

# EMV-gerechtes Leiterplattendesign

Dipl.-Ing.(FH) Harry Schilling  
Klostergarten 15a  
85072 Eichstätt  
08421 / 900 174  
fh@harryschilling.de

---

---

---

---

---

---

---

---

## Seminarprogramm

### 1. Tag

08:30 - 10:30 Grundlagen; Definitionen; Störquellen

10:30 - 11:00 Pause

11:00 - 13:00 Störgrößen; Störsenken; Koppelmechanismen; Strahlungsbeeinflussung

13:00 - 14:00 Pause

14:00 - 16:00 Induktive-, kapazitive- und galvanische Beeinflussung; Leitung

---

---

---

---

---

---

---

---

## Seminarprogramm

### 2. Tag

08:30 - 10:30 Leitung; HF-Eigenschaften passiver Bauelemente; Signalspektren

10:30 - 11:00 Pause

11:00 - 13:00 Codierung; Filter für LP; Übersicht Designmaßnahmen

13:00 - 14:00 Pause

14:00 - 16:00 Übersicht Designmaßnahmen; ESD; Optische Leiterplatte

---

---

---

---

---

---

---

---

## Inhalte

- 1. Grundlagen
  - 1.1. Welle
  - 1.2. Elektromagnetische Welle
  - 1.3. Spektrum
  - 1.4. Pegeldefinitionen
  - 1.5. dB-Werte
- 2. Definitionen
  - 2.1. Was ist EMV
  - 2.2. Beeinflussungsmodell
- 3. Störquellen
  - 3.1. Einteilung der Störquellen

---

---

---

---

---

---

---

---

## Inhalte

- 3.1.1. Systemeigene Störquellen
- 3.1.2. Systemfremde Störquellen
- 3.2. Emissionsmechanismen
  - 3.2.1. Leitungsgeführte Emission
  - 3.2.2. Niederfrequente Magnetfelder
  - 3.2.3. Abstrahlung hochfrequenter Störsignale
    - 3.2.3.1. Dipolantenne
      - 3.2.3.1.1. 2D - Feldlinienverlauf
      - 3.2.3.1.2. 3D - Feldlinienverlauf
    - 3.2.3.2. Rahmenantenne
    - 3.2.3.3. Schlitzstrahler
    - 3.2.3.4. Leitung / Draht

---

---

---

---

---

---

---

---

## Inhalte

- 3.2.3.5. Doppelleitung
- 3.2.4. Geschaltete Induktivität
- 4. Störgrößen
  - 4.1. Übersicht
  - 4.2. Gegentaktstörspannung
  - 4.3. Gleichtaktstörspannung
- 5. Störsenken
  - 5.1. Störsicherheitsabstand
  - 5.2. Systeme
    - 5.2.1. Analoge Systeme
    - 5.2.2. Diskrete Systeme

---

---

---

---

---

---

---

---

## Inhalte

- 5.2.2.1. Statische Störfestigkeit
- 5.2.2.2. Dynamische Störfestigkeit
- 6. Koppelmechanismen
- 6.1. Übersicht
- 6.2. Nahfeld – Fernfeld
- 7. Strahlungsbeeinflussung
- 7.1. Leiterschleife
- 7.2. Fernfeldbedingung
- 7.3. Feldstärke und Störspannung
- 7.4. Maßnahme Schirmung
- 7.5. Maßnahme Aufhebung

---

---

---

---

---

---

---

---

## Inhalte

- 8. Induktive Beeinflussung
- 9. Kapazitive Beeinflussung
- 10. Galvanische Beeinflussung
- 11. Leitung
- 11.1. Ersatzschaltbild
- 11.2. Ladungsverlauf
- 11.3. Ausbreitungsgeschwindigkeit
- 11.4. Schaltzeiten und kritische Längen
- 11.5. Laufzeit
- 11.6. Reflexion
- 11.7. Impedanz

---

---

---

---

---

---

---

---

## Inhalte

- 11.8. Impedanzanpassung
- 11.9. Strukturen
- 11.10. Einzelleitung
- 11.10.1. Surface Microstrip
- 11.10.2. Symmetrical Stripline
- 11.11. Differentielle Leitung
- 11.11.1. Vorteile
- 11.11.2. Impedanz mit Bezug auf GND
- 11.11.3. Odd Mode Impedanz
- 11.11.4. Even Mode Impedanz
- 11.11.5. Surface Microstrip
- 11.11.6. Symmetrical Stripline

---

---

---

---

---

---

---

---

## Inhalte

- 11.12. Differentielle Leitung Coplanar
- 11.13. Leiterprofil und Ladungsverteilung
- 11.14. Leiterprofil und Feldverteilung
- 11.15. Fertigungstoleranzen
- 11.15.1. Einfluss der Rückätzung
- 11.15.2. Einfluss des Pressvorgangs
- 12. HF-Eigenschaften passiver Bauelemente
- 12.1. Widerstand
- 12.2. Kondensator
- 12.3. Spule
- 13. Signalspektren

---

---

---

---

---

---

---

---

## Inhalte

- 13.1. Fourier-Prinzip
- 13.2. Schwingungsaddition
- 13.3. Beispiele Signalspektren
- 13.3.1. Sägezahn
- 13.3.2. Dreieck
- 13.3.3. Gauß
- 13.3.4. Rechteck I
- 13.3.5. Rechteck II
- 13.3.6. Impuls
- 13.4. Grundregeln
- 14. Codierung
- 14.1. System

---

---

---

---

---

---

---

---

## Inhalte

- 14.2. PCM
- 14.3. Spektrum digitaler Signale
- 14.4. Frames
- 14.5. Reduzierung der Intensität
- 14.5.1. Phasenmodulation
- 14.5.2. Frequenzmodulation
- 14.5.3. Pseudo Random Patterns
- 15. Filter für LP
- 15.1. Filtertypen
- 15.1.1. RC-TP-1.Ordnung
- 15.1.2. RL-HP-1.Ordnung
- 15.1.3. LC-TP-2.Ordnung

---

---

---

---

---

---

---

---

## Inhalte

- 15.1.4. LC-HP-2.Ordnung
- 15.2. Anordnung
- 15.3. Filter Einbau und Montage
- 16. Übersicht Designmaßnahmen
- 16.1. Gleich- und Gegentaktstörungen
- 16.2. Signalleitung
- 16.3. Masse und Versorgung
- 16.4. Masse und Signalleitung
- 16.5. Leiterplatte
- 16.5.1. Basismaterial
- 16.5.2. Kupferfolie

---

---

---

---

---

---

---

---

## Inhalte

- 16.5.3. Pressvorgang
- 16.5.4. Vias
- 16.6. Bauelemente
- 16.6.1. OpAmp
- 16.6.2. Digital IC
- 16.6.3. Oszillatoren
- 16.6.4. Stecker
- 16.7. Filter
- 16.8. Schirmung
- 17. Elektrochemische Störmechanismen
- 17.1. Galvanisches Element
- 17.2. Elektrochemische Spannungsreihe

---

---

---

---

---

---

---

---

## Inhalte

- 18. ESD
- 18.1. Entstehung
- 18.2. Energiekopplung
- 18.3. Schutzmaßnahmen
- 18.3.1. Isolation
- 18.3.2. Ausweichpfad
- 19. Messtechnik
- 20. Optische Leiterplatte
- 21. Literatur / Links
- 21.1. Literatur
- 21.2. Links

---

---

---

---

---

---

---

---

# 1. Grundlagen

---

---

---

---

---

---

---

---

## 1.1. Welle

- Als Welle bezeichnet man den Vorgang einer sich räumlich ausbreitenden Schwingung
- Eine Welle transportiert keine Materie oder Masse weiter, sondern nur den Zustand bzw. die Energie eines Teilchens.
- Man unterscheidet zwei Arten von Wellen:
  - transversale Wellen:** Sie schwingen senkrecht zu ihrer Ausbreitungsrichtung
  - longitudinale Wellen:** Sie schwingen parallel zu ihrer Ausbreitungsrichtung.

---

---

---

---

---

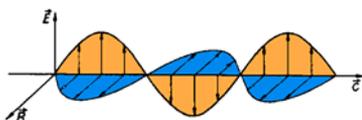
---

---

---

## 1.2. Elektromagnetische Welle

Der Unterschied zwischen einer elektromagnetischen Welle und einer mechanischen Welle ist der, dass hier keine Teilchen schwingen. Statt dessen schwingen hier ein elektrisches Feld  $E$  und ein magnetisches Feld  $B$ , die abhängig voneinander sind. Sie stehen senkrecht aufeinander und zur Ausbreitungsrichtung. An jedem Punkt der Ausbreitungsrichtung schwingen also die Vektoren  $E$  und  $B$  periodisch mit der Zeit:



---

---

---

---

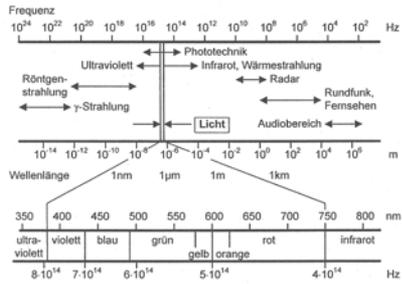
---

---

---

---

## 1.3. Spektrum




---

---

---

---

---

---

---

---

## 1.4. Pegeldefinitionen

- Spannungspegel  $U/\text{dB} = 20 \lg U_x/U_0$  mit  $U_0 = 1\mu\text{V}$
- Strompegel  $I/\text{dB} = 20 \lg I_x/I_0$  mit  $I_0 = 1\mu\text{A}$
- E-Feldstärkepegel  $E/\text{dB} = 20 \lg E_x/E_0$  mit  $E_0 = 1\mu\text{V/m}$
- H-Feldstärkepegel  $H/\text{dB} = 20 \lg H_x/H_0$  mit  $H_0 = 1\mu\text{A/m}$
- Leistungspegel  $P/\text{dB} = 10 \lg P_x/P_0$  mit  $P_0 = 1\text{pW}$

---

---

---

---

---

---

---

---

## 1.5. dB-Werte

6 dB	entspricht	2 : 1
20 dB	entspricht	10 : 1
40 dB	entspricht	100 : 1
60 dB	entspricht	1 000 : 1
80 dB	entspricht	10 000 : 1
100 dB	entspricht	100 000 : 1
120 dB	entspricht	1 000 000 : 1

---

---

---

---

---

---

---

---

## 2. Definitionen

---

---

---

---

---

---

---

---

### 2.1. Was ist EMV

Die Fähigkeit elektrotechnischer Einrichtungen, sich problemlos in ein elektromagnetisches Einsatzumfeld einzufügen.

Das besagt erstens, dort unter dem Einfluss elektromagnetischer Störgrößen in beabsichtigter Weise zufriedenstellend zu arbeiten (**Störfestigkeit**)

und zweitens, diese Umgebung und andere darin befindliche Einrichtungen nicht unzulässig elektromagnetisch zu belasten (**Störemission**).

---

---

---

---

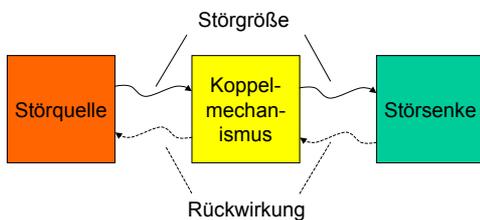
---

---

---

---

### 2.2. Beeinflussungsmodell



---

---

---

---

---

---

---

---

### 3. Störquellen

---

---

---

---

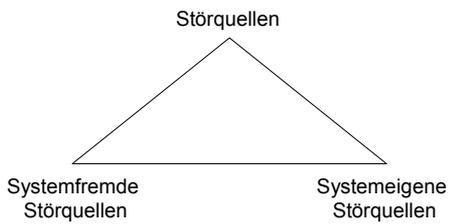
---

---

---

---

#### 3.1. Einteilung der Störquellen



---

---

---

---

---

---

---

---

#### 3.1.1. Systemfremde Störquellen

Systemfremde Störquellen:

- Blitzentladungen
- Elektrostatische Entladungen
- Technische elektromagnetische Prozesse
- Nuklearexplosionen (NEMP)

---

---

---

---

---

---

---

---

### 3.1.2. Systemeigene Störquellen

Systemeigene Störquellen:

- Potentialänderungen
- Signalwechsel
- Taktsignale
- Magnetfelder
- Funkentladungen
- usw.

---

---

---

---

---

---

---

---

### 3.2. Emissionsmechanismen

- Leitungsgeführte Emission hochfrequenter Störsignale
- Niederfrequente Magnetfelder
- Abstrahlung hochfrequenter Störsignale
- Geschaltete Induktivitäten

---

---

---

---

---

---

---

---

#### 3.2.1. Leitungsgeführte Emission

---

---

---

---

---

---

---

---

### 3.2.2. Niederfrequente Magnetfelder

---

---

---

---

---

---

---

---

### 3.2.3. Abstrahlung hochfrequenter Störsignale

- Elektrisch kurze und symmetrische Dipolantenne (Draht- oder Leiterstück)
- Rahmenantenne (Stromschleifen, gebildet durch Verkabelung, Printbahnen, Gehäuse Teile usw.)
- Schlitzstrahler (Öffnungen in Schirmgehäusen)
- Draht (Netz- oder Datenleitungen mit Gleichtaktstrom)
- Doppelleitung

---

---

---

---

---

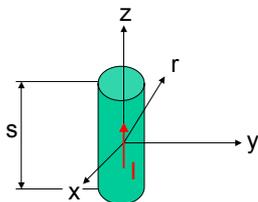
---

---

---

#### 3.2.3.1. Dipolantenne

Näherung für E-Feldstärke



$$|E_{\max}| = 377\Omega \cdot \frac{I \cdot s}{2 \cdot \lambda} \cdot \frac{1}{r}$$

---

---

---

---

---

---

---

---

### 3.2.3.1. Dipolantenne

Beispielrechnung:

Draht der Länge  $s = 5\text{cm}$  wird von einem Strom mit  $I = 1\text{mA}$  und einer Frequenz von  $30\text{MHz}$  durchflossen.

Für die elektrische Feldstärke gilt:  $|E_{\text{max}}| = 377\Omega \cdot \frac{I \cdot s}{2 \cdot \lambda \cdot r}$

im Abstand von zum Beispiel  $10\text{m}$  folgt:  $|E_{\text{max}}| = 377\Omega \cdot \frac{1\text{mA} \cdot 0.05\text{m}}{2 \cdot 10\text{m}} \cdot \frac{1}{10\text{m}} = 94\frac{\mu\text{V}}{\text{m}}$

Es ergibt sich eine elektrische Feldstärke in dB von  $40\text{dB} \frac{\mu\text{V}}{\text{m}}$

---

---

---

---

---

---

---

---

### 3.2.3.1. Dipolantenne

Wird die Reflexion der Welle am Boden berücksichtigt, ergibt sich ein Wert

von ca.  $46\text{dB} \frac{\mu\text{V}}{\text{m}}$

Dieser Wert ist bereits  $16\text{dB}$  über dem Klasse B - Grenzwert der EN 55022!

Der max. zulässige Strom auf der Leitung dürfte  $170\mu\text{A}$  nicht überschreiten, um unter dem Grenzwert zu bleiben!

---

---

---

---

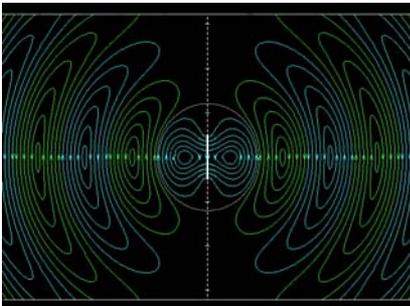
---

---

---

---

#### 3.2.3.1.1. 2D Feldlinienverlauf



---

---

---

---

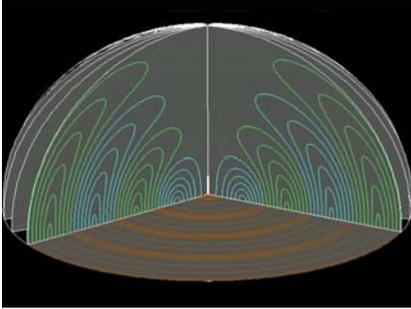
---

---

---

---

### 3.2.3.1.2. 3D Feldlinienverlauf




---

---

---

---

---

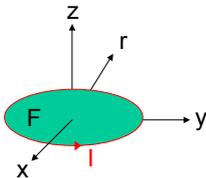
---

---

---

### 3.2.3.2. Rahmenantenne

Näherung für E-Feldstärke



$$|E_{\max}| = 377\Omega \cdot \frac{\pi}{\lambda^2} \cdot I \cdot F \cdot \frac{1}{r}$$

---

---

---

---

---

---

---

---

### 3.2.3.2. Rahmenantenne

Beispielrechnung:

Eine Drahtschleife mit einer Länge der Kanten von 5cm wird von einem Strom  $I = 10\text{mA}$  mit einer Frequenz von 150MHz durchflossen.

Für die elektrische Feldstärke gilt:  $|E_{\max}| = 377\Omega \cdot \frac{\pi}{\lambda^2} \cdot I \cdot F \cdot \frac{1}{r}$

Im Abstand von zum Beispiel 10m folgt:  $|E_{\max}| = 377\Omega \cdot \frac{\pi}{2^2\text{m}^2} \cdot 10\text{mA} \cdot 0.05^2\text{m}^2 \cdot \frac{1}{10\text{m}}$   
 $= 740\mu\frac{\text{V}}{\text{m}}$

Es ergibt sich eine elektrische Feldstärke in dB von  $57\text{dB} \frac{\mu\text{V}}{\text{m}}$

---

---

---

---

---

---

---

---

### 3.2.3.2. Rahmenantenne

Wird die Reflexion der Welle am Boden berücksichtigt, ergibt sich ein Wert von

$$\text{ca. } 63\text{dB} \frac{\mu\text{V}}{\text{m}}$$

Dieser Wert ist bereits 33dB über dem Klasse B - Grenzwert der EN 55022!

Die max. zulässige Länge der Kanten, um den Grenzwert nicht zu überschreiten, beträgt 7.3mm!

---

---

---

---

---

---

---

---

### 3.2.3.3. Schlitzstrahler

---

---

---

---

---

---

---

---

### 3.2.3.4. Leitung / Draht

Leitungen / Drähte wirken wie Antennen!



$$l_{\text{Kabel}} > \frac{\lambda_{\text{Störung}}}{10} \Rightarrow \text{Antenne}$$

---

---

---

---

---

---

---

---

### 3.2.3.4. Leitung / Draht

Leitungen / Drähte wirken wie Antennen!

Leitungstyp	Frequenzbereich			
	bis 1 MHz	1 MHz bis 10 MHz	10 MHz bis 100 MHz	100 MHz bis 1 GHz
Netzstromversorgungsleitung	x	x	x	x
Telefonleitung	x	x	x	x
Datennetzkabel	x	x	x	x
Schnittstellenkabel		x	x	x
Verdrahtung innerhalb eines Schränks (Länge max. 3 m)			x	x
Öffnung in einem Schrank (Länge max. 3 m)			x	x
Verdrahtung innerhalb eines Gehäuses (Länge max. 0.3 m)				x
Öffnung in einem Gehäuse (Länge max. 0.3 m)				x
Leiterbahn auf einer Leiterplatte (Länge max. 0.3m)				x

---

---

---

---

---

---

---

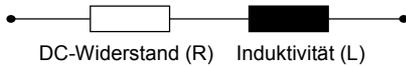
---

---

---

### 3.2.3.4. Leitung / Draht

Ersatzschaltbild eines elektrischen Drahtes:



$$\text{Impedanz : } |Z| = \sqrt{R^2 + (L \cdot \omega)^2}$$

L beträgt ca. 1µH / m

---

---

---

---

---

---

---

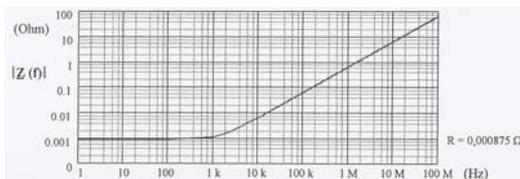
---

---

---

### 3.2.3.4. Leitung / Draht

Impedanzverhalten eines 0.1 m langen Drahtes mit einem Querschnitt von 2 mm<sup>2</sup>:




---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

### 3.2.3.5. Doppelleitung

---

---

---

---

---

---

---

---

### 3.2.4. Geschaltete Induktivität

---

---

---

---

---

---

---

---

### 4. Störgrößen

---

---

---

---

---

---

---

---

## 4.1. Übersicht

Störgrößen können Spannungen, Ströme, elektrische und magnetische Felder sein.

Sie können in vier Störgrößentypen eingeteilt werden:

Systematisierung	Störgrößen			
	periodisch		nicht periodisch, zufällig verteilt	
Zeitliches Erscheinungsbild	schmalbandig	breitbandig	schmalbandig	breitbandig
Bandbreite				
Beispiele	Sinusschwingung ungedämpft	Rechtecksignal	Sinusschwingung gedämpft	Entladevorgang

---

---

---

---

---

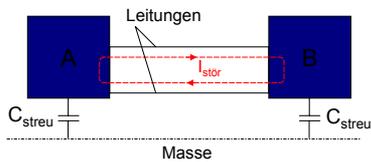
---

---

---

## 4.2. Gegentaktstörspannung

Gegentaktstörspannungen treten zwischen den Leitern eines Adernpaares in Erscheinung. Sie überlagern die Nutzsignale direkt.




---

---

---

---

---

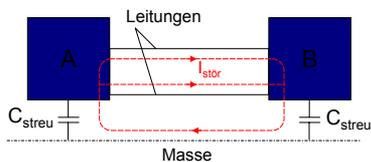
---

---

---

## 4.3. Gleichtaktstörspannung

Gleichtaktstörspannungen treten zwischen je einer Leitung eines Adernpaares und Erde auf. Sie beanspruchen die Leiterisolation gegen Erde.




---

---

---

---

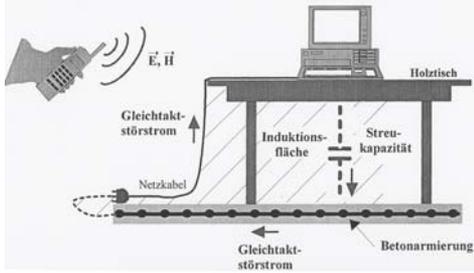
---

---

---

---

### 4.3. Gleichtaktstörspannung



---

---

---

---

---

---

---

---

### 5. Störsenken

---

---

---

---

---

---

---

---

### 5.1. Störsicherheitsabstand

Damit ein Empfänger ein Nutzsignal mit ausreichender Sicherheit aufnehmen kann, muss es im allgemeinen stärker sein als die Summe der an den Empfänger gelangenden Störsignale.  
Den Unterschied zwischen Intensität des Nutzsignals und Intensität des Störsignals bezeichnet man als Störsicherheitsabstand.

---

---

---

---

---

---

---

---

## 5.2. Systeme

Man unterscheidet die Störfestigkeit folgender Systeme:

- Analoge Systeme
- Diskrete Systeme
  - Statische Störfestigkeit von Logikgattern
  - Dynamische Störfestigkeit von Logikgattern
- Geräte (*nicht Inhalt des Seminars*)

---

---

---

---

---

---

---

---

### 5.2.1. Analoge Systeme

Analoge Systeme können durch ihr Signal-Rausch-Verhältnis S/N beschrieben werden. Störsignale addieren sich zum Rauschsignal (z.B. thermisches Rauschen).

$$\frac{S}{N} = 20 \log \frac{U_N}{\sqrt{U_R^2 + U_S^2}}$$

wobei  $U_N$  ...Nutzsignalspannung (Effektivwert)  
 $U_R$  ...Rauschspannung (Effektivwert)  
 $U_S$  ...Störsignalspannung (Effektivwert)

---

---

---

---

---

---

---

---

### 5.2.2. Diskrete Systeme

Diskrete Systeme werden durch die statische und dynamische Störfestigkeit beschrieben. Anders als bei analogen Systemen führt hier ein Störsignal nicht direkt zu einer Nutzsignalverfälschung, sondern es kommt bei logischen Gattern erst zu einer Veränderung des logischen Signalzustandes, wenn ein bestimmter Schwellwert bzw. eine bestimmte Einwirkdauer überschritten wird.

---

---

---

---

---

---

---

---

### 5.2.2.1. Statische Störfestigkeit

Die statische Störfestigkeit charakterisiert die Widerstandsfähigkeit gegenüber Störsignalen, deren Einwirkdauer  $t_s$  größer oder gleich der Schaltzeit  $t_p$  ist.

High – Pegel : Statischer Störabstand  $S_{High} = |U_{E-H-min} - U_{A-H-min}|$

Low – Pegel : Statischer Störabstand  $S_{Low} = |U_{E-L-max} - U_{A-L-max}|$

---

---

---

---

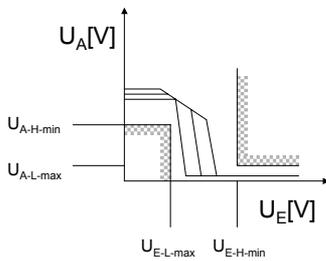
---

---

---

---

### 5.2.2.1. Statische Störfestigkeit



---

---

---

---

---

---

---

---

### 5.2.2.2. Dynamische Störfestigkeit

Die dynamische Störfestigkeit charakterisiert die Widerstandsfähigkeit gegenüber Störsignalen, deren Einwirkdauer  $t_s$  kleiner der Schaltzeit  $t_p$  ist.

Im Vergleich zur statischen Störfestigkeit sind bei der dynamischen Störfestigkeit höhere Amplituden notwendig, um einen unzulässigen Zustandswechsel herbeizuführen.

Verschiedene Logikfamilien weisen hier unterschiedliche Eigenschaften auf.

---

---

---

---

---

---

---

---

# 6. Koppelmechanismen

---

---

---

---

---

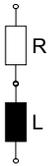
---

---

---

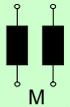
## 6.1. Übersicht

Galvanische  
Kopplung



$$U_{\text{StorG}} = iR + L \frac{di}{dt}$$

Induktive  
Kopplung



$$U_{\text{StorI}} = M \frac{di}{dt}$$

Kapazitive  
Kopplung



$$U_{\text{StorK}} = RC \frac{du}{dt}$$

Strahlungs-  
Kopplung



$$U_{\text{StorS}} \approx E I_{\text{effAntenne}}$$

Nahfeld

Fernfeld

---

---

---

---

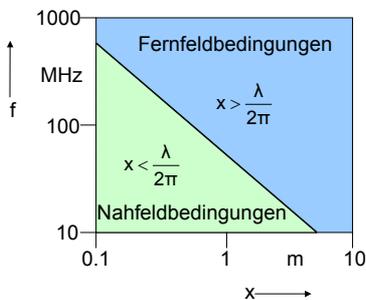
---

---

---

---

## 6.2. Nahfeld - Fernfeld




---

---

---

---

---

---

---

---

## 7. Strahlungsbeeinflussungen

---

---

---

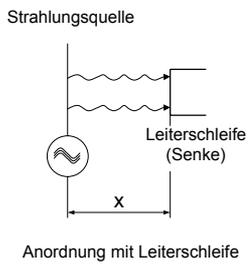
---

---

---

---

### 7.1. Leiterschleife



---

---

---

---

---

---

---

### 7.2. Fernfeldbedingung

Für Fernfeld gilt:  $x > \frac{\lambda}{2\pi}$

Analog gilt:  $x > \frac{c}{2\pi f}$

Damit ergibt sich folgender Zusammenhang für Frequenz  $f$  und Abstand  $x$ , unter dem Fernfeldbedingungen gelten:

f in MHz	x in m
1	50
10	5
100	0,5
1000	0,05

---

---

---

---

---

---

---

## 7.3. Feldstärke und Störspannung

Abschätzungen:

Für die elektrische Feldstärke gilt:  $E \approx 0,3 \frac{\sqrt{P}}{x}$

Für die Störspannung gilt:  $U_{\text{StörS}} = E_{\text{effAntenne}}$

---

---

---

---

---

---

---

---

## 7.3. Feldstärke und Störspannung

Beispielrechnung:

Digitalisignal mit  $f = 500 \text{ MHz}$  und einer Leistung  $P = \frac{1}{3} \text{ Watt}$ ; Leiterschleifenlänge  $l = 0,1 \text{ m}$ ;

Fernfeldbedingung:  $x > \frac{3 \cdot 10^8}{2\pi \cdot 500 \cdot 10^6} \text{ m} = 0,095 \text{ m}$

Für die elektrische Feldstärke gilt:  $E \approx 0,3 \frac{\sqrt{\frac{1}{3}}}{0,095 \text{ m}} \text{ V} = 1,8 \frac{\text{V}}{\text{m}}$

Für die Störspannung gilt:  $U_{\text{StörS}} = 1,8 \cdot 0,1 \text{ V} = 0,18 \text{ V}$

Bei ECL - Technik mit 0,8V Signal entspricht dies einer Störspannungsanteil von 22,5%!

---

---

---

---

---

---

---

---

## 7.3. Feldstärke und Störspannung

Ergebnis:

Das Fernfeld kann bei entsprechenden Frequenzen und entsprechender geometrischer Ausdehnung der Leiterplatte bereits auf der Leiterplatte selbst zur Wirkung kommen!

⇒ Berechnungen für Fernfeld!

Die Störspannung hängt von der Länge der Leiterschleife ab.

⇒ Hohe Störpegel bei langen Leiterschleifen!

---

---

---

---

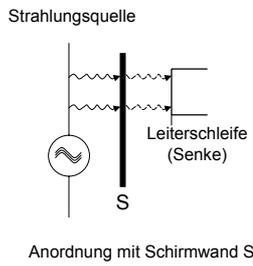
---

---

---

---

## 7.4. Maßnahme - Schirmung



---

---

---

---

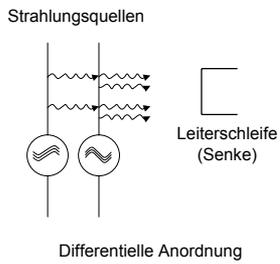
---

---

---

---

## 7.5. Maßnahme - Aufhebung



---

---

---

---

---

---

---

---

## 8. Induktive Beeinflussungen

---

---

---

---

---

---

---

---

## 8. Induktive Beeinflussungen

Ursache:

Induktive Beeinflussungen werden durch parasitäre Flussverkettungen zwischen Betriebsstromkreisen bzw. durch Magnetfelder, die von elektrostatischen oder Blitzentladungen herrühren, verursacht.

Forderung:

Parasitäre Induktivitäten vermeiden bzw. möglichst klein halten.

---

---

---

---

---

---

---

---

## 8. Induktive Beeinflussungen

Maßnahmen:

- Gegeninduktivität klein halten
  - + kurze Leitungslängen
  - + kleine Leiterschleifen des gefährdeten Kreises
  - + großer Abstand zwischen Signal- und Energieleitungen
- Kurzschlusschleifen in der Nähe gefährdeter Signalschleifen
- Orthogonale Anordnung der magnetischen Achsen
- Schirmen

---

---

---

---

---

---

---

---

## 9. Kapazitive Beeinflussungen

---

---

---

---

---

---

---

---

## 9. Kapazitive Beeinflussungen

Ursache:

Ursache für kapazitive Beeinflussungen sind parasitäre, d.h. schaltungstechnisch nicht beabsichtigte Kapazitäten zwischen Leitern bzw. leitfähigen Gebilden, die zu verschiedenen Stromkreisen gehören.

Forderung:

Parasitäre Kapazitäten möglichst klein halten, jedoch die Koppelkapazitäten zum Bezugspotential groß gestalten.

---

---

---

---

---

---

---

---

## 9. Kapazitive Beeinflussungen

Maßnahmen:

- Parasitäre Kapazitäten klein halten
  - + kurze Leitungslängen
  - + kleine Leiterquerschnittsflächen
  - + Parallelführungen vermeiden
  - + kleine Dielektrizitätszahlen des Leiterplattenmaterials
- Große Koppelkapazitäten zum Bezugspotential
  - + Einbetten von Signalleitern zwischen Bezugspotentialleitern

---

---

---

---

---

---

---

---

## 9. Kapazitive Beeinflussungen

- Möglichst niederohmige Ausführung der beeinflussungsgefährdeten Stromkreise
- Schaltkreisfamilien so langsam wie möglich wählen
- Schirmen

---

---

---

---

---

---

---

---

## 10. Galvanische Beeinflussungen

---

---

---

---

---

---

---

---

## 10. Galvanische Beeinflussungen

Ursache:

Eine oder mehrere gemeinsame Impedanzen von Stromkreisen. Jeder der in den Kreisen fließenden Ströme erzeugt somit einen Beitrag zum Spannungsabfall an der (den) Impedanz(en), dieser Spannungsabfall wirkt sich in allen Kreisen aus.

Forderung:

Impedanz- und induktivitätsarme Ausführung von Leiterzügen, die notwendigerweise mehreren Stromkreisen angehören.

---

---

---

---

---

---

---

---

## 10. Galvanische Beeinflussungen

Maßnahmen:

- Impedanz- und induktivitätsarme Ausführung von Leiterzügen
- + kürzestmögliche gemeinsame Leitungslängen
- + große Leiterquerschnittsflächen
- + enge Parallelführungen von Hin- und Rückleitungen
- + flächenhafte Führung des Bezugs- und Versorgungspotentials
- Weitgehende Vermeidung gemeinsamer Leiterstücke

---

---

---

---

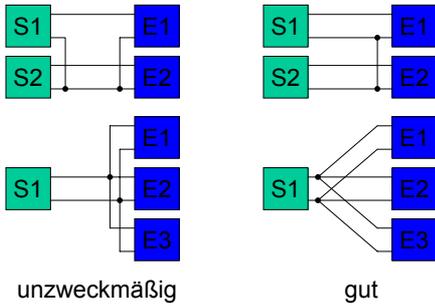
---

---

---

---

## 10. Galvanische Beeinflussungen



---

---

---

---

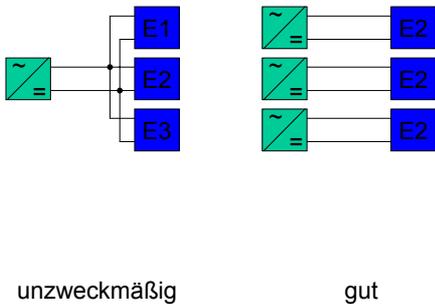
---

---

---

---

## 10. Galvanische Beeinflussungen



---

---

---

---

---

---

---

---

## 10. Galvanische Beeinflussungen

- Potentialtrennung (Optokoppler)
- Schaltkreisfamilien so langsam wie möglich wählen

---

---

---

---

---

---

---

---

# 11. Leitung

---

---

---

---

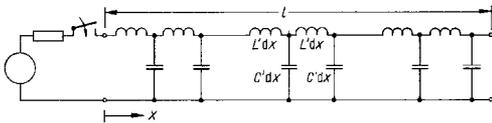
---

---

---

---

## 11.1. Ersatzschaltbild



---

---

---

---

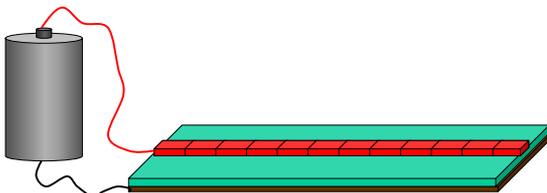
---

---

---

---

## 11.2. Ladungsverlauf



$$Z_0 = \frac{U}{I} \quad I = \frac{\delta Q}{\delta t} \quad \delta Q = \delta C V$$

---

---

---

---

---

---

---

---

### 11.3. Ausbreitungsgeschwindigkeit

$$V = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

C = Lichtgeschwindigkeit  
=  $2.99792 \cdot 10^8$  m/s  
 $\epsilon_r$  = Dielektrizitätskonstante

---

---

---

---

---

---

---

---

### 11.3. Ausbreitungsgeschwindigkeit

Medium	$\epsilon_r$	Ausbreitungsgeschw.
Luft	1.0	30 cm/ns
PTFE-Teflon	2.2	20 cm/ns
SiO2-MCM-D	3.9	15 cm/ns
Polyimid/Glas	4.1	14.8 cm/ns
FR-4	4.1	14.8 cm/ns
AIO-MCM-C	9.0	10 cm/ns

---

---

---

---

---

---

---

---

### 11.4. Schaltzeiten und kritische Länge

$$l = \frac{T_r}{2T_{pd}}$$

$T_r$  = Schaltzeit  
 $T_{pd}$  = propagation delay / inch

---

---

---

---

---

---

---

---

## 11.4. Schaltzeiten und kritische Länge

Logikfamilie	Schaltzeit $T_r$	Kritische Länge $l$
S-TTL	5.0 ns	36 cm
10KECL	2.5 ns	18 cm
AS-TTL	1.9 ns	14 cm
F-TTL	1.2 ns	9 cm
BiCMOS	0.7 ns	5 cm
10KHECL	0.7 ns	5 cm
100KECL	0.5 ns	3.5 cm
GaAs	0.3 ns	2 cm

---

---

---

---

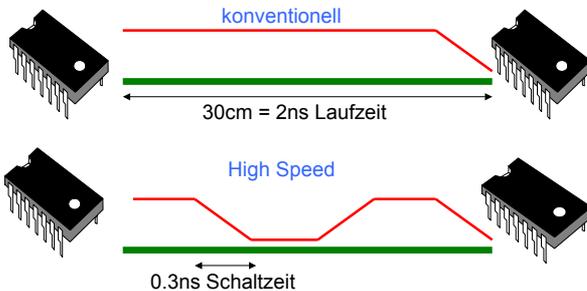
---

---

---

---

## 11.5. Laufzeit




---

---

---

---

---

---

---

---

## 11.5. Laufzeit

Forderung:

Verwenden von Leitungslängen, die für die herangezogene Logikfamilie als kurze Leitung gelten.

Maßnahmen:

- Bauteilanzordnung so gestalten, dass kurze Leitungen möglich sind.
- Bei HS -Designs stärkeres Verwenden der dritten Dimension durch den Einsatz von Multichip-Modulen oder kompakter Bauelemente, wie zum Beispiel SMD, BGA usw.

---

---

---

---

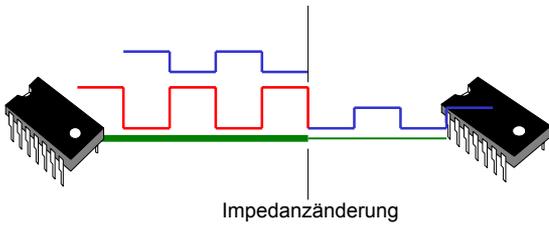
---

---

---

---

## 11.6. Reflexion



---

---

---

---

---

---

---

---

## 11.6. Reflexion

Forderung:

L/C - Verhältnis auf der Leiterplatte konstant halten.

Maßnahmen:

- Design der Leiterplatte und der Leiterbahn mit konstanter Impedanz.
- Vermeidung von Vias

---

---

---

---

---

---

---

---

## 11.7. Impedanz

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

---

---

---

---

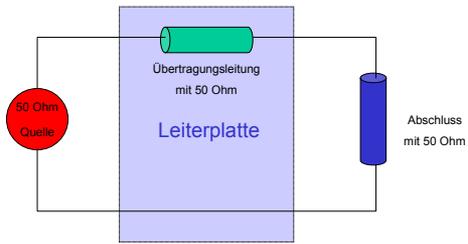
---

---

---

---

## 11.8. Impedanzanpassung



---

---

---

---

---

---

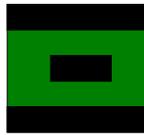
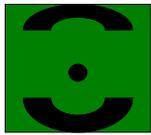
---

---

## 11.9. Strukturen



Koax-Kabel



Stripline

---

---

---

---

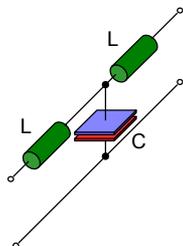
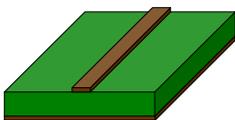
---

---

---

---

## 11.10. Einzelleitung



---

---

---

---

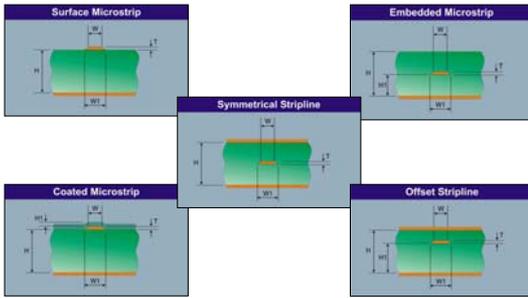
---

---

---

---

## 11.10. Einzelleitung




---

---

---

---

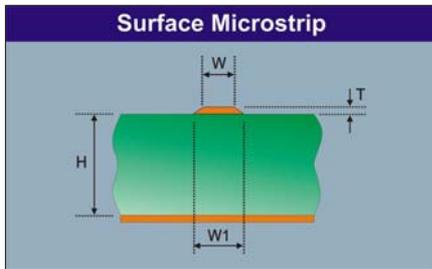
---

---

---

---

### 11.10.1. Surface Microstrip




---

---

---

---

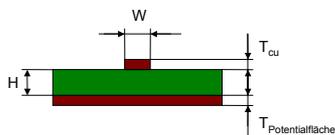
---

---

---

---

### 11.10.1. Surface Microstrip



$$Z_0 = \left[ \frac{87}{\sqrt{\epsilon_r + 1.41}} \right] \ln \left[ \frac{5.98 \cdot H}{0.8 \cdot W + T_{Cu}} \right]$$

mit  $0.3 < \frac{H}{W} < 10$

---

---

---

---

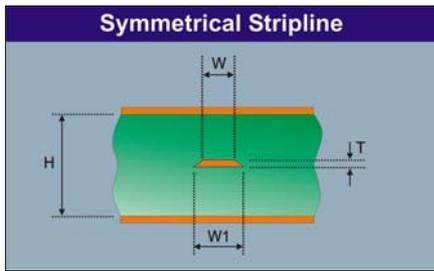
---

---

---

---

## 11.10.2. Symmetrical Stripline




---

---

---

---

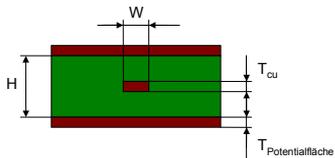
---

---

---

---

## 11.10.2. Symmetrical Stripline



$$Z_0 = \left[ \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \right] \ln \left[ \frac{4 \cdot H}{0.67 \pi \cdot (0.8 \cdot W + T_{Cu})} \right]$$

mit  $\frac{W}{H - T_{Cu}} < 0.35$  und  $\frac{T_{Cu}}{H} < 0.25$

---

---

---

---

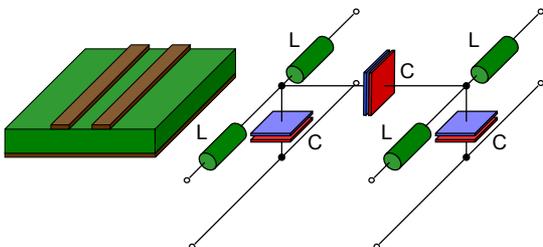
---

---

---

---

## 11.11. Differentielle Leitung




---

---

---

---

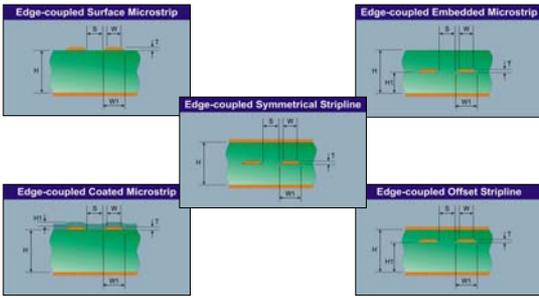
---

---

---

---

## 11.11. Differentielle Leitung



---

---

---

---

---

---

---

---

### 11.11.1. Vorteile

- Unempfindlich gegenüber äußeren HF-Signalen bzw. EM-Feldern.
- System kann mit kleinen Signalen arbeiten
- Hohe Taktraten bei geringer Eigenabstrahlung möglich

---

---

---

---

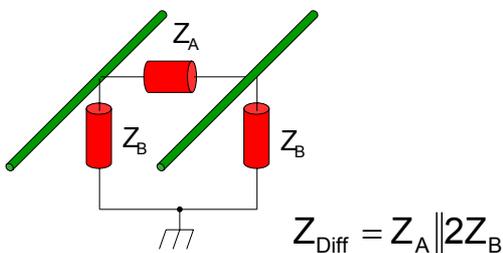
---

---

---

---

### 11.11.2. Impedanz mit Bezug auf GND



---

---

---

---

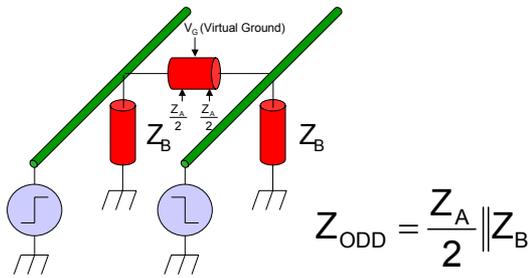
---

---

---

---

### 11.11.3. Odd Mode Impedanz



---

---

---

---

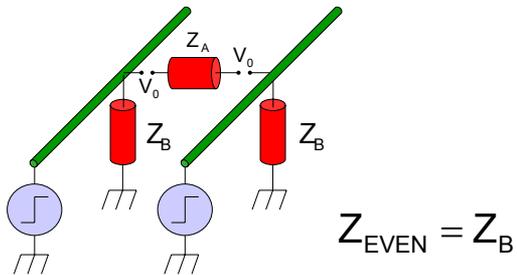
---

---

---

---

### 11.11.4. Even Mode Impedanz



---

---

---

---

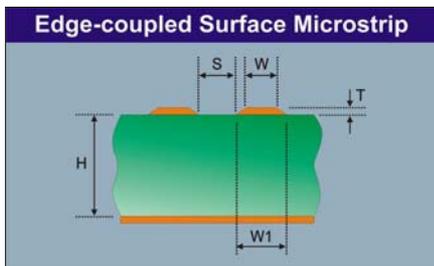
---

---

---

---

### 11.11.5. Surface Microstrip



---

---

---

---

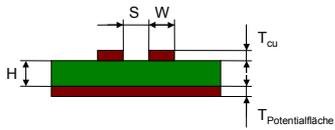
---

---

---

---

### 11.11.5. Surface Microstrip



$$Z_{\text{Diff}} = 2 \cdot Z_0 \left( 1 - 0.48 \left( -0.96 \frac{S}{H} \right) \right)$$

mit  $Z_0$  als Impedanz des Einzelleiters

---

---

---

---

---

---

---

---

### 11.11.5. Surface Microstrip

Vgl. Microstrip (Einzelleitung):

$$Z_0 = \left[ \frac{87}{\sqrt{\epsilon_r + 1.41}} \right] \ln \left[ \frac{5.98 \cdot H}{0.8 \cdot W + T_{\text{Cu}}} \right]$$

---

---

---

---

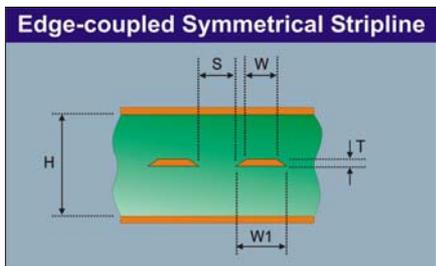
---

---

---

---

### 11.11.6. Symmetrical Stripline




---

---

---

---

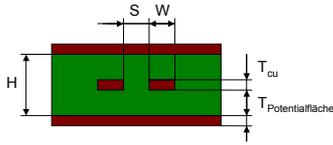
---

---

---

---

## 11.11.6. Symmetrical Stripline



$$Z_{\text{Diff}} = 2 \cdot Z_0 \left( 1 - 0.347 \left( -2.9 \frac{S}{H} \right) \right)$$

mit  $Z_0$  als Impedanz des Einzelleiters

---

---

---

---

---

---

---

---

## 11.11.6. Symmetrical Stripline

Vgl. Symmetrical Stripline (Einzelleitung):

$$Z_0 = \left[ \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \right] \ln \left[ \frac{4 \cdot H}{0.67 \pi \cdot (0.8 \cdot W + T_{\text{Cu}})} \right]$$

---

---

---

---

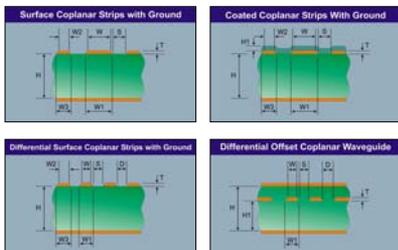
---

---

---

---

## 11.12. Differentielle Leitung Coplanar




---

---

---

---

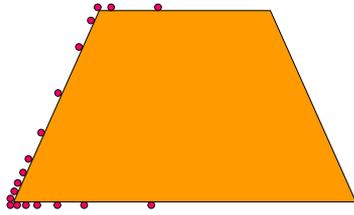
---

---

---

---

### 11.13. Leiterprofil und Ladungsverteilung



---

---

---

---

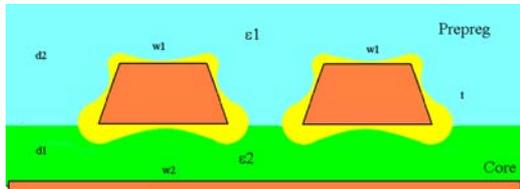
---

---

---

---

### 11.14. Leiterprofil und Feldverteilung



---

---

---

---

---

---

---

---

### 11.15. Fertigungstoleranzen

---

---

---

---

---

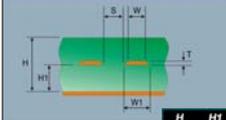
---

---

---

## 11.15.1. Einfluss der Rückätzung

Edge-coupled Embedded Microstrip



H	H1	W	W1	S	T	Er	Z/D/L/C	Zdiff
600	500	75	75	100	35	4.2	Z	99.3
600	500	65	75	100	35	4.2	Z	102.3
600	500	55	75	100	35	4.2	Z	105.0
23.6	19.7	2.95	2.95	3.94	1.38	4.2	Z	99.3
23.6	19.7	2.56	2.95	3.94	1.38	4.2	Z	102.3
23.6	19.7	2.17	2.95	3.94	1.38	4.2	Z	105.0

---

---

---

---

---

---

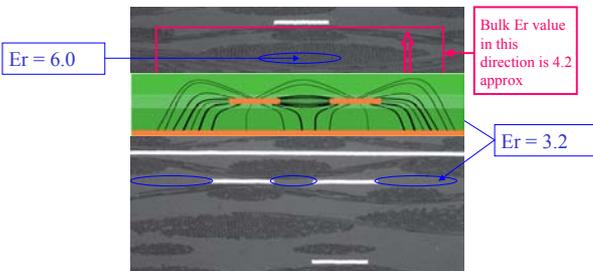
---

---

---

---

## 11.15.2. Einfluss des Pressvorgangs




---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## 12. HF-Eigenschaften passiver Bauelemente

---

---

---

---

---

---

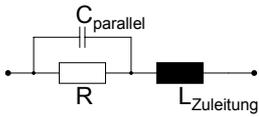
---

---

---

---

## 12.1. Widerstand



---

---

---

---

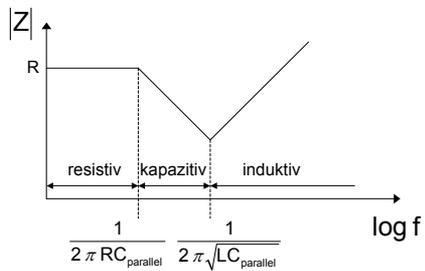
---

---

---

---

## 12.1. Widerstand



---

---

---

---

---

---

---

---

## 12.2. Kondensator



---

---

---

---

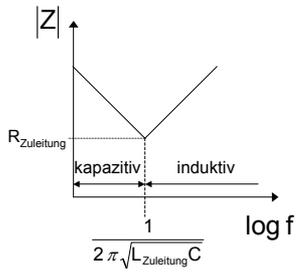
---

---

---

---

## 12.2. Kondensator



---

---

---

---

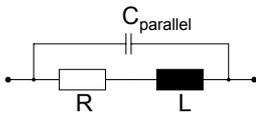
---

---

---

---

## 12.3. Spule



---

---

---

---

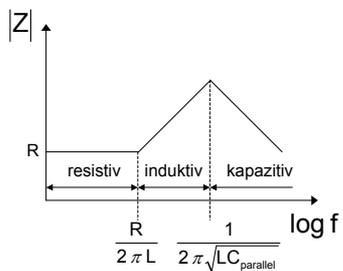
---

---

---

---

## 12.3. Spule



---

---

---

---

---

---

---

---

## 13. Signalspektren

---

---

---

---

---

---

---

---

### 13.1. Fourier-Prinzip

Fourier-Prinzip:

Alle Schwingungen / Signale können so aufgefasst werden, als seien sie aus lauter Sinusschwingungen unterschiedlicher Frequenz und Amplitude zusammengesetzt.

$$y(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n \omega_0 t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n \omega_0 t)$$

---

---

---

---

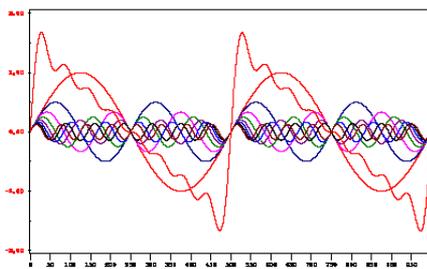
---

---

---

---

### 13.2. Schwingungsaddition



---

---

---

---

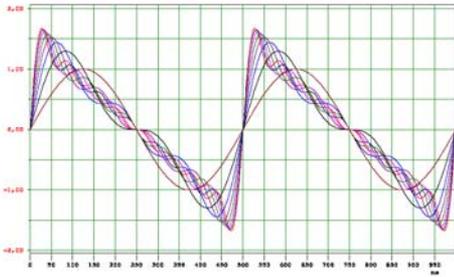
---

---

---

---

## 13.2. Schwingungsaddition



---

---

---

---

---

---

---

---

## 13.3. Beispiele Signalspektren

---

---

---

---

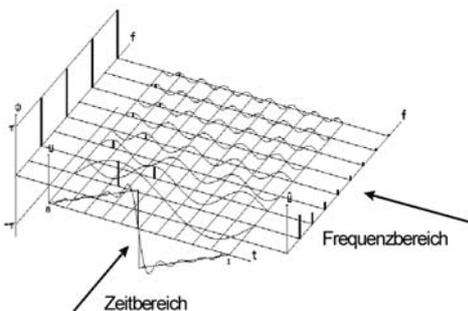
---

---

---

---

### 13.3.1. Sägezahn



---

---

---

---

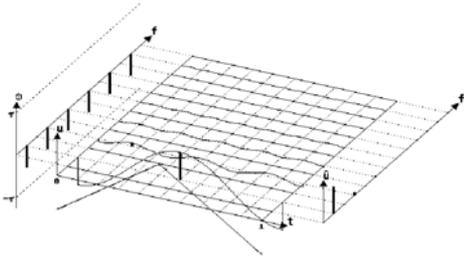
---

---

---

---

### 13.3.2. Dreieck



---

---

---

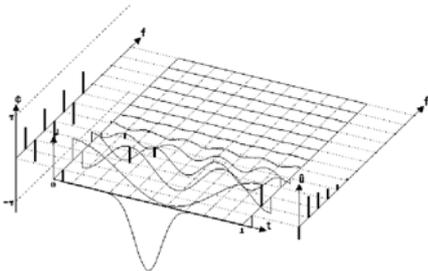
---

---

---

---

### 13.3.3. Gauß



---

---

---

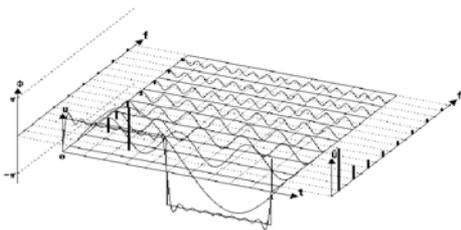
---

---

---

---

### 13.3.4. Rechteck I



---

---

---

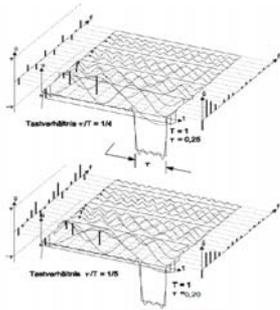
---

---

---

---

### 13.3.5. Rechteck II



---

---

---

---

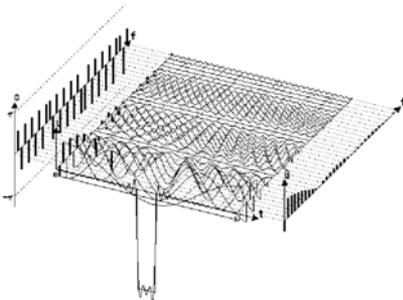
---

---

---

---

### 13.3.6. Impuls



---

---

---

---

---

---

---

---

### 13.4. Grundregeln

- Periodische Signale besitzen ein diskretes Linienspektrum, nicht periodische Signale dagegen ein kontinuierliches Spektrum.
- Alle großen zeitlichen Kenngrößen erscheinen im Frequenzbereich klein und umgekehrt.
- Je mehr die Zeitdauer eines Signals eingeschränkt wird, desto breiter wird zwangsläufig sein Frequenzband.

---

---

---

---

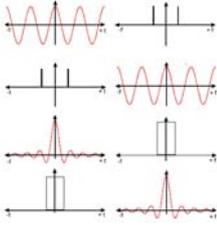
---

---

---

---

## 13.4. Grundregeln



Periodische Signale besitzen ein diskretes Linienspektrum, nicht periodische Signale dagegen ein kontinuierliches Spektrum.

---

---

---

---

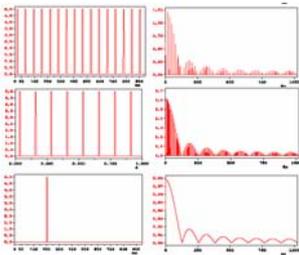
---

---

---

---

## 13.4. Grundregeln



Alle großen zeitlichen Kenngrößen erscheinen im Frequenzbereich klein und umgekehrt.

---

---

---

---

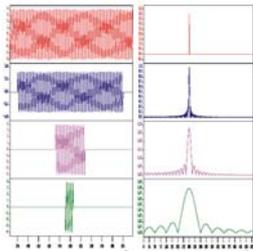
---

---

---

---

## 13.4. Grundregeln



Je mehr die Zeitdauer eines Signals eingeschränkt wird, desto breiter wird zwangsläufig sein Frequenzband.

---

---

---

---

---

---

---

---

# 14. Codierung

---

---

---

---

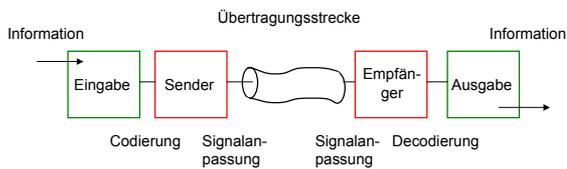
---

---

---

---

## 14.1. System



---

---

---

---

---

---

---

---

## 14.2. PCM

PCM: Pulse - Code - Modulation

Jedem Abtastwert wird eine bestimmte Codekombination mit konstanter Anzahl Binärzeichen zugeordnet. Die übertragene Information liegt nicht mehr in der Amplitude des Abtastwertes, sondern in der zugehörigen Codekombination, die aus einer Folge von Ein- und Ausschaltimpulsen besteht. Gleiche Abtastwerte haben auch gleiche Codekombinationen.

---

---

---

---

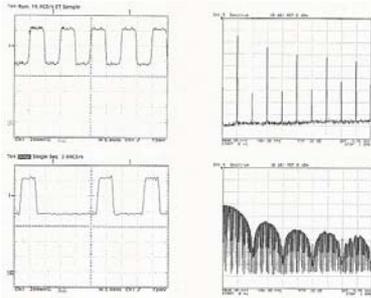
---

---

---

---

### 14.3. Spektrum digitaler Signale



---

---

---

---

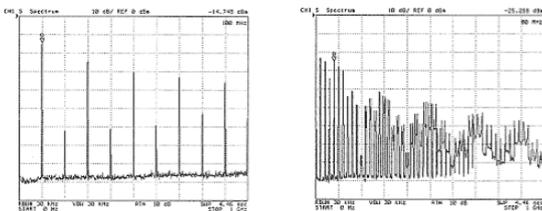
---

---

---

---

### 14.4. Frames



200 Mb/s 1010 PCM

200 Mb/s 1010 PCM  
8B/10B codiert

---

---

---

---

---

---

---

---

### 14.5. Reduzierung der Intensität

---

---

---

---

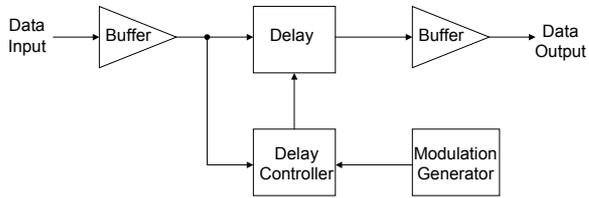
---

---

---

---

## 14.5.1. Phasenmodulation



---

---

---

---

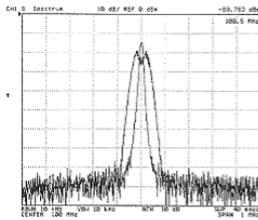
---

---

---

---

## 14.5.1. Phasenmodulation



200 MBd PCM bei 100MHz  
(schmaler Peak)

200 MBd moduliert 6.28rad  
(breiter Peak)

---

---

---

---

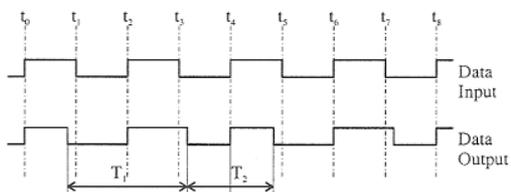
---

---

---

---

## 14.5.2. Frequenzmodulation



---

---

---

---

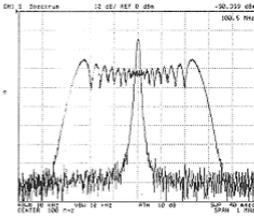
---

---

---

---

## 14.5.2. Frequenzmodulation



200 MBd PCM bei 100MHz  
(schmaler Peak)

200 MBd moduliert 1MHz  
(breiter Peak)

---

---

---

---

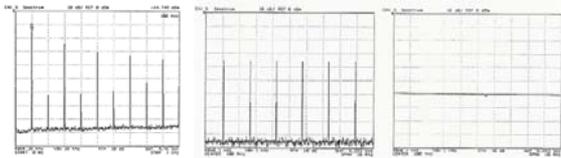
---

---

---

---

## 14.5.3. Pseudo Random Patterns



200 MBd 1010 PCM    200 MBd PCM PN 7    200 MBd PCM PN15

---

---

---

---

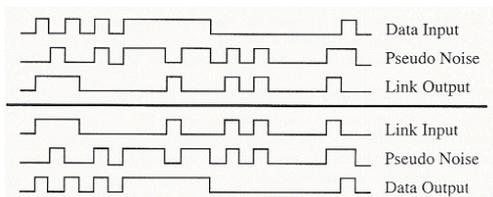
---

---

---

---

## 14.5.3. Pseudo Random Patterns



---

---

---

---

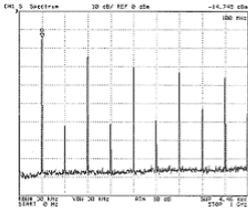
---

---

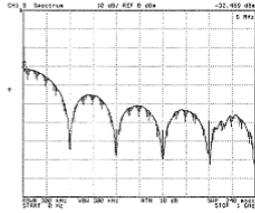
---

---

### 14.5.3. Pseudo Random Patterns



200 MBd 1010 PCM



200 MBd 1010 PCM PN codiert

---

---

---

---

---

---

---

---

### 15. Filter für Leiterplatten

---

---

---

---

---

---

---

---

#### 15.1. Filtertypen

---

---

---

---

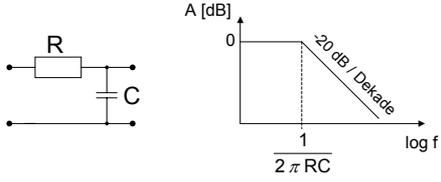
---

---

---

---

### 15.1.1. RC-TP-1.Ordnung



---

---

---

---

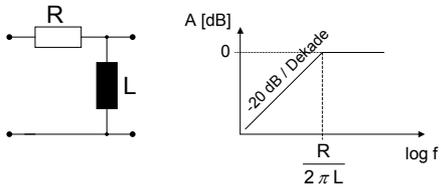
---

---

---

---

### 15.1.2. RL-HP-1.Ordnung



---

---

---

---

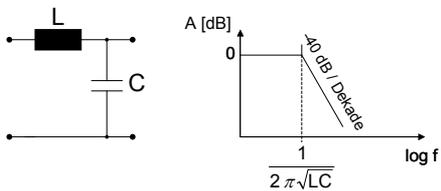
---

---

---

---

### 15.1.3. LC-TP-2.Ordnung



---

---

---

---

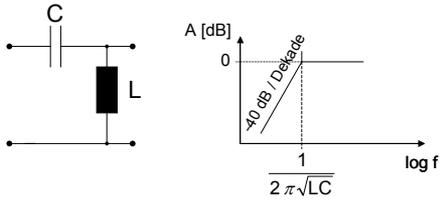
---

---

---

---

### 15.1.4. LC-HP-2.Ordnung




---

---

---

---

---

---

---

---

### 15.2. Filter Anordnung

Impedanz am Eingang des Filters	Wahl und Anordnung der Filterbauteile	Impedanz am Ausgang des Filters
niedrig		niedrig
hoch		hoch
niedrig		hoch
hoch		niedrig
unbekannt		unbekannt

---

---

---

---

---

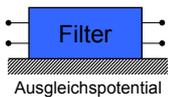
---

---

---

### 15.3. Filter Einbau und Montage

- Filter am Eingang der Leiterplatte montieren
- Störungen am Ort des Entstehens filtern
- Gekapselte und vorgefertigte Filterbauelemente flächig auf das Ausgleichspotential montieren




---

---

---

---

---

---

---

---

## 16. Übersicht Designmaßnahmen

---

---

---

---

---

---

---

---

### 16.1. Gleich- und Gegentaktstörung

Maßnahmen gegen asymmetrische oder Gleichtaktstörungen	Maßnahmen gegen symmetrische oder Gegentaktstörungen
Verminderung der Schleifenfläche	Verdrillung
Filter	Filter
Abgeschirmte Kabel	Abgeschirmte Kabel
Symmetrische Übertragung	
Aufftrennen von Schleifen	
Erdrücke	
Drosseln	
Ferrite	

---

---

---

---

---

---

---

---

### 16.2. Signalleitung

- Schaltkreisfamilien so langsam wie möglich wählen
- Bauteileanordnung so gestalten, dass kurze Leitungen möglich sind.
- Bei HS -Designs stärkeres Verwenden der dritten Dimension durch den Einsatz von Multichip-Modulen oder kompakter Bauelemente, wie zum Beispiel SMD, BGA usw.
- Design der Leiterplatte und der Leiterbahn mit konstanter Impedanz.

---

---

---

---

---

---

---

---

## 16.2. Signalleitung

- Möglichst niederohmige Ausführung der beeinflussungsgefährdeten Stromkreise
- Einbetten von Signalleitern zwischen Bezugspotentialleitern
- Vermeidung von Vias
- Parallelführungen von Leitungen verschiedener Kreise vermeiden
- enge Parallelführungen von Hin- und Rückleitungen

---

---

---

---

---

---

---

---

## 16.2. Signalleitung

- großer Abstand zwischen Signal- und Energieleitungen
- kleine Leiterschleifen des gefährdeten Kreises
- Kurzschlusschleifen in der Nähe gefährdeter Signalschleifen
- Orthogonale Anordnung der magnetischen Achsen
- Schirmen
- Potentialtrennung (Optokoppler)

---

---

---

---

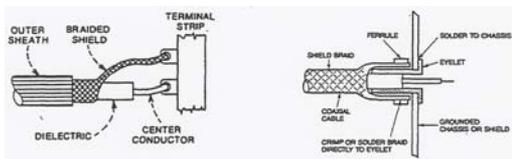
---

---

---

---

## 16.2. Signalleitung



falsch

richtig

---

---

---

---

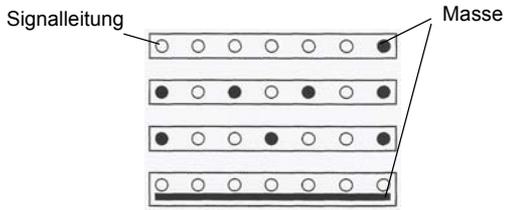
---

---

---

---

## 16.2. Signalleitung



---

---

---

---

---

---

---

---

## 16.2. Signalleitung



falsch

richtig

---

---

---

---

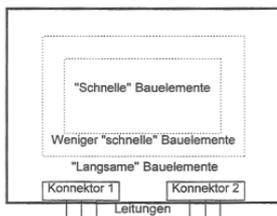
---

---

---

---

## 16.2. Signalleitung



---

---

---

---

---

---

---

---

## 16.3. Masse und Versorgung

Ursache:

Wenn ein aktives Bauelement schaltet, benötigt es kurzzeitig einen erhöhten Strom, also einen Gleichstromimpuls, der schnell geliefert werden muss.

Folge:

Absinken der Spannung, wodurch andere Bauteile gestört werden. Es kann zu weiteren unnötigen Schaltvorgängen oder auch zu Induktionsvorgängen mit hohen Spannungsspitzen kommen. Die Folge ist eine erhöhte Abstrahlung und eine verminderte Störsicherheit.

---

---

---

---

---

---

---

---

## 16.3. Masse und Versorgung

Forderung:

Vorhandensein eines Pufferspeichers.

Maßnahmen:

- Für die Stromversorgung bedeutet das, dass
- L' möglichst klein gehalten wird zum Beispiel durch große Kupferflächen.
  - C' möglichst groß gestaltet wird durch ein sogenanntes Vcc/GND-Sandwich.

---

---

---

---

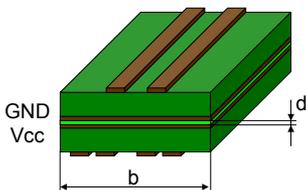
---

---

---

---

## 16.3. Masse und Versorgung



$$Z = \frac{377\Omega}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \frac{d}{b}$$

gilt ab einige 10kHz!

Empfehlung :  $d \approx 0.1\text{mm}$

---

---

---

---

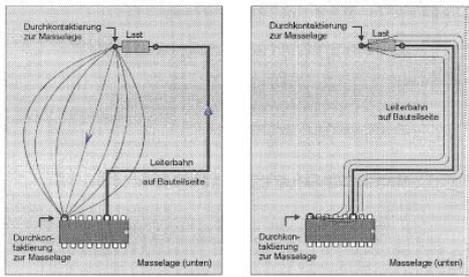
---

---

---

---

## 16.4. Masse und Signalleitung




---

---

---

---

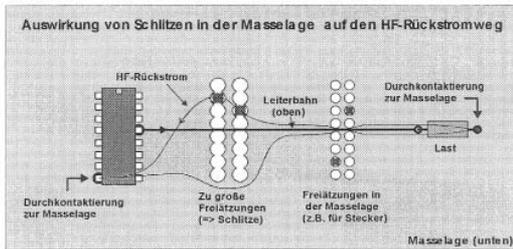
---

---

---

---

## 16.4. Masse und Signalleitung




---

---

---

---

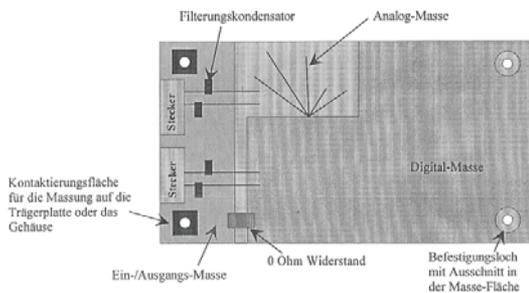
---

---

---

---

## 16.4. Masse und Signalleitung




---

---

---

---

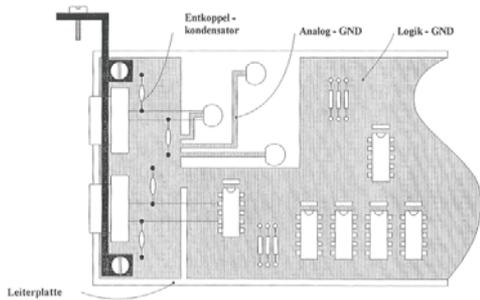
---

---

---

---

## 16.4. Masse und Signalleitung



---

---

---

---

---

---

---

---

## 16.5. Leiterplatte

---

---

---

---

---

---

---

---

### 16.5.1. Basismaterial

Auswahl des Basismaterials hinsichtlich Dielektrikum und Toleranzen im Hinblick auf die Signalfrequenzen durchführen.

---

---

---

---

---

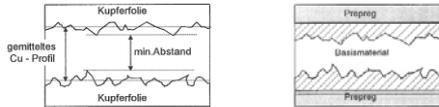
---

---

---

## 16.5.2. Kupferfolie

Die Kupferfolie beeinflusst die geometrischen Größen Leiterbahndicke  $T_{Cu}$  und Lagenabstand  $H$  aufgrund ihrer Struktur:



Bei HighSpeed-Designs müssen Impedanzschwankungen, die durch die Oberflächenrauigkeit der Kupferfolie verursacht werden, minimiert werden, zum Beispiel durch die Verwendung von sog. VLP-Kupferfolien.

---

---

---

---

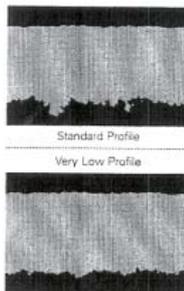
---

---

---

---

## 16.5.2. Kupferfolie



---

---

---

---

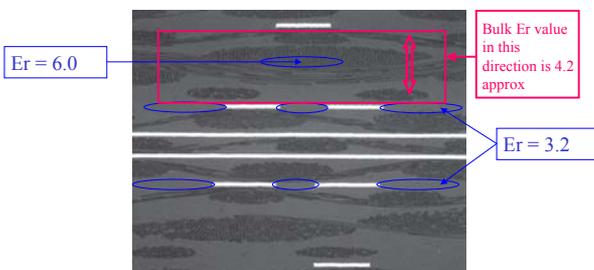
---

---

---

---

## 16.5.3. Pressvorgang



---

---

---

---

---

---

---

---

## 16.5.4. Vias

Impedanzkontrollierte Leitungen für HighSpeed-Signale sollten keine oder nur sehr wenige Vias zwischen dem Sende- und Empfangsbauteil aufweisen.

Vias bilden Kapazitäten mit den anderen Lagen einer Leiterplatte und führen deshalb zu Impedanzveränderungen und Reflexionen.

---

---

---

---

---

---

---

---

## 16.6. Bauelemente

- OPs
- schnelle digital ICs
- Oszillatoren
- Stecker

---

---

---

---

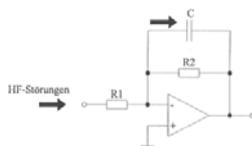
---

---

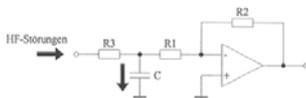
---

---

### 16.6.1. OpAmp



unzweckmäßig



gut

---

---

---

---

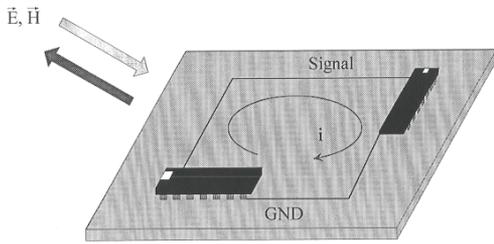
---

---

---

---

## 16.6.2. Digital IC



---

---

---

---

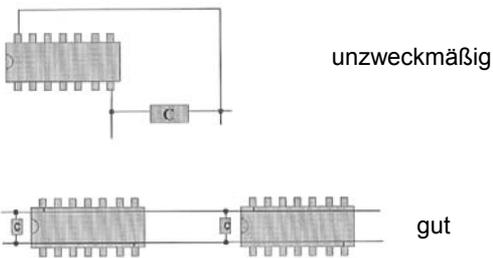
---

---

---

---

## 16.6.2. Digital IC



---

---

---

---

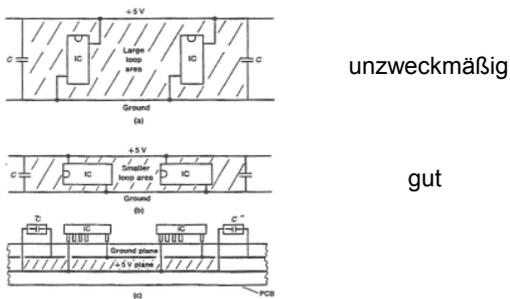
---

---

---

---

## 16.6.2. Digital IC



---

---

---

---

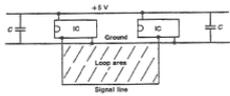
---

---

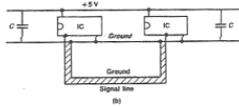
---

---

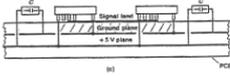
## 16.6.2. Digital IC



unzweckmäßig



gut




---

---

---

---

---

---

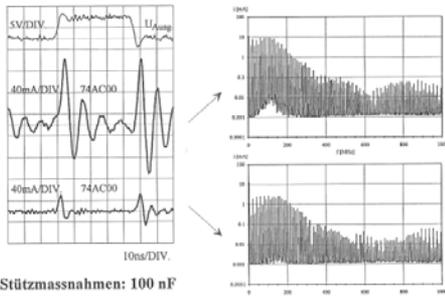
---

---

---

---

## 16.6.2. Digital IC




---

---

---

---

---

---

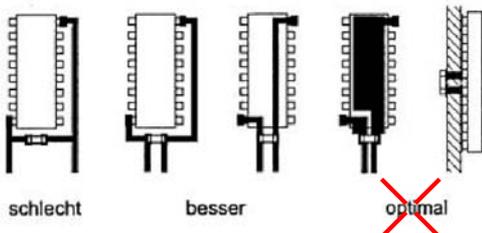
---

---

---

---

## 16.6.2. Digital IC



HS ungeeignet!

---

---

---

---

---

---

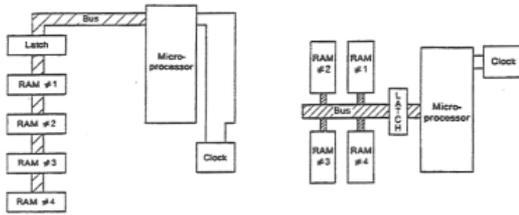
---

---

---

---

## 16.6.2. Digital IC



unzweckmäßig

gut

---

---

---

---

---

---

---

---

## 16.6.3. Oszillator

Beim Oszillator ist entweder ein Quarz oder eine RC- bzw. für höhere Frequenzen eine LC-Kombination das frequenzbestimmende Element.

Aufbauhinweise:

- Oszillatoren sollten, wo möglich, geschirmt werden
- Es soll eine eigene abgeblockte Stromversorgung verwendet werden
- Oszillatoren dort aufbauen, wo sie benötigt werden, um kurze Leitungen zu ermöglichen
- Quarzoszillatoren mittels Drahtbügel flächig auf einer Massefläche befestigen
- Bei Prozessoren auf die Bezugsmasse beziehen, um den Takt optimal zum Prozessor zu führen.

---

---

---

---

---

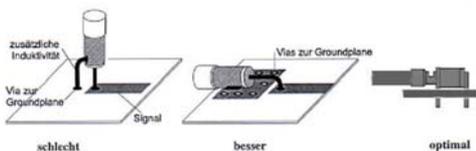
---

---

---

## 16.6.4. Stecker

Steckerbohrungen (Vias) und Anschlussdrähte bilden Kapazitäten mit den verschiedenen Lagen einer Leiterplatte und führen deshalb zu Impedanzveränderungen und Reflexionen. Für HighSpeed-Signale müssen spezielle impedanzangepasste Stecker verwendet werden, zum Beispiel SMA- oder SMB-Stecker.



---

---

---

---

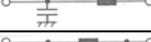
---

---

---

---

## 16.7. Filter

Impedanz am Eingang des Filters	Wahl und Anordnung der Filterungsbauteile	Impedanz am Ausgang des Filters
niedrig		niedrig
hoch		hoch
niedrig		hoch
hoch		niedrig
unbekannt		unbekannt

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## 16.7. Filter

- Filter am Eingang der Leiterplatte montieren
- Störungen am Ort des Entstehens filtern
- Gekapselte und vorgefertigte Filterbauelemente flächig auf das Ausgleichspotential montieren

---

---

---

---

---

---

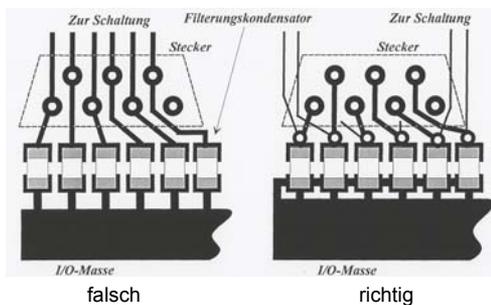
---

---

---

---

## 16.7. Filter




---

---

---

---

---

---

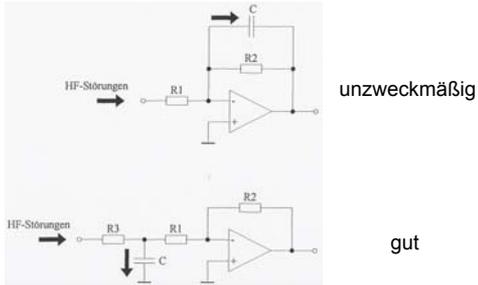
---

---

---

---

## 16.7. Filter




---

---

---

---

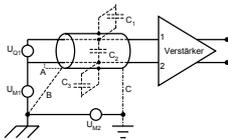
---

---

---

---

## 16.8. Schirmung



Verbindung A :  $U_{12} = 0$

$$\text{Verbindung B : } U_{12} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} U_{M1}$$

$$\text{Verbindung C : } U_{12} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} (U_{M1} + U_{M2})$$

---

---

---

---

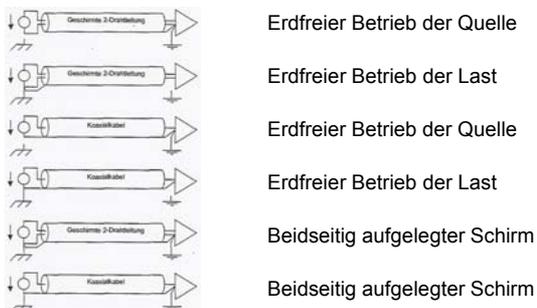
---

---

---

---

## 16.8. Schirmung




---

---

---

---

---

---

---

---

# 17. Elektrochemische Störmechanismen

---

---

---

---

---

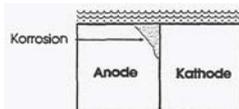
---

---

---

## 17.1. Galvanisches Element

Werden in Niederspannungsschaltkreisen Kontaktstellen aus unterschiedlichen Metallen gebildet, so entstehen unter Einwirkung von Luftfeuchtigkeit galvanische Elemente. Die Höhe der Kontaktspannungen hängt davon ab, wie weit die beiden Metalle in der elektrochemischen Spannungsreihe voneinander entfernt sind. Der Kontakt korrodiert.



---

---

---

---

---

---

---

---

## 17.2. Elektrochemische Spannungsreihe

ANODISCHES ENDE (stärkste Korrosionsanfälligkeit)	
Gruppe I:	1. Magnesium 2. Zink
Gruppe II:	3. Galvanisierter Stahl 4. Aluminium Zn 5. Cadmium 6. Aluminium 17ST 7. Stahl 8. Eisen
Gruppe III:	9. rostfreier Stahl (aktiv) 10. Zinn-Weiß-Lot 11. Blei 12. Zinn 13. Nickel (aktiv) 14. Messing 15. Kupfer 16. Bronze
Gruppe IV:	17. Kupfer-Nickel-Legierung 18. Mangan 19. Silberlot 20. Nickel (passiviert) <sup>1)</sup> 21. rostfreier Stahl (passiviert) <sup>1)</sup>
Gruppe V:	22. Silber 23. Graphit 24. Gold 25. Platin
KATHODISCHES ENDE (geringste Korrosionsanfälligkeit)	

<sup>1)</sup> Passivierung durch Einsetzen in eine stark oxidierende Säurelösung

---

---

---

---

---

---

---

---

## 18. ESD

---

---

---

---

---

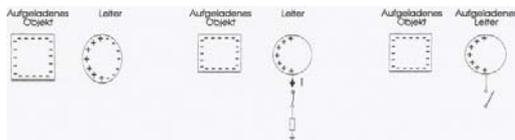
---

---

---

### 18.1. Entstehung

Befindet sich ein elektrischer Leiter im elektrostatischen Feld eines aufgeladenen Isolators, so findet auf dem Leiter eine Ladungstrennung statt. Insgesamt bleibt der Leiter aber neutral. Wird eine Erdverbindung hergestellt fließt Ladung ab. Zurück bleibt ein aufgeladener Leiter.



---

---

---

---

---

---

---

---

### 18.2. Energiekopplung

Eine elektrostatische Entladung kann ihre Energie durch direkte Leitung oder kapazitive oder induktive Kopplung auf eine elektronische Schaltung übertragen.

---

---

---

---

---

---

---

---

## 18.3. Schutzmaßnahmen

Maßnahmen zum Schutz der Schaltung sind:

- Verhindern statischer Aufladung an der Quelle
- Isolation gegen Entladung
- Bereitstellen eines Ausweichpfades für die Entladung
- Schirmung gegen elektrische und magnetische Felder

---

---

---

---

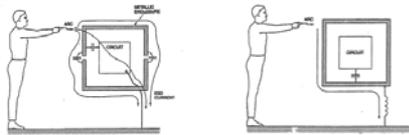
---

---

---

---

### 18.3.1. Isolation



unzweckmäßig

gut

---

---

---

---

---

---

---

---

### 18.3.2. Ausweichpfad

Maßnahmen zur Bereitstellung eines Ausweichpfades:

- Kondensator zur Ableitung des Entladestroms
- Schutzdiode zur Ableitung des Entladestroms
- Niederohmiger Ableitpfad, der bereits vor der Schaltung den Entladestrom ableitet

---

---

---

---

---

---

---

---

## 19. Messtechnik

---

---

---

---

---

---

---

---

## 20. Optische Leiterplatte

---

---

---

---

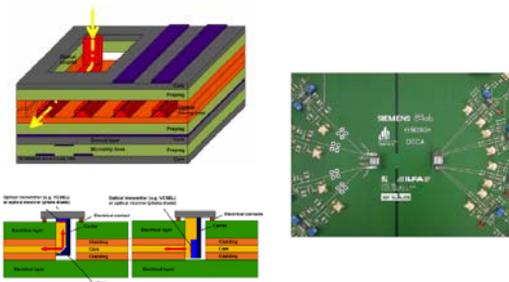
---

---

---

---

## 20. Optische Leiterplatte



---

---

---

---

---

---

---

---

## 21. Literatur / Links

---

---

---

---

---

---

---

---

### 21.1. Literatur

Literatur:

- Printed Circuit Board Design Techniques for EMC Compliance, M. I. Montrose, IEEE Press
- Elektromagnetische Verträglichkeit, Habiger Ernst, Hüthig, 1998
- Taschenbuch der Hochfrequenztechnik, Meinke – Gundlach, Springer, 1992
- Streifenleiter und Hohlleiter, Janssen, Hüthig, 1992
- Elektronische Bauelemente, Reisch, Springer, 1998
- Halbleiter-Schaltungstechnik, Tietze - Schenk, Springer, 1993

---

---

---

---

---

---

---

---

### 21.2. Links

Links:

- [www.polarinstruments.com/de](http://www.polarinstruments.com/de) - Applicationsschriften
- [www.mentor.com](http://www.mentor.com)
- [www.agilent.com](http://www.agilent.com)

---

---

---

---

---

---

---

---