

# 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



## 5. EMV-Simulation

# 5 EMV-Simulation

## Übersicht

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

## Simulation ⇔ Entwicklungsmessungen

Simulation und Messungen => zwei Ansätze zur Modellerstellung

### Simulation

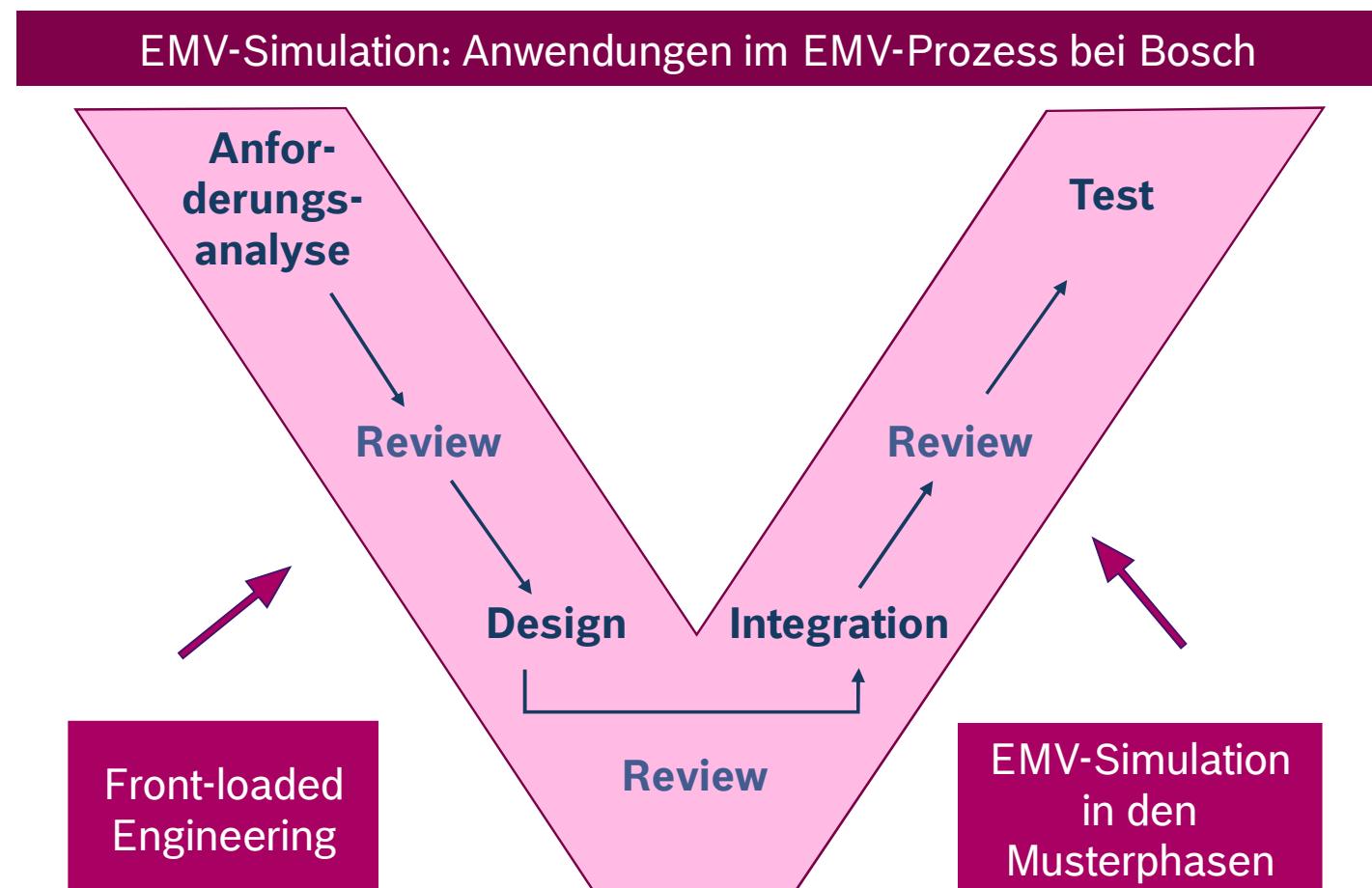
- Simulation mittels eines Modells
- Das Modell kann ungenau / unzureichend sein
- Hardware Muster nur für Modellvalidierung notwendig
- Das „Innenleben“ des Gerätes ist bekannt (im Rahmen der Modellgenauigkeit)
- Kosten relativ gering: Simulationsexperte und Software (Rechner / Lizenz)

### Entwicklungsmessungen

- Messung des Systemverhaltens
- Messergebnisse sind häufig nicht repräsentativ
- Stark vereinfachte oder heuristische Modelle aufgrund des Verhaltens
- Hardware-Muster notwendig (Verfügbarkeit, Kosten)
- Kosten relativ hoch: Messlabor & Messteam

# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“



# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

## EMV-Simulation: Anwendungen im EMV-Prozess bei Bosch

### → EMV-Simulation in den Musterphasen

- Messungen ermitteln das Systemverhalten
- Simulation zeigt die Ursachen dieses Verhaltens
  - Störsenken
  - Störquellen
  - Störpfade
- EMV-Analyse → Maßnahmen
- Iterative Untersuchungen
  - Maßnahmenvorschlag mittels Simulation
  - Messtechnische Überprüfung der Maßnahme
- Validierung der Simulationsergebnisse ist zwingend notwendig
- → Im Endeffekt sind durch den Einsatz der Simulation weniger Hardwaremusteriterationen notwendig => Kosteneinsparung

# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

## EMV-Simulation: Anwendungen im EMV-Prozess bei Bosch

### → Front-loaded Engineering (EMV-Design)

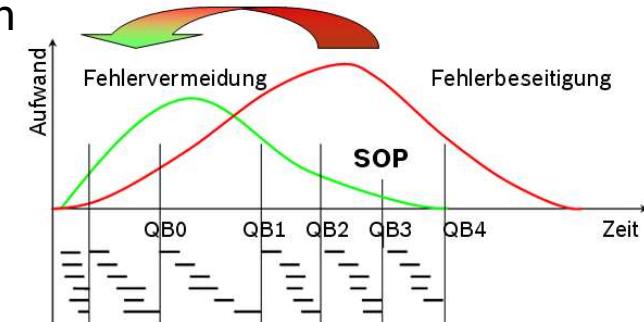
- Einsatz EMV-Simulation in früher Designphase
- HW-Muster ist in diesem Stadium noch nicht verfügbar
- EMV-Simulation auf Basis - Prototyp aus ähnlichen Projekten oder „virtuellem Gerätemuster“

### • Ergebnisse:

- Prinzipielle, qualitative Aussagen
- potentielle Störgrößen
- potentielle Störquellen
- potentielle Störsenken
- potentielle Störpfade
- Größenordnung der Störgrößen

### • Auswirkung auf das EMV-Konzept:

→ Frühzeitige Planung der EMV-Maßnahmen



# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

→ Strukturierung der EMV-Simulation bei Bosch (AE/EMC)

Schritt 1:  
Durchführung einer Anforderungsanalyse für die EMV- Simulation

Schritt 2:  
Auswahl der Ressourcen / Partitionierung

Schritt 3:  
Durchführung einer Analyse

Schritt 4:  
Durchführung von Sensitivitätsanalysen

Schritt 5:  
Durchführung von Optimierungen und Robustheitsanalysen

# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

8

Automotive Electronics | AE/EMC-P1 Dr. W. Pfaff | SS 2020

© Robert Bosch GmbH 2016. Alle Rechte vorbehalten, auch bzgl. jeder Verfügung, Verwertung, Reproduktion, Bearbeitung, Weitergabe sowie für den Fall von Schutzrechtsanmeldungen.

## → Hauptkriterien für Klassifikation

- Simulations- bzw. Modellebene
- Simulationsbereich
- Anwendungsbereich

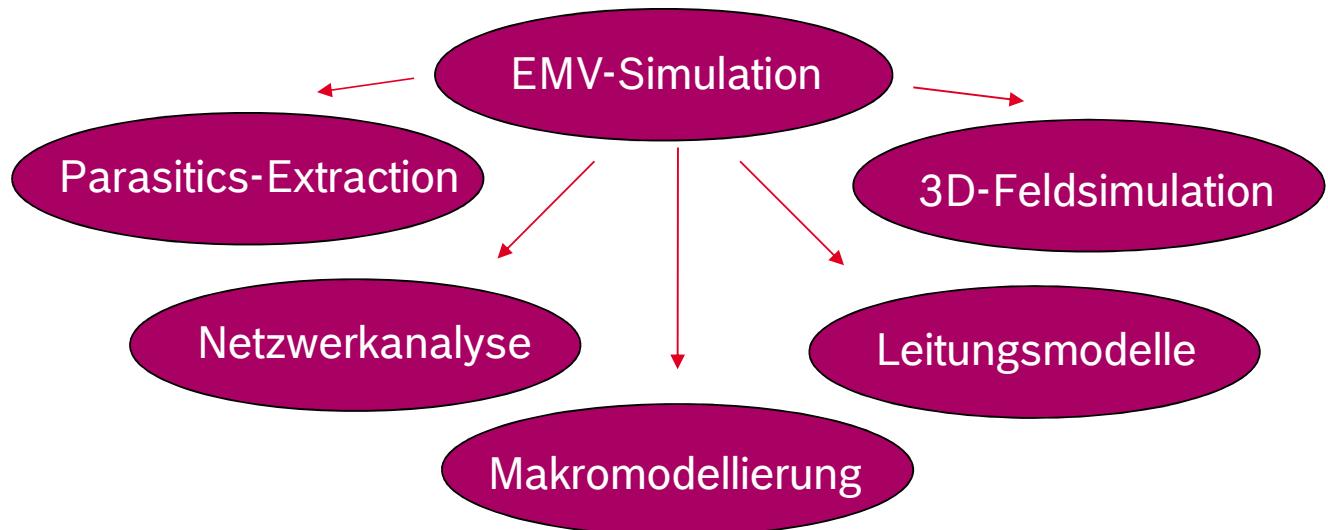
## → Simulationsebene

- Systemanalyse (wird bisher selten in der EMV-Simulation angewendet)
- Netzwerkanalyse
- Leitungsmodelle
- 3D-Feldanalyse
- Reduktion-Order-Verfahren (Makromodellierung)



# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“



## → Simulationsbereiche

- DC-Simulation
- AC-Simulation
- Zeitbereichssimulation
- usw.

## → Simulationsbereiche

- Elektrostatik, Magnetostatik
- Simulation im Frequenzbereich
- Direkte Zeitbereichssimulation
- Zeitbereichssimulation durch Faltungsansatz
- Eigenmode-Analyse

# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

## → Simulationsbereiche: Überblick

### → DC-Simulation (Netzwerkanalyse)

- Simulation im Anfangspunkt bei Transientensimulation

### → Elektrostatik (3D-Feldanalyse)

- Berechnung der partiellen Kapazitäten und Induktivitäten
- Pre-Processing für Simulationen im Dynamikbereich
- Hilfssimulation im EMV-Bereich

### → Simulation im Frequenzbereich (bzw. AC-Simulation)

- Ersetzung  $d/dt \rightarrow j\omega$
- Lösung: komplexe Amplituden im geforderten Frequenzbereich
- Ausschließlich Analyse linearer Probleme

# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

## → Simulationsbereiche: Überblick

### → Simulation im Zeitbereich

- Unterscheidung zwischen direkter Simulation und Simulation mittels Faltungsintegralen

### → Direkte Simulation - direkte Lösung der differentiellen Gleichungen bezüglich der Zeit bei beliebiger Anregung (Störsignal bzw. Störquelle)

- Vorteile:
  - Ansatz gilt auch für nichtlineare Probleme und entspricht der physikalischen Aufgabenstellung
  - Durch Fouriertransformation Berechnung des Störsignalspektrums  
→ Entspricht der Messung mit Spektrumanalyser/Messemmpfänger
  - Funktional- und EMV-Verhalten können simultan simuliert werden
- Nachteile:
  - Zeitaufwand ist ggf. hoch (Diskretisierung der Zeitachse mit kleinen Schritten für die numerische Integration)

# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

## → Simulationsbereiche: Überblick

### Zeitbereichssimulation durch das Faltungsintegral (Duhamelintegral)

$$y(t) = \int_0^t g(t-\tau)x(\tau)d\tau$$

- $y(t)$ : Systemantwort (Strom, Spannung oder andere Größe) auf die beliebige Anregung  $x(t)$
- $g(t)$ : Greensche Funktion (auch bekannt als Impulsantwort), die als Systemantwort auf die  $\delta(t)$ -Anregung definiert ist
- $\delta(t)$ : Dirac-Funktion
- Die Übertragungsfunktion des Systems kann aus der Impulsantwort durch Fouriertransformation berechnet werden:

$$\underline{Y}(j\omega) / \underline{X}(j\omega) = F \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} g(t) e^{-j\omega t} dt \right\}$$

# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

## → Simulationsbereiche: Überblick

### Zeitbereichssimulation durch das Faltungsintegral

- → Einmalige Zeitbereichssimulation mit  $\delta(t)$ -Anregung:  
Post-Prozessing → Frequenzbereichssimulation  
(Fouriertransformation)  
Post-Prozessing → Zeitbereichssimulationen mit beliebigen Anregungen
- Vorteil:  
Im Vergleich zur direkten Zeitbereichssimulation ist der Ansatz effizienter, da die Anregung sehr kurz ist
- Nachteil:  
Ansatz gilt nur für lineare Probleme  
(Grund: Superpositionsprinzip = Duhamel-Integral )

# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

## → Simulationsbereiche: Überblick

Simulation im Zeitbereich  $\Leftrightarrow$  Simulation im Frequenzbereich

Zeitbereich (ZB)  $\rightarrow g(t)$   $\rightarrow$  FB: Fouriertransformation  $\rightarrow Y(j\omega)$

Frequenzbereich (FB)  $\rightarrow Y(j\omega)$   $\rightarrow$  z.B.: inverse Fouriertransf.  $\rightarrow g(t)$

Nichtlineare Probleme

- Einzige Möglichkeit: Simulation im Zeitbereich

Lineare Probleme ZB  $\Leftrightarrow$  FB

- ZB: Breitbandige Probleme (z.B. Transienten bei Impulsstörungen) haben kurze Ausgleichsvorgänge und breite Frequenzbereiche  
 $\rightarrow$  ZB ist effizienter
- FB: Schmalbandige Probleme (z.B. Schwingungen bei Resonanzen mit hoher Güte) haben lange Ausgleichsvorgänge und schmale Frequenzbereiche  
 $\rightarrow$  FB ist effizienter

# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
  - 5.3.1 Klassifikation
  - 5.3.2 Differentielle Methoden
  - 5.3.3 Integralgleichungsverfahren
  - 5.3.4 Zusammenfassung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

## Feldberechnungsmethoden

FDTD: Finite Difference Time Domain

FEM: Finite Element Method

FIT: Finite Integration Theory

PEEC: Partial Element Equivalent Circuit Method

MOR: Makromodellierung

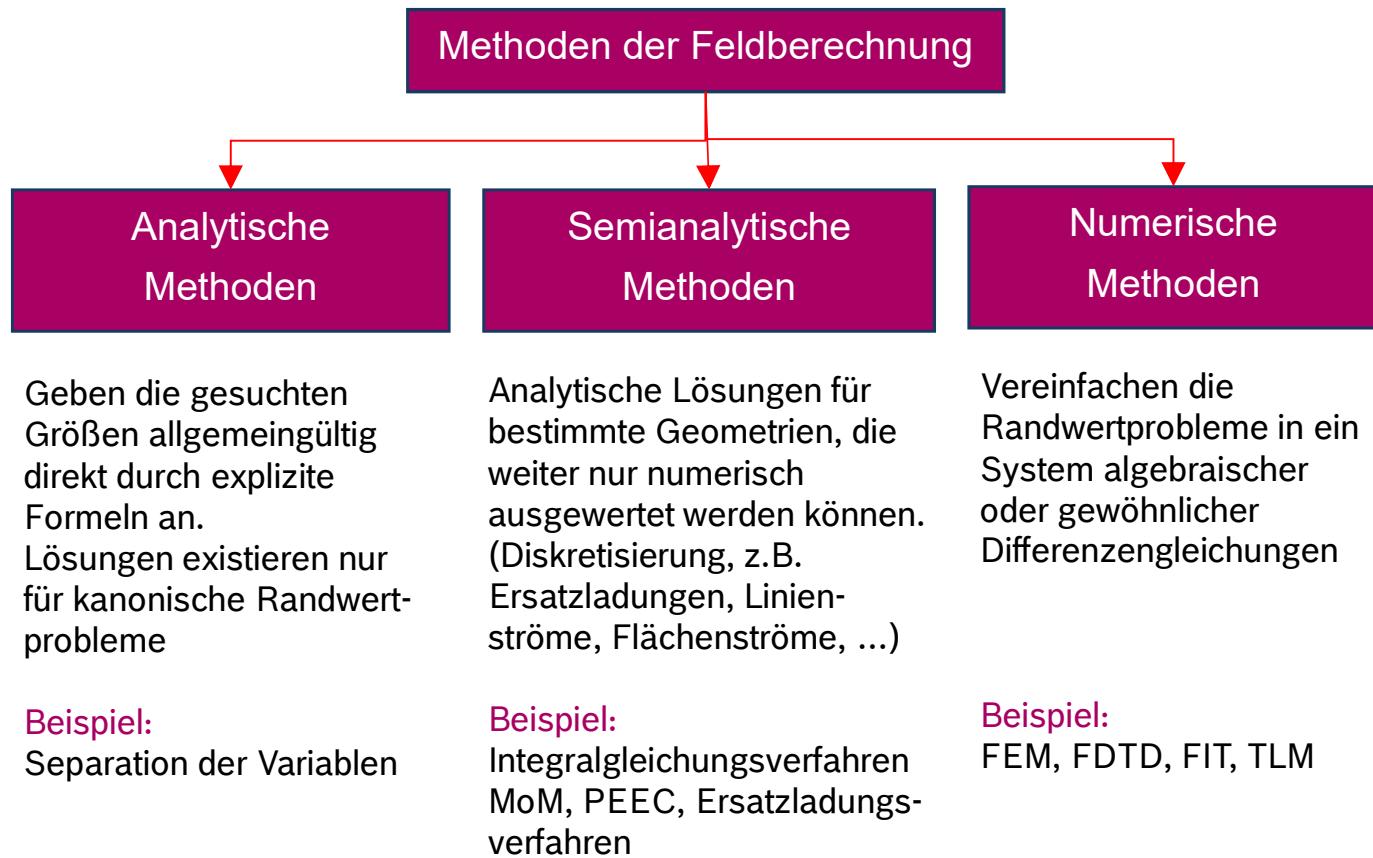
TLM: Transmission Line Matrix Method

MoM : Method of Moment

BEM : Boundary Element Method

# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
  - 5.3.1 Klassifikation
  - 5.3.2 Differentielle Methoden
  - 5.3.3 Integralgleichungsverfahren
  - 5.3.4 Zusammenfassung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“



# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
  - 5.3.1 Klassifikation
  - 5.3.2 Differentielle Methoden
  - 5.3.3 Integralgleichungsverfahren
  - 5.3.4 Zusammenfassung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

## → Definition

Mathematisches Modell (analytisches Modell):  
Analytische Beschreibung einer physikalischen Erscheinung.

## → Beispiel:

Maxwellsche Gleichungen, Feldintegralgleichungen,  
Wellengleichungen, Leitungsgleichungen

## → Definition

Numerisches Modell:  
Angenäherter Algorithmus zur Berechnung der Lösung des mathematischen Modells in bestimmten Punkten (numerische Lösung).

## → Beispiel

**FEM, MoM, ...**

## → Simulationsmethoden beruhen auf unterschiedlichen mathematischen Modellen → unterschiedliche Simulationsmethoden

# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
  - 5.3.1 Klassifikation
  - 5.3.2 Differentielle Methoden
  - 5.3.3 Integralgleichungsverfahren
  - 5.3.4 Zusammenfassung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“



# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
  - 5.3.1 Klassifikation
  - 5.3.2 Differentielle Methoden
  - 5.3.3 Integralgleichungsverfahren
  - 5.3.4 Zusammenfassung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

## → Definition

Vollwellenmethoden bzw. Modelle (eng.: full-wave methods) entsprechen den Maxwell'schen Gleichungen bei beliebigen Frequenzen, wenn das Modellgitter fein genug ist

## → Definition

Quasi-statische Methoden bzw. Modelle (eng.: quasi-static methods) entsprechen den Maxwell'schen Gleichungen nur bei den Frequenzen, bei denen die Abstrahlung der elektromagnetischen Energie vernachlässigbar ist.

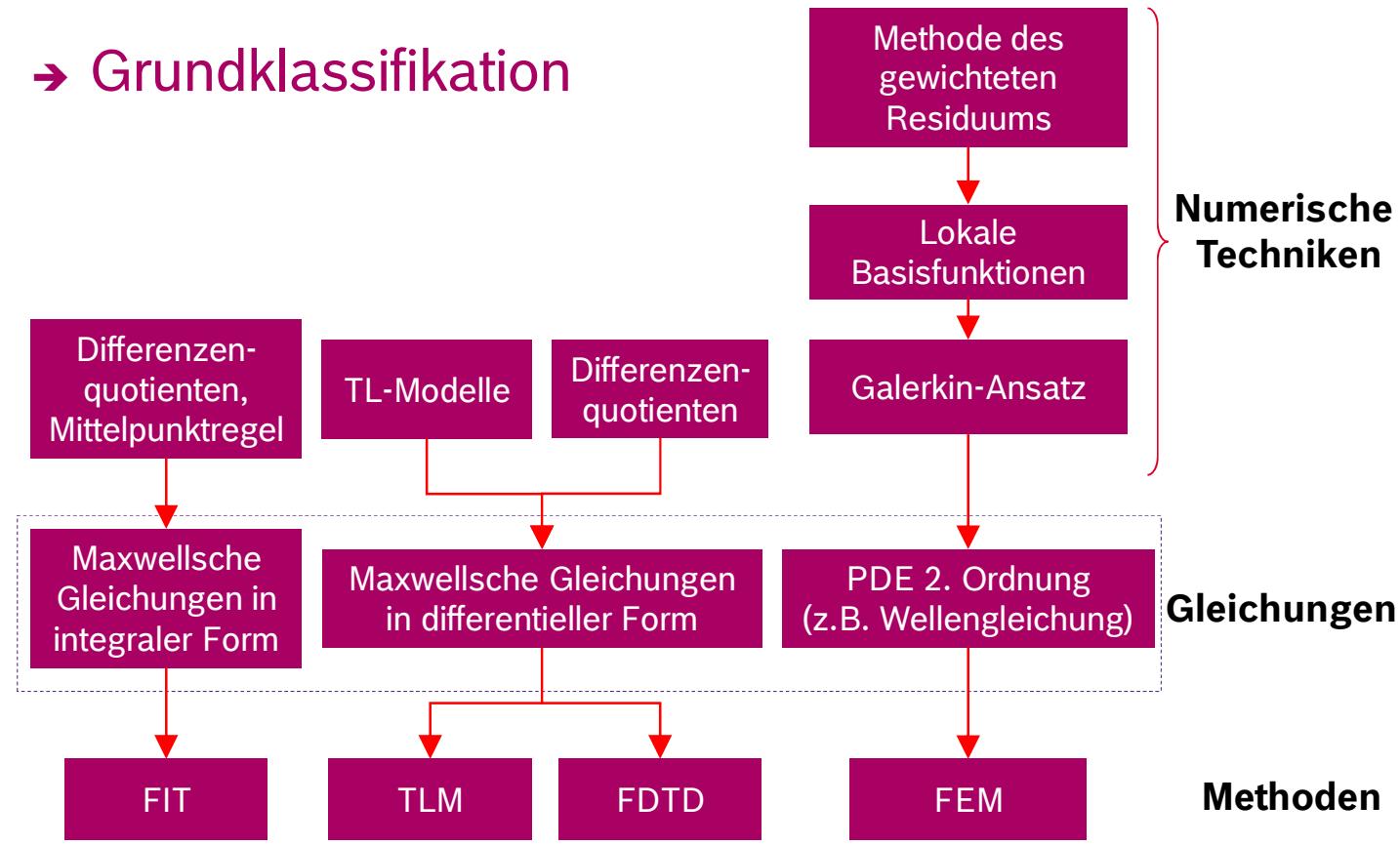
## → Definition

(elektro-)statische Methoden bzw. Modelle entsprechen den Maxwell'schen Gleichungen nur bei niedrigen Frequenzen, bei denen das System kein dynamisches Verhalten zeigt

# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
  - 5.3.1 Klassifikation
  - 5.3.2 Differentielle Methoden
  - 5.3.3 Integralgleichungsverfahren
  - 5.3.4 Zusammenfassung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

## → Grundklassifikation



# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
  - 5.3.1 Klassifikation
  - 5.3.2 Differentielle Methoden
  - 5.3.3 Integralgleichungsverfahren
  - 5.3.4 Zusammenfassung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

## → Finite Integration Algorithmus (FIT-Methode): Überblick

- Ausgangspunkt: Maxwellsche Gleichungen in Integralform

$$\oint_s \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} + \frac{\partial \Phi}{\partial t} = 0 \quad \oint_s \mathbf{H} \cdot d\mathbf{s} = \int_A \left[ \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right] \cdot d\mathbf{A}$$

$$\oint_A \mathbf{D} \cdot d\mathbf{A} = q \quad \oint_A \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0$$

- Numerische Ansätze:

Approximation von zeitlichen Ableitungen:  
Zentraldifferenzenformel

$$\frac{d}{dt} f(z, t) \Big|_{t=t_0} \approx \frac{f(z_0, t+\Delta t/2) - f(z_0, t-\Delta t/2)}{h}$$

Approximation von räumlichen Integralen:  
Mittelpunktrege

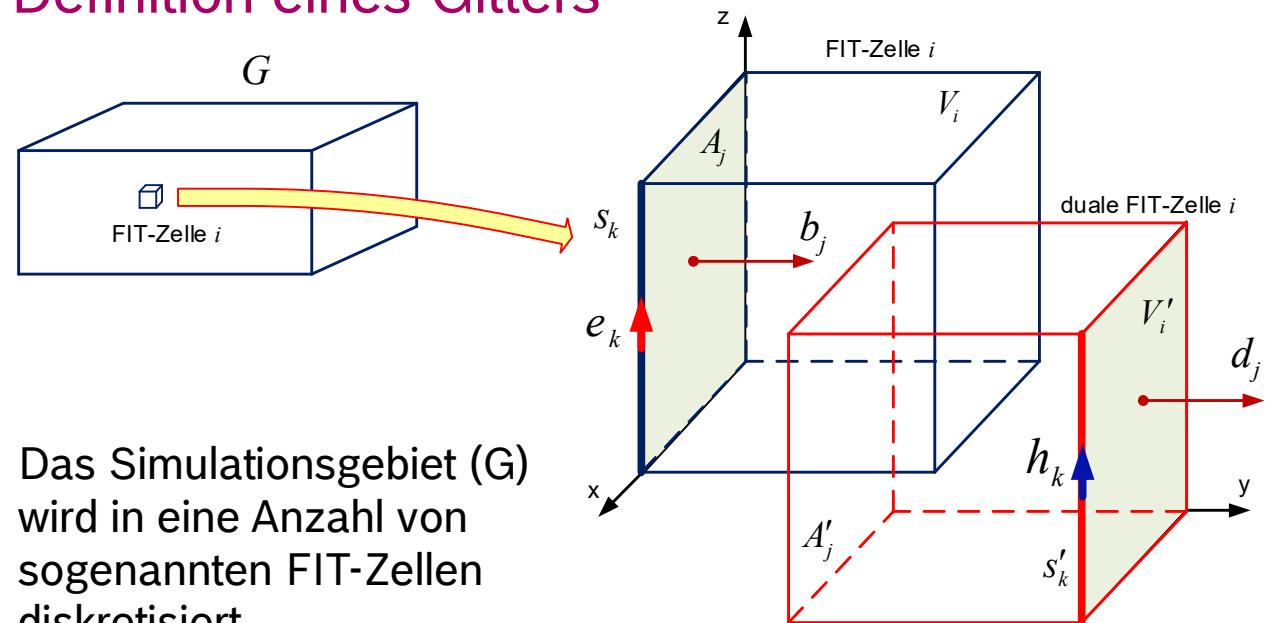
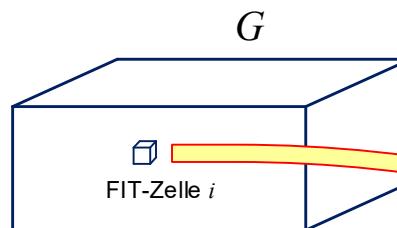
$$\int_{z_0-h/2}^{z_0+h/2} f(z, t) dz \approx h f(z_0, t)$$

Bei Bosch (AE/EMC) angewendete Software FIT → „CST Studio“

# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
  - 5.3.1 Klassifikation
  - 5.3.2 Differentielle Methoden
  - 5.3.3 Integralgleichungsverfahren
  - 5.3.4 Zusammenfassung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

## → Definition eines Gitters



Das Simulationsgebiet ( $G$ ) wird in eine Anzahl von sogenannten FIT-Zellen diskretisiert.  
Die dualen FIT-Zellen sind um eine halbe Länge gegen die normalen FIT-Zellen verschoben.

Detaillierte Vorgehensweise:  
Siehe „Anhang zu 5.3.2  
Differentielle Methoden“

# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
  - 5.3.1 Klassifikation
  - 5.3.2 Differentielle Methoden
  - 5.3.3 Integralgleichungsverfahren
  - 5.3.4 Zusammenfassung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

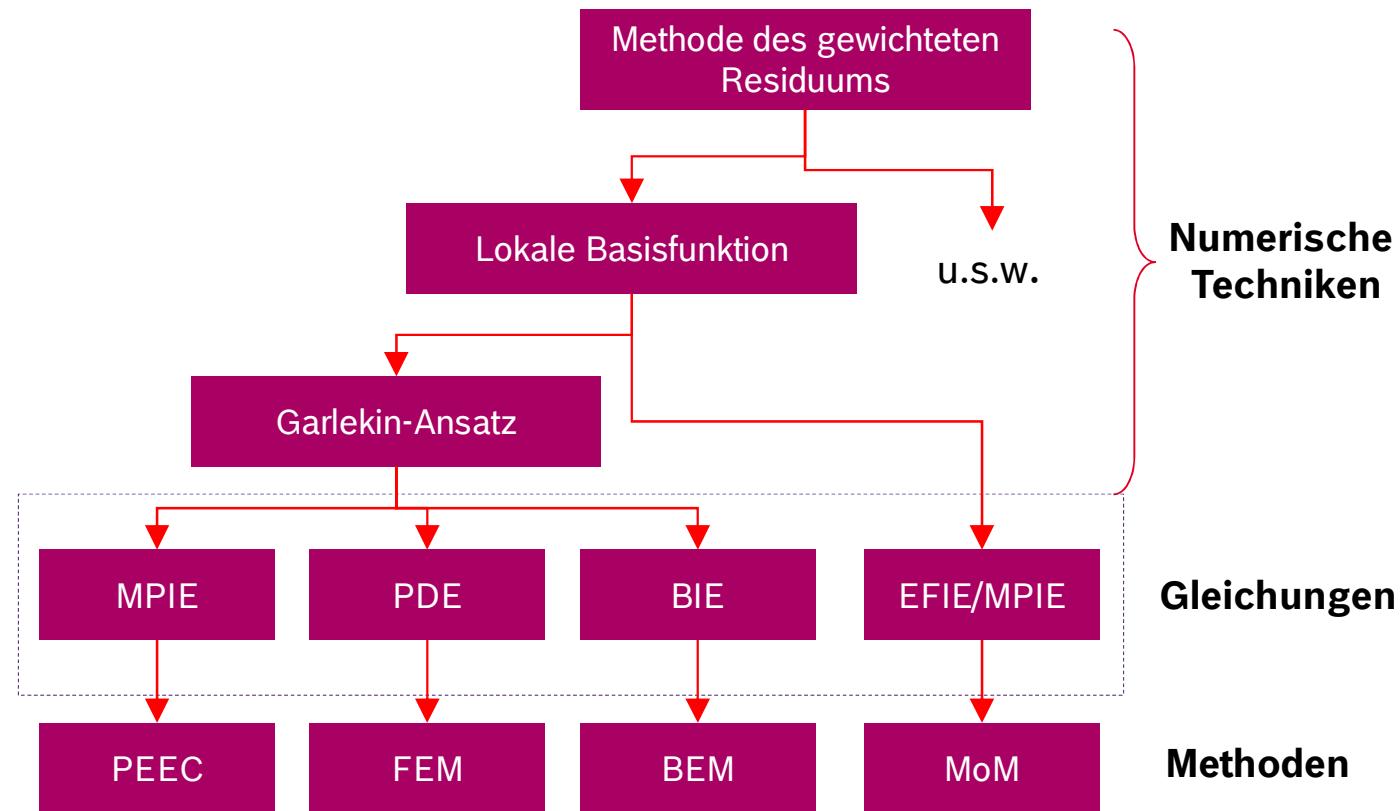
## → Differentielle Methoden: Zusammenfassung

- Diskretisierung des ganzen Simulationsraumes
  - Beispiel: quadratischer Gebiet mit der Seitenlänge  $10 \lambda \rightarrow \Delta x < \lambda_{max} / 10$  → 100 FIT-Zellen in jeder Dimension → insgesamt  $100^3$  Zellen!
  - Andere differentielle Methoden haben ähnliche Anzahl an Unbekannten
  - Typisches Anwendungsgebiet beschränkt sich auf die Volumen mit der Dimensionen  $< (2-3) \lambda_{max}$
  - Diese Randbedienung entspricht den EMV-Problemstellungen für typische Produkte der Automobilelektronik („AE-Produkte“) (Sensoren, Steuergeräte und andere elektronische Systeme sind meist elektrisch klein oder vergleichbar mit  $\lambda_{max}$ )
- Inhomogene Medien - leicht zu behandeln
- Offene Räume: Behandlung durch die offene- oder PML-Randbedienungen
- Praktische Anwendungsgrenzen:
  - Desktop: 2-3 Mio. Zellen
  - Workstation mit Hardware Acceleration: 10-15 Mio. Zellen
- CST deklariert für die Software: bis 100 Mio. Zellen

# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
  - 5.3.1 Klassifikation
  - 5.3.2 Differentielle Methoden
  - 5.3.3 Integralgleichungsverfahren
  - 5.3.4 Zusammenfassung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

## → Grundklassifikation



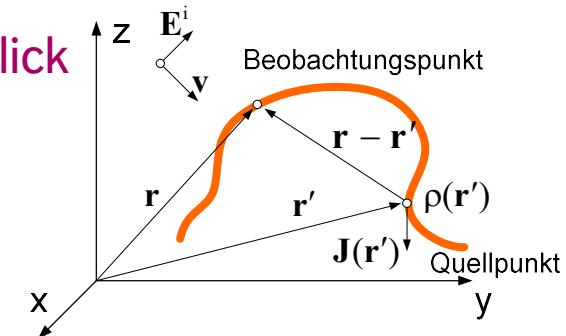
# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
  - 5.3.1 Klassifikation
  - 5.3.2 Differentielle Methoden
  - 5.3.3 Integralgleichungsverfahren
  - 5.3.4 Zusammenfassung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

## → Wichtigste Integralgleichungen: Überblick

- Elektrische Feldintegralgleichung (EFIE):

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



- Greensche Funktion für elektrische Feldstärke im Freiraum:

$$\overline{\mathbf{G}}^E(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = j\omega \mu_0 \left[ \mathbf{I} + \frac{\nabla \nabla}{k^2} \right] g(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$$

- Mixed-Potential Feldintegralgleichung (MPIE):

$$\mathbf{E}^i(\mathbf{r}) = \frac{\mathbf{J}(\mathbf{r})}{\sigma} + j\omega \mu_0 \int_V \overline{\mathbf{G}}^A(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \cdot \mathbf{J}(\mathbf{r}') dV + \frac{\nabla}{\epsilon} \int_V K^\phi(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \rho_c(\mathbf{r}') dV$$

- Mixed-Potential Feldintegralgleichung im Freiraum:

$$\mathbf{E}^i(\mathbf{r}) = \frac{\mathbf{J}(\mathbf{r})}{\sigma} + j\omega \mu_0 \int_V g(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \mathbf{J}(\mathbf{r}') dV + \frac{\nabla}{\epsilon} \int_V g(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \rho_c(\mathbf{r}') dV$$

# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
  - 5.3.1 Klassifikation
  - 5.3.2 Differentielle Methoden
  - 5.3.3 Integralgleichungsverfahren
  - 5.3.4 Zusammenfassung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

## → Integralgleichungen: Schwerpunkte

- Alle Integralgleichungen sind direkt aus den Maxwell-Gleichungen abgeleitet
- Alle Integralgleichungen enthalten die Raumfaltungsintegrale der Greenschen Funktion und der Strom- und Ladungsquellen → Superpositionsprinzip → **Gilt nur für lineare Medien!**
- Die Strom und Ladungsverteilungen sind unbekannt → Diskretisierung von Strahlungsquellen → wenige Unbekannte im Vergleich mit differentiellen Methoden
- Greensche Funktion
  - ist eine Funktion der Frequenz (bzw. Zeit) und der Koordinaten
  - hängt von der Geometrie des Raumes und der Medien ab
  - Analytische Greensche Funktionen sind nur für wenige „kanonische“ Geometrien bekannt: Freiraum, Halbraum, Rechteckgebiet, Zylindergebiet, kugelförmiger Gebiet, geschichtete Medien
- Integralgleichungen sind Vollwellenmodelle  
(d.h. Integralgleichung = Maxwellgleichung, wenn die Integralgleichung anwendbar ist)

# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
  - 5.3.1 Klassifikation
  - 5.3.2 Differentielle Methoden
  - 5.3.3 Integralgleichungsverfahren
  - 5.3.4 Zusammenfassung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

## → Momentenmethode (MoM, Method of Moments–„mother of methods“)

- Ausgangspunkt: Feldintegralgleichung  
(hier zwecks Vereinfachung skalar formuliert)

$$L \{ J_z(\mathbf{r}) \} = E_z^i(\mathbf{r})$$

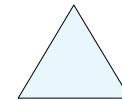
$$L \{ J_z(\mathbf{r}) \} = \int_V j\omega\mu \left[ 1 + \frac{1}{k^2} \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right] g(\mathbf{r}, \mathbf{r}') J_z(\mathbf{r}') dV'$$

- Unbekannt ist die Stromverteilung auf den Leitern
- **Schritt 1: Diskretisierung**

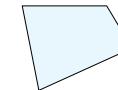
Nur die leitende Struktur wird in eine Anzahl von Zellen unterteilt.  
1-dimensionale Zellen: für drahtförmige Strahler:



2-dimensionale Zellen (Flächenzellen): für flächenhafte Strukturen



Dreieck



Viereck



Rechteck

# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
  - 5.3.1 Klassifikation
  - 5.3.2 Differentielle Methoden
  - 5.3.3 Integralgleichungsverfahren
  - 5.3.4 Zusammenfassung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

→ **Momentenmethode (MoM, Method of Moments–„mother of methods“)**

- **Schritt 2:** Wir approximieren die unbekannte Stromverteilung in Form:

$$J_z(\mathbf{r}) = \sum_{k=1}^n \alpha_k b_k(\mathbf{r})$$

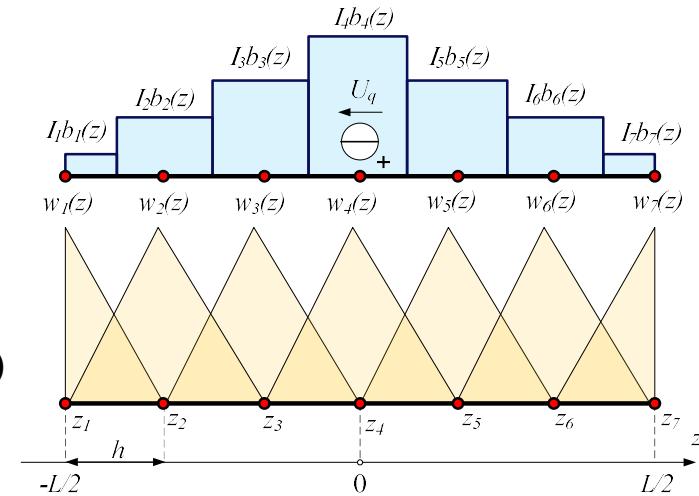
wobei  $b_k(\mathbf{r})$  die **Basisfunktionen** sind, diese Funktionen sind festgelegt. Die Entwicklungskoeffizienten  $\alpha_k$  sind zu berechnen.

- **Schritt 3:** Wir definieren den lokalen Fehler im Punkt ( $z$ ):

$$L\{ J_z(\mathbf{r}) \} = E_z^i(\mathbf{r})$$

$$\sum_{k=1}^n \alpha_k L\{ b_k(\mathbf{r}) \} \approx E_z^i(\mathbf{r})$$

**lokaler Fehler:**  $R(\mathbf{r}) = \sum_{k=1}^n \alpha_k L\{ b_k(\mathbf{r}) \} - E_z^i(\mathbf{r})$



# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
  - 5.3.1 Klassifikation
  - 5.3.2 Differentielle Methoden
  - 5.3.3 Integralgleichungsverfahren
  - 5.3.4 Zusammenfassung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

Weiter fordern wir, dass der Fehler über das gesamte Volumen aller Leiter ( $V$ ) Null ist. Dafür integrieren wir den lokalen Fehler:

$$\int_V R(\mathbf{r}) w_m(\mathbf{r}) dV = 0$$

wobei  $w_m(\mathbf{r})$  die **Gewichtungsfunktion** ist.



$$\sum_{k=1}^n \alpha_k \int_V L\{ b_k(\mathbf{r}) \} w_m(\mathbf{r}) dV = \int_V E_z^i(\mathbf{r}) w_m(\mathbf{r}) dV$$

**Schritt 4:** Wir berechnen die unbekannten Entwicklungskoeffizienten  $\alpha_k$  durch das algebraische Gleichungssystem, das  $n$  Gleichungen für unterschiedliche  $w_m(x, y, z)$ ,  $m = 1, n$  aller Gewichtsfunktionen entspricht.

Matrixdarstellung des Gleichungssystems:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix}$$

Mit konstante Koeffizienten:

$$a_{mk} = \int_V L\{ b_k(\mathbf{r}) \} w_m(\mathbf{r}) dV$$

$$b_m = \int_V E_z^i(\mathbf{r}) w_m(\mathbf{r}) dV$$

**Software:** FEKO (kostenlose Studentenversion), Webseite: <http://www.emss.de/>

# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
  - 5.3.1 Klassifikation
  - 5.3.2 Differentielle Methoden
  - 5.3.3 Integralgleichungsverfahren
  - 5.3.4 Zusammenfassung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

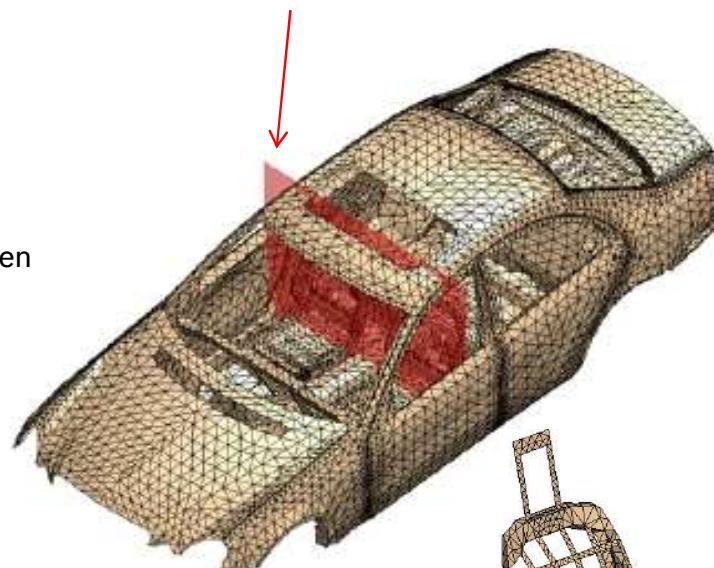
Differentielle Methoden	↔	Integralgleichungsverfahren
→ Inhomogene und anisotrope Medien Leicht zu implementieren wegen des 3D-Gitters		→ Inhomogene und anisotrope Medien Möglich aber ineffizient
→ Offene Räume (Ab- und Einstrahlung) Darstellung durch Randbedingungen → etwas weniger effizient		→ Offene Räume (Ab- / Einstrahlung) Integralgleichungen geben ein analytisches Modell → sehr effizient
→ Nichtlineare Medien Möglich im Zeitbereich, jedoch führen solche Simulationen häufig zu Instabilitäten		→ Nichtlineare Medien nicht möglich
→ ZB- und FB-Simulation		→ Bevorzugt: FB-Simulation
→ Große Anzahl von Unbekannten, aber schwach besetzte Systemmatrizen		→ Kleine Anzahl von Unbekannten, bei vollbesetzte Systemmatrizen
→ Fazit Anwendung im Kfz-Bereich: Module, Geräte, Komponenten		→ Fazit Anwendung im Kfz-Bereich: Antennen, Karosserien, Ein- / Abstrahlung

# 5 EMV-Simulation

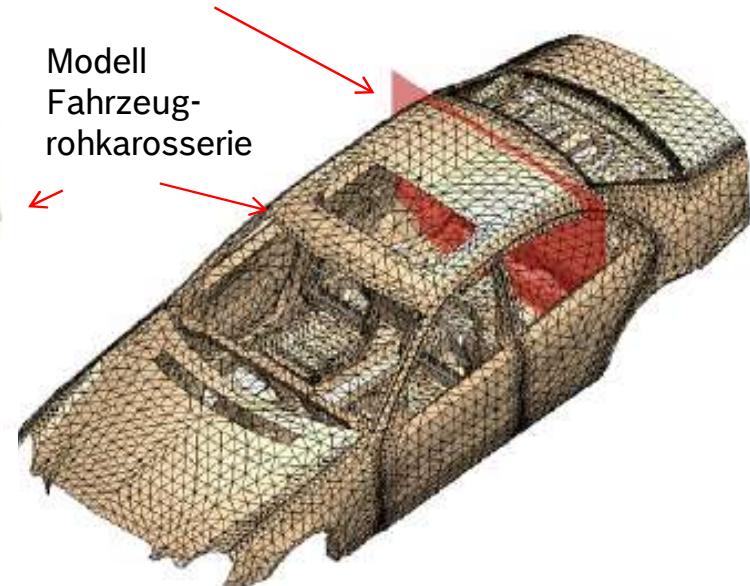
- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
  - 5.3.1 Klassifikation
  - 5.3.2 Differentielle Methoden
  - 5.3.3 Integralgleichungsverfahren
  - 5.3.4 Zusammenfassung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

## Integralgleichungsverfahren – Beispiel Feldverteilung im Fahrzeug

Berechnungsebene 1



Berechnungsebene 2



Modell Sitz



Quelle: VDA/FAT Band 190 - Schriftenreihe der Forschungsvereinigung Automobiltechnik

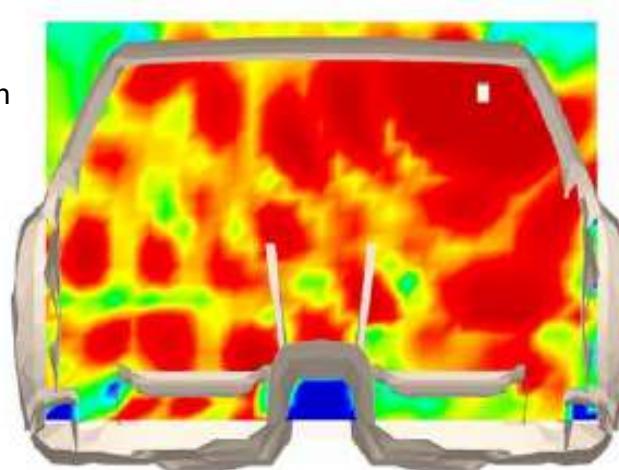
# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
  - 5.3.1 Klassifikation
  - 5.3.2 Differentielle Methoden
  - 5.3.3 Integralgleichungsverfahren
  - 5.3.4 Zusammenfassung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

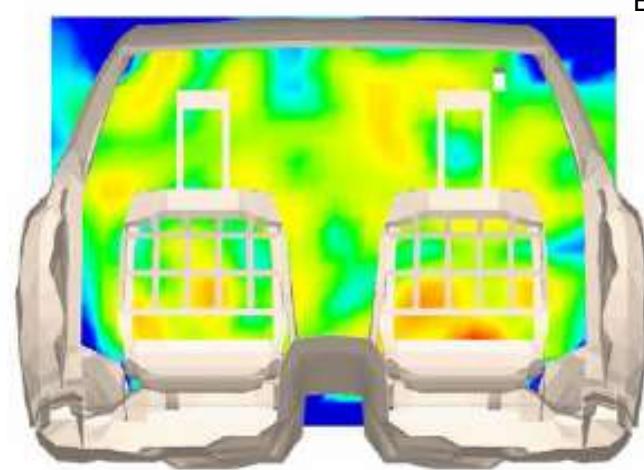
## Integralgleichungsverfahren – Beispiel Feldverteilung im Fahrzeug

Mobiltelefon im Fahrzeug - Kopfhöhe Fahrer - Frequenz:  $f \approx 900 \text{ MHz}$

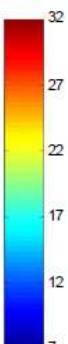
Berechnungsebene 1



Berechnungsebene 2



Feldstärke in  
dBV/m  
Effektivwert



Quelle: VDA/FAT Band 190 - Schriftenreihe der Forschungsvereinigung Automobiltechnik

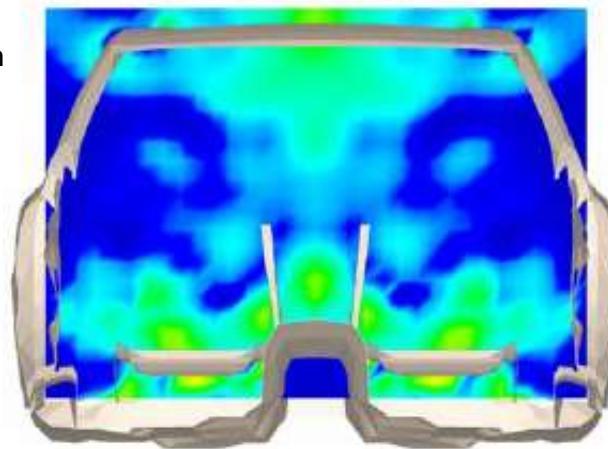
# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
  - 5.3.1 Klassifikation
  - 5.3.2 Differentielle Methoden
  - 5.3.3 Integralgleichungsverfahren
  - 5.3.4 Zusammenfassung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

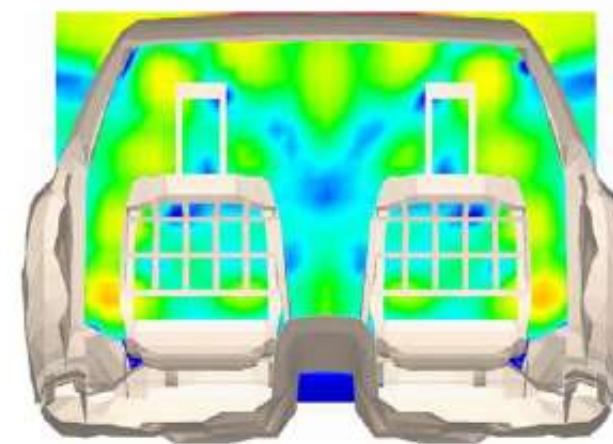
## Integralgleichungsverfahren – Beispiel Feldverteilung im Fahrzeug

Mobiltelefon mit Außenantenne (Dachposition) - Frequenz:  $f \approx 900$  MHz

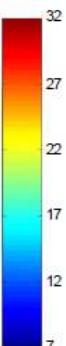
Berechnungsebene 1



Berechnungsebene 2



Feldstärke in  
dBV/m  
Effektivwert



Quelle: VDA/FAT Band 190 - Schriftenreihe der Forschungsvereinigung Automobiltechnik

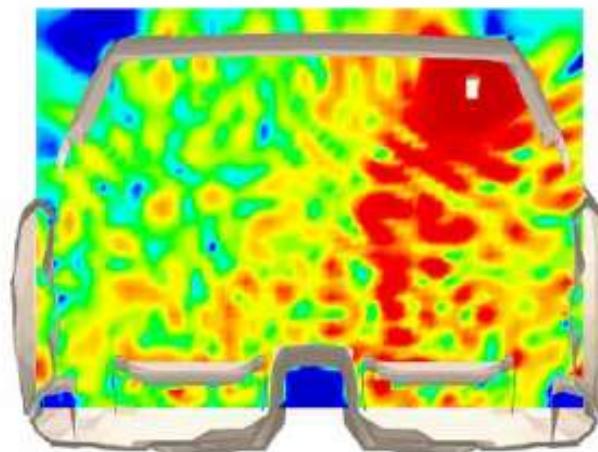
# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
  - 5.3.1 Klassifikation
  - 5.3.2 Differentielle Methoden
  - 5.3.3 Integralgleichungsverfahren
  - 5.3.4 Zusammenfassung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

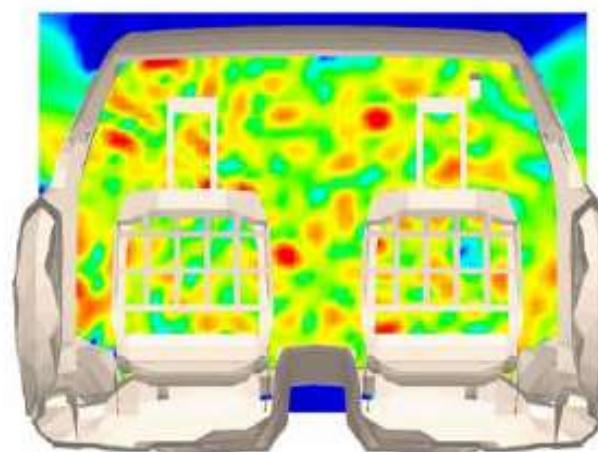
## Integralgleichungsverfahren – Beispiel Feldverteilung im Fahrzeug

Mobiltelefon im Fahrzeug - Kopfhöhe Fahrer - Frequenz:  $f \approx 2000$  MHz

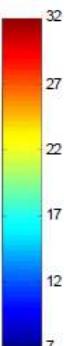
Berechnungsebene 1



Berechnungsebene 2



Feldstärke in  
dBV/m  
Effektivwert



Quelle: VDA/FAT Band 190 - Schriftenreihe der Forschungsvereinigung Automobiltechnik

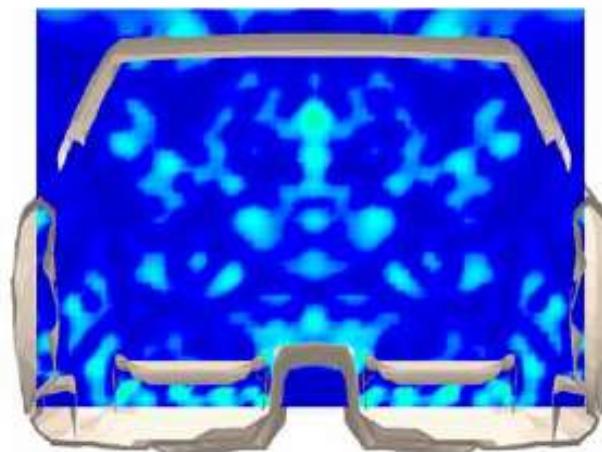
# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
  - 5.3.1 Klassifikation
  - 5.3.2 Differentielle Methoden
  - 5.3.3 Integralgleichungsverfahren
  - 5.3.4 Zusammenfassung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

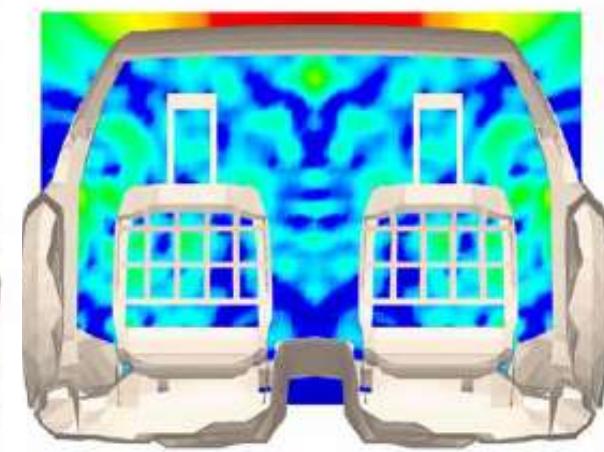
## Integralgleichungsverfahren – Beispiel Feldverteilung im Fahrzeug

Mobiltelefon mit Außenantenne (Dachposition) - Frequenz:  $f \approx 2000$  MHz

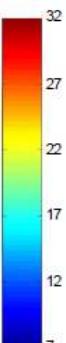
Berechnungsebene 1



Berechnungsebene 2



Feldstärke in  
dBV/m  
Effektivwert



Quelle: VDA/FAT Band 190 - Schriftenreihe der Forschungsvereinigung Automobiltechnik

# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
  - 5.3.1 Klassifikation
  - 5.3.2 Differentielle Methoden
  - 5.3.3 Integralgleichungsverfahren
  - 5.3.4 Zusammenfassung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

## Zusammenfassung

- Integralgleichungsverfahren und differentielle Methoden haben zum Teil überlagerte Anwendungsbereiche, in denen sie effektiv eingesetzt werden können, ansonsten aber bevorzugte Einsatzgebiete
- Bosch (AE/EMC) benutzt Simulationssoftware (Vorzugstools) mit beiden Modellierungstypen:
  - Differentielles Verfahren: CST Microwave Studio – FIT
  - Integralverfahren: FEKO von EMSS - MoM
- Die Softwarehersteller komplettieren ihre Software mit anderen Ansätzen. Z.B.:
  - Seit 2008 hat CST Microwave Studio auch einen MoM-Solver
  - Seit 2007 hat FEKO auch einen FEM-Solver
- Allgemein gilt für die Feldberechnungsverfahren:
  - Vorteil: Genaue Darstellung der Störfelder und Störstromverteilungen in 3D
  - Nachteil: 3D-Simulation ist sehr zeitaufwendig

# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
  - 5.4.1 Berechnung der parasitären Induktivitäten
  - 5.4.2 Berechnung der parasitären Kapazitäten
  - 5.4.3 EMV-Simulation in einem Netzwerksimulator
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

## → Grundidee

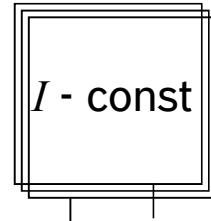
- 3D-Simulation ist sehr zeitaufwendig
- Wenn das Simulationsobjekt im Wesentlichen elektrisch klein ist, ist die genaue 3D-Stromverteilung (bzw. Feldverteilung) oft vernachlässigbar
- Das Koppelpfadmodell kann durch konzentrierte Kopplungen dargestellt werden (siehe Kapitel 2.1.2)
- Nachfolgende Simulation mittels eines Netzwerksimulators
- Algorithmus
  - Berechnung der parasitären Eigen- und Gegeninduktivitäten und der parasitären Kapazitäten
  - Modellierung einer Ersatzschaltung mittels eines Netzwerksimulators

# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
  - 5.4.1 Berechnung der parasitären Induktivitäten
  - 5.4.2 Berechnung der parasitären Kapazitäten
  - 5.4.3 EMV-Simulation in einem Netzwerksimulator
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

## → Induktivitäten (Theoretische Bemerkung)

- Schleifeninduktivitäten (Drossel, Spule, Rahmen...)



$$L = \frac{N \Phi}{I}$$

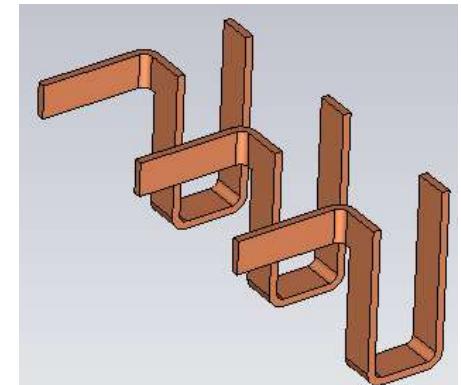
$\Phi$ : der magnetisches Fluss durch die geschlossene Schleife

$N$ : Anzahl der Windungen

- Parasitäre Induktivitäten (Stanzgitter, Leiterzüge, usw.)

- Verzweigungen
- AVT Leiterzüge schließen sich durch Schaltungen, Module usw.
- Nur Betrachtung der Induktivitäten der Leitersegmente bzw. AVT - Teile
- Die Schleifeninduktivitäten kann man nicht definieren

→ Konzept der **partiellen** Induktivitäten



# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
  - 5.4.1 Berechnung der parasitären Induktivitäten
  - 5.4.2 Berechnung der parasitären Kapazitäten
  - 5.4.3 EMV-Simulation in einem Netzwerksimulator
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

→ Partielle Eigeninduktivität für ein Leitersegment:

$$L = \frac{U}{j\omega I}$$

$I$ : Strom im Leitersegment

$U$ : Spannungsabfall entlang des Segmentes

→ D.h., partielle Eigeninduktivität = parasitäre Eigeninduktivität im Leitersegment

→ Partielle Gegeninduktivität für zwei Leitersegmente:

$$L_{k,m} = \frac{U_k}{j\omega I_m}$$

$I_m$ : Strom im Leitersegment  $m$

$U_k$ : induzierte Spannung im Leitersegment  $k$

→ D.h., partielle Gegeninduktivität beschreibt die induktive Kopplung zwischen zwei Leitersegmenten

→ Wie berechnet man die partiellen Induktivitäten?

- Differentielle Methoden sind hier nicht anwendbar, da die Stromsegmente getrennt von den physikalischen Schleifen zu berechnen sind.
- Antwort: Methode der partiellen Elemente (PEEC-Methode)

# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
  - 5.4.1 Berechnung der parasitären Induktivitäten
  - 5.4.2 Berechnung der parasitären Kapazitäten
  - 5.4.3 EMV-Simulation in einem Netzwerksimulator
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

## → PEEC-Methode: Überblick

- Integralgleichungsverfahren
- Ähnlich zu der Momentenmethode (siehe [Nitsch 2009])
- Der Hauptunterschied zur MoM ist die Netzwerkdarstellung  
→ Ersatzschaltung für jedes Segment der AVT
- Ersatzschaltung besteht aus partiellen Induktivitäten und Kapazitäten
- Vollwellen-PEEC-Methode ist ein numerisches Modell der MPIE-Gleichung in Form einer Ersatzschaltung, bei der alle magnetischen und elektrischen Kopplungen zeitlich verzögert (retardiert) sind
- Quasi-Statische-PEEC-Methode vernachlässigt die zeitliche Verzögerung.  
→ ein 3D-Modell, das aber die Abstrahlung nicht berücksichtigt
- Die Bauelemente der PEEC-Ersatzschaltung haben eine physikalische Bedeutung: partielle Induktivitäten und Kapazitäten, die durch analytische Formeln oder numerisch berechnet werden können
- PEEC-Methode
  - Allgemeine Anwendung: Vollwellenverfahrenverfahren
  - Spezielle Anwendung: Berechnung von Parasitics

# 5 EMV-Simulation

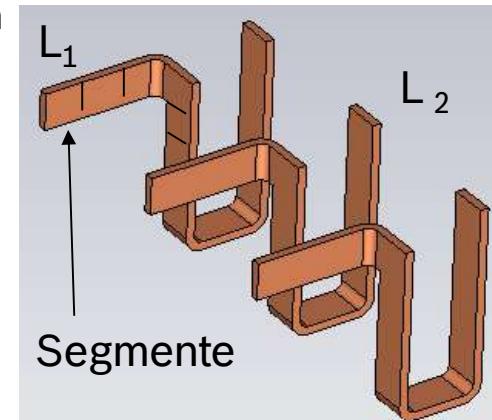
- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
  - 5.4.1 Berechnung der parasitären Induktivitäten
  - 5.4.2 Berechnung der parasitären Kapazitäten
  - 5.4.3 EMV-Simulation in einem Netzwerksimulator
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

## → Berechnung der parasitären Induktivitäten: Ablauf

- Schritt 1: AVT wird in Segmente diskretisiert
- Schritt 2: Berechnung der partiellen Induktivitäten für die Segmente
- Schritt 3: Berechnung der parasitären Induktivitäten zwischen AVT-Teilen
  - z.B.: Einfachste Darstellung ohne Skineffekt
  - 1) Eigen-Induktivität eines Leiters ist die Summe der partiellen Induktivitäten zwischen den Segmenten, die zu dem Leiter gehören
  - 2) Gegeninduktivität zwischen zwei Leitern ist die Summe der partiellen Induktivitäten zwischen den Segmenten, die zu zwei unterschiedlichen Leitern gehören

$$L = \sum_{m=1}^{M_1} \sum_{k=1}^{M_1} L_{mk}$$

$$M_{12} = \sum_{m \in M_1} \sum_{k \in M_2} L_{mk}$$



# 5 EMV-Simulation

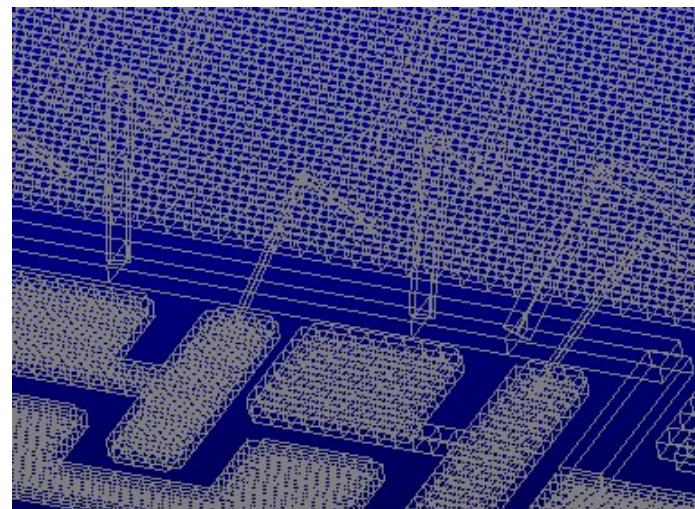
- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
  - 5.4.1 Berechnung der parasitären Induktivitäten
  - 5.4.2 Berechnung der parasitären Kapazitäten
  - 5.4.3 EMV-Simulation in einem Netzwerksimulator
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

→ Software: zur Zeit gibt es nur ein “Freeware-Tool“: Fast Henry

Input: eine Text-Datei-  
Angabe für AVT-Geometrie



1D- und 2D-Segmentierung



Output:  
Induktivitätsmatrix bei  
gegebenen Frequenzen



Ersatzschaltung mit  
parasitären  
Induktivitäten

# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
  - 5.4.1 Berechnung der parasitären Induktivitäten
  - 5.4.2 Berechnung der parasitären Kapazitäten
  - 5.4.3 EMV-Simulation in einem Netzwerksimulator
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

→ Berechnung der parasitären Kapazitäten mittels eines statischen EM-Solver

- Matrix mit Kapazitätskoeffizienten:

$$K = \mathbf{P}^{-1}$$

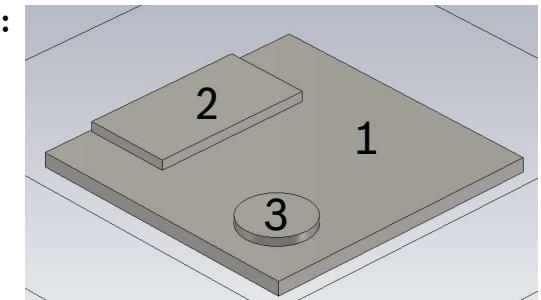
Beispiel: 3 leitende Körper

- Matrix mit partiellen Kapazitäten:

$$C = \{ C_{i,j} \}$$

wobei  $C_{i,j} = -K_{i,j}$

$$C_{i,i} = \sum_{j=1}^N K_{i,j}$$



→ Software: CST EM Studio

- Automatisierter Ablauf
- Ergebnis in der Form von der K-Matrix

Capacitance Matrix:			
	2	3	1
2	1.215582e-012 F	-8.661417e-015 F	-1.206920e-012 F
3	-8.661417e-015 F	4.230941e-013 F	-4.144327e-013 F
1	-1.206920e-012 F	-4.144327e-013 F	1.621353e-012 F

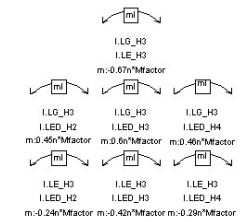
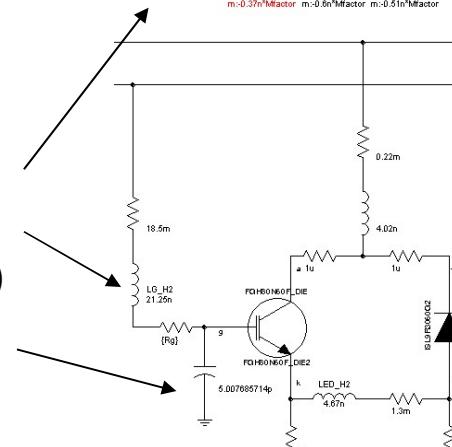
# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
  - 5.4.1 Berechnung der parasitären Induktivitäten
  - 5.4.2 Berechnung der parasitären Kapazitäten
  - 5.4.3 EMV-Simulation in einem Netzwerksimulator
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

## → Grundidee

- Funktionalmodell neben dem EMV-Modell (Berücksichtigung der Beeinflussungen durch Parasitics-Extraction-Ansätze)
- Hohe Effizienz
- ZB- und FB-Simulation
- Gilt nur für elektrisch kleine Objekte

- Beispiel:  
DBC-Modell mit parasitären Induktivitäten (Bonds, Leiterzüge) und parasitären Kapazitäten

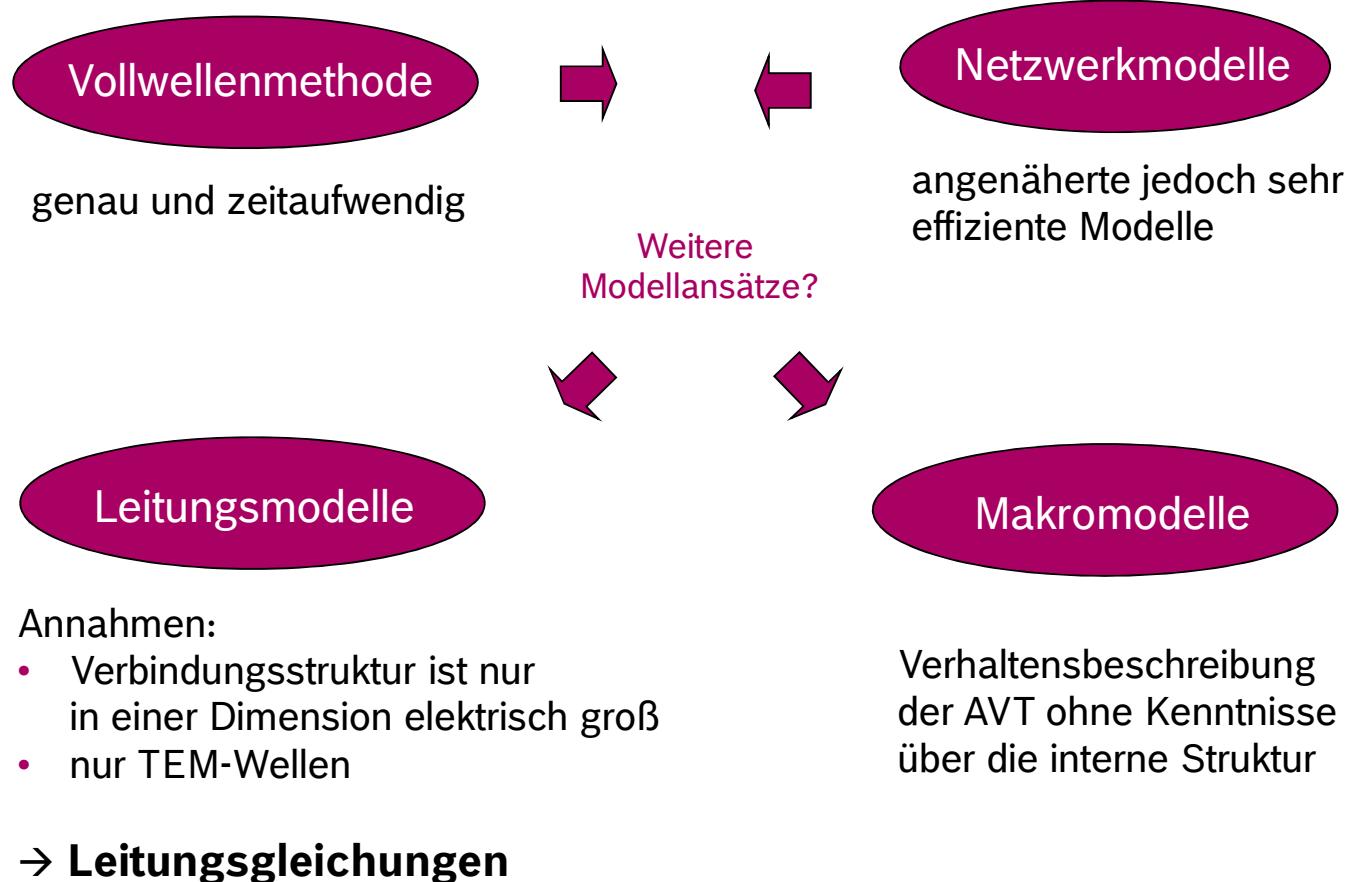


Software: Saber®  
(Übliche Anwendung: EMV in der Leistungselektronik)



# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
  - 5.4.1 Berechnung der parasitären Induktivitäten
  - 5.4.2 Berechnung der parasitären Kapazitäten
  - 5.4.3 EMV-Simulation in einem Netzwerksimulator
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“



# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
  - 5.4.1 Berechnung der parasitären Induktivitäten
  - 5.4.2 Berechnung der parasitären Kapazitäten
  - 5.4.3 EMV-Simulation in einem Netzwerksimulator
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

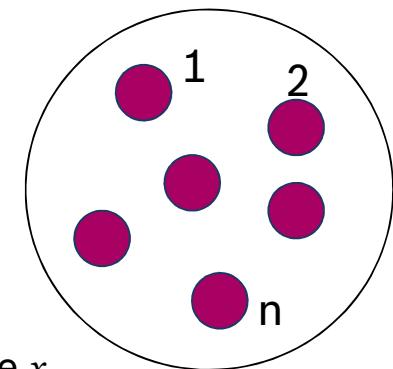
## → Leitungsgleichungen (Überblick)

Herleitung aus den Maxwell'schen Gleichungen oder aus der Feldintegralgleichung

$$\frac{d}{dx} \mathbf{V}(x) + \mathbf{Z}' \mathbf{I}(x) = 0$$

$$\frac{d}{dx} \mathbf{I}(x) + \mathbf{Y}' \mathbf{V}(x) = 0$$

Kabelquerschnitt



$\mathbf{V}(x)$ : Spannungen im Querschnitt mit der Koordinate  $x$

$\mathbf{I}(x)$ : Ströme im Querschnitt mit der Koordinate  $x$

Längenbezogene Impedanzen:

$$\mathbf{Z}' = \begin{bmatrix} R'_1 + j\omega L'_1 & j\omega M'_{12} & \dots & j\omega M'_{1n} \\ j\omega M'_{21} & R'_2 + j\omega L'_2 & \dots & j\omega M'_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ j\omega M'_{n1} & j\omega M'_{n2} & \dots & R'_n + j\omega L'_n \end{bmatrix}$$

Längenbezogene Admittanzen:

$$\mathbf{Y}' = j\omega \begin{bmatrix} C'_{11} & C'_{12} & \dots & C'_{1n} \\ C'_{21} & C'_{22} & \dots & C'_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ C'_{n1} & C'_{n2} & \dots & C'_{nn} \end{bmatrix}$$

# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
  - 5.4.1 Berechnung der parasitären Induktivitäten
  - 5.4.2 Berechnung der parasitären Kapazitäten
  - 5.4.3 EMV-Simulation in einem Netzwerksimulator
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

## → Leitungsgleichungen: Annahmen zur Herleitung

- Summe der Ströme im Querschnitt ist Null (**nur Gegentaktströme!**)
- Querabstände sind elektrisch klein
  - die Gleichungen gelten bis zu einer Grenzfrequenz
  - kein Vollwellenmodell
- Nur lineare Medien
- Leitungsgleichungen beschreiben nur TEM-Wellenausbreitung entlang einer Koordinate
- Abstrahlung der elektromagnetischen Energie ist in den Leitungsgleichungen nicht berücksichtigt

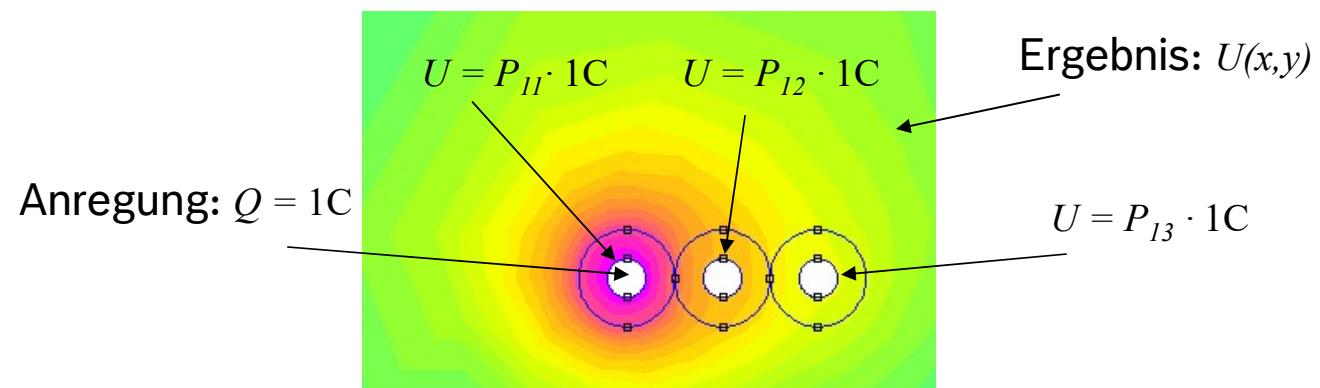
## → Leitungsgleichungen: Bewertung

- Sehr effizient im Vergleich zur 3D-Simulation
- 3D-Simulation der langen Verbindungsstrukturen (z.B. Kabelbäume) ist kaum möglich → Leitungsmodelle sind hierfür die einzige Lösung
- Genauigkeit der Leitungsmodelle ist ausreichend, wenn die Abstrahlung vernachlässigbar ist
- Leitungsmodelle kann man mit einem Netzwerksimulator berechnen

# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
  - 5.4.1 Berechnung der parasitären Induktivitäten
  - 5.4.2 Berechnung der parasitären Kapazitäten
  - 5.4.3 EMV-Simulation in einem Netzwerksimulator
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

- **Berechnung der längenbezogenen Parameter der Leitungsgleichungen**
- Drahtleitungen in Luft: einfache analytische Formeln
  - Leiterplatten: Näherungsformeln für Striplines und Micro-Striplines
  - Isolierte Drähte und Kabelbäume: 2D-Feldsimulation für den Leitungsquerschnitt (FEM-Methode für Poisson-Gleichung)  
Ansatz ist identisch mit dem Beschriebenen im Kapitel 5.4.2
    - 2D anstelle 3D
    - Längsbezogene Kapazitäten anstelle partieller Kapazitäten
    - Beispiel: Berechnung der Kapazitäten für eine 3-adige Leitung (2D-FEM-Simulation)



# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
  - 5.4.1 Berechnung der parasitären Induktivitäten
  - 5.4.2 Berechnung der parasitären Kapazitäten
  - 5.4.3 EMV-Simulation in einem Netzwerksimulator
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

## → Anwendungsbereiche für Leitungsmodelle

- Kabelbäume, Drahtsysteme  
Querschnitt: elektrisch klein  
Länge: kann mehrere  $\lambda$  sein → großer Aufwand bei 3D-Simulation
- Leiterplatten (Modelle für Leiterzüge)  
Aus der Sicht der elektromagnetischen Theorie sind die EM-Wellen zwischen Leiterzügen und Masseebene wegen der Inhomogenitäten keine TEM-Wellen (→ Hybridwellen). Jedoch bezeichnet man solche Wellen im begrenzten Frequenzbereich als Quasi-TEM-Wellen (Hybridwellen erscheinen nur bei höheren Frequenzen).

Fazit: Leitungsmodelle gelten für die Leiterplattenmodellierung im begrenzten Frequenzbereich. Z.B.: Abschätzung für Microstripes:

$$f_b = \frac{21,3 \text{ mm}}{(W + 2h)\sqrt{\epsilon_r + 1}} \text{ GHz}$$

$W, h$  : Leiterzugbreite und -höhe;  $\epsilon_r$ : Permittivitätszahl

- Leitungsmodelle gelten nur für Leiterzüge. Pads, Vias und breite Leiterzüge kann man nur in 3D modellieren! → **Hybridverfahren:** Leitungsmodell für Leiterzüge und PEEC-Methode für sonstige Verbindungsstrukturen

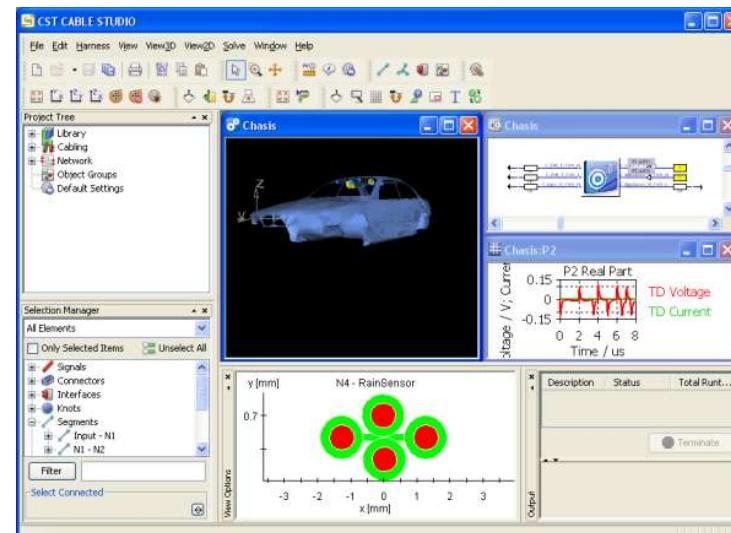
# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
  - 5.4.1 Berechnung der parasitären Induktivitäten
  - 5.4.2 Berechnung der parasitären Kapazitäten
  - 5.4.3 EMV-Simulation in einem Netzwerksimulator
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

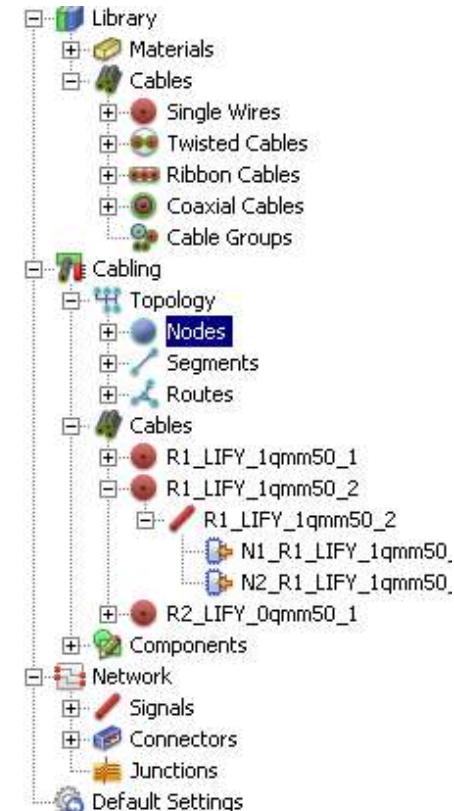
## → Anwendung der Leitungsmodelle

### CST Cable Studio

- Automatisierte Erstellung der Leitungsmodelle und Berechnung der Leitungsparameter
- Alle anwendbaren Kabelquerschnitte
- Import für Kfz-Kabelbaum
- Hohe Effizienz



- Anwendung: Modellierung nur Kabelbäume



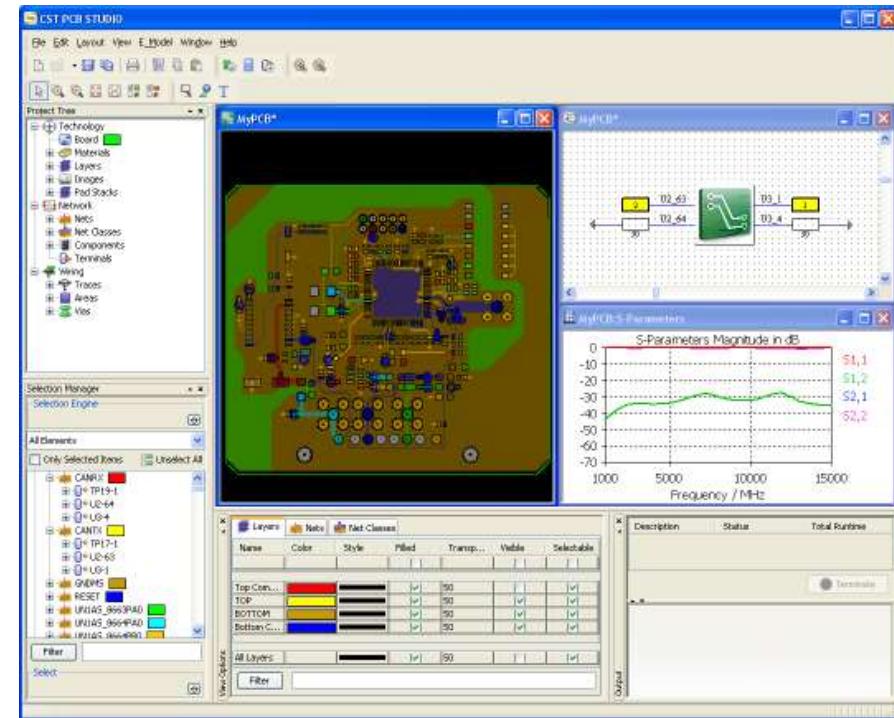
# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

## → Anwendung der Leitungsmodelle

### CST PCB Studio

- Hybridverfahren: Leitungsmodelle und PEEC-Methode
- Import für Layout-Daten
- Hohe Effizienz für Layout-Modellierung
- Layout-Simulation simultan mit der Netzwerksimulation
- Zeit- und Frequenzbereich



# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

## → Model Order Reduction - MOR

### → Kernidee

Sehr komplexe Objekte, die mittels riesiger Zahl der Gleichungen (3D-Simulation) darzustellen sind, haben oft sehr einfache Antworten im Zeit- und Frequenzbereich.

### Folge:

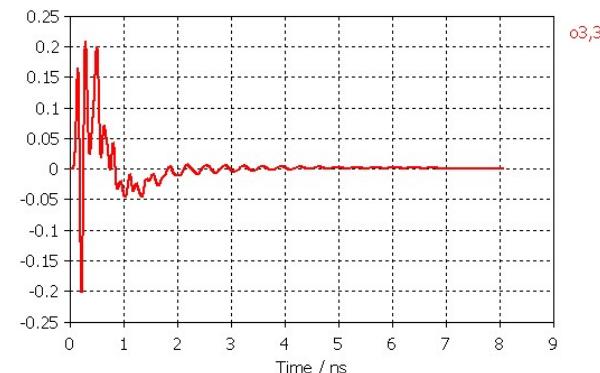
Ihr Verhalten lässt sich mittels eines Modells niedriger Ordnung darstellen!

### → Beispiel: 3D-Sensorsimulation

Sensor, Kabelbaum,  
Layout, Schaltung, ASIC  
→ 3D-Stromverteilung  
FIT-Modell: 1.300.000 Unbekannte

> 1.000.000 diff. Gl.

### Zeitantwort auf einem Port:



Man sieht nur wenige Frequenzen!

# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

## → Erklärung

- Numerisches Modell ist nur ein Modell mit Millionen von differentialen Gleichungen
- Die Summe der Millionen exponentiellen Funktionen ergibt eine **einfache** Funktion
- Diese Funktion kann als Lösung eines einfachen Modells betrachtet werden.
- Lösung des numerischen Modells: Entwicklung in **vielen** künstlichen Unbekannten
- Analytische Lösung: Entwicklung in wenigen Eigenfunktionen (physikalisches Modell)

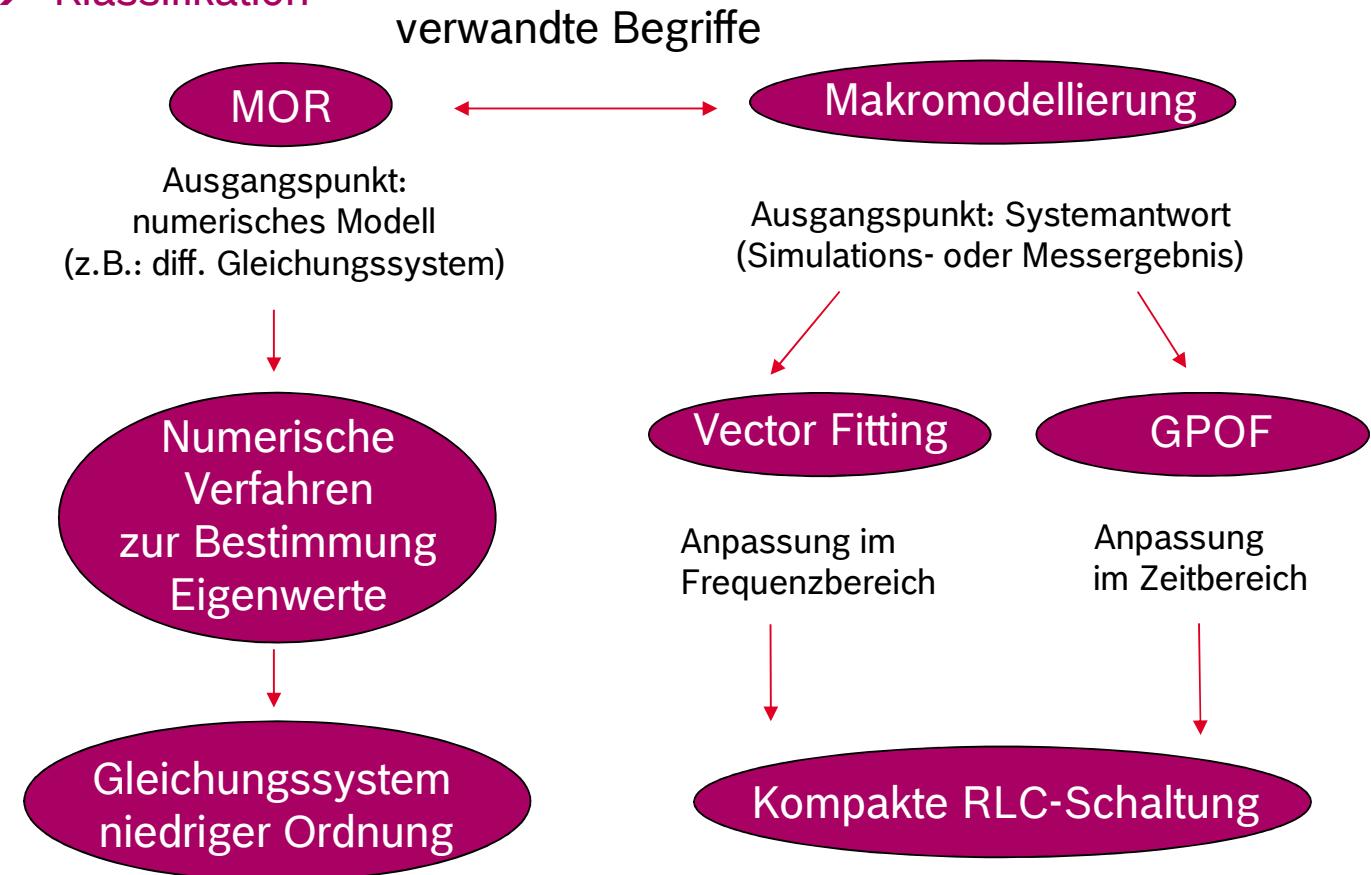
## → MOR-Verfahren → Black-Box-Modellierung



# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

## → Klassifikation



# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

## → Bedeutung

- MOR: Beschleunigung der Lösung der vorhandenen großen Modelle  
→ MOR-Algorithmus wurde in CST Microwave Studio (MWS) implementiert
  - Vorteil: schnellere Simulation
  - Nachteil: interne Feld- bzw. Stromverteilung ist unbekannt (Modellierung des Portverhaltens)
- Makromodellierung: Black-Box-Beschreibung aufgrund des Portverhaltens
  - Hohe Bedeutung für die Simulation von **komplexen Systemen!**
  - Systempartitionierung
    - Messungen der Systemteile } → Portverhalten
    - Simulation der Systemteile } → Makromodellierung der Systemteile



**Gesamtsystemsimulation**  
(siehe Kapitel 5.7)

# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

- MOR-Verfahren: Anwendungen in der Arbeit von Bosch AE/EMC
- Implementierung von Mess- oder Simulationsergebnissen in einen Netzwerksimulator (z.B. Saber)

## Ablauf:

Netzwerk-Analysator

3D-Simulation

Vector-Fitting-Software

Touchstone®-Datei

MOR-CST

Saber

LT-Spice

SPICE-Subcircuit

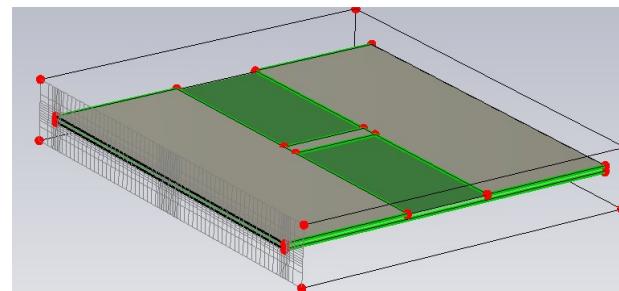
Ersatzschaltung

# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

→ Beispiel: Makromodel für einen  $\Pi$ -Mikrostreifenfilter

Ausgangspunkt: 3D-Simulation in MWS



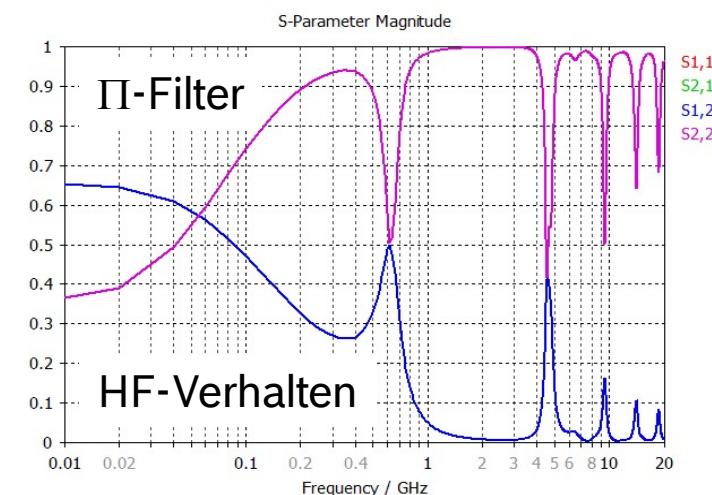
Export als Touchstone ® - Datei:

```
Filter.s2p - Editor
Datei Bearbeiten Format Ansicht ?
! TOUCHSTONE file generated by CST MICROWAVE STUDIO
! Date and time: wed Feb 10 10:51:53 2010
! Project name: Spar.cst
# GHZ S MA R 50
0          0.02186      -180
0.02       0.0694943    102.553
0.04       0.132649     87.9858
0.06       0.194876     79.3385
0.08       0.254614     72.3746
0.1        0.311219     66.2025
0.12       0.364378     60.5156
0.14       0.413939     55.1722
0.16       0.459809     50.0941
0.18       0.501903     45.2373
```

Ziel:

Modell für Netzwerksimulator (unter Berücksichtigung des HF-Verhaltens)

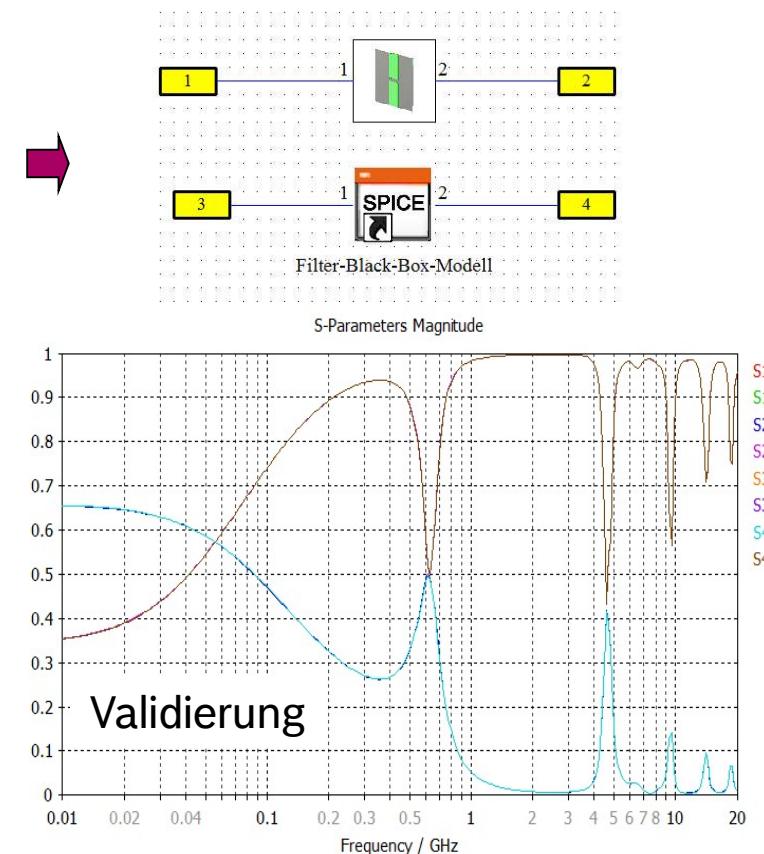
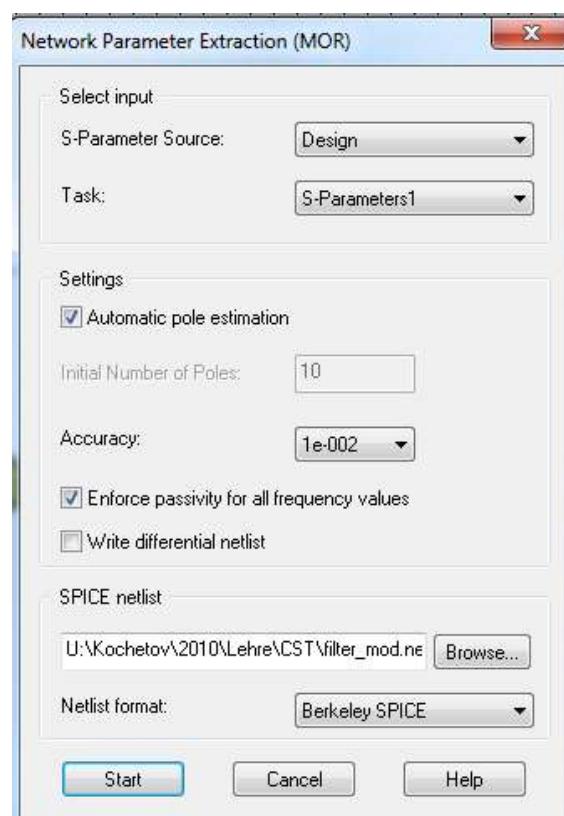
→ Simulierte S-Parameter:



# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

Makromodellierung: MOR-Tool aufgrund der Touchstone ® - Datei:

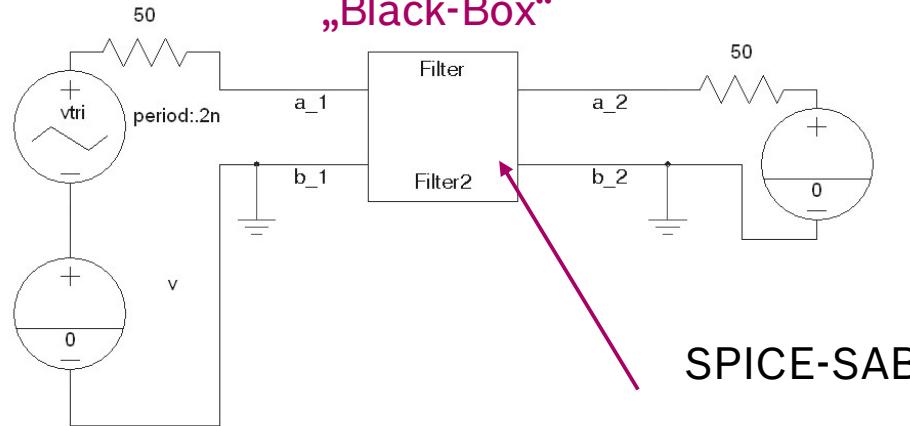


# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

## → Makromodell in Saber

### „Black-Box“



### SPICE-SABER Translator

```
*****
*** Netlist for Macromodel generated by CST DESIGN ENVIRONMENT ***
*** This file was generated automatically ***
*** Berkeley SPICE format ***
***** *****
*** Generated 18-Feb-2010, 10:58 ***
*****
*** Connect the external circuit to ports 1, 2 .... ***
.subckt Design 1 d1 2 d2
*** Nodal Ckts Associated with Each State Variable ***
Cn1    node1  0      1e-9
Ra1_1   node1  0      2.042240426460596e-003
Gb1_1   node1  0  1  d1   -1.000000000000000e+000
** End of Nodal Ckt for State Variable #1 **
```

## → Anwendung von

### „SPICE-Saber-Translator“ Tool

## → 2-Torschaltung:

### Makromodell

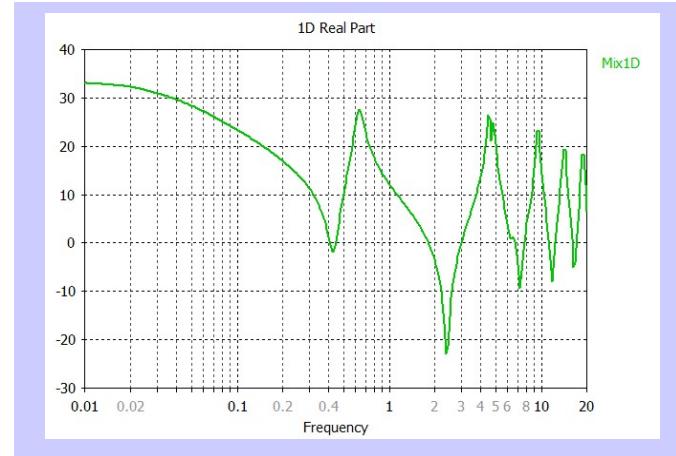
## → Simulation im Zeit- und Frequenzbereich

# 5 EMV-Simulation

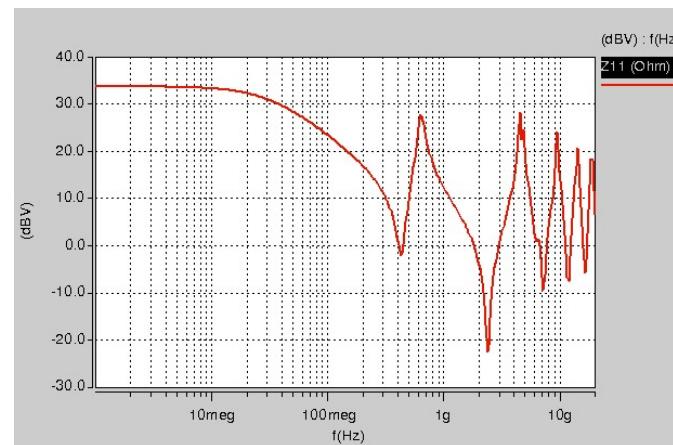
- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

## → Validierung im Frequenzbereich

### Eingangsimpedanz in CST MWS



### Eingangsimpedanz in Saber

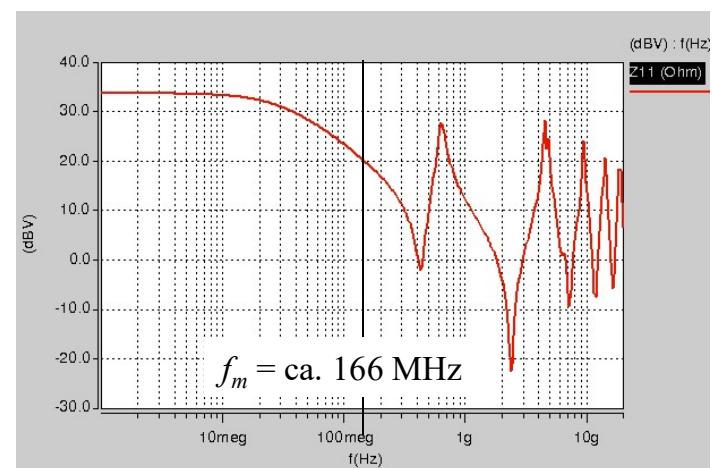


# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

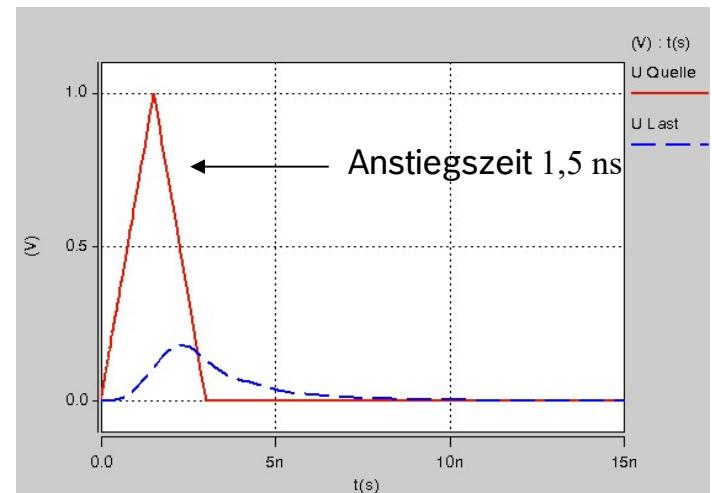
Endergebnis:  
Zeitbereichssimulation in Saber

Im Frequenzbereich:  $S_{21}$



Im Zeitbereich

- Da die Grenzfrequenz der Anregung unter 0,4 GHz liegt, sieht man kaum Schwingungen  
→ Erwünschtes Filterverhalten

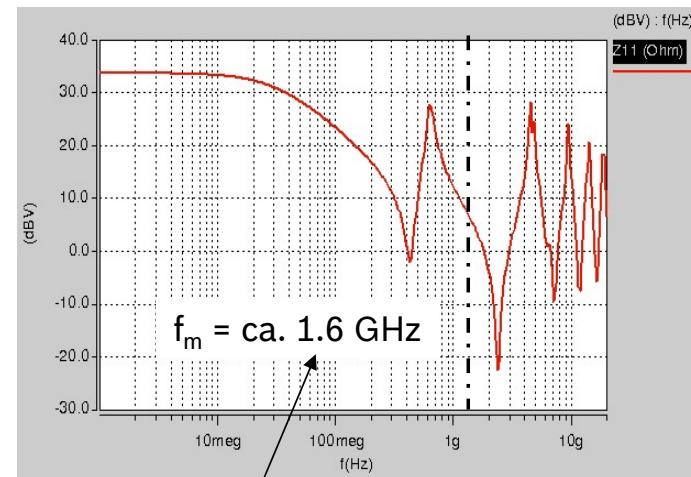


# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

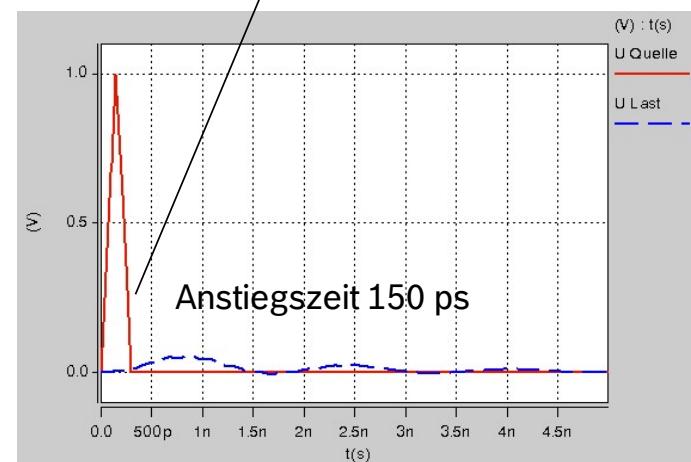
## Endergebnis: Simulation in Saber

### Im Frequenzbereich: $S_{21}$



### Im Zeitbereich

- Da die Grenzfrequenz der Anregung über 1 GHz liegt, sieht man Schwingungen (parasitäre Effekte)  
→ Unerwünschtes Filterverhalten
- Fazit: Vollwelleneffekte wurden in einer Netzwerksimulation implementiert!



# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

## → Objekte und Ebenen der EMV-Simulation

- Stanzgitter → 3D-Simulation
- Layout → 3D-Simulation oder Leitungsmodelle
- Bestückung
  - Funktionsverhalten → Netzwerkanalyse
  - Parasitäres Verhalten → 3D-Simulation
- Gehäuse → 3D-Simulation
- Antennen → 3D-Simulation (am besten Integralgleichungsverfahren)
- Störquellen → nach Bedarf Netzwerk- oder 3D-Feldanalyse
- Kabelbäume → Leitungsmodelle
- ASIC → Netzwerkanalyse (Bauelemente-Modell)
- Bonds und Verdrahtungen → 3D-Simulation

## → Es gibt viele Strukturen, die eine simultane Simulation auf den unterschiedlichen Ebenen erfordern

→ Simulation des Gesamtsystems möglich,  
muss hierarchisch erfolgen

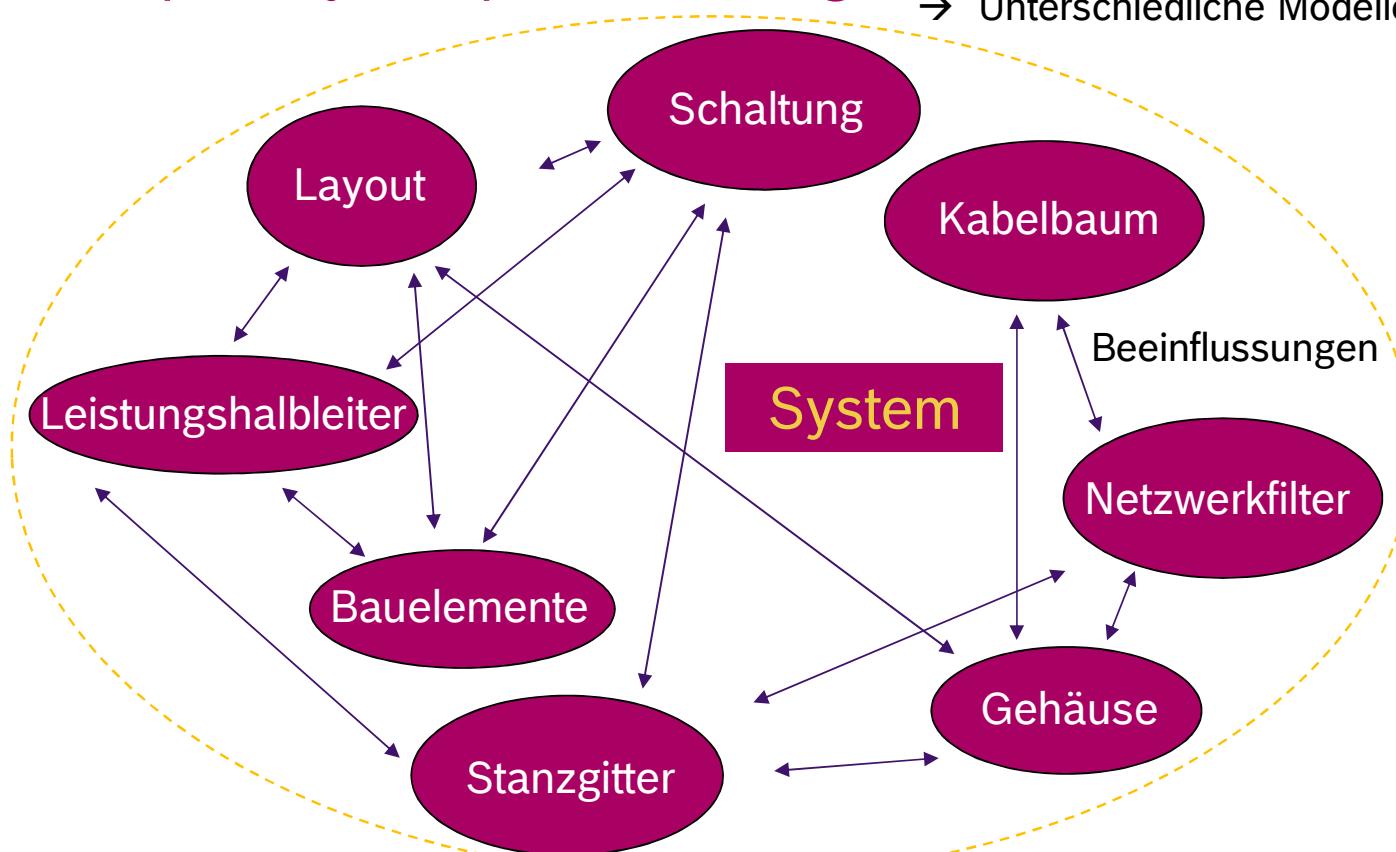
## → Systempartitionierung

## 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

### → Beispiel: Systempartitionierung

Unterschiedliche Objekte  
→ Unterschiedliche Modelle



# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

## → Kriterien zur Systempartitionierung

- Systempartitionierung nach geeigneten Simulationsmethoden
- Partitionierung der 3D-Probleme, um den Simulationsumfang zu reduzieren:
  - Unverkoppelte 3D-Strukturen getrennt modellieren
  - Galvanisch gekoppelte 3D-Strukturen getrennt modellieren
  - Wenn möglich, feldgebundene Beeinflussungen vereinfacht betrachten
- Beachtung von funktionaler und EMV-Systempartitionierung

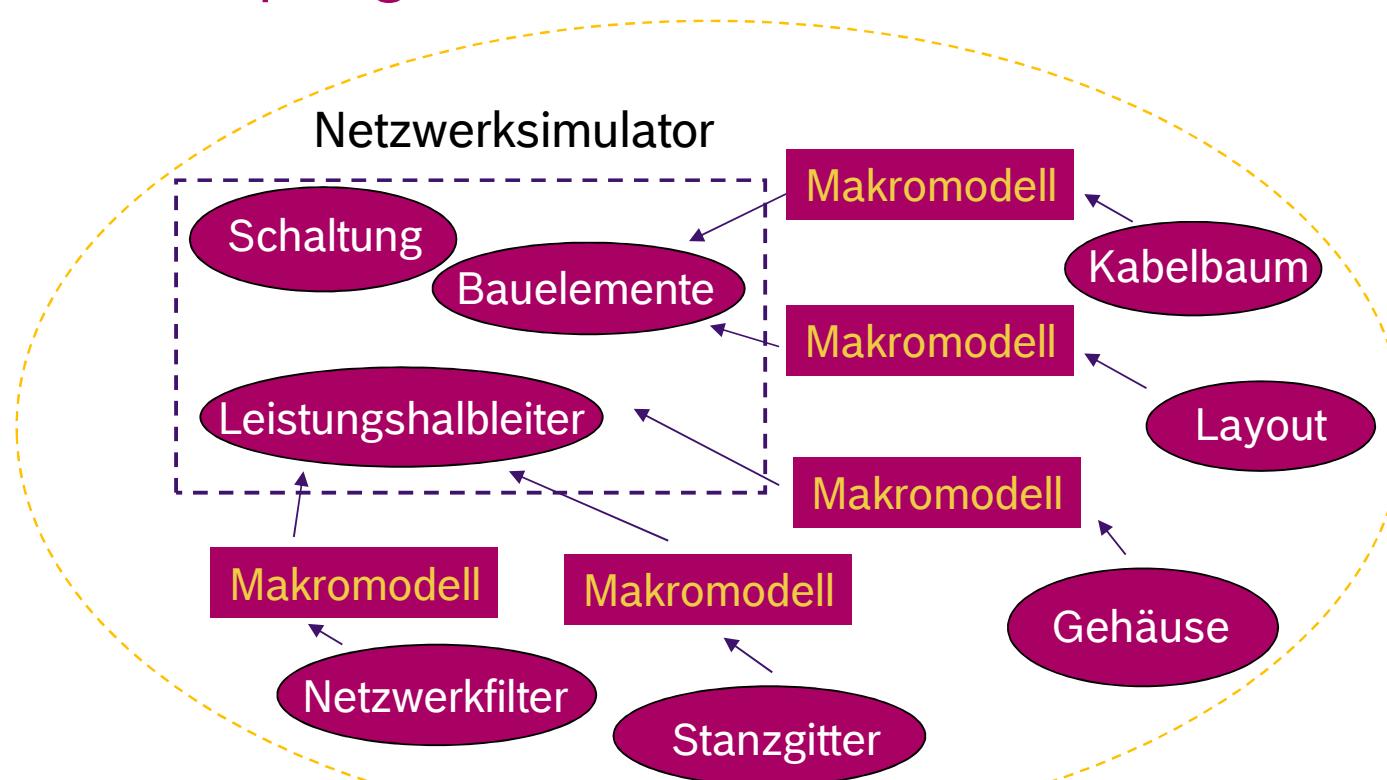
## → Verknüpfung zwischen den unterschiedlichen Modellebenen

- Gesamtsystemsimulation: 3D-Feldsimulation ist ungeeignet
  - 3D-Simulation ist sehr aufwendig;
  - Jede Subsystemänderung führt zu einer weiteren zeitaufwendigen 3D-Simulation
- Netzwerksimulationsebene → sehr schnell, sehr einfach anwendbar, universaler Verknüpfungsansatz → **Makromodellierung**

# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

## → Gesamtsystemsimulation: Verknüpfung über Netzwerksimulator



## 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

### → Gesamtsystemsimulation bei Bosch (AE/EMC)

- **Simulation in Saber (siehe die Simulation bei der ESL, Kapitel 5.8)**
  - Schaltungssimulation hat die höchste Priorität
  - Anwendungsbereich Leistungselektronik
  - 3D-Modelle: Ersatzschaltungen oder S-Parameter-Blöcke
  - Modelle aufgrund von Messdaten: Ersatzschaltungen oder S-Parameter-Blöcke
- **Simulation in CST Design Studio**
  - Spezieller Netzwerksimulator (ungeeignet für Leistungselektronik, beschränkte Auswahl an Bauelementen)
  - N-Tor-Black-Box-Modelle für unterschiedliche 3D-Solver
    - Microwave Studio (FIT, MoM, Vollwellenmodelle)
    - PCB Studio (PEEC / TL, Layoutmodelle)
    - Cable Studio (Leitungsmodelle, Kabelbäume)
    - EM Studio (Elektrostatik, Magnetostatik...)
    - MPHYSICS Studio (Thermik, Mechanik,...)
    - MICROSTRIPES (TLM, Vollwellenmodell)

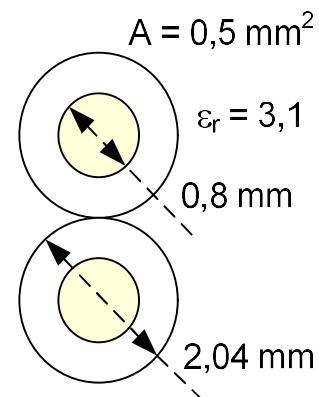
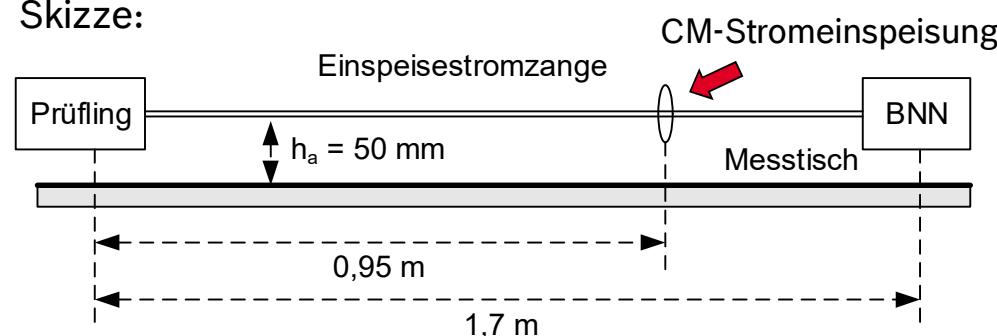
# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

## → Gesamtsystemsimulation in CST Design Studio: Beispiel

- Vereinfachter Testaufbau für die BCI-Prüfung
- Testaufbau gemäß der internationalen Norm ISO 11452-4
- Frequenzbereich: von 1 bis 400 MHz
- Zu berechnen: Störspannung zwischen ASIC-Versorgung und Ground-PINs
- Systembestandteile:
  - Prüfling (siehe nächste Seite)
  - Kabelbaum (verdrillte Doppelleitung mit einem Kupferquerschnitt  $0,5 \text{ mm}^2$ )
  - Einspeisestromzange
  - Bordnetznachbildungen für beide Kabeladern

Skizze:

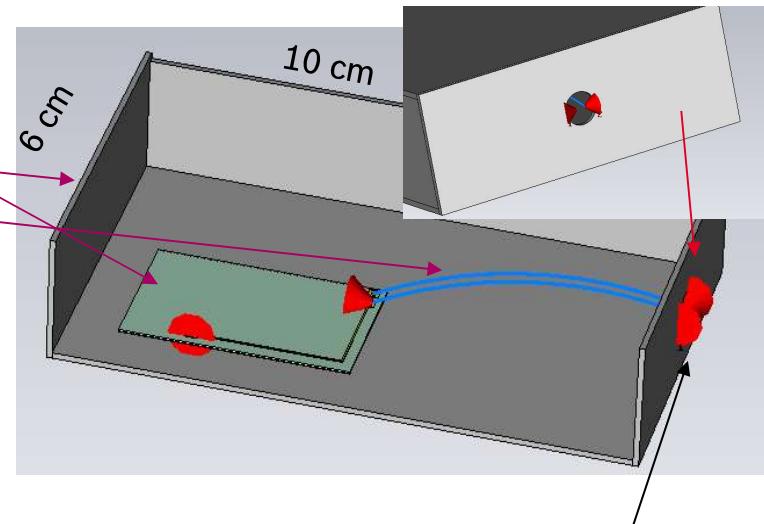


# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

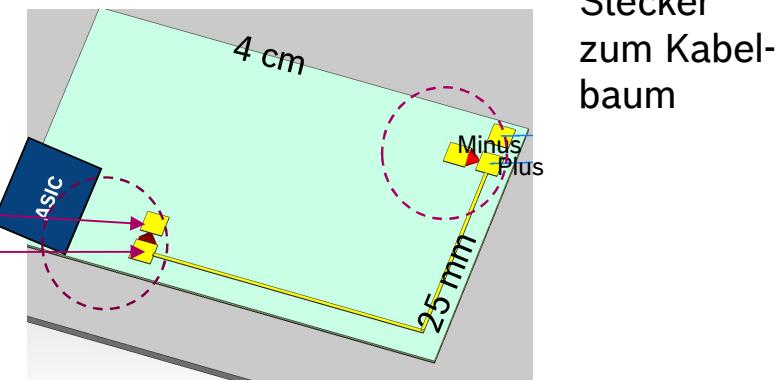
## → Prüfling

- 2-lagige Leiterplatte
- Alugehäuse
- Drahtverbindung
- Zu betrachten ist nur der Pfad: „Stecker - ASIC auf der Leiterplatte“



## → Leiterplatte

- Untere Lage: durchgehende Masseebene
- Obere Lage: Signallage
- Zur Vereinfachung nur Betrachtung der Versorgungsnetzwerke
- ASIC
  - GND
  - VDD
- Zur Vereinfachung: Darstellung: ESB



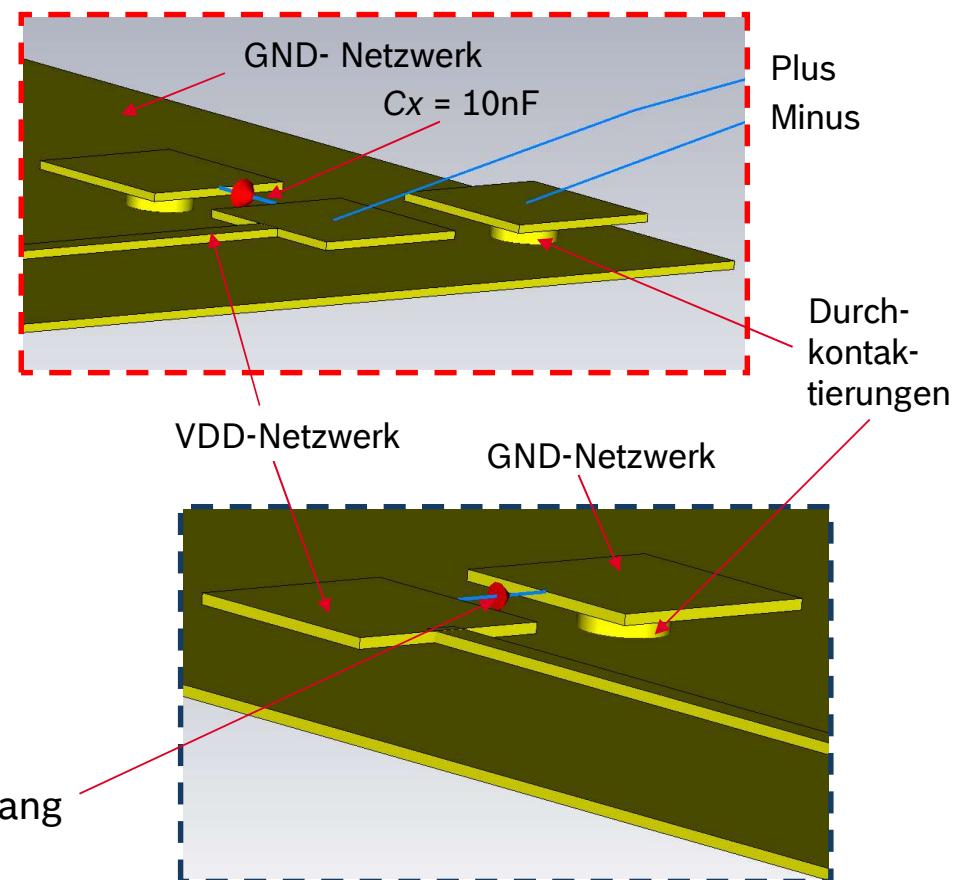
# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

## → Prüfling

- Leiterplatten-eingang

- ASIC-Eingang

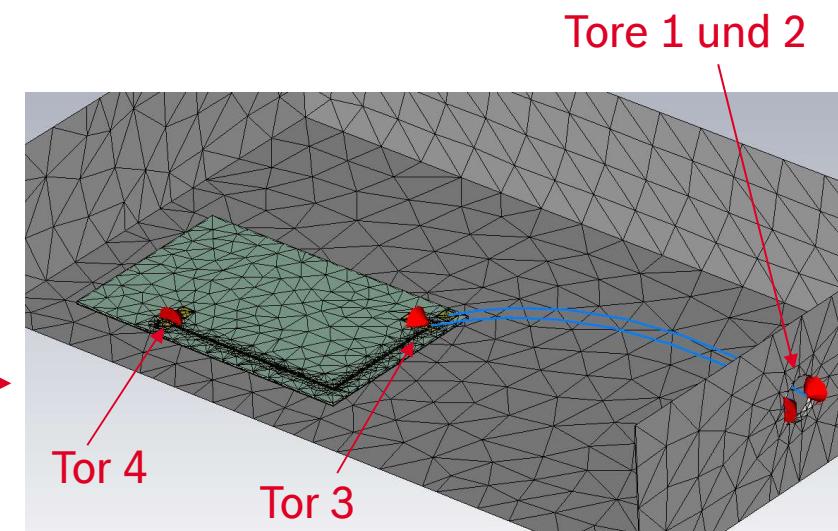


# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

## → Prüfling: 3D- Modellierung

- Im Frequenzbereich unter 400 MHz (quasistationär):
  - elektrisch klein
  - Magnetische und elektrische Beeinflussungen in 3D
  - AVT ist unsymmetrisch → inhomogene 3D-Stromverteilung
- Im GHz-Bereich sind Vollwelleneffekte zu erwarten  
→ Vollwellenansatz bei der Prüflingsberechnung
- Fazit:  
AVT der Prüflings muss mittels 3D-Simulation behandelt werden
- Softwareauswahl:  
CST Microwave Studio  
FD – Solver  
AVT-Modell  
Bezug zur Netzwerk-simulationsebene durch 4-Tore



# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

→ Systemteile, die für die Netzwerksimulation benötigt werden

→ ASIC-Modell

- HF-ESB ist vorhanden
  - Parallele RC- Schaltung

Parasitäre Kapazität zwischen Ground und Versorgung-PINs:  $C = 100 \text{ pF}$

Eingangsimpedanz:  $R = 1 \text{ k}\Omega$ :

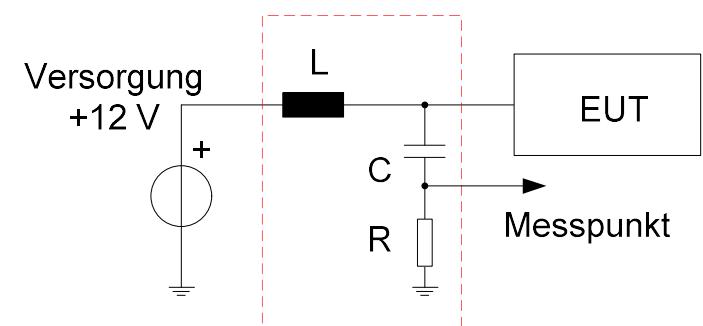
→ Bordnetznachbildung (BNN)

- gemäß ISO 7637-2,  
siehe Kapitel 3.3.1
- BNN für beide Kabeladern

→  $C_X$  – Kondensator  $10 \text{ nF}$

→ Stromspule

- Ersatzschaltbild:  
Stromquelle mit Innenwiderstand  $R_i = 50 \Omega$



# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

## → Kabelbaum

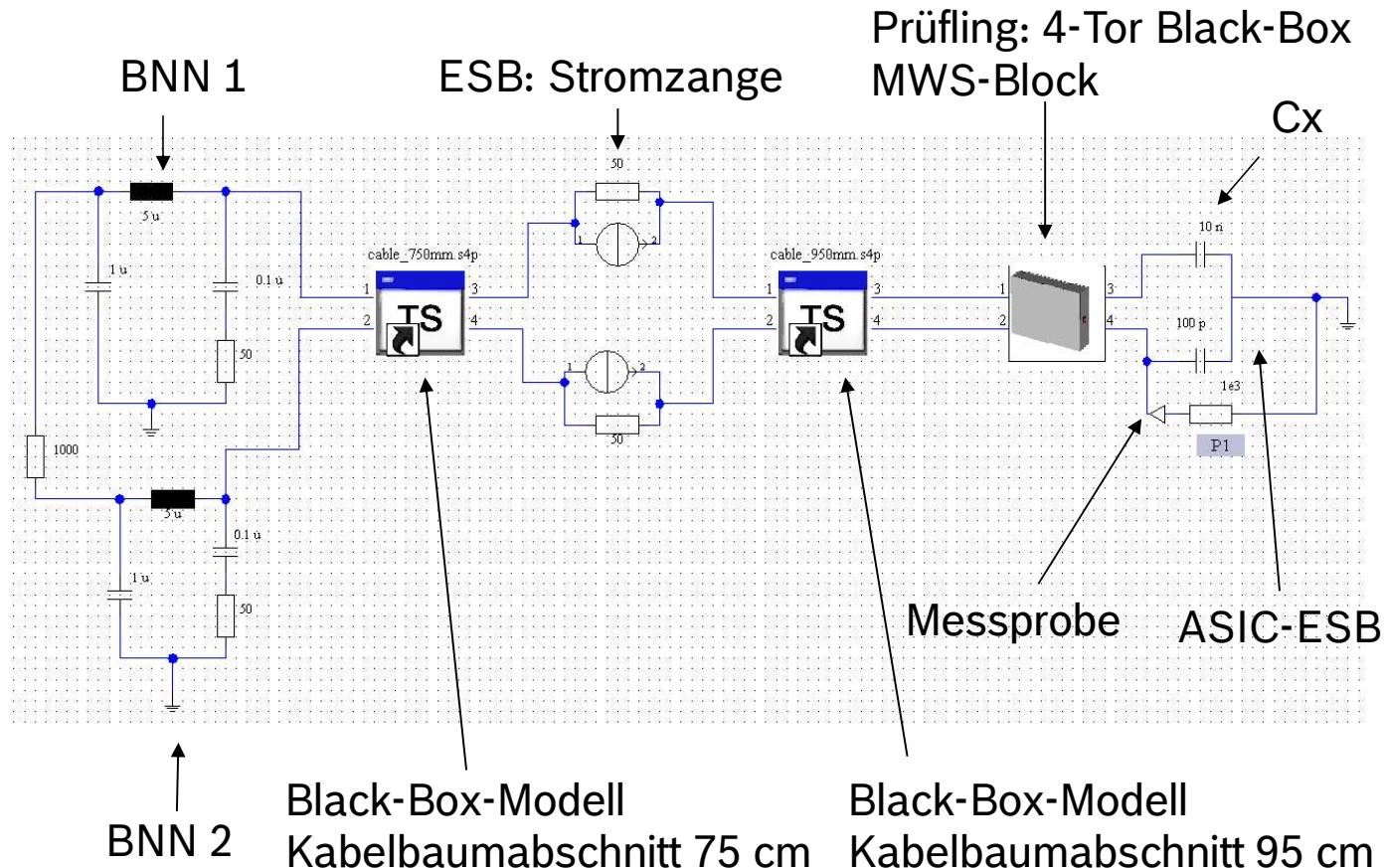
- Im Labor wird immer der gleiche Kabelbaum verwendet
- Messdaten sind in Form der Touchstone ® - Datei vorhanden
- → Makromodell des Kabelbaumes aufgrund der Messdaten

```
# Hz S DB R 50
!
1000000.000000 -26.605496 85.139988 -27.807715 84.617382 -0.021404 -3.220527 -29.686855 -96.555577
-27.807715 84.617382 -26.605496 85.139988 -29.686855 -96.555576 -0.021404 -3.220527
-0.021404 -3.220527 -29.686855 -96.555577 -26.605496 85.139988 -27.807715 84.617382
-29.686855 -96.555576 -0.021404 -3.220527 -27.807715 84.617382 -26.605496 85.139988
!
1027138.878387 -26.374706 85.008821 -27.577031 84.472044 -0.022575 -3.307359 -29.456121 -96.732751
-27.577032 84.472044 -26.374706 85.008821 -29.456120 -96.732751 -0.022575 -3.307359
-0.022575 -3.307359 -29.456121 -96.732751 -26.374706 85.008821 -27.577031 84.472044
-29.456120 -96.732751 -0.022575 -3.307359 -27.577032 84.472044 -26.374706 85.008821
```

# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

→ Gesamtsystemmodell in CST Design Studio



# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

## → Design Studio: Simulationsablauf

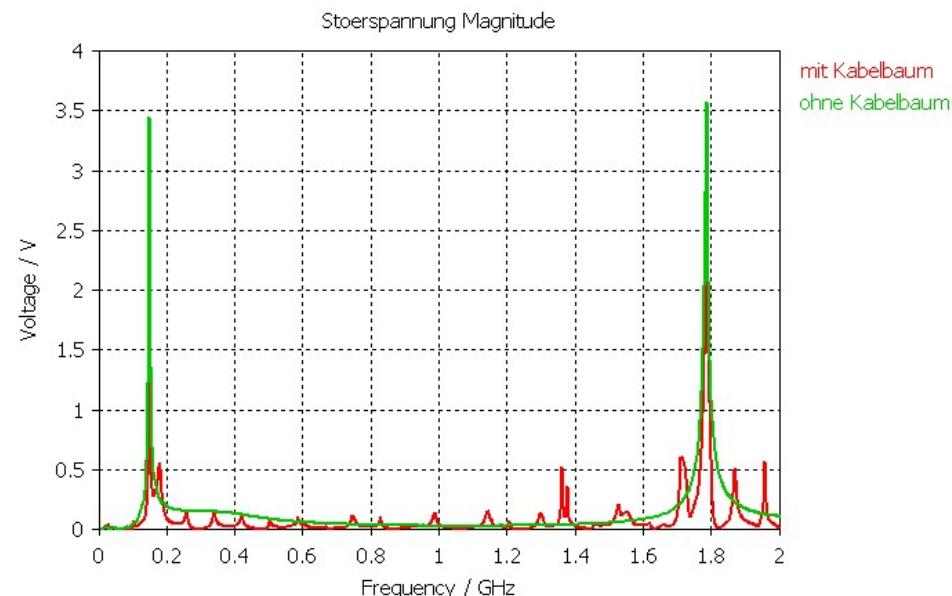
- 3D-Simulation in MWS (FD-Solver, FIT-Methode)
  - S-Matrixberechnung
  - Optional: Berechnung der Strom- bzw. Feldverteilungen
  - Simulationsdauer ist relativ lang (im Beispiel: ca. 1 h)
- Netzwerksimulation in CST Design Studio
  - Simulationsdauer ist sehr kurz (im Beispiel: ca. 15 s)
  - Ergebnis: Ströme und Spannungen in der Schaltung (bzw. an den Toren der Black-Box-Modelle)
- Postprocessing: Wiederherstellung der 3D-Feldverteilungen (in MWS), die der Netzwerksimulation entsprechen
  - Möglich für lineare Probleme
  - Theorie: Anwendung des Superpositionsprinzips
  - Simulationsdauer ist kurz (im Beispiel: ca. 20 s)

# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

## → Simulationsergebnis im erweiterten Frequenzbereich (bis 2 GHz)

- Simulation ohne Kabelbaum (3D-Vollwellensimulation)
  - Hohe Störung bei 152 MHz und 1,78GHz  
→ Eigen-Resonanzen des Prüflings
  - Simulation mit Kabelbaum
    - Zusätzlich periodische Resonanzen → Kabelbaumresonanzen

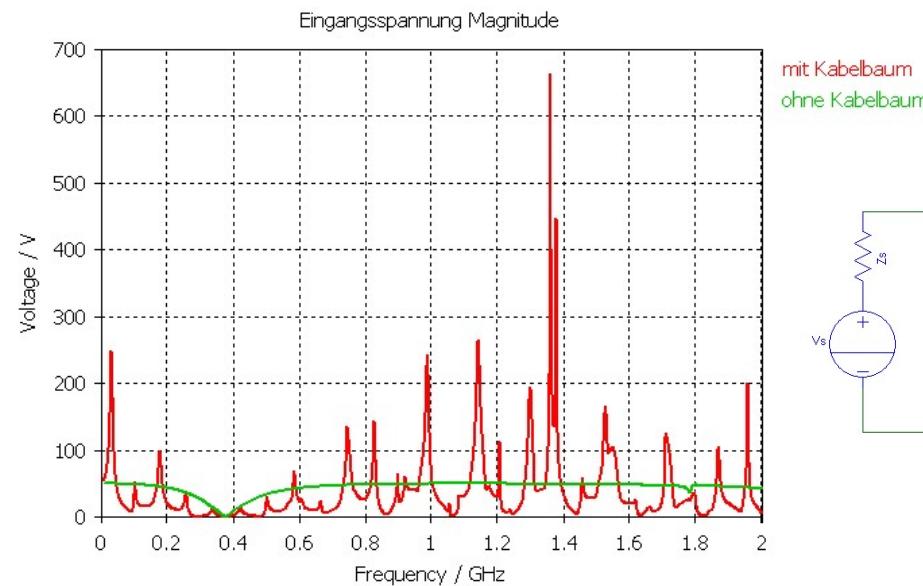


# 5 EMV-Simulation

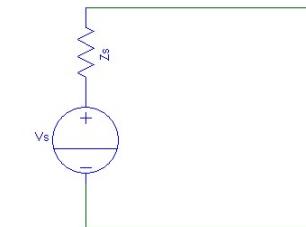
- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

→ Simulationsergebnis im erweiterten Frequenzbereich (bis 2 GHz)

- Differentielle Spannung (Eingang des Prüflings)



mit Kabelbaum  
ohne Kabelbaum



Bei Resonanz  
ist  $Z_{inp}$  niedrig

sonst  
ist  $Z_{inp}$  hoch

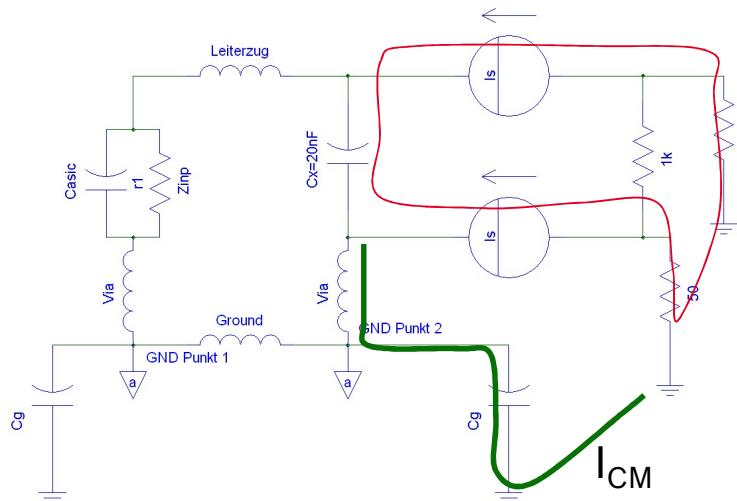
- Erklärung:  
Bei Eigen-Resonanzen hat der Prüfling eine niedrige Eingangsimpedanz  
→ kleine Eingangsspannung und hoher Eingangsstrom

# 5 EMV-Simulation

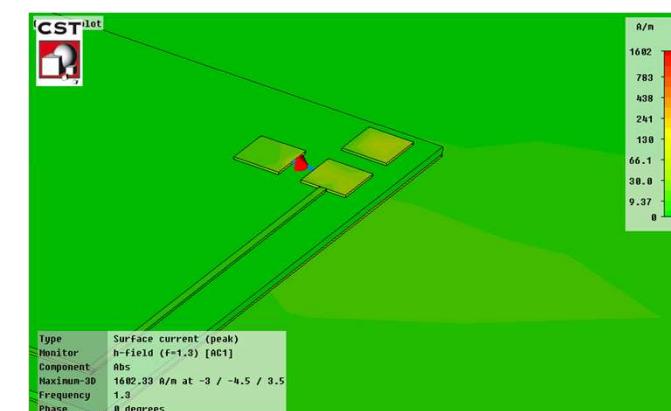
- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

## → EMV- Analyse bei 1,3 GHz: Kabelbaumresonanz

- Keine Resonanzen im Prüfling
- Ersatzschaltung
- Bei höheren Frequenzen ist  $C_x$  gut leitend
- Hauptstrompfad läuft durch  $C_x \rightarrow$  Stromausgleich  
→ Störströme fließen nur in der Leiterplattenecke.  
Es gibt keine DM-Störung im ASIC.



3D-Stromdichteverteilung

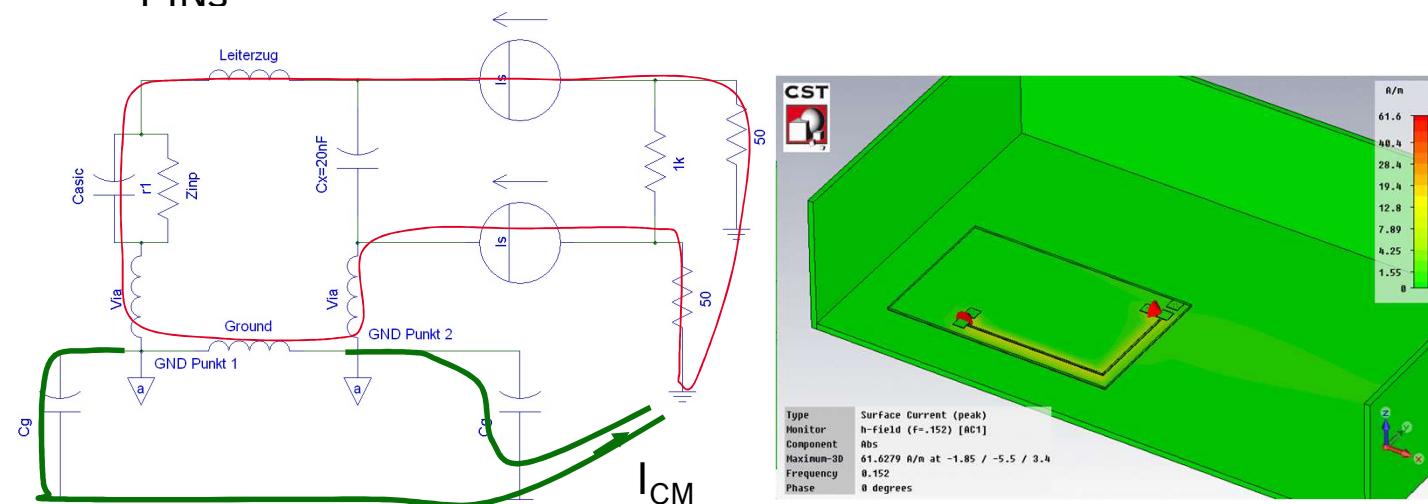


# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

## → EMV- Analyse bei 152 MHz: Resonanz im Prüfling

- Stromausgleich durch ASIC
- Ursache: LC-Resonanz
  - L*: Leiterzüge, Durchkontaktierungen
  - C*: ASIC - Kapazität
- GND – Netzwerk hat hohe Streukapazität gegen Gehäuse
- Folge: Asymmetrie und differentielle Störspannung zwischen ASIC - PINs

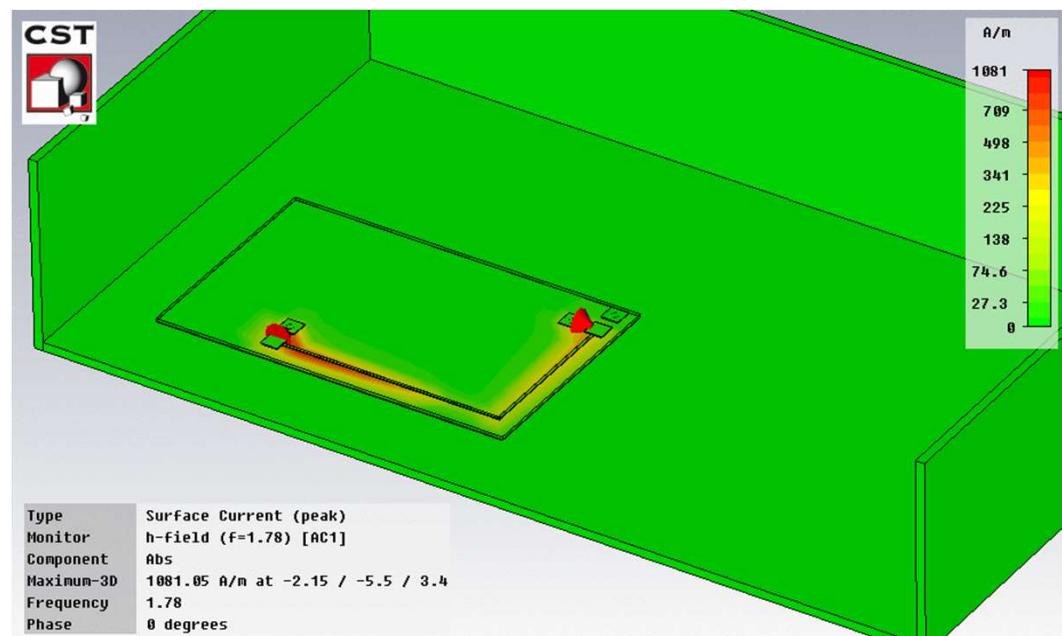


# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

→ EMV-Analyse bei 1,78 GHz: Resonanz im Prüfling

- Leiterzug hat  $\lambda/2$ -Leitungsresonanz
- ESB mit konzentrierten Bauelementen gilt nicht mehr
- Man sieht stehende Wellen



# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

## → Zusammenfassung:

### Gesamtsystemsimulation mittels CST Design Studio

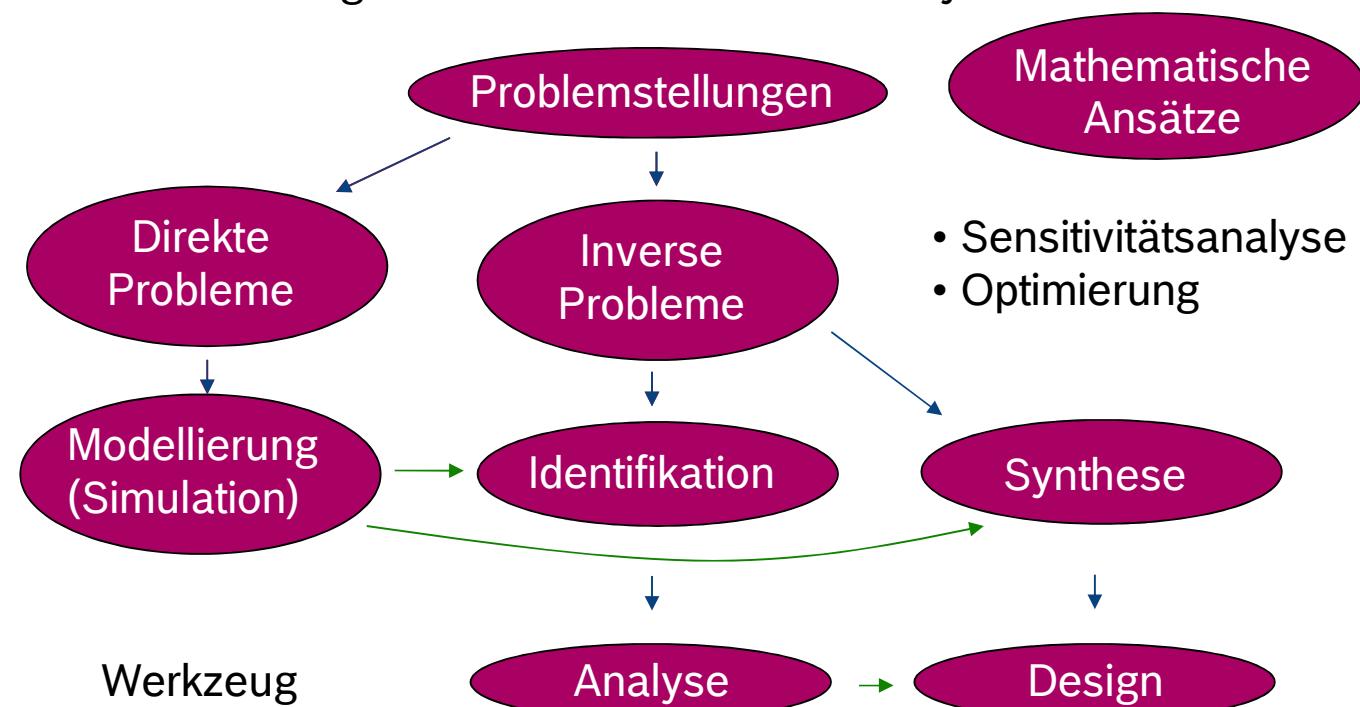
- 3D-Simulation: Höchster Zeitaufwand
  - Anwendung nur wenn unbedingt notwendig (z.B. Stanzgitter, Gehäuse usw.)
  - 3D-Simulation kann durch effizientere Ansätze ersetzt werden (z.B. Makromodelle aufgrund von Messdaten, Cable Studio, ESB, usw.)
  - Vorteil der 3D-Simulation: 3D-Störstrom (bzw. EM-Feld) Darstellung  
→ Inputs für EMV - Analyse
- Simulation in CST Design Studio ist sehr effizient
  - Optimierung der Bestückung
  - Parameteranpassung
- Nachteile von CST Design Studio
  - Schlechte Modelle für Halbleiter (insbesondere für Leistungshalbleiter)  
→ schwierig für EMV in der Leistungselektronik anzuwenden
  - Netzwerksimulator hat eine sehr beschränkte Auswahl an Elementen
  - 3D-Störstromberechnung ist **nur bei linearen Schaltungen** möglich

# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

## EMV-Analyse mittels Simulation

- Bisher betrachtet: nur die Modellierung und Simulation
- Ziel: EMV-Design → Bedarfe in der EMV-Analyse



# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

## → Sensitivitätsanalyse: Überblick

- Grundidee allgemein: Identifikation der Systemparameter, die das Systemverhalten hauptsächlich beeinflussen
- In der EMV:
  - Systemverhalten: Störaussendung oder Störempfindlichkeit
  - Systemparameter beschreiben die Störpfade (z.B.: Parasitics)
- Mathematische Formulierung:

$$\mathbf{y} = \mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{p}), \quad \mathbf{p} = \{p_i\} \quad \phi = \mathbf{T} \mathbf{x}$$

**p:** Vektor der Systemparameter

**x:** Systemzustand

**y:** Systemantwort

**φ:** Skalare Funktion: Maß des Systemverhaltens (z.B. Maximale Störspannung im gegebenen Frequenzbereich)

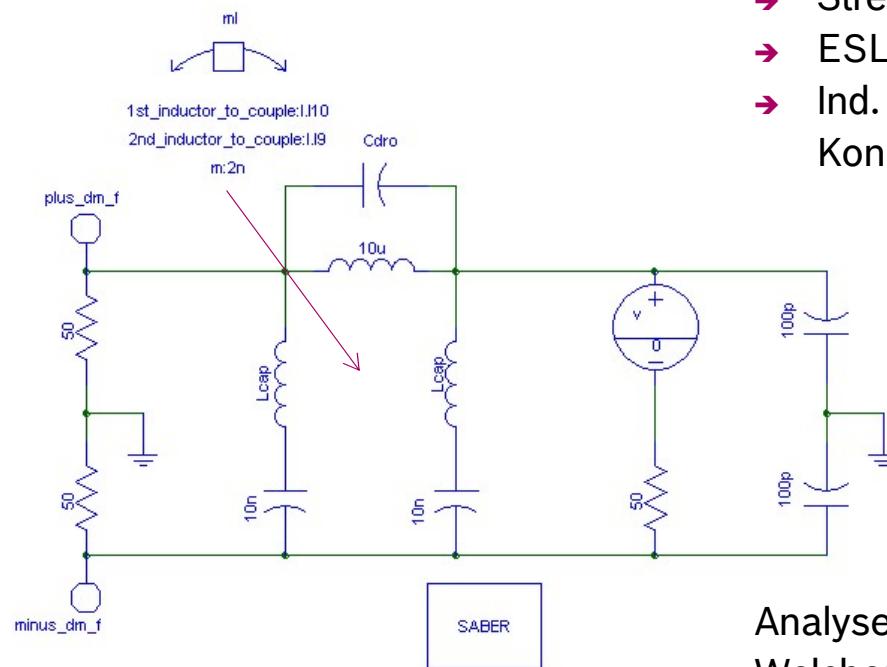
$\frac{\partial \phi}{\partial p_i}$ : Sensitivität auf den Parameter  $p_i$

# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

## → Sensitivitätsanalyse: Beispiel

Π-Filter (siehe Kapitel 3)



Drei Parasitics:

- Streukapazität der Drossel ( $C_{dro}$ )
- ESL des Kondensators ( $L_{cap}$ )
- Ind. Kopplung zwischen Kondensatoren ( $M$ )

$\phi$ : nodale Spannung  $U_{plus}$

Analyse beantwortet die Frage:  
Welcher Parameter hat den größten Einfluss auf die nodale Spannung?

# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

## → Ergebnis der Sensitivitätsanalyse mit Saber

Sensitivity of At END of MAG(plus_dm_f) in pfile sen.ac						
Nominal Value = 201.99m						
Instance	Part Type	Parameter Name	Nominal Value	Sensitivity	Bar-chart	
-	-	lcap	7n	-0.402	-----	
-	-	cdro	5p	0.336	-----	
ml.ml1	<undef>	m	2n	-0.254	-----	

- Maximale Beeinflussung durch ESL des Kondensators
- Keine quantitative Information
- Nur ein qualitativer Hinweis, der nur bei kleinen Änderungen der Parameter bezüglich der nominalen Werte gilt
- Jedoch bringt es viel für das Design  
→ Identifikation der kritischen Parasitics
- Hinweis für EMV-Integration:
  - Stanzgitter bei den Kondensatoren muss möglichst kurz designed werden
  - Bauelement mit kleiner ESL wählen

# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

## → Direkte und inverse Problemstellungen

### Direkte Problemstellungen



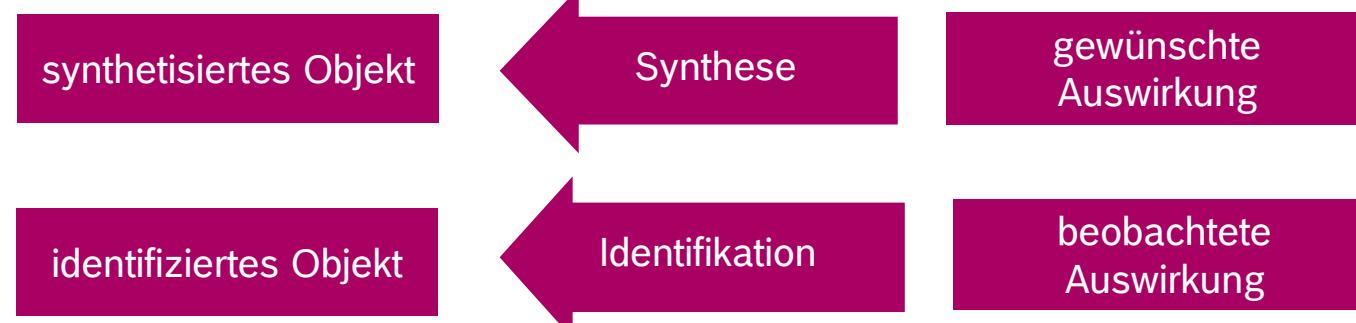
z.B.:

Gerät, Schaltung, Antenne,  
Verbindungsstruktur

z.B.:

Funktion des Gerätes,  
Verhalten der Schaltung,  
Strahlungsdiagramm der Antenne,  
Signal Integrity (SI) abhängig  
von der Verbindungsstruktur

### Inverse Problemstellungen



# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

## Simulation am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“

### → Auswahl des Tools abhängig von der Aufgabestellung

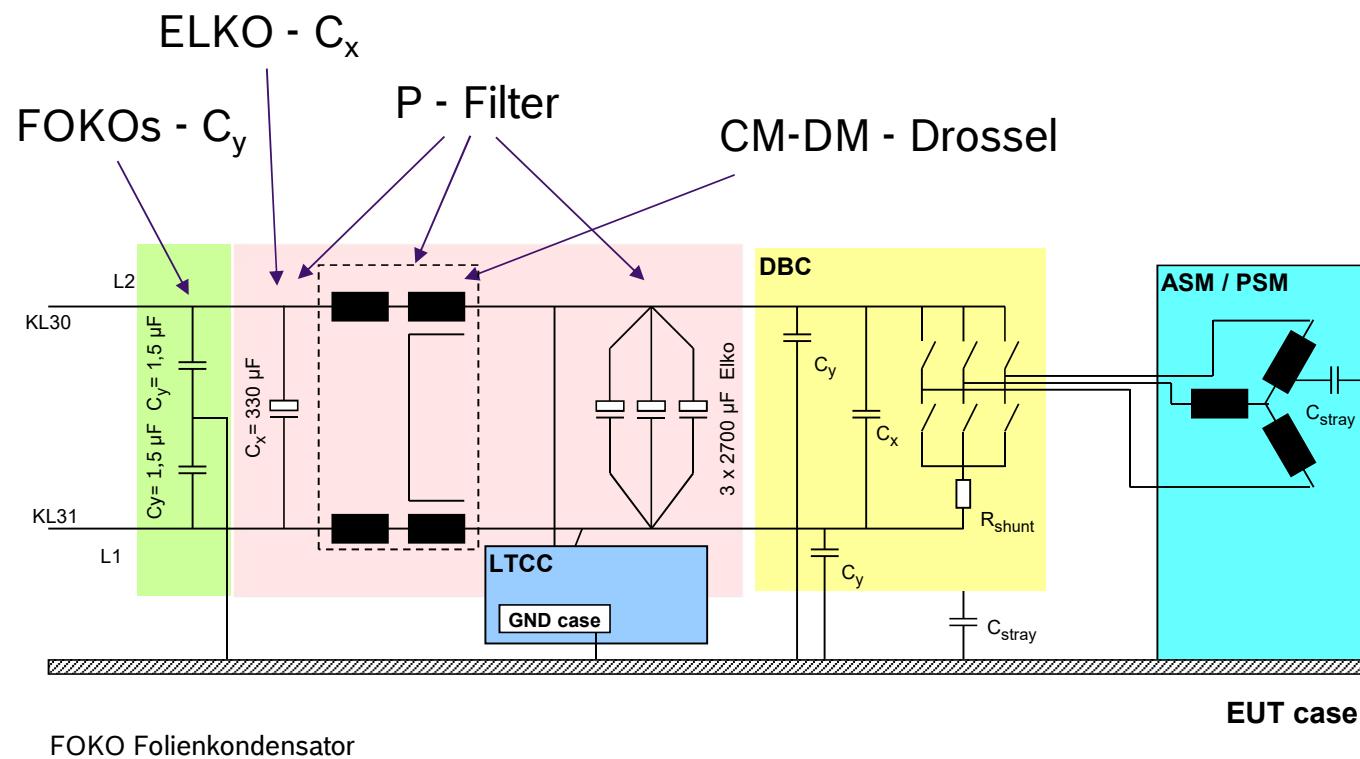
- Komplexes System → Gesamtsystemsimulation  
→ Zwei Varianten: Design Studio und Saber
- Hauptstörquelle: MOSFETs  
→ Genaue Darstellung des Umschaltverhaltens hat primäre Bedeutung
- Frequenzbereich: < 110 MHz
  - Steuergerät ist elektrisch klein  
→ Kaum Vollwelleneffekte zu erwarten
  - Es sind viele parasitäre Effekte zu erwarten (elektrische und magnetische Kopplungen)
  - Gehäuse ist nicht leitfähig  
→ kaum Gehäuseresonanzen

### → Fazit: Saber ist das Haupttool. Alle elektromagnetische Beeinflussungen werden in der Form der Ersatzschaltungen dargestellt

# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“
  - 5.9.1 Elektrische Servolenkung: Sabermodell
  - 5.9.2 Elektrische Servolenkung: Modellvalidierung
  - 5.9.3 EMV-Analyse aufgrund der Simulation

→ Elektrische Servolenkung: prinzipielle Schaltung mit Filterelementen (Kapitel 3)

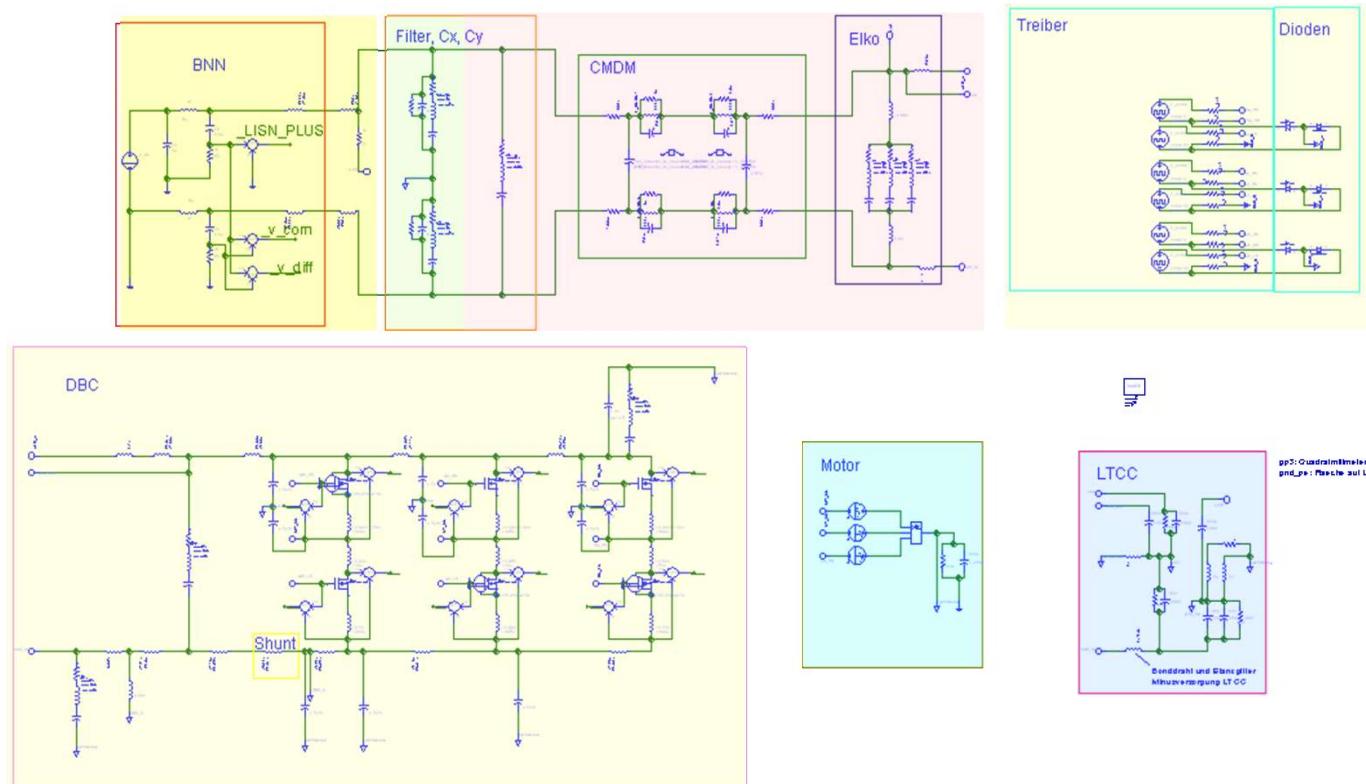


# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“
  - 5.9.1 Elektrische Servolenkung: Sabermodell
  - 5.9.2 Elektrische Servolenkung: Modellvalidierung
  - 5.9.3 EMV-Analyse aufgrund der Simulation

## Elektrische Servolenkung: Modellbeschreibung

→ ESL3: Gesamtsystemmodell für EMV-Simulation

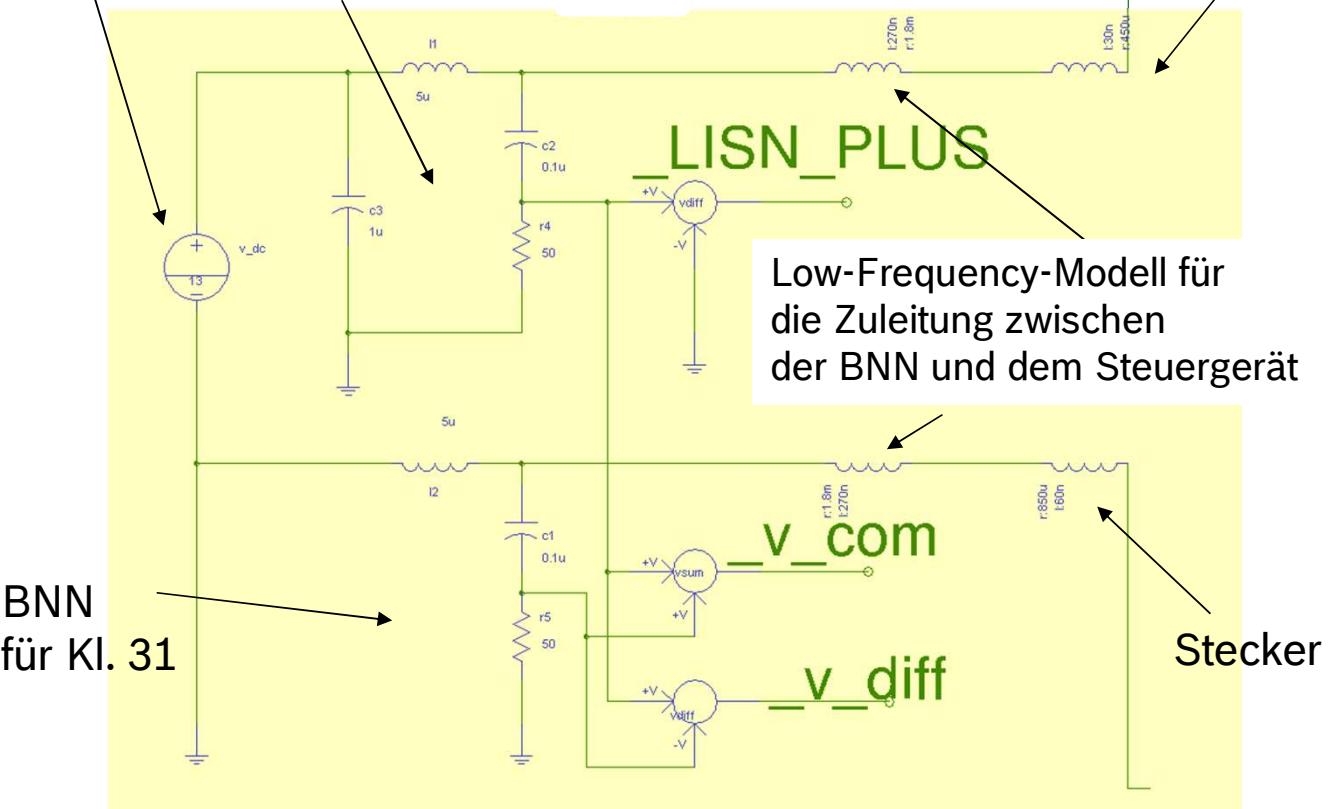


# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“
  - 5.9.1 Elektrische Servolenkung: Sabermodell
  - 5.9.2 Elektrische Servolenkung: Modellvalidierung
  - 5.9.3 EMV-Analyse aufgrund der Simulation

## → Modellteile: Bordnetznachbildung (BNN)

Batterie BNN für Kl. 30



# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“
  - 5.9.1 Elektrische Servolenkung: Sabermodell
  - 5.9.2 Elektrische Servolenkung: Modellvalidierung
  - 5.9.3 EMV-Analyse aufgrund der Simulation

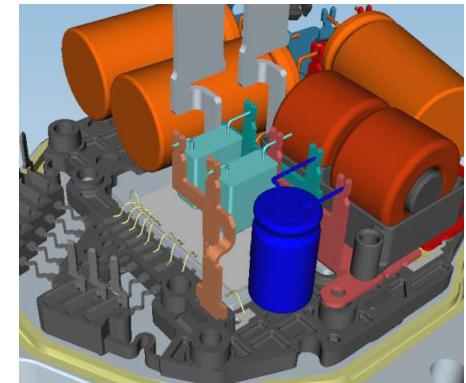
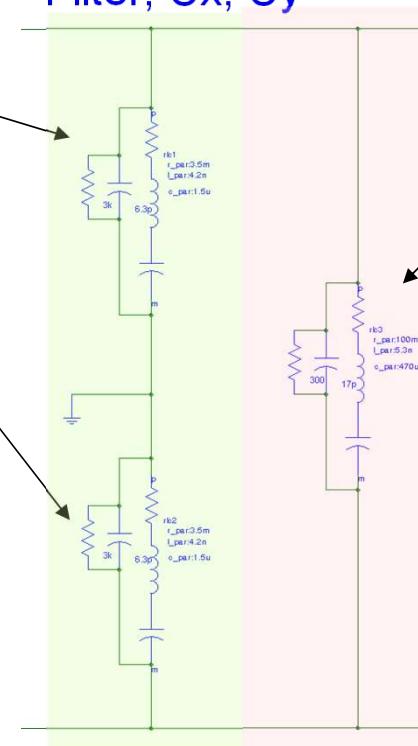
→ Modellteile: Eingangsfilter  $C_x$  und  $C_y$

Modelle für  $C_y$  mit Parasitics

Filter,  $C_x, C_y$

Modelle für  $C_x$  mit Parasitics

Alle Modelle sind aufgrund von Messdaten erstellt

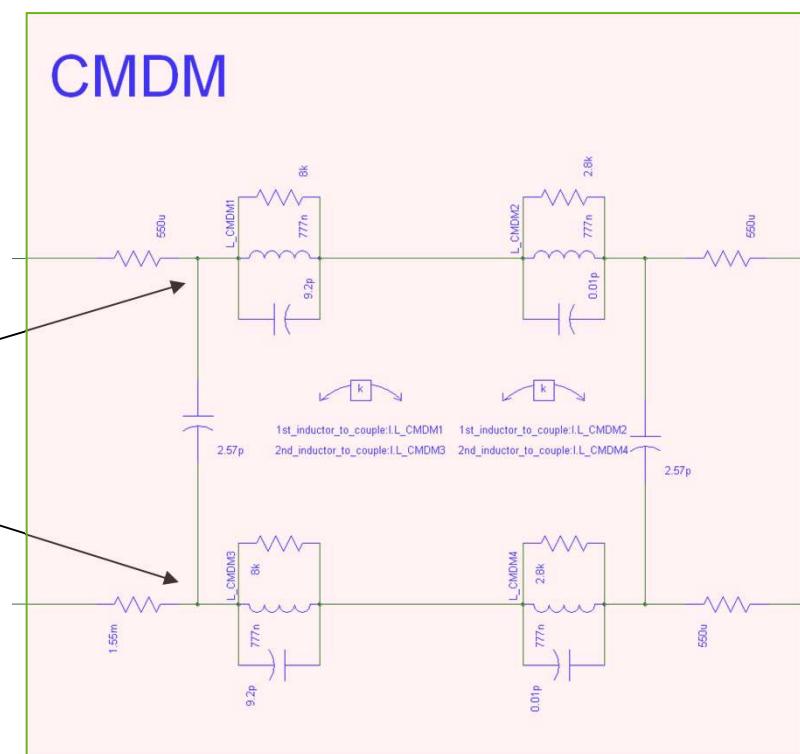
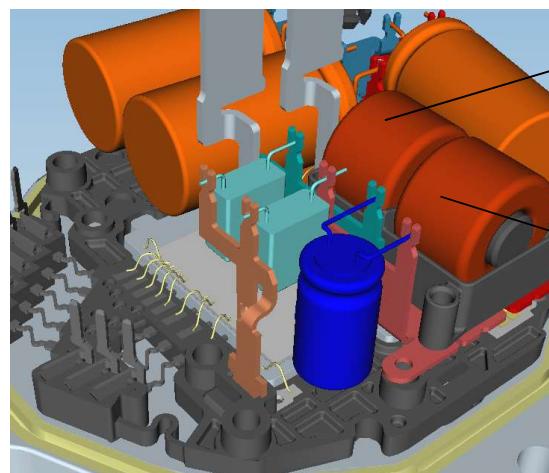


# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“
  - 5.9.1 Elektrische Servolenkung: Sabermodell
  - 5.9.2 Elektrische Servolenkung: Modellvalidierung
  - 5.9.3 EMV-Analyse aufgrund der Simulation

## → Modellteile: CMDM-Drossel

- Streukapazitäten der Wicklungen
- Ein physikalisches Modell wurde mit den Messdaten gefittet

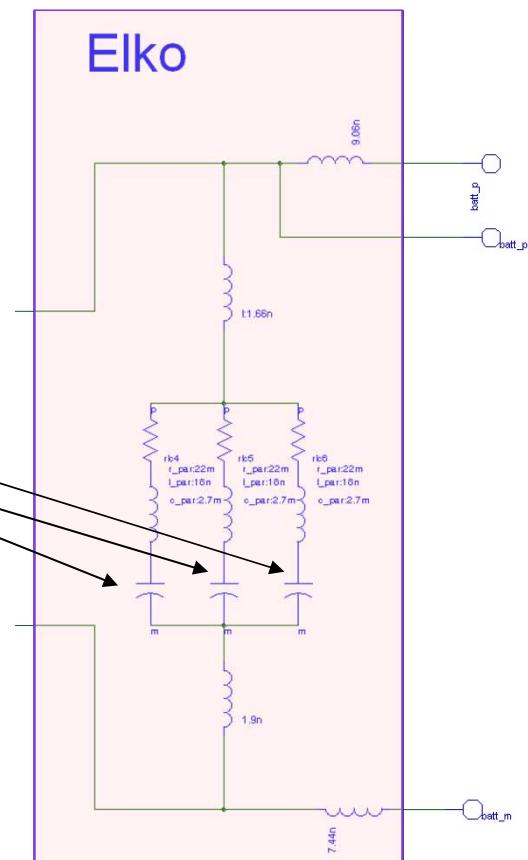
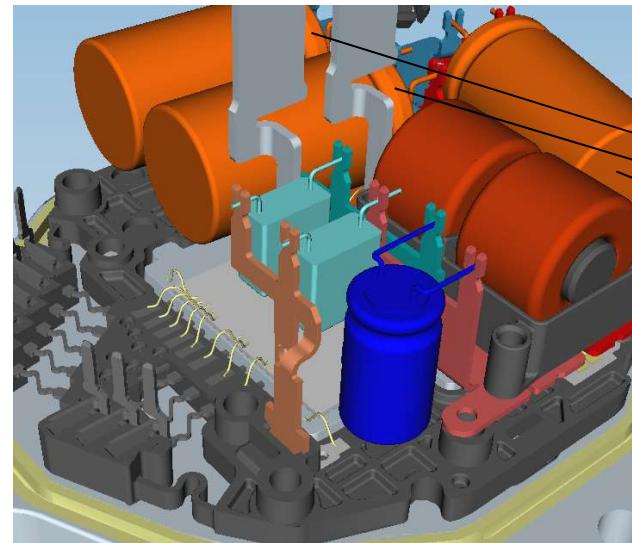


# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“
  - 5.9.1 Elektrische Servolenkung: Sabermodell
  - 5.9.2 Elektrische Servolenkung: Modellvalidierung
  - 5.9.3 EMV-Analyse aufgrund der Simulation

## → Modellteile: Zwischenkreiskondensator

- Modell Elko: erstellt aufgrund der Messungen
- Zugehöriges Stanzgitter

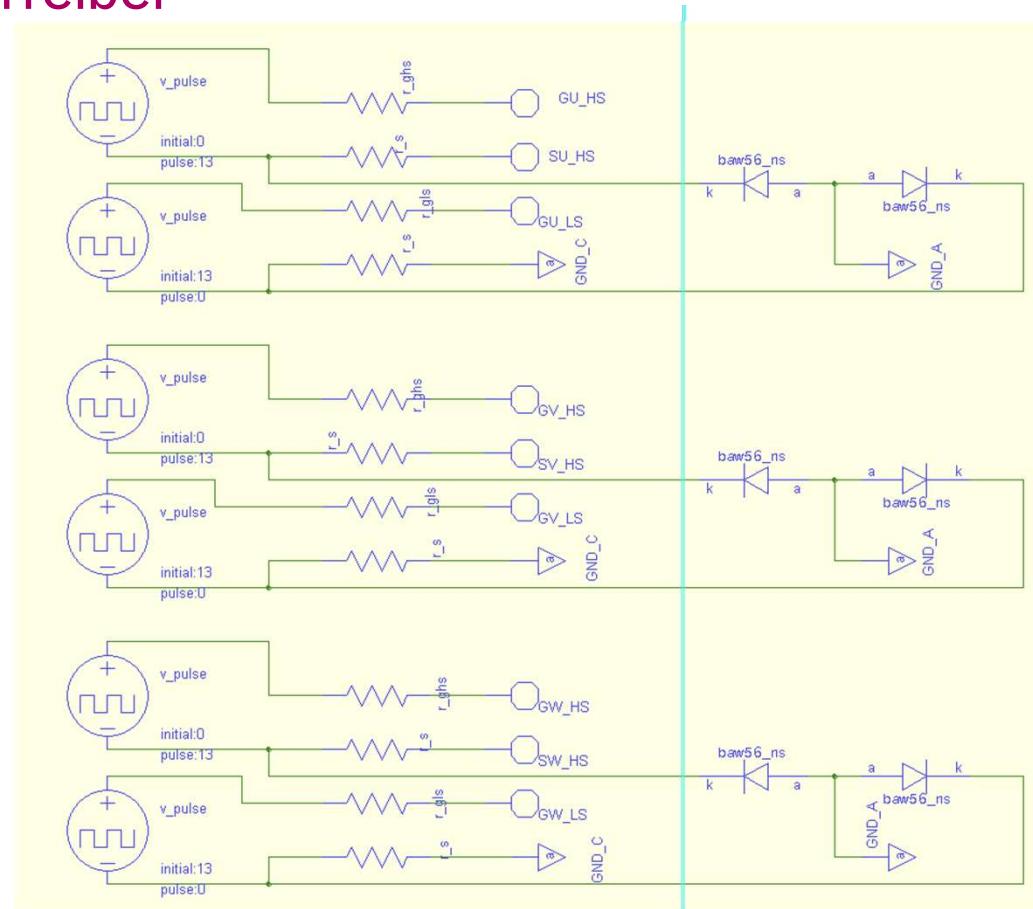


# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“
  - 5.9.1 Elektrische Servolenkung: Sabermodell
  - 5.9.2 Elektrische Servolenkung: Modellvalidierung
  - 5.9.3 EMV-Analyse aufgrund der Simulation

## → Modellteile: Treiber

ein vereinfachtes Modell:  
Spannungsquelle und Vorwiderstand

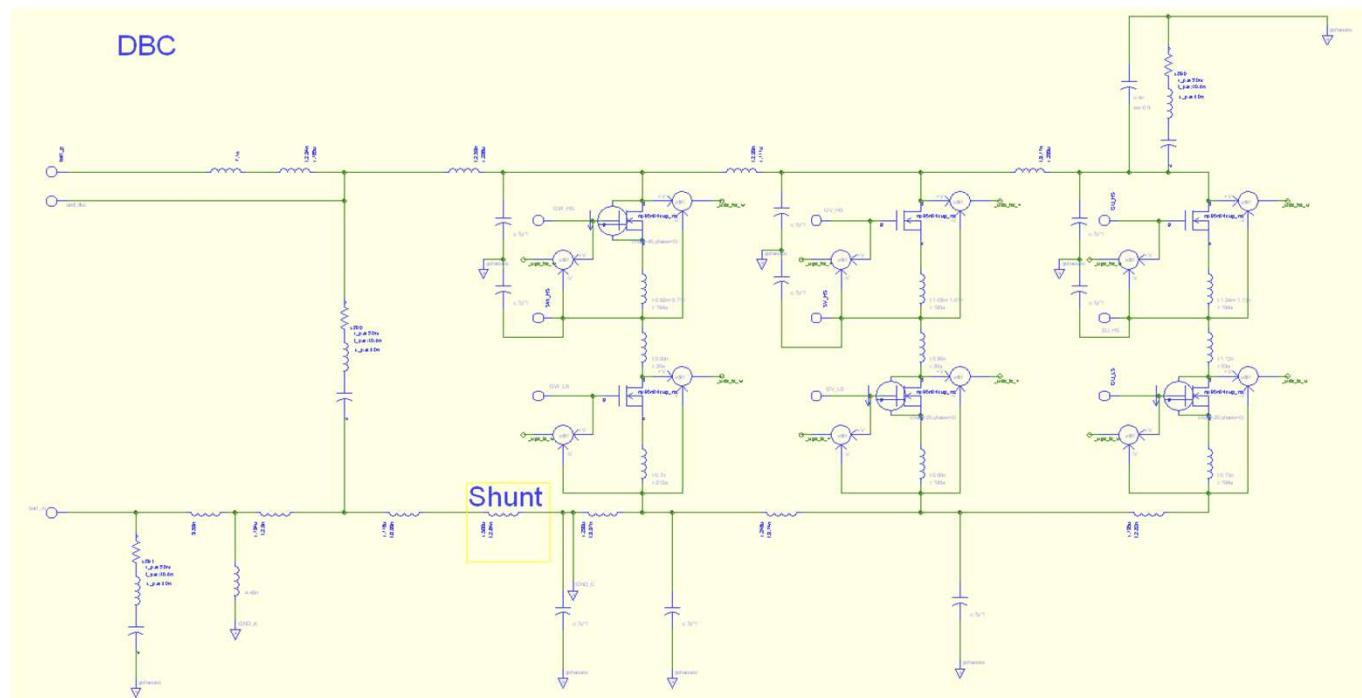


## 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
  - ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
  - ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
  - ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
  - ▶ 5.5 Leitungsmodelle
  - ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
  - ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
  - ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
  - ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“
    - 5.9.1 Elektrische Servolenkung Sabermodell
    - 5.9.2 Elektrische Servolenkung Modellvalidierung
    - 5.9.3 EMV-Analyse aufgrund der Simulation

## → Modellteile: DBC

- Wichtig: Umschaltverhalten → genaue Modelle für die MOSFET- Ansteuerung
  - Layoutmodell ist in diesem Fall sehr vereinfacht (nur parasitäre Induktivitäten und Kapazitäten, da Abmessungen „klein“)

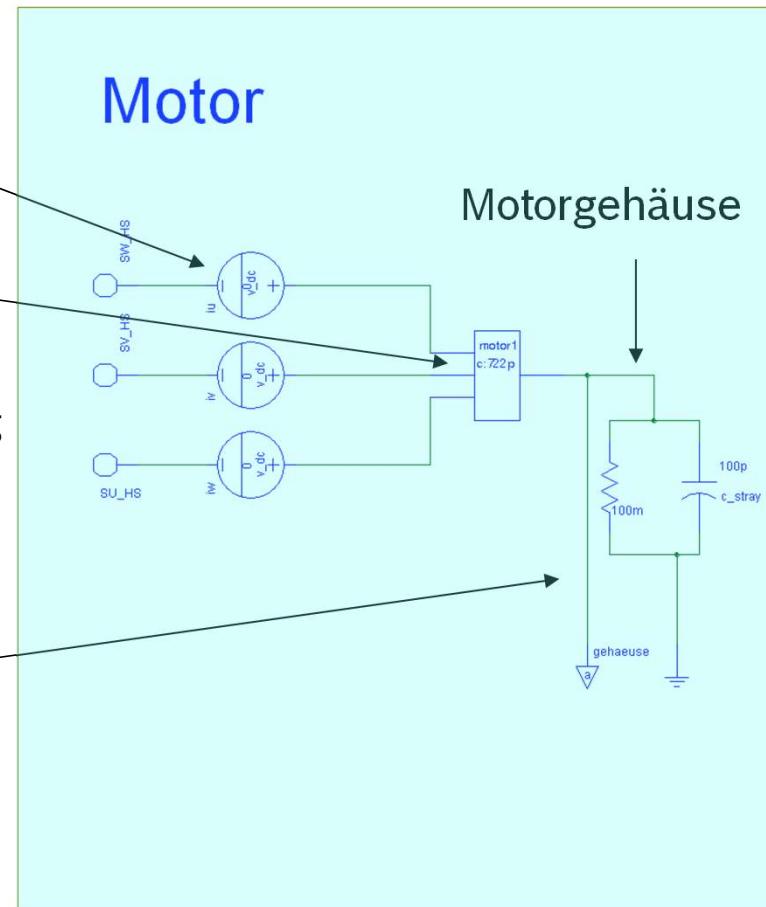


# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“
  - 5.9.1 Elektrische Servolenkung: Sabermodell
  - 5.9.2 Elektrische Servolenkung: Modellvalidierung
  - 5.9.3 EMV-Analyse aufgrund der Simulation

## → Modellteile: Motor

- Phasenstromsensoren
- 4-Tor-Makromodell der Motorwicklungen  
Erstellt aufgrund der Messdaten  
Ansatz:  
**Messdaten → Makromodellierung**  
→ Ersatzschaltung  
(siehe Kapitel 5.6)
- Anbindung zwischen dem Motorgehäuse und dem Messtisch  
(hier galvanische Anbindung)



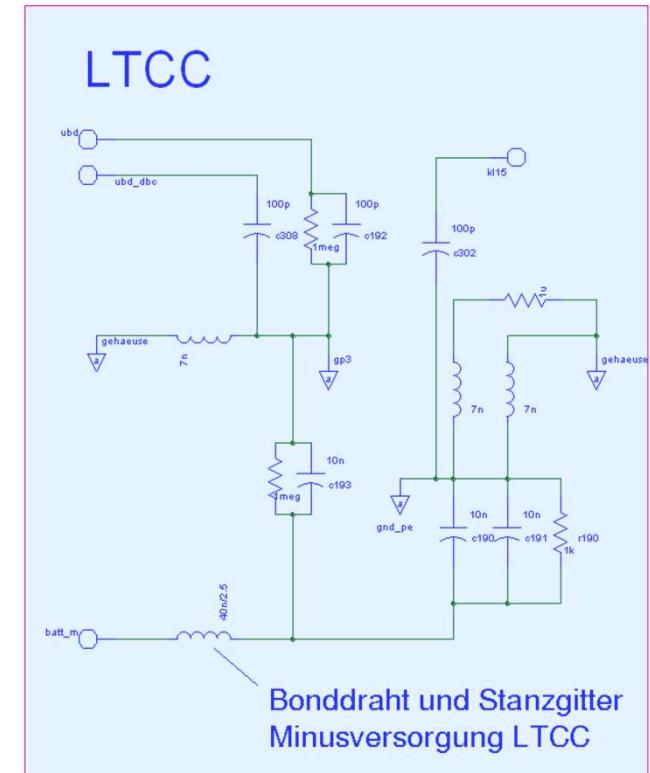
# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“
  - 5.9.1 Elektrische Servolenkung: Sabermodell
  - 5.9.2 Elektrische Servolenkung: Modellvalidierung
  - 5.9.3 EMV-Analyse aufgrund der Simulation

## → Modellteile: LTCC

- Starke Vereinfachung
- EMV-Ersatzschaltung
- ESB enthält:

- Nur die Kapazitäten, die eine Verbindung mit den LTCC-Toren haben
- EMV-Kondensatoren ( $C_y$ )
- Parasitäre Induktivitäten
- ESB für die Pfade zwischen den Grounds
- Fazit:  
ESB zur Berücksichtigung der Resonanzkreise auf der Systemebene



gp3: Quadratmillimeterfläche auf LTCC; Potential: Gehäuse  
gnd\_pe: Fläche auf LTCC nahe Stecker; Potential: Gehäuse

# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“
  - 5.9.1 Elektrische Servolenkung: Sabermodell
  - 5.9.2 Elektrische Servolenkung: Modellvalidierung
  - 5.9.3 EMV-Analyse aufgrund der Simulation

## Elektrische Servolenkung: Modellvalidierung

- **Modellerstellung:** Qualität der Modelle am Anfang der Modellierung
  - Sehr selten ist das Modell zu Beginn gut dimensioniert → Modellvalidierung und ggf. Optimierung (unvollständige Aufgabenstellung, ungenaue Modelle für einige Komponenten, Parameterdrift der Bauelemente)
- **Modellvalidierung: Schwerpunkte**
  - Validierung aufgrund des Vergleiches von Simulations- und Messergebnissen
  - Untersuchung von Hardwaremustern oder ausgewählten Blöcken und Baugruppen
  - Auswahl signifikanter Vergleichskriterien (üblicherweise die Störgrößen)
  - Messung - Messfehler, nicht alles kann gemessen werden (ist zugänglich)
  - Simulation - Simulationsfehler, unvollständiges/ ungeeignetes Modell
  - Quantitative Validierung ist häufig nicht möglich
  - Qualitative Validierung
    - Anzahl und Frequenzen der Resonanzen
    - Größenordnung
    - Prinzipielle Konsequenzen von Parametervariierung (z.B.: man variiert einen Kondensator → Resonanzfrequenz verschiebt sich)

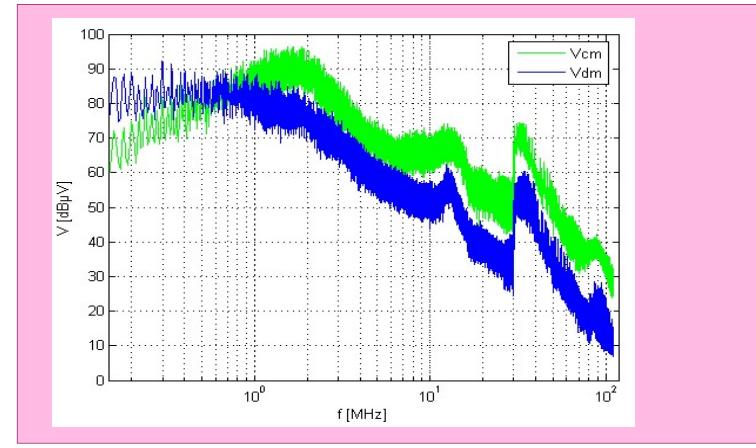
# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“
  - 5.9.1 Elektrische Servolenkung: Sabermodell
  - 5.9.2 Elektrische Servolenkung: Modellvalidierung
  - 5.9.3 EMV-Analyse aufgrund der Simulation

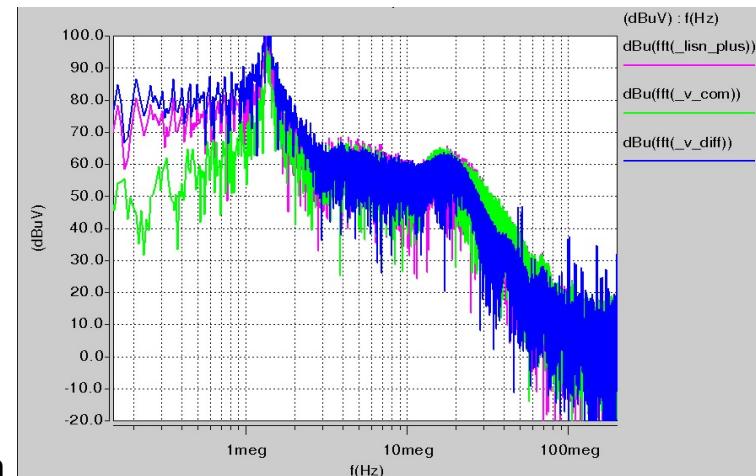
## → Vergleich: Spektrum der Störspannungen

Vorgehensweise bei der Validierung:

- Mehrere Simulationen und Messungen
- Modellanpassung
- Beispiel: Störspannung an der BNN



Messung: Spektrumanalysator



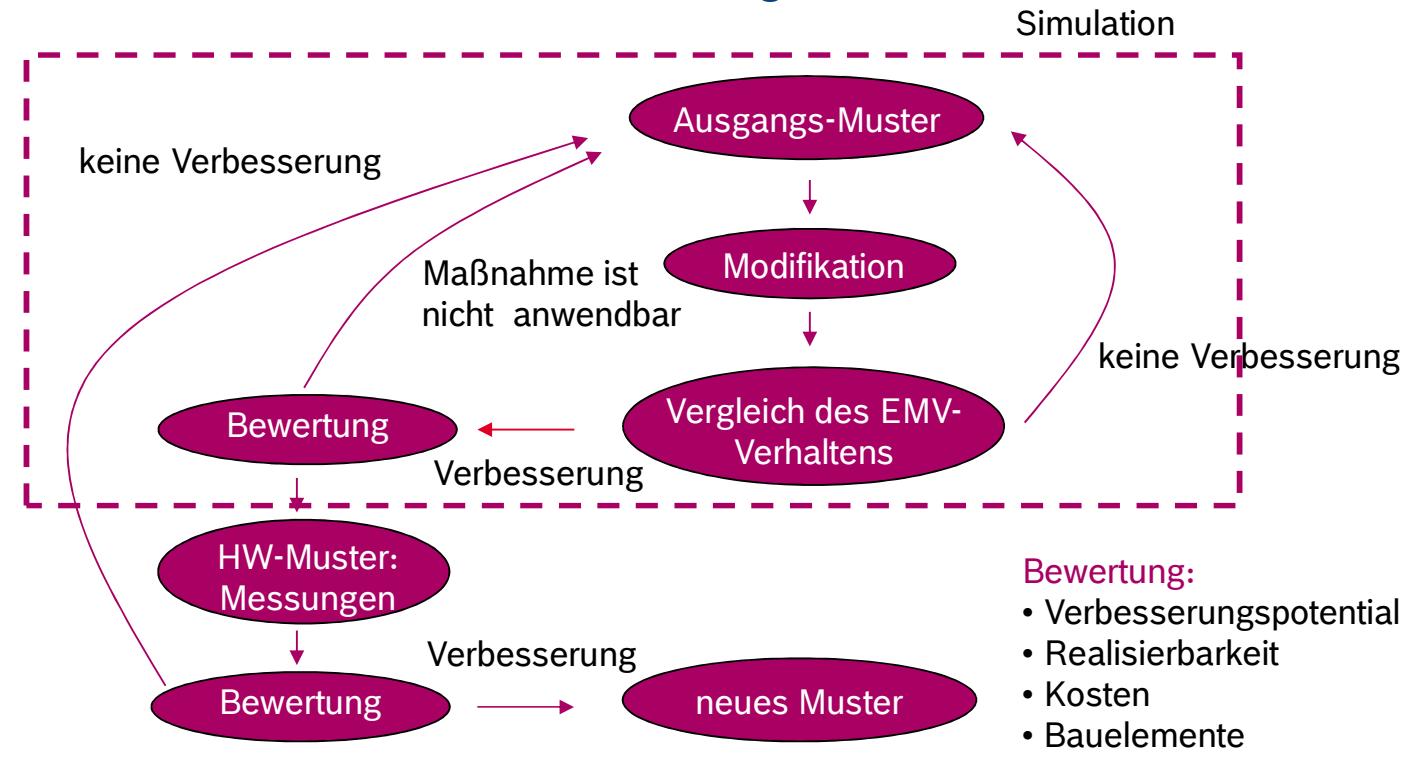
Simulation: im Zeitbereich mit nachfolgender Fouriertransformation

# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“
  - 5.9.1 Elektrische Servolenkung: Sabermodell
  - 5.9.2 Elektrische Servolenkung: Modellvalidierung
  - 5.9.3 EMV-Analyse aufgrund der Simulation

## Elektrische Servolenkung: EMV- Analyse

### → Ansatz: Virtuelle Parameteränderung



# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“
  - 5.9.1 Elektrische Servolenkung: Sabermodell
  - 5.9.2 Elektrische Servolenkung: Modellvalidierung
  - 5.9.3 EMV-Analyse aufgrund der Simulation

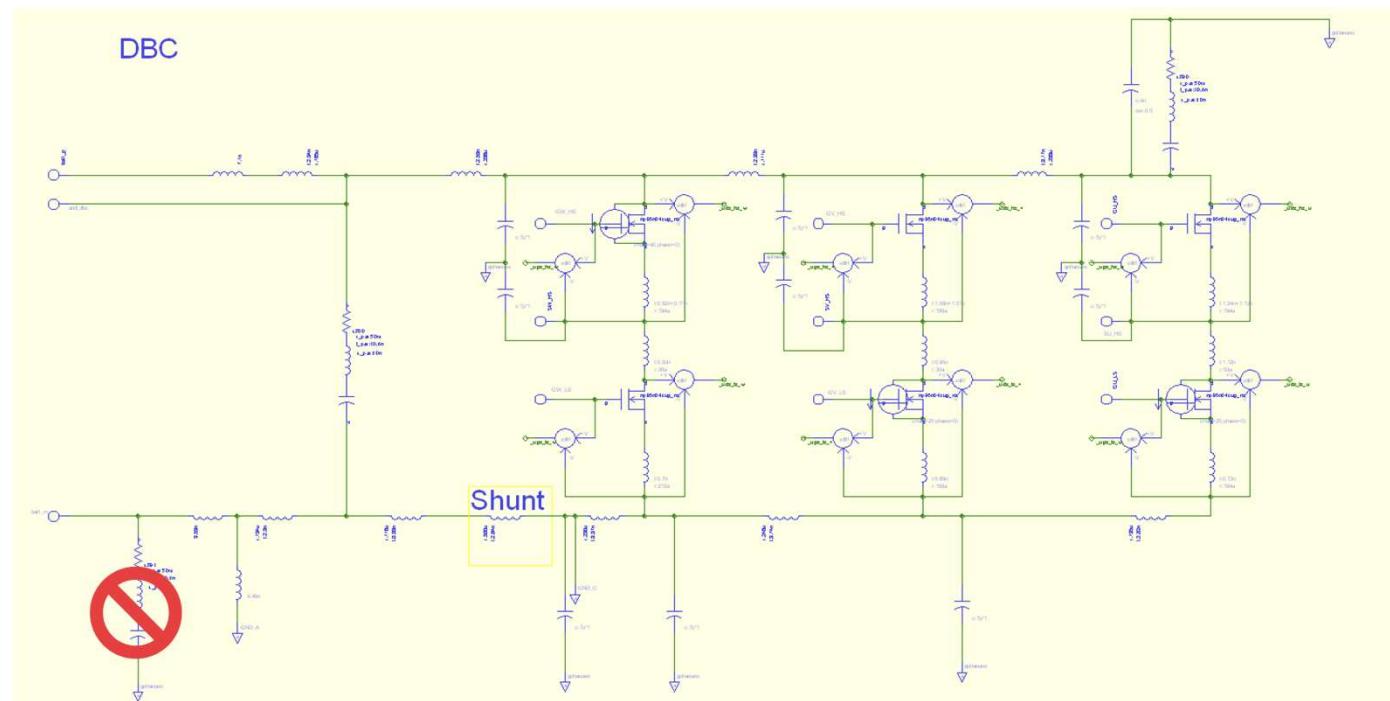
## → EMV-Analyse mittels Simulation

- Insgesamt über 200 numerische Experimente
- Nur wenige numerische Experimente sind in der Hardware zwecks Validierung umgesetzt
- Nur einige Änderungen sind in den nächsten Mustern implementiert
- Im Folgenden werden drei Beispiele/Maßnahmen betrachtet:
  - 1: Einfluss der Gehäuseanbindung auf die Störaussendung
  - 2: Ersatz der CM/DM- Drossel durch zwei Drosseln (CM- und DM-Drossel getrennt)
  - 3: Symmetrierung der parasitären Induktivitäten im DBC-Modul

# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“
  - 5.9.1 Elektrische Servolenkung: Sabermodell
  - 5.9.2 Elektrische Servolenkung: Modellvalidierung
  - 5.9.3 EMV-Analyse aufgrund der Simulation

## → Beispiel 1: Entfall der Gehäuseanbindung in DBC- Modul

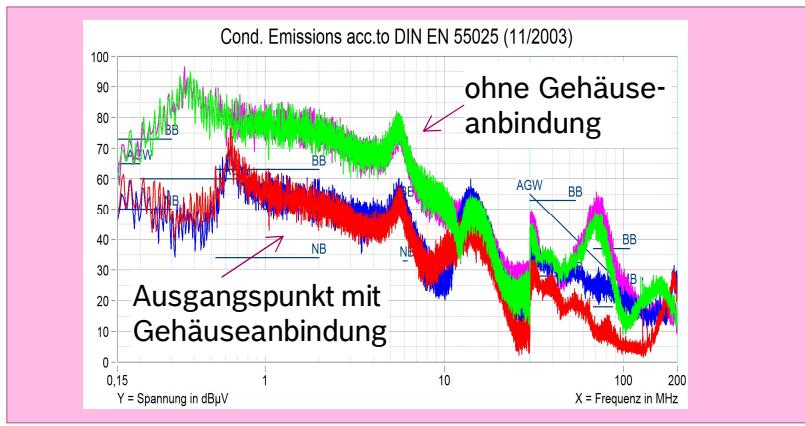


# 5 EMV-Simulation

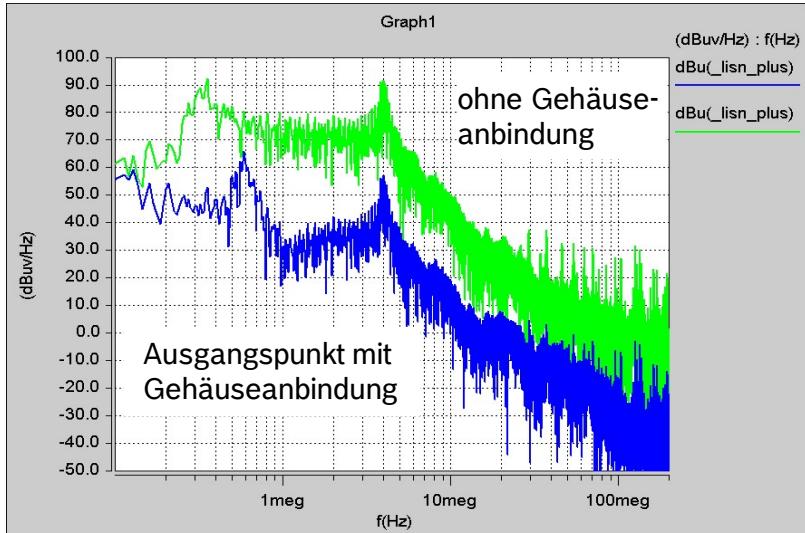
- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“
  - 5.9.1 Elektrische Servolenkung: Sabermodell
  - 5.9.2 Elektrische Servolenkung: Modellvalidierung
  - 5.9.3 EMV-Analyse aufgrund der Simulation

## → Beispiel 1: Entfall der Gehäuseanbindung im DBC- Modul

### Messergebnis



### Simulationsergebnis



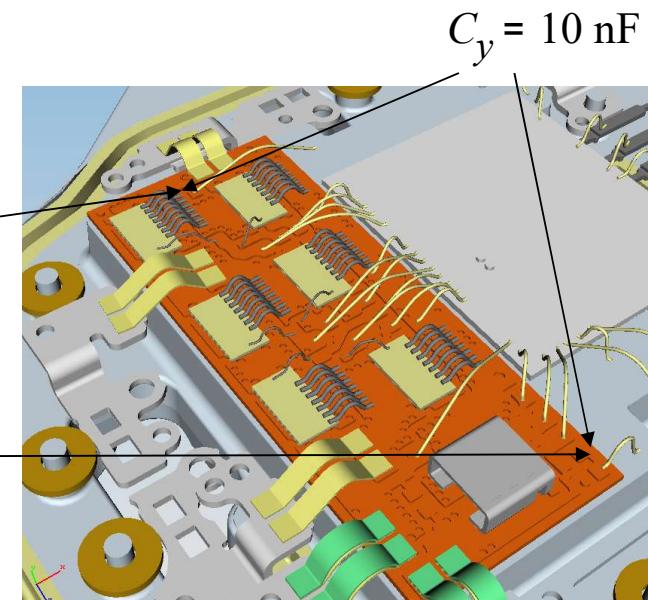
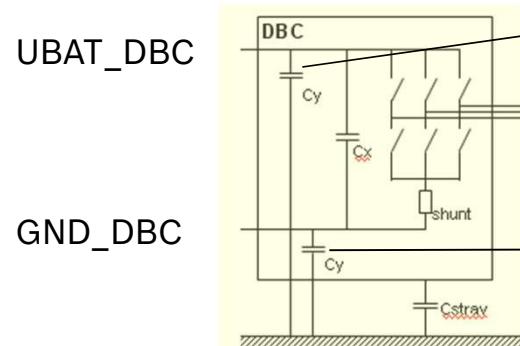
# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“
  - 5.9.1 Elektrische Servolenkung: Sabermodell
  - 5.9.2 Elektrische Servolenkung: Modellvalidierung
  - 5.9.3 EMV-Analyse aufgrund der Simulation

## → Beispiel 1: Entfall der Gehäuseanbindung in DBC- Modul

### Zusammenfassung

- Entfall der Gehäuseanbindung des DBC-Blocks ist äquivalent zu einer Abwesenheit der  $C_y$ -Kondensatoren
- Das führt zu ca. 25 dB Erhöhung der Emission im ganzen Frequenzbereich
- Fazit: Möglichst gute galvanische Verbindung



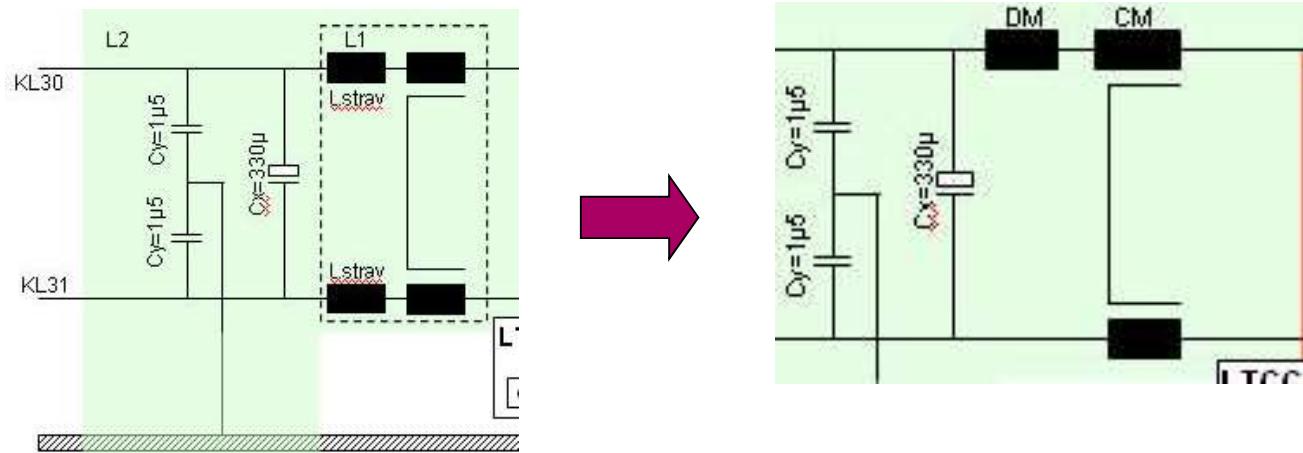
# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“
  - 5.9.1 Elektrische Servolenkung: Sabermodell
  - 5.9.2 Elektrische Servolenkung: Modellvalidierung
  - 5.9.3 EMV-Analyse aufgrund der Simulation

## → Beispiel 2: CM/DM Ersetzung

Die bisherige Drossel (CMDM-Drossel) wird ersetzt durch 2 Drosseln (CM-Drossel und DM-Drossel).

Motivation: Breitbandige Absenkung der Emission

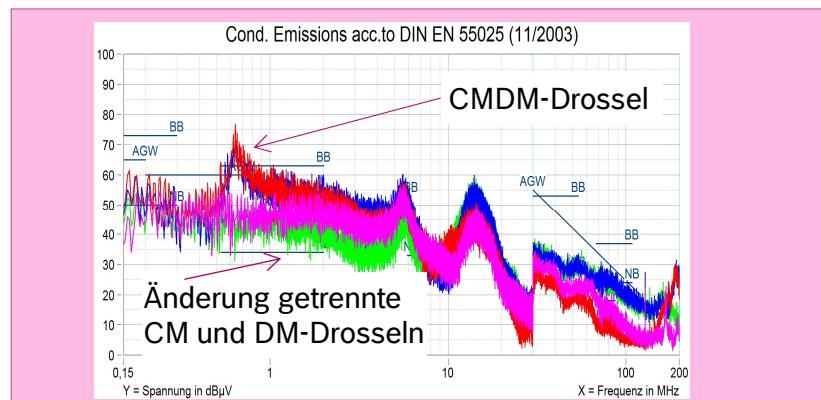


# 5 EMV-Simulation

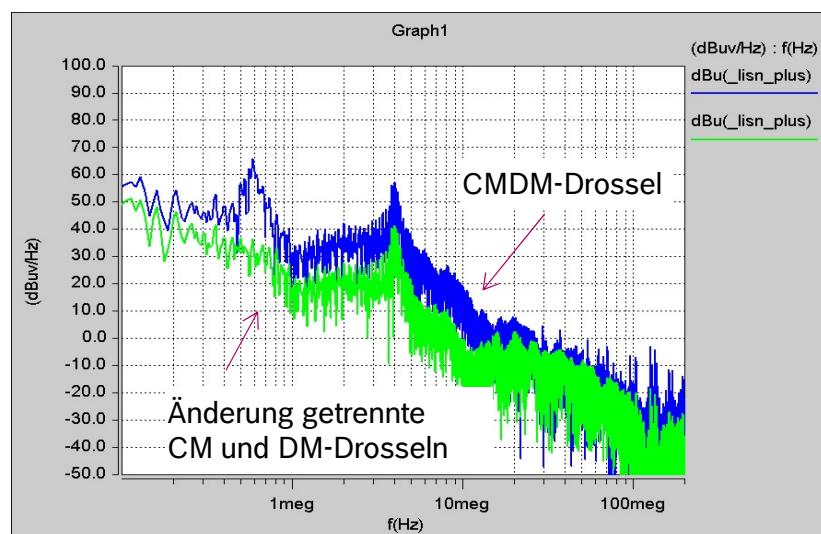
- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“
  - 5.9.1 Elektrische Servolenkung: Sabermodell
  - 5.9.2 Elektrische Servolenkung: Modellvalidierung
  - 5.9.3 EMV-Analyse aufgrund der Simulation

## → Beispiel 2: CM/DM Ersetzung

### Messergebnis



### Simulationsergebnis



# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“
  - 5.9.1 Elektrische Servolenkung: Sabermodell
  - 5.9.2 Elektrische Servolenkung: Modellvalidierung
  - 5.9.3 EMV-Analyse aufgrund der Simulation

## → Beispiel 2: CM/DM Ersetzung

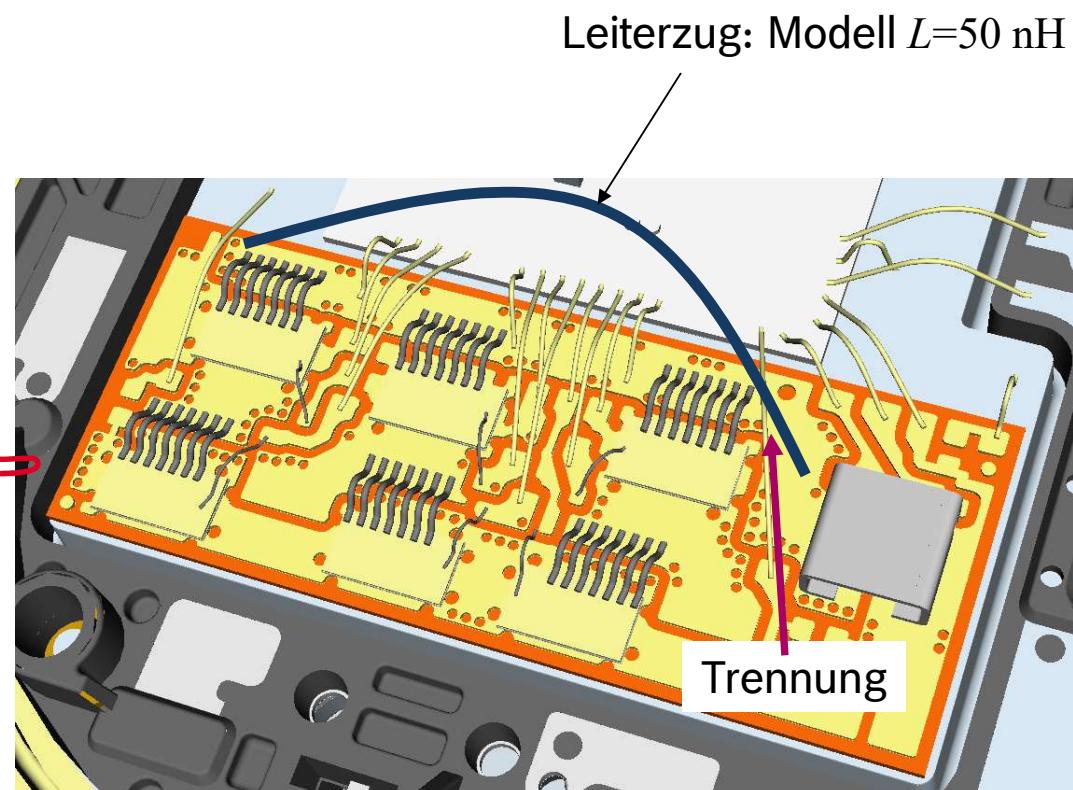
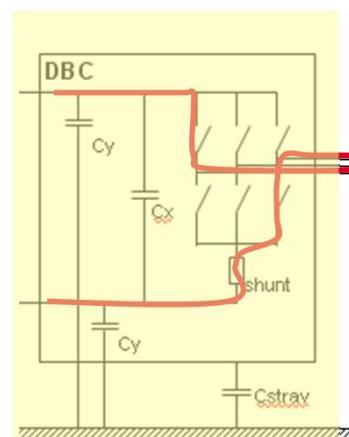
### Zusammenfassung:

- Resonanz bei 600 kHz fehlt
- Emissionsreduktion um 10-20 dB im ganzen Frequenzbereich
- Gute Übereinstimmung zwischen Messungen und Simulation
- Nachteile der Änderung
  - Zwei Drosseln anstelle von einer Drossel
  - Größerer Bauraum
  - Erhöhte Kosten
- Diese Änderung wurde in der 3. Generation der ESL nicht angewendet
- Jedoch haben die erhöhten Anforderungen für die nächste Generation (ESL4) dazu geführt, diese Maßnahme einzuführen

# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“
  - 5.9.1 Elektrische Servolenkung: Sabermodell
  - 5.9.2 Elektrische Servolenkung: Modellvalidierung
  - 5.9.3 EMV-Analyse aufgrund der Simulation

## → Beispiel 3: Symmetrierung der parasitären Induktivitäten im DBC-Modul

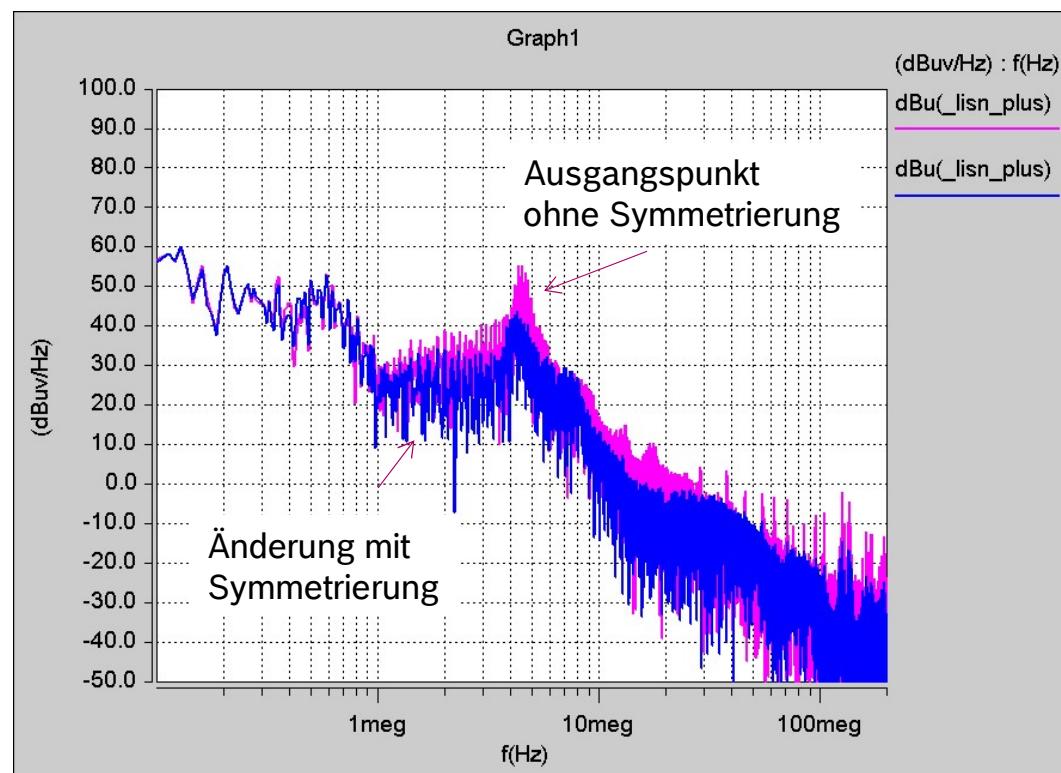


# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“
  - 5.9.1 Elektrische Servolenkung: Sabermodell
  - 5.9.2 Elektrische Servolenkung: Modellvalidierung
  - 5.9.3 EMV-Analyse aufgrund der Simulation

## → Beispiel 3: Symmetrierung der parasitären Induktivitäten in DBC

Simulations-  
ergebnis



# 5 EMV-Simulation

- ▶ 5.1 Einführung und Motivation
- ▶ 5.2 Klassifikation und Grundbegriffe in der EMV-Simulation
- ▶ 5.3 3D-Simulation: Einführung in die Methoden der numerischen Feldberechnung
- ▶ 5.4 Parasitics-Extraction-Verfahren
- ▶ 5.5 Leitungsmodelle
- ▶ 5.6 MOR-Verfahren: Makromodellierung
- ▶ 5.7 Gesamtsystemsimulation
- ▶ 5.8 EMV-Analyse mittels Simulation
- ▶ 5.9 Simulationsbeispiele am Produktbeispiel „Elektrische Servolenkung“
  - 5.9.1 Elektrische Servolenkung: Sabermodell
  - 5.9.2 Elektrische Servolenkung: Modellvalidierung
  - 5.9.3 EMV-Analyse aufgrund der Simulation

## → Beispiel 3: Symmetrierung der parasitären Induktivitäten in DBC

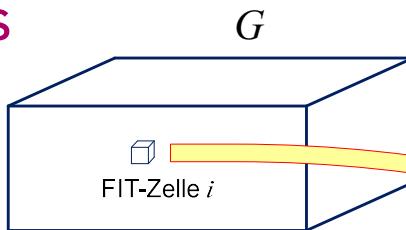
### Zusammenfassung

- Beispiel einer virtuellen Untersuchung (es gab keine Mustermessungen)
- Motivation:
  - Prüfung der Beeinflussung der Symmetrie in den +/- Netzwerken auf die Störaussendung
  - Prüfung der Möglichkeit einer Emissionsminimierung auf Layoutebene
- Ergebnis
  - Durch die Layoutänderung kann man eine Emissionsreduktion von ca. 20 dB erreichen
  - Parasitäre Induktivität wird aus der Brücke entfernt
  - Nachteil: stark erhöhte Induktivität zwischen Versorgung und allen 3 MOSFETs
- Diese Änderung wurde nicht implementiert

# 5 EMV-Simulation

Anhang zu 5.3.2 Differentielle Methoden

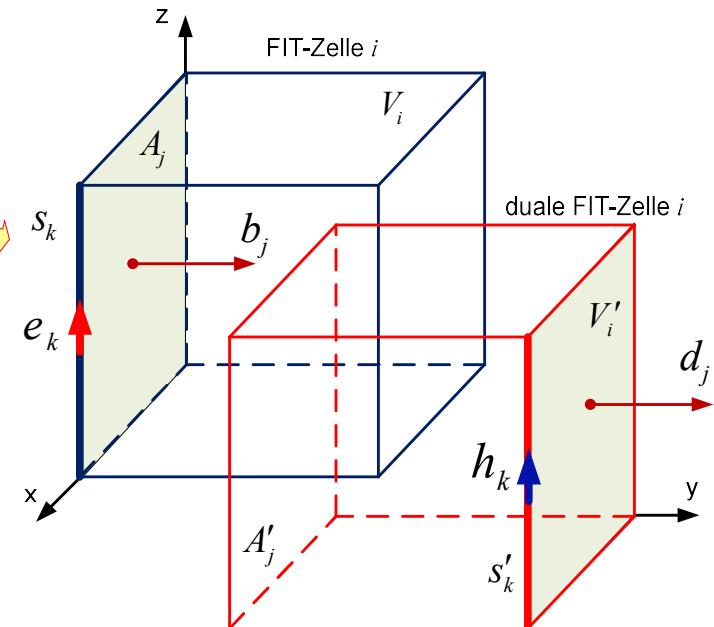
## → Definition des Gitters



Das Simulationsgebiet ( $G$ ) wird in eine Anzahl von sogenannten FIT-Zellen diskretisiert. Die dualen FIT-Zellen sind auf einer halben Länge gegen die normalen FIT-Zellen verschoben.

FIT-Gitter besteht aus:

- $V_i$  - elementare Volumen,  $G = \bigcup V_i$
- $A_j$  - elementare Facetten,  $\{A_j\} = \bigcap V_i$
- $s_k$  - elementare Kanten,  $\{s_k\} = \bigcap A_j$



duales FIT-Gitter besteht aus:

- $V'_i$  - elementare Volumen,  $G = \bigcup V'_i$
- $A'_j$  - elementare Facetten,  $\{A'_j\} = \bigcap V'_i$
- $s'_k$  - elementare Kanten,  $\{s'_k\} = \bigcap A'_j$

# 5 EMV-Simulation

## Anhang zu 5.3.2 Differentielle Methoden

- 1) Gitterspannungen  
(Spannungen auf den elementaren Kanten)

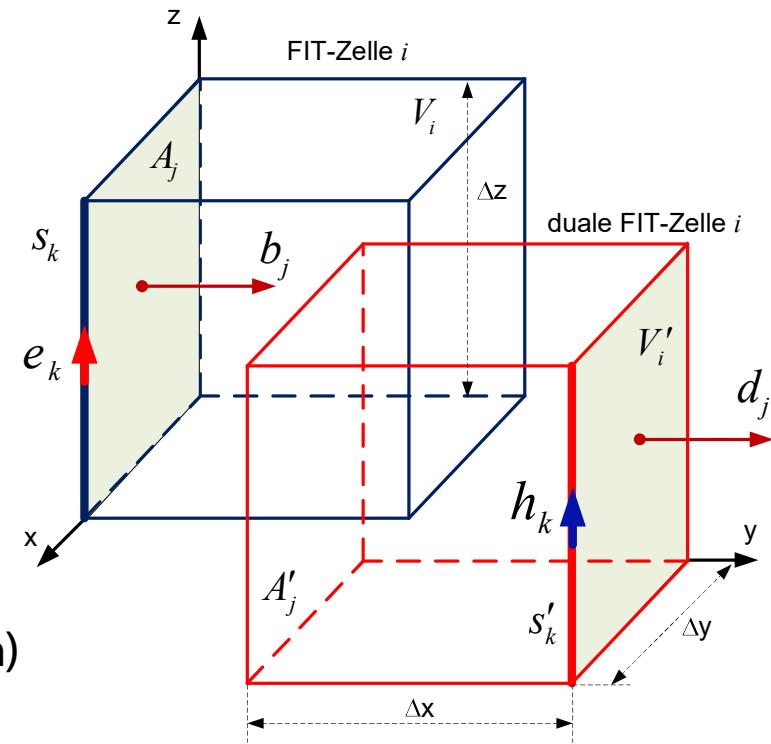
$$\int_{s_k} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = e_k$$

- 2) Magnetische Flüsse normal zu den elementaren Facetten

$$\int_{A_j} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = b_j$$

- 3) Magnetische Gitterspannungen (Magnetische Spannungen auf den dualen elementaren Kanten)

$$\int_{s'_k} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{s} = h_k$$



# 5 EMV-Simulation

## Anhang zu 5.3.2 Differentielle Methoden

- 4) elektrische Flüsse normal zu den dualen elementaren Facetten

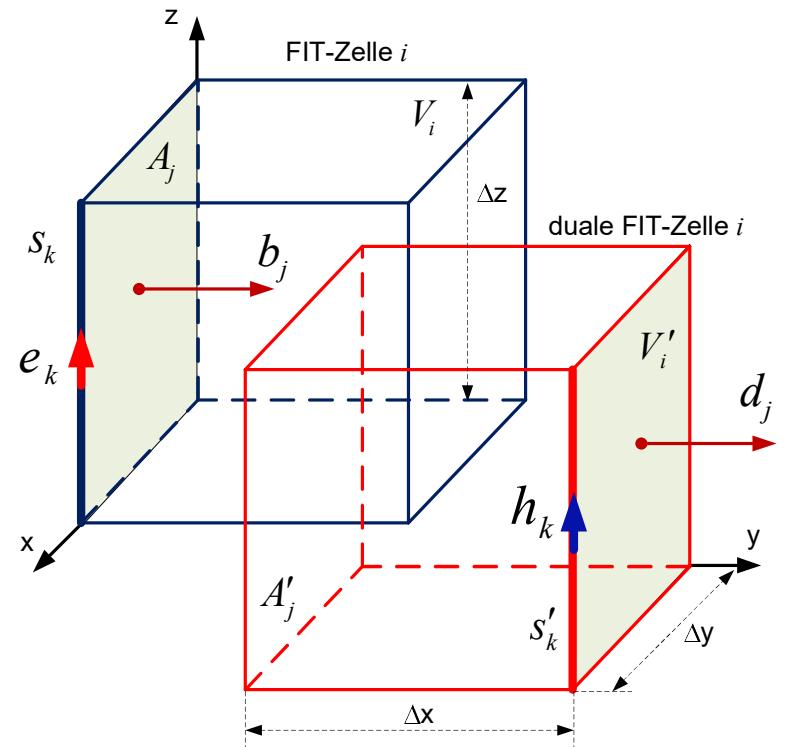
$$\int_{A'_j} \mathbf{D} \cdot d\mathbf{A} = d_j$$

- 5) gesamte elektrische Ströme der Facetten

$$\int_{A'_j} \mathbf{J} \cdot d\mathbf{A} = j_j$$

- 6) elektrische Ladungen der dualen elementaren Volumen

$$\int_{V'_i} \rho dV = q_i$$



# 5 EMV-Simulation

## Anhang zu 5.3.2 Differentielle Methoden

→ Beziehungen zwischen den Unbekannten und den Feldgrößen

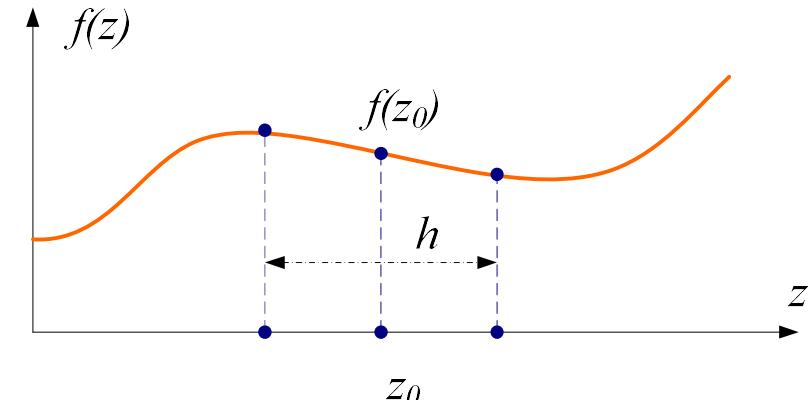
Die in der FIT-Methode verwendeten Unbekannten definieren eindeutig die Feldgrößen in den Mittelpunkten der Kanten und der Facetten des Gitters durch die Mittelpunktregel der numerischen Integration:

$$e_k = \Delta z E_k \quad b_j = \Delta z \Delta x B_j$$

$$h_k = \Delta z H_k \quad d_j = \Delta z \Delta x D_j$$

Mittelpunktregel:

$$\int_{z_0-h/2}^{z_0+h/2} f(z, t) dz \approx h f(z_0, t)$$



Fazit:

Wir lösen die Gleichungen bezüglich der Unbekannten  $e_k, b_i, h_k, d_j$ , danach berechnen wir die unbekannten Feldgrößen.

# 5 EMV-Simulation

Anhang zu 5.3.2 Differentielle Methoden

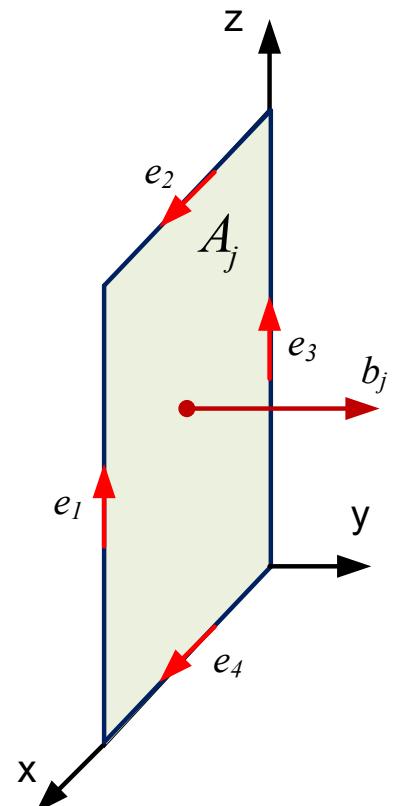
→ Gittergleichung für das Induktionsgesetz

Ausgangspunkt:  $\oint_{\partial A_j} \mathbf{E} d\mathbf{s} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_{A_j} B dA_j$

$$\int_{A_j} B dA_j = b_j \quad \downarrow \quad \oint_{\partial A_j} \mathbf{E} d\mathbf{s} = -e_1 + e_2 + e_3 - e_4$$

Algebraische Gleichung bezüglich der Raumkoordinaten:

$$-e_1 + e_2 + e_3 - e_4 = -\frac{\partial}{\partial t} b_j$$



# 5 EMV-Simulation

Anhang zu 5.3.2 Differentielle Methoden

→ Gittergleichung für die vierte Maxwell-Gleichung  
(magnetische Quellenfreiheit)

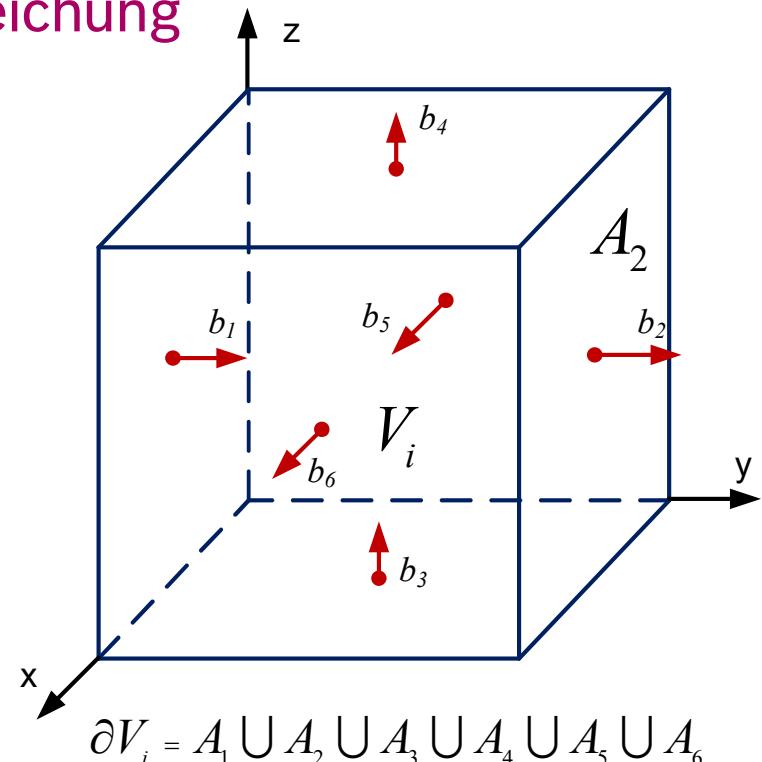
Ausgangspunkt:

$$\oint_{\partial V_i} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0$$

$$\int_{A_j} B dA_j = b_j$$

$$-b_1 + b_2 - b_3 + b_4 - b_5 + b_6 = 0$$

Algebraische Gleichung bezüglich der Raumkoordinaten:



# 5 EMV-Simulation

Anhang zu 5.3.2 Differentielle Methoden

→ Gittergleichung für das Durchflutungsgesetz

Ausgangspunkt:

$$\oint_{\partial A'_j} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{s} = \int_{A'_j} \left[ \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right] \cdot d\mathbf{A}$$

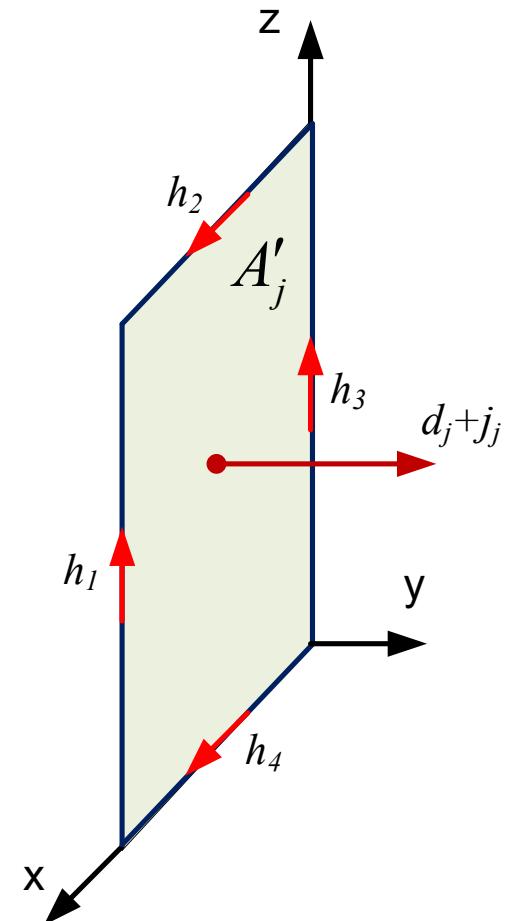
$$\oint_{\partial A_j} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{s} = -h_1 + h_2 + h_3 - h_4$$



$$\int_{A'_j} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \cdot d\mathbf{A} = \frac{\partial}{\partial t} d_j$$

$$\int_{A'_j} \mathbf{J} \cdot d\mathbf{A} = j_j$$

Algebraische Gleichung bezüglich  
der Raumkoordinaten:  $-h_1 + h_2 + h_3 - h_4 = \frac{\partial}{\partial t} d_j + j_j$



# 5 EMV-Simulation

Anhang zu 5.3.2 Differentielle Methoden

→ Gittergleichung für dritte Maxwell'sche Gleichung  
(elektrische Quellenstärke)

Ausgangspunkt:

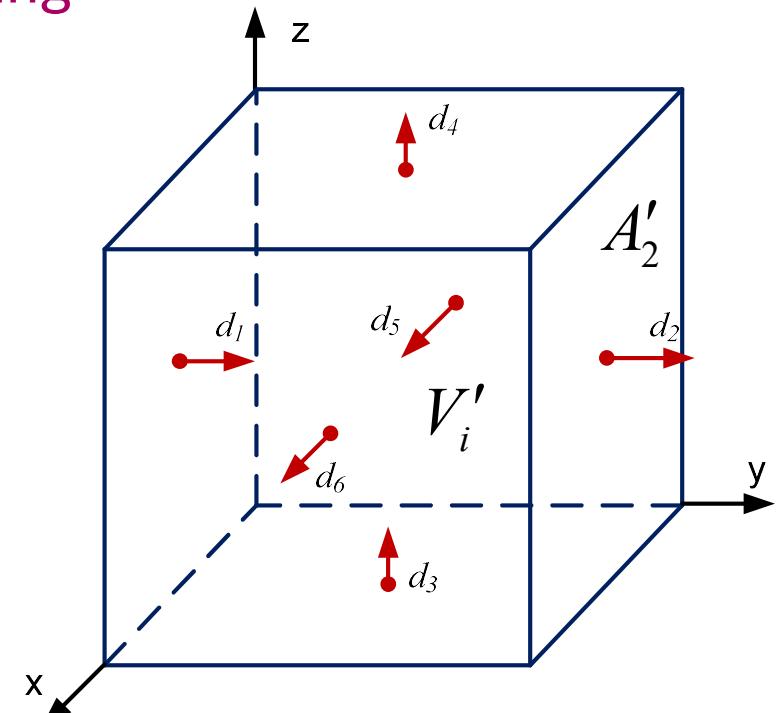
$$\oint_{\partial V'_i} \mathbf{D} \cdot d\mathbf{A} = \int_{V'_i} \rho dV$$

$$\int_{A'_j} \mathbf{D} \cdot d\mathbf{A} = d_j$$

$$\int_{V'_i} \rho dV = q_i$$

$$-d_1 + d_2 - d_3 + d_4 - d_5 + d_6 = q_i$$

Algebraische Gleichung bezüglich  
der Raumkoordinaten:



$$\partial V'_i = A'_1 \cup A'_2 \cup A'_3 \cup A'_4 \cup A'_5 \cup A'_6$$

# 5 EMV-Simulation

## Anhang zu 5.3.2 Differentielle Methoden

$$\int_{s_k} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} \approx s_k E_k = e_k \quad \int_{A'_j} \mathbf{D} \cdot d\mathbf{A} \approx D_j A'_j = d_j$$

$$\downarrow \quad \mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}$$

$$D_{jk}^{\varepsilon} e_k = d_j, D_{jk}^{\varepsilon} = \frac{A'_j}{s_k} \varepsilon$$



Materialmatrix  $D_{\varepsilon}$

$$s_k E_k = e_k \quad \varepsilon E_j A'_j = d_j$$

$$\int_{s'_k} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{s} \approx s'_k H_k = h_k \quad \int_{A_j} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} \approx B_j A_j = b_j$$

$$\downarrow \quad \mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$$

$$D_{jk}^{\mu} h_k = b_j, D_{jk}^{\mu} = \frac{A_j}{s'_k} \mu$$



Materialmatrix  $D_{\mu}$

$$s'_k H_k = h_k \quad \mu H_j A_j = b_j$$

# 5 EMV-Simulation

## Anhang zu 5.3.2 Differentielle Methoden

Allgemeine Formulierung der FIT-Methode enthält die dynamischen Formeln:

$$-e_1 + e_2 + e_3 - e_4 = -\frac{\partial}{\partial t} b_j$$

$$-h_1 + h_2 + h_3 - h_4 = \frac{\partial}{\partial t} d_j + j_j$$

Zeitliche Ableitungen



im Zeitbereich

Leap-Frog-Schema



im Frequenzbereich

2) mit  $j\omega$  ersetzen, z.B.:

$$-e_1 + e_2 + e_3 - e_4 = -j\omega b_j$$

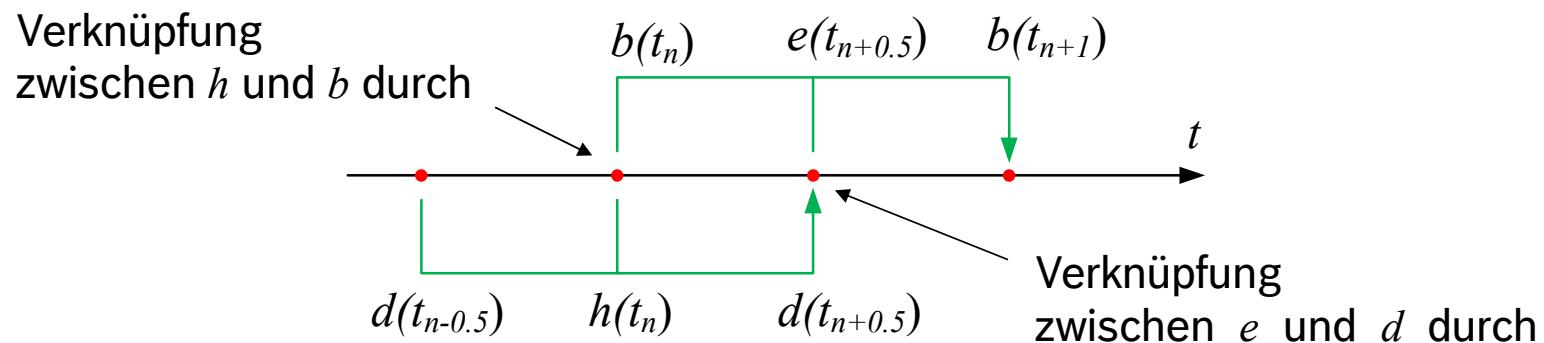
# 5 EMV-Simulation

## Anhang zu 5.3.2 Differentielle Methoden

Numerische Integration der Gittergleichungen mittels der Mittelpunktsregel führt zur „leapfrog“ - Struktur des Algorithmus:

$$b_j(t_{n+1}) = b_j(t_n) + \Delta t (e_1(t_{n+0.5}) - e_2(t_{n+0.5}) - e_3(t_{n+0.5}) + e_4(t_{n+0.5}))$$

$$d_j(t_{n+0.5}) = d_j(t_{n-0.5}) - \Delta t (h_1(t_n) - h_2(t_n) - h_3(t_n) + h_4(t_n))$$



## Schlussfolgerung:

Wir berechnen die magnetische und elektrische Feldkomponente in den Zeitpunkten mit  $\Delta t/2$  Zeitverschiebung

# 5 EMV-Simulation

## Anhang zu 5.3.2 Differentielle Methoden

### → FIT-Methode: weitere Schwerpunkte

- Im Zeitbereich ist die Methode extrem effizient
- Der Zeitschritt der numerischen Integration ist von oben begrenzt  
→ Stabilitätskriterium:

$$v_{\max} \Delta t \leq \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\Delta x_{\min}^2} + \frac{1}{\Delta y_{\min}^2} + \frac{1}{\Delta z_{\min}^2}}}$$

- nur hexahedrale Gittern
- Primärer Simulationsbereich der FIT-Methode
- Im Frequenzbereich
  - Hexahedrale und Tetrahedrale Gittern → Mehr flexibel bezüglich der Geometrie
  - Effizienz ist niedriger als in der FEM-Methode

### → Software: CST Microwave Studio, Webseite: <http://www.cst.com/>

EMV IN DER  
AUTOMOBIL-  
TECHNIK  
... DAS WAR'S

