zeitbereich:*

$$u_{LStör} = \frac{R_L}{R_i + R_L} \cdot u_{Stör}$$

$$u_{Stör} = M \cdot \frac{di_{Stör}}{dt}$$

- im *Frequenzbereich:*

$$\underline{U}_{LStör} = \frac{R_L}{R_i + R_L} \cdot \underline{U}_{Stör}$$

$$\underline{U}_{Stör} = j\omega M \cdot \underline{I}_{Stör}$$

Die Höhe der induzierten Störspannung $u_{Stör}$ hängt also ab von

1. der Grösse der Gegeninduktivität $M = \phi / i_{Stör}$ zwischen der Schleife des Nutzkreises und dem Störleiter.
2. der Änderungsgeschwindigkeit, der Amplitude und der Frequenz des Störstromes $i_{Stör}$.

Die Gegeninduktivität M wird durch die Topologie der Leiter oder der Leiterbahnanordnungen bestimmt.

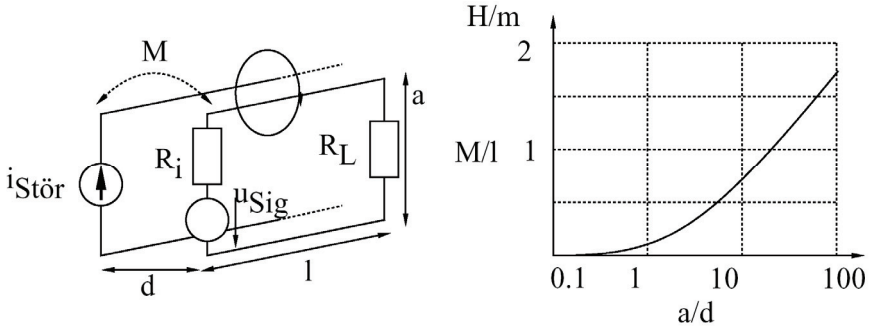


Bild 21: Gegeninduktivität bei parallelen Leiterschlaufen

Für den einfachen Fall zweier, parallel verlaufender Leiterschleifen gemäss Bild 21 gilt für die Gegeninduktivität M:

$$M = \frac{\mu_o \cdot l}{2 \cdot \pi} \cdot \ln\left[1 + \left(\frac{a}{d}\right)^2\right]$$

Unter Verwendung der Schleifen-Abmessungen l = 1m, a/d = 0.1 folgt für die Gegeninduktivität M = 2 nH. Findet im Störkreis infolge eines Schaltvorganges oder eines Laststosses eine schnelle zeitliche Stromänderung di/dt statt, wird im Nutzkreis eine Störspannung induziert:

$$u_{Stör} = M \cdot \frac{di}{dt}$$

Für den praxisnahen Fall $R_i << R_L$ fällt der Hauptteil der Störspannung über dem Verbraucher ab. Bei einer Stromanstiegsgeschwindigkeit von di/dt = 1000 A/µs beträgt hier der Störspannungsanteil an der Last $u_{LStör}$=2V.

Nachweis magnetisch eingekoppelter Störungen

Der Störanteil an der Lastspannung u_L ist:

$$u_{LStör} = \frac{R_L}{R_i + R_L} \cdot u_{Stör} = \frac{R_L}{R_i + R_L} \cdot M \cdot \frac{di_{Stör}}{dt}$$

$$\underline{U}_{LStör} = j\omega M \cdot \frac{R_L}{R_i + R_L} \cdot \underline{I}_{Stör}$$

Bei magnetischer Kopplung ist der Störspannungsanteil $u_{LStör}$ an der Last durch einen niedrigen Innenwiderstand R_i der Signalspannungsquelle nicht zu reduzieren. Zur Diagnose muss deshalb der Wechselanteil des Störstromes $i_{Stör}$ zu null gemacht werden. Die magnetisch eingekoppelte Komponente der Störspannung $u_{LStör}$ muss dann verschwinden!

Abhilfemassnahmen

Die magnetisch eingekoppelten Störungen lassen sich durch folgende Massnahmen herabsetzen:

- Verringerung der Gegeninduktivität M durch:
  - Vergrössern des Abstandes zwischen der störenden und der störungsgefährdeten Masche.
  - Verkleinern der Schleifenfläche durch Verkürzen der Leitungen und enge räumliche Anordnung von Hin- und Rückleiter.
  - Verdrillen von Hin- und Rückleiter. Dadurch ändert sich die Richtung der magnetischen Erregung fortlaufend. Die durch die Teilflüsse induzierten Störspannungsanteile u_{Sti} heben sich gegenseitig auf. In Bild 22 ist dieser Sachverhalt anschaulich dargestellt.

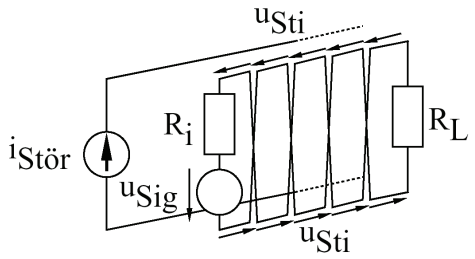


Bild 22: Verdrillen des Hin- und Rückleiters

- Verringerung der Änderungsgeschwindigkeit des Störstromes durch Verwendung von Bauelementen mit niedrigerer Grenzfrequenz oder durch den Einsatz von Tiefpass-Filtern.
- Herabsetzen der Flussänderungsgeschwindigkeit $d\phi/dt$ mittels einer Kurzschlussschleife in unmittelbarer Nähe des beeinflussungsgefährdeten Nutzkreises.
  Im Kurzschlussring KS von Bild 23 fliesst aufgrund der induzierten Störspannung ein Strom, welcher einen Fluss erzeugt, der dem Fluss ϕ entgegenwirkt. Dadurch verringert sich die in den Nutzkreis induzierte Störspannung $u_{Stör}$.

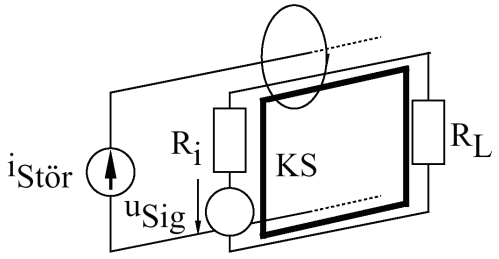


Bild 23: Kurzschlussring

- Entkoppeln des Nutz- und Störkreises durch orthogonale Anordnung der magnetischen Achsen. Das Magnetfeld des Störkreises liefert auf diese Weise keinen Flussbeitrag im Nutzkreis. Bild 24 verdeutlicht diesen Sachverhalt, der insbesondere bei spulenförmigen Anordnungen zu beachten ist.

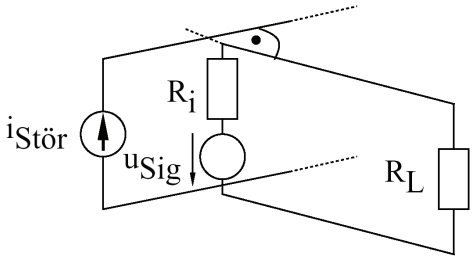


Bild 24: Magnetische Entkopplung durch orthogonale Anordnung

- Schirmen der beeinflussungsgefährdeten Leitungen, Stromkreise, Baugruppen, Geräte und Anlagen durch:
  - Ferromagnetische Schirme
  - Unmagnetische Schirme

  Die ferromagnetischen Schirme haben eine gute Schirmwirkung gegen niederfrequente magnetische Felder. Die Schirmwirkung ist umso besser, je höher die Permeabilität des Materials und die Dicke der Schirmwände ist. Der Schirm leitet das Magnetfeld am beeinflussungsgefährdeten Anlagenteil vorbei, indem er dem Magnetfeld einen Weg mit geringerem magnetischen Widerstand anbietet als dies ohne Schirm der Fall wäre.
  Beispiele für unmagnetische Schirme sind Gehäuse aus metallisiertem Kunststoff, Aluminium- und Kupfergehäuse. Sie wirken vor allem gegen hochfrequente magnetische Felder. Im Schirm bilden sich Wirbelströme, welche das Störfeld durch Energieentzug dämpfen.

Persönliche Lernkontrolle

Frage 1: **Magnetischer Koppelmechanismus**

Im Rahmen der innerbetrieblichen Weiterbildung bekommen Sie den Auftrag, den magnetischen Koppelmechanismus zu erklären. Sie verwenden dazu einen Messkreis, bestehend aus der Serieschaltung einer mit dem Innenwiderstand R_i behafteten Spannungsquelle u_{Nutz} und eines Oszillographen. Das Messgerät kann durch seinen Eingangswiderstand R_E modelliert werden. Die Messanordnung wird durch einen zweiten Stromkreis magnetisch gestört. Die Störquelle kann als Stromquelle $i_{Stör}$ modelliert werden.

a) Zeichnen Sie die Anordnung bestehend aus Messkreis, Störquelle und Kopplung. (K2)

b) Berechnen Sie den zeitlichen Verlauf der Eingangsspannung u_E am Oszillographen in Funktion der Nutzspannung u_{Nutz} und des Störstromes $i_{Stör}$. (K2)

c) Wie gross ist der Störanteil $u_{EStör}$ an der gemessenen Spannung? (K1)

d) Kann durch Massnahmen an der Spannungsquelle u_{Nutz} der Störanteil am Eingang des Oszillographen verringert werden? Begründen Sie Ihre Antwort mit höchstens drei Sätzen. (K3)

Frage 2: **Magnetisch gestörte Datenübertragung**

Die Datenübertragung und die elektrische Energieversorgung moderner Dienstleistungsunternehmen müssen aus Platzgründen oft im selben Leitungsschacht durchgeführt werden. Sie sind als Techniker verantwortlich für die Wartung und den technischen Unterhalt der Kommunikationsanlagen. An den Schnittstellen der Datenübertragungssysteme treten immer häufiger Schäden an der Hardware auf. Die Analyse der defekten Bauteile ergibt, dass Überspannungen die wahrscheinlichste Ausfallursache darstellen.

a) Aufgrund der parallelen Führung der Energie- und Signalübertragungsleitungen vermuten Sie, dass die Energieleitung die Störungen verursacht. Treten im Strom aufgrund von Schaltvorgängen und nichtlinearen Lasten hohe Änderungsgeschwindigkeiten auf, so können in den Signalleitungen durch das Magnetfeld hohe Störspannungen induziert werden. Wie können Sie eine magnetische Beeinflussung nachweisen? (K3)

b) Im Moment versorgt die Energieleitung zwei parallele Lasten. In Bild 25 sind die zwei Lastströme i_1 und i_2 aufgeführt.

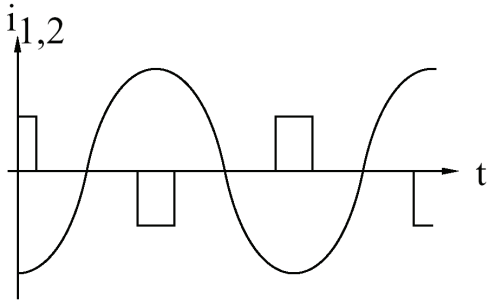


Bild 25: Lastströme der zwei parallelen Lasten

Wie sieht der Verlauf des in der Energieleitung fliessenden Stromes $i_{Stör}$ aus? (K1)

c) Zeichnen Sie den qualitativen Verlauf des magnetisch eingekoppelten Störspannungsanteils $u_{LStör}$ am Ende einer Signalleitung. Vernachlässigen Sie für Ihre Betrachtungen den Einfluss der Leitungsimpedanzen. (K4)

Frage 3: **Schirmung störungsgefährdeter Leitungen**

In einem Postamt wird der Zahlungsverkehr vollautomatisiert. Die Datenübertragung und die elektrische Energieversorgung müssen aus Platzgründen im selben Leitungsschacht durchgeführt werden. Zur Verbesserung der kapazitiven Abschirmung der Datenübertragung wird die Datenleitung gemäss Bild 26 geschirmt. Die Abschirmung des Leiters wird an beiden Seiten mit dem Bezugsleiter verbunden. Ist diese Lösung in bezug auf allfällige magnetische Beeinflussungen zweckmässig?

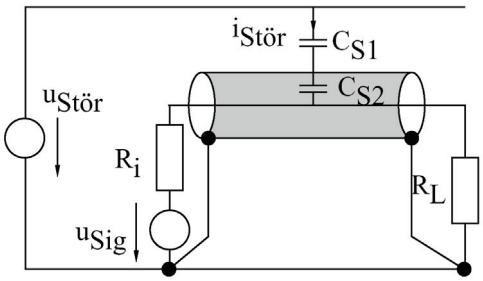


Bild 26: Beidseitige Bindung der Schirmung an das Bezugspotential

a) Zeichnen Sie zuerst die Ersatzschaltung für die gegebene Anordnung unter Berücksichtigung der Leitungsimpedanz $Z = R + j\omega L$ des gemeinsamen Bezugsleiters von Nutz- und Störkreis. (K3)

b) Beurteilen Sie anhand der Ersatzschaltung, ob die Anordnung empfindlich ist auf magnetisch eingekoppelte Störungen. Begründen Sie Ihre Antwort mit ein paar Sätzen. (K4)

Antworten auf die persönliche Lernkontrolle

Antwort 1: **Magnetischer Koppelmechanismus**

a) Die magnetisch beeinflusste Messanordnung sieht wie folgt aus:

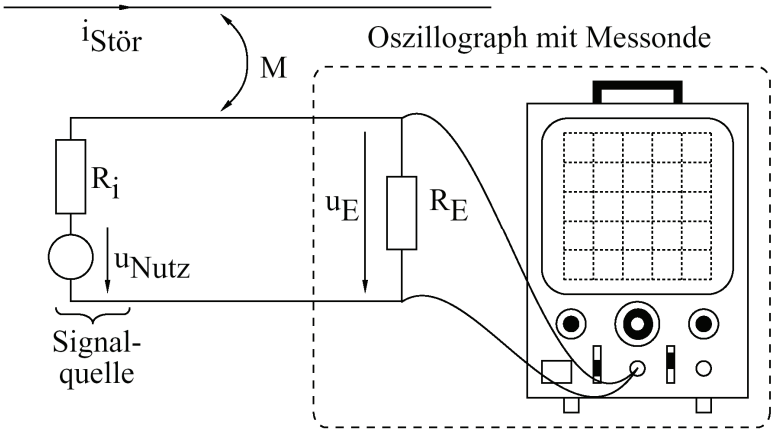
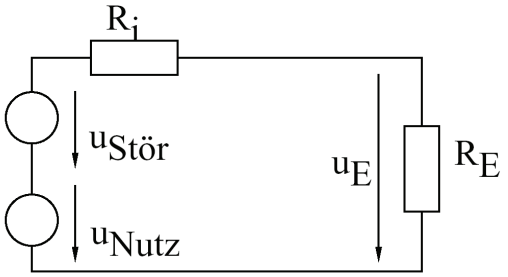


Bild 27: Durch magnetische Einkopplung gestörter Messkreis

b) Die Eingangsspannung u_E am Oszilographen berechnet sich zu:



$$\left| \begin{array}{lcl} u_{Nutz} & = & i_1 \cdot R_i + u_E - u_{Stör} \\ u_E & = & R_E \cdot i_1 \end{array} \right|$$

$$\Rightarrow \quad u_E = \frac{R_E}{R_i + R_E} \cdot u_{Nutz} + \frac{R_E}{R_i + R_E} \cdot u_{Stör}$$

Bild 28: Magnetisch beeinflusste Messanordnung

Die induzierte Störspannung $u_{Stör}$ ist vom Störstrom $i_{Stör}$ und der Gegeninduktivität M abhängig:

$$u_{Stör} = M \cdot \frac{di_{Stör}}{dt}$$

Daraus resultiert die Eingangsspannung u_E am Oszillographen als:

$$\underline{\underline{u_E = \frac{R_E}{R_i + R_E} \cdot u_{Nutz} + \frac{R_E}{R_i + R_E} \cdot M \cdot \frac{di_{Stör}}{dt}}}$$

c) Der Störanteil $u_{EStör}$ an der gemessenen Spannung beträgt:

$$\underline{\underline{u_{EStör} = \frac{R_E}{R_i + R_E} \cdot M \cdot \frac{di_{Stör}}{dt}}}$$

d) Bei magnetischer Kopplung kann der Störspannungsanteil $u_{EStör}$ an der Last durch eine niederohmige Signalspannungsquelle nicht reduziert werden. Der Störanteil $u_{EStör}$ am Eingang des Oszillographen verschwindet aber bei sehr hohem Innenwiderstand R_i. Führt man daher die Signalquelle als Stromquelle (R_i ---> ∞) und den Verbraucher als Stromsenke ($R_E = 0$) aus, so fällt die gesamte induzierte Störspannung $u_{Stör}$ am Innenwiderstand R_i ab.

Wenn Sie in der Lage waren, die Frage 1 vollständig zu lösen, haben Sie den Mechanismus der magnetischen Kopplung sehr gut verstanden und können getrost zur nächsten Aufgabe übergehen. Falls Sie noch nicht alles verstanden haben, empfehlen wir Ihnen, den Abschnitt *"Koppelmechanismus"* nochmals zu studieren.

Antwort 2: **Magnetisch gestörte Datenübertragung**

a) Bei magnetischer Kopplung kann der Störspannungsanteil an der Last durch Verkleinern des Innenwiderstands R_i der Signalspannungsquelle nicht reduziert werden. Der Störanteil an der Ausgangsspannung für die in Bild 19 dargestellte allgemeine Anordnung eines magnetisch beeinflussten Nutzkreises beträgt:

$$u_{LStör} = \frac{R_L}{R_i + R_L} \cdot M \cdot \frac{di_{Stör}}{dt}$$

Zur Diagnose muss deshalb der Wechselanteil des Störstromes $i_{Stör}$ zu null gemacht werden. Die magnetisch eingekoppelte Komponente der Störspannung $u_{LStör}$ muss dann verschwinden! In unserem konkreten Fall muss die Energieleitung kurzzeitig ausgeschaltet werden. Zumindest dürfen im Energiekabel in der Messzeitspanne keine Wechselstromanteile und keine transienten Ströme fliessen. Falls die magnetisch eingekoppelten Störungen in den Datenleitungen von der Energieleitung herrühren, müssen sie dadurch verschwinden.

b) Der in der Energieleitung fliessende Strom $i_{Stör}$ ist die Überlagerung der beiden Lastströme i_1 und i_2:

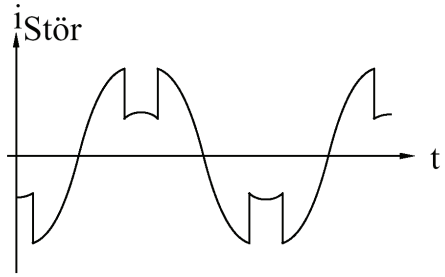


Bild 29: Resultierender Störstrom $i_{Stör}$

c) Für den magnetisch eingekoppelten Störspannungsanteil am Ende einer Signalleitung gilt folgende Beziehung:

$$u_{LStör} = \frac{R_L}{R_i + R_L} \cdot M \cdot \frac{di_{Stör}}{dt}$$

Aus dieser mathematischen Beziehung und dem in Bild 29 aufgeführten Verlauf des Störstromes $i_{Stör}$ folgt für den qualitativen Verlauf des Störspannungsanteils $u_{LStör}$:

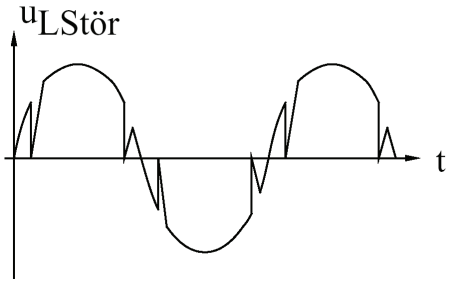


Bild 30: Verlauf des Störspannungsanteils $u_{LStör}$ am Ende der Signalleitung

Waren Sie in der Lage, den Nachweis der magnetischen Kopplung zu erbringen und anhand des in der Energieleitung fliessenden Störstromes auf den Störspannungsanteil am Ende der Datenleitung zu schliessen, gratulieren wir Ihnen herzlich. Sie haben damit gezeigt, dass Sie in der Lage sind, das Gelernte anzuwenden und das zugrundeliegende Prinzip zu erkennen. Hatten Sie bei einigen

Fragen noch vereinzelt Schwierigkeiten, empfehlen wir Ihnen die Abschnitte *"Koppelmechanismus"* und *"Nachweis magnetisch eingekoppelter Störungen "* nochmals etwas genauer anzuschauen.

Antwort 3: **Schirmung störungsgefährdeter Leitungen**

a) Das nächste Bild zeigt die Ersatzschaltung für die in Bild 26 dargestellte Schirmanordnung unter Berücksichtigung der Leitungsimpedanz $\underline{Z}=R+j\omega L$ des gemeinsamen Bezugsleiters von Nutz- und Störkreis:

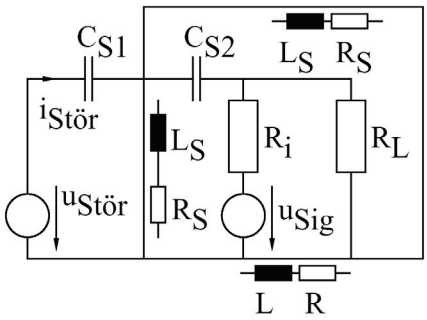


Bild 31: Ersatzschaltung der Schirmung mit zweiseitiger Verbindung zum Bezugsleiter

b) Eine zweiseitige Verbindung des Schirms mit dem Bezugsleiter ist ungeeignet, da in diesem Fall über Schirm und Bezugsleiter eine Induktionsschleife entsteht. Darin erzeugt ein magnetisch eingekoppelter Störstrom $i_{Stör}$ über die Bezugsleiterimpedanz einen Störanteil $u_{LStör}$ in der Spannung an der Last. Die Anordnung mit beidseitiger Verbindung des Schirms mit dem Bezugsleiter ist wegen ihrer grossen Empfindlichkeit gegenüber magnetischen Beeinflussungen ungeeignet.

Falls Sie in der Lage waren, die Frage 3 vollständig zu beantworten, haben Sie das Prinzip der magnetischen Beeinflussung gut verstanden. Sie sind somit in der Lage, die Wirksamkeit und die Empfindlichkeit verschiedener Schirmungen gegenüber magnetischen Einkopplungen zu beurteilen und miteinander zu vergleichen. Hatten Sie vereinzelt noch Schwierigkeiten, empfehlen wir Ihnen, die zwei Abschnitte *"Koppelmechanismus"* und *"Abhilfemassnahmen"* nochmals etwas genauer anzuschauen.

Nach erfolgreicher persönlicher Lernkontrolle sind Sie gut vorbereitet für die Diskussion innerhalb Ihrer Expertenrunde und die anschliessende Unterrichtsrunde.
Nutzen Sie jetzt die noch verbleibende Zeit bis alle Ihre Kollegen für die Diskussion bereit sind, um sich nochmals jene Abschnitte im Stoff einzuprägen, in denen Sie sich noch nicht so sattelfest fühlen.

Expertenrunde D: Impedanzkopplung

Arbeitsanleitung

Übersicht

Beeinflussen sich Stromkreise über gemeinsame Leiterabschnitte, so sprechen wir von Impedanzkopplung. Der Einfluss der Impedanzkopplung kann meist durch eine durchdachte Leiterführung entschärft werden. Dazu müssen Sie aber als Entwickler einer elektrischen Schaltung das Phänomen der Impedanzkopplung verstehen. In dieser Expertenrunde werden deshalb folgende Themenkreise behandelt:

- Mechanismus der Impedanzkopplung
- Stromanalyse zur Erkennung der Impedanzkopplung
- Abhilfemassnahmen gegen Impedanzkopplung

Aus der allgemeinen Arbeitsanleitung sind Ihnen die übergeordneten Ziele sowie der Zeitplan für die Expertenrunde bekannt. Die fachlichen Ziele und das genaue Vorgehen folgen jetzt.

Fachliche Ziele

- Sie sind im Stande, die Impedanzkopplung und die dafür massgebende Ersatzschaltung Ihren Kollegen zu erklären.
- Sie kennen zwei Möglichkeiten zur Verringerung der Impedanzkopplung.
- Sie sind im Stande, das Werkzeug der Stromanalyse zur Beurteilung der Impedanzkopplung anzuwenden.

Vorgehen

1. Machen Sie sich zuerst mit dem EMV-Beeinflussungsmodell vetraut. Lesen Sie dazu das Kapitel "Elektromagnetische Beeinflussung" aus Ihren Unterlagen.
2. Lesen Sie anschliessend das Kapitel "Impedanzkopplung". Machen Sie sich dabei Notizen und überlegen Sie sich, welche Fragen Sie in der ganzen Runde mit Ihren Expertenkollegen besprechen wollen.
3. Führen Sie die "Persönliche Lernkontrolle" durch.
4. Versuchen Sie innerhalb Ihrer Expertengruppe, die noch ungeklärten Fragen über den Stoff zu beantworten. Falls Sie zu einzelnen Fragen keine Lösung finden, können Sie sich an den Lehrer wenden.
5. Jetzt, da Sie den Stoff beherrschen, müssen Sie sich noch überlegen, wie Sie ihn Ihren Kollegen vermitteln wollen. Einige Tips dazu finden Sie im Kapitel "Mini-Didaktik".
   Beachten Sie, dass Ihre Vorbereitungen vor Beginn der Unterrichtsrunde abgeschlossen sein müssen!

Lernstoff

Koppelmechanismus

Allgemein muss für die Impedanzkopplung die Leitungstheorie herangezogen werden. Gilt aber, dass die Leitungslängen viel geringer als die Wellenlängen sind, so darf in einer ersten Näherung mit einem diskreten RL-Leitungsmodell wie in Bild 32 gerechnet werden.

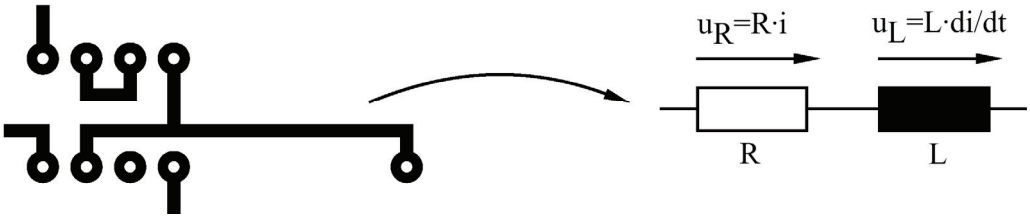
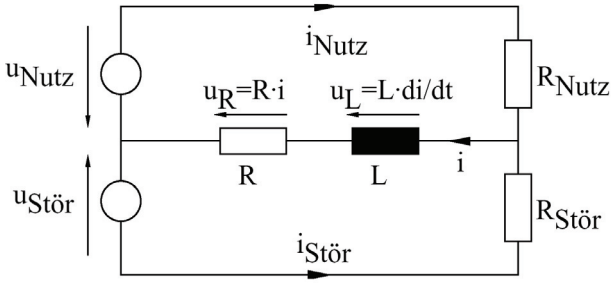


Bild 32: RL-Ersatzschaltung der Leitung

Für gedruckte Schaltungen darf man überschlagsmässig mit einer Induktivitätsbelag von 1nH/mm rechnen. Für übliche Leitungslängen in gedruckten Schaltungen überwiegt bei Frequenzen ab 10..100kHz bereits der induktive Spannungsabfall gegenüber dem ohmschen Anteil. Die grössten Ströme einer elektronischen Schaltung führen in der Regel die Versorgungs- und Masseleitung. Über diese Verbindungen werden sämtliche aktiven Elemente gespeist. Es ist hier also besonders wichtig, kurze Verbindungen zu realisieren, um den aktiven Elementen eine konstante Speisespannung zur Verfügung stellen zu können.

Regel: Fliessen in einem Leitungselement Ströme aus zwei oder mehreren Maschen, so sind diese Maschen über die Impedanz des gemeinsamen Leitungselementes miteinander gekoppelt.



Spannung über Kopplung:

$$u_k = u_R + u_L$$

$$u_k = R\cdot(i_{Nutz} + i_{Stör}) + L\cdot\frac{d}{dt}(i_{Nutz} + i_{Stör})$$

Bild 33: Impedanzkopplung durch ein Stück gemeinsame Leitung

Die Maschengleichung für die gestörte Masche enthält einen Term mit $i_{Stör}$, der eine Störspannung verursacht.

Bei gemischten Elektronikschaltungen, z.B. analogen Verstärkerschaltungen zusammen mit digitalen Logikelementen, kann das Schalten einer Gegentaktstufe einer digitalen Komponente über ein Stück gemeinsame Leitung eine Störspannung im analogen Teil verursachen. Die Störquelle gehört hier unmittelbar zur Schaltung. Es sind daher häufig einzelne Funktionsblöcke einer Schaltung, die einen benachbarten Block stören oder auch von den Nachbarblöcken gestört werden.

Der Spannungsabfall an einem RL-Leitungsstück kann zwar in den einzelnen Kreisen nicht vermieden werden. Die Kopplung wird aber durch die Verbindung der beiden Maschen in nur einem Punkt beseitigt. Man spricht hier von sternförmiger Leitungsführung hin zum gemeinsamen Erdungspunkt. Bild 34 verdeutlicht diesen Sachverhalt.

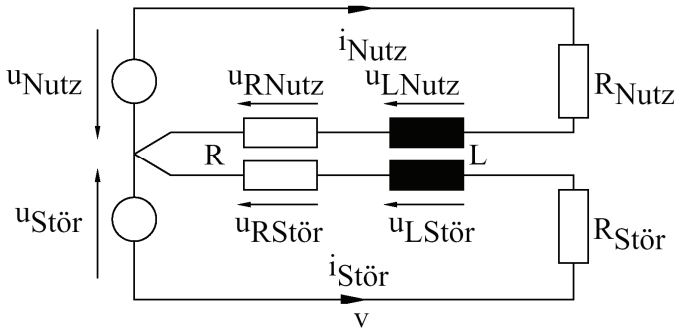


Bild 34: Verminderung der Impedanzkopplung durch getrennte Rückleitungen

In der Anordnung nach Bild 35 sind beiden Transistorkreise durch das gemeinsame Leitungsstück in der Hin- und Rückführung miteinander gekoppelt.

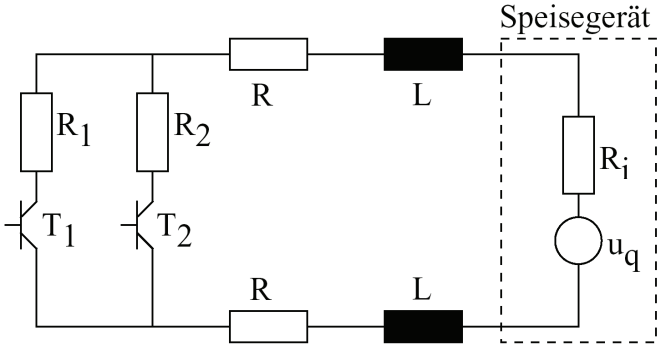


Bild 35: Über Netzteil und Leitungsimpedanzen gekoppelte Kreise mit aktiven Elementen

Der Spannungsabfall, der sich als Spannungsänderung zwischen den Punkten A und B äussert, ist durch die momentane Summe beider Transistorströme i_{T1} und i_{T2} bestimmt. Auch hier hilft wieder eine sternförmige Leitungszuführung.

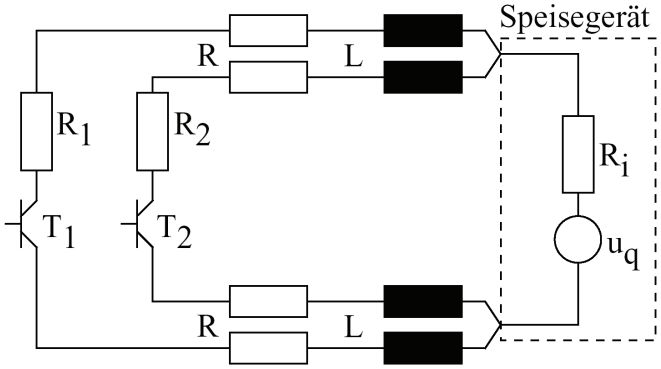


Bild 36: Verminderung der gegenseitigen Kopplung beider Stufen

Beide Stufen sind jetzt nur noch über den Innenwiderstand der Speisequelle miteinander gekoppelt.

Stromanalyse zur Erkennung der Impedanzkopplung

Die Stromanalyse ist ein zuverlässiges Werkzeug, das Impedanzkopplung sichtbar und damit durchschaubar macht. Sie ist sowohl auf das Schaltbild zur Planung eines störsicheren Schaltungsaufbaus, als auch auf das Layout oder den Verdrahtungsplan anwendbar. Mit der Stromanalyse können Hinweise für eine optimale Plazierung von Bauelementen und für die Gestaltung des Masse- Versorgungssystems gewonnen werden.

Vorgehensweise:

- Die Ströme aller Maschen einer Schaltung werden in ihrem geschlossenen Umlauf
  - entweder in das Schaltbild zur Analyse
  - oder in das Layout zur Kontrolle

  eingetragen. Die Leitungsimpedanzen werden hierfür nicht eingezeichnet.
- Ist der Stromkreis, der durchflossen wird, abhängig vom Vorzeichen des Stromes, so werden die möglichen Strommaschen separat eingezeichnet. Dies tritt zum Beispiel dann auf, wenn der Stromkreis Dioden enthält.
- Gleich- und Wechselströme dürfen getrennt betrachtet werden.

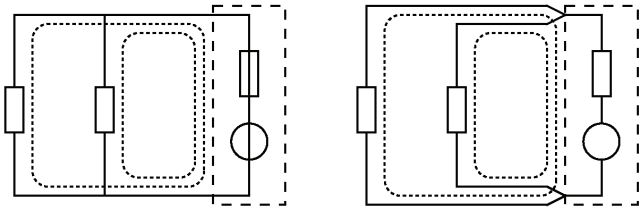


Bild 37: Stromanalyse für die Schaltungen nach Bild 35 und 36

Mit der Stromanalyse wird sofort sichtbar, dass die beiden Stromkreise gekoppelt sind. Eine sternförmige Verdrahtung entkoppelt die beiden Stromkreise weitgehend.

Reihenmassestruktur

In den meisten Schaltungen kann man Reihenmassestrukturen erkennen. Die Signale und die Masseleitung werden von einer Komponente zur nächsten geschlauft.

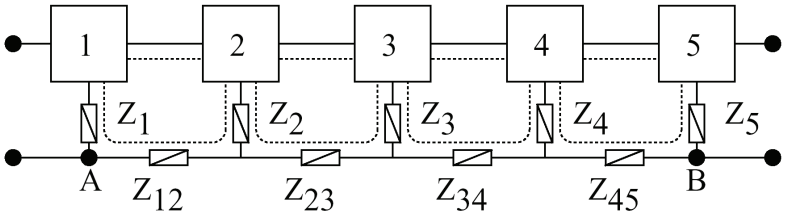


Bild 38: Reihenmassestruktur

Im Bild 38 sind die Leitungsimpedanzen und die Stromkreise eingezeichnet. An den Impedanzen Z_{ij} zwischen den Stufen entstehen durch einzelne Signalströme Spannungsabfälle. Sie verändern jeweils das Bezugspotential zur Masse und summieren sich zu einer Spannung zwischen den Punkten A und B auf.
Die meisten Schaltungen weisen aufgrund ihrer räumlichen Ausdehnung eine Massestruktur auf, die stückweise einer Reihenmassestruktur ähnlich ist. In der folgenden Abbildung ist eine noch übersichtliche Struktur skizziert.

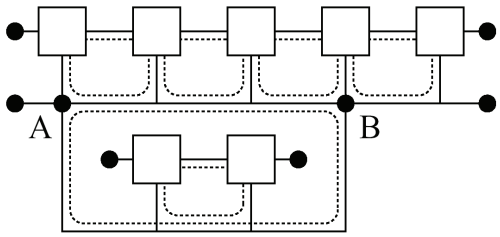


Bild 39: Masseschleife aus zwei Reihenmassestrukturen

Die beiden einzelnen Reihenstrukturen sind hier noch über eine Masseschleife verbunden. Masseschleifen entstehen immer dann, wenn zwei räumlich auseinanderliegende Punkte A und B einer Masse über mehr als einer Verbindung miteinander verbunden sind. Spannungen, die - auf welchem Weg auch immer - in diese Schleifen eingekoppelt werden, verursachen einen Strom in diesen Massenschleifen. Dieser Strom vergrössert wiederum die Potentialdifferenz zwischen den Punkten A und B.

Sternstruktur

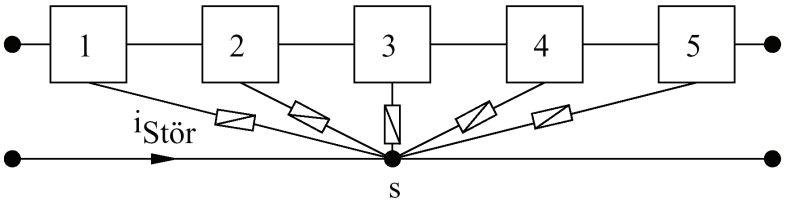


Bild 40: Schaltung mehrerer Stufen in Sternstruktur

Die Sternstruktur vermeidet unterschiedliche Bezugspotentiale der einzelnen Stufen. Die Masseverbindungen werden dadurch im allgemeinen länger und die Impedanzen Zi dementsprechend grösser. Ob die sich daraus ergebende Kopplung zwischen den Eingangs- und Ausgangskreisen der Stufen zu Störungen führen kann, muss im Einzelfall untersucht werden. Ein entscheidender Vorteil dieser Struktur ist auch ihre Unempfindlichkeit gegenüber Störströmen, die von aussen auf die Masse eingeprägt werden. Sie verursachen im gemeinsamen Sternpunkt keinen Spannungsabfall.

In ausgedehnten Schaltungen ist es nicht sinnvoll, alle Stufen in nur einem Sternpunkt zu verbinden. Dadurch würden dann unzumutbar lange Verbindungen vom Sternpunkt zu den einzelnen Stufen entstehen. Man behilft sich in solchen Fällen mit Untersternpunkten.

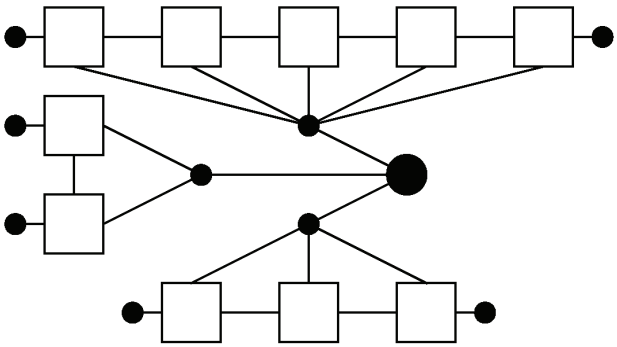


Bild 41: Kanalisierung von mehreren Sternpunkten

Versorgungs-Masse-System

Der Einsatz aktiver und digitaler Baugruppen erfordert eine konstante Speisespannung an deren Anschlüssen. Das Versorgungs-Masse-System zeigt aber, dass gerade bei schnellen Vorgängen über den Zuleitungsinduktivitäten Spannungsabfälle entstehen.

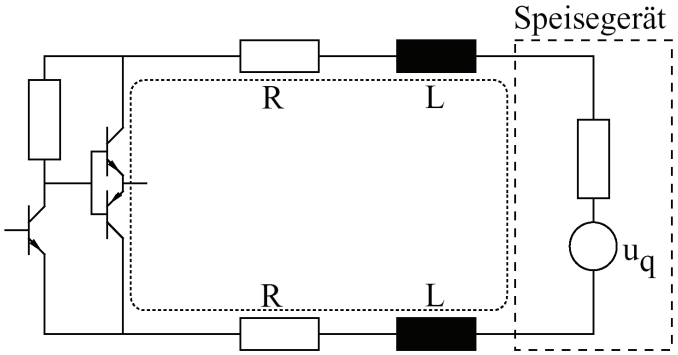


Bild 42: Gegentaktstufe

Viele digitale Bauelemente besitzen eine Gegentaktstufe. Im Schaltmoment ist sowohl der obere als auch der untere Transistor leitend. Ein hoher steiler Stromimpuls muss nun über die Versorgungsleitungen geliefert werden. Dies führt zu einem Zusammenbruch der Speisespannung an den Anschlussklemmen des Bauelementes. Betrachtet man das Bauelement im Schaltmoment als eine Stromquelle, so muss der Stromkreis über die Zuleitungen mit der Speisequelle geschlossen werden. Fügt man nun aber nahe am Element einen Abblockkondensator ein, so ergibt sich eine Ersatzschaltung wie folgt:

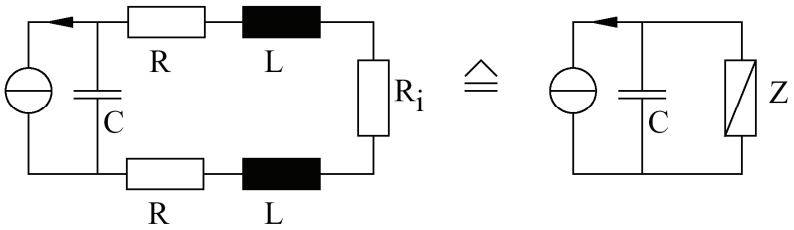


Bild 43: Ersatzschaltung mit Stromquelle und Impedanzen im Stromkreis

Eine Kapazität besitzt für schnelle Vorgänge eine niedrige Impedanz. Die Zuleitungen mit ihren Induktivitäten haben im Gegensatz dazu eine hohe Impedanz. Ein Grossteil des Schaltstromes fliesst daher über den Abblockkondensator. Die Zuleitungen werden kaum belastet. Abblockkondensatoren sind nur dann wirksam, wenn sie nahe am Bauelement angebracht werden.

Persönliche Lernkontrolle

Frage 1: **Mechanismus der Impedanzkopplung**

Im Rahmen der innerbetrieblichen Weiterbildung bekommen Sie den Auftrag, den Mechanismus der Impedanzkopplung zu erklären. Sie verwenden dazu eine geregelte Spannungsversorgung. Die Versorgung kann als ideale Spannungsquelle u_{DC} und die Last als Widerstand R_L modelliert werden. Aus Platzgründen weisen der Leistungs- und der Regelungsteil lediglich eine gemeinsame Masseleiterbahn auf. Der Regelkreis kann als eine mit einem Seriewiderstand R_S belastete ideale Signalspannungsquelle u_S betrachtet werden. Die Übertragung der Mess- und Steuersignale zwischen Regel- und Leistungskreis erfolgt potentialgetrennt über Lichtleiter und darf deshalb im Modell an dieser Stelle vernachlässigt werden.

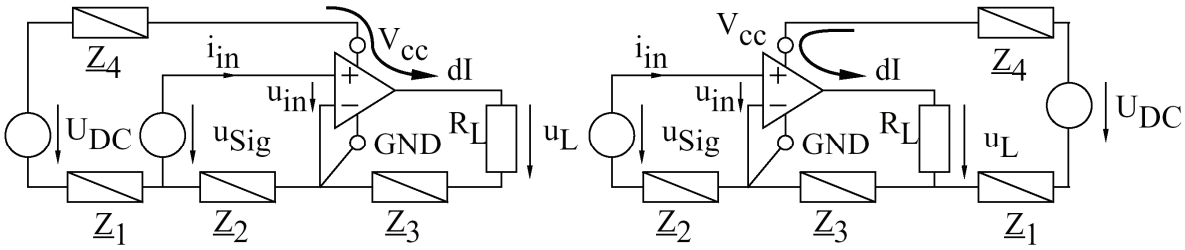
a) Zeichnen Sie die Anordnung bestehend aus Regelkreis, Leistungskreis und der als Kopplung wirkenden gemeinsamen Masseleiterbahn. Verwenden Sie für die Masseleiterbahn ein diskretes RL-Leitungsmodell. (K2)

b) Berechnen Sie die Differentialgleichung der Spannung u_k über der Koppelimpedanz des gemeinsamen Masseleiterabschnitts in Funktion der Versorgungsspannung u_{DC} und der Signalspannung u_S bei konstanten Widerständen R_S und R_L. (K2)

c) Massnahmen zur Verringerung des Einflusses der Impedanzkopplung:
   - Zeichnen Sie für die geregelte Spannungsversorgung eine Anordnung mit geringerer Impedanzkopplung. (K3)
   - Begründen Sie Ihren Lösungsvorschlag mit einem bis zwei Sätzen. (K2)

Frage 2: **Stromanalyse**

Sie arbeiten als Entwicklungsingenieur in einer Firma, welche Sensoren herstellt. Ihr Spezialgebiet ist die analoge Signalverarbeitung. Eines Tages fragt Sie ein junger Kollege, welcher an der Entwicklung eines neuen Produktes beteiligt ist, um Rat. Die sehr kleinen Signalamplituden am Sensorausgang stellen hohe Anforderungen an die Signal-Vorverarbeitung. Ihr Kollege fühlt sich in bezug auf die Versorgung und Erdung seiner Verstärkerschaltung noch unsicher. Er möchte von Ihnen wissen, welche seiner zwei nachfolgend dargestellten Schaltungen besser geeignet ist:



Vorschlag 1 Vorschlag 2

Bild 44: Schaltungsvorschläge für Verstärkerstufe

a) Führen Sie für beide Schaltungsvorschläge nach Bild 44 die Stromanalyse durch. (K1)

b) Analysieren Sie die zwei Schaltungen im Hinblick auf ihre Empfindlichkeit gegenüber schnellen Umladevorgängen im Lastkreis R_L des Operationsverstärkers. Die benötigten kurzen und hohen Stromimpulse dI müssen von der Versorgungsspannung u_{DC} geliefert werden. Nehmen Sie dabei für Ihre Betrachtungen an, dass der Eingangsstrom i_{in} des Operationsverstärkers null ist. (K4)

c) Berechnen Sie für beide Schaltungsvorschläge:

1. die Eingangsspannung u_{in} des Operationsverstärkers
2. die Schwankungen dV_{cc} am Versorgungsanschluss V_{cc} des Operationsverstärkers in Funktion auf die von den Umladevorgängen verursachten Stromimpulse dI. Als Spannung V_{cc} wird die Potentialdifferenz zwischen den Klemmen V_{cc} und GND des Operationsverstärkers bezeichnet. (K3)

Frage 3: **Versorgungs-und Erdungssystem**

Sie arbeiten in einem Ingenieurbüro als Fachmann auf dem Gebiet der Energieversorgung von vernetzten Rechenanlagen. Eine Grossbank erteilt Ihrem Büro den Auftrag, die technischen Einrichtungen ihres neuen Dienstleistungszentrums zu planen.
Ihre Kollegen aus der Abteilung für Computer- und Kommunkationssysteme haben sich ein modulares Konzept ausgedacht, zu dem Sie nun ein passendes Versorgungs- und Erdungssystem entwerfen müssen. Die einzelnen Module sind in drei Elektronikschränken untergebracht. Dies ist in Bild 45 schematisch dargestellt.

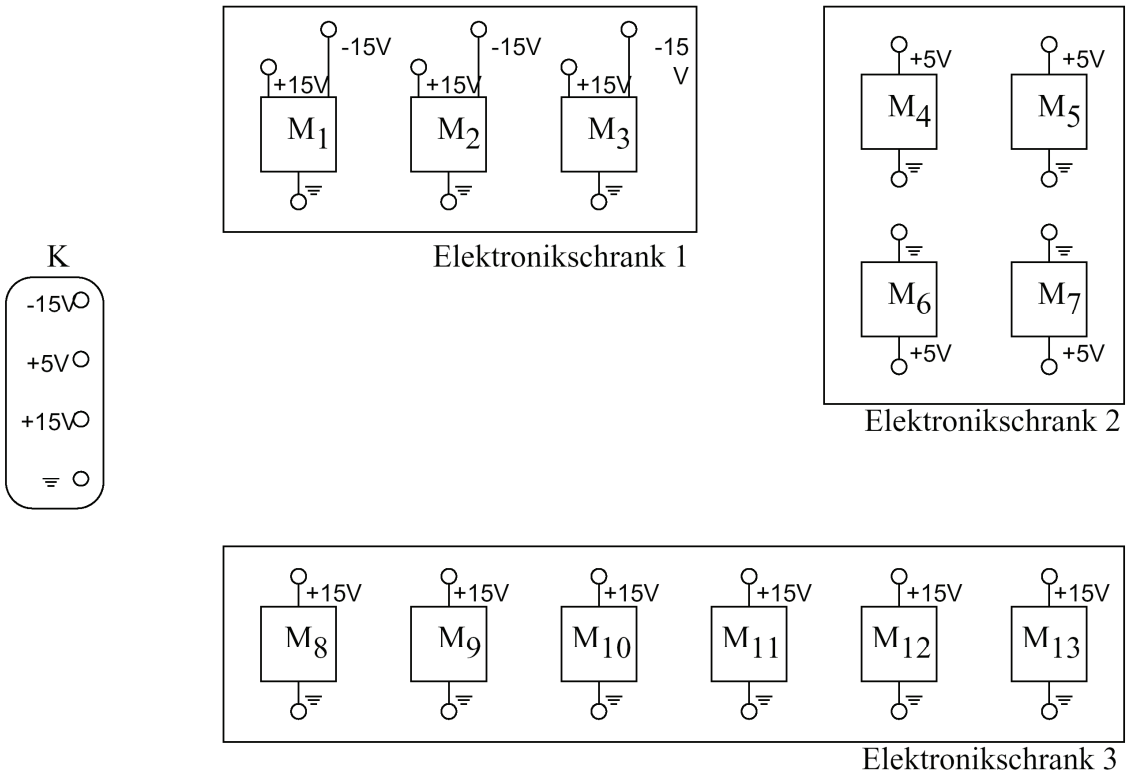


Bild 45: Modulares Computer- und Kommunikationssystem

a) Entwerfen Sie für das geplante neue System ein Versorgungs- und Erdungssystem mit möglichst geringer Impedanzkopplung. Schliessen Sie dazu die Versorgungs- und Masseanschlüsse der einzelnen Module M_i an den Klemmenkasten K der zentralen Speisung an. Sie brauchen dabei lediglich die einzelnen Verbindungen ins Bild 45 einzuzeichnen.(K3)

b) Begründen Sie Ihren Lösungsvorschlag mit ein paar Sätzen. Zählen Sie dazu mindestens je einen Vor- und Nachteil Ihrer Lösung gegenüber der in der Praxis oft zu beobachtenden Reihenmassestruktur auf. (K4)

Antworten auf die persönliche Lernkontrolle

Antwort 1: **Mechanismus der Impedanzkopplung**

a) Die Impedanzkopplung zwischen dem Leistungsteil und der Regelung der Spannungsversorgung sieht wie folgt aus:

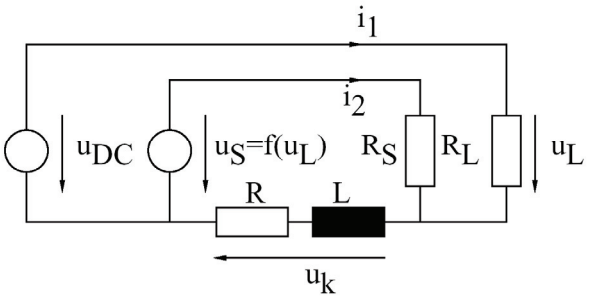


Bild 46: Impedanzkopplung zwischen Regelung und Leistungsteil

b) Für die Spannung u_k über der Koppelimpedanz des gemeinsamen Masseleiterabschnitts gilt das folgende Gleichungssystem:

$$\left|\begin{array}{lcl} u_k & = & R\cdot(i_1+i_2)+L\cdot\frac{d}{dt}(i_1+i_2) \\ U_{DC} & = & R_L\cdot i_1+u_k \\ U_S & = & R_S\cdot i_2+u_k \end{array}\right|$$

Bei konstanten Widerständen R_S und R_L ergibt sich daraus für die Spannung u_k die Differentialgleichung:

$$\underline{\underline{\left[1+R\cdot\frac{R_L+R_S}{R_L\cdot R_S}\right]u_k+L\cdot\frac{R_L+R_S}{R_L\cdot R_S}\cdot\frac{du_k}{dt}=\frac{R}{R_L}\cdot u_{DC}+\frac{L}{R_L}\cdot\frac{du_{DC}}{dt}+\frac{R}{R_S}\cdot u_S+\frac{L}{R_S}\cdot\frac{du_S}{dt}}}$$

c) Durch Verzicht auf die gemeinsame Masseleitung kann die Impedanzkopplung zwischen der Regelung und dem Leistungskreis beseitigt werden:

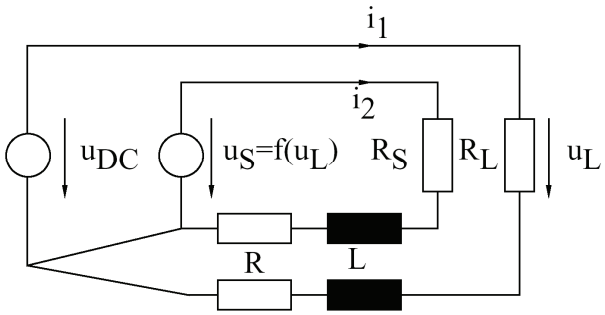


Bild 47: Regelung und Leistungsteil ohne gegenseitige Impedanzkopplung

Der Spannungsabfall an einem RL-Leitungsstück kann zwar sowohl im Regelungs- wie auch im Leistungskreis nicht vermieden werden. Die Impedanzkopplung hingegen kann durch die sternpunktartige Verbindung der beiden Stromkreise in nur einem Punkt beseitigt werden.

Wenn Sie in der Lage waren, die Frage 1 vollständig zu lösen, haben Sie den Mechanismus der Impedanzkopplung sehr gut verstanden und können getrost zur nächsten Aufgabe übergehen. Falls Sie noch nicht alles verstanden haben, empfehlen wir Ihnen, den Abschnitt *"Koppelmechanismus"* nochmals zu studieren.

Antwort 2: **Stromanalyse**

a) Führen wir für die beiden Schaltungsvorschläge von Bild 44 die Stromanalyse durch, so gelangen wir zu folgendem Bild:

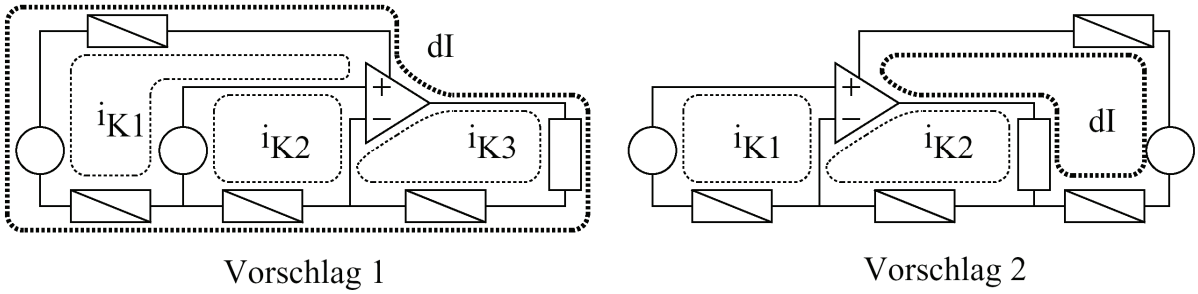


Bild 48: Stromanalyse der Verstärkerschaltungen

b) Unter der Annahme, dass der Eingangsstrom i_{in} des Operationsverstärkers vernachlässigbar klein ist, fallen beim Vorschlag 1 die Stromkreise i_{K1} bis i_{K3} ausser Betracht. Beim Vorschlag 2 betrifft dies die Maschen i_{K1} und i_{K2}.

In Bild 48 bleiben nur noch die beiden von den schnellen Umladevorgängen im Lastkreis R_L des Operationsverstärkers erzeugten dI-Stromkreise übrig. Die hohen Stromimpulse dI erzeugen bei der Schaltung nach Vorschlag 1 über der Impedanz $\underline{Z}_2$ Störungen am Verstärkereingang. Beim Schaltungsvorschlag 2 hingegen haben sie keine Auswirkungen auf die Eingangsspannung u_{in} der Verstärkerstufe.

In der Schaltung nach Vorschlag 2 sind darüber hinaus die Impedanzen $\underline{Z}_2$ und $\underline{Z}_3$ nicht von den Umlade-Stromimpulsen dI durchflossen. Im Gegensatz dazu fliessen die Stromimpulse beim Vorschlag 1 durch sämtliche Leitungsimpedanzen $\underline{Z}_1$ bis $\underline{Z}_4$. Deshalb ist die Schaltung nach Vorschlag 1 viel empfindlicher als jene nach Vorschlag 2 gegenüber schnellen Umladevorgängen im Lastkreis des Operationsverstärkers.

c) 1. Die Berechnung der *Eingangsspannung* u_{in} des Operationsverstärkers ergibt

- für den *Schaltungsvorschlag 1:* $u_{in} = u_{Sig} + dI \cdot Z_2$
- für den *Schaltungsvorschlag 2:* $u_{in} = u_{Sig}$

2. Die Schwankungen dV_{cc} am Versorgungsanschluss V_{cc} des Operationsverstärkers lassen sich mit Hilfe der von den dI-Stromimpulsen hervorgerufenen Spannungsabfällen bestimmen. Aus der Masche U_{DC}-Leitung-V_{cc}-GND-Leitung-U_{DC} ergeben sich folgende Schwankungen dV_{cc} am Versorgungsanschlusspunkt V_{cc}:

- für den *Schaltungsvorschlag 1:*

$$dV_{cc} = \pm dI \cdot (Z_1 + Z_2 + Z_4)$$

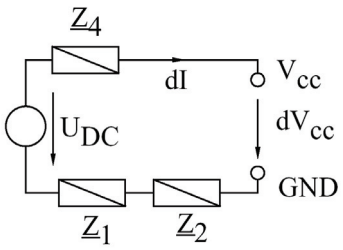


Bild 49: Schwankungen dV_{cc} und wirksame Ersatzschaltung nach Vorschlag 1

- für den *Schaltungsvorschlag 2:*

$$dV_{cc} = \pm dI \cdot (Z_1 + Z_4)$$

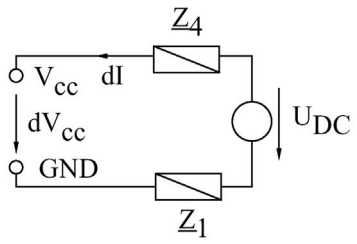


Bild 50: Schwankungen dV_{cc} und wirksame Ersatzschaltung nach Vorschlag 2

Diese Berechnungen bestätigen, dass die Schaltung nach Vorschlag 1 deutlich weniger empfindlich auf Stromimpulse in den Zuleitungen zur Spannungsversorgung reagiert als jene nach Vorschlag 2. Sowohl die Schwankungen am Versorgungsanschluss als auch die Rückwirkungen auf den Eingang des Operationsverstärkers sind beim zweiten Schaltungsvorschlag geringer als beim ersten.

Waren Sie in der Lage, die beiden Schaltungsvorschläge anhand der Stromanalyse miteinander zu vergleichen und die treffenden Folgerungen zu ziehen, gratulieren wir Ihnen herzlich. Sie haben damit gezeigt, dass Sie fähig sind, das Gelernte anzuwenden und das zugrundeliegende Prinzip zu erkennen. Hatten Sie bei einigen Teilfragen noch vereinzelt Schwierigkeiten, empfehlen wir Ihnen die Abschnitte *"Koppelmechanismus"* und *"Stromanalyse zur Erkennung der Impedanzkopplung"* nochmals etwas genauer anzuschauen.

Antwort 3: **Versorgungs-und Erdungssystem**

a)

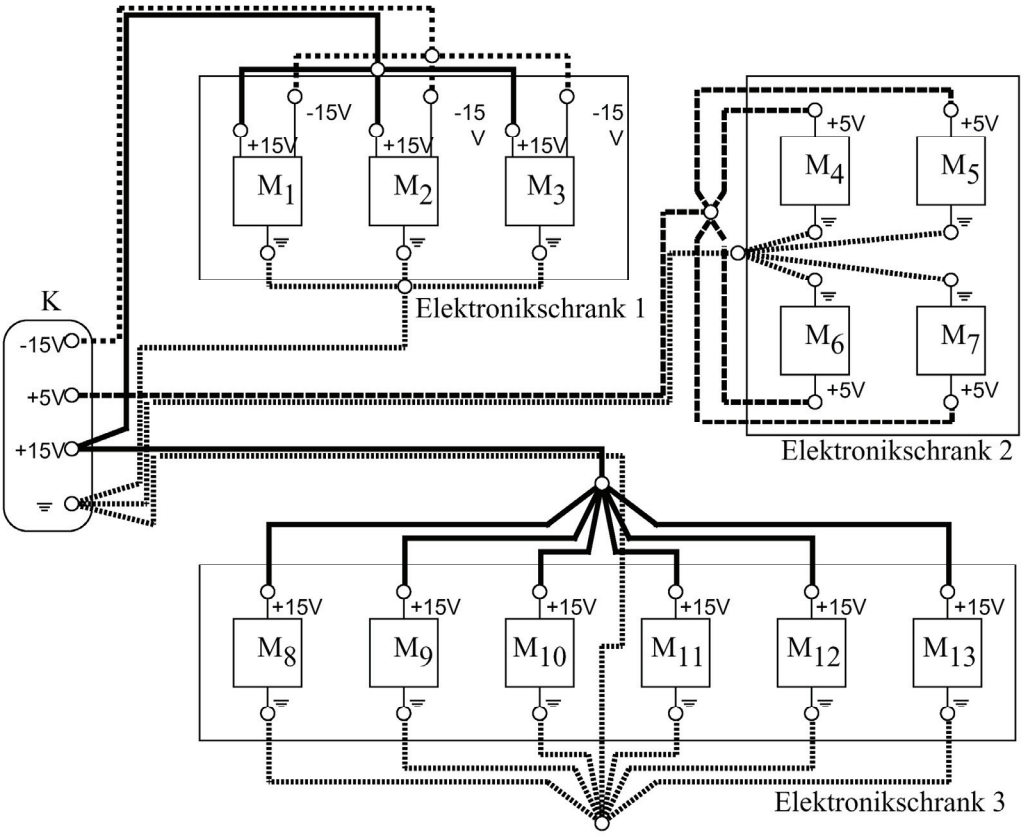


Bild 51: Versorgungs- und Erdungssystem des Computer- und Kommunikationssystems

Das Bild 51 zeigt eine mögliche Ausführung des Versorgungs- und Erdungssystems des neuen modularen Computer- und Kommunikationssystems.

b) Unsere Lösung für das Versorgungs- und Erdungssystems weist eine sternförmige Struktur auf. Die Untersternpunkte am Eingang der drei Teileinheiten wurden aufgrund der grossen Ausdehnung der Schaltung gewählt. Ein einziger Sternpunkt hätte unzumutbar lange Verbindungen zu den einzelnen Modulen zur Folge.
Beachten Sie die Verringerung der wirksamen Zuleitungsinduktivitäten durch die enge parallele Leiterführung des Hin- und Rückleiters.

Gegenüber der Reihenmassestruktur, bei welcher die Versorgungs- und Masseleitungen, wie in Bild 38 dargestellt, von einer Komponente zur nächsten geschlauft werden, weist die Sternstruktur mehrere triftige Vorteile auf:

- Die Sternstruktur entkoppelt die einzelnen Module und Teileinheiten einer Schaltung voneinander. Dadurch wird verhindert, dass Stromänderungen in der Versorgung eines Moduls durch Impedanzkopplung sich störend auf ein benachbartes Modul auswirken können.
- Die Sternstruktur vermeidet, dass einzelne Module und Teileinheiten einer Schaltung unterschiedliche Bezugspotentiale zur gemeinsamen Masse aufweisen.
- Ein entscheidender Vorteil der Sternstruktur ist ihre Unempfindlichkeit gegenüber Störströmen, die von aussen her auf die Masse eingeprägt werden. Sie verursachen, wie in Bild 40 gezeigt wurde, keinen Spannungsabfall im gemeinsamen Sternpunkt.

Ein Nachteil der Sternstruktur gegenüber der Reihenmassestruktur sind die im allgemeinen längeren Masseverbindungen. Dadurch werden die Zuleitungsimpedanzen grösser. Dies wiederum hat höhere Spannungsabfälle in den Versorgungs-Masse-Leitungen zur Folge.

Gesamthaft überwiegen die Vorteile der Sternstruktur die Nachteile bei weitem. Darin liegt auch der Grund, dass wir uns für eine sternförmige Struktur des Versorgungs- und Erdungssystems entschieden haben.

Falls Sie in der Lage waren, die Frage 3 vollständig zu beantworten, haben Sie das Prinzip der Impedanzkopplung gut verstanden. Sie haben damit bewiesen, dass Sie fähig sind, ein Problem im Bereich der Impedanzkopplung zu analysieren und die wesentlichen Vor- und Nachteile der einzelnen Versorgungs-Masse-Systeme zu erkennen. Hatten Sie vereinzelt noch Schwierigkeiten, empfehlen wir Ihnen, die drei kurzen Abschnitte *"Reihenmassestruktur"* , *"Sternstruktur"* und *"Versorgungs-Masse-System"* nochmals etwas genauer anzuschauen.

Nach erfolgreicher persönlicher Lernkontrolle sind Sie gut vorbereitet für die Diskussion innerhalb Ihrer Expertenrunde und die anschliessende Unterrichtsrunde.
Nutzen Sie jetzt die noch verbleibende Zeit, bis alle Ihre Kollegen für die Diskussion bereit sind, um sich nochmals jene Abschnitte im Stoff einzuprägen, in denen Sie sich noch nicht so sattelfest fühlen.

Allgemeine Unterlagen für alle

Elektromagnetische Beeinflussung

Die Beschreibung der elektromagnetischen Beeinflussung erfolgt nach einem Beeinflussungsmodell, das aus Störquelle, Kopplung und Störsenke besteht. Voraussetzung für den Mechanismus der Störbeeinflussung ist dabei mindestens eine Quelle, von der Störgrössen ausgehen, und eine Senke, die durch diese Störgrössen beeinträchtigt werden kann. Die Störquelle und die Störsenke sind über einen physikalischen Mechanismus so miteinander verbunden, dass die Störgrössen der Störquelle auf die Senke einwirken können. In der Fachsprache bezeichnet die Kopplung den physikalischen Mechanismus, über den Störquelle und Störsenke miteinander verbunden sind.

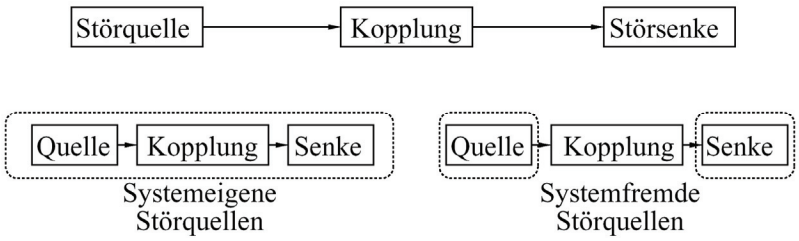


Bild 52: EMV-Beeinflussungsmodell

Dabei können Quellen und Senken innerhalb oder ausserhalb des betrachteten Systems liegen. Wir sprechen daher von systemeigenen oder systemfremden Ursachen und Folgen.

- Ursachen für das Auftreten systemeigener Beeinflussungen sind beispielsweise schnelle Signalwechsel auf Steuer- oder Datenleitungen, Schaltvorgänge in Leistungsstufen, Magnetfelder induktiver Komponenten oder solche von Speicherlaufwerken, Rauschen aktiver und passiver Bauelemente und anderes mehr.
- Beispiele von systemfremden Beeinflussungen sind Blitzentladungen, elektrostatische Entladungen an Kleidern, Werkzeugen und Einrichtungen in der Umgebung des Systems und Störungen, welche über die 50 Hz-Versorgung ins System gelangen.

Die Beeinflussung erfolgt durch elektromagnetische Grössen, den sogenannten Störgrössen. Es kann sich dabei um Ströme, Spannungen, elektrische Felder oder magnetische Felder handeln.

Als potentielle Störquellen müssen alle Einrichtungen oder Teileinrichtungen sowie Ereignisse von ihnen betrachtet werden, bei denen eine elektromagnetische Energieumsetzung erfolgt.

Als Störsenken sind alle Einrichtungen oder entsprechende Teile zu betrachten, die durch Störgrössen über Kopplungen in ihrer Funktion beeinflusst werden. Die Kopplung erfolgt nach den Gesetzen der Energieübertragung im elektromagnetischen Feld.

Mini-Didaktik

Den Stoff einwandfrei zu beherrschen, ist die Grundvoraussetzung für einen guten und lehrreichen Unterricht. Viel Wissen allein reicht dafür aber nicht aus. Sie müssen sich noch überlegen, wie Sie Ihr Wissen Ihren Kolleginnen und Kollegen aus den anderen Expertenrunden am besten vermitteln können.
Die Wirkung verschiedener Unterrichtsformen und Unterrichtsmethoden auf die Schul- und Studienleistung ist wissenschaftlich gut erforscht. Unser Ziel in dieser Mini-Didaktik besteht nicht darin, Ihnen möglichst viele dieser Forschungsergebnisse zu präsentieren. Uns geht es vielmehr darum, Ihnen als "Junglehrerin" oder als "Junglehrer" eine Anleitung mit praktisch direkt umsetzbaren Tips zu geben. Diese Anleitung soll Ihnen helfen, Ihr Wissen Ihren Kolleginnen und Kollegen möglichst effizient zu vermitteln.

" Auf diesem Blatt finden Sie fünf Tips für die Unterrichtsrunde.

1. **Überblick in drei Sätzen**
   Geben Sie den anderen Schülern in drei Sätzen einen Überblick über das, was Sie bei Ihrem Stoffgebiet gelernt haben. Sagen Sie Ihnen nur, was für Sie das wichtigste war, z.B. "Ich erzähle Euch in der nächsten Viertelstunde, was alles vorhanden sein muss, damit man von einem Lebewesen sprechen kann".
2. **Was wissen oder können die Zuhörer nachher**
   Sagen Sie Ihren Mitschülerinnen, was sie nach der Unterrichtsrunde von Ihrem Stoffgebiet wissen und was sie nachher können müssen. Orientieren Sie sich dafür an Ihren Lernzielen vorne in den Unterlagen.
3. **Unterrichtsblock**
   Jetzt wird es ernst! Sie tragen nun den anderen vor, was Sie gelernt haben. Vielleicht hilft Ihnen da eine kleine Geschichte, oder Sie machen eine Zeichnung. Wichtig ist, dass sich Ihre Zuhörerinnen etwas vorstellen können.
4. **Zusammenfassung**
   Am Schluss fassen Sie das Wichtigste nochmals kurz zusammen. Zwei, drei Sätze reichen!
5. **Keine Fremdwörter**
   Sprechen Sie einfach! Verwenden Sie keine Fremd- oder Fachwörter. Sonst werden die Schüler verunsichert und schalten ab. Erklären Sie die Themen so einfach, dass Ihre Zuhörer nachher zufrieden "Aha" sagen können.

" (Frey K., Schleich R., Frey-Eiling A. 1994, 17)

An dieser Stelle noch zwei Bemerkungen:
- Oft erleben Sie als Lehrperson, dass die zuhörenden Schülerinnen und Schüler viele Fragen stellen. Wir empfehlen Ihnen daher, für allfällige Fragen in Ihrer Unterrichtseinheit genügend Zeitreserve einzuplanen.
- Falls Sie sich bei der didaktischen Strukturierung und über die zu wählende Unterrichtsmethode unsicher fühlen, können Sie jederzeit Ihre Lehrerin oder Ihren Lehrer fragen.

Praktischer Versuch

Praktischer Versuch

Ziele des Versuches

- Sie können die kapazitive und magnetische Kopplung experimentell nachweisen.
- Sie wissen, welche der verschiedenen Abhilfemassnahmen und Schirmungen Sie gegen bestimmte Störungseinkopplungen ergreifen können und haben ihre Wirkung praktisch überprüft.

Versuchsaufbau

Auf einer gedruckten Schaltung sind ein Störkreis sowie zwei Messkreise aufgebracht. Verschiede Leitungsanordnungen können durch einfaches Umstecken getestet werden. Damit sollen Sie die kapazitiven und magnetischen Kopplungseffekte nachmessen.
Zusammen mit der Impedanzkopplung über ein Stück gemeinsame Leitung treten immer noch kapazitive und/oder magnetische Kopplungen auf. Deshalb lässt sich die Impedanzkopplung nicht für sich allein in dieser einfachen Versuchsanordnung nachmessen.

Störkreis

Der Störkreis mit dem Lastwiderstand $R_{Stör}$ wird über einen Frequenzgenerator gespeist. Der Frequenzgenerator kann verschiedene Kurvenformen, Amplituden und Frequenzen erzeugen.

Messkreis 1 und 2

Das Nutzsignal im Messkreis 1 ist null. Der Messkreis besteht also nur aus einer Masche mit dem Innenwiderstand R_i der Nutzsignal-Spannungsquelle und einem Messwiderstand R_1. Da das Nutzsignal null ist, können wir also direkt das eingekoppelte Störsignal als Potentialdifferenz über den Anschlussklemmen des Messwiderstandes nachmessen. Der zeitliche Verlauf des Störanteils wird mit einem Oszillographen dargestellt.
Der Messkreis 2 besteht nur aus einer verdrillten Leiterschlaufe und einem Messwiderstand R_2. Wir können also damit die magnetisch eingekoppelten Störsignale als Potentialdifferenz über den Anschlussklemmen des Messwiderstandes R_2 nachmessen.
Der Messwiderstand R_1 oder R_2 ist durch die Eingangsimpedanz des Oszillographen festgelegt. Durch Auswechseln der Widerstände R_i und $R_{Stör}$ sowie durch Umstecken der Störspannung $u_{Stör}$ und des KO-Spannungsabgriffs können leicht verschiedene Anordungen ausgemessen werden.

Versuchsdurchführung

Da Sie nun mit dem Versuchsaufbau bestens vertraut sind, können Sie sich an die praktische Arbeit machen!

Was Sie genau messen und nachweisen müssen, steht in der folgenden Anleitung. Selbstverständlich dürfen Sie neben den hier beschriebenen Versuchen auch noch eigene Vermutungen und Annahmen verifizieren. Achten Sie dabei aber auf den Zeitplan, so dass Sie sicher das vorgeschriebene Pensum erledigen können!

Einstellungen am Oszillosgraphen

Sie benötigen zwei Kanäle des Oszillographen. Auf Kanal 1 wird immer die Ausgangsspannung des Funktionsgenerators dargestellt. Der erste Kanal zeigt somit den Verlauf der Störspannung an. Mit dem Kanal 2 wird der eingekoppelte Störanteil der Störspannung im Nutzkreis angezeigt. Die horizontale und vertikale Ablenkung müssen Sie in jedem Teilversuch in Abhängigkeit des Signalverlaufes passend eingestellen.

Einstellungen am Funktionsgenerator

Die Amplitude, Frequenz und Kurvenform der Ausgangsspannung kann verändert werden. Die Amplitude der Störspannung lässt sich kontinuierlich zwischen null und 25V einstellen. Die Frequenz kann zwischen einigen Hertz und 1MHz variiert werden. Als Kurvenformen dienen Rechteck, Dreieck und Sinus.

Kapazitive Kopplung

Um magnetische Kopplungseffekte auszuschalten, wird $R_{Stör}$ unendlich gesetzt. Das bedeutet, dass die entsprechenden Buchsen offen bleiben.

Stellen Sie als Kurvenform der Störquelle ein Rechteck mit einer Grundfrequenz von 100kHz ein. Setzen Sie für den Innenwiderstand der Nutzsignalquelle R_i einen 470 Ohm Widerstand ein. Welche Kurvenform erwarten Sie für die Spannung über R_1?

1. Wählen Sie eine Leiterbahnanordnung so, dass der spannungsführende Leiter des Störkreises möglichst nahe beim Nutzkreis liegt. Variieren Sie die Amplitude des Störsignals.
   Erkennen Sie die Proportionalität?
2. Variieren Sie den Innenwiderstand R_i der Nutzsignalquelle zwischen null und 10 kOhm. Erkennen Sie auch hier eine Proportionalität?
   Setzten Sie anschliessend wieder den 470 Ohm Widerstand ein.
3. Variieren Sie nun den Abstand zwischen Mess- und Störkreis. Formulieren Sie Ihre Erwartungen im voraus. So können Sie überprüfen, ob Sie den Stoff verstanden haben!
4. Ändern Sie die Anordung so, dass eine Schirmleiterbahn zwischen dem Stör- und Messkreis liegt.
   - Messen Sie den Koppeleinfluss, ohne die Schirmleiterbahn zu erden.
   - Messen Sie den Koppeleinfluss mit geerdeter Schirmleiterbahn.

   Werden Sie bei Ihrem nächsten Printlayout an kritischen Stellen Schirmleiterbahnen einsetzen, um kapazitive Kopplungen zu vermindern?
5. Stellen Sie nun die Anordung mit dem grössten Koppeleinfluss wieder her. Ändern Sie die Grundfrequenz des Störsignals auf 500kHz. Verwenden Sie nun das Dreieck als Kurvenform.
   Welche Kurvenform erwarten Sie für die Spannung über R_1?
6. Die Koppelkapazität soll über Messungen bestimmt werden. Verwenden Sie dazu die Sinus-Kurvenform bei 500kHz. Messen Sie die Amplituden über die Skalierung der Anzeige des Oszillographen.
   Überlegen Sie sich, aus welchen Beziehungen Sie die Koppelkapazität berechnen können.

Magnetische Kopplung

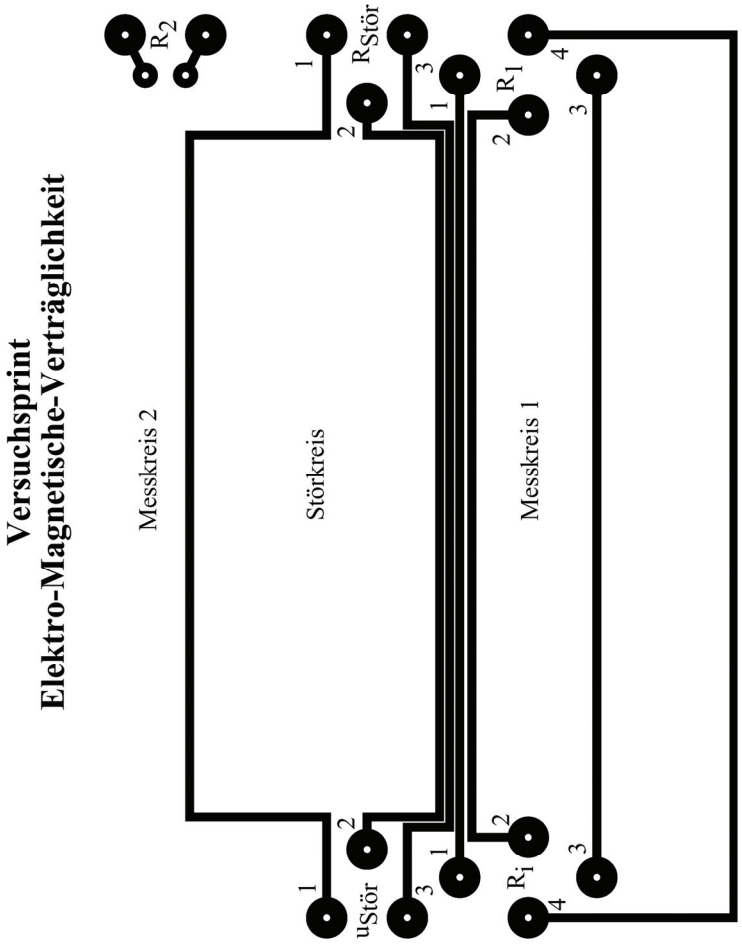
Um kapazitive Kopplungseffekte auszuschalten, wird der Innenwiderstand R_i der Nutzquelle null gesetzt. Das bedeutet, dass die entsprechenden Buchsen kurzgeschlossen werden.

Stellen Sie als Kurvenform der Störquelle ein Rechteck mit einer Grundfrequenz von 100kHz ein. Setzen Sie für den Störwiderstand $R_{Stör}$ einen 47 Ohm Widerstand ein. Sie können davon ausgehen, dass der Strom im Störkreis denselben Verlauf wie die Störspannung aufweist. Daher dürfen sie weiterhin die Störspannung im Störkreis messen.
Welche Kurvenform erwarten Sie nun für die Spannung über R_1?

1. Wählen Sie eine Leiterbahnanordnung so, dass eine maximal grosse Leiterschlaufe des Messkreises entsteht. Sie soll möglichst nahe am Störkreis liegen. Variieren Sie mit der Amplitude des Störspannung den Sörstrom.
   Erkennen Sie die Proportionalität?
2. Variieren Sie nun die Schlaufengrösse des Messkreises und den Abstand zwischen Mess- und Störkreis.
   Formulieren Sie wiederum Ihre Erwartungen im voraus.

4. Ändern Sie die Anordung so, dass eine Schirmleiterbahn zwischen dem Stör- und dem Messkreis zu liegen kommt. Messen Sie den Koppeleinfluss mit geerdeter Schirmleiterbahn. Werden Sie bei Ihrem nächsten Printlayout an kritischen Stellen Schirmleiterbahnen einsetzen, um magnetische Einkopplungen zu vermindern?
5. Messen Sie den Koppeleinfluss in der verdrillten Leiterschlaufe nach.
6. Stellen Sie nun die Anordung mit dem grössten Koppeleinfluss wieder her. Ändern Sie die Grundfrequenz des Störsignals auf 500kHz. Verwenden Sie nun das Dreieck als Kurvenform. Welche Kurvenform erwarten Sie für die Spannung über R_1?
7. Die Gegeninduktivität soll über Messungen bestimmt werden. Verwenden Sie dazu die Sinus-Kurvenform bei 500kHz. Messen Sie die Amplituden über die Skalierung der Anzeige des Oszillographen.
   Überlegen Sie sich, aus welchen Beziehungen Sie die Gegeninduktivität berechnen können.

Gedruckte Schaltung



Printlayout der Versuchsschaltung

Fragebogen zur EMV

Fragebogen zur EMV Serie A

Teilgebiet: Übersicht und Umfeld von EMV

Frage 1: **Begriffe und Definitionen**

Sie sind als Entwicklungsingenieur in einem Unternehmen tätig, das Unterbruchfreie Stromversorgungen (USV) herstellt. Um unter Fachleuten auf dem Gebiet der elektromagnetischen Verträglichkeit mitreden zu können, müssen Sie die wichtigsten EMV-Begriffe kennen.

a) Erklären Sie einem Nichtfachmann mit eigenen Worten den Begriff EMV.
(K2) **(2 Punkte)**

b) Definieren Sie die Begriffe EMC, EMS und EMI.
(K1) **(3 Punkte)**

Frage 2: **Störquellen und Ausbreitungspfade**

Sie sind als Entwicklungsingenieur in der Automobilindustrie tätig. Im Bereich der elektromagnetischen Verträglichkeit EMV werden zunehmend genauere gesetzliche Bestimmungen und Vorschriften erlassen, welche insbesondere auch die Haftung der Hersteller für Ihre Produkte genau regeln. Sie werden deshalb beauftragt, die für den Automobilsektor relevanten EMV-Störquellen und Ausbreitungspfade genau zu ermitteln.

a) Analysieren Sie, welche externen EMV-Störquellen für die Automobilhersteller von Bedeutung sind. Zählen Sie mindestens fünf externe Störquellen auf und nennen Sie zu jeder Quelle den Ausbreitungspfad der Störungen.
(K4) **(3 Punkte)**

b) Nennen Sie vier mögliche interne Störquellen. Geben Sie wiederum zu jeder Quelle den Ausbreitungspfad der Störungen an.
(K4) **(3 Punkte)**

c) Wo im EMV-Beeinflussungsmodell bieten sich Ihnen als Automobilhersteller Eingriffsmöglichkeiten, um:
- bei externen Störquellen
- bei internen Störquellen

unerwünschte Störeinflüsse auf das Auto zu reduzieren? Nennen Sie alle möglichen Eingriffsorte gemäss dem EMV-Beeinflussungsmodell.
(K3) **(2 Punkte)**

Teilgebiet: Kapazitive Kopplung

Frage 3: **Schutz der Datenübertragung gegen kapazitive Störungseinflüsse**

Sie arbeiten in einer Studiengruppe eines modernen Dienstleistungsunternehmens. Ihre Aufgabe besteht darin, sich Konzepte für eine möglichst störungsfreie Datenübertragung in stark elektromagnetisch beeinflussungsgefährdeten Kabelschächten zu erarbeiten.
Sie überlegen sich, welche Eigenschaften die Treiberstufen zu Beginn der Datenleitungen

haben sollten, um auch im Falle starker kapazitiver Störeinflüsse eine möglichst störungsfreie Datenübertragung sicherzustellen.

a) Ist eine Strom- oder eine Spannungsquelle als Signalquelle besser geeignet? Begründen Sie Ihre Antwort mit zwei bis drei Sätzen.
(K4) **(3 Punkte)**

b) Nennen Sie mindestens drei Massnahmen, um in langen Kabelschächten die kapazitive Beeinflussung zwischen den einzelnen Datenübertragungsleitungen zu verringern.
(K1) **(2 Punkte)**

Frage 4: **Beurteilung kapazitiver Schirmungen für Leiterplatten**

Sie sind Entwicklungsleiter eines kleinen Unternehmens, welches Stromversorgungen herstellt. Um die Zuverlässigkeit eines Schaltnetzteiles zu steigern, soll die Leiterplatte mit der Steuerungs- und Regelungselektronik geschirmt werden. Einer Ihrer Entwicklungsingenieure hat sich eine Lösung überlegt und fragt Sie um Rat.
Zum Schutz der Steuerungs- und Regelungselektronik soll die Leiterplatte mit einer Schirmleiterbahn versehen werden. In Bild 53 ist die Leiterplatte mit Schirmleiterbahn, welche an einer Stelle an Masse gebunden ist, schematisch dargestellt.

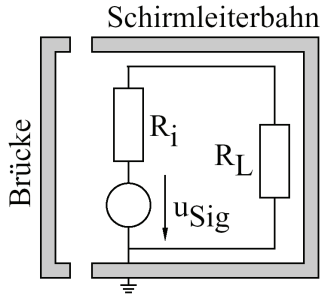


Bild 53: Leiterplatte mit Schirmleiterbahn

a) Über die Brücke kann die Leiterbahn kurzgeschlossen werden. Bietet die Anordnung
- bei offener Brücke
- bei geschlossener Brücke

dem elektronischen Schaltkreis auf der Leiterplatte guten Schutz gegen kapazitive Einkopplungen? Begründen Sie Ihre Antwort mit zwei bis drei Sätzen.
(K3) **(3 Punkte)**

b) Wie kann die wirksame Kopplungskapazität zwischen der Schirmleiterbahn und der Signalleitung beseitigt werden? Wie muss die bestehende Anordnung geändert werden, damit dieses Ziel erreicht wird? Zeichnen Sie Ihren Lösungsvorschlag und begründen Sie ihn kurz.
(K4) **(3 Punkte)**

Teilgebiet: Magnetische Kopplung

Frage 5: **Beurteilung magnetischer Störeinflüsse**

Sie sind in einem grossen Ingenieurunternehmen für die Aus- und Weiterbildung der Mitarbeiter zuständig. Ihr nächster Auftrag besteht darin, dem Kader der Abteilung für Datenverarbeitung und Kommunikationsnetze die grundlegenden EMV-Phänomene beizubringen.

a) Stellen Sie den magnetischen Koppelmechanismus und die dafür massgebende Ersatzschaltung dar. In Ihrer Anordnung sollen Nutz- und Störkreis, welche über eine parasitäre Kopplung

miteinander verbunden sind, erkennbar sein. Leiten Sie anschliessend die Beziehung für die Spannung u_L am Ausgang des Nutzkreises her.
(K2) **(2 Punkte)**

b) Wie sieht für die Anordnung nach Bild 19 der Kurvenverlauf des Störspannungsanteils $u_{LStör}$ am Verbraucher aus, wenn der Störstrom $i_{Stör}$ folgende Verläufe aufweist?

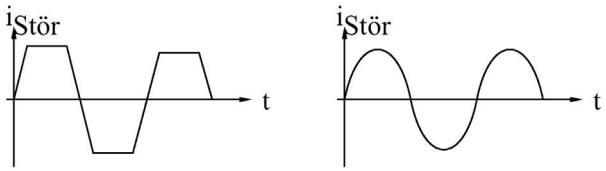


Bild 54: Verläufe des Störstromes

(K3) **(3 Punkte)**

Frage 6: **Beeinflussung durch Magnetfelder**

Sie arbeiten als Ingenieur in der Entwicklungsabteilung eines Unternehmens, das getaktete Stromversorgungen herstellt. Der Leistungsteil einer Ihrer Neuentwicklungen enthält mehrere Transformatoren und Drosseln. In Bild 55 ist ihre Anordnung schematisch dargestellt.

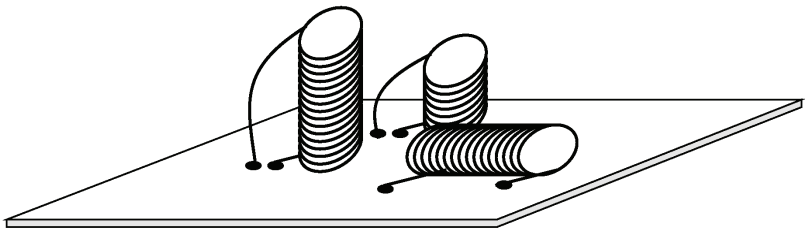


Bild 55: Schematische Anordnung der magnetischen Komponenten des Leistungsteils

Die benötigte umfangreiche Steuerungs- und Regelungselektronik ist auf einer separaten Leiterplatte untergebracht, die Sie gut gegen eine magnetische Beeinflussung vom Leistungsteil her schützen wollen.

a) Bei der gegebenen Anordnung der magnetischen Bauteile ist es möglich, die Signalelektronik ohne Verwendung von Abschirmungen vor unerwünschter magnetischer Beeinflussung zu bewahren. Überlegen Sie sich, wie Sie die Leiterplatte mit der Signalelektronik anordnen müssen, um sie von den Drosseln und Transformatoren des Leistungsteils magnetisch zu entkoppeln. Zeichnen Sie Ihre Lösung in Bild 55 ein.
(K3) **(3 Punkte)**

b) Nennen Sie drei weitere Möglichkeiten, um die magnetische Beeinflussung zwischen Signal- und Leistungsteil zu verringern. Beurteilen Sie mit wenigen Worten, wie wirksam Ihre einzelnen Lösungsvorschläge sind.
(K2) **(2 Punkte)**

Teilgebiet: Impedanzkopplung

Frage 7: **Einfluss von Geschwindigkeit und Abmessungen**

Sie arbeiten als Ingenieur in der Entwicklungsabteilung eines Unternehmens, das Daten verarbeitungs- und Kommunikationssysteme herstellt. Die Schaltung eines Kollegen weist starke EMV-Störungen auf. Er vermutet, die Schaltung sei so schnell und so klein, dass Wellen- und Strahlungskopplung auftreten.

a) Die Schaltung weist eine mittlere Leitungslänge von 3 cm auf. Bei welcher Frequenz ist die Wellenlänge noch 100 mal grösser als die mittlere Leitungslänge?
(K1) **(1 Punkt)**

b) Für welche Frequenz weist die Schaltung eine kritische Leitungslänge auf?
(K1) **(1 Punkt)**

c) Können mit dem Einsatz langsamerer Logikfamilien allfällige Störeinflüsse durch Impedanzkopplung herabgesetzt werden? Begründen Sie Ihre Antwort mit zwei bis drei Sätzen.
(K3) **(3 Punkte)**

Frage 8: **Beurteilung der Leiterführung des Versorgungs-Masse-Systems**

Ein Nachteil der Entwicklung immer schnellerer digitaler Schaltungen ist ihre zunehmende Empfindlichkeit. In einer kritischen Schaltung ist es daher wichtig, den durch die Zuleitungs-induktivitäten hervorgerufenen Spannungsabfall im Versorgungs-Masse-System möglichst gering zu halten.
In der Abbildung 56 sind zwei unterschiedliche Leitungsführungen des Versorgungs-Masse-Systems dargestellt. Beide sind in der Praxis häufig anzutreffen. Eine der zwei dargestellten Leitungsführungen eignet sich besser, um die induktiven Spannungsabfälle in den Zuleitungen des Versorgungs-Masse-Systems gering zu halten.

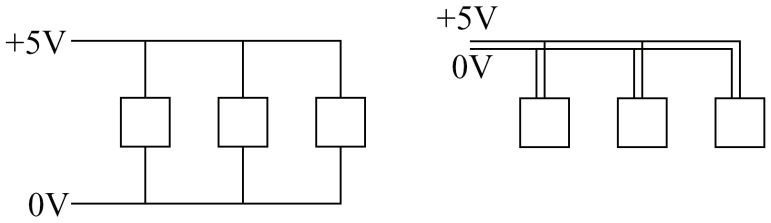


Bild 56: Leitungsführung des Versorgungs-Masse-Systems

a) Überlegen Sie sich, welche der beiden Leitungsführungen besser ist. Beachten Sie, dass die Versorgungs- und Masseleitungen in beiden Fällen gleich lang sind. Begründen Sie Ihre Antwort mit zwei bis drei Sätzen.
(K4) **(3 Punkte)**

Um hochfrequente Störströme von den Versorgungsleitungen fernzuhalten, wird die Versorgungsspannung mittels Abblockkondensatoren gestützt. In Bild 57 sind zwei denkbare Leiterführungen des Versorgungs-Masse-Systems zwischen zwei aktiven Bauelementen dargestellt. Die zwei aktiven Elemente liegen unmittelbar nebeneinander. Deshalb möchte man die Speisung beider Elemente mit nur einem Abblockkondensator stützen.

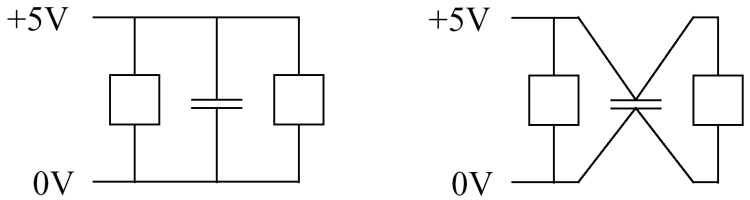


Bild 57: Abblockkondensator mit Versorgungs-Masse-System

b) Überlegen Sie sich, welche der beiden Leitungsführungen vorzuziehen ist? Begründen Sie Ihre Wahl mit zwei bis drei Sätzen.
(K3) **(3 Punkte)**

Antworten auf den Fragebogen zur EMV Serie A

Teilgebiet: Übersicht und Umfeld von EMV

Antwort 1: **Begriffe und Definitionen**

a) In Verbindung mit Individuen versteht man unter "verträglich" deren Fähigkeit, sich relativ problemlos in bestimmte soziale Umfelder einzuordnen. Dazu gehören die Bereitschaft zu Toleranz und Rücksichtnahme. Auf die Phänomenwelt der Elektrotechnik bezogen, charakterisiert das Wort "Elektromagnetisch-verträglich" ganz ähnlich die Fähigkeit elektrotechnischer Betriebsmittel, in ihrer elektromagnetischen Umgebung zufriedenstellend zu arbeiten, ohne diese Umgebung und andere sich darin befindlichen Einrichtungen elektromagnetisch unzulässig zu belasten.

(2 Punkte)

b) **EMC** Electromagnetic Compatibility
EMC entspricht der Fähigkeit einer elektrischen Einrichtung, in einer vorgegebenen elektromagnetischen Umgebung einwandfrei zu funktionieren und dabei alle sich in dieser Umgebung befindlichen Einrichtungen nicht unzulässig zu beeinflussen.
EMC entspricht dem deutschen Begriff EMV.

EMS Electromagnetic Susceptibility
EMS beschreibt die Fähigkeit einer elektrischen Einrichtung, in stark gestörter elektromagnetischen Umgebung einwandfrei zu funktionieren. Es stellt somit ein Mass für die Immunität der Einrichtung gegen elektromagnetische Beeinflussungen dar.
Der deutsche Begriff für EMS heisst "elektromagnetische Störfestigkeit".

EMI Electromagnetic Interference
EMI beschreibt die elektromagnetische Störbeeinflussung einer elektrischen Einrichtung auf andere benachbarte Einrichtungen.
Der deutsche Begriff für EMI heisst "elektromagnetische Störbeeinflussung" und wird mit dem Störemissionsgrad quantitativ erfasst.

(3 Punkte)

Antwort 2: **Störquellen und Ausbreitungspfade**

a) In der nachfolgenden Übersicht sind einige *externe* EMV-Störquellen, die bei einem Auto von Bedeutung sind, zusammen mit ihrem Ausbreitungspfad dargestellt.

Externe EMV-Störquellen	Ausbreitungspfad
Fernseh-, Radio- und Mobilfunksender	gestrahlt
Blitzentladungen	gestrahlt
Hochspannungsleitungen	gestrahlt
Elektrostatisch aufgeladene Personen	leitungsgebunden
Leuchtstofflampen	gestrahlt

(3 Punkte)

b) Mögliche *interne* EMV-Störquellen eines Autos sind in der nachfolgenden Übersicht aufgeführt:

Interne EMV-Störquellen	Ausbreitungspfad
Takt- und Zündsystem des Motors	gestrahlt oder leitungsgebunden
Servoantriebe für Hilfsbetriebe	gestrahlt oder leitungsgebunden
ABS-Bremssystem	gestrahlt oder leitungsgebunden
Stromversorgungen der Hilfsbetriebe	gestrahlt oder leitungsgebunden
Heizung und Belüftung	leitungsgebunden

(3 Punkte)

c) Gemäss EMV-Beeinflussungsmodell haben Sie als Automobilhersteller folgende Eingriffsmöglichkeiten:

- bei **externen** Störquellen:
  - an der Kopplung
  - an der Störsenke
- bei **internen** Störquellen:
  - an der Störquelle
  - an der Kopplung
  - an der Störsenke

(2 Punkte)

Teilgebiet: Kapazitive Kopplung

Antwort 3: **Schutz der Datenübertragung gegen kapazitive Störungseinflüsse**

a) Zur Unterdrückung kapazitiver Einkopplungen sollte die Signalquelle eine Spannung am Verbraucher einprägen. Die Spannung u_L an der Last beträgt für die Anordnung nach Bild 8:

$$u_L = \underbrace{\frac{R_L}{R_i + R_L} \cdot u_{Sig}}_{\text{Nutzanteil}} + \underbrace{\frac{R_L \cdot R_i}{R_i + R_L} \cdot i_{Stör}}_{\text{Störanteil}} = \frac{R_L}{R_i + R_L} \cdot \left(u_{Sig} + R_i \cdot i_{Stör}\right)$$

Der Störanteil an der Lastspannung wird umso geringer, je kleiner R_i und R_L sind. Um kapazitive Einkopplungen klein zu halten, müssen deshalb die Impedanzen von kopplungsgefährdeten Stromkreisen möglichst niederohmig sein.
Im Fall einer idealen Spannungsquelle (R_i=0) als Signalquelle verschwindet der kapazitive Störanteil am Verbraucher gar vollständig.

(3 Punkte)

b) Massnahmen zur Verringerung der kapazitiven Beeinflussung:

- Abstand zwischen zwei sich störenden Leitungen vergrössern.
- Schirmwände zwischen den einzelnen Leitungen einfügen.
- Verwenden von Signalspannungsquellen und Treiberstufen mit möglichst geringem Innenwiderstand am Anfang der Übertragungsleitung.
- Geschwindigkeit der Hardware für die Datenübertragung nur so hoch wählen wie dies von der Funktion her nötig ist.

(2 Punkte)

Antwort 4: **Beurteilung kapazitiver Schirmungen für Leiterplatten**

a) Die Anordnung gemäss Bild 53 bietet:

- bei **offener** Brücke Schutz gegen kapazitive Beeinflussungen.
- bei **geschlossener** Brücke keinen Schutz gegen kapazitive Beeinflussungen.

Eine geerdete Leiterbahn in der Nähe einer beeinflussungsgefährdeten Signalleiterbahn hat eine gute Schirmwirkung. Der Schirm bewirkt, dass die wirksame Kapazität zwischen Nutz- und Störkreis verkleinert wird. Dadurch wird der von der Störquelle getriebene Störstrom über den Schirm und nicht über den Verbraucher abgeleitet.

(3 Punkte)

b) Wird dafür gesorgt, dass sich der Schirm stets auf gleichem Potential befindet wie die Signalleitung, so liegt über der Koppelkapazität zwischen Schirm und Signalleitung keine Spannung. Dadurch kann über die Kapazität auch kein Störstrom fliessen. Die wirksame Kapazität zwischen dem Schirm und der Signalleitung kann auf diese Weise beseitigt werden.
In der Anordnung gemäss Bild 58 sorgt der Spannungsfolger dafür, dass das Potential des Schirms jenem der Signalleitung folgt. Dies setzt voraus, dass der Operationsverstärker genügend schnell ist, um dem Nutzsignal folgen zu können.

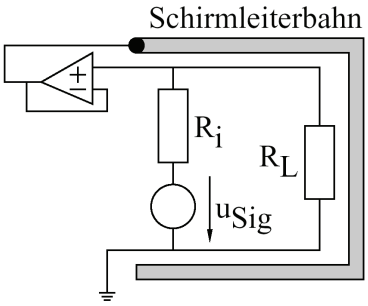


Bild 58: Beseitigung der wirksamen Kapazität zwischen Nutz- und Störleiter

(3 Punkte)

Teilgebiet: Magnetische Kopplung

Antwort 5: **Beurteilung magnetischer Störeinflüsse**

a) In Bild 59 ist der magnetische Koppelmechanismus ersichtlich.

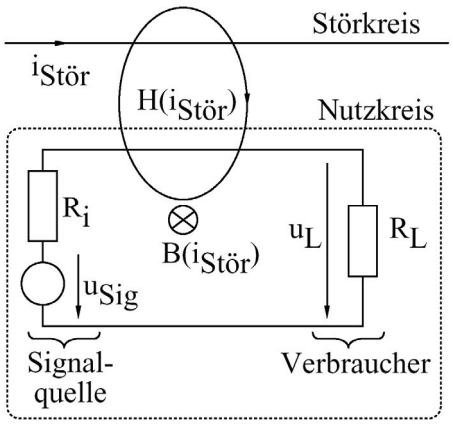


Bild 59: Magnetisch beeinflusster Nutzkreis

Der Strom $i_{Stör}$ stellt die Störgrösse dar. Er erzeugt eine magnetische Induktion $B(i_{Stör})$ und damit einen magnetischen Fluss $\phi(i_{Stör})$. Der Fluss durchsetzt die in Bild 59 dargestellte Masche des Nutzkreises. Eine von $i_{Stör}$ hervorgerufene Flussänderung induziert eine Störspannung $u_{Stör}$ in die Masche des Nutzkreises. Die Spannung u_L an der Last, welche durch die magnetisch eingekoppelten Störspannung $u_{Stör}$ einen Störanteil enthält, beträgt:

$$u_L = \underbrace{\frac{R_L}{R_i + R_L} \cdot u_{Sig}}_{\text{Nutzanteil}} + \underbrace{\frac{R_L}{R_i + R_L} \cdot u_{Stör}}_{\text{Störanteil}} = \frac{R_L}{R_i + R_L} \cdot \left(u_{Sig} + u_{Stör}\right)$$

(2 Punkte)

b) Der Störanteil $u_{LStör}$ an der Lastspannung u_L beträgt für die Anordnung nach Bild 59:

$$u_{LStör} = \frac{R_L}{R_i + R_L} \cdot u_{Stör} = \frac{R_L}{R_i + R_L} \cdot M \cdot \frac{di_{Stör}}{dt}$$

Mit Hilfe dieser Beziehung lässt sich der qualitative Kurvenverlauf des Störspannungsanteils $u_{LStör}$ am Verbraucher für die gegebenen Verläufe von $i_{Stör}$ leicht ermitteln:

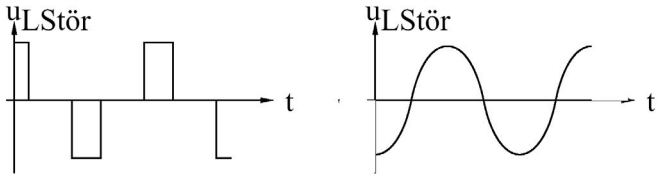


Bild 60: Verlauf des Störspannungsanteils $u_{LStör}$ am Verbraucher

(3 Punkte)

Antwort 6: **Beeinflussung durch Magnetfelder**

a) Stromkreise können durch orthogonale Anordnung der magnetischen Achsen magnetisch voneinander entkoppelt werden. Dies gilt insbesondere für Anordnungen mit Spulen und Transformatoren. Bei der gegebenen Anordnung ist es möglich, die Leiterplatte mit der Signalelektronik durch Wahl der richtigen Ebene magnetisch vollständig vom Leistungsteil zu entkoppeln.

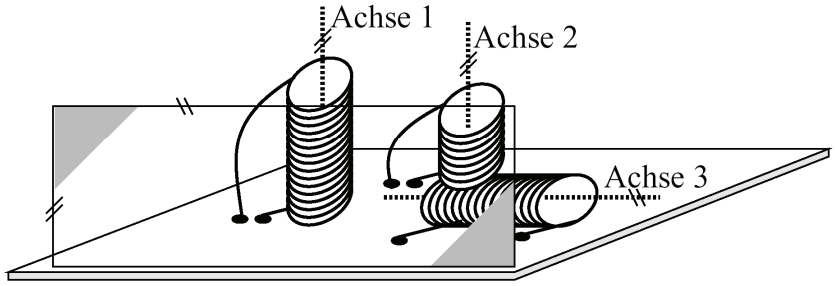


Bild 61: Magnetische Entkopplung durch orthogonale Anordnung

(3 Punkte)

b) Massnahmen zur Verringerung der magnetischen Beeinflussung:

- Verkleinern der Schleifenfläche durch Verkürzen der Leitungen und enge räumliche Anordnung von Hin- und Rückleiter. Dies ist sehr wirksam zur Verringerung von magnetischen Einkopplungen. Die Grösse der Schleifen lässt sich in der Praxis beim Schaltungslayout reduzieren.
- Vergrössern des Abstandes zwischen der störenden und der störungsgefährdeten Masche. Diese Massnahme ist sehr wirksam, hat aber einen höheren Platzbedarf zur Folge.
- Verdrillen von Hin- und Rückleiter. Dadurch ändert sich die Richtung der magnetischen Erregung fortlaufend, und die induzierten Störspannungsanteile heben sich gegenseitig auf. Hierbei handelt es sich um eine Massnahme, welche sich bei Kabelverbindungen leicht, bei gedruckten Schaltungen hingegen nur schwer verwirklichen lässt. Ihre Wirkung zur Verringerung der magnetischen Beeinflussung ist sehr gut.

- Anbringen einer Kurzschlussschleife in unmittelbarer Nähe des beeinflussungsgefährdeten Nutzkreises. Diese Massnahme lässt sich nur für vereinzelte Schaltkreise, nicht aber für ganze Schaltungen realisieren.
- Schirmen der beeinflussungsgefährdeten Leitungen, Stromkreise und Baugruppen. Ferromagnetische Schirme haben eine gute Schirmwirkung gegen niederfrequente magnetische Felder. Die Schirmwirkung ist umso besser, je höher die Permeabilität des Materials und die Dicke der Schirmwände ist. Magnetische Kopplung ist durch Schirmung schwer zu beherrschen, teuer und aufwendig.

(2 Punkte)

Teilgebiet: Impedanzkopplung

Antwort 7: **Einfluss von Geschwindigkeit und Abmessungen**

a) Bei der Frequenz f_1 ist die Wellenlänge noch 100 mal grösser als die mittlere Leitungslänge :

$$Frequenz \quad f_1 = 100 \cdot \frac{c}{Leitungslänge} = 100 \cdot \frac{3 \cdot 10^8 \, m/s}{0.03m} = 100MHz$$

(1 Punkt)

b) Die Schaltung weist bei der Frequenz f_2 eine kritische Leitungslänge auf:

$$Frequenz \quad f_2 = \frac{c}{Leitungslänge} = \frac{3 \cdot 10^8 \, m/s}{0.03m} = 10 \, GHz$$

(1 Punkt)

c) Der Einsatz langsamerer Logikfamilien hat eine Verringerung der Flankensteilheit der Signale zur Folge. Die Geschwindigkeit der Umladevorgänge in den einzelnen Bauteilen nimmt ebenfalls zu langsameren Logikfamilien hin ab. Dies führt zu einer Reduktion der induktiven Spannungsabfälle entlang den Leiterbahnen. Dadurch verringern sich ebenfalls die Störeinflüsse durch Impedanzkopplung.
Aus EMV-Sicht sollte deshalb die Arbeitsgeschwindigkeit von Logikschaltungen nicht höher sein als dies von ihrer Funktion her erforderlich ist. Dies gilt insbesondere für Logiksysteme, welche in stark gestörter Umgebung, wie Leistungsstufen und dergleichen, zum Einsatz gelangen.

(3 Punkte)

Antwort 8: **Beurteilung der Leiterführung des Versorgungs-Masse-Systems**

a) Bei sehr nahe aneinanderliegenden Leitern heben sich die durch den hin- und rückfliessenden Strom erzeugten Magnetfelder auf. Dadurch verschwindet im Idealfall die resultierende Zuleitungsinduktivität. Die Leitungsführung auf der rechten Seite des Bildes 56 kommt diesem Idealfall bereits sehr nahe. Sie ist daher der Anordnung auf der linken Seite des Bildes vorzuziehen.

(3 Punkte)

b) Die Impedanz des Abblockzweiges muss möglichst niedrig gehalten werden, um die Störspannungen an den Klemmen der Bauteile zu minimieren. In der Anordnung auf der linken Seite des Bildes 57 ist die Koppelimpedanz wegen der gemeinsamen Zuleitungsabschnitte zum Kondensator grösser als in jener auf der rechten Seite. Dort sind die beiden Schleifen nur noch über die Impedanz des Abblockkondensators miteinander gekoppelt. Die Anordnung rechts ist daher jener auf der linken Seite vorzuziehen.

(3 Punkte)

Fragebogen zur EMV Serie B

Teilgebiet: Übersicht und Umfeld von EMV

Frage 1: **Normen und Normierungsgremien**

Sie sind in einem Unternehmen, das drehzahlvariable Antriebssysteme herstellt, verantwortlich für die Qualitätssicherung. Um die elektromagnetische Verträglichkeit Ihrer Produkte als wesentliches Qualitätsmerkmal effektiv planen, realisieren, prüfen und ausweisen zu können, müssen Sie die wichtigsten Normen und Normierungsgremien kennen.

a) Zählen Sie im Bereich der Elektrotechnik ein schweizerisches und zwei europäische Normierungsgremien von Bedeutung auf. Beurteilen Sie anschliessend die rechtliche Verbindlichkeit der von diesen Gremien erlassenen Normen.
(K1) **(2 Punkte)**

b) Erklären Sie mit eigenen Worten die folgenden drei Arten von Normen:

- Basic Standards
- Generic Standards
- Product Standards

(K2) **(2 Punkte)**

Frage 2: **Kosten und Entwicklungsufwand von EMV**

Sie sind als Projektleiter verantwortlich für die Entwicklung und Inbetriebsetzung eines neuen Solarenergiekraftwerkes. Bei der Ausarbeitung des Pflichtenheftes sagt Ihnen einer Ihrer Mitarbeiter:

" Die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) ist schwer fassbar und kann deshalb nicht bereits in der Konzeptphase eines Projektes mitberücksichtigt werden. EMV wird am effektivsten sichergestellt, indem bei der Inbetriebsetzung die Störquellen gesucht und dann beseitigt werden."

a) Was sagen Sie zum Vorschlag, die EMV erst ab der Inbetriebsetzungsphase in die Projektplanung miteinzubeziehen? Begründen Sie Ihre Antwort mit zwei bis drei Sätzen.
(K2) **(2 Punkte)**

b) Wie sieht der Zusammenhang zwischen den Kosten für EMV-Aufwendungen in Funktion der unverträglichkeitsbedingten Fehlerwahrscheinlichkeit aus? Unterscheiden Sie bei den Kosten zwischen jenen, die für störsicherheitsfördernde Massnahmen von Projektbeginn an ergriffen werden und jenen, die zum Ausbessern und Beheben fehlerhafter EMV-Systemarbeit anfallen.
(K2) **(2 Punkte)**

c) Nach welchen Grundsätzen organisieren Sie Ihr EMV-Qualitätssicherungssystem? Nennen Sie mindestens drei wesentliche Merkmale Ihres Konzeptes.
(K5) **(3 Punkte)**

Teilgebiet: Kapazitive Kopplung

Frage 3: **Schirmung störungsgefährdeter Leitungen**

In einem Labor mit elektrischen Maschinen und Stromrichtern werden die Computer untereinander vernetzt. Zur Verminderung der kapazitiven Beeinflussung der Datenübertragung durch die Maschinen und ihren Stromrichtern sollen die Datenleitungen geschirmt werden. Sie wollen sich ein Bild über die Wirksamkeit einiger Schirmungskonzepte verschaffen.
In Bild 11 ist die kapazitive Schirmung eines Signalkreises gegenüber einem Störkreis dargestellt. Überlegen Sie sich, ob die Schirmung gemäss Bild 62 nicht zweckmässiger wäre.

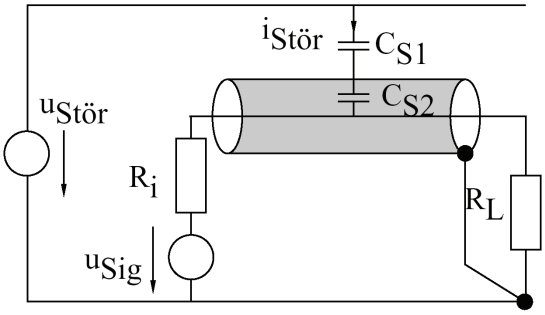


Bild 62: Abschirmung von Leitungen

a) Zeichnen Sie zuerst für beide Anordnungen die Ersatzschaltung unter Berücksichtigung der Leitungsimpedanz $Z = R + j\omega L$ des gemeinsamen Bezugsleiters.
(K3) **(2 Punkte)**

b) Beurteilen Sie anhand der Ersatzschaltungen, bei welcher der beiden Verbindungen des Schirms mit dem Bezugsleiter die kapazitiv eingekoppelten Störungen geringer sind. Begründen Sie Ihre Antwort mit zwei bis drei Sätzen.
(K4) **(3 Punkte)**

Frage 4: **Beurteilung kapazitiver Störeinflüsse**

Sie sind als EMV-Spezialist in einem Unternehmen der Erwachsenenweiterbildung tätig. Ihr nächster Auftrag besteht darin, dem Kader eines Ingenieurbüros, welches sich auf dem Gebiet der Datenverarbeitung und der Kommunikationsnetze spezialisiert hat, die grundlegenden EMV-Phänomene beizubringen.

a) Stellen Sie den kapazitiven Koppelmechanismus und die dafür massgebende Ersatzschaltung dar. In Ihrer Anordnung sollen Nutz- und Störkreis, welche über eine parasitäre Kopplung miteinander verbunden sind, erkennbar sein. Leiten Sie anschliessend die Beziehung für die Spannung u_L am Ausgang des Nutzkreises her.
(K2) **(2 Punkte)**

b) Wie sieht für die Anordnung nach Bild 8 der Kurvenverlauf des Spannungsanteils $u_{LStör}$ am Verbraucher qualitativ aus, wenn die Störspannung $u_{Stör}$ folgende Verläufe aufweist?

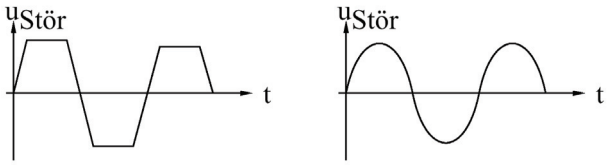


Bild 63: Verläufe der Störspannung

(K3) **(3 Punkte)**

Teilgebiet: Magnetische Kopplung

Frage 5: **Schutz der Datenübertragung gegen magnetische Störungseinflüsse**

Aus Platzgründen müssen bei der Renovation eines Dienstleistungsgebäudes die Kabel der elektrischen Energieversorgung und die Datenübertragungsleitungen im selben Leitungsschacht verlegt werden. Sie sind als Entwicklungsingenieur verantwortlich, dass die Datenübertragung trotz der zu befürchtenden Magnetfelder in der Nähe des Energiekabels jederzeit einwandfrei funktioniert. Dazu müssen Sie sich überlegen, welche Eigenschaften die Treiberstufen zu Beginn der Datenleitungen haben sollten, um auch im Falle starker magnetischer Störeinflüsse eine möglichst störungsfreie Datenübertragung sicherzustellen.

a) Ist eine Strom- oder eine Spannungsquelle als Signalquelle besser geeignet? Begründen Sie Ihre Antwort mit zwei bis drei Sätzen.
(K4) **(3 Punkte)**

b) Nennen Sie mindestens drei Massnahmen, um die magnetische Beeinflussung der Datenübertragungsleitungen durch das Magnetfeld eines Energiekabels in langen Kabelschächten zu verringern.
(K1) **(2 Punkte)**

Frage 6: **Beurteilung der magnetischen Schirmung auf Leiterplatten**

Sie sind Entwicklungsleiter eines kleinen Unternehmens, welches Stromversorgungen herstellt. Um die Zuverlässigkeit eines Schaltnetzteiles zu steigern, soll die Leiterplatte mit der Steuerungs- und Regelungselektronik geschirmt werden. Einer Ihrer Entwicklungsingenieure hat sich eine Lösung überlegt und fragt Sie um Rat.
Zum Schutze der Steuerungs- und Regelungselektronik soll die Leiterplatte mit einer Schirmleiterbahn versehen werden. In Bild 64 ist die Leiterplatte mit Schirmleiterbahn, welche an einer Stelle an Masse gebunden ist, schematisch dargestellt.

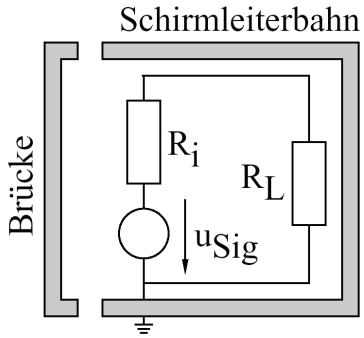


Bild 64: Leiterplatte mit Schirmleiterbahn

a) Über die Brücke kann die Leiterbahn kurzgeschlossen werden. Bietet die Anordnung
- bei offener Brücken
- bei geschlossener Brücke

dem elektronischen Schaltkreis auf der Leiterplatte guten Schutz gegen magnetische Einkopplungen? Begründen Sie Ihre Antwort mit zwei bis drei Sätzen.
(K4) **(3 Punkte)**

b) Um auch bei starker magnetischer Beeinflussung die Funktionsweise der Schaltung zu gewährleisten, wird an Stelle einer Spannungs- eine Stromübertragung gewählt. Wie wirkt sich diese Massnahme in bezug auf magnetische und kapazitive Störeinflüsse aus? Begründen Sie Ihre Antwort mit zwei bis drei Sätzen.
(K4) **(3 Punkte)**

Teilgebiet: Impedanzkopplung

Frage 7: **Optimale Führung der Versorgungs- und Masseleitungen**

Sie sind als Entwicklungsingenieur in einer Firma tätig, welche Sensoren herstellt. Ihr Spezialgebiet ist die analoge Signalverarbeitung. Ein Kollege, welcher am Schaltungslayout einer Verstärkerschaltung für einen neuen Sensor arbeitet, fragt Sie um Rat bei der Leitungsführung des Versorgungs- und des Massesystems.
Auf der linken Seite des Bildes 65 ist die Beschaltung des Operationsverstärkers und auf der rechten Seite die Anordnung der Bauteile dargestellt.

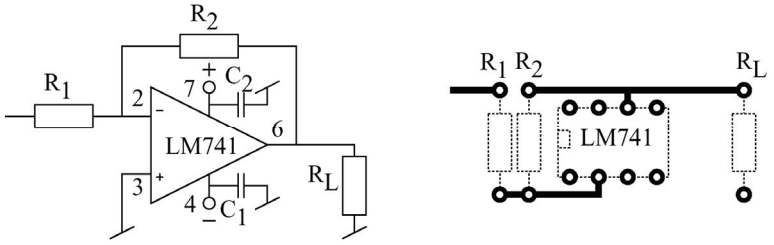


Bild 65: Schaltung und Anordnung der Bauteile einer Operationsverstärkerschaltung

a) Die Verbindungen der Abblockkondensatoren zu ihren Bauteilen werden bei einem guten Layout sehr kurz. Begründen Sie in höchstens fünf Sätzen, weshalb dies erforderlich ist.
(K3) **(2 Punkte)**

b) Ergänzen Sie das vorliegende Schaltungslayout. Richten Sie dabei Ihr Augenmerk insbesondere auf die Leitungsführung der Versorgungs- und Masseleitungen und auf die Platzierung der Abblockkondensatoren. Beachten Sie, dass Sie in Ihrer Firma nur einseitige Printplatten herstellen können.
(K4) **(3 Punkte)**

Frage 8: **Mechanismus der Impedanzkopplung und Stromanalyse**

Mit steigender Komplexität digitaler Schaltungen steigt auch deren Empfindlichkeit gegenüber Störeinflüssen. Damit steigen insbesondere auch die Anforderungen an die Stabilität der Versorgungsspannung und des Bezugspotentials. Entlang der Versorgungs- und Masseleiterbahnen entstehen aufgrund der Leitungsimpedanzen sowohl transiente als auch stationäre Potentialunterschiede. Um die Schaltung in ihrer Funktionsweise nicht zu beeinträchtigen, müssen diese Potentialschwankungen gering gehalten werden.

a) Wie muss das Versorgungs-Masse-System gestaltet sein, damit benachbarte Schaltungsteile sich gegenseitig möglichst wenig stören? Nennen Sie mindestens drei wichtige Eigenschaften eines guten Versorgungs-Masse-Systems.
(K1) **(1 Punkt)**

b) Erklären Sie mit eigenen Worten den Mechanismus der Impedanzkopplung. Eine kleine Skizze und maximal fünf Sätze sollten dafür ausreichen.
(K2) **(2 Punkte)**

c) In diesem Puzzle wurde Ihnen die Stromanalyse vorgestellt. Erklären Sie in wenigen Sätzen, wozu die Stromanalyse dient und wie sie angewendet wird?
(K2) **(2 Punkte)**

Antworten auf den Fragebogen zur EMV Serie B

Teilgebiet: Übersicht und Umfeld von EMV

Antwort 1: **Normen und Normierungsgremien**

a) Normierungsgremien

Schweizerisches Normierungsgremium:
- **SEV** (Schweizerischer Elektrotechnischer Verein)

Europäische Normierungsgremien:
- **IEC** (International Electrotechnical Commission)
- **CENELEC** (Commission Européenne de Normalisation Electrotechnique)

Rechtliche Verbindlichkeit

- **SEV-Normen** sind rein schweizerische (nationale) Normen ohne Wirkung nach aussen. In der Schweiz sind sie rechtlich verbindlich.
- **IEC-Normen** beruhen auf internationalen Vereinbarungen. Sie stellen für die einzelnen Mitgliedstaaten Empfehlungen dar und müssen nicht gesetzlich befolgt werden.
- **CENELEC-Normen** beruhen auf einer europäischen Übereinkunft. Jedes einzelne CENELEC-Mitglied ist verpflichtet, diese Norm unverändert als nationale Norm zu übernehmen.

(2 Punkte)

b) Arten von Normen

- **Basic Standards**
  beschreiben die grundlegenden Phänomene und Messverfahren zum Nachweis der EMV und des Einhaltens der geforderten Grenzwerte.
- **Generic Standards**
  beschreiben die Anforderungen bezüglich Störaussendung und Störfestigkeit unter Berücksichtigung einer bestimmten Umgebungsart wie Industrie, Wohnbereich und andere mehr.
- **Product Standards**
  schreiben die besonderen Anforderungen an eine bestimmte Produktegruppe vor. Sie müssen sich an die Basic und Generic Standards anlehnen.

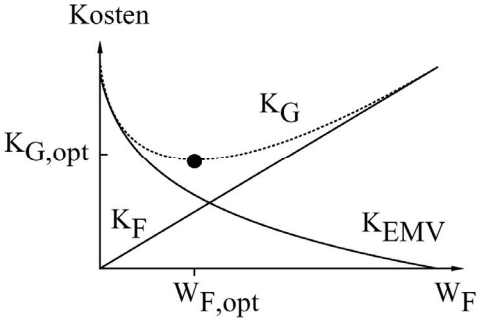
(2 Punkte)

Antwort 2: **Kosten und Entwicklungsaufwand von EMV**

a) Die EMV-Anliegen müssen im Projektablauf von Beginn weg mitberücksichtigt werden. Falls die Notwendigkeit von Massnahmen für die EMV erst im Verlaufe des Projektes Beachtung finden, verursacht dies grosse zusätzliche Kosten. In Bild 4 sind die gravierenden Nachteile bei zu später Berücksichtigung der EMV-Anliegen deutlich erkennbar. Je später die Notwendigkeit von Massnahmen für die EMV erkannt wird, desto schwieriger und weiter von der Ideallösung entfernt können sie realisiert werden. Überschlagsmässig nimmt die relative Kostensteigerung bei zu spätem Einbringen von EMV-Massnahmen exponentiell zu.

(2 Punkte)

b) Die Gesamtkosten für die EMV-Aufwendungen sind die Summe aus den Kosten für störfestigkeitsfördernde Massnahmen in der Entwicklung und den Kosten, welche im Fehlerfall für Nachbesserungen und Nachentwicklungen sowie für allfällige Schadenersatzforderungen anfallen. In Bild 66 sind die Gesamtkosten in Funktion der Fehlerwahrscheinlichkeit bei elektromagnetischer Unverträglichkeit dargestellt. Bei kostenmässig optimal gestalteten EMV-Massnahmen streben die Gesamtkosten einem Minimum zu.



W_F: Unverträglichkeitsbedingte Fehlerwahrscheinlichkeit

K_F: Kosten, die durch fehlerhafte EMV-Systemarbeit entstehen

K_{EMV}: Kosten, die durch störsicherheitsfördernde Massnahmen anfallen

$K_G = K_{EMV} + K_F$; Gesamtkosten

Bild 66: Prinzipieller Zusammenhang zwischen Kosten und Fehlerwahrscheinlichkeit

(2 Punkte)

c) Denkbare Merkmale eines EMV-Qualitätssicherungssystems sind:
- Die EMV muss wie alle anderen Qualitätsmerkmale geplant und ihre Verwirklichung im Projekteablauf durch die Qualitätssicherung erfasst und durchgesetzt werden.
- Die Mitarbeiter müssen im EMV-Bereich besser ausgebildet werden. In der Konzept-Phase eines neuen Produktes werden aus Unwissenheit viele Chancen zur Erhöhung der elektromagnetischen Verträglichkeit verpasst.
- Die Einsatzbedingungen eines neuen elektrotechnischen Erzeugnisses müssen im voraus genau erfasst werden. Das gilt insbesondere für die geforderte Störfestigkeit EMS sowie für die maximal zulässige Störbeeinflussung EMI.
- EMV muss in der Vermarktung eines Produktes einen höheren Stellenwert erlangen. Sie muss als Qualitätsmerkmal angepriesen werden. Findet Sie beim Kunden angemessene Beachtung, so steigt auch die Investitionsbereitschaft in diesem Bereich.

(3 Punkte)

Teilgebiet: Kapazitive Kopplung

Antwort 3: **Schirmung störungsgefährdeter Leitungen**

a) Auf der linken Seite des folgenden Bildes ist die Ersatzschaltung für die Anordnung von Bild 11 und auf der rechten jene für die Anordnung von Bild 62 dargestellt.

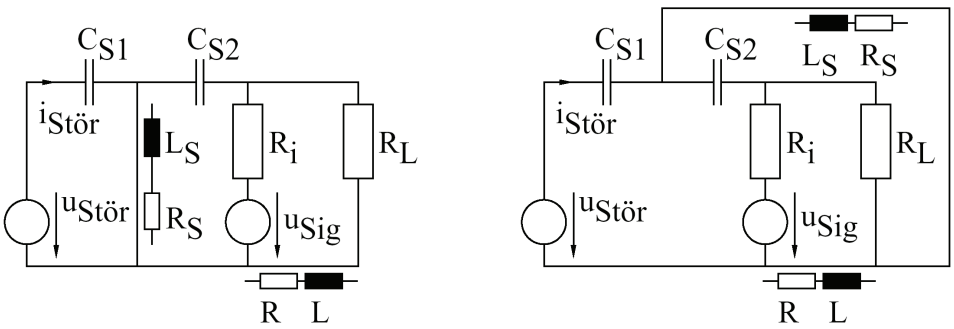


Bild 67: Ersatzschaltungen für die beiden Schirmungs-Anordnungen

(2 Punkte)

b) Der Schirm muss an der Signalquelle mit dem Bezugsleiter verbunden werden. Im anderen Fall erzeugt der Störstrom über der Leitungsimpedanz $Z = R + j\omega L$ des Bezugsleiters eine Spannung, welche sich im Nutzkreis der Signalspannung überlagert. In der Anordnung nach Bild 11 sind demzufolge die kapazitiv eingekoppelten Störungen geringer als in jener von Bild 62.

(3 Punkte)

Antwort 4: **Beurteilung kapazitiver Störeinflüsse**

a) Aus Bild 68 ist der kapazitive Koppelmechanismus ersichtlich.

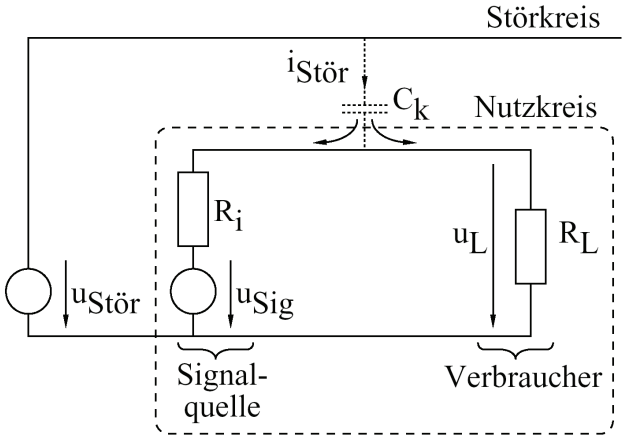


Bild 68: Kapazitiv beeinflusster Nutzkreis

Der Nutzkreis ist über die parasitäre Koppelkapazität C_k mit dem Störkreis verbunden. Die Spannungsquelle $u_{Stör}$ stellt die Störgrösse dar. Die Spannung u_L an der Last enthält durch den kapazitiv eingekoppelten Störstrom $i_{Stör}$ einen Störanteil. Sie beträgt:

$$u_L = \underbrace{\frac{R_L}{R_i + R_L} \cdot u_{Sig}}_{\text{Nutzanteil}} + \underbrace{\frac{R_L \cdot R_i}{R_i + R_L} \cdot i_{Stör}}_{\text{Störanteil}} = \frac{R_L}{R_i + R_L} \cdot \left(u_{Sig} + R_i \cdot i_{Stör}\right)$$

(2 Punkte)

b) Der Störanteil $u_{LStör}$ an der Lastspannung u_L beträgt für die Anordnung nach Bild 8:

$$u_{LStör} = \frac{R_i \cdot R_L}{R_i + R_L} \cdot i_{Stör} \approx \frac{R_L \cdot R_i}{R_i + R_L} \cdot C_k \cdot \frac{du_{Stör}}{dt}$$

Mit Hilfe dieser Beziehung lässt sich der qualitative Kurvenverlauf des Störspannungsanteils $u_{LStör}$ am Verbraucher für die gegebenen Verläufe von $u_{Stör}$ leicht ermitteln:

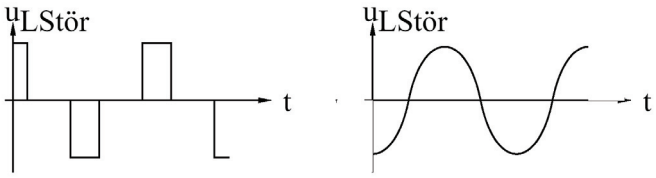


Bild 69: Verlauf des Störspannungsanteils $u_{LStör}$ am Verbraucher

(3 Punkte)

Teilgebiet: Magnetische Kopplung

Antwort 5: **Schutz der Datenübertragung gegen magnetische Störungseinflüsse**

a) Zur Unterdrückung magnetischer Einkopplungen sollte die Signalquelle einen Strom am Verbraucher einprägen. Die Wahl einer Stromsteuerung bewirkt beim Auftreten kapazitiver Störungseinflüsse allerdings, dass der eingekoppelte Störstrom vollständig zusammen mit dem Nutzstrom durch den Verbraucher fliesst. Kapazitive Kopplung ist aber im Gegensatz zur magnetischen gut durch Schirmung zu beherrschen.
Der Störanteil $u_{LStör}$ an der Lastspannung u_L für die Anordnung nach Bild 19 beträgt:

$$u_{LStör} = \frac{R_L}{R_i + R_L} \cdot u_{Stör}$$

Der Störanteil an der Lastspannung wird umso geringer, je grösser R_i ist. Für den Fall einer idealen Stromquelle (R_i--->∞) als Signalquelle verschwindet der magnetische Störanteil am Verbraucher gar vollständig.

(3 Punkte)

b) Massnahmen zur Verringerung der magnetischen Beeinflussung:
- Vergrössern des Abstandes zwischen zwei sich störenden Leitungen.
- Verkleinern der wirksamen Schleifenfläche durch enge räumliche Anordnung des Hin- und Rückleiters.
- Verdrillen des Hin- und Rückleiters.
- Verwenden von einer Strom- an Stelle einer Spannungsübertragung.
- Geschwindigkeit der Hardware für die Datenübertragung nur so hoch wählen, wie dies von ihrer Funktion her erforderlich ist.

(2 Punkte)

Antwort 6: **Beurteilung der magnetischen Schirmung auf Leiterplatten**

a) Die Anordnung gemäss Bild 64 bietet:

- bei **offener** Brücke keinen Schutz gegen magnetische Beeinflussungen.
- bei **geschlossener** Brücke Schutz gegen magnetische Beeinflussungen.

Eine geschlossene Leiterbahn in der Nähe einer beeinflussungsgefährdeten Signalleiterbahn wirkt als Kurzschlussring. In der geschlossenen Kurzschlussschleife fliesst aufgrund der induzierten Störspannung ein Strom, welcher einen Fluss erzeugt, der jenem von der Störung herrührenden entgegenwirkt. Dadurch verringert sich die in den Nutzkreis induzierte Störspannung.

(3 Punkte)

b) Die Stromübertragung bietet einen sehr guten Schutz gegen unerwünschte magnetische Einflüsse. Für den Fall einer idealen Stromquelle als Signalquelle verschwindet der magnetische Störanteil am Verbraucher gar vollständig.
Die Wahl einer Stromsteuerung bewirkt allerdings beim Auftreten kapazitiver Störungseinflüsse, dass der eingekoppelte Störstrom vollständig zusammen mit dem Nutzstrom durch den Verbraucher fliesst. Sie ist daher sehr empfindlich auf kapazitive Störungen. Im Gegensatz zur magnetischen sind aber bei der kapazitiven Kopplung die Störeinflüsse durch Schirmung besser zu beherrschen.

Eine gegen kapazitive Einkopplungen geschirmte Stromübertragung bietet aus diesen Gründen einen sehr guten Schutz sowohl gegen kapazitive als auch gegen magnetische Störeinflüsse.

(3 Punkte)

Teilgebiet: Impedanzkopplung

Antwort 7: **Optimale Führung der Versorgungs- und Masseleitungen**

a) Alle Impedanzen des Abblockzweiges sollten prinzipiell so klein wie möglich gehalten werden. Es ist deshalb notwendig, die Abblockkondensatoren in umittelbarer Nähe der Störquellen zu plazieren. Werden die Leitungen des Kondensators zur Störquelle und Störsenke so induktivitätsarm wie möglich ausgeführt, so ist jederzeit gewährleistet, dass auch sehr schnelle Störimpulse über die Abblockkondensatoren kurzgeschlossen werden, ohne dass sie in der Schaltung zu Über- oder Unterspannungen führen.

(2 Punkte)

b) Wir haben das Schaltungslayout von Bild 65 wie folgt ergänzt:

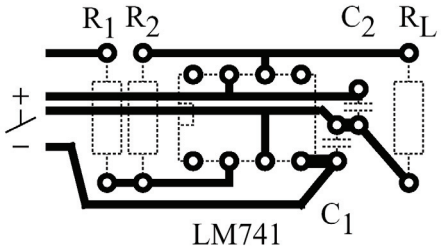


Bild 70: Vollständiges Schaltungslayout der Operationsverstärkerschaltung

Dabei haben wir versucht, folgende grundlegenden EMV-Anliegen umzusetzen:

- Realisierung möglichst kurzer und induktivitätsarmer Verbindungen zu den Abblockkondensatoren
- Impedanzkopplungen im ganzen Layout so gering wie möglich halten
- Reduktion der wirksamen Zuleitungsinduktivitäten im Versorgungs-Masse-System durch sehr nahe aneinanderliegende Leiterführung der Versorgungs- und der Masseleiterbahn.

(3 Punkte)

Antwort 8: **Mechanismus der Impedanzkopplung und Stromanalyse**

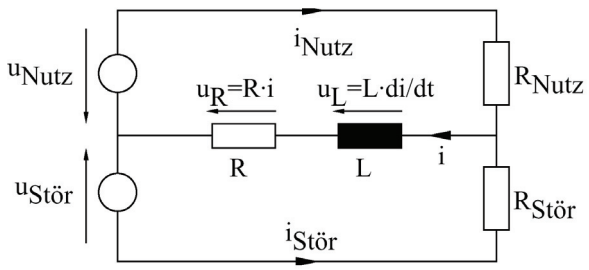
a) Wichtige Eigenschaften eines guten Versorgungs-Masse-Systems sind:

- geregelte, stabile Versorgungsspannung
- Kurzschlussfestigkeit
- niedrige Zuleitungsimpedanzen
- keine Massenschleifen
- sternförmige Massestruktur
- induktivitätsarme Verbindungen zu den Abblockkondensatoren

(1 Punkt)

b) *Mechanismus der Impedanzkopplung*

Fliessen in einem Leitungsabschnitt Ströme aus zwei oder mehr Maschen, so sind diese Maschen über die Impedanz des gemeinsamen Leitungsabschnitts miteinander gekoppelt. In Bild 71 sind zwei gekoppelte Stromkreise in Form eines Nutz- und Störkreises, dargestellt.



Spannung über Kopplung :

$$u_k = u_{Nutz} + u_{Stör}$$

$$u_k = \overbrace{R \cdot i_{Nutz} + L \cdot \frac{di_{Nutz}}{dt}}^{\text{Nutzanteil}} + \underbrace{R \cdot i_{Stör} + L \cdot \frac{di_{Stör}}{dt}}_{\text{Störanteil}}$$

Bild 71: Impedanzkopplung durch ein gemeinsames Stück Leitung.

Aus der Formel für die Spannung u_k über der gemeinsamen Koppelimpedanz ist ersichtlich, dass der Strom des Störkreises einen Spannungsabfall über der Koppelimpedanz verursacht. Dieser macht sich als Störspannung im Nutzkreis bemerkbar.

(2 Punkte)

c) *Stromanalyse*

Die Stromanalyse ist ein zuverlässiges Werkzeug, das Impedanzkopplung sichtbar und damit durchschaubar macht. Sie ist sowohl auf das Schaltbild zur Planung eines störsicheren Schaltungsaufbaus als auch auf das Layout oder den Verdrahtungsplan anwendbar. Mit der Stromanalyse können Hinweise für eine optimale Plazierung von Bauelementen und für die Gestaltung des Versorgungs-Masse-Systems gewonnen werden.

Anwendungsverfahren der Stromanalyse

- Die Ströme aller Maschen einer Schaltung werden in ihrem geschlossenen Umlauf
  - entweder in das Schaltbild zur Analyse
  - oder in das Layout zur Kontrolle

  eingetragen. Die Leitungsimpedanzen werden hierfür nicht eingezeichnet.
- Ist der Stromkreis, der durchflossen wird, abhängig vom Vorzeichen des Stromes, so werden die möglichen Strommaschen separat eingezeichnet. Dies tritt zum Beispiel dann auf, wenn der Stromkreis Dioden enthält.
- Gleich- und Wechselströme dürfen getrennt betrachtet werden.

(2 Punkte)

Quellenverzeichnis

Quellenverzeichnis

Quellen, welche von den Studenten in den Unterrichtsteilen benutzt werden

Es werden keine Quellen benötigt.

Von den Autoren verwendete Quellen

Zitierte Quellen

[1] Weiler J.: Niederfrequenz-EMV-Normen: Stolperdrähte oder Leitplanken? Zürich 1994 (Seminarvortrag vom 8. Juni 1994)

[2] Frey K., Schleich R., Frey-Eiling A.: Manual für die Semesterarbeit "Gruppenunterricht nach der Puzzle-Methode". Zürich 1994 (Druck ETHZ)

Als Grundlage benutzte Quellen

[1] Duff W. G.: Fundamentals of Electromagnetic Compatibility, Volume 1. Gainville (Virginia, USA) 1988 (Interference Control Technologies)

[2] Mardiguian M.: Grounding and Bonding, Volume 2. Gainville (Virginia, USA) 1988 (Interference Control Technologies)

[3] Fleck K.: Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) in der Praxis. Berlin Offenbach 1982 (vde)

[4] SEV-Informationzyklus: EMV-Technik zwischen Recht und Administration. Zürich 1993 (SEV Zentrale Dienste)

[5] Habiger E.: Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) im Blickfeld von Technik und Gesellschaft. Dresden 1993 (Technische Universität Dresden)

[6] Freund R.: Zeitbereichanalyse von EMP-Einkopplungen in Leiterschleifensysteme. München 1989 (Dissertation an: Universität der Bundeswehr München)

[7] Hölzel F.: EMV Theoretische und praktische Hinweise für den Systementwurf. Heidelberg 1983 (Hütthig)

[8] Hewlett Packard : European 1994 EMC Symposium, Technical Papers. 1994 (Hewlett Packard)

[9] Franz J.: Elektromagnetische Verträglichkeit, Störungssicherer Aufbau elektronischer Schaltungen. Hannover 1993 (Universität Hannover)

[10] Chun E. A.: EMV Störfestigkeit leittechnischer Einrichtungen. Berlin Offenbach 1991 (vde)

[11] Habiger E.: Handbuch Elektromagnetische Verträglichkeit. Berlin 1993 (vde)