

EMV in der Automobiltechnik

- ▶ Einführung
(Bosch – ein Unternehmen stellt sich vor)
- ▶ 1 Grundlagen der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) in der Automobiltechnik
- ▶ 2 EMV-Anforderungsanalyse und Design
- ▶ 3 EMV-Integration
- ▶ 4 EMV-Prüfverfahren in der Automobiltechnik
- ▶ 5 EMV-Simulation
- ▶ Literatur

Dr.-Ing. Wolfgang Pfaff



2. EMV-Anforderungsanalyse und Design

2 EMV-Design

Übersicht

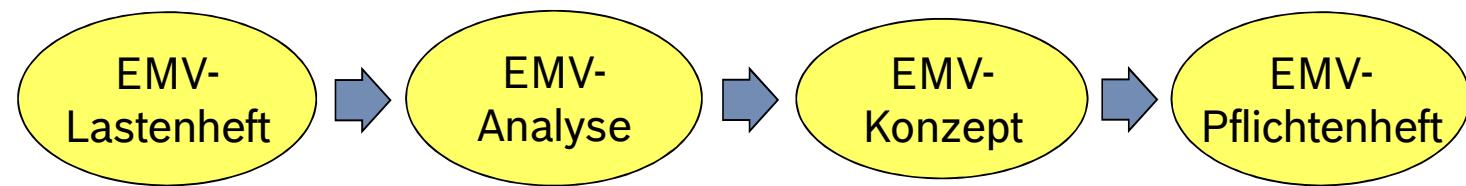
- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störpfade in Kfz-Technik
- ▶ 2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme:
Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel
„Elektrische Servolenkung“

2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ 2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

► EMV-Design: allgemein

- Ableitung der möglichen technischen Lösungen aus den im **EMV-Lastenheft** definierten Anforderungen
- **EMV-Analyse**
- Konzeptuelle Design-/Maßnahmenfindung
- Review der möglichen technischen Lösungen und Ableitung der besten Lösung:
=> **EMV-Konzept**
- Dokumentation des Ergebnisses (**EMV-Konzept**) im **EMV-Pflichtenheft**



2 EMV-Design

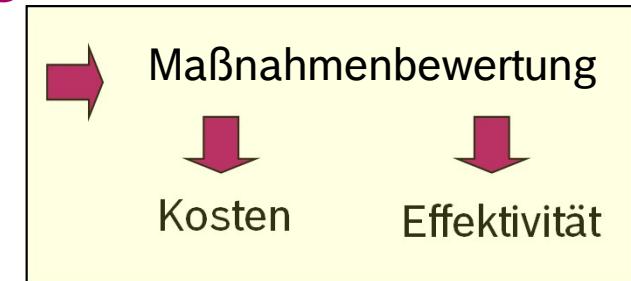
- ▶ Allgemein
 - ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
 - ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
 - ▶ 2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte
 - ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
 - ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“
- EMV-Analyse
- Potentielle Störquellen
 - Potentielle Störsenken
Störempfindliche Bauelemente, Module und Systeme
 - Störpfade
 - Kritisches Review und Ermittlung
der entscheidenden Störquellen, Störsenken und Störpfade
=> Komplexitätsreduzierung
 - Output:
Qualitatives Modell der elektromagnetischen Beeinflussungen

2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ 2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

► Konzeptuelle Maßnahmenfindung

- Schaltung
- Filterung
- Schirmung
- Maßnahmen auf der AVT-Ebene (topologische Ansätze)



► AVT (Aufbau- und Verbindungstechnik)

- Kabeläume und Leitungen
- Stanzgitter, Kühlbänke und Gehäuse
- Leiterplatten, Klemmen und Stecker
- Gel, Kleber und Dichtung (Material und Geometrie)



► Beispiel: metallische Leiterschiene im Freiraum (Verhalten: Antenne) und in der Nähe der Gehäusewand (Verhalten: Leitung)

2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ **2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik**
 - 2.1.1 Störquellen:**
 - Klassifikation**
 - 2.1.2 Störaussendung durch DC-Motoren
 - 2.1.3 Störaussendung durch Halbleiterumschaltung
 - 2.1.4 Weitere Störquellen
 - 2.1.5 Störsenken
 - ▶ **2.2 Störpfade in der Kfz-Technik**
 - ▶ **2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte**
 - ▶ **2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz**
 - ▶ **2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“**

Quellen

- ▶ **Nutzsignale – gewollte Aussendung**
 - z.B.: Rundfunk, Mobiltelefon
- ▶ **Störsignale -ungewollte Aussendung**
 - z.B.: Elektromotor, Zündkerzen
- ▶ **Breitbandstörungen**
 - z.B.: durch Schaltvorgänge
- ▶ **Schmalbandstörungen**
 - z.B.: Radiosender
- ▶ **Beabsichtigte Wirkung**
 - z.B.: Radiosender
- ▶ **Unbeabsichtigte Wirkung**
 - z.B.: Geräteabstrahlung

2 EMV-Design

► Allgemein

► 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik

- 2.1.1 Störquellen:
Klassifikation
- 2.1.2 Störaussendung durch DC-Motoren**
- 2.1.3 Störaussendung durch Halbleiterumschaltung
- 2.1.4 Weitere Störquellen
- 2.1.5 Störsenken

► 2.2 Störpfade in Kfz-Technik

► 2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte

► 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz

► 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

Physikalische Vorgänge



Kontaktspannung
Bürsten-Lamellen

Kommutierung
(Bürstenfeuer)

Mechanische
Kontaktschwankungen

Halbleiterumschaltung
im Steuergerät

Bürsten-
motoren

Elektronisch
kommutierte
Motoren

Störeffekte

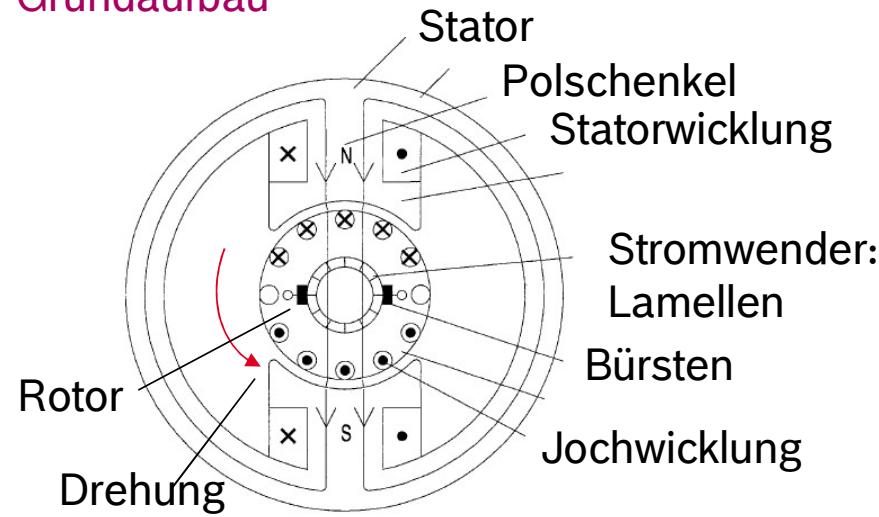
Leitungsgebundene
Störungen

Feldgebundene
Störungen

2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ **2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik**
 - 2.1.1 Störquellen: Klassifikation
 - 2.1.2 Störaussendung durch DC-Motoren**
 - 2.1.3 Störaussendung durch Halbleiterumschaltung
 - 2.1.4 Weitere Störquellen
 - 2.1.5 Störsenken
- ▶ 2.2 Störpfade in Kfz-Technik
- ▶ 2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

→ DC-Motor mit Bürsten: Grundlagen Grundaufbau



ABS8-Motor



- Mechanische Kommutierung zwischen Bürsten und Lamellen
- Hohe Induktivität der Wicklungen
- Folge: Spannungs- / Stromschwankungen
=> HF-Störungen

2 EMV-Design

► Allgemein

► 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik

2.1.1 Störquellen:
Klassifikation

2.1.2 Störaussendung durch DC-Motoren

2.1.3 Störaussendung durch
Halbleiterumschaltung

2.1.4 Weitere Störquellen

2.1.5 Störsenken

► 2.2 Störpfade in Kfz-Technik

► 2.3 Überblick: EMV-relevante
parasitäre Effekte

► 2.4 EMV-Konzept für komplexe
Systeme: Top-Down-Ansatz

► 2.5 EMV-Design am
Produktbeispiel
„Elektrische Servolenkung“

Kontakt zwischen Bürste und
Kommutator abhängig von:

- Materialeigenschaften

$$\rho_{\text{Kupfer}} = 0,017 \mu\Omega\text{m}$$

$$\rho_{\text{Kohle}} = 0,1 \dots 100 \mu\Omega\text{m}$$

- Kontaktgeometrie

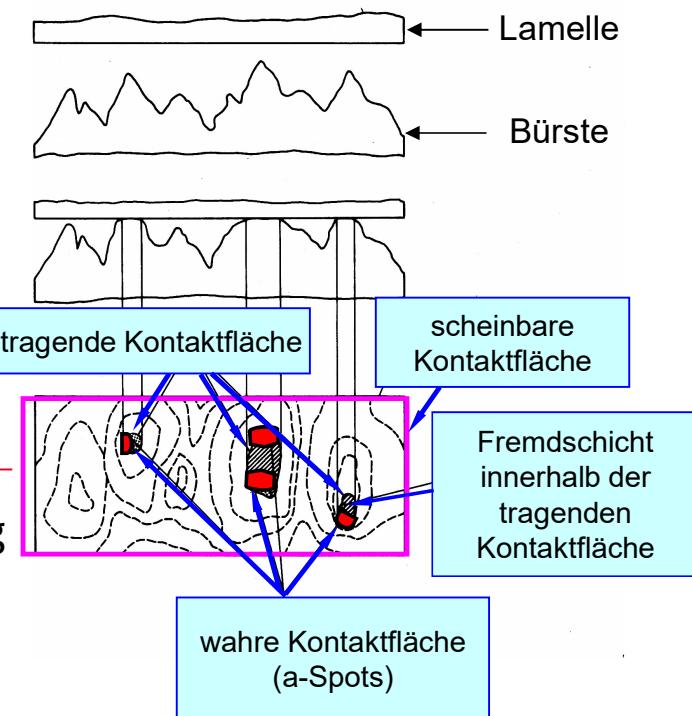
- Patina

Spannungsabfall am Kontakt:

$$U = I \cdot R_{\text{spot}} + I \cdot R_{\text{patina}}$$

R_{spot} und R_{patina} abhängig vom Strom
(nichtlinear)

Wicklung hat hohe Induktivität → HF-Spannungsschwingungen



2 EMV-Design

→ Mechanische Kommutierung (Bürstenfeuer)

► Allgemein

► 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik

2.1.1 Störquellen:
Klassifikation

2.1.2 Störaussendung durch DC-Motoren

2.1.3 Störaussendung durch Halbleiterumschaltung

2.1.4 Weitere Störquellen

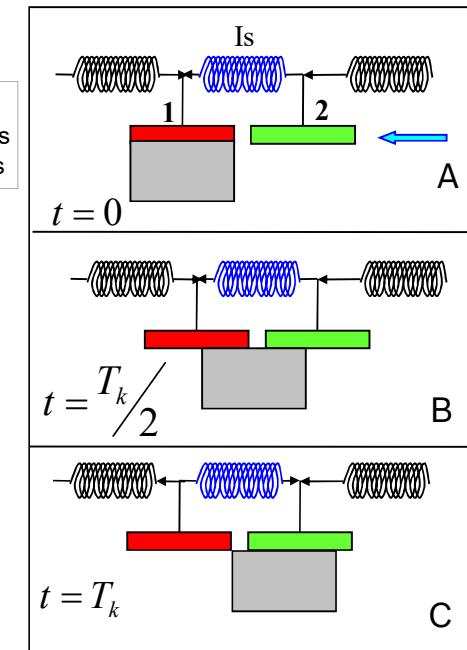
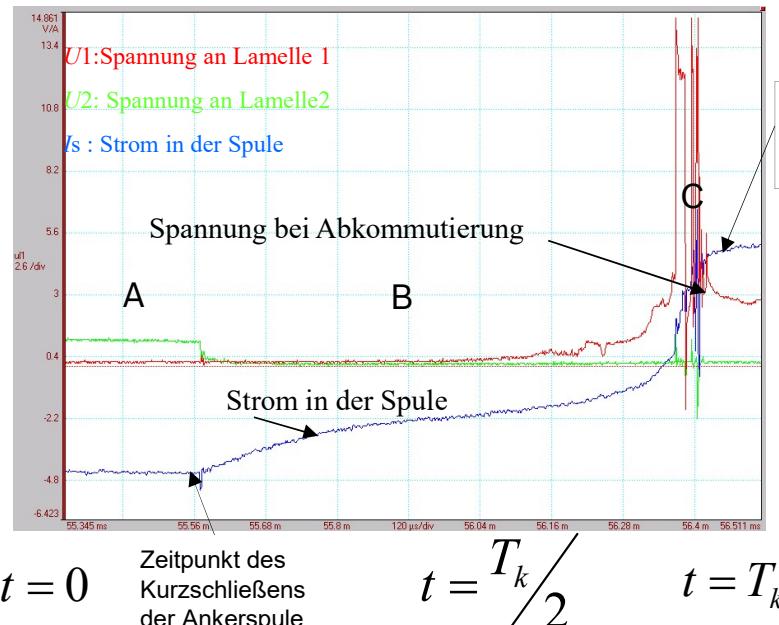
2.1.5 Störsenken

► 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik

► 2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte

► 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz

► 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“



- Schneller Stromabriß in der Wicklung (hohe Induktivität)
- Funkenbildung → HF-Schwingungen zwischen den Bürsten und den Lamellen

2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ **2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik**
 - 2.1.1 Störquellen:
Klassifikation
 - 2.1.2 Störaussendung durch DC-Motoren**
 - 2.1.3 Störaussendung durch Halbleiterumschaltung
 - 2.1.4 Weitere Störquellen
 - 2.1.5 Störsenken
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ 2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

→ DC-Motor mit Bürsten: Zusammenfassung (Erfahrung bei Bosch AE/EMC)

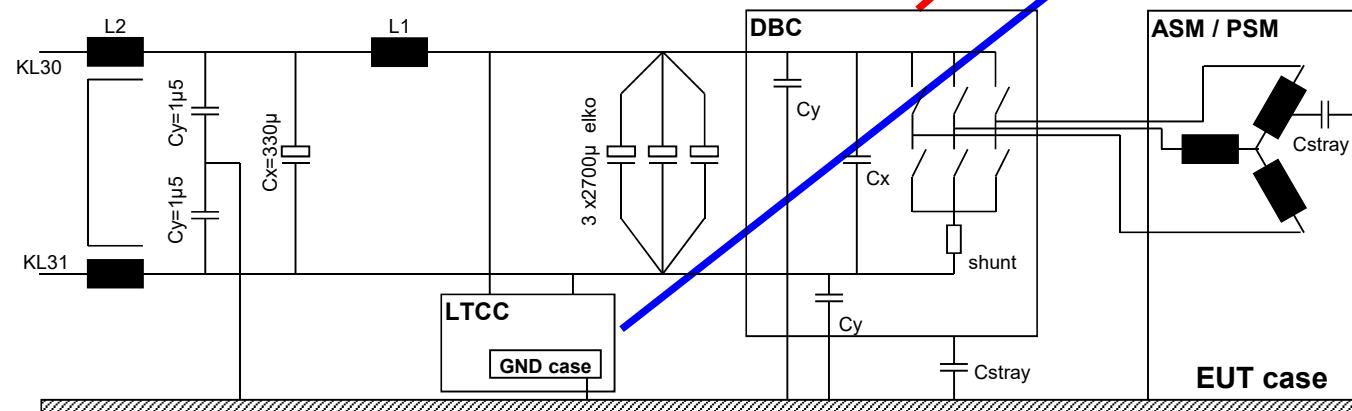
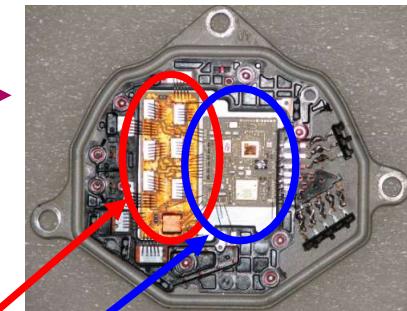
- Frittung als wirksame Störungsursache: nur im LW- und MW-Bereich
- Mechanische Kontaktschwankungen: geringe Störaussendung
- Kommutierung (Bürstenfeuer): Hauptursache im gesamten Frequenzbereich
- Bürstenmaterial und Abrieb teilweise starker Einfluss

2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ **2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik**
 - 2.1.1 Störquellen:
Klassifikation
 - 2.1.2 Störaussendung durch DC-Motoren**
 - 2.1.3 Störaussendung durch Halbleiterumschaltung
 - 2.1.4 Weitere Störquellen
 - 2.1.5 Störsenken
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ 2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

→ Elektronisch kommutierte DC-Motoren

- Mechanische Kommutierung fehlt
- Umwandlung: DC-Bordnetzspannung → 3-Phasenwechselspannung
- Im Endeffekt: Asynchronmaschine
- **Beispiel: Elektrische Servolenkung**

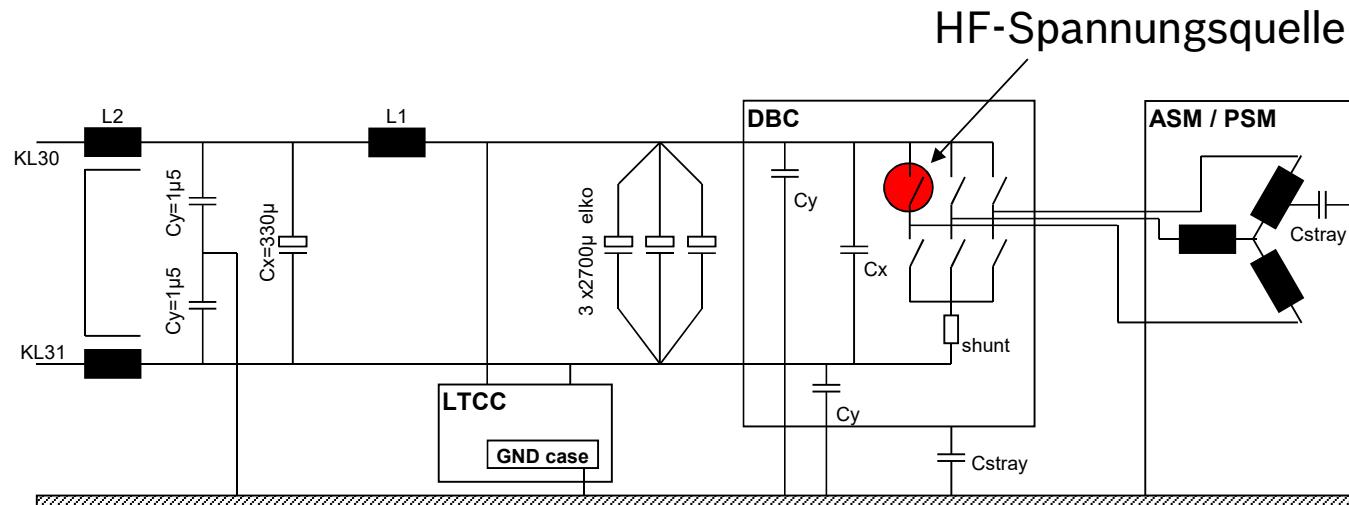


2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ **2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik**
 - 2.1.1 Störquellen:
Klassifikation
 - 2.1.2 Störaussendung durch DC-Motoren
 - 2.1.3 Störaussendung durch Halbleiterumschaltung
 - 2.1.4 Weitere Störquellen
 - 2.1.5 Störsenken
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ 2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

→ Elektronisch kommutierende DC-Motoren als Störquellen

- Umschaltvorgänge von Halbleitern
- HF-Schwingungen durch den Schaltvorgang in den HL-Schaltern (siehe Absatz 2.1.3)
- Leitungs- und feldgebundene Störungen



2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ **2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik**
 - 2.1.1 Störquellen:
Klassifikation
 - 2.1.2 Störaussendung
durch DC-Motoren
 - 2.1.3 Störaussendung durch
Halbleiterumschaltung
 - 2.1.4 Weitere Störquellen
 - 2.1.5 Störsenken
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ 2.3 Überblick: EMV-relevante
parasitäre Effekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe
Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am
Produktbeispiel
„Elektrische Servolenkung“

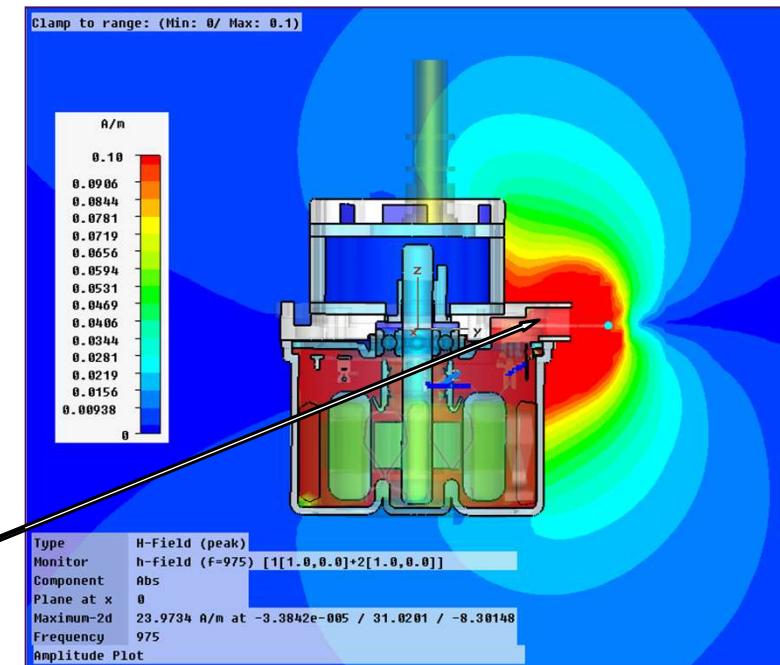
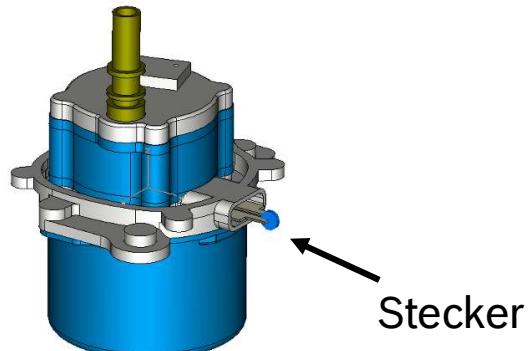
→ DC-Motoren: feldgebundene Störungen (Direktabstrahlung)

- Sehr starke EM-Felder
- Motorgehäuse wirkt als Schirm
- Direktabstrahlung durch Öffnungen

H-Feld Simulation

Beispiel:

Elektrische Vakuumpumpe



2 EMV-Design

► Allgemein

► 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik

2.1.1 Störquellen:
Klassifikation

2.1.2 Störaussendung
durch DC-Motoren

2.1.3 Störaussendung durch Halbleiterumschaltung

2.1.4 Weitere Störquellen
2.1.5 Störsenken

► 2.2 Störpfade in Kfz-Technik

► 2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte

► 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz

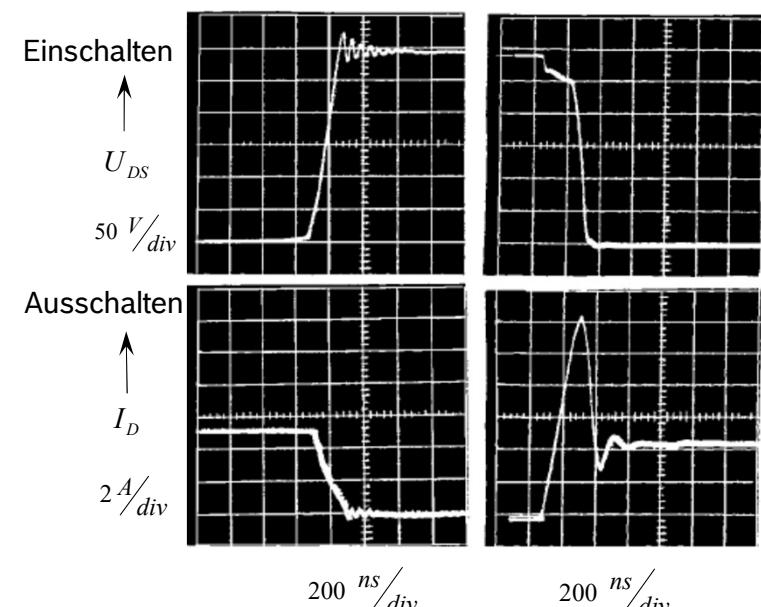
► 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

→ Störaussendung durch Halbleiterumschaltung

- Leistungs-MOSFET
- Leistungs-IGBT
- DBC-Module

- ➔ Parasitäre Kapazitäten
- ➔ Parasitäre Induktivitäten (Stanzgitter, Layout, Motorwicklungen)
- ➔ Umschaltung → sprunghafte Spannungsänderungen an parasitären Kapazitäten
- ➔ Ausgleichsvorgang → HF-Schwingungen

Umschaltvorgang eines MOSFETs



Quelle: [Schröder, 2006]

2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ **2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik**
 - 2.1.1 Störquellen:
Klassifikation
 - 2.1.2 Störaussendung
durch DC-Motoren
 - 2.1.3 Störaussendung durch
Halbleiterumschaltung
 - 2.1.4 Weitere Störquellen**
 - 2.1.5 Störsenken
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ 2.3 Überblick: EMV-relevante
parasitäre Effekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe
Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am
Produktbeispiel
„Elektrische Servolenkung“

→ Weitere Störquellen

- Zündkerzen (Funkenentstehung)
- Starter
- Relais
- Steuergeräte
- ASICs (üblicherweise vernachlässigbar)
- Adaptive cruise control (ACC), Radarsensoren
- Mobilfunkgeräte
- Multimediasysteme
- ...

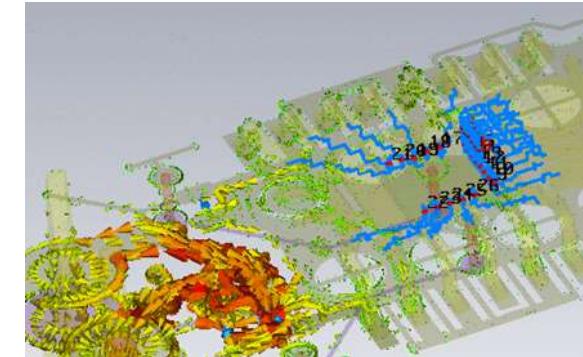


2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ **2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik**
 - 2.1.1 Störquellen:
Klassifikation
 - 2.1.2 Störaussendung
durch DC-Motoren
 - 2.1.3 Störaussendung durch
Halbleiterumschaltung
 - 2.1.4 Weitere Störquellen
 - 2.1.5 Störsenken**
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ 2.3 Überblick: EMV-relevante
parasitäre Effekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe
Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am
Produktbeispiel
„Elektrische Servolenkung“

Störempfindliche Systeme

- Funkempfänger
- Car Multimedia
- Steuersysteme
- Sensorsysteme



Störempfindliche Module

- Logische Schaltungen
- Treiberschaltungen
- Sensoren

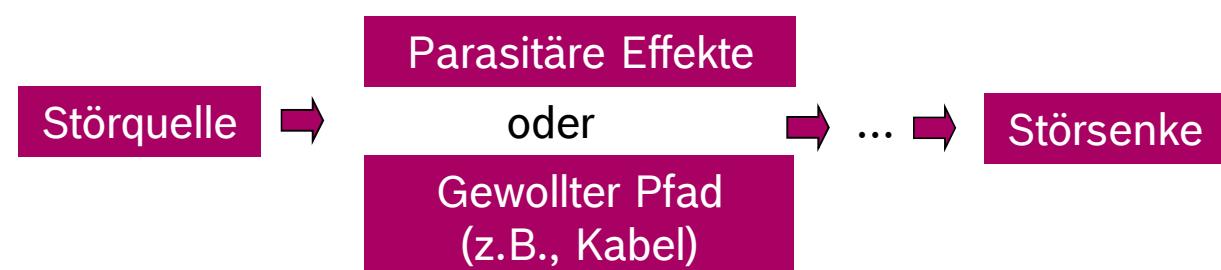
Störempfindliche Bauelemente

- ASICs
- Sensorelemente
- ICs mit höheren Impedanzen

2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ **2.2 Störpfade in der Kfz-Technik**
- ▶ 2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

- Gesamter Störpfad ist komplex: Kombination vieler Kopplungsmechanismen und parasitärer Effekte
- Meist mehrere parasitäre Effekte wirksam
- Zwecks Vereinfachung und Verständnis: Zerlegung in mehrere möglichst unabhängige Teilstörpfade
- Es gibt keine allgemeingültige Theorie, die beliebige Störpfade beschreibt.
- Für jeden neuen Anwendungsfall wird eine eigene Störpfadanalyse benötigt.



2 EMV-Design

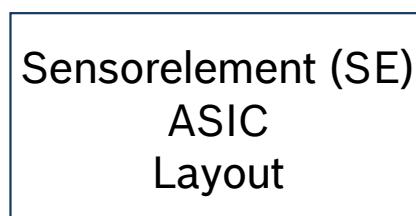
→ Beispiel: Koppelpfad durch einen Resonanzeffekt im Drucksensor

Boschprodukt: Drucksensor

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ **2.2 Störpfade in der Kfz-Technik**
- ▶ 2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“



Sensor



Problembeschreibung

Störquelle:
HF-Stromführender Leiter
im Kabelbaum

Induzierte Spannungen



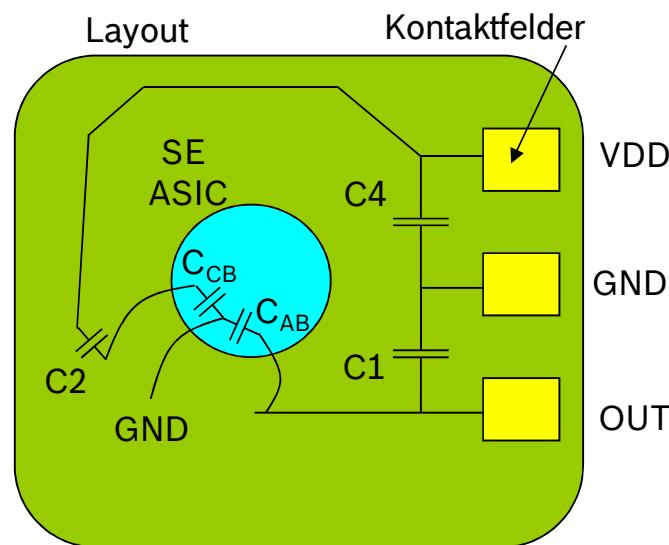
zum
Steuergerät

Gleichaktstrom

2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ **2.2 Störpfade in der Kfz-Technik**
- ▶ 2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

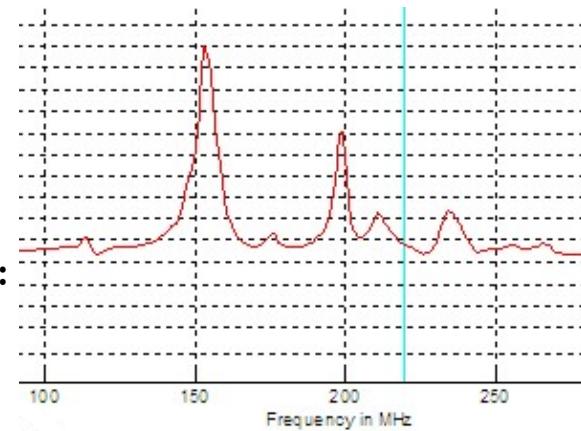
→ Schutzmaßnahmen



Messergebnis EMV-Test:
Spannung Drucksignal
Frage:
Was passiert?!?

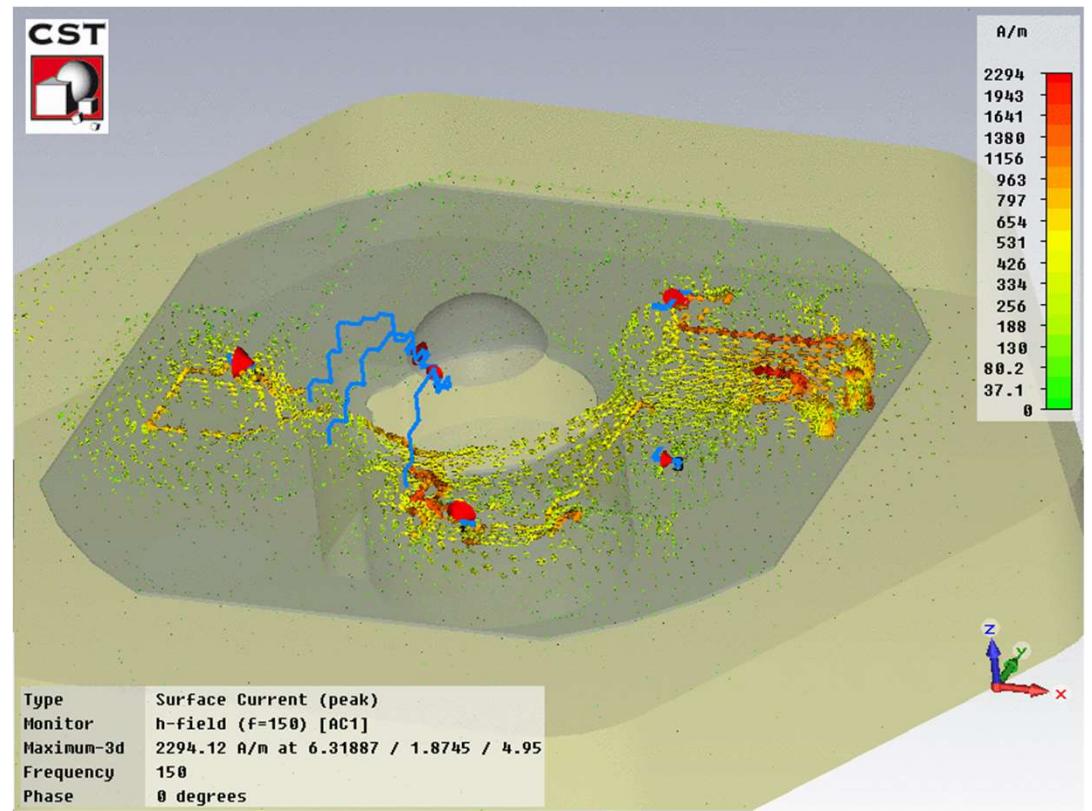
Schutzkondensatoren mit ca. 20 nF zwischen den Kontaktfeldern auf der Leiterplatte:
Symmetrische Last bei HF
→ Wir erwarten den Ausgleich des Gleichtaktstromes

Realität:
Ausfälle bei 150 MHz und 200 MHz



2 EMV-Design

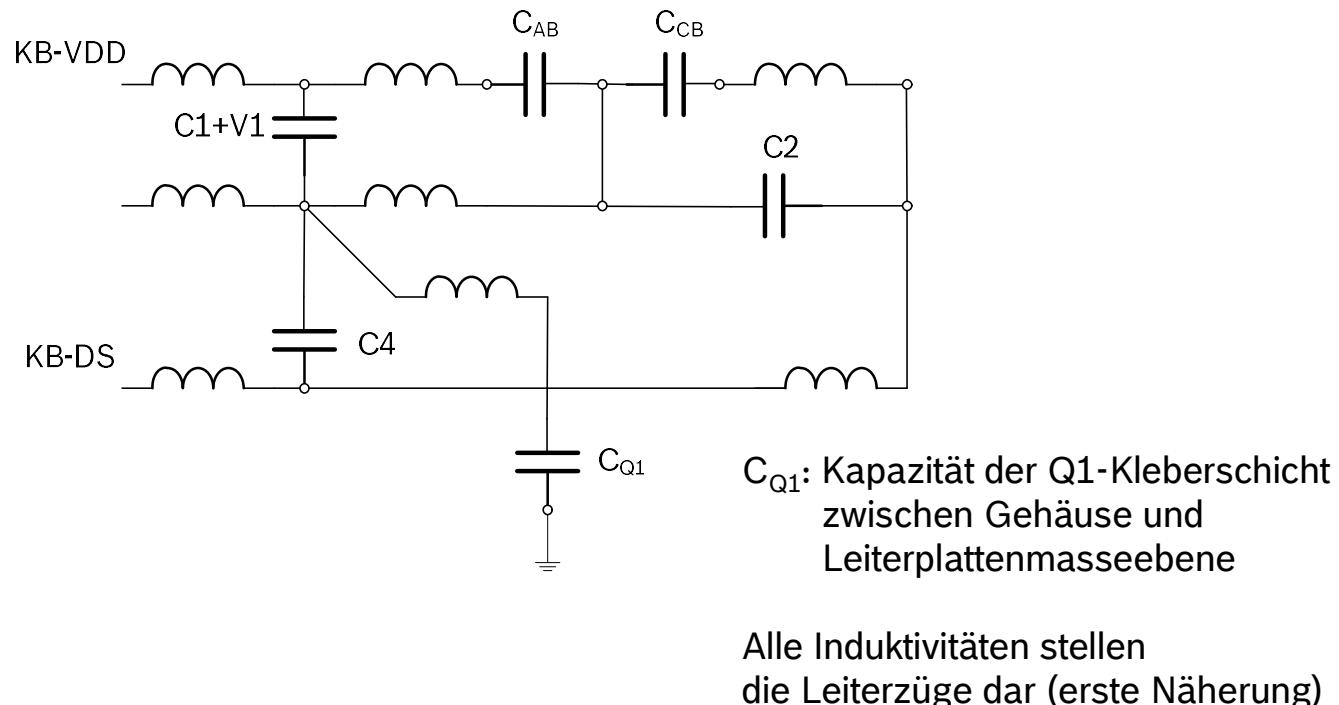
- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ **2.2 Störpfade in der Kfz-Technik**
- ▶ 2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“



2 EMV-Design

→ Relevante parasitäre Effekte:
Darstellung mittels einer
Ersatzschaltung

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ **2.2 Störpfade in der Kfz-Technik**
- ▶ 2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

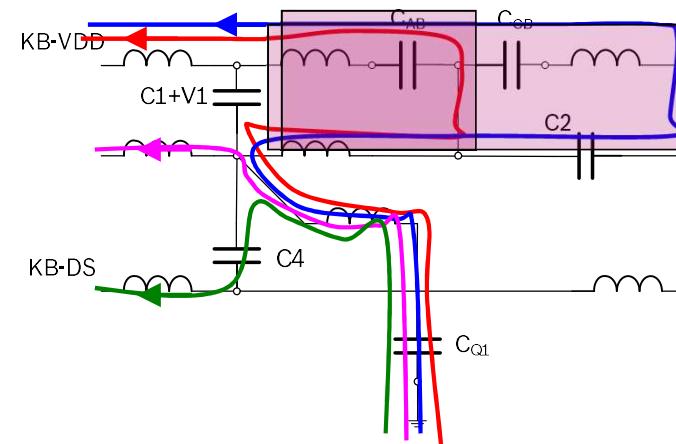


2 EMV-Design

→ Störpfad bei 150 MHz in der Ersatzschaltung

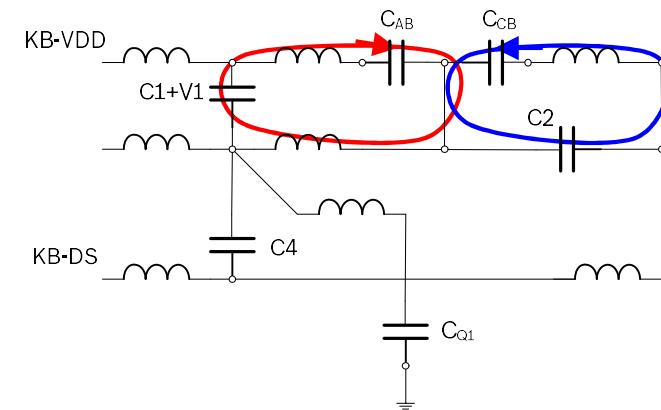
- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ **2.2 Störpfade in der Kfz-Technik**
- ▶ 2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

Strompfade bei Phasenwinkel 0°



Der Störstrom lädt die PIN-Kapazitäten auf

Strompfade bei Phasenwinkel ca. 90°



Entladung der PIN-Kapazitäten durch C_1 und C_2 , da C_1 und $C_2 \gg C_{AB}$ und C_{CB}

2 EMV-Design

→ Mechanismus der Störung bei 150 MHz

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ **2.2 Störpfade in der Kfz-Technik**
- ▶ 2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

- Relevante parasitäre Effekte:
 - parasitäre Induktivitäten der Leiterzüge und Bonds (ca. 10 nH)
 - parasitäre Kapazität zwischen ASIC PINs (ca. 150 pF)
 - Streukapazität der Leiterplattenmasse gegen das Gehäuse
- Erklärung:
 - Bei 150 MHz bilden die parasitären Induktivitäten und die ASIC-Kapazität einen Reihenresonanzkreis, der den Entstörkondensator kurzschließt!
 - Bei der Gleichtaktstromanregung (Phase 0°) wird der ASIC aufgeladen
 - Bei Abwesenheit der Anregung (Phase 90°) wird sich der ASIC durch die Entstörkondensatoren entladen
 - Fazit: die Versorgungsspannung vom ASIC driftet → Abweichung vom Drucksignal

2 EMV-Design

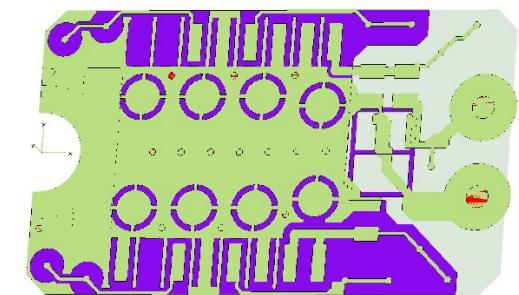
- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ **2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte**
 - 2.3.1 AVT: HF-Verhalten**
 - 2.3.2 Verbindungsstrukturen: Kopplungsmechanismen
 - 2.3.3 Kabelbäume und Leiterplatten: Übersprechen
 - 2.3.4 Verbindungsstrukturen: Verlustmechanismen
 - 2.3.5 Gleich- und Gegentaktströme
 - 2.3.6 Reale Masse
 - 2.3.7 Ab- und Einstrahlmechanismen
 - 2.3.8 Gehäuse und Karosserie: Hohlraumresonanzen
 - 2.3.9 Weitere Resonanzeffekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

AVT: HF-Verhalten

- ▶ AVT oder Verbindungsstrukturen: Verhalten
 - Prinzipielle Schaltung: immer Kurzschlussmodell (idealer Kurzschluss)

Betrachtung von unterschiedlichen Modellen in Bezug zur EMV – Analyse:

- ideale Leiter
- parasitäre Widerstände, Induktivitäten und Kapazitäten
- Leitungen
- Strahler (Antennen)



- ▶ Welche Darstellung ist richtig?
- ▶ Alle Darstellungen sind korrekt in der geeigneten Aufgabestellung (entscheidend: Grenzfrequenz, Größe, Geometrie)

2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ **2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte**
 - 2.3.1 AVT: HF-Verhalten
 - 2.3.2 Verbindungsstrukturen: Kopplungsmechanismen
 - 2.3.3 Kabelbäume und Leiterplatten: Übersprechen
 - 2.3.4 Verbindungsstrukturen: Verlustmechanismen
 - 2.3.5 Gleich- und Gegentaktströme
 - 2.3.6 Reale Masse
 - 2.3.7 Ab- und Einstrahlmechanismen
 - 2.3.8 Gehäuse und Karosserie: Hohlraumresonanzen
 - 2.3.9 Weitere Resonanzeffekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

Definitionen: Grenzfrequenz und minimale Wellenlänge

Das Frequenzspektrum (von funktionalen Signalen und Störsignalen) ist immer begrenzt; Ursachen:

- steigende Verluste bei höheren Frequenzen
- keine Signalquellen mit unendlichem Frequenzspektrum
- finite Umschaltzeit bei allen elektronischen Elementen
- ▶ Es kann für **alle Probleme** in der EMV-Analyse eine **maximale Grenzfrequenz** (Bezeichnung f_m) definiert werden.
- ▶ Bei der EMV-Analyse betrachtet man nur den relevanten Frequenzbereich von DC bis zu f_m
→ Nur Betrachtung der in diesem Frequenzbereich relevanten Effekte
- ▶ Minimale Wellenlänge entspricht der Grenzfrequenz:
$$\lambda_m = \frac{v}{f_m}$$
 v : Lichtgeschwindigkeit im Medium
- ▶ Bedeutung: die Oberwelle mit der kleinsten Wellenlänge im relevanten Frequenzspektrum

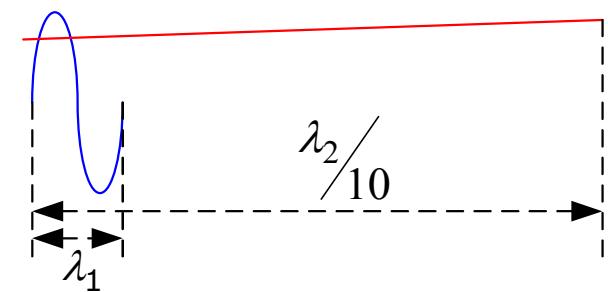
2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ **2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte**
 - 2.3.1 AVT: HF-Verhalten
 - 2.3.2 Verbindungsstrukturen: Kopplungsmechanismen
 - 2.3.3 Kabelbäume und Leiterplatten: Übersprechen
 - 2.3.4 Verbindungsstrukturen: Verlustmechanismen
 - 2.3.5 Gleich- und Gegentaktströme
 - 2.3.6 Reale Masse
 - 2.3.7 Ab- und Einstrahlmechanismen
 - 2.3.8 Gehäuse und Karosserie: Hohlraumresonanzen
 - 2.3.9 Weitere Resonanzeffekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

Elektrisch kleine - elektrisch große Dimensionen

- ▶ Die Dimensionen einer Verbindungsstruktur kann nur in Bezug zu der Grenzfrequenz (minimale Wellenlänge) als groß oder klein betrachtet werden
- ▶ Z.B., Leitungslänge:

- ▶ 1. sei $\lambda_m = \lambda_1 \rightarrow \lambda_m \ll L \rightarrow$ elektrisch lange Leitung
- ▶ 2. sei $\lambda_m = \lambda_2 \rightarrow \lambda_m \gg L \rightarrow$ elektrisch kurze Leitung



Sind die Leiterzüge elektrisch lang?



2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ **2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte**
 - 2.3.1 AVT: HF-Verhalten**
 - 2.3.2 Verbindungsstrukturen: Kopplungsmechanismen
 - 2.3.3 Kabelbäume und Leiterplatten: Übersprechen
 - 2.3.4 Verbindungsstrukturen: Verlustmechanismen
 - 2.3.5 Gleich- und Gegentaktströme
 - 2.3.6 Reale Masse
 - 2.3.7 Ab- und Einstrahlmechanismen
 - 2.3.8 Gehäuse und Karosserie: Hohlraumresonanzen
 - 2.3.9 Weitere Resonanzeffekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

Modelle für die AVT

→ Betrachtung als ideal leitende Verbindung

(Eng.: perfect electric conductor, PEC)

- nur elektrisch kurze Leiter
- Verluste und galvanische Kopplungen sind vernachlässigbar
- Anwendung hauptsächlich bei niedrigen Frequenzen
- ist ungenau für die Verbindungsstrukturen, die die Leistungsströme führen; Beispiel: Leiterzug einer LF-Signalleiterplatte

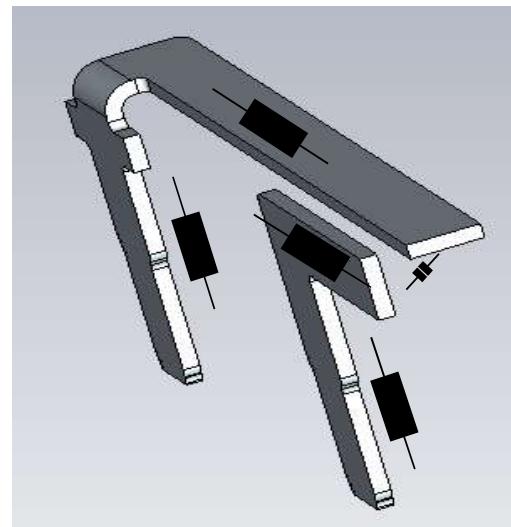
→ Betrachtung mit parasitären Widerständen, Induktivitäten und Kapazitäten

- nur elektrisch kurze Leiter
- nur ohmsche Verluste werden betrachtet
- ideale (verlustlose) Induktivitäten und Kapazitäten
- gilt hauptsächlich bei niedrigen Frequenzen
- gilt für die Verbindungsstrukturen, die die Leistungsströme führen
- gilt für Strukturen mit komplexer Geometrie (z.B. Stanzgitter, Kühlkörper)

2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ **2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte**
 - 2.3.1 AVT: HF-Verhalten
 - 2.3.2 Verbindungsstrukturen: Kopplungsmechanismen
 - 2.3.3 Kabelbäume und Leiterplatten: Übersprechen
 - 2.3.4 Verbindungsstrukturen: Verlustmechanismen
 - 2.3.5 Gleich- und Gegentaktströme
 - 2.3.6 Reale Masse
 - 2.3.7 Ab- und Einstrahlmechanismen
 - 2.3.8 Gehäuse und Karosserie: Hohlraumresonanzen
 - 2.3.9 Weitere Resonanzeffekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

- Parasitäre Widerstände, Induktivitäten und Kapazitäten
 - Sehr nützlich in der praktischen EMV-Analyse
 - Erste Approximation für die elektrischen und magnetischen Beeinflussungen in der AVT → Zeigen die Haupteffekte
 - Erzeugung der RLC-Modelle kann die 3D-Simulation heranziehen
- Beispiel: Stanzgitterelemente



üblich: Modellierung als RL-Modell

2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
 - ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
 - ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
 - ▶ **2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte**
 - 2.3.1 AVT: HF-Verhalten
 - 2.3.2 Verbindungsstrukturen: Kopplungsmechanismen
 - 2.3.3 Kabelbäume und Leiterplatten: Übersprechen
 - 2.3.4 Verbindungsstrukturen: Verlustmechanismen
 - 2.3.5 Gleich- und Gegentaktströme
 - 2.3.6 Reale Masse
 - 2.3.7 Ab- und Einstrahlmechanismen
 - 2.3.8 Gehäuse und Karosserie: Hohlraumresonanzen
 - 2.3.9 Weitere Resonanzeffekte
 - ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
 - ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“
- Faustregeln bei der Erstellung von RLC-Modellen
- Wirkwiderstand ist nicht vernachlässigbar (Abschätzung DC-Widerstand)
 - dünner Leiter, Skin- und Proximity-Effekte, Leitfähigkeit ist gering
 - Eigeninduktivität (Abschätzung: 1 mm → 1 nH)
 - dünner und langer Leiter (z.B. Bonds, Leiterzüge).
Warum? $L \propto 1/\text{Querschnittsfläche}$, $L \propto \text{Länge}$
 - Gegeninduktivität
 - dünne und lange Leiterpaare
 - spitze Winkel ($M \propto \text{Kosinus des Winkels zwischen den Strömen}$)
 - kleine Abstände
 - Kapazitäten (Abschätzung: Platten-Kondensator)
 - Verbindungsstrukturen mit großen Flächen (Gehäuse, Kühlkörper)
Warum? $C \propto \text{Leiterfläche}$
 - kleine Abstände
- Allgemeiner Ansatz: siehe Kapitel 5, PEEC Methode

2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ **2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte**
 - 2.3.1 AVT: HF-Verhalten**
 - 2.3.2 Verbindungsstrukturen: Kopplungsmechanismen
 - 2.3.3 Kabelbäume und Leiterplatten: Übersprechen
 - 2.3.4 Verbindungsstrukturen: Verlustmechanismen
 - 2.3.5 Gleich- und Gegentaktströme
 - 2.3.6 Reale Masse
 - 2.3.7 Ab- und Einstrahlmechanismen
 - 2.3.8 Gehäuse und Karosserie: Hohlraumresonanzen
 - 2.3.9 Weitere Resonanzeffekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

► Betrachtung als Leitungen

- AVT-Elemente elektrisch lang bezüglich einer Dimension
- Betrachtung: nur TEM-Moden oder Quasi-TEM-Moden
Stromsumme im Leitungsquerschnitt ist Null
→ kein Antennen-Mode-Strom
- Beispiele:
Kabelbäume, Zuleitungen, verdrillte Leitungen, Leiterzüge,
manchmal Stanzgitterelemente



- **Einschränkungen**
 - Ab- und Einstrahlung sind nicht berücksichtigt
 - nur gültig für leitungsähnliche Strukturen



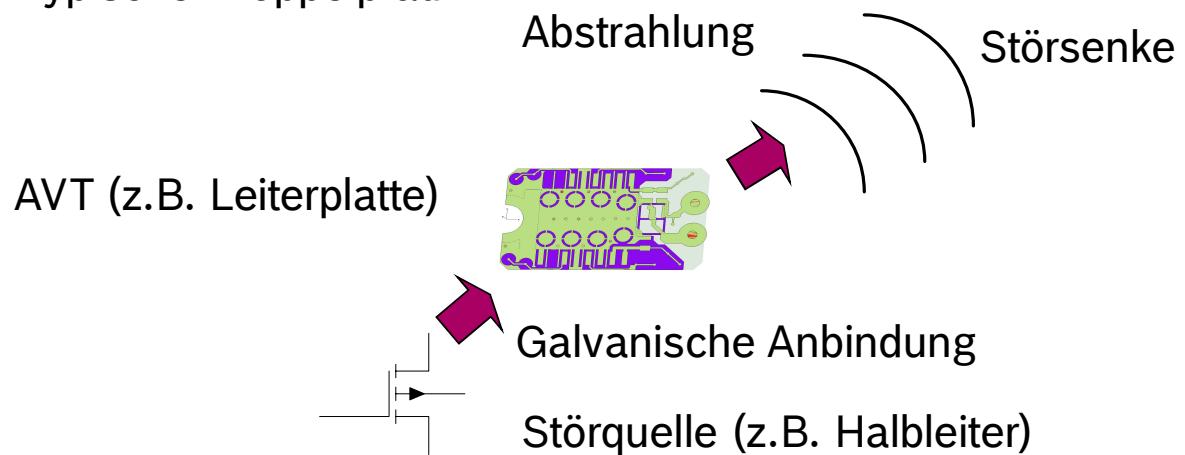
2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störfade in der Kfz-Technik
- ▶ **2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte**
 - 2.3.1 AVT: HF-Verhalten
 - 2.3.2 Verbindungsstrukturen: Kopplungsmechanismen
 - 2.3.3 Kabelbäume und Leiterplatten: Übersprechen
 - 2.3.4 Verbindungsstrukturen: Verlustmechanismen
 - 2.3.5 Gleich- und Gegentaktströme
 - 2.3.6 Reale Masse
 - 2.3.7 Ab- und Einstrahlmechanismen
 - 2.3.8 Gehäuse und Karosserie: Hohlraumresonanzen
 - 2.3.9 Weitere Resonanzeffekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

► Betrachtung als Antennenstruktur ungewollter Strahler (Antennen)

- Elektrisch große Strukturen
- Elektrisch kleine Strukturen: bei sehr hohen Strömen, sehr empfindlichen Störsenken oder kleinen Abständen
- Viele Verbindungsstrukturen wirken als unbeabsichtigte Antennen im höheren Frequenzbereich

Typischer Koppelpfad:

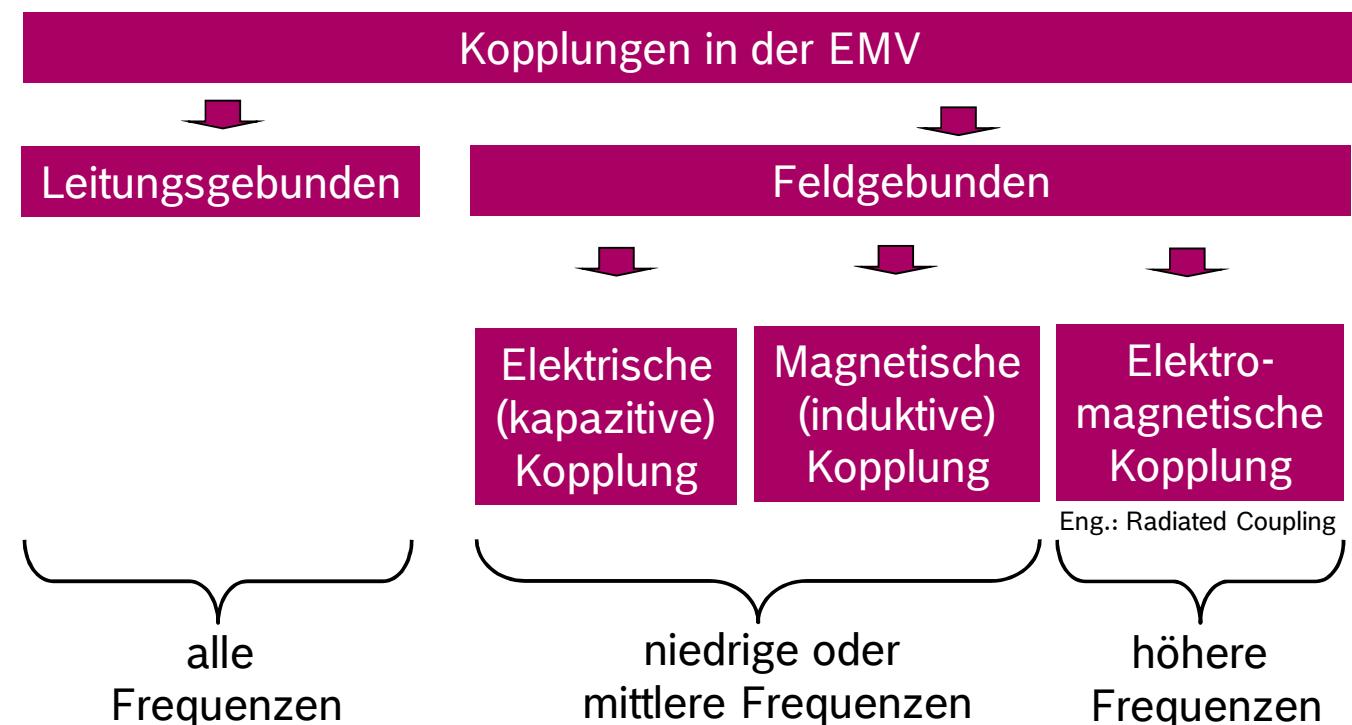


2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ **2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte**
 - 2.3.1 AVT: HF-Verhalten
 - 2.3.2 Verbindungsstrukturen: Kopplungsmechanismen**
 - 2.3.3 Kabelbäume und Leiterplatten: Übersprechen
 - 2.3.4 Verbindungsstrukturen: Verlustmechanismen
 - 2.3.5 Gleich- und Gegentaktströme
 - 2.3.6 Reale Masse
 - 2.3.7 Ab- und Einstrahlmechanismen
 - 2.3.8 Gehäuse und Karosserie: Hohlraumresonanzen
 - 2.3.9 Weitere Resonanzeffekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

Verbindungsstrukturen: Kopplungsmechanismen

→ Allgemeine Klassifikation



2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ **2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte**
 - 2.3.1 AVT: HF-Verhalten
 - 2.3.2 Verbindungsstrukturen: Kopplungsmechanismen**
 - 2.3.3 Kabelbäume und Leiterplatten: Übersprechen
 - 2.3.4 Verbindungsstrukturen: Verlustmechanismen
 - 2.3.5 Gleich- und Gegentaktströme
 - 2.3.6 Reale Masse
 - 2.3.7 Ab- und Einstrahlmechanismen
 - 2.3.8 Gehäuse und Karosserie: Hohlraumresonanzen
 - 2.3.9 Weitere Resonanzeffekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

→ Kapazitive Kopplungen

Beispiel: Anordnung aus n isolierten Leitern

- Es gilt (siehe Grundl. Elektrotechnik)

$$\bar{\varphi} = \mathbf{P} \bar{q}$$

φ, q : Potentiale und Ladungen der Körper

\mathbf{P} : Potentialkoeffizientenmatrix

Die Potentialkoeffizienten im Vakuum:

$$p_{mk} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 A'_k A_m} \int \int_{A_m A'_k} \frac{dA dA'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}$$

mit

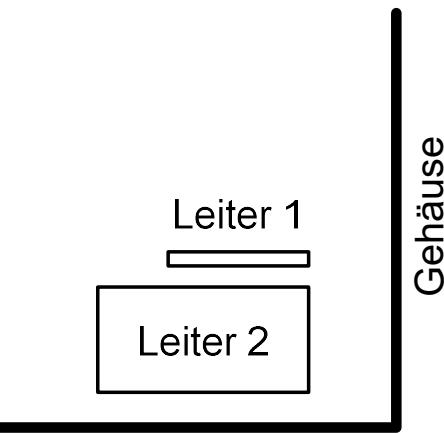
A_k : Oberfläche des Leiters k

A_m : Oberfläche des Leiters m

Allgemein: numerisch

- $\mathbf{K} = \mathbf{P}^{-1}$: Matrix mit Kapazitätskoeffizienten
- **partielle Kapazitäten**: beschreiben die Kopplungen durch das elektrische Feld

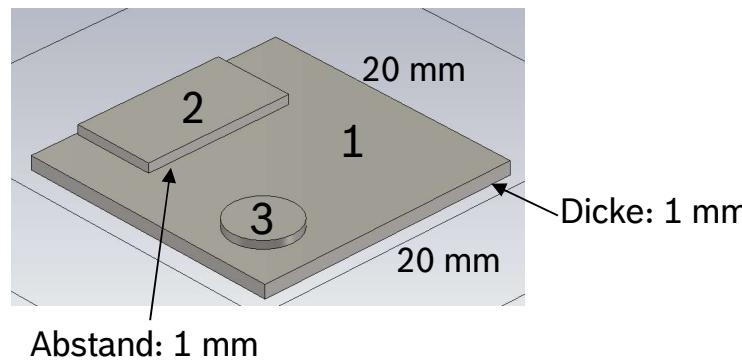
$$C_{ij} = \begin{cases} \sum_{k=1}^n K_{ik}, & i = j \\ -K_{ij}, & i \neq j \end{cases}, \quad i, j = 1, n$$



2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ **2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte**
 - 2.3.1 AVT: HF-Verhalten
 - 2.3.2 Verbindungsstrukturen: Kopplungsmechanismen**
 - 2.3.3 Kabelbäume und Leiterplatten: Übersprechen
 - 2.3.4 Verbindungsstrukturen: Verlustmechanismen
 - 2.3.5 Gleich- und Gegentaktströme
 - 2.3.6 Reale Masse
 - 2.3.7 Ab- und Einstrahlmechanismen
 - 2.3.8 Gehäuse und Karosserie: Hohlraumresonanzen
 - 2.3.9 Weitere Resonanzeffekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

→ Beispiel: Kapazitive Kopplungen in Luft



- Konsequenzen
 - Kapazitäten im pF-Bereich
 - Höchste Kopplungen
 - $C_{12} = 1,21 \text{ pF}$
 - $C_{13} = 0,414 \text{ pF}$

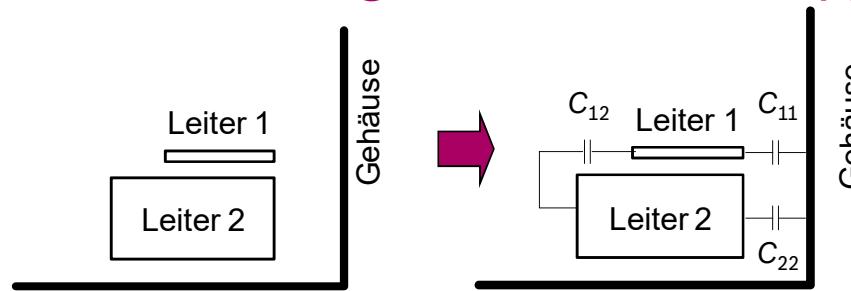
Kapazitätskoeffizienten (FEM-Lösung)

	2	3	1	
2		$1.215582\text{e-}012 \text{ F}$	$-8.661417\text{e-}015 \text{ F}$	$-1.206920\text{e-}012 \text{ F}$
3		$-8.661417\text{e-}015 \text{ F}$	$4.230941\text{e-}013 \text{ F}$	$-4.144327\text{e-}013 \text{ F}$
1		$-1.206920\text{e-}012 \text{ F}$	$-4.144327\text{e-}013 \text{ F}$	$1.621353\text{e-}012 \text{ F}$

2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ **2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte**
 - 2.3.1 AVT: HF-Verhalten
 - 2.3.2 Verbindungsstrukturen: Kopplungsmechanismen**
 - 2.3.3 Kabelbäume und Leiterplatten: Übersprechen
 - 2.3.4 Verbindungsstrukturen: Verlustmechanismen
 - 2.3.5 Gleich- und Gegentaktströme
 - 2.3.6 Reale Masse
 - 2.3.7 Ab- und Einstrahlmechanismen
 - 2.3.8 Gehäuse und Karosserie: Hohlraumresonanzen
 - 2.3.9 Weitere Resonanzeffekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

→ Ersatzschaltung für elektrische Kopplungen



Verschiebungströme zwischen den Leitern

→ Allgemeine Verhältnisse zwischen der Geometrie und partiellen Kapazitäten

$$C \propto P^{-1} \leftarrow p_{mk} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 A'_k A_m} \int \int_{A_m A'_k} \frac{dA dA'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}$$

Kapazitive Kopplungen sind

- Proportional zu den Oberflächen des Leiters
- Umgekehrt proportional zum Abstand zwischen den Leitern
- Proportional zur Permittivität des Dielektrikums
(nicht aus Freiraumformel erkennbar)

2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ **2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte**
 - 2.3.1 AVT: HF-Verhalten
 - 2.3.2 **Verbindungsstrukturen: Kopplungsmechanismen**
 - 2.3.3 Kabelräume und Leiterplatten: Übersprechen
 - 2.3.4 Verbindungsstrukturen: Verlustmechanismen
 - 2.3.5 Gleich- und Gegentaktströme
 - 2.3.6 Reale Masse
 - 2.3.7 Ab- und Einstrahlmechanismen
 - 2.3.8 Gehäuse und Karosserie: Hohlraumresonanzen
 - 2.3.9 Weitere Resonanzeffekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

→ Induktive Kopplungen

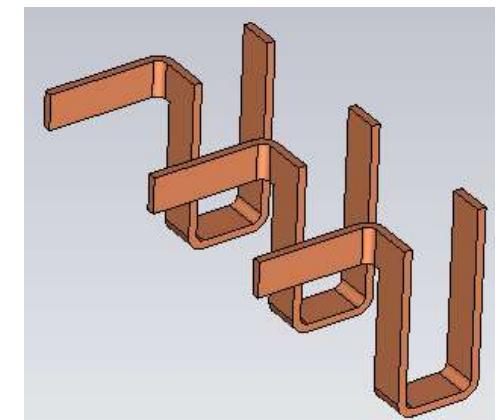
Beispiel: Anordnung aus n stromführenden Leitern

- Es gilt (siehe Grundl. Elektrotechnik)

$$\bar{u} = \mathbf{L} \frac{d}{dt} \bar{i}(t)$$

- $\bar{u}, \bar{i}(t)$: Vektoren mit den Strömen und induzierten Spannungen in den Leitern
- \mathbf{L} : Matrix mit **partiellen Induktivitäten**
- **Allgemeine Formel im Freiraum für gerade Leiter:**

$$L_{mk} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \int \frac{dV dV'}{|r - r'|} \cos \phi_{km}$$



Eigeninduktivitäten und Gegeninduktivitäten bei kleinen Abständen zwischen Leitern

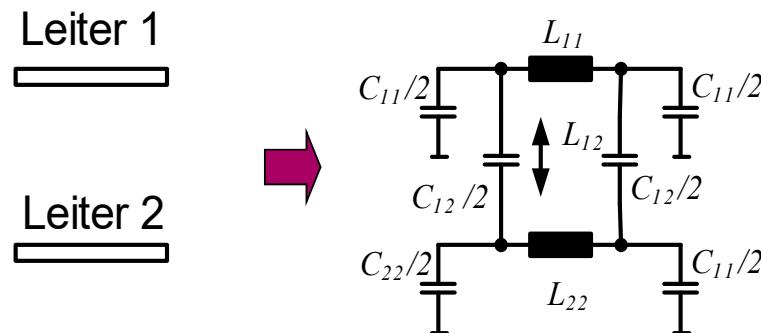
- Umgekehrt proportional zu der Querschnittsdimension des Leiters
- Proportional zu der Länge des Leiters
- Proportional zum Kosinus des Winkels zwischen den Strömen
- es gibt keine magnetische Kopplung zwischen senkrechten Leitern

2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ **2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte**
 - 2.3.1 AVT: HF-Verhalten
 - 2.3.2 **Verbindungsstrukturen: Kopplungsmechanismen**
 - 2.3.3 Kabelräume und Leiterplatten: Übersprechen
 - 2.3.4 Verbindungsstrukturen: Verlustmechanismen
 - 2.3.5 Gleich- und Gegentaktströme
 - 2.3.6 Reale Masse
 - 2.3.7 Ab- und Einstrahlmechanismen
 - 2.3.8 Gehäuse und Karosserie: Hohlraumresonanzen
 - 2.3.9 Weitere Resonanzeffekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

→ Feldgebundene Kopplung:

- Überlagerung der elektrischen und magnetischen Kopplungen
- Beispiel: zwei Verbindungsstrukturen



- Komplexe Struktur: große Anzahl der Kopplungen
- → Modellreduktion, unbedeutende Störpfade sind zu vernachlässigen

→ Wichtig

- Modell gilt nur für elektrisch kleine AVT
- Bei Leitungen → Übersprechen
- Bei höheren Frequenzen → „Radiated Coupling“

2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ **2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte**
 - 2.3.1 AVT: HF-Verhalten
 - 2.3.2 Verbindungsstrukturen: Kopplungsmechanismen
 - 2.3.3 Kabelbäume und Leiterplatten: Übersprechen**
 - 2.3.4 Verbindungsstrukturen: Verlustmechanismen
 - 2.3.5 Gleich- und Gegentaktströme
 - 2.3.6 Reale Masse
 - 2.3.7 Ab- und Einstrahlmechanismen
 - 2.3.8 Gehäuse und Karosserie: Hohlraumresonanzen
 - 2.3.9 Weitere Resonanzeffekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

Kabelbäume und Leiterplatten: Übersprechen

- ▶ Verbindungsstruktur ist elektrisch lang in einer Dimension
- ▶ nur TEM-Wellen → Kopplungen im Querschnitt der Leitung
- ▶ Kabelbäume, Leiterzüge auf den Leiterplatten
- ▶ mathematische Beschreibung: Leitungsgleichungen (siehe [Tesche 1997])

$$\frac{d}{dt} \mathbf{U}(x) + j\omega \mathbf{L}' \mathbf{I}(x) = 0$$

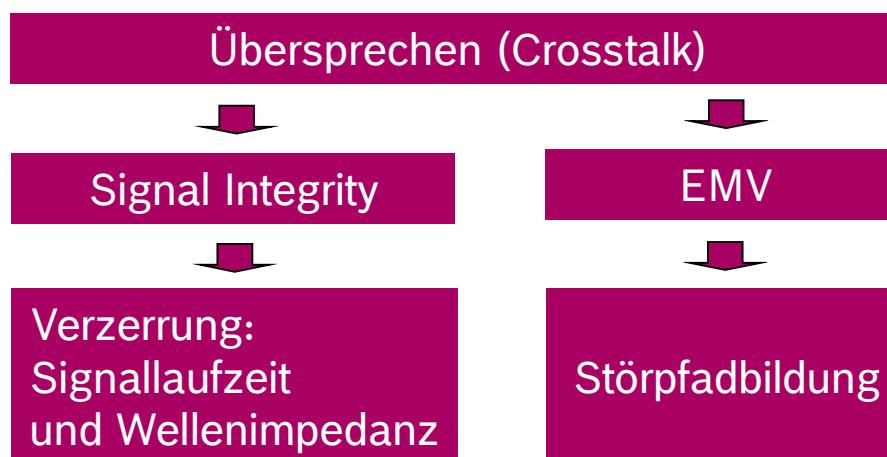
$$\frac{d}{dt} \mathbf{I}(x) + j\omega \mathbf{C}' \mathbf{U}(x) = 0$$

- ▶ $\mathbf{I}(x)$, $\mathbf{U}(x)$: Vektoren mit den Strömen und Spannungen
- ▶ \mathbf{L}' , \mathbf{C}' : Matrizen der längenbezogenen Induktivitäten und Kapazitäten
- ▶ längsbezogene Induktivitäten beschreiben die magnetischen Kopplungen
- ▶ längsbezogene Kapazitäten beschreiben die elektrischen Kopplungen
- ▶ ESB für die Kopplungen aus Kapitel 2.3.2 gilt für den Leitungsquerschnitt, wenn die partiellen Induktivitäten und Kapazitäten durch die längsbezogene Induktivitäten und Kapazitäten ersetzt werden

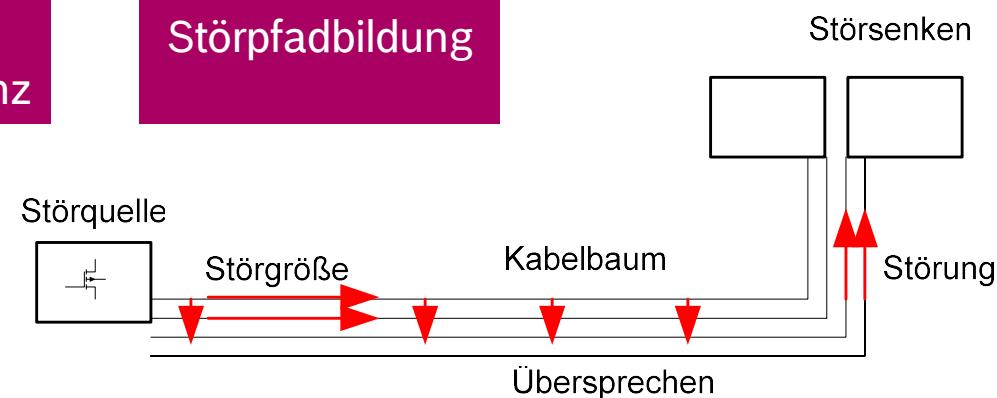
2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ **2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte**
 - 2.3.1 AVT: HF-Verhalten
 - 2.3.2 Verbindungsstrukturen: Kopplungsmechanismen
 - 2.3.3 Kabelbäume und Leiterplatten: Übersprechen**
 - 2.3.4 Verbindungsstrukturen: Verlustmechanismen
 - 2.3.5 Gleich- und Gegentaktströme
 - 2.3.6 Reale Masse
 - 2.3.7 Ab- und Einstrahlmechanismen
 - 2.3.8 Gehäuse und Karosserie: Hohlraumresonanzen
 - 2.3.9 Weitere Resonanzeffekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

► Auswirkungen vom Übersprechen

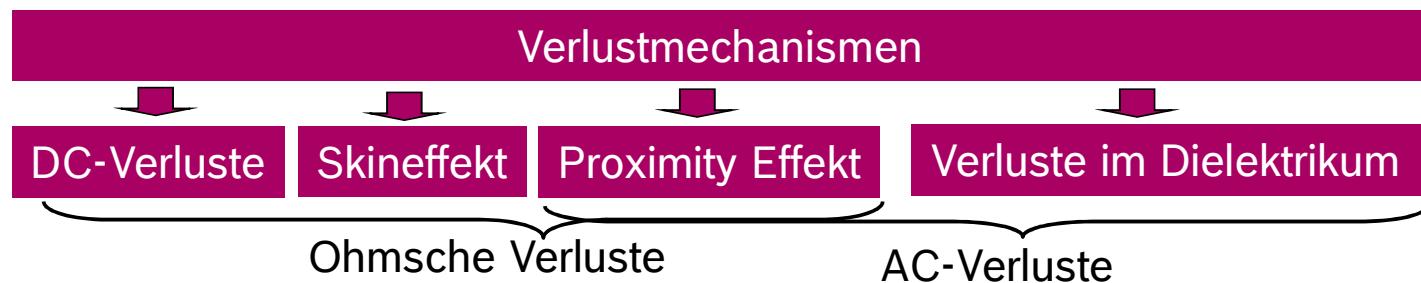


- Beeinflussungen durch Übersprechen haben eine große Bedeutung
- siehe Leitungstheorie



2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ **2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte**
 - 2.3.1 AVT: HF-Verhalten
 - 2.3.2 Verbindungsstrukturen: Kopplungsmechanismen
 - 2.3.3 Kabelbäume und Leiterplatten: Übersprechen
 - 2.3.4 Verbindungsstrukturen: Verlustmechanismen**
 - 2.3.5 Gleich- und Gegentaktströme
 - 2.3.6 Reale Masse
 - 2.3.7 Ab- und Einstrahlmechanismen
 - 2.3.8 Gehäuse und Karosserie: Hohlraumresonanzen
 - 2.3.9 Weitere Resonanzeffekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“



→ DC-Verluste

- Ohmsche Verluste wegen der Leitungsströme
- DC Verluste in der AVT sind in der Regel niedrig
- Allgemeine Formel für einen geraden Leiter:

$$R_{dc} = \frac{l}{A \gamma}$$

wobei l : Länge, A : Querschnittsfläche und γ : Leitfähigkeit

- DC Verluste sind zu beachten für:
 - Dünne Leiter (z.B. Bonds)
 - Leistungsstromführende Schaltkreise (z.B.: DBC- Layout)

2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ **2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte**
 - 2.3.1 AVT: HF-Verhalten
 - 2.3.2 Verbindungsstrukturen: Kopplungsmechanismen
 - 2.3.3 Kabelbäume und Leiterplatten: Übersprechen
 - 2.3.4 Verbindungsstrukturen: Verlustmechanismen**
 - 2.3.5 Gleich- und Gegentaktströme
 - 2.3.6 Reale Masse
 - 2.3.7 Ab- und Einstrahlmechanismen
 - 2.3.8 Gehäuse und Karosserie: Hohlraumresonanzen
 - 2.3.9 Weitere Resonanzeffekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

► Skineffekt

- Verdrängung des Stromes an die Oberfläche des Leiters („leitende Haut“)
- Eindringtiefe:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \gamma \mu}}$$

- Wie stark ist der Skineffekt?
→ Beispiel: 1 mm × 1 mm Kupferleiter

► Auswirkungen

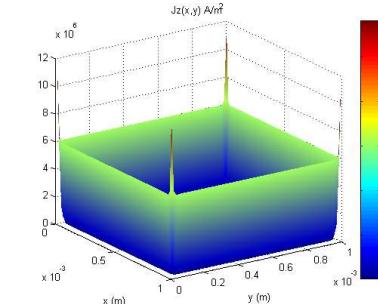
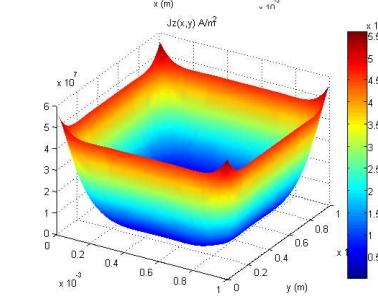
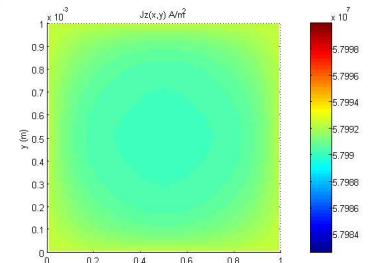
- Wirkwiderstandserhöhung im höheren Frequenzbereich:
 $R_s(\omega) \propto \sqrt{\omega}$
- Frequenzabhängige Verluste
- Reduzierung der inneren Induktivität

1 Hz

1 MHz

100 MHz

Stromdichte



2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ **2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte**
 - 2.3.1 AVT: HF-Verhalten
 - 2.3.2 Verbindungsstrukturen: Kopplungsmechanismen
 - 2.3.3 Kabelbäume und Leiterplatten: Übersprechen
 - 2.3.4 Verbindungsstrukturen: Verlustmechanismen**
 - 2.3.5 Gleich- und Gegentaktströme
 - 2.3.6 Reale Masse
 - 2.3.7 Ab- und Einstrahlmechanismen
 - 2.3.8 Gehäuse und Karosserie: Hohlraumresonanzen
 - 2.3.9 Weitere Resonanzeffekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

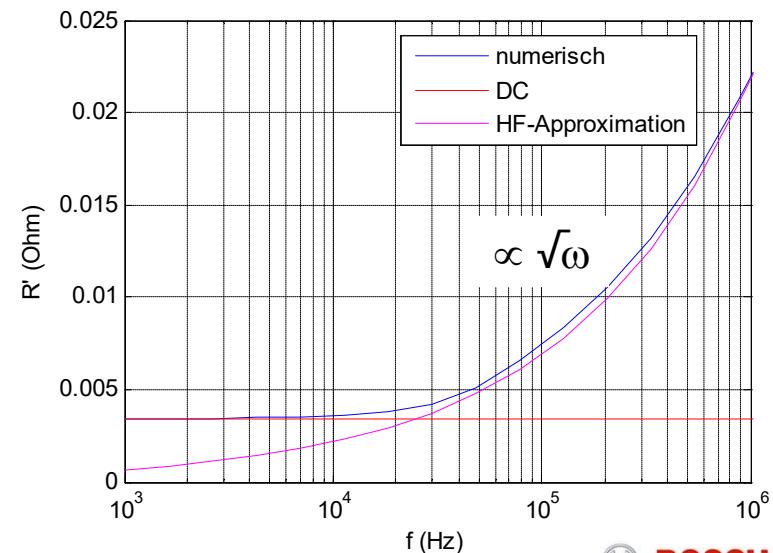
→ Skineffekt-Verluste: Abschätzung

- Geschlossene Lösung: Leiter mit rundem Querschnitt
- Allgemeine Lösung: numerisch
- Abschätzung bei höheren Frequenzen:

$$R'_s = \frac{1}{s\delta\gamma}$$

s : Umfang des Leiters
δ: Eindringtiefe

Leitungsquerschnitt
5 mm
Kupfer 1 mm



2 EMV-Design

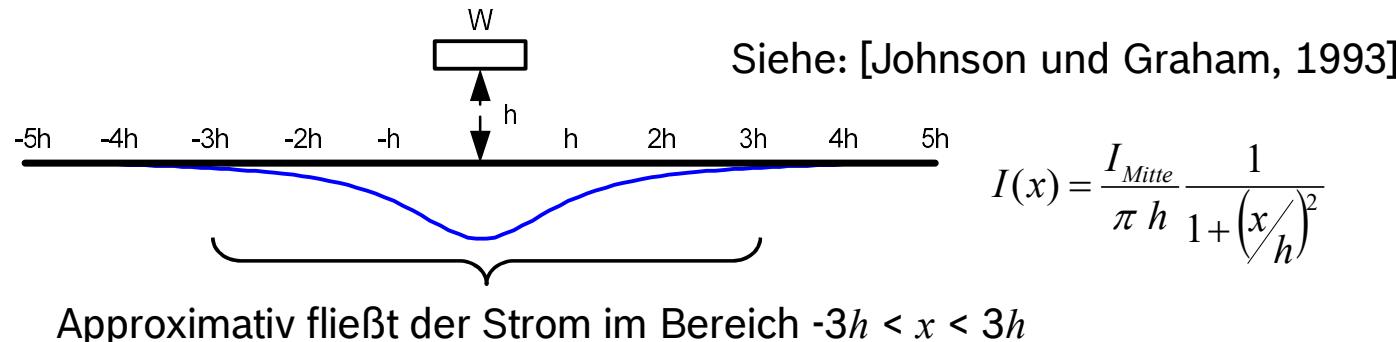
- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ **2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte**
 - 2.3.1 AVT: HF-Verhalten
 - 2.3.2 Verbindungsstrukturen: Kopplungsmechanismen
 - 2.3.3 Kabelbäume und Leiterplatten: Übersprechen
 - 2.3.4 Verbindungsstrukturen: Verlustmechanismen**
 - 2.3.5 Gleich- und Gegentaktströme
 - 2.3.6 Reale Masse
 - 2.3.7 Ab- und Einstrahlmechanismen
 - 2.3.8 Gehäuse und Karosserie: Hohlraumresonanzen
 - 2.3.9 Weitere Resonanzeffekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

► Proximity-Effekt

- inhomogene Stromverteilung infolge der Ströme in den benachbarten Leitern
- Auswirkungen in Bezug auf Verluste: Der Strom in einem Leiter induziert Ströme in den benachbarten Leitern (hauptsächlich an der Oberflächen) → Verluste
- genaue Betrachtung: nur numerisch

► Beispiel: Stanzgitterschiene in der Nähe von einer Gehäusewand

- Verteilung des induzierten Stromes im Querschnitt (Approximation):



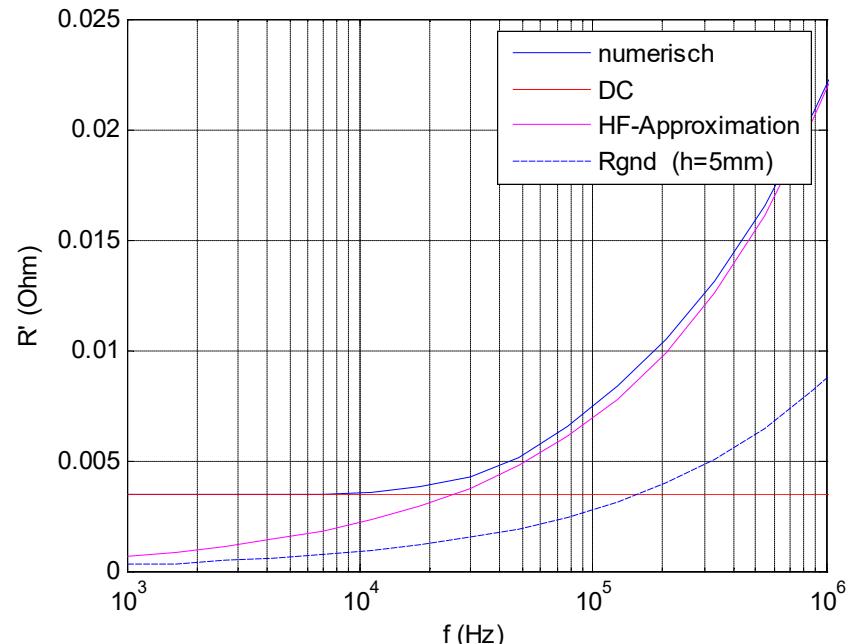
2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ **2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte**
 - 2.3.1 AVT: HF-Verhalten
 - 2.3.2 Verbindungsstrukturen: Kopplungsmechanismen
 - 2.3.3 Kabelbäume und Leiterplatten: Übersprechen
 - 2.3.4 Verbindungsstrukturen: Verlustmechanismen**
 - 2.3.5 Gleich- und Gegentaktströme
 - 2.3.6 Reale Masse
 - 2.3.7 Ab- und Einstrahlmechanismen
 - 2.3.8 Gehäuse und Karosserie: Hohlraumresonanzen
 - 2.3.9 Weitere Resonanzeffekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

→ Abschätzung des ohmschen Widerstandes

- Äquivalenter Leiter: Breite $6h$, Dicke δ

$$R'_{gnd} = \frac{1}{6h \cdot \delta \gamma}$$



2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störfade in der Kfz-Technik
- ▶ **2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte**
 - 2.3.1 AVT: HF-Verhalten
 - 2.3.2 Verbindungsstrukturen: Kopplungsmechanismen
 - 2.3.3 Kabelbäume und Leiterplatten: Übersprechen
 - 2.3.4 Verbindungsstrukturen: Verlustmechanismen**
 - 2.3.5 Gleich- und Gegentaktströme
 - 2.3.6 Reale Masse
 - 2.3.7 Ab- und Einstrahlmechanismen
 - 2.3.8 Gehäuse und Karosserie: Hohlraumresonanzen
 - 2.3.9 Weitere Resonanzeffekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

→ Verluste im Dielektrikum

- Dielektrikum: verlustlos nur bei niedrigen Frequenzen
- Allgemeine Definition für Permittivität:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon' - j\varepsilon''$$

- Tangens des Verlustwinkels:

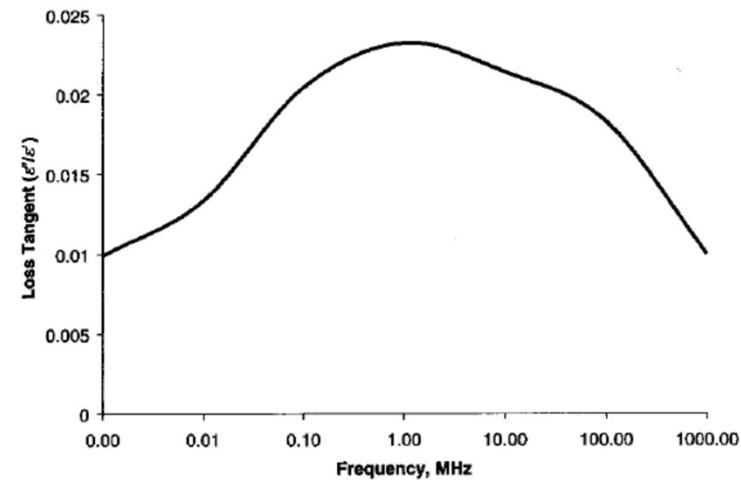
$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)}$$

- Dispersives Dielektrikum
mathematische Beschreibung (Debye-Modell):

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{1 + j\omega\tau}$$

τ : Relaxationszeit

z.B., für Epoxydharz FR4
Leiterplattenmaterial:



2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ **2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte**
 - 2.3.1 AVT: HF-Verhalten
 - 2.3.2 Verbindungsstrukturen: Kopplungsmechanismen
 - 2.3.3 Kabelbäume und Leiterplatten: Übersprechen
 - 2.3.4 Verbindungsstrukturen: Verlustmechanismen**
 - 2.3.5 Gleich- und Gegentaktströme
 - 2.3.6 Reale Masse
 - 2.3.7 Ab- und Einstrahlmechanismen
 - 2.3.8 Gehäuse und Karosserie: Hohlraumresonanzen
 - 2.3.9 Weitere Resonanzeffekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

→ Verluste in der AVT und EMV: allgemeine Konsequenzen

- DC-Verluste: Einfluss auf das Funktionsverhalten
- AC-Verluste: Einfluss sowohl auf das Funktionsverhalten als auch EMV-Verhalten
- AC-Verluste: steigen bei höheren Frequenzen



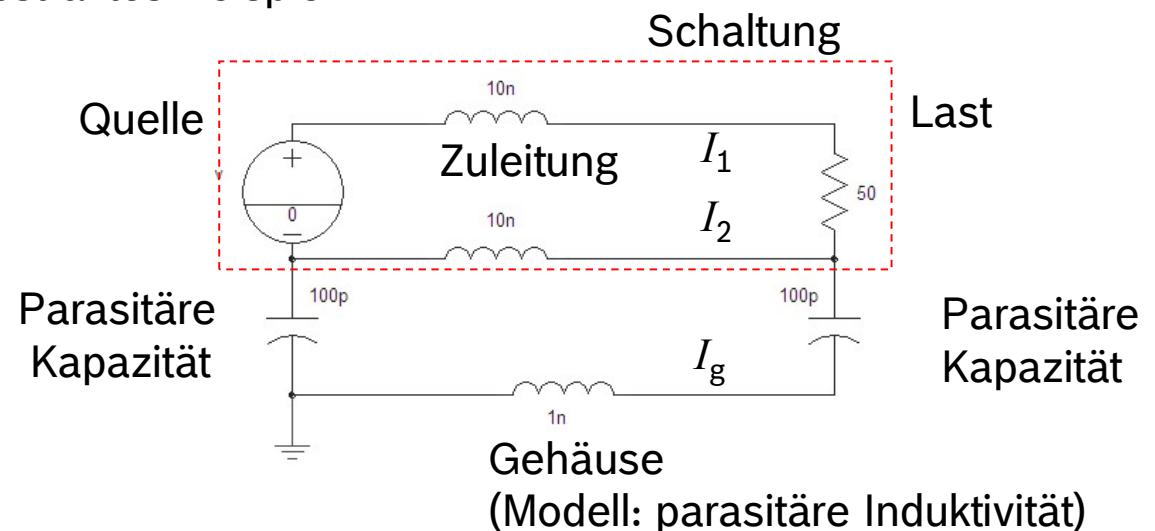
- AVT dient als ein intrinsischer Tiefpass im Störpfad
- Als Regel: EMV-Analyse ohne Verluste in der AVT entspricht dem „worst case“
- AC-Verluste können das EMV-Verhalten des Systems qualitativ ändern (z.B., die Resonanz wird scheinbar bedämpft)

2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störfäde in der Kfz-Technik
- ▶ **2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte**
 - 2.3.1 AVT: HF-Verhalten
 - 2.3.2 Verbindungsstrukturen: Kopplungsmechanismen
 - 2.3.3 Kabelbäume und Leiterplatten: Übersprechen
 - 2.3.4 Verbindungsstrukturen: Verlustmechanismen
 - 2.3.5 Gleich- und Gegentaktströme**
 - 2.3.6 Reale Masse
 - 2.3.7 Ab- und Einstrahlmechanismen
 - 2.3.8 Gehäuse und Karosserie: Hohlraumresonanzen
 - 2.3.9 Weitere Resonanzeffekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

Gleich- und Gegentaktströme

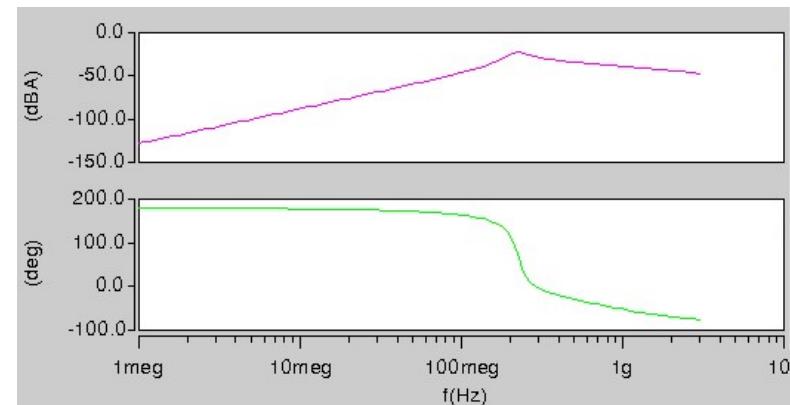
- Aus den Grundlagen: Stromlinien bilden ein Wirbelfeld (sind geschlossen)
- Verbindungsstrukturen führen „differentielle“ Signale:
 - Leiterpaare
 - Leiter im Bezug zu der Masse (Bezugsleiter)
- Abstraktes Beispiel



2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störfäde in der Kfz-Technik
- ▶ **2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte**
 - 2.3.1 AVT: HF-Verhalten
 - 2.3.2 Verbindungsstrukturen: Kopplungsmechanismen
 - 2.3.3 Kabelbäume und Leiterplatten: Übersprechen
 - 2.3.4 Verbindungsstrukturen: Verlustmechanismen
 - 2.3.5 Gleich- und Gegentaktströme**
 - 2.3.6 Reale Masse
 - 2.3.7 Ab- und Einstrahlmechanismen
 - 2.3.8 Gehäuse und Karosserie: Hohlraumresonanzen
 - 2.3.9 Weitere Resonanzeffekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

- **Funktionales Verhalten:** $I_1 + I_2 = 0$, Lastspannung ist 1 V
- Das gilt nur bei niedrigen Frequenzen
- Bei hohen Frequenzen fließt ein Teil des Stromes z.B. über das Gehäuse (Ursache: parasitäre Kapazitäten)
- Die Stromsumme in den Hin- und Rückleitern (Simulation):



→ $I_1 + I_2 \neq 0$

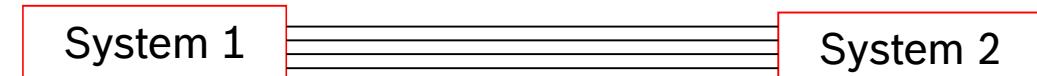
- **Negative Auswirkungen:**
 - HF-Störstrom auf dem Gehäuse
 - Die Lastspannung ist gestört
- **Merkmal des Problems:** Hin- und Rückströme sind nicht gleich

2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ **2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte**
 - 2.3.1 AVT: HF-Verhalten
 - 2.3.2 Verbindungsstrukturen: Kopplungsmechanismen
 - 2.3.3 Kabelbäume und Leiterplatten: Übersprechen
 - 2.3.4 Verbindungsstrukturen: Verlustmechanismen
 - 2.3.5 Gleich- und Gegentaktströme**
 - 2.3.6 Reale Masse
 - 2.3.7 Ab- und Einstrahlmechanismen
 - 2.3.8 Gehäuse und Karosserie: Hohlraumresonanzen
 - 2.3.9 Weitere Resonanzeffekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

→ Definition

Beabsichtigte Verbindungen
(Kabelbäume, Leiterzüge usw.)



Man unterscheidet zwei Fälle in der Signalübertragung:

- **Gegentaktfall (Eng. DM, differential mode)**
Die Stromsumme im Querschnitt des Kabels ist Null.
 - **Gleichtaktfall oder (Eng. CM: common mode oder antenna mode)**
Alle Ströme in den Kabeladern fließen in der selben Richtung.
Diese Ströme gleichen sich aus (werden zu null),
wenn die Last symmetrisch ist!
 - Die beliebige Stromverteilung lässt sich in Gleich- und
Gegentaktfall zerlegen (**bei linearen Problemen**)
- **Gegentaktfall:** stammt vom funktionalen Verhalten der Schaltung
 - **Gleichtaktfall:** parasitärer Effekt (Ausnahme: Antennen)
 - Ursachen: unbeabsichtigter Rückleiter (wie im Beispiel) oder Ab- und
Einstrahlung der AVT (typisch im GHz-Frequenzbereich)

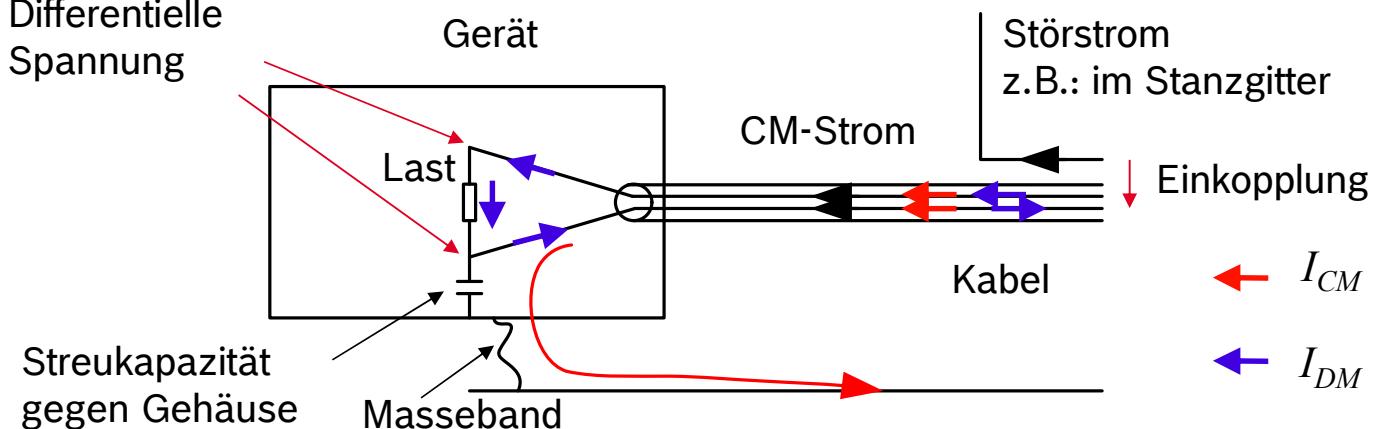
2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ **2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte**
 - 2.3.1 AVT: HF-Verhalten
 - 2.3.2 Verbindungsstrukturen: Kopplungsmechanismen
 - 2.3.3 Kabelbäume und Leiterplatten: Übersprechen
 - 2.3.4 Verbindungsstrukturen: Verlustmechanismen
 - 2.3.5 Gleich- und Gegentaktströme**
 - 2.3.6 Reale Masse
 - 2.3.7 Ab- und Einstrahlmechanismen
 - 2.3.8 Gehäuse und Karosserie: Hohlraumresonanzen
 - 2.3.9 Weitere Resonanzeffekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

→ Gleich- und Gegentaktsignalumwandlung

- Die Gleich- und Gegentaktsignale können ineinander umgewandelt werden. Die Ursache für diese Transformation ist die Asymmetrie!
- Ein Beispiel der Umwandlung „Gegentaktsignal → Gleichtaktsignal“ wurde oben angegeben (siehe S. 50). Ursache: Asymmetrie in den parasitären Kapazitäten.
- Ein Beispiel der Umwandlung „Gegentaktsignal ← Gleichtaktsignal“

Differentielle Spannung

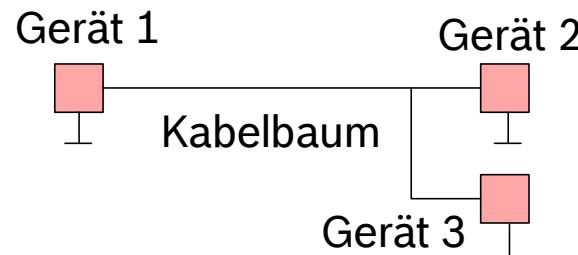


2 EMV-Design

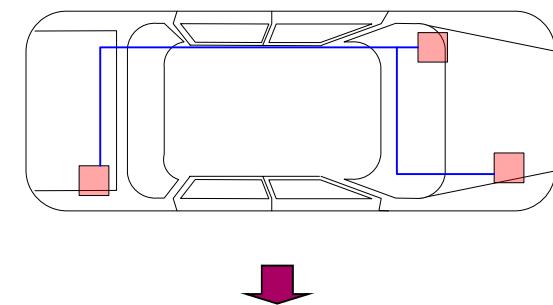
- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störfäde in der Kfz-Technik
- ▶ **2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte**
 - 2.3.1 AVT: HF-Verhalten
 - 2.3.2 Verbindungsstrukturen: Kopplungsmechanismen
 - 2.3.3 Kabelbäume und Leiterplatten: Übersprechen
 - 2.3.4 Verbindungsstrukturen: Verlustmechanismen
 - 2.3.5 Gleich- und Gegentaktströme
 - 2.3.6 Reale Masse**
 - 2.3.7 Ab- und Einstrahlmechanismen
 - 2.3.8 Gehäuse und Karosserie: Hohlraumresonanzen
 - 2.3.9 Weitere Resonanzeffekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

→ Effekt der realen Masse (bzw. des Bezugsleiters)

Schaltplan: ideale Masse



Realität: Karosserie



Konsequenzen:

- Asymmetrie → Gleichtaktstörungen
- Abstrahlung → Störaussendung
- Einstrahlung → „Masse“ wirkt als Empfänger, d.h.: Störempfang

- Reiheninduktivität
- Reihenwiderstand
- Mehre Rückstrompfade
- Zeitverzögerung

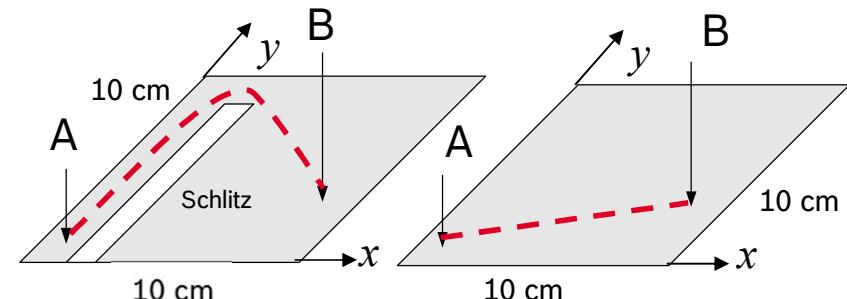
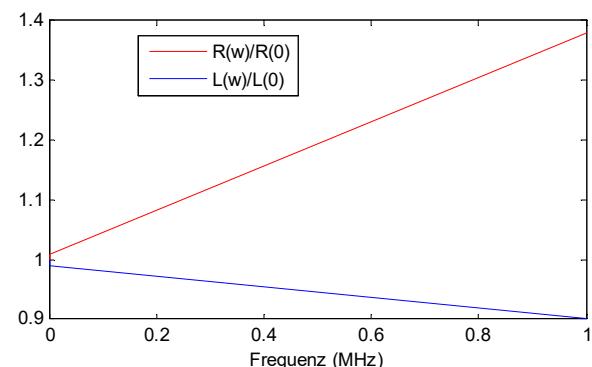
2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störfäde in der Kfz-Technik
- ▶ **2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte**
 - 2.3.1 AVT: HF-Verhalten
 - 2.3.2 Verbindungsstrukturen: Kopplungsmechanismen
 - 2.3.3 Kabelbäume und Leiterplatten: Übersprechen
 - 2.3.4 Verbindungsstrukturen: Verlustmechanismen
 - 2.3.5 Gleich- und Gegentaktströme
 - 2.3.6 Reale Masse**
 - Ab- und Einstrahlmechanismen
 - Gehäuse und Karosserie: Hohlraumresonanzen
 - Weitere Resonanzeffekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

→ Modell der Masse

- Bei niedrigen Frequenzen: RL-Reihenschaltung
- Parameter sind abhängig von:
Geometrie des Bezugsleiters, der Leitfähigkeit und der Frequenz
- **Beispiel: rechteckige Kupferfläche (numerische Simulation)**
Parasitäre Induktivität und der Widerstand zwischen den Kontaktpunkten A ($x = 5 \text{ mm}$, $y = 5 \text{ mm}$) und B ($x = 95 \text{ mm}$, $y = 30 \text{ mm}$) sind zu berechnen

Frequenzabhängigkeit



DC: $R = 1,16 \Omega$ $R = 0,24 \Omega$
 $L = 91 \text{ nH}$ $L = 36 \text{ nH}$

2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ **2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte**
 - 2.3.1 AVT: HF-Verhalten
 - 2.3.2 Verbindungsstrukturen: Kopplungsmechanismen
 - 2.3.3 Kabelbäume und Leiterplatten: Übersprechen
 - 2.3.4 Verbindungsstrukturen: Verlustmechanismen
 - 2.3.5 Gleich- und Gegentaktströme
 - 2.3.6 Reale Masse**
 - 2.3.7 Ab- und Einstrahlmechanismen
 - 2.3.8 Gehäuse und Karosserie: Hohlraumresonanzen
 - 2.3.9 Weitere Resonanzeffekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

→ Modell der Masse bei höheren Frequenzen (d.h., bei elektrisch großer Masse)

- Finite Wellenlaufzeit → Phasenverschiebung
- Abstrahlung → Zusätzliche Verluste
- Schwingungen in der Massenfläche → Querresonanzen
- Bei gewissen Frequenzen kann die Impedanz zwischen Kontaktpunkten durch Resonanzen sehr hoch werden

→ Genaue Beschreibung nur durch die 3D-Simulation

→ Eng: „Ground Bounce“

2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störfade in der Kfz-Technik
- ▶ **2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte**

- 2.3.1 AVT: HF-Verhalten
- 2.3.2 Verbindungsstrukturen: Kopplungsmechanismen
- 2.3.3 Kabelbäume und Leiterplatten: Übersprechen
- 2.3.4 Verbindungsstrukturen: Verlustmechanismen
- 2.3.5 Gleich- und Gegentaktströme
- 2.3.6 Reale Masse
- 2.3.7 Ab- und Einstrahlmechanismen**
- 2.3.8 Gehäuse und Karosserie: Hohlraumresonanzen
- 2.3.9 Weitere Resonanzeffekte

- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

➤ Ab- und Einstrahlungsmechanismen

→ Elementarer Strahler: Elektrischer Dipol (Hertzscher Dipol)

Das gestrahlte Feld:

$$\underline{E}_r = \frac{\underline{I} \cdot h}{2\pi} \cdot k^2 Z_0 \cdot \left(\frac{1}{(kr)^2} - j \frac{1}{(kr)^3} \right) \cdot e^{-jk \cdot r} \cdot \cos \theta$$

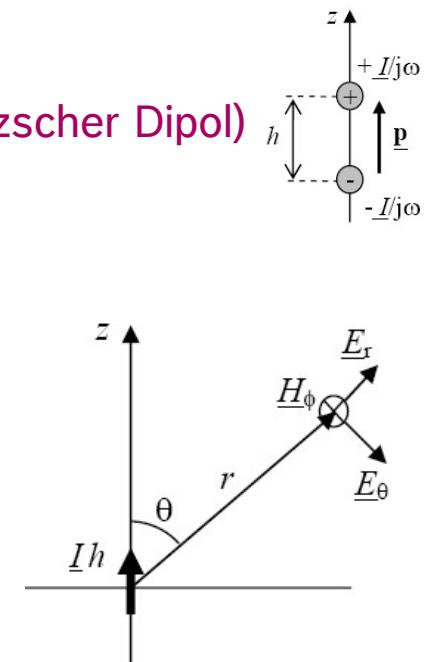
$$\underline{E}_\theta = \frac{\underline{I} \cdot h}{4\pi} \cdot k^2 Z_0 \cdot \left(j \frac{1}{(kr)} + \frac{1}{(kr)^2} - j \frac{1}{(kr)^3} \right) \cdot e^{-jk \cdot r} \cdot \sin \theta$$

$$\underline{H}_\phi = \frac{\underline{I} \cdot h}{4\pi} \cdot k^2 \cdot \left(j \frac{1}{(kr)} + \frac{1}{(kr)^2} \right) \cdot e^{-jk \cdot r} \cdot \sin \theta$$

wobei

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad k = \omega \sqrt{\mu \epsilon} = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$$

- elektrisch kleiner Strahler
- Abstrahlung durch oszillierenden elektrisches Dipol
- r : Abstand bis zum Beobachtungspunkt



2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ **2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte**
 - 2.3.1 AVT: HF-Verhalten
 - 2.3.2 Verbindungsstrukturen: Kopplungsmechanismen
 - 2.3.3 Kabelbäume und Leiterplatten: Übersprechen
 - 2.3.4 Verbindungsstrukturen: Verlustmechanismen
 - 2.3.5 Gleich- und Gegentaktströme
 - 2.3.6 Reale Masse
 - 2.3.7 Ab- und Einstrahlmechanismen**
 - 2.3.8 Gehäuse und Karosserie: Hohlraumresonanzen
 - 2.3.9 Weitere Resonanzeffekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

→ **Nahfeld ($k r \ll 1$, d.h., $r \ll \lambda$)**

- Die allgemeine Formel lässt sich vereinfachen:

$$e^{-jk \cdot r} \approx 1$$

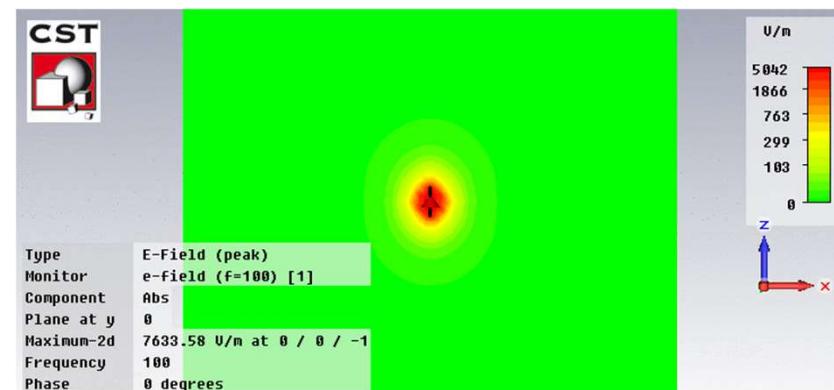
$$\frac{1}{(k \cdot r)^3} \gg \frac{1}{(k \cdot r)^2} \gg \frac{1}{(k \cdot r)}$$

$$H_\phi \approx \frac{I \cdot h}{4\pi \cdot r^2} \cdot \sin \theta$$

$$\underline{\mathbf{E}} \approx \frac{I \cdot h}{4\pi \cdot r^3} \cdot \frac{Z_0}{jk} (2 \cdot \cos \theta \cdot \mathbf{e}_r + \sin \theta \cdot \mathbf{e}_\theta)$$

- Das ist die quasi-statische Lösung
- Im Bezug zur EMV: elektrische und magnetische Kopplungen

Elektrische Feldstärke in der Umgebung einer elektrisch kurzen Antenne bei niedrigen Frequenzen
 $k r \ll 1$
→ Nahfeld dominiert



2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ **2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte**
 - 2.3.1 AVT: HF-Verhalten
 - 2.3.2 Verbindungsstrukturen: Kopplungsmechanismen
 - 2.3.3 Kabelbäume und Leiterplatten: Übersprechen
 - 2.3.4 Verbindungsstrukturen: Verlustmechanismen
 - 2.3.5 Gleich- und Gegentaktströme
 - 2.3.6 Reale Masse
 - 2.3.7 Ab- und Einstrahlmechanismen**
 - 2.3.8 Gehäuse und Karosserie: Hohlraumresonanzen
 - 2.3.9 Weitere Resonanzeffekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

→ **Fernfeld** ($k r \gg 1$, d.h., $r \gg \lambda$)

- Die allgemeine Formel lässt sich vereinfachen:

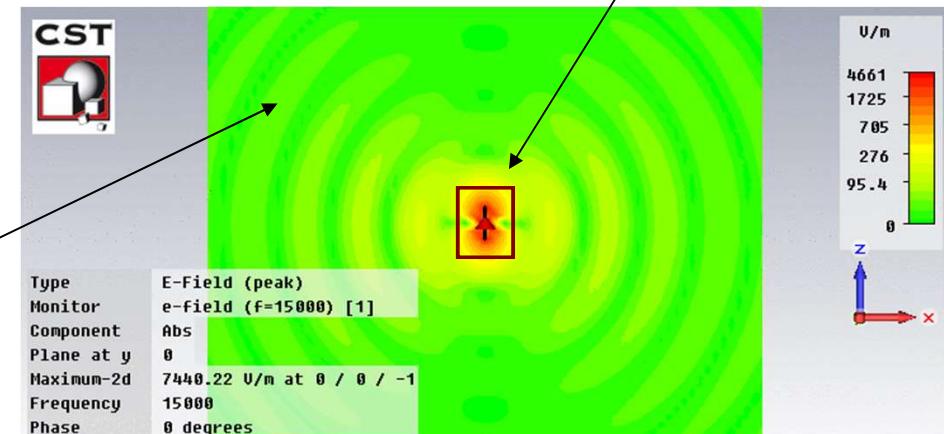
$$\frac{1}{(kr)} \gg \frac{1}{(kr)^2} \gg \frac{1}{(kr)^3} \Rightarrow E_r \approx 0 \quad \underline{E}_\theta \approx jk \cdot \frac{I \cdot h}{4\pi \cdot r} \cdot Z_0 \cdot e^{-jk \cdot r} \cdot \sin \theta \Rightarrow E_\theta = Z_0 H_\phi$$

$$\underline{H}_\phi \approx jk \cdot \frac{I \cdot h}{4\pi \cdot r} \cdot e^{-jk \cdot r} \cdot \sin \theta$$

- E- und H-Felder sind gleichphasig und bilden TEM-Wellen

- Ausbreitung der Wellen von einer elektrisch kurzen Antenne bei höheren Frequenzen:

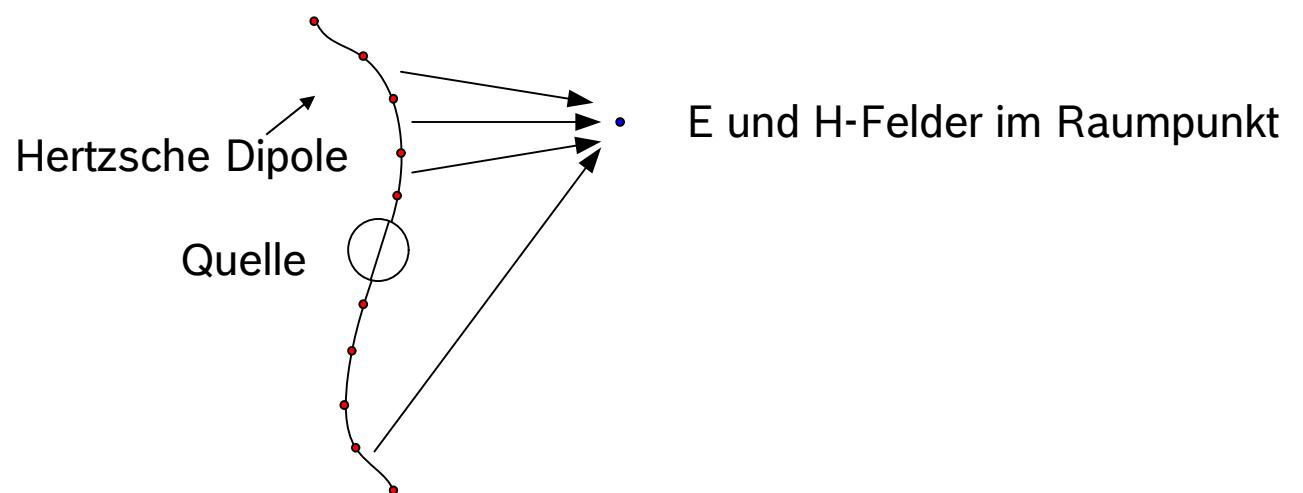
nur Fernfeld



2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ **2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte**
 - 2.3.1 AVT: HF-Verhalten
 - 2.3.2 Verbindungsstrukturen: Kopplungsmechanismen
 - 2.3.3 Kabelbäume und Leiterplatten: Übersprechen
 - 2.3.4 Verbindungsstrukturen: Verlustmechanismen
 - 2.3.5 Gleich- und Gegentaktströme
 - 2.3.6 Reale Masse
 - 2.3.7 Ab- und Einstrahlmechanismen**
 - 2.3.8 Gehäuse und Karosserie: Hohlraumresonanzen
 - 2.3.9 Weitere Resonanzeffekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

- **Magnetischer Dipol: dual zum elektrischen Dipol**
- **Allgemeiner Strahler**
 - Superposition der elektrisch kleinen Antennen (Hertzsche Dipole)



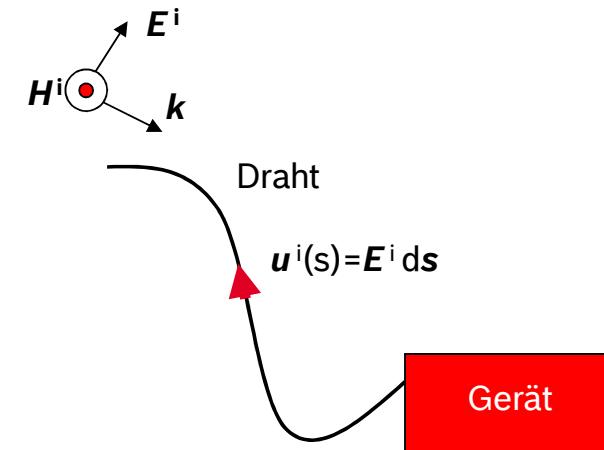
- Gibt es einen Zusammenhang zwischen magnetischen bzw. elektrischen Kopplungen bei niedrigen Frequenzen und der Abstrahlung?
Ja! Siehe PEEC-Methode in Kapitel 5.

2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ **2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte**
 - 2.3.1 AVT: HF-Verhalten
 - 2.3.2 Verbindungsstrukturen: Kopplungsmechanismen
 - 2.3.3 Kabelbäume und Leiterplatten: Übersprechen
 - 2.3.4 Verbindungsstrukturen: Verlustmechanismen
 - 2.3.5 Gleich- und Gegentaktströme
 - 2.3.6 Reale Masse
 - 2.3.7 Ab- und Einstrahlmechanismen**
 - 2.3.8 Gehäuse und Karosserie: Hohlraumresonanzen
 - 2.3.9 Weitere Resonanzeffekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

→ Feldeinstrahlung

externe EM-Welle (eingeprägtes Feld)
Fernfeld → TEM- Welle



→ Einstrahlung: Grundprinzipien

$$u_i = \int_s \mathbf{E}^i \cdot d\mathbf{s} \quad u_i = \oint_{s=\partial A} \mathbf{E}^i \cdot d\mathbf{s} = -\frac{\partial \Phi}{\partial t}$$

u_i : induzierte Spannung

E^i : externe (eingeprägte) elektrische Feldstärke

Φ : magnetischer Fluss durch eine geschlossene Schleife

s : Umlauf des Leiters (bzw. AVT, Draht...)

→ Satz

Nur die elektrische oder nur die magnetische Feldstärke gibt eine eindeutige Definition für die elektromagnetische Feldeinstrahlung / -abstrahlung (siehe [Tesche 1997])

2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ **2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte**
 - 2.3.1 AVT: HF-Verhalten
 - 2.3.2 Verbindungsstrukturen: Kopplungsmechanismen
 - 2.3.3 Kabelbäume und Leiterplatten: Übersprechen
 - 2.3.4 Verbindungsstrukturen: Verlustmechanismen
 - 2.3.5 Gleich- und Gegentaktströme
 - 2.3.6 Reale Masse
 - 2.3.7 Ab- und Einstrahlmechanismen**
 - 2.3.8 Gehäuse und Karosserie: Hohlraumresonanzen
 - 2.3.9 Weitere Resonanzeffekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

→ Theoretische Erklärung

- Randbedingung auf der Oberfläche des Leiters:

Eingeprägtes Feld → $\mathbf{E}^i = -\mathbf{E}^s$ ← Streufeld



- Elektrische Feldintegralgleichung:

$$\mathbf{E}^i(\mathbf{r}) = j\omega \mu_0 \int_V \overline{\mathbf{G}}^E(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \cdot \mathbf{J}(\mathbf{r}') dV$$



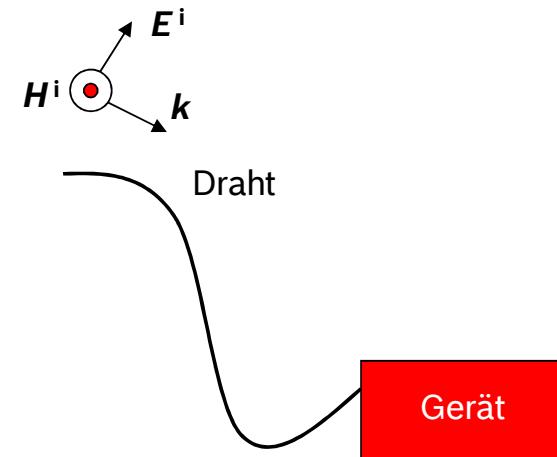
- Lösung für die Stromverteilung: $\mathbf{J}(\mathbf{r}')$



- Lösungen für die räumlichen Feldverteilungen:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \mathbf{E}^i(\mathbf{r}) - j\omega \mu_0 \int_V \overline{\mathbf{G}}^E(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \cdot \mathbf{J}(\mathbf{r}') dV$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}) = \frac{1}{Z_0} \mathbf{k} \times \mathbf{E}^i(\mathbf{r}) - j\omega \mu_0 \int_V \overline{\mathbf{G}}^H(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \cdot \mathbf{J}(\mathbf{r}') dV$$



2 EMV-Design

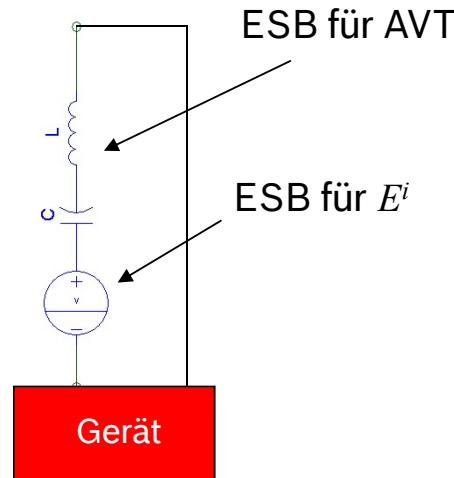
- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störfade in der Kfz-Technik
- ▶ **2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte**
 - 2.3.1 AVT: HF-Verhalten
 - 2.3.2 Verbindungsstrukturen: Kopplungsmechanismen
 - 2.3.3 Kabelbäume und Leiterplatten: Übersprechen
 - 2.3.4 Verbindungsstrukturen: Verlustmechanismen
 - 2.3.5 Gleich- und Gegentaktströme
 - 2.3.6 Reale Masse
- ▶ **2.3.7 Ab- und Einstrahlmechanismen**
 - 2.3.8 Gehäuse und Karosserie: Hohlraumresonanzen
 - 2.3.9 Weitere Resonanzeffekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

→ Frequenzselektive Feldeinstrahlung

- Sei die Amplitude des eingeprägtes Feldes konstant bei allen Frequenzen

$$\mathbf{E}^i(\omega) = \text{const}$$

- Induzierte Spannungen sind konstant, aber der Empfang ist frequenzabhängig. Warum?
- Beispiel:



Antwort:
Resonanzen in der AVT

Bei Resonanzen kann ein Draht
(normal Leerlauf – hochimpedant)
niedrige Impedanz zeigen

Relevante Effekte:
Antennenresonanzen und
Leitungsresonanzen



2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ **2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte**
 - 2.3.1 AVT: HF-Verhalten
 - 2.3.2 Verbindungsstrukturen: Kopplungsmechanismen
 - 2.3.3 Kabelbäume und Leiterplatten: Übersprechen
 - 2.3.4 Verbindungsstrukturen: Verlustmechanismen
 - 2.3.5 Gleich- und Gegentaktströme
 - 2.3.6 Reale Masse
 - 2.3.7 Ab- und Einstrahlmechanismen**
 - Gehäuse und Karosserie: Hohlraumresonanzen
 - 2.3.9 Weitere Resonanzeffekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

→ Beispiel:

EM-Kopplung zwischen zwei Verbindungsstrukturen

Störquelle: Draht

Länge: 10 mm

Störsenke: Leitung

Höhe: 5 mm

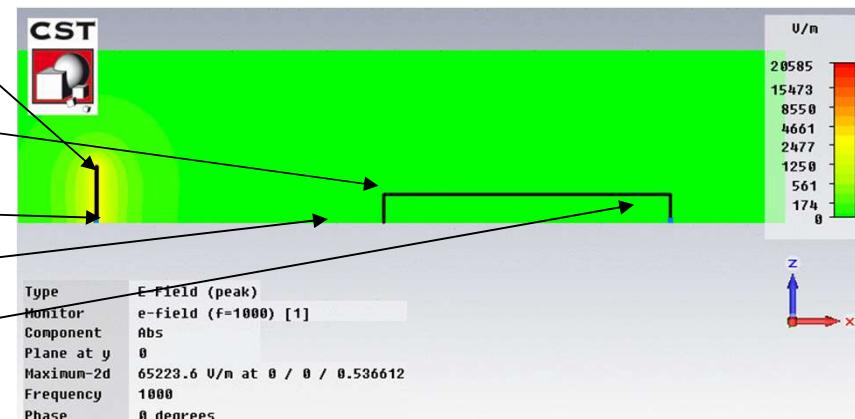
Länge: 50 mm

Stromquelle

Kupfertisch

Messgröße:

Störstrom in der Leitung



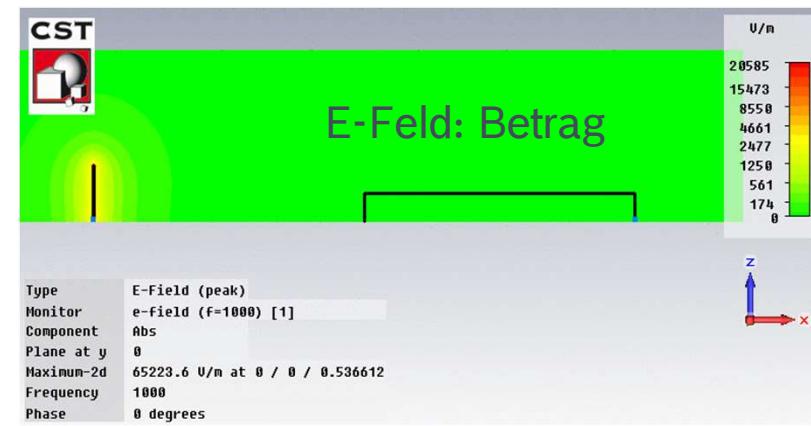
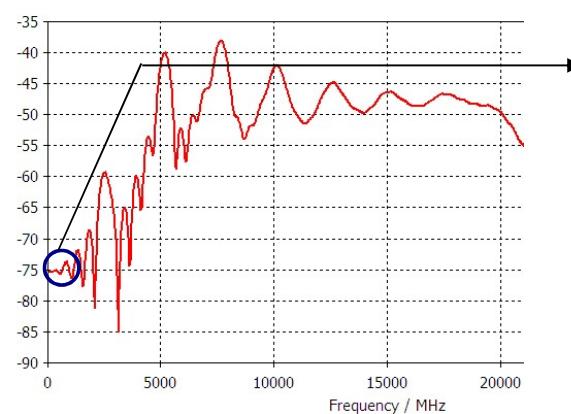
→ Resonanzfrequenzen der Anordnung:

- 2,5 GHz: $\lambda/2 \approx$ effektive Länge der Leitung
- 7,5 GHz: $\lambda/4 =$ Länge der Monopolantenne (Störsender)
- 15 GHz: $\lambda/4 =$ Leitungshöhe (vertikale Stäbe wirken wie Empfangsantennen)

2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ **2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte**
 - 2.3.1 AVT: HF-Verhalten
 - 2.3.2 Verbindungsstrukturen: Kopplungsmechanismen
 - 2.3.3 Kabelbäume und Leiterplatten: Übersprechen
 - 2.3.4 Verbindungsstrukturen: Verlustmechanismen
 - 2.3.5 Gleich- und Gegentaktströme
 - 2.3.6 Reale Masse
- ▶ **2.3.7 Ab- und Einstrahlmechanismen**
 - 2.3.8 Gehäuse und Karosserie: Hohlraumresonanzen
 - 2.3.9 Weitere Resonanzeffekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

- Simulation bei 1 GHz
- Störstrom (dBA): Frequenzgang

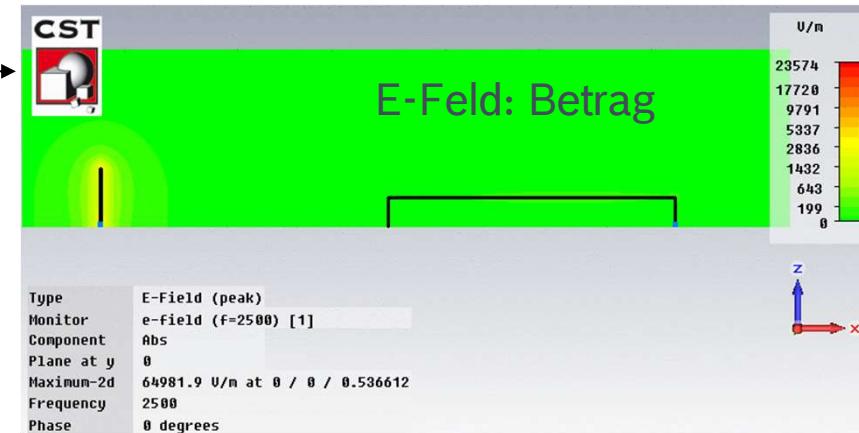
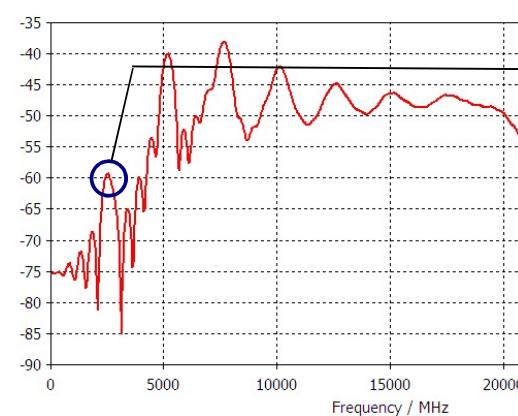


- Störquelle: Nahfeld ist dominant, Fernfeld ist sehr schwach
- Störsenke: außerhalb des Nahfeldes
- Störung (Störstrom in der Leitung) ist gering, da kaum Störung die Leitung erreicht

2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ **2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte**
 - 2.3.1 AVT: HF-Verhalten
 - 2.3.2 Verbindungsstrukturen: Kopplungsmechanismen
 - 2.3.3 Kabelbäume und Leiterplatten: Übersprechen
 - 2.3.4 Verbindungsstrukturen: Verlustmechanismen
 - 2.3.5 Gleich- und Gegentaktströme
 - 2.3.6 Reale Masse
- ▶ **2.3.7 Ab- und Einstrahlmechanismen**
 - 2.3.8 Gehäuse und Karosserie: Hohlraumresonanzen
 - 2.3.9 Weitere Resonanzeffekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

- Simulation bei 2,5 GHz
- Störstrom (dBA): Frequenzgang

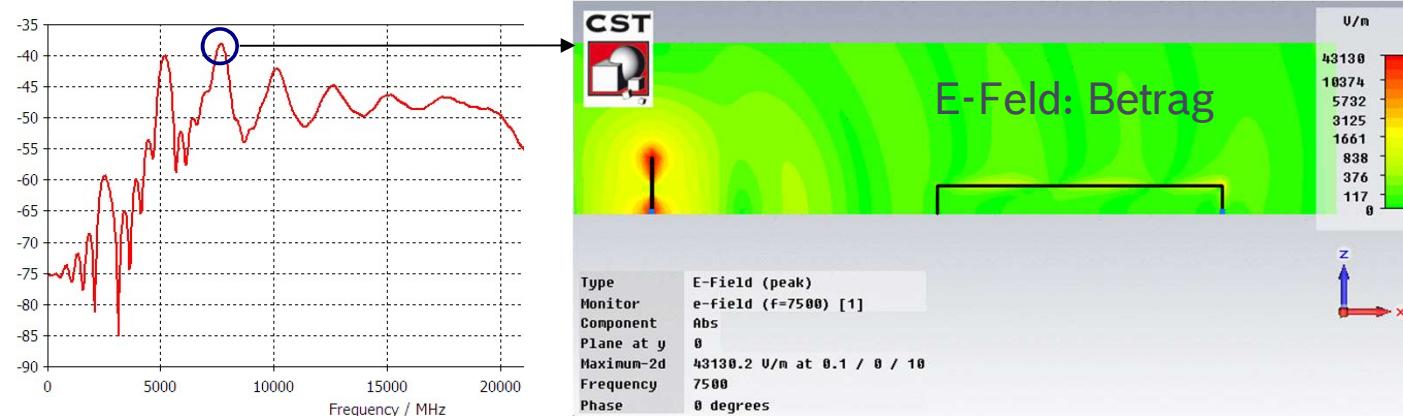


- Störquelle: Nahfeld ist dominant, Fernfeld ist sehr schwach
- Störsenke: außerhalb des Nahfeldes
- Leitungsresonanz der Störsenke
- Störung ist relativ gering, da kaum Störung die Leitung erreicht

2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ **2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte**
 - 2.3.1 AVT: HF-Verhalten
 - 2.3.2 Verbindungsstrukturen: Kopplungsmechanismen
 - 2.3.3 Kabelbäume und Leiterplatten: Übersprechen
 - 2.3.4 Verbindungsstrukturen: Verlustmechanismen
 - 2.3.5 Gleich- und Gegentaktströme
 - 2.3.6 Reale Masse
- ▶ **2.3.7 Ab- und Einstrahlmechanismen**
 - 2.3.8 Gehäuse und Karosserie: Hohlraumresonanzen
 - 2.3.9 Weitere Resonanzeffekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

- Simulation bei 7,5 GHz
- Störstrom (dBA): Frequenzgang



- Störquelle: $\lambda/4$ -Resonanz → intensive Abstrahlung
- Störsenke: 3. Leitungsresonanz → Leitung ist niederohmig
- Störung ist sehr stark

2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik

▶ 2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte

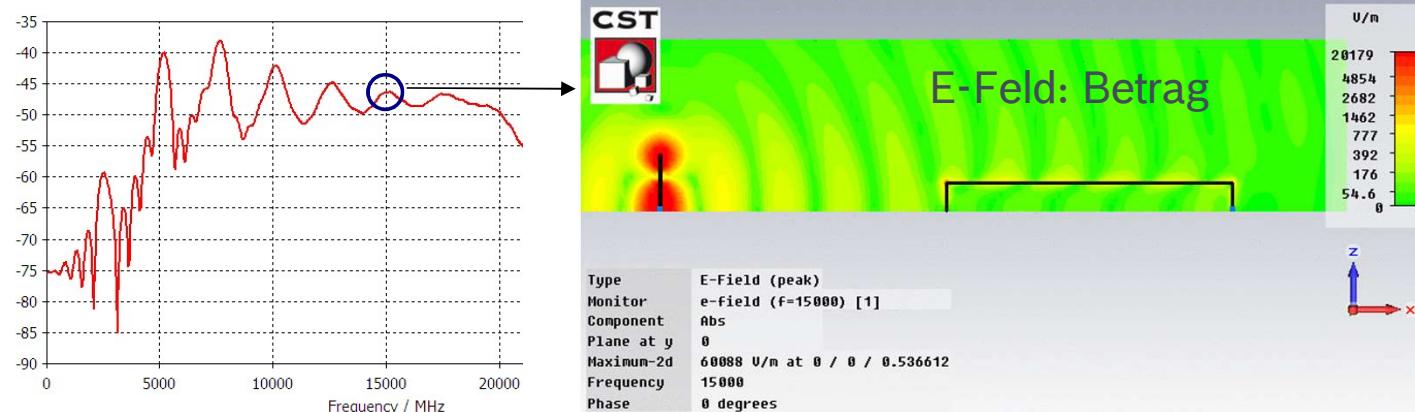
- 2.3.1 AVT: HF-Verhalten
- 2.3.2 Verbindungsstrukturen: Kopplungsmechanismen
- 2.3.3 Kabelbäume und Leiterplatten: Übersprechen
- 2.3.4 Verbindungsstrukturen: Verlustmechanismen
- 2.3.5 Gleich- und Gegentaktströme
- 2.3.6 Reale Masse

2.3.7 Ab- und Einstrahlmechanismen

- Gehäuse und Karosserie: Hohlraumresonanzen
- 2.3.9 Weitere Resonanzeffekte

- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

- Simulation bei 15 GHz
- Störstrom (dBA): Frequenzgang



- Störquelle: intensive Abstrahlung, jedoch schwächer als bei 7,5 GHz
- Störsenke: guter Empfang, da die vertikalen Stäbe $\lambda/4$ entsprechen
- Leitungsresonanz → Leitung ist niederohmig
- Störung ist stark

2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ **2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte**
 - 2.3.1 AVT: HF-Verhalten
 - 2.3.2 Verbindungsstrukturen: Kopplungsmechanismen
 - 2.3.3 Kabelbäume und Leiterplatten: Übersprechen
 - 2.3.4 Verbindungsstrukturen: Verlustmechanismen
 - 2.3.5 Gleich- und Gegentaktströme
 - 2.3.6 Reale Masse
 - 2.3.7 Ab- und Einstrahlmechanismen
 - 2.3.8 Gehäuse und Karosserie: Hohlraumresonanzen**
 - 2.3.9 Weitere Resonanzeffekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

- ▶ Bisherige Betrachtung: Beeinflussungen im Freiraum
- ▶ Realität: sehr oft geschlossene Räume mit leitenden Begrenzungen
- ▶ Kfz: Karosserie ist leitend, hat viele Öffnungen



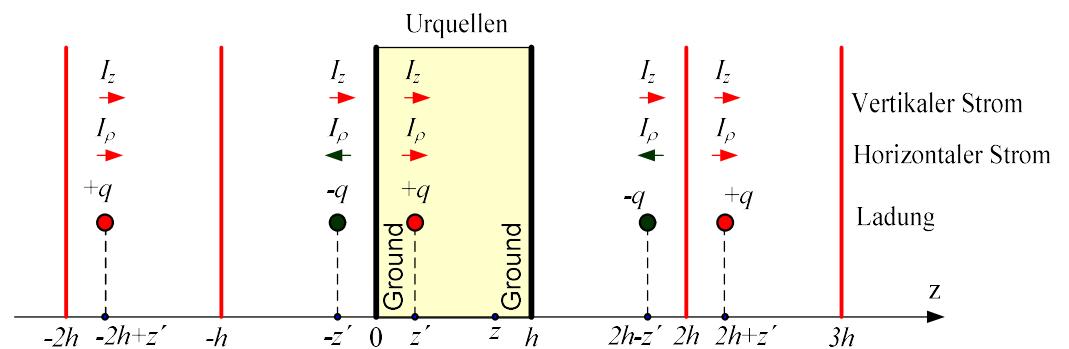
- ▶ Elektronisches Gerät: Gehäuse ist oft leitend
- ▶ Beeinflusst das Gehäuse (bzw. Karosserie) das EMV-Verhalten?
 - theoretisch:** **immer**
 - in der Praxis:** **manchmal**



2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ **2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte**
 - 2.3.1 AVT: HF-Verhalten
 - 2.3.2 Verbindungsstrukturen: Kopplungsmechanismen
 - 2.3.3 Kabelbäume und Leiterplatten: Übersprechen
 - 2.3.4 Verbindungsstrukturen: Verlustmechanismen
 - 2.3.5 Gleich- und Gegentaktströme
 - 2.3.6 Reale Masse
 - 2.3.7 Ab- und Einstrahlmechanismen
 - 2.3.8 Gehäuse und Karosserie: Hohlraumresonanzen**
 - 2.3.9 Weitere Resonanzeffekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

- Zunächst: Feldquellen zwischen zwei perfekt leitenden Flächen
- Grundprinzip: Image-Theorie
- Die Strahler werden mehrmals reflektiert:



- Streufeld: Superposition des Streufeldes der reflektierten Quellen
- Rechteckiger perfekt leitender Hohlraum (Cavity):
 - Beschreibung durch die Image-Theorie
 - Reflektierter Strahler in drei Dimensionen
 - Analytische Beschreibung möglich [Balanis 1989]

2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
 - ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
 - ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
 - ▶ **2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte**
 - 2.3.1 AVT: HF-Verhalten
 - 2.3.2 Verbindungsstrukturen: Kopplungsmechanismen
 - 2.3.3 Kabelbäume und Leiterplatten: Übersprechen
 - 2.3.4 Verbindungsstrukturen: Verlustmechanismen
 - 2.3.5 Gleich- und Gegentaktströme
 - 2.3.6 Reale Masse
 - 2.3.7 Ab- und Einstrahlmechanismen
 - ▶ **2.3.8 Gehäuse und Karosserie: Hohlraumresonanzen**
 - 2.3.9 Weitere Resonanzeffekte
 - ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
 - ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

- Allgemein: Gehäuse bzw. Karosserie
 - Komplexe Geometrie
 - Es gibt keine analytische Beschreibung
 - Haupteigenschaften entsprechen dem idealen Rechteckhohlraum

- Hohlraumresonanzen für idealen Rechteckhohlraum
 - Resonanzfrequenzen für TE- und TM-Moden:

$$(f_r)_{mnp}^{TM} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\varepsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{c}\right)^2} \quad \begin{matrix} m=1, 2, 3, \dots \\ n=1, 2, 3, \dots \\ p=0, 1, 2, \dots \end{matrix}$$

$$(f_r)_{mnp}^{TE} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\varepsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{c}\right)^2} \quad \begin{cases} m=0,1,2,\dots \\ n=0,1,2,\dots \\ p=0,1,2,\dots \end{cases} \quad \left. \right\} m=n \neq 0$$

mit	a, b und c :	Seitenlangen des Hohlraums
	n, m und p :	Nummern der Resonanzmoden im Bezug zu den x -, y -, z -Koordinaten

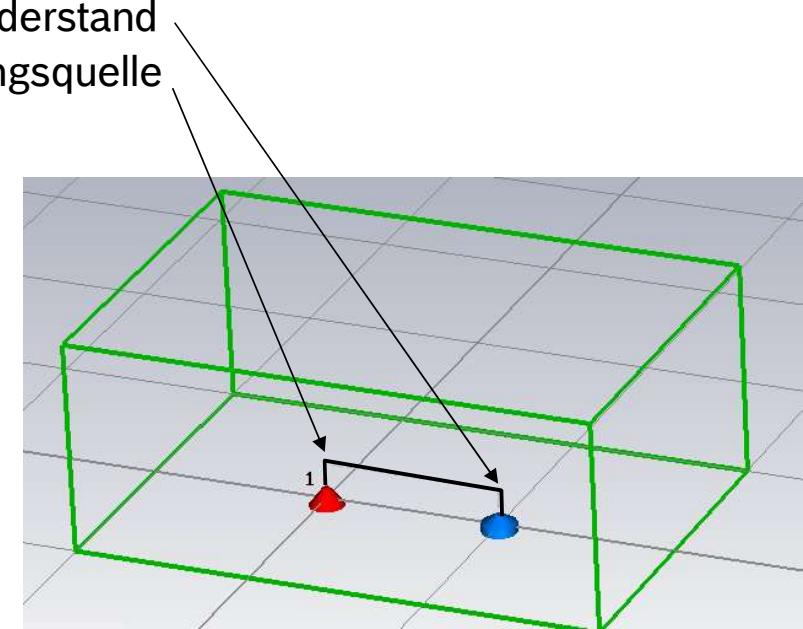
- Unendliche Resonanzenfolge

2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ **2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte**
 - 2.3.1 AVT: HF-Verhalten
 - 2.3.2 Verbindungsstrukturen: Kopplungsmechanismen
 - 2.3.3 Kabelbäume und Leiterplatten: Übersprechen
 - 2.3.4 Verbindungsstrukturen: Verlustmechanismen
 - 2.3.5 Gleich- und Gegentaktströme
 - 2.3.6 Reale Masse
 - 2.3.7 Ab- und Einstrahlmechanismen
 - 2.3.8 Gehäuse und Karosserie: Hohlraumresonanzen**
 - 2.3.9 Weitere Resonanzeffekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

→ Beispiel: Leitung im Hohlraum

- Länge l : 50 mm
- Höhe h : 10 mm
- Grundfläche: Aluminium (AL-Ground)
- Wände: Aluminium
- Last: 50- Ω -Widerstand
- Anregung: Spannungsquelle
- Hohlraum:
- Länge a : 150 mm
- Breite b : 100 mm
- Höhe c : 50 mm
- Simulation der Lastspannung
 - Im Freiraum
 - Im Aluminiumgehäuse



2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik

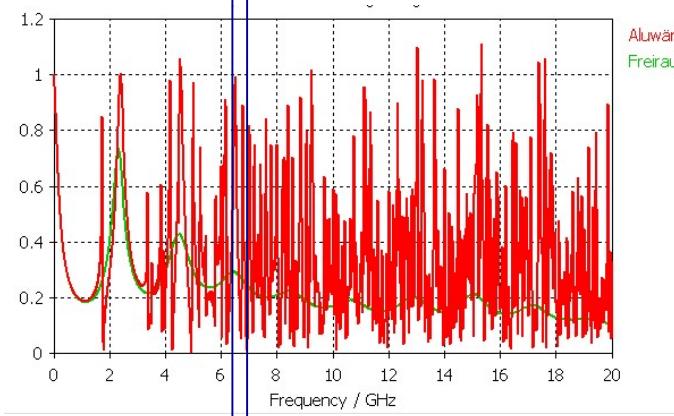
▶ 2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte

- 2.3.1 AVT: HF-Verhalten
- 2.3.2 Verbindungsstrukturen: Kopplungsmechanismen
- 2.3.3 Kabelbäume und Leiterplatten: Übersprechen
- 2.3.4 Verbindungsstrukturen: Verlustmechanismen
- 2.3.5 Gleich- und Gegentaktströme
- 2.3.6 Reale Masse
- 2.3.7 Ab- und Einstrahlmechanismen
- 2.3.8 Gehäuse und Karosserie: Hohlraumresonanzen**
- 2.3.9 Weitere Resonanzeffekte

- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

→ Beispiel: Leitung im Hohlraum

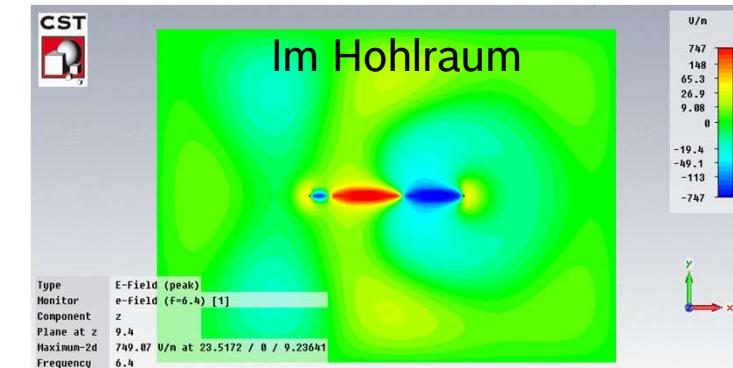
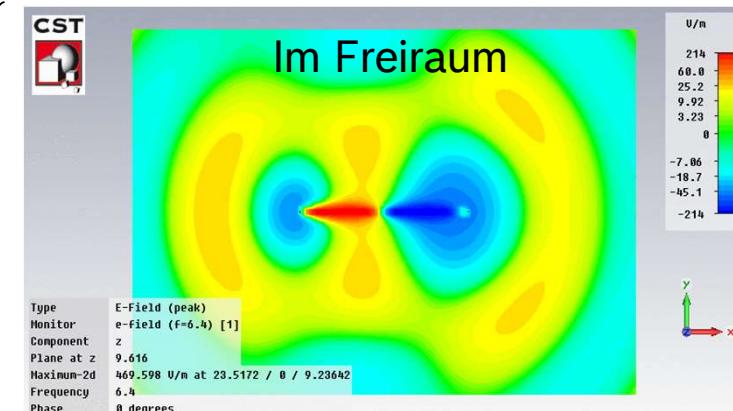
- Riesige Unterschiede
- Leitungsresonanzen
- Hohlraumresonanzen



6.4 GHz

- Stehende Wellen
- Abstrahlung
- „Heiße“ und „kalte“ Zonen

Blick von Oben

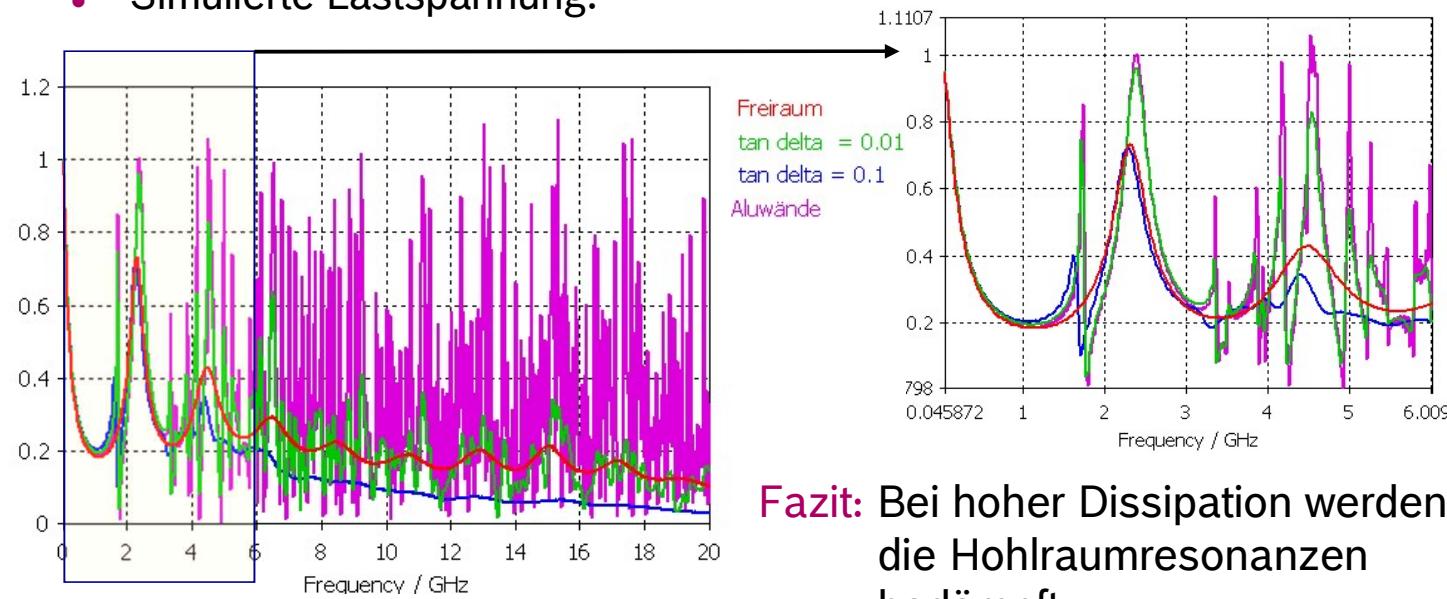


2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ **2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte**
 - 2.3.1 AVT: HF-Verhalten
 - 2.3.2 Verbindungsstrukturen: Kopplungsmechanismen
 - 2.3.3 Kabelbäume und Leiterplatten: Übersprechen
 - 2.3.4 Verbindungsstrukturen: Verlustmechanismen
 - 2.3.5 Gleich- und Gegentaktströme
 - 2.3.6 Reale Masse
 - 2.3.7 Ab- und Einstrahlmechanismen
 - 2.3.8 Gehäuse und Karosserie: Hohlraumresonanzen**
 - 2.3.9 Weitere Resonanzeffekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

→ Einfluss der Dissipation

- Was passiert, wenn das Medium im Hohlraum oder die Wände die EM-Energie absorbieren?
- Numerisches Experiment: Füllen des Hohlraums mit verlustbehafteten Dielektrikum (zwei Varianten $\tan \delta = 0,01$ und $\tan \delta = 0,1$ bei 1 GHz)
- Simulierte Lastspannung:



Fazit: Bei hoher Dissipation werden die Hohlraumresonanzen bedämpft

2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ **2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte**
 - 2.3.1 AVT: HF-Verhalten
 - 2.3.2 Verbindungsstrukturen: Kopplungsmechanismen
 - 2.3.3 Kabelbäume und Leiterplatten: Übersprechen
 - 2.3.4 Verbindungsstrukturen: Verlustmechanismen
 - 2.3.5 Gleich- und Gegentaktströme
 - 2.3.6 Reale Masse
 - 2.3.7 Ab- und Einstrahlmechanismen
 - 2.3.8 Gehäuse und Karosserie: Hohlraumresonanzen**
 - 2.3.9 Weitere Resonanzeffekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

→ Realität: Hohlraumresonanzen in den Gerätegehäusen und Karosserien



- Gerätegehäuse sind sehr dicht gefüllt (Raumkosten)
- Viele Kunststoffelemente, Kabelbäume, Leiter → Dienen zur Dissipation
- Kfz: Sitze, Cockpit, Personen, usw. → Dienen zur Dissipation
- Hohlraum hat viele Öffnungen (Fenster, Türen) → Abstrahlung → Verluste
- Fazit:
Hohlraumresonanzen gehören großteils zu sekundären Effekten in Bezug zur EMV im Kfz-Bereich
Betrachtung ist in ausgewählten Fällen notwendig

2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ **2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte**
 - 2.3.1 AVT: HF-Verhalten
 - 2.3.2 Verbindungsstrukturen: Kopplungsmechanismen
 - 2.3.3 Kabelbäume und Leiterplatten: Übersprechen
 - 2.3.4 Verbindungsstrukturen: Verlustmechanismen
 - 2.3.5 Gleich- und Gegentaktströme
 - 2.3.6 Reale Masse
 - 2.3.7 Ab- und Einstrahlmechanismen
 - 2.3.8 Gehäuse und Karosserie: Hohlraumresonanzen
 - 2.3.9 Weitere Resonanzeffekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

- Es gibt eine große Zahl von Resonanzeffekten mit unterschiedlichen Mechanismen
- Schwerpunkte
 - Gerät hat unbeabsichtigte und beabsichtigte elektrische Energiespeicher:
 - Parasitäre Kapazitäten und Induktivitäten der AVT
 - Nominale und parasitäre Kapazitäten und Induktivitäten der Bauelemente, z.B.: Gatekapazität, ASIC-GND-Versorgungs-Kapazität, SMD-Kondensator
 - Energiespeicher und die AVT bilden unbeabsichtigte Resonanzkreise
 - Störquellen regen diese unbeabsichtigte Resonanzkreise an
 - ➔ HF-Schwingungen
 - HF-Schwingungen stören die empfindlichen Elemente
- Es ergeben sich sehr oft Resonanzeffekte in einem unbeabsichtigten Pfad zwischen der Störquelle und der Störsenke

2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ 2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte

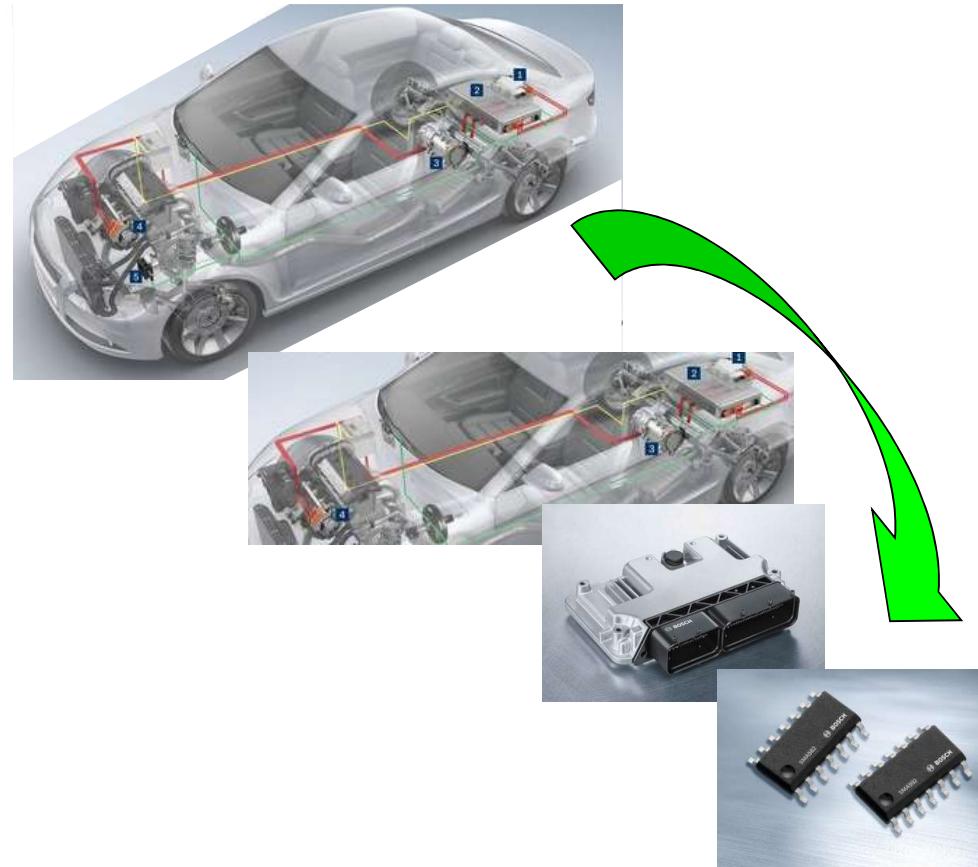
► 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme:

Top-Down-Ansatz

- 2.4.1 Top-down Ansatz
- 2.4.2 Analyse auf der Systemebene
- 2.4.3 Analyse auf der Modulebene
- 2.4.4 Analyse auf der Bauelementebene

- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

Top-down Ansatz



Top-Down-Analyse



Fahrzeuganalyse



Systemanalyse



Komponenten-/Modulanalyse



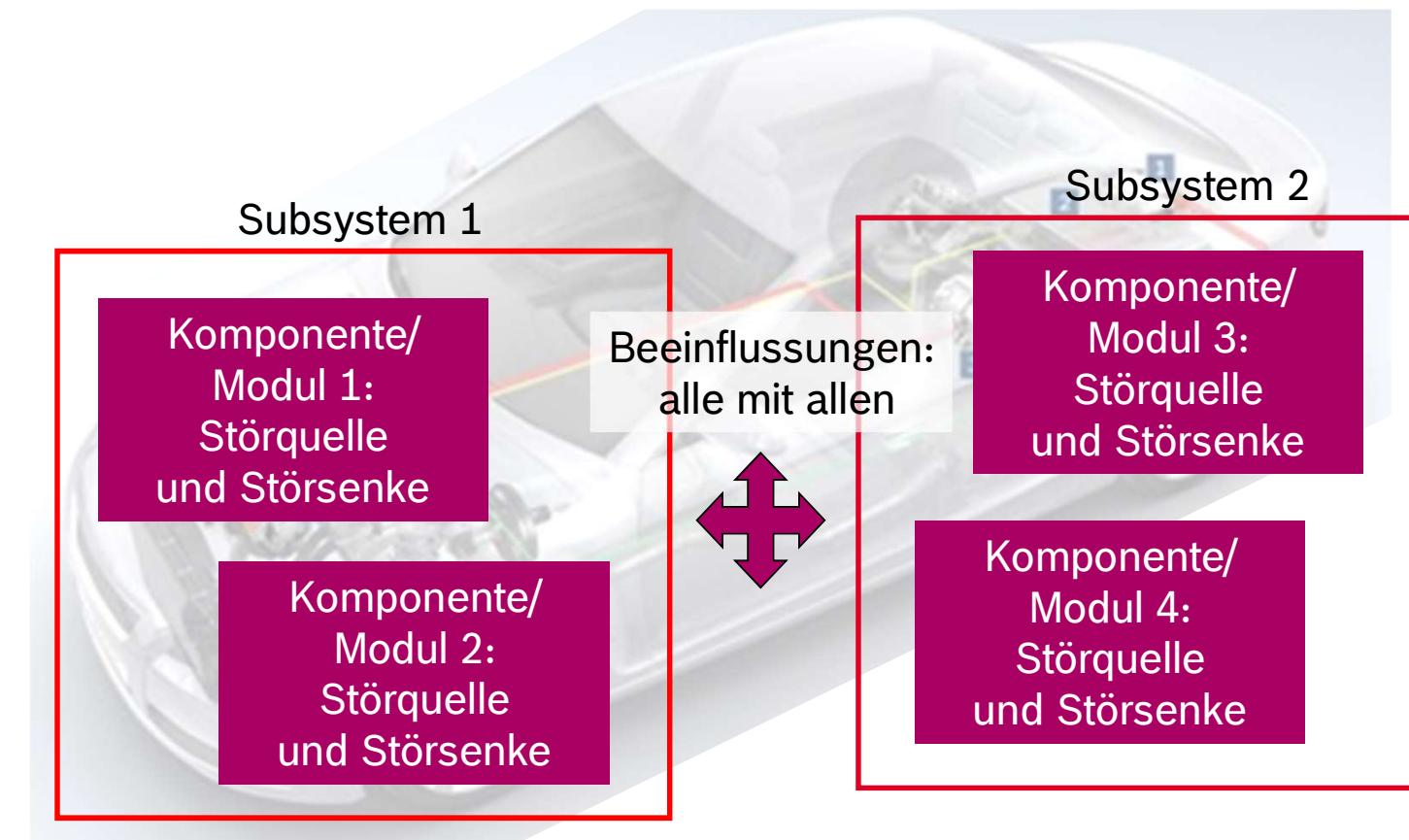
Bauelemente-analyse



2 EMV-Design

→ Allgemeiner Überblick: Störquelle, Störsenke und Störfade im Kfz

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störfade in der Kfz-Technik
- ▶ 2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte
- ▶ **2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme:**
Top-Down-Ansatz
 - 2.4.1 Top-down Ansatz
 - 2.4.2 Analyse auf der Systemebene
 - 2.4.3 Analyse auf der Modulebene
 - 2.4.4 Analyse auf der Bauelementebene
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“



2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störfade in der Kfz-Technik
- ▶ 2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte
- ▶ **2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme:**
Top-Down-Ansatz
 - 2.4.1 Top-down Ansatz
 - 2.4.2 Analyse auf der Systemebene
 - 2.4.3 Analyse auf der Modulebene
 - 2.4.4 Analyse auf der Bauelementebene
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

Problemstellung Fahrzeug / System

- ▶ Hohe Komplexität
 - Große Anzahl von gegenseitigen Beeinflussungen
 - Nur wenige Beeinflussungen sind relevant! -
 - Koppelpfade: sehr komplex → Analyse ist kaum möglich
 - Komplett-Simulation unmöglich (Zeitaufwand)
 - Messungen:
 - „Black-Box-Beschreibung“
 - Häufig großer Messfehler wegen Komplexität
- ▶ EMV-Konzept für Fahrzeug/System
 - riesiger Zeitaufwand für Analyse
 - Direkte detaillierte Lösung unwahrscheinlich

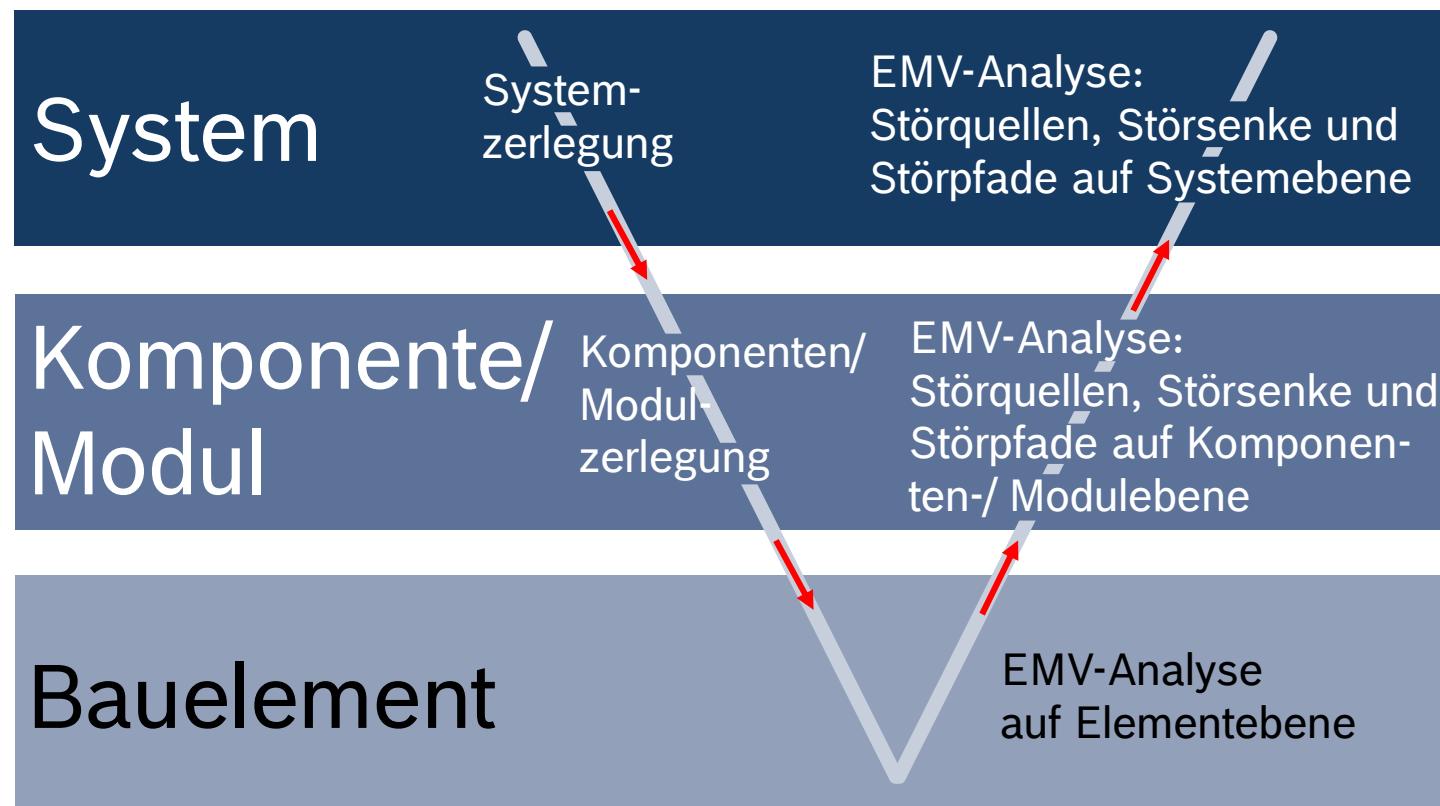
Wie sind solche Probleme zu behandeln?

- ▶ Antwort: **hierarchische Systemdarstellung → V-Modell**

2 EMV-Design

V-Modell: EMV - Konzept für komplexe System

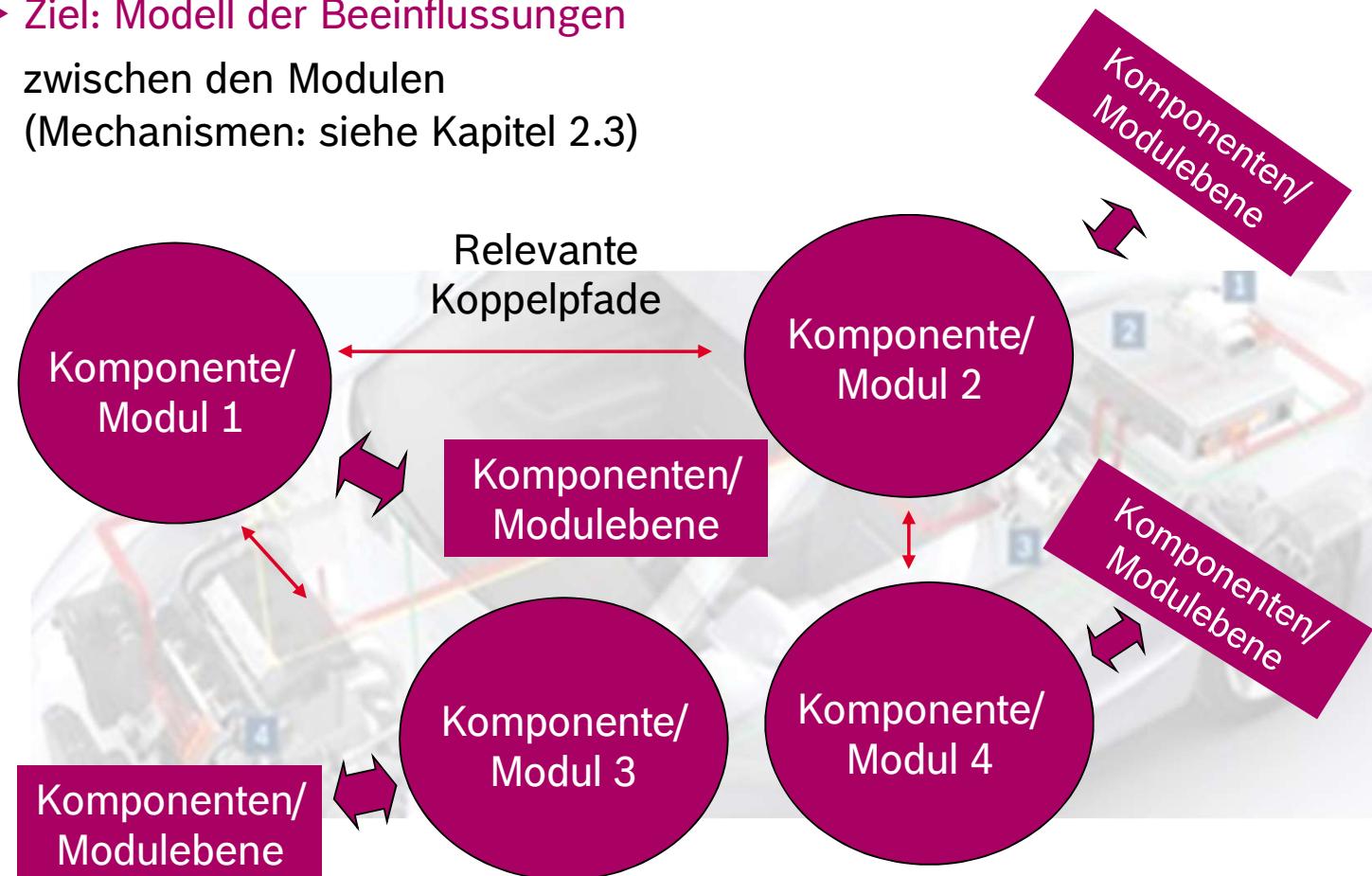
- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ 2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte
- ▶ **2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz**
 - 2.4.1 Top-down Ansatz**
 - 2.4.2 Analyse auf der Systemebene
 - 2.4.3 Analyse auf der Modulebene
 - 2.4.4 Analyse auf der Bauelementebene
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“



2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ 2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte
- ▶ **2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz**
 - 2.4.1 Top-down Ansatz
 - 2.4.2 Analyse auf der Systemebene**
 - 2.4.3 Analyse auf der Modulebene
 - 2.4.4 Analyse auf der Bauelementebene
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

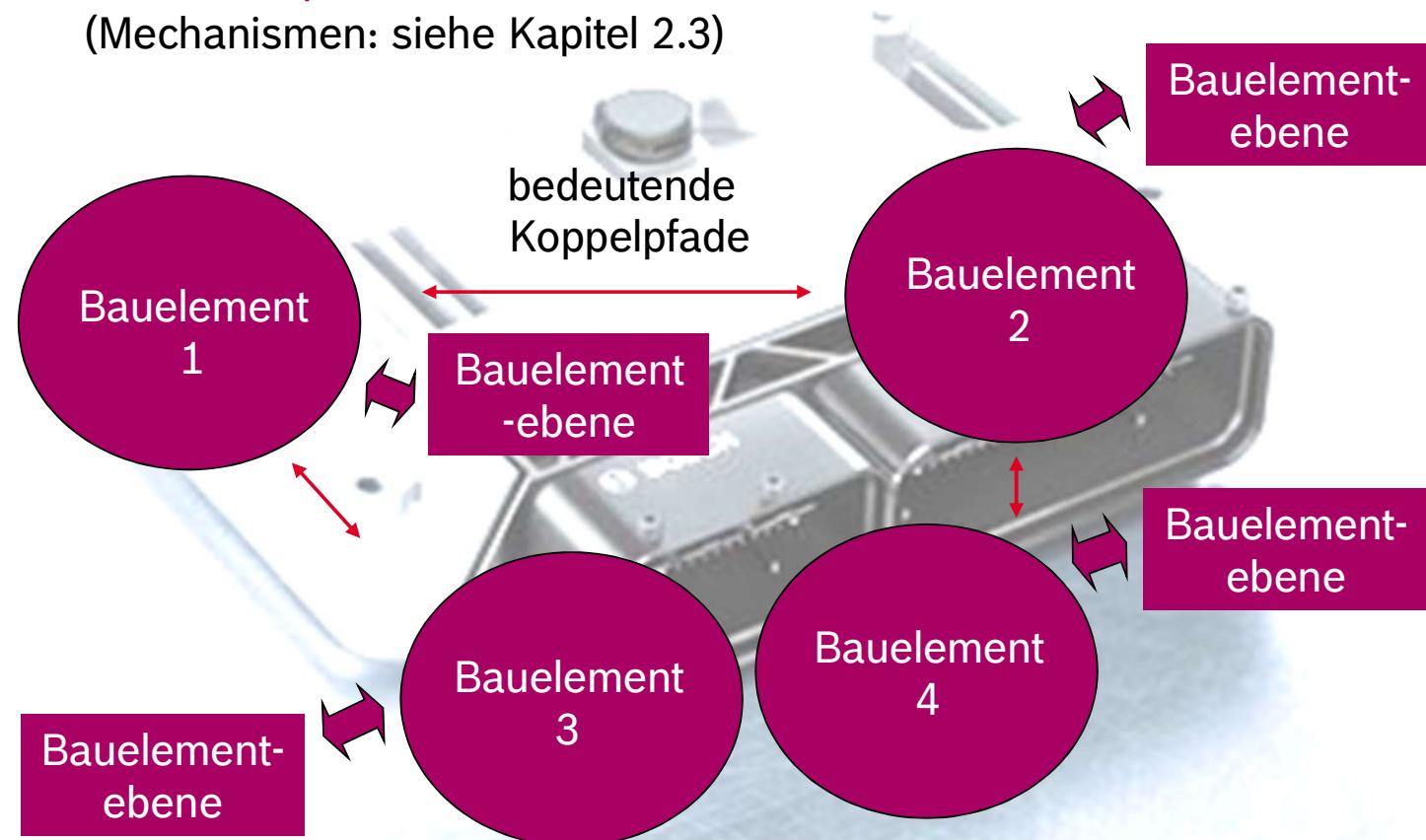
► Ziel: Modell der Beeinflussungen zwischen den Modulen
(Mechanismen: siehe Kapitel 2.3)



2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ 2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte
- ▶ **2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz**
 - 2.4.1 Top-down Ansatz
 - 2.4.2 Analyse auf der Systemebene
 - 2.4.3 Analyse auf der Modulebene**
 - 2.4.4 Analyse auf der Bauelementebene
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

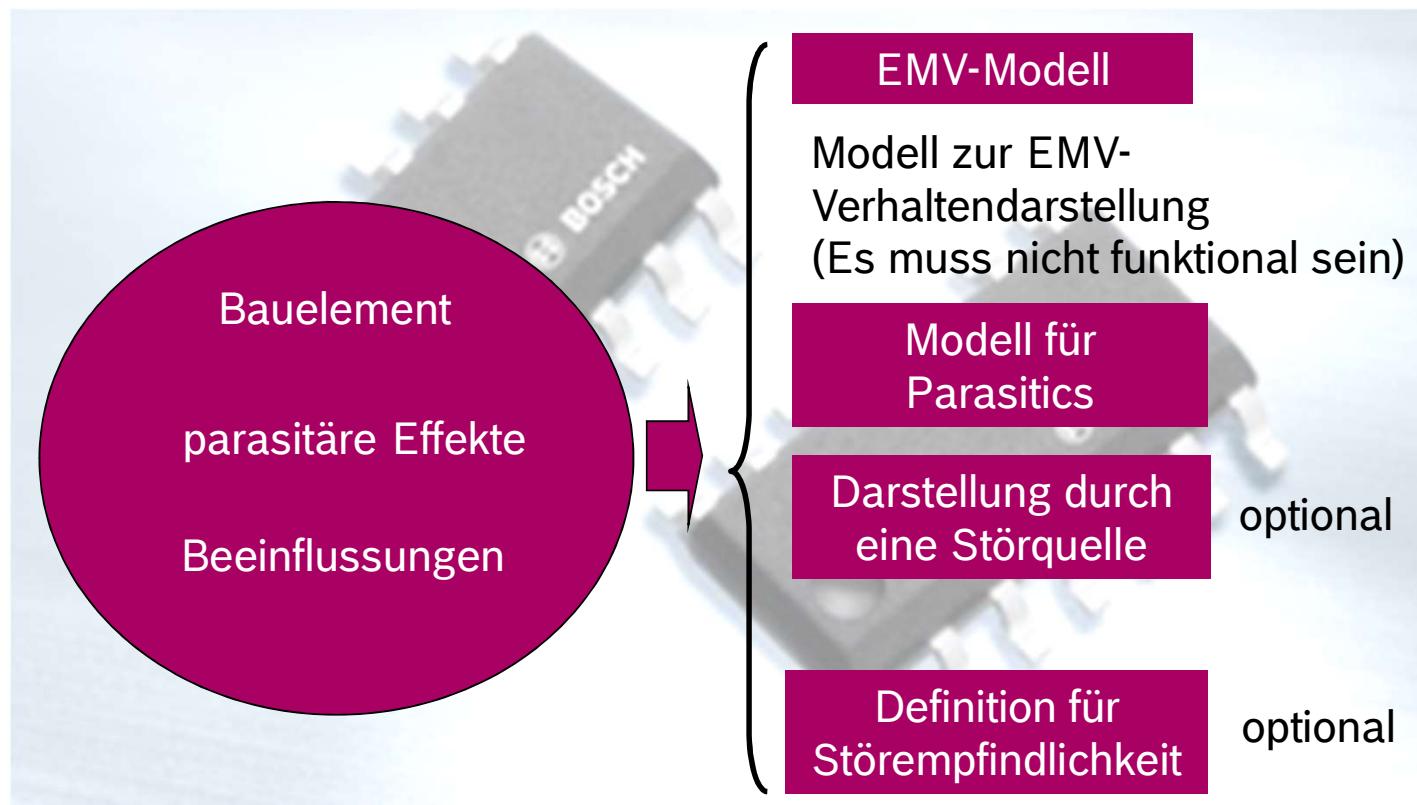
► Ziel: Modell der internen Beeinflussungen in den Komponenten / Modulen
(Mechanismen: siehe Kapitel 2.3)



2 EMV-Design

► Allgemeine Darstellung

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ 2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte
- ▶ **2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz**
 - 2.4.1 Top-down Ansatz
 - 2.4.2 Analyse auf der Systemebene
 - 2.4.3 Analyse auf der Modulebene
 - 2.4.4 Analyse auf der Bauelementebene**
- ▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

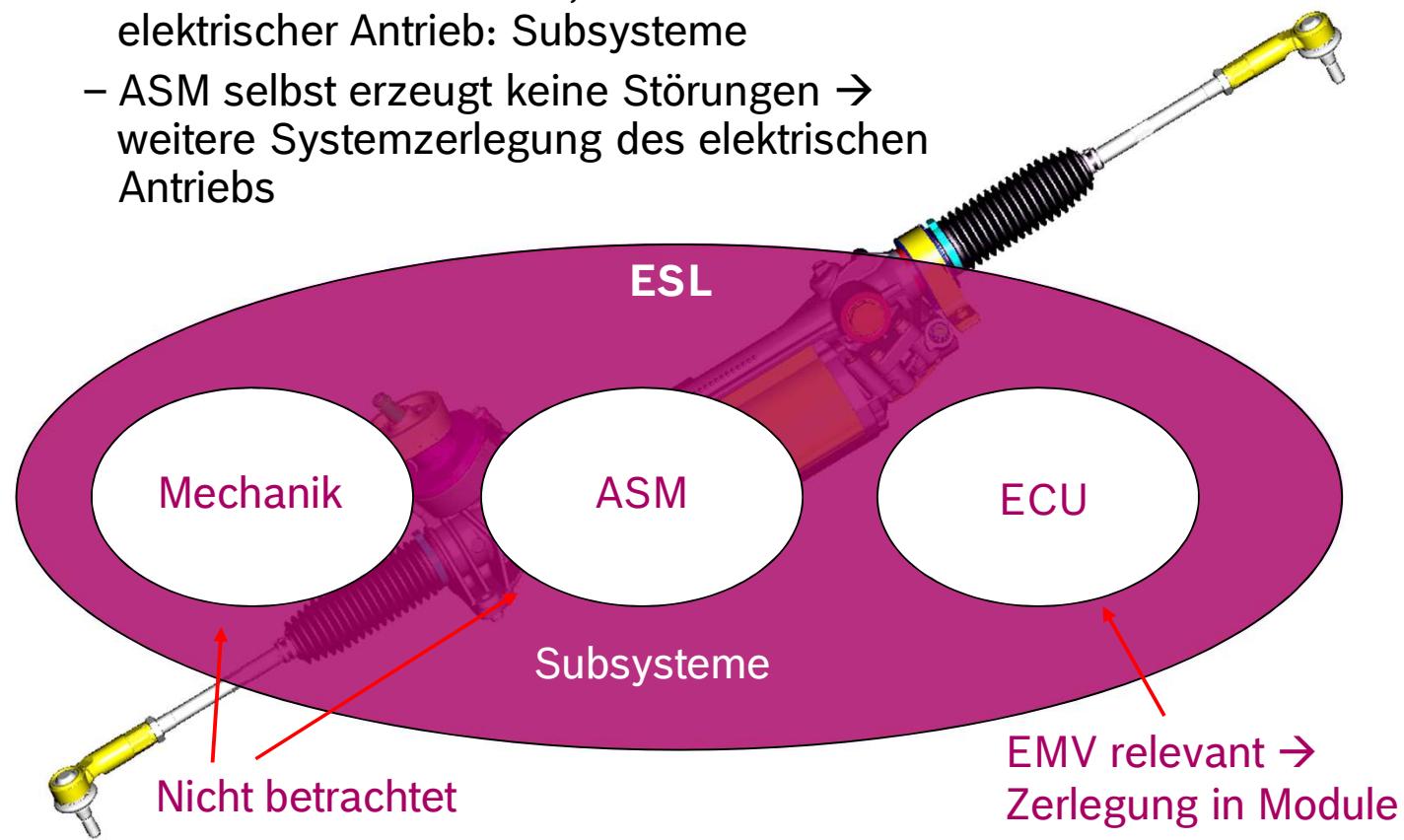


2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ 2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ **2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“**
 - 2.5.1 Systemzerlegung**
 - 2.5.2 Parasitäre Effekte
 - 2.5.3 Störpfadskizze
 - 2.5.4 Vorgaben: Entstörkonzept
 - 2.5.5 EMV – Konzept: Dokumentation

→ Schritt 1: Zerlegung auf Systemebene

- Mechanische Elemente, Motor und elektrischer Antrieb: Subsysteme
- ASM selbst erzeugt keine Störungen → weitere Systemzerlegung des elektrischen Antriebs



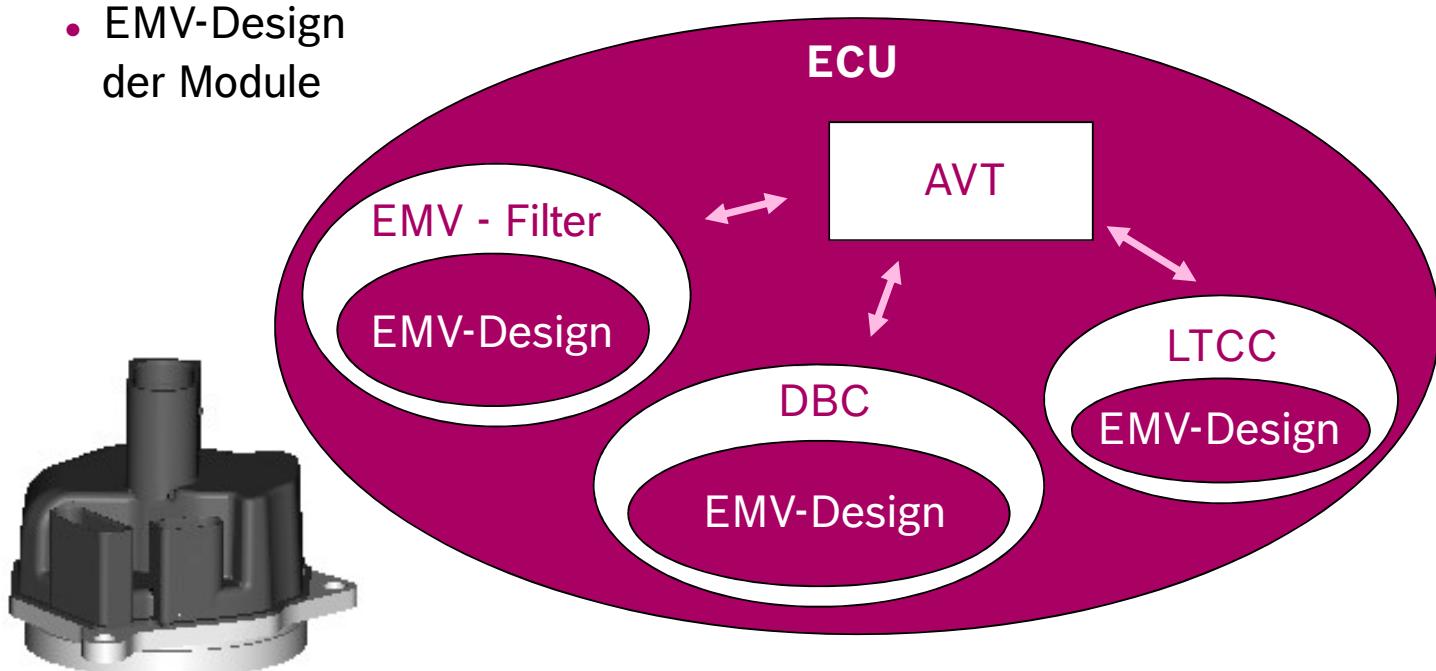
2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ 2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ **2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“**
 - 2.5.1 Systemzerlegung
 - 2.5.2 Parasitäre Effekte
 - 2.5.3 Störpfadskizze
 - 2.5.4 Vorgaben: Entstörkonzept
 - 2.5.5 EMV – Konzept: Dokumentation

→ Schritt 2: Zerlegung auf Modulebene

→ 3 Module

- Beeinflussungen zwischen Modulen
- Interne Beeinflussungen in den Modulen
- EMV-Design

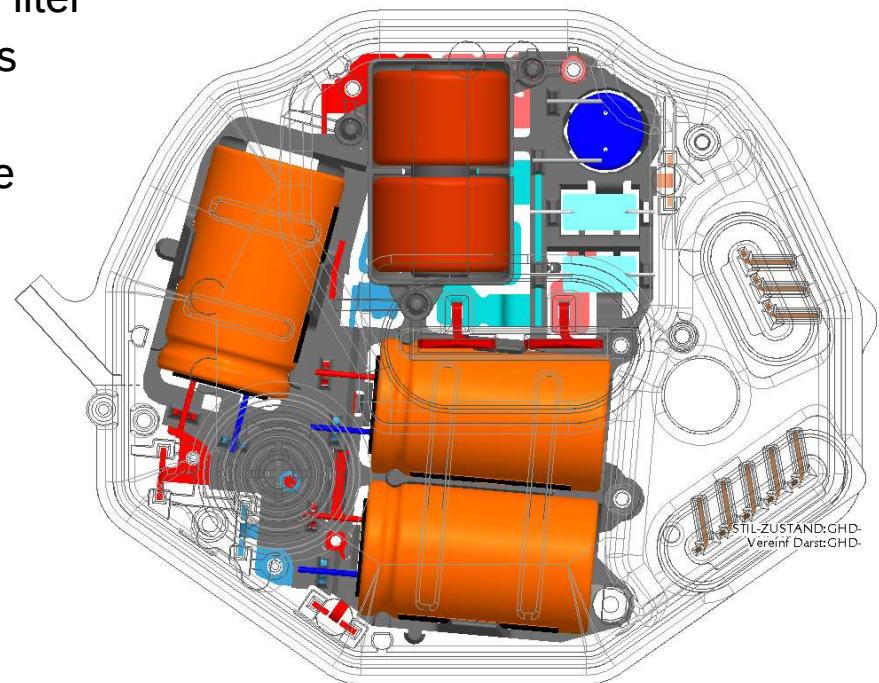


2 EMV-Design

→ Schritt 3: EMV Design: Filter

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ 2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ **2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“**
 - 2.5.1 Systemzerlegung**
 - 2.5.2 Parasitäre Effekte
 - 2.5.3 Störpfadskizze
 - 2.5.4 Vorgaben: Entstörkonzept
 - 2.5.5 EMV – Konzept: Dokumentation

- Filterkonzeptentwicklung
- Abschätzung der unbeabsichtigten Kopplungen im Filter
- Abschätzung des HF-Verhaltens der Bauelemente

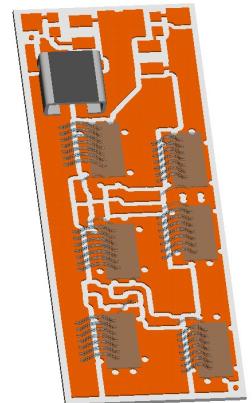


2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störfade in der Kfz-Technik
- ▶ 2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme:
Top-Down-Ansatz
- ▶ **2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“**
 - 2.5.1 Systemzerlegung
 - 2.5.2 Parasitäre Effekte
 - 2.5.3 Störfadskizze
 - 2.5.4 Vorgaben: Entstörkonzept
 - 2.5.5 EMV – Konzept: Dokumentation

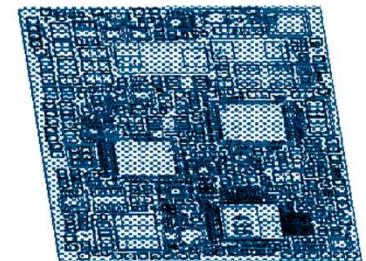
→ Schritt 4: EMV Design: DBC – Modul

- MOSFETs:
 - Störquellen → Modell der Störquelle
 - EMV - Analyse auf der Bauelementebene
 - Kopplungsmodell im DBC - Modul
 - Layoutvorschriften



→ Schritt 5: EMV Design: LTCC – Modul

- Analyse der möglichen Einkopplungsmechanismen
- Störquellen, Störsenken
- Layoutvorschriften



2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störfade in der Kfz-Technik
- ▶ 2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme:
Top-Down-Ansatz
- ▶ **2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“**
 - 2.5.1 Systemzerlegung
 - 2.5.2 Parasitäre Effekte**
 - 2.5.3 Störfadskizze
 - 2.5.4 Vorgaben: Entstörkonzept
 - 2.5.5 EMV – Konzept: Dokumentation

Parasitäre Effekte

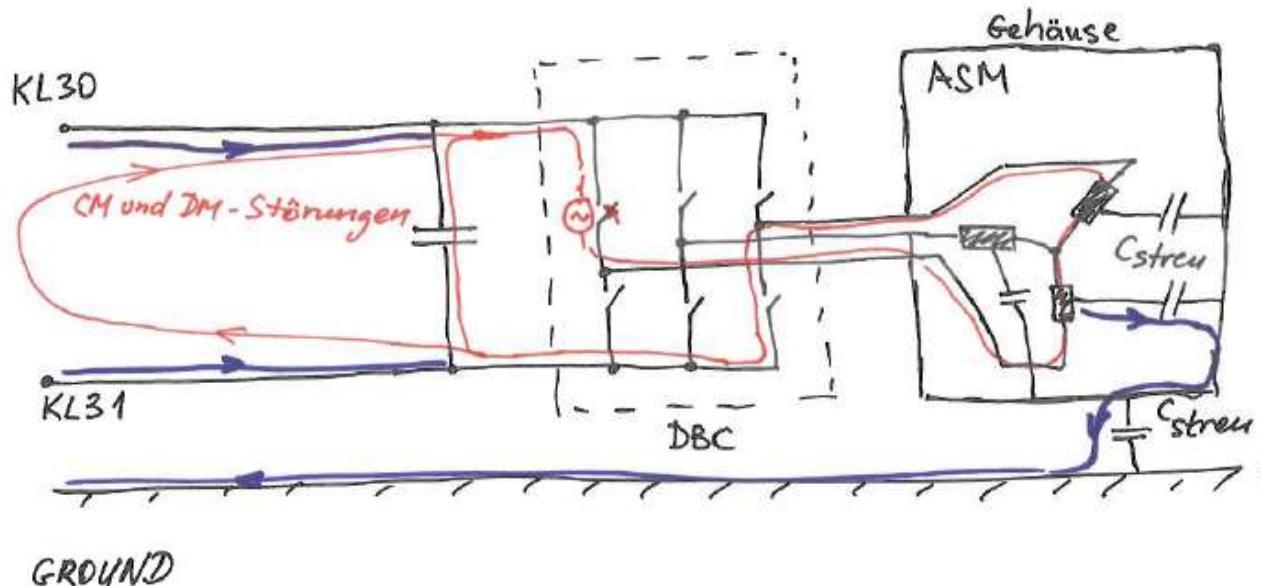
- Stanzgitter, Bonds, Leiterzüge
 - Parasitäre Induktivitäten, magnetische Kopplungen, Abstrahlung
- ECU - Gehäuse (Kunststoff)
 - Keine Schirmwirkung, keine Hohlraumresonanzen
- Motorgehäuse
 - Nichtideale Masse (Ground)
- Motor
 - Streukapazität (Wicklungen – Gehäuse), magnetische Felder (geschirmt), Pfad für den CM-Strom
- DBC
 - MOSFETs: Störquelle

2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ 2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ **2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“**
 - 2.5.1 Systemzerlegung
 - 2.5.2 Parasitäre Effekte
 - 2.5.3 Störpfadskizze**
 - 2.5.4 Vorgaben: Entstörkonzept
 - 2.5.5 EMV – Konzept: Dokumentation

Störpfadskizze

- Aus Erfahrung:
 - Störaussendung kritisch (im Fall einer ESL)
 - Störfestigkeit eher unkritisch
- Vermutlicher Störpfad



2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ 2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ **2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“**
 - 2.5.1 Systemzerlegung
 - 2.5.2 Parasitäre Effekte
 - 2.5.3 Störpfadskizze**
 - 2.5.4 Vorgaben: Entstörkonzept
 - 2.5.5 EMV – Konzept: Dokumentation

- Gibt es weitere, andere Störpfade?
- Ist auf Designebene schwer vorher zu sagen
- Maßnahmen für den vermuteten Störpfad
- Grobe Entstörkonzeptplanung:
AE/EMC Vorschriften für ASM-Motoren
 - CM/DM-Drossel (siehe Kapitel 3)
 - C_x – und C_y – Entstörkondensatoren (siehe Kapitel 3)
 - Eingang: FOKO (Folienkondensator) und Π – Filter (siehe Kapitel 3)
- Weitere Arbeiten
 - Vorläufige Planung der vorgegebenen EMV – Maßnahmen (detailliert im Kapitel 3)
 - Stanzgitterauslegungskonzept
 - EMV – Filterkonzept
 - Layoutkonzept für DBC
 - Layoutkonzept für LTCC

2 EMV-Design

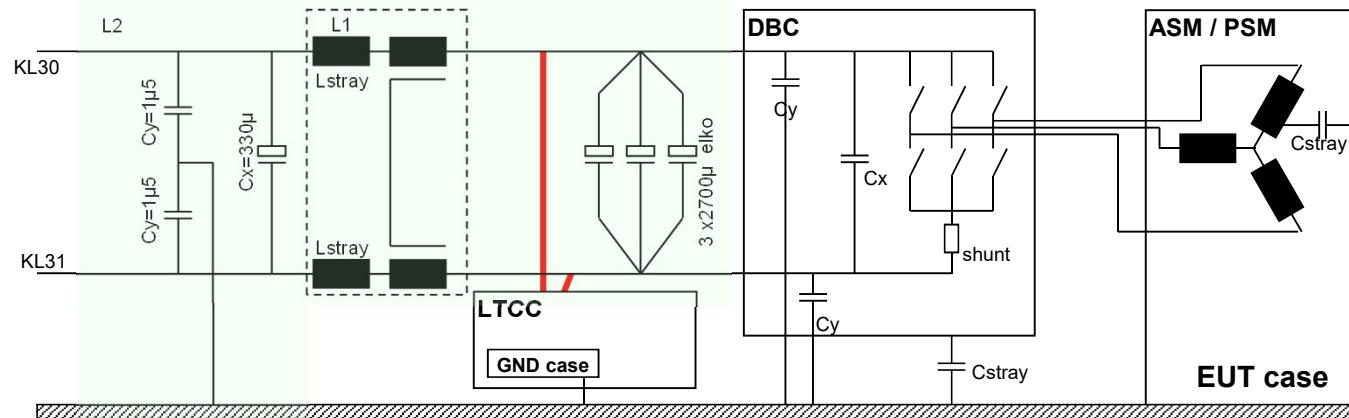
Vorgaben: Entstörkonzept

Grundsätzliche Vorgaben zur Stanzgitterauslegung des Filters im Deckel

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ 2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ **2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“**
 - 2.5.1 Systemzerlegung
 - 2.5.2 Parasitäre Effekte
 - 2.5.3 Störpfadskizze
 - 2.5.4 Vorgaben: Entstörkonzept**
 - 2.5.5 EMV – Konzept: Dokumentation

Skizze zum „Layout, Stanzgitterauslegung für Filterdeckel

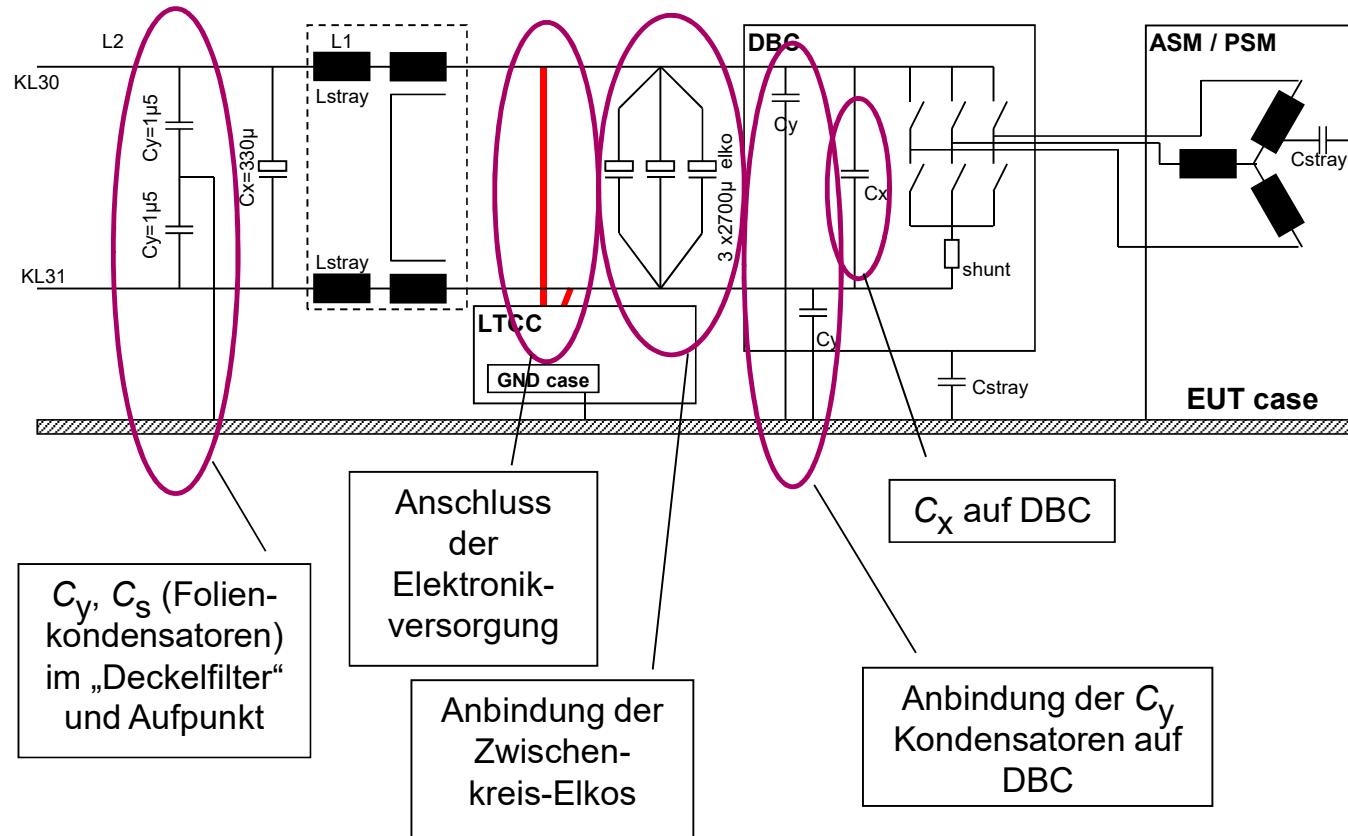
- dabei Zwischenkreis-Elkos über DBC „platzieren / entlang führen“



2 EMV-Design

Einzelne Parameter bei der Stanzgitter- sowie DBC-Auslegung

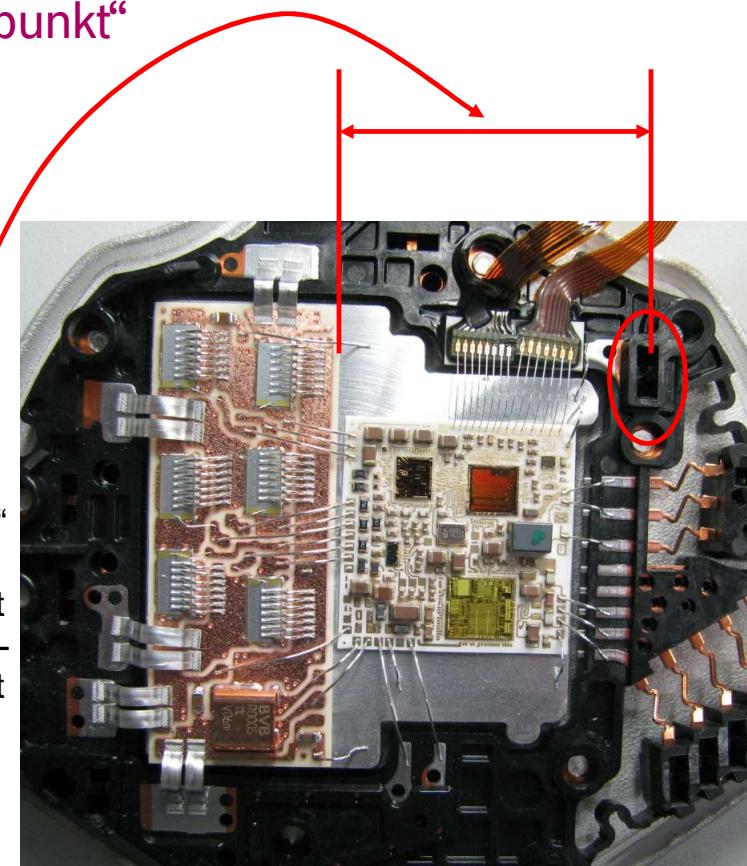
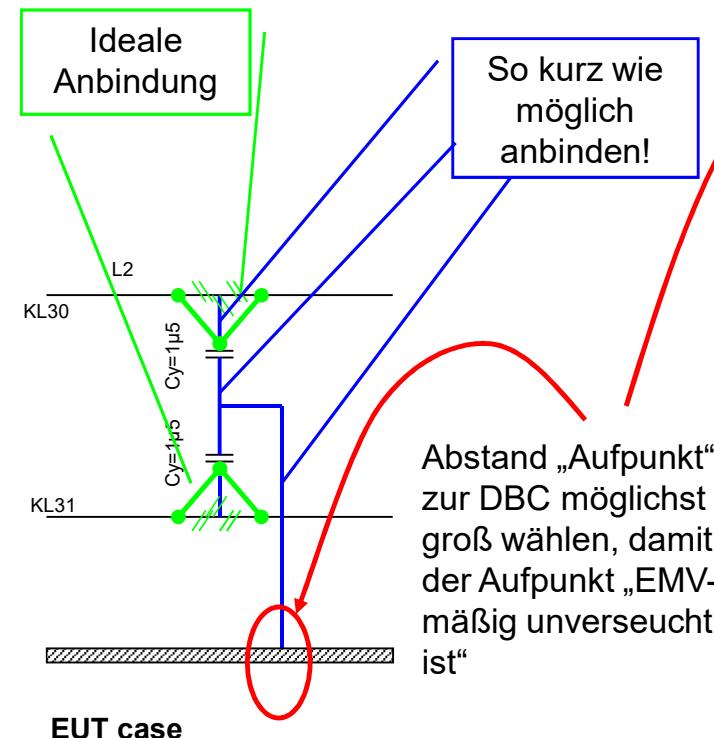
- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ 2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ **2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“**
 - 2.5.1 Systemzerlegung
 - 2.5.2 Parasitäre Effekte
 - 2.5.3 Störpfadskizze
 - 2.5.4 Vorgaben: Entstörkonzept**
 - 2.5.5 EMV – Konzept: Dokumentation



2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ 2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ **2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“**
 - 2.5.1 Systemzerlegung
 - 2.5.2 Parasitäre Effekte
 - 2.5.3 Störpfadskizze
 - 2.5.4 Vorgaben: Entstörkonzept**
 - 2.5.5 EMV – Konzept: Dokumentation

C_y-Kondensatoren (Fokus) im “Filterdeckel” und deren „Aufpunkt“



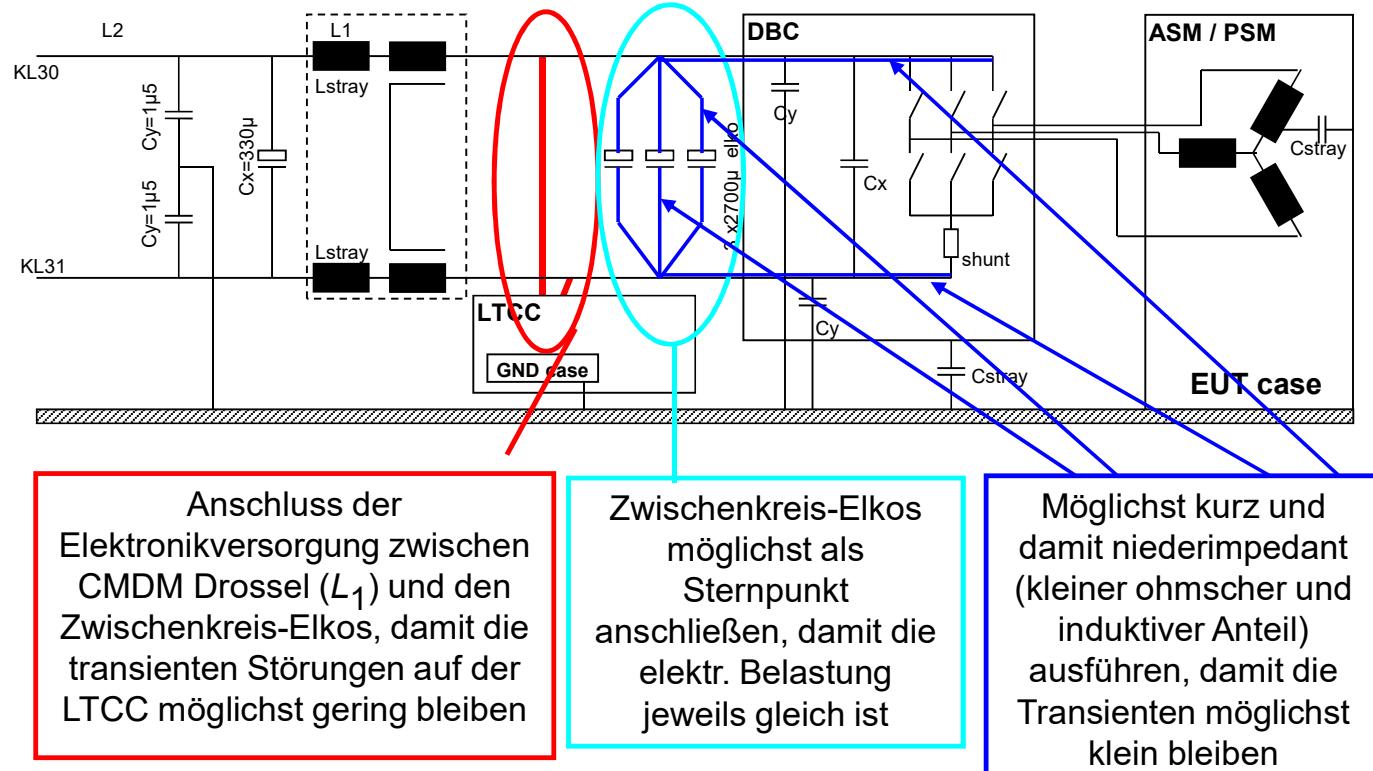
2 EMV-Design

Anbindung der Elektronikversorgung Anbindung Zwischenkreis-Elkos

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ 2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme:
Top-Down-Ansatz

▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

- 2.5.1 Systemzerlegung
- 2.5.2 Parasitäre Effekte
- 2.5.3 Störpfadskizze
- 2.5.4 Vorgaben: Entstörkonzept**
- 2.5.5 EMV – Konzept: Dokumentation

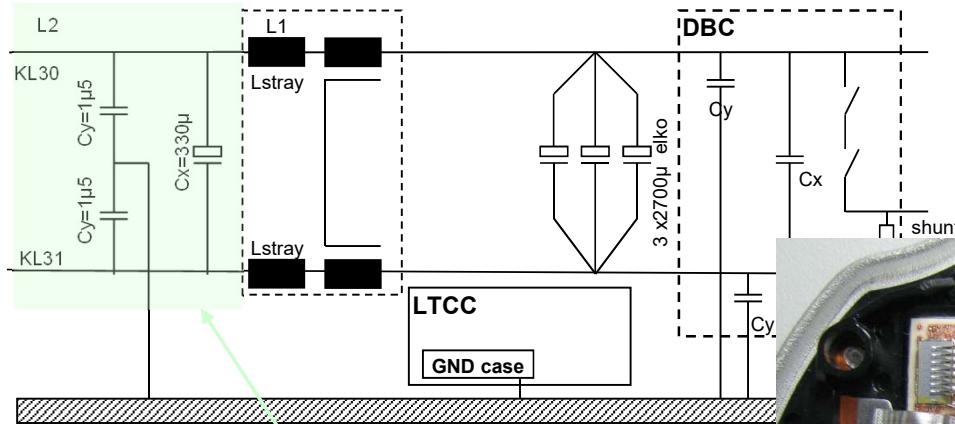


2 EMV-Design

Anbindung Elektronikversorgung

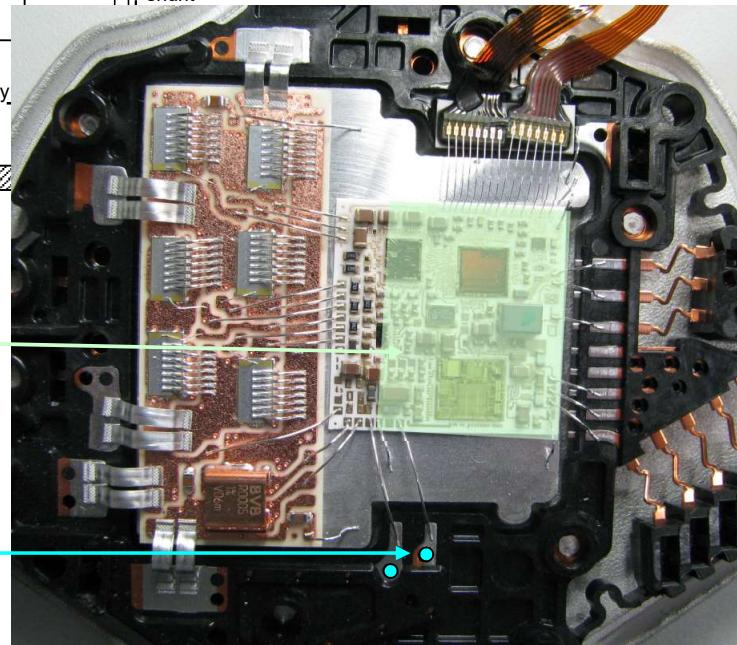
- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ 2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ **2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“**

- 2.5.1 Systemzerlegung
- 2.5.2 Parasitäre Effekte
- 2.5.3 Störpfadskizze
- 2.5.4 Vorgaben: Entstörkonzept**
- 2.5.5 EMV – Konzept: Dokumentation



Diese Leitungen möglichst nicht dicht über der LTCC über dem µC führen, damit die µC/ASIC-Direktabstrahlung nicht aus dem ECU „herausgekoppelt“ werden kann.

**ESL3
Elektronikversorgung**



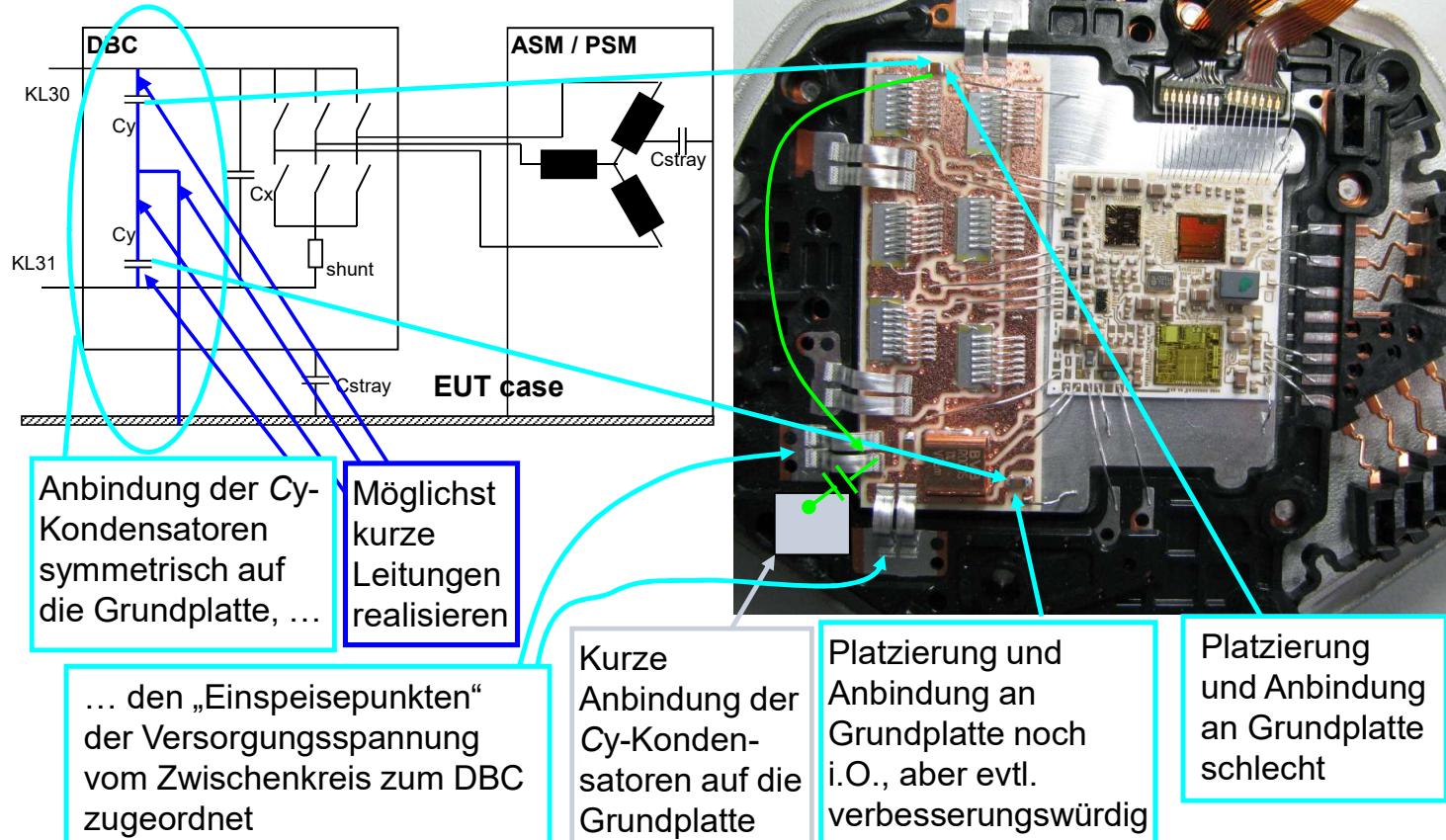
2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störfäde in der Kfz-Technik
- ▶ 2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz

▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

- 2.5.1 Systemzerlegung
- 2.5.2 Parasitäre Effekte
- 2.5.3 Störfadskizze
- 2.5.4 Vorgaben: Entstörkonzept**
- 2.5.5 EMV – Konzept: Dokumentation

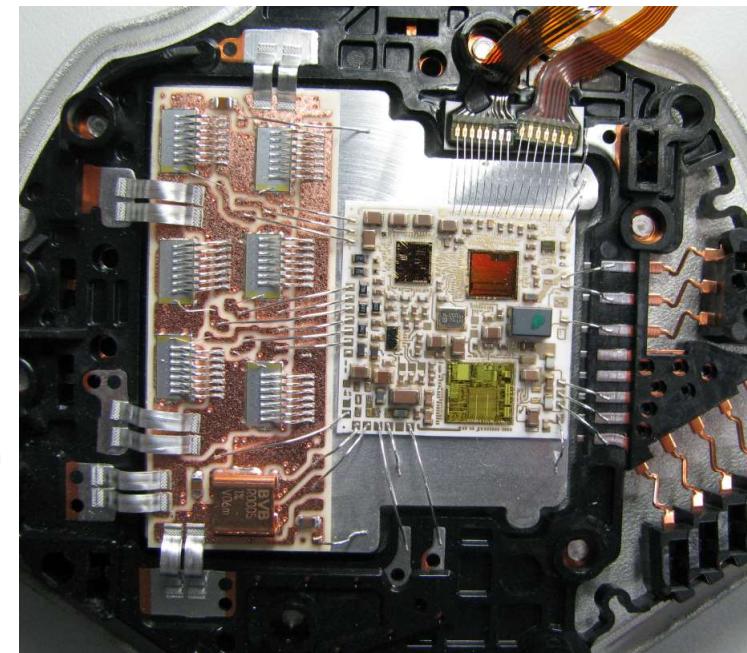
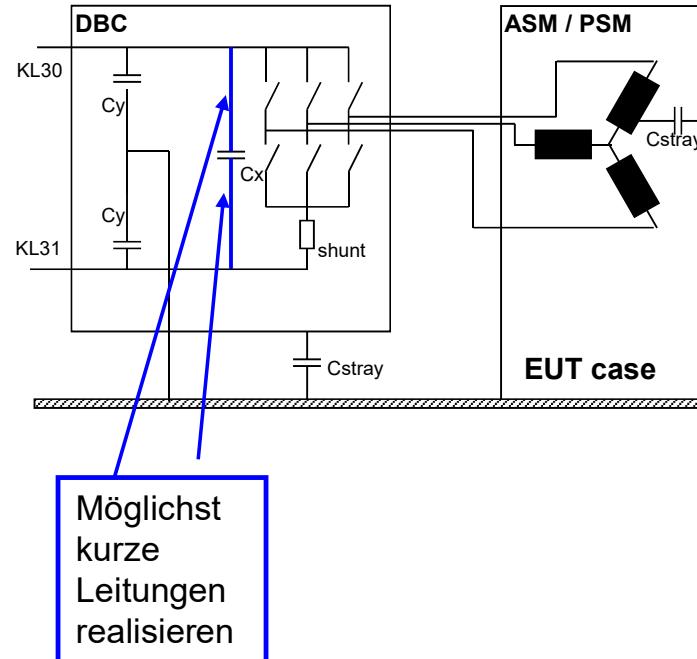
Anbindung der C_y Kondensatoren auf der DBC



2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ 2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ **2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“**
 - 2.5.1 Systemzerlegung
 - 2.5.2 Parasitäre Effekte
 - 2.5.3 Störpfadskizze
 - 2.5.4 Vorgaben: Entstörkonzept**
 - 2.5.5 EMV – Konzept: Dokumentation

C_X Kondensator auf der DBC



2 EMV-Design

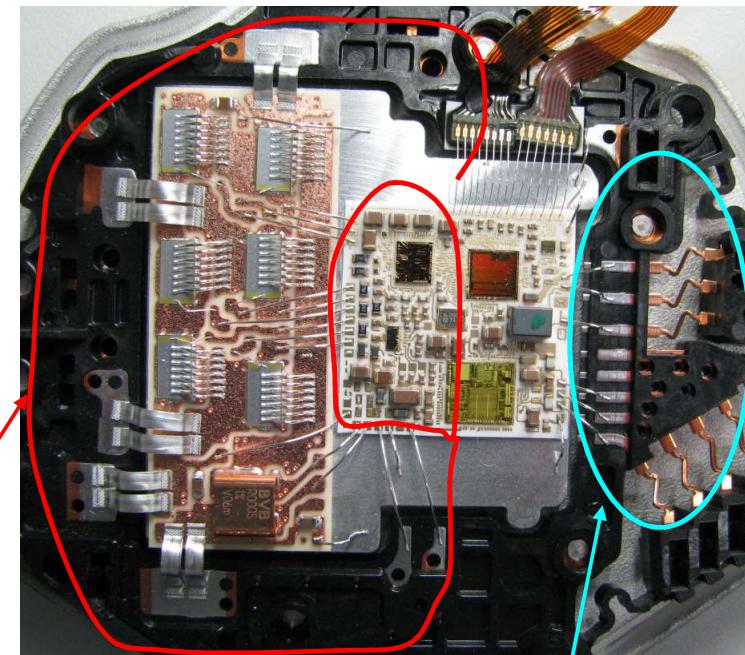
- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störfade in der Kfz-Technik
- ▶ 2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ **2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“**

- 2.5.1 Systemzerlegung
- 2.5.2 Parasitäre Effekte
- 2.5.3 Störfadskizze
- 2.5.4 Vorgaben: Entstörkonzept**
- 2.5.5 EMV – Konzept: Dokumentation

Allgemeine Vorgaben zur Kleinsignalleitungsführung in Bezug auf Powerleitungen

Allgemein sollten die Kleinsignal- Leitungen räumlich von den Power- leitungen getrennt sein!

GUT:
Powerleitungen werden in diesem Bereich geführt
→ dadurch räumliche Trennung zu Kleinsignal-Anschlüssen gegeben



GUT:
Nur an einer Seite
Abgang für Kleinsignal- Leitungen

2 EMV-Design

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störfade in der Kfz-Technik
- ▶ 2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ **2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“**

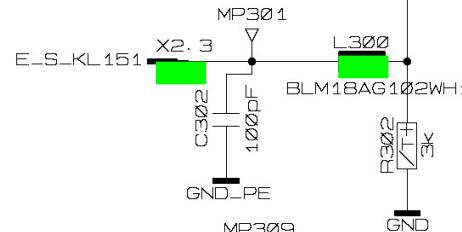
- 2.5.1 Systemzerlegung
- 2.5.2 Parasitäre Effekte
- 2.5.3 Störfadskizze
- 2.5.4 Vorgaben: Entstörkonzept**
- 2.5.5 EMV – Konzept: Dokumentation

Vorgaben zur Emissionsunterdrückung auf der LTCC

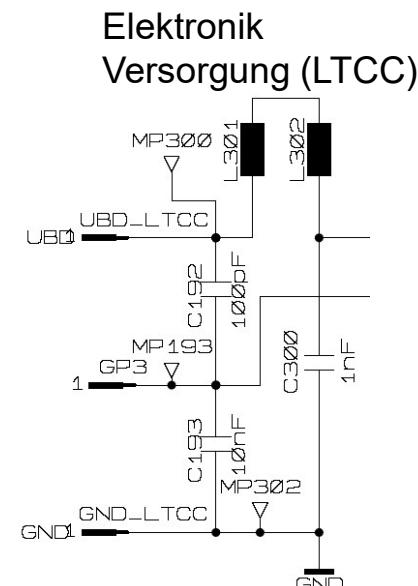
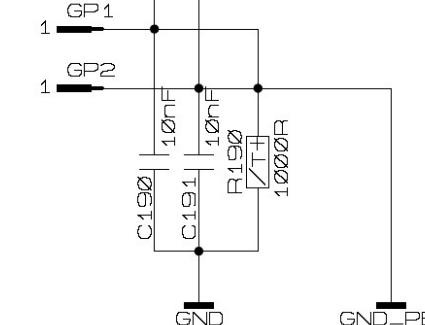
→ EMV-Maßnahmen auf der LTCC

- Emissionsunterdrückung von KL15 mittels Widerständen
- Verbindung von Elektronik GND mit EUT Gehäusepotential (GND_PE)
- Schaltung für Elektronik-Versorgung (LTCC)
- Einsatz von 100- μ H-CAN-Drossel zur Emissionsunterdrückung am Koppelpfad CAN

KL15 Emissionsunterdrückung



Verbindung von Elektronik GND mit EUT Gehäusepotential (GND_PE)



2 EMV-Design

EMV - Konzept: Dokumentation

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störpfade in der Kfz-Technik
- ▶ 2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz
- ▶ **2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“**
 - 2.5.1 Systemzerlegung
 - 2.5.2 Parasitäre Effekte
 - 2.5.3 Störpfadskizze
 - 2.5.4 Vorgaben: Entstörkonzept
 - 2.5.5 EMV – Konzept: Dokumentation**

- Bisher: nur interne (für AE/EMC) Dokumentation (Folien)
- EMV-Design Output: „EMC Concept“

→ Inhalt

5	Design basics
5.1	Stanzgitter
5.1.1	FOKO's
5.1.2	Pi-Filter
5.1.3	Zwischenkreis Elko's
5.1.4	Abschirmblech
5.2	LTCC
5.2.1	Abblockkonzept
5.2.2	Abschirmkonzept
5.2.3	Spannungsreglerkonzept
5.2.4	Stecker-Kondensatoren / Ferrite
5.3	DBC
5.3.1	Parasitäre Elemente
5.3.2	EMV-Beschaltung
5.3.3	MOS-FET

Report:	EMC concept V02	confidential, internal
Issue	V02	
Topic	EMC concept PowerPack Gen 3	
Description		

EPS

**Electric
Power
Steering**



BOSCH

2 EMV-Design

→ Produktentstehungsprozess bei Bosch (PEP)

- ▶ Allgemein
- ▶ 2.1 Störquellen und Störsenken in der Kfz-Technik
- ▶ 2.2 Störfäde in der Kfz-Technik
- ▶ 2.3 Überblick: EMV-relevante parasitäre Effekte
- ▶ 2.4 EMV-Konzept für komplexe Systeme: Top-Down-Ansatz

▶ 2.5 EMV-Design am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

- 2.5.1 Systemzerlegung
- 2.5.2 Parasitäre Effekte
- 2.5.3 Störfadskizze
- 2.5.4 Vorgaben: Entstörkonzept

2.5.5 EMV – Konzept: Dokumentation

