

# **EMV-Störfestigkeitstests und ihre Analyse mittels Charakteristischer Moden**

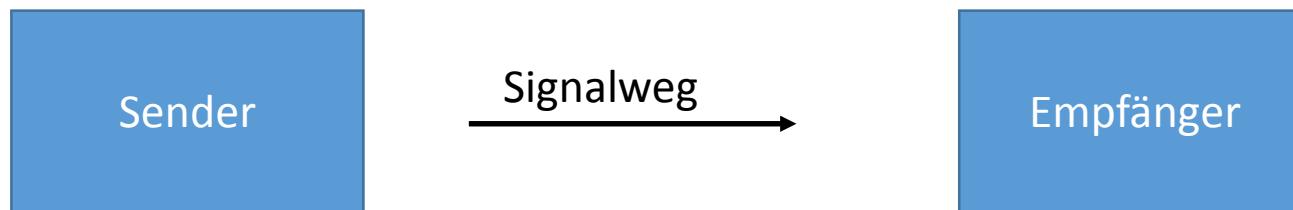
**Zuverlässigkeit Technischer Systeme  
und Elektrische Messtechnik**  
**Prof. Dr. Frank Gronwald**

# Überblick

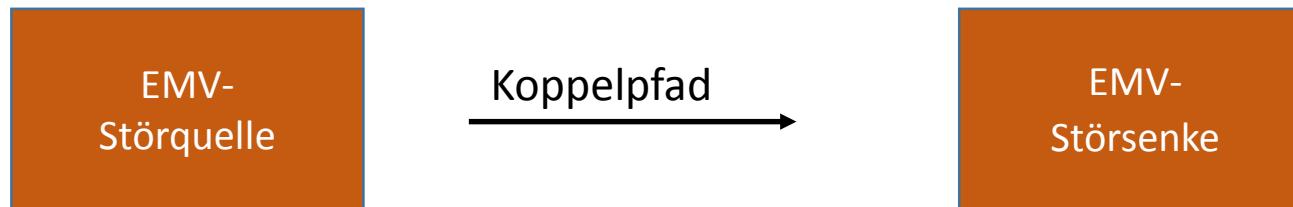
1. Komplexe Probleme der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) und Elektromagnetische Simulationen
2. EMV-Störfestigkeitstests im Resonanzbereich und numerische Berechnung von Charakteristischen Moden
3. Anwendungsbeispiel: Vergleich gestrahlter und stromeinspeisender EMV-Störfestigkeitstests mittels Charakteristischer Moden
4. Erfahrungen und Zusammenfassung

## Kurze Wiederholung zur Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV): Signale und Interferenzen

- Viele hochfrequenztechnische Anwendungen übertragen Signale:



- Im Rahmen der EMV werden unerwünschte elektromagnetische Kopplungen untersucht:



## Elektromagnetische Kopplungen in komplexe Systeme: Von der Quelle bis zur Senke



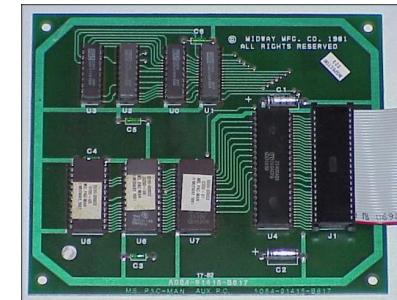
EMV-Quelle



Äußere Kopplung



Innere Kopplung



EMV-Senke

äußeres Problem

inneres Problem

## Feldgebundene EMV-Tests zur Nachbildung des Koppelpfades von der Quelle bis zur Senke



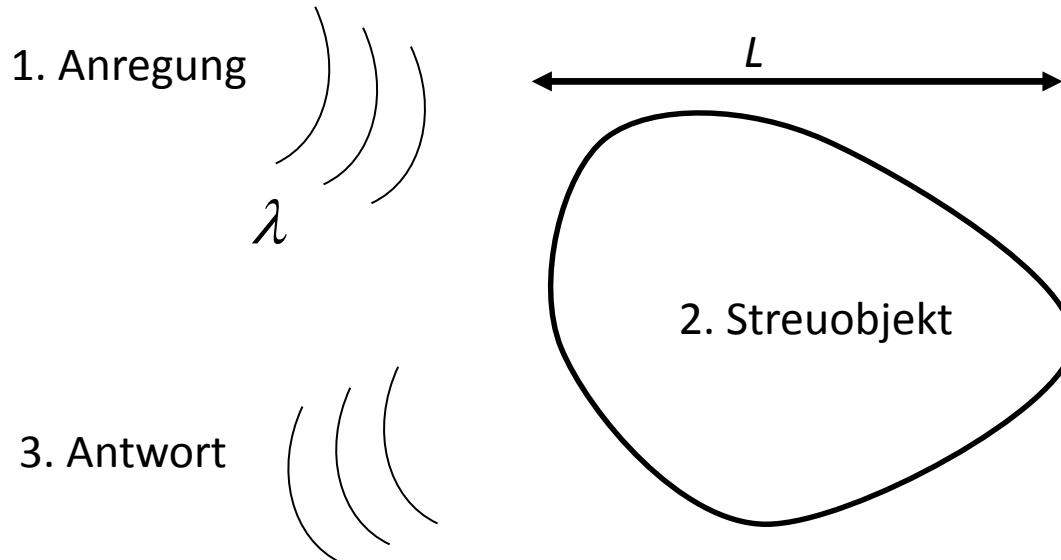
EMV-Test eines komplexen Systems in einer Halbabsorberkammer

siehe: G.A. Rasek et al.: "HIRF Transfer Function Observations: Notes on Results Versus Requirements and Certification Approach", IEEE Trans. on EMC, vol. 57, Issue 2, April 2015, p. 195-202.

# Überblick

1. Komplexe Probleme der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) und Elektromagnetische Simulationen
2. EMV-Störfestigkeitstests im Resonanzbereich und numerische Berechnung von Charakteristischen Moden
3. Anwendungsbeispiel: Vergleich gestrahlter und stromeinspeisender EMV-Störfestigkeitstests mittels Charakteristischer Moden
4. Erfahrungen und Zusammenfassung

## Elektromagnetische Streuung und die „Singularity Expansion Method“



Resonanzregion:  
 $\lambda$  und  $L$  sind von gleicher  
 Größenordnung

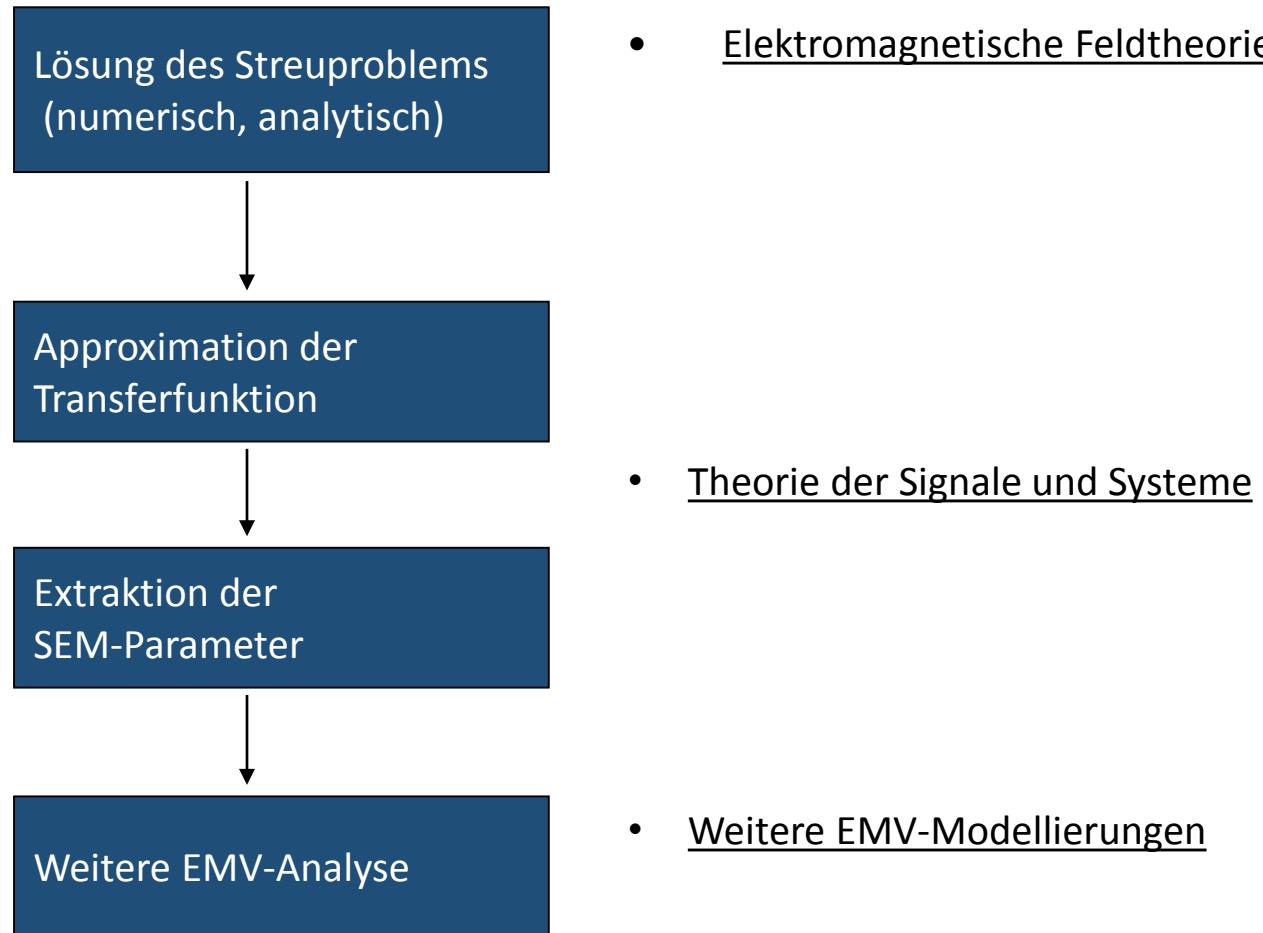
- Singularity Expansion Method: Es folgt mit Linearität und Zeitinvarianz, dass die Transferfunktion, welche Anregung und Antwort verknüpft, geschrieben werden kann als

$$H(s) \approx \sum_{m=1}^M \left( \frac{R_m}{s - s_m} + \frac{R_m^*}{s - s_m^*} \right) \quad s_m = \sigma_m + j\omega_m \quad \begin{array}{l} \text{Polstellen} \\ R_m \end{array}$$

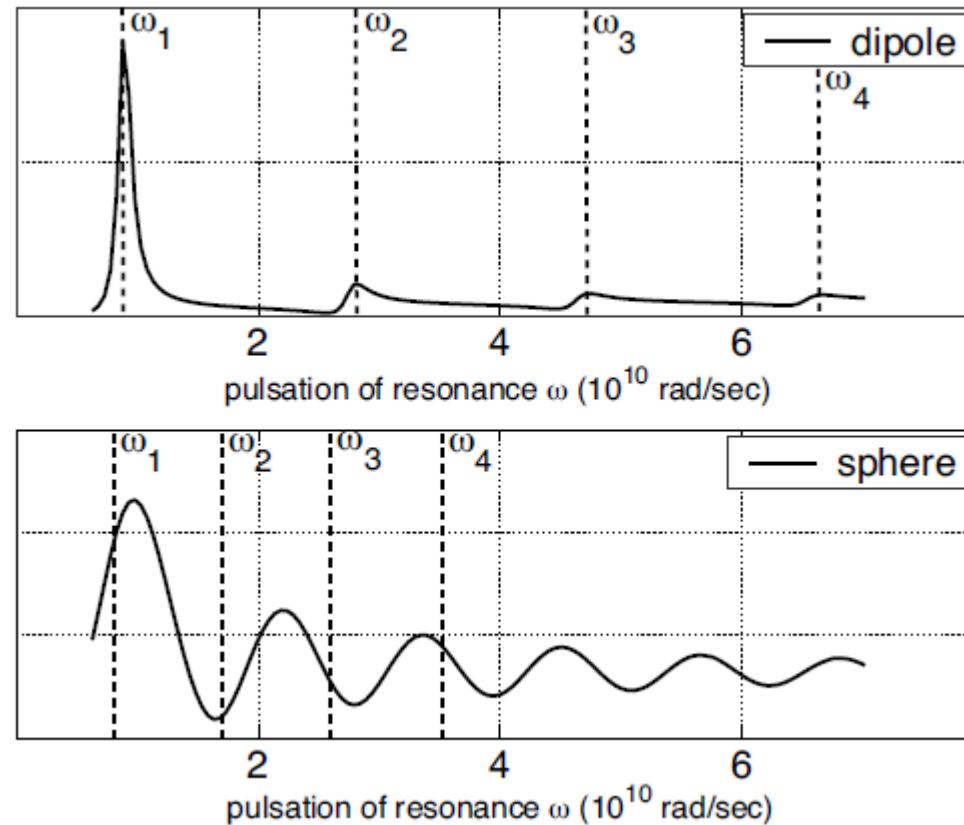
$$R_m^* \quad \begin{array}{l} \text{Residuen} \end{array}$$

siehe: Baum, C.E.: "The Singularity Expansion Method", in *Transient Electromagnetic Fields*, L.B. Felsen (ed.), Springer, Heidelberg, 1976, 129-179.

## SEM-Strategie zur EMV-Analyse

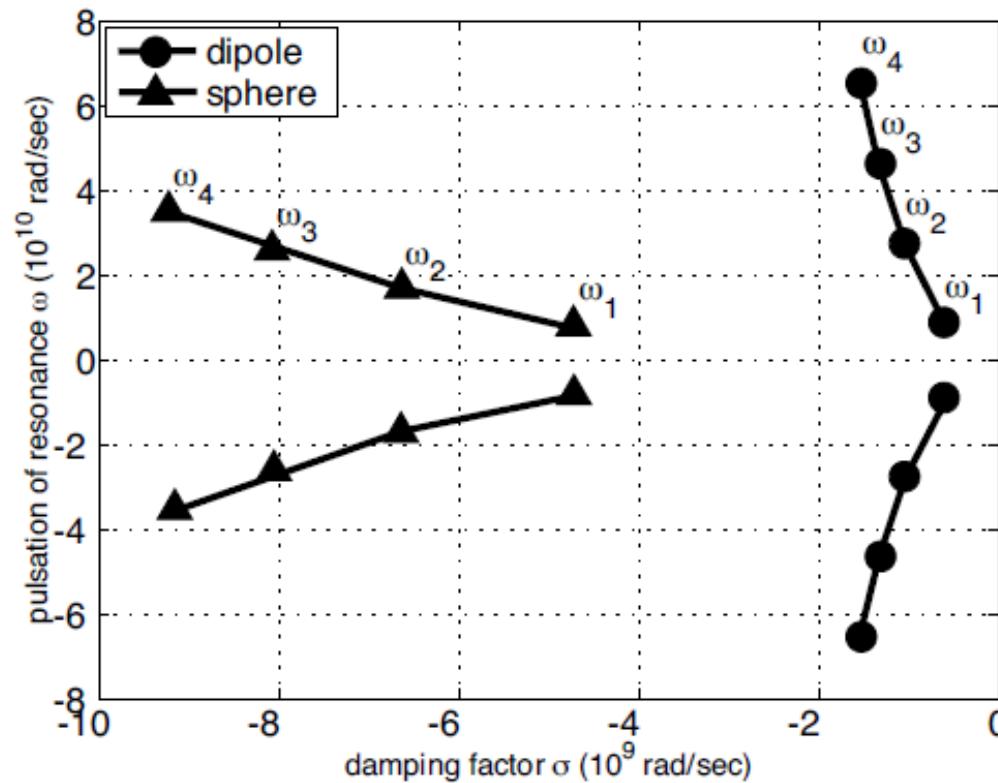


## Eine numerische Untersuchung mit FEKO aus dem Jahre 2007



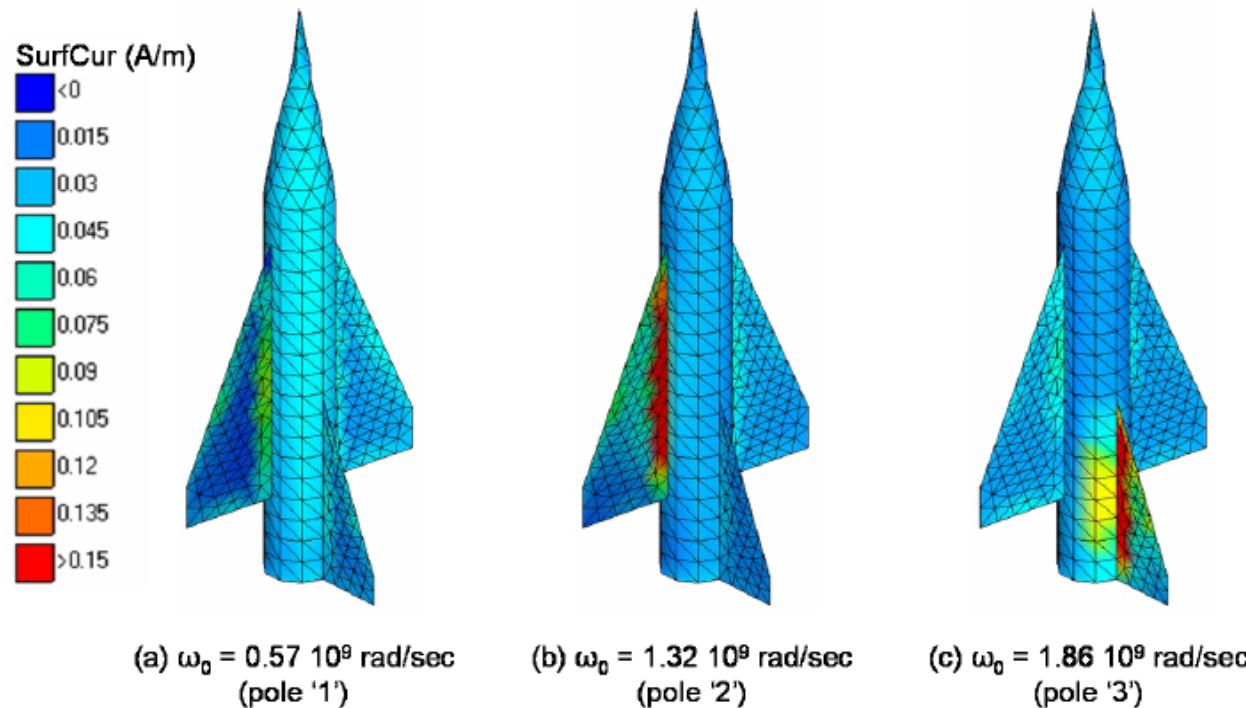
siehe: J. Chauveau, N. de Beaucoudrey, and J. Saillard: "Characterization of perfectly conducting targets in resonance domain with their quality of resonance, Progress in Electromagnetics Research, PIER 74, (2007), pp. 69-84.

## Eine numerische Untersuchung mit FEKO aus dem Jahre 2007



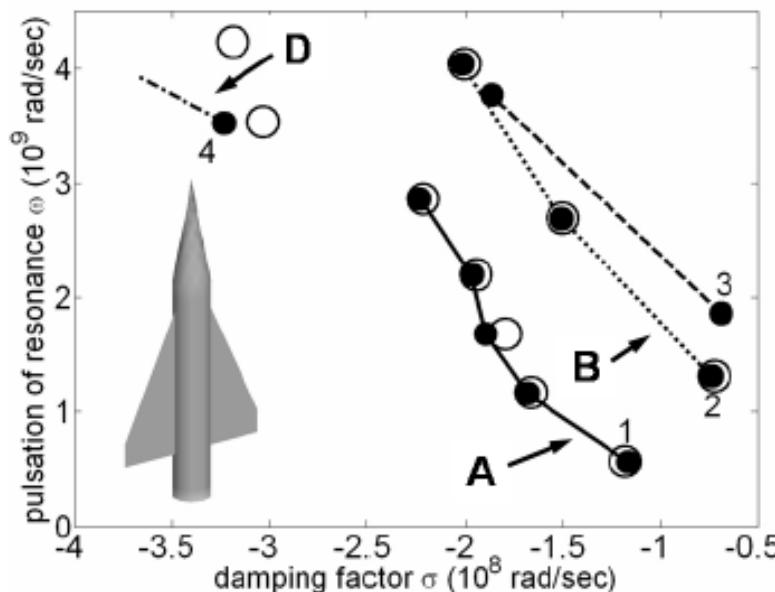
siehe: J. Chauveau, N. de Beaucoudrey, and J. Saillard: "Characterization of perfectly conducting targets in resonance domain with their quality of resonance, Progress in Electromagnetics Research, PIER 74, (2007), pp. 69-84.

## Eine numerische Untersuchung mit FEKO aus dem Jahre 2007

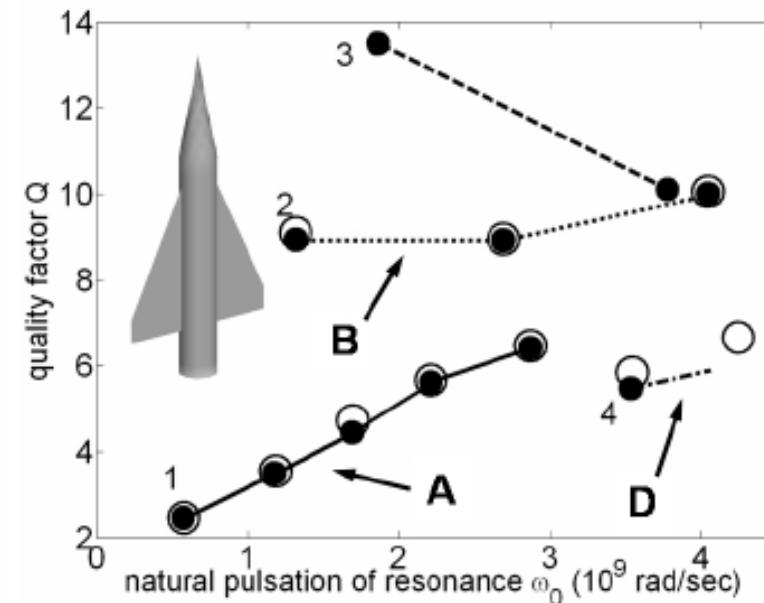


siehe: J. Chauveau, N. de Beaucoudrey, and J. Saillard: "Characterization of perfectly conducting targets in resonance domain with their quality of resonance, Progress in Electromagnetics Research, PIER 74, (2007), pp. 69-84.

## Eine numerische Untersuchung mit FEKO aus dem Jahre 2007



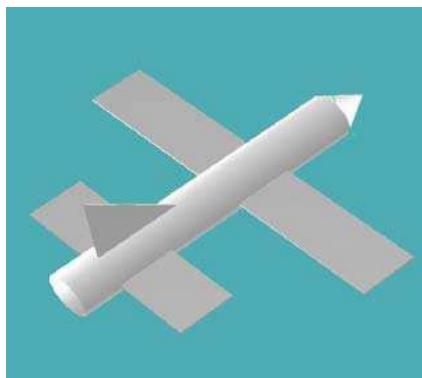
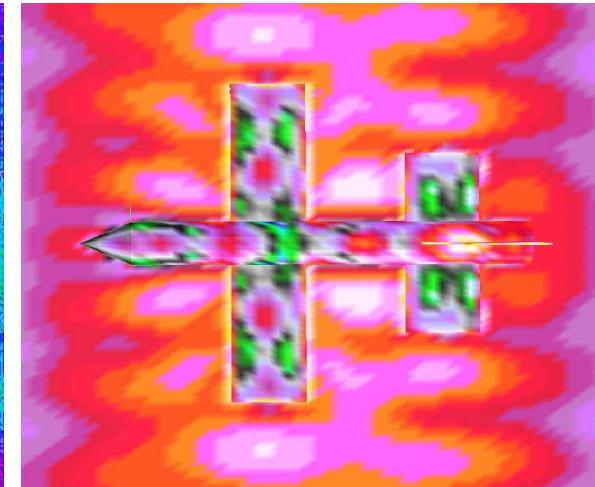
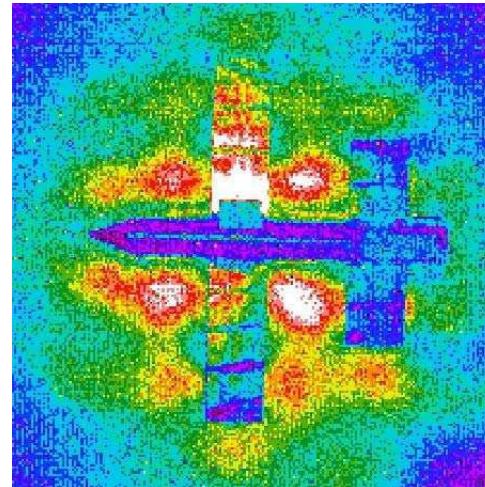
(a)



(b)

siehe: J. Chauveau, N. de Beaucoudrey, and J. Saillard: "Characterization of perfectly conducting targets in resonance domain with their quality of resonance, Progress in Electromagnetics Research, PIER 74, (2007), pp. 69-84.

## Thermographische Untersuchungen von Resonanzen



thermographisch gemessene  
Resonanzen

numerisch berechnete  
Resonanzen

siehe: A. Drozd, I. Kasperovich, J. Norgard, and R. Musselman: "Feature Selected Validation and Verification (FSVV) of CEM Code Predictions using IR Thermal Images of EM Fields", 2008 Asia-Pacific Symposium on EMC, Singapore (2008).

## Thermographische Untersuchungen von Resonanzen

*Proc. of the 2019 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe 2019), Barcelona, Spain, September 2–6, 2019.*

# Thermo-fluorescent images of electric and magnetic near-fields of a High Impedance Surface

Hugo Ragazzo

*ONERA/DEMR*

*Université de Toulouse*

F-31055 Toulouse, France  
hugo.ragazzo@onera.fr

Daniel Prost

*ONERA/DEMR*

*Université de Toulouse*

F-31055 Toulouse, France  
daniel.prost@onera.fr

François Issac

*ONERA/DEMR*

*Université de Toulouse*

F-31055 Toulouse, France  
francois.issac@onera.fr

Stephane Faure

*LPCNO*

*INSA*

Toulouse, France

s-faure@insa-toulouse.fr

Julian Carrey

*LPCNO*

*INSA*

Toulouse, France

julian.carrey@insa-toulouse.fr

Jean-François Bobo

*CNRS*

*CEMES*

Toulouse, France

jfbobo@cemes.fr

## Resonanzen, Eigenmoden, Singularitäten, and Charakteristische Moden

- Die Konzepte der „Resonanzen“, „Eigenmoden“, „Singularitäten“, und „Characteristischen Moden“ charakterisieren  
„eine große Systemantwort bei gegebener Anregung und Frequenz“
- Etwas Literatur:
  - R.F. Harrington, J.R. Mautz, and J.Y. Chang: „The theory of characteristic modes for conducting bodies“, IEEE Trans. Antennas Propag. vol. 19, no. 5,(May 1971), pp. 629-639.
  - C.E. Baum: „On the Eigenmode Expansion Method for Electromagnetic Scattering and Antenna Problems, Part I: Some Basic Relations for Eigenmode Expansions, and Their Relation to the Singularity Expansion“, Interaction Note 229, (January 1975), 94 pages.
  - C.E. Baum: „Toward an Engineering Theory of Electromagnetic Scattering: The Singularity and Eigenmode Expansion Methods, in *Electromagnetic Scattering*, P.L.E.-Uslenghi (ed.), (Academic Press, New York, 1978).
  - M. Vogel, C. Gampala, D. Ludick, U. Jacobus, and C.J. Reddy: „Characteristic Mode Analysis: Putting Physics back into Simulation“, IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 57, no. 2, (April 2015), pp. 307-317.

# Überblick

1. Komplexe Probleme der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) und Elektromagnetische Simulationen
2. EMV-Störfestigkeitstests im Resonanzbereich und numerische Berechnung von Charakteristischen Moden
3. Anwendungsbeispiel: Vergleich gestrahlter und stromeinspeisender EMV-Störfestigkeitstests mittels Charakteristischer Moden
4. Erfahrungen und Zusammenfassung

## EMV-Tests: gestrahlt (HIRF) und mit direkter Stromeinspeisung (DCI)



HIRF test

G.A. Rasek et al.: "HIRF Transfer Function Observations: Notes on Results Versus Requirements and Certification Approach", IEEE Trans. on EMC, vol. 57, Issue 2, April 2015, p. 195-202.

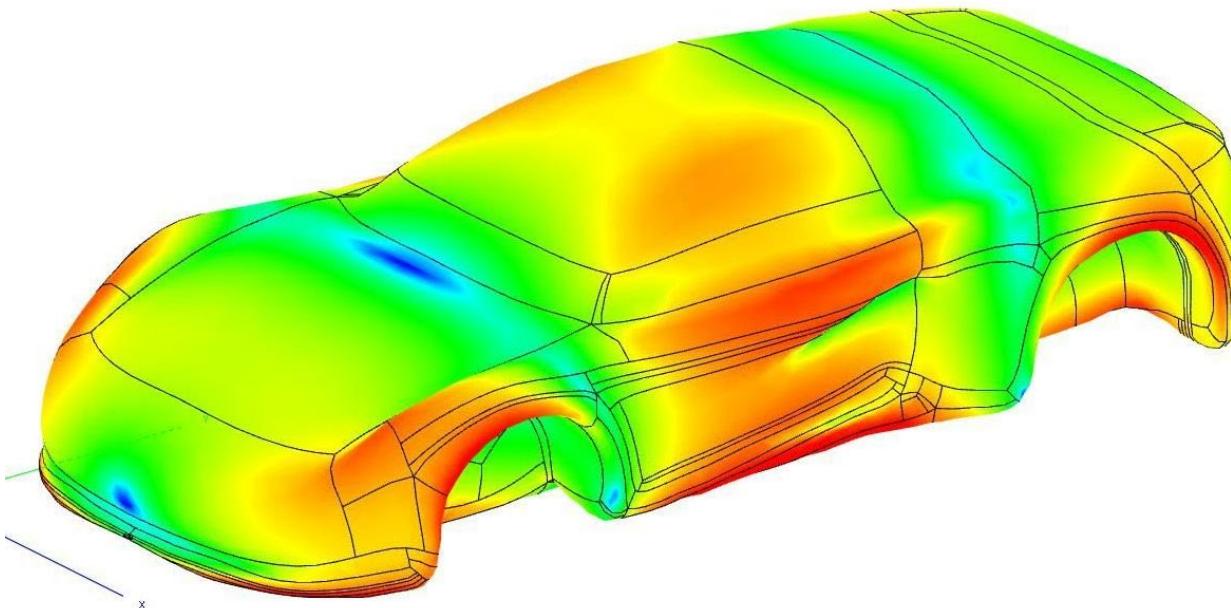


DCI test

C. Leat: "The Safety of Aircraft Exposed to Electromagnetic Fields: HIRF Testing of Aircraft using Direct Current Injection", Report DSTO-RR-0329, Australian Government Department of Defence, (June 2007), 107 pages.

## Motivation

BMVI-Projekt „Anpassung und Erweiterung von Testverfahren für vernetzte Luftfahrzeuge auf Testverfahren vernetzter Automobile im Straßenverkehr“



Supported by:



Federal Ministry  
of Transport and  
Digital Infrastructure

on the basis of a decision  
by the German Bundestag

## Motivation

*Proc. of the 2019 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe 2019), Barcelona, Spain, September 2–6, 2019.*

# A Numerical Analysis of HIRF- and DCI-Equivalence by Characteristic Mode Theory

Jan Ückerseifer\*, Martin Aidam<sup>†</sup>, Markus Rothenhäuser<sup>‡</sup>, and Frank Gronwald\*

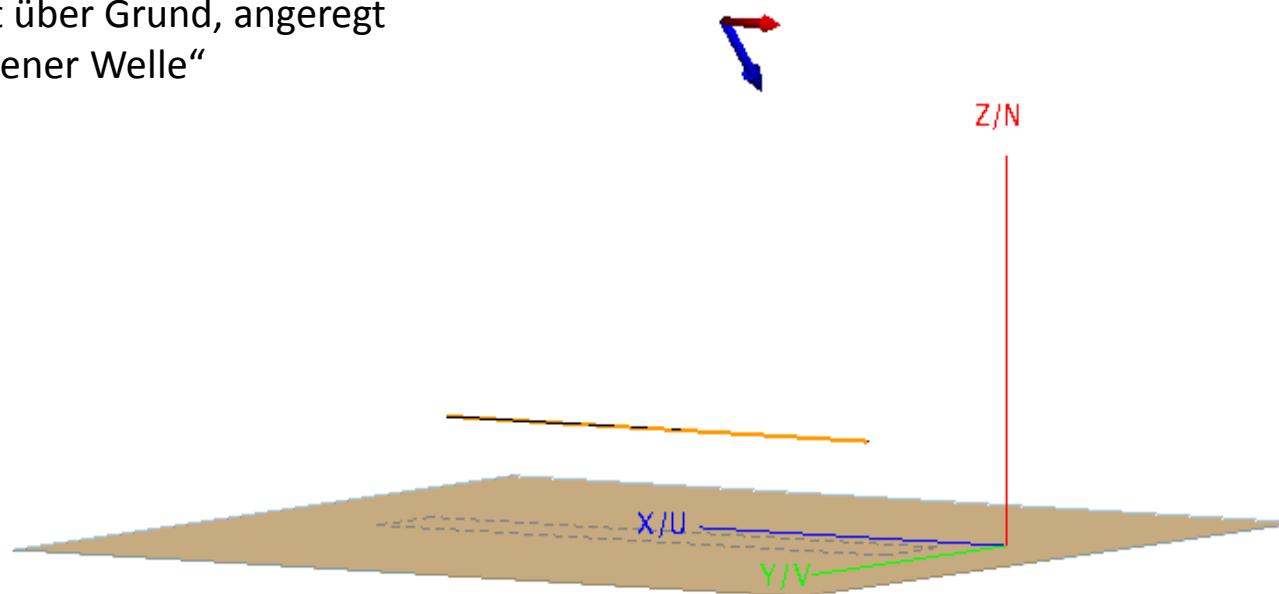
\*University of Siegen, Reliability of Technical Systems and Electrical Measurement, Siegen, Germany  
Email: jan.ueckerseifer@uni-siegen.de

<sup>†</sup>Daimler AG, HV and EMC System Technology, Sindelfingen, Germany  
Email: martin.aidam@daimler.com

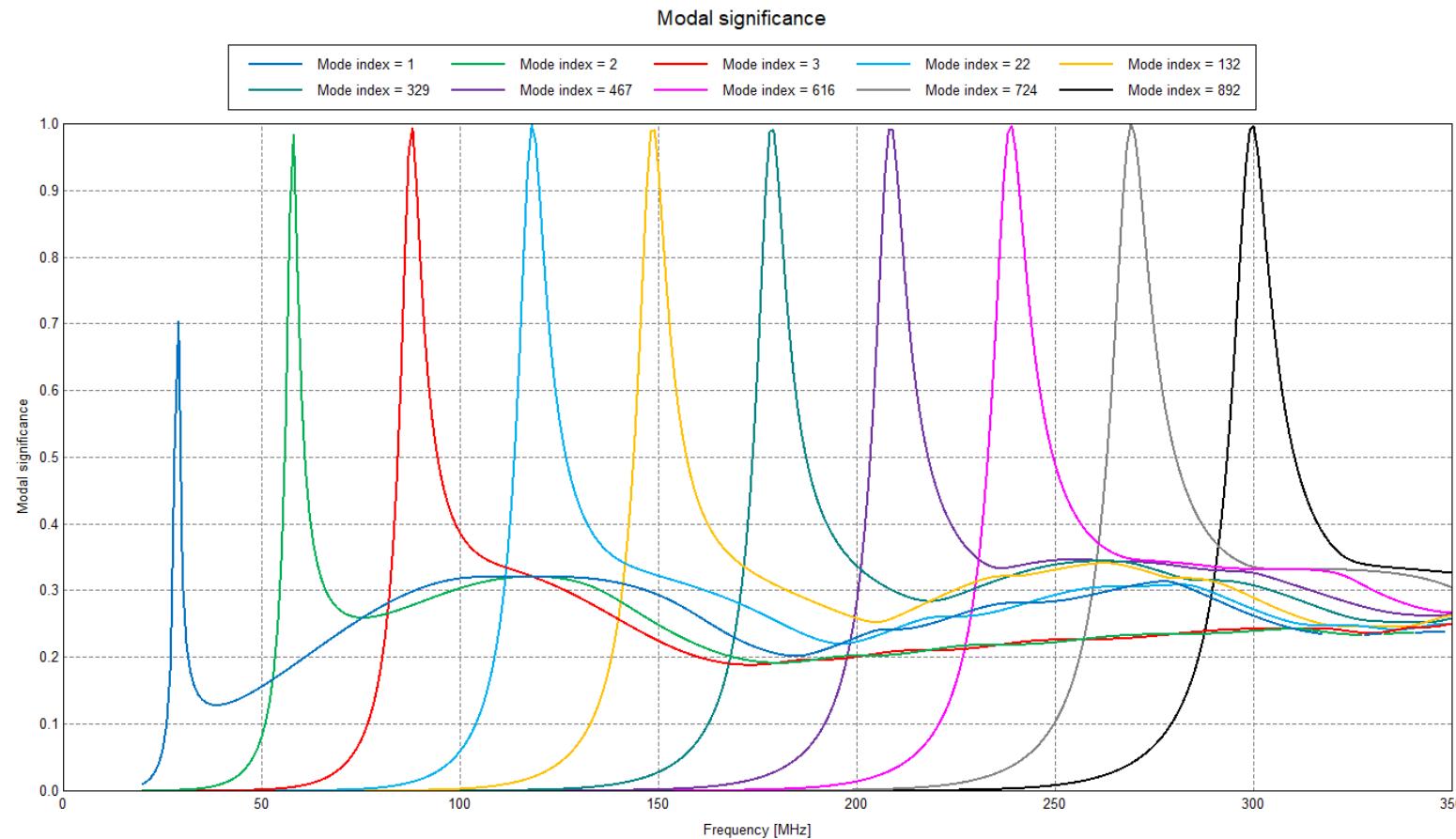
<sup>‡</sup>Airbus Defence and Space, Electromagnetic Effects Systems Engineering, Manching, Germany  
Email: markus.rothenhaeusler@airbus.com

## Eine einfache Beispielkonfiguration

„Draht über Grund, angeregt  
mit ebener Welle“



## Beurteilung charakteristischer Moden mit modaler Signifikanz

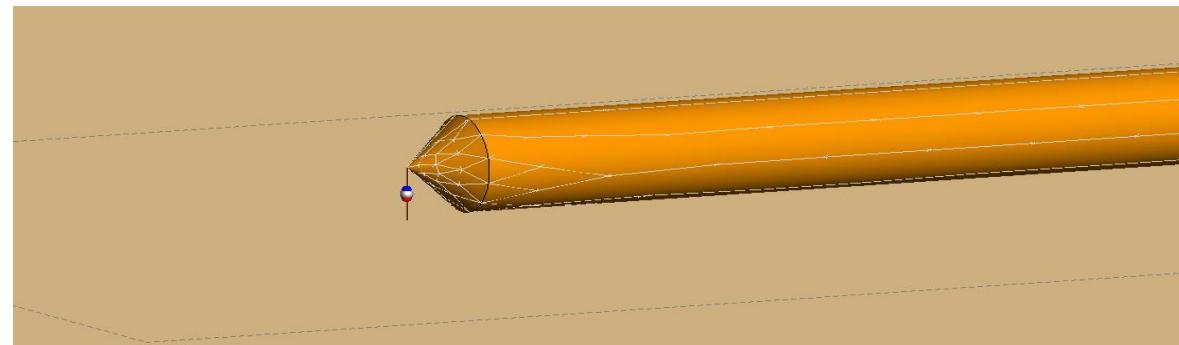
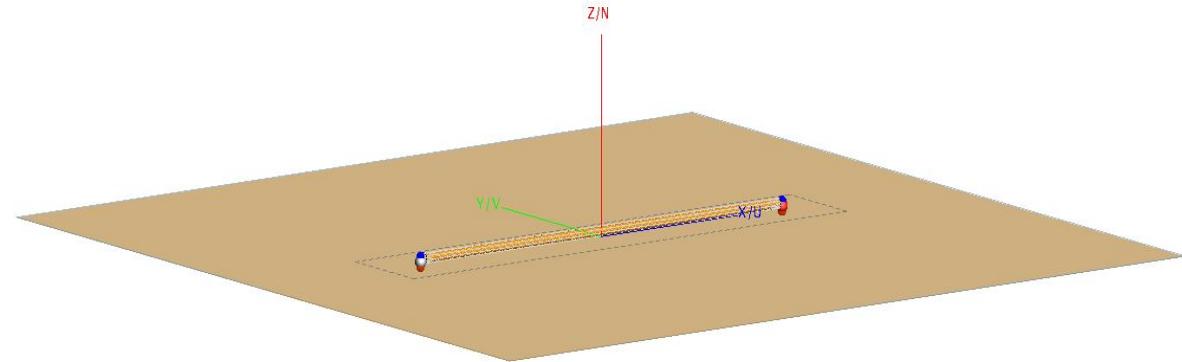


## Frequenzen der Charakteristischen Moden

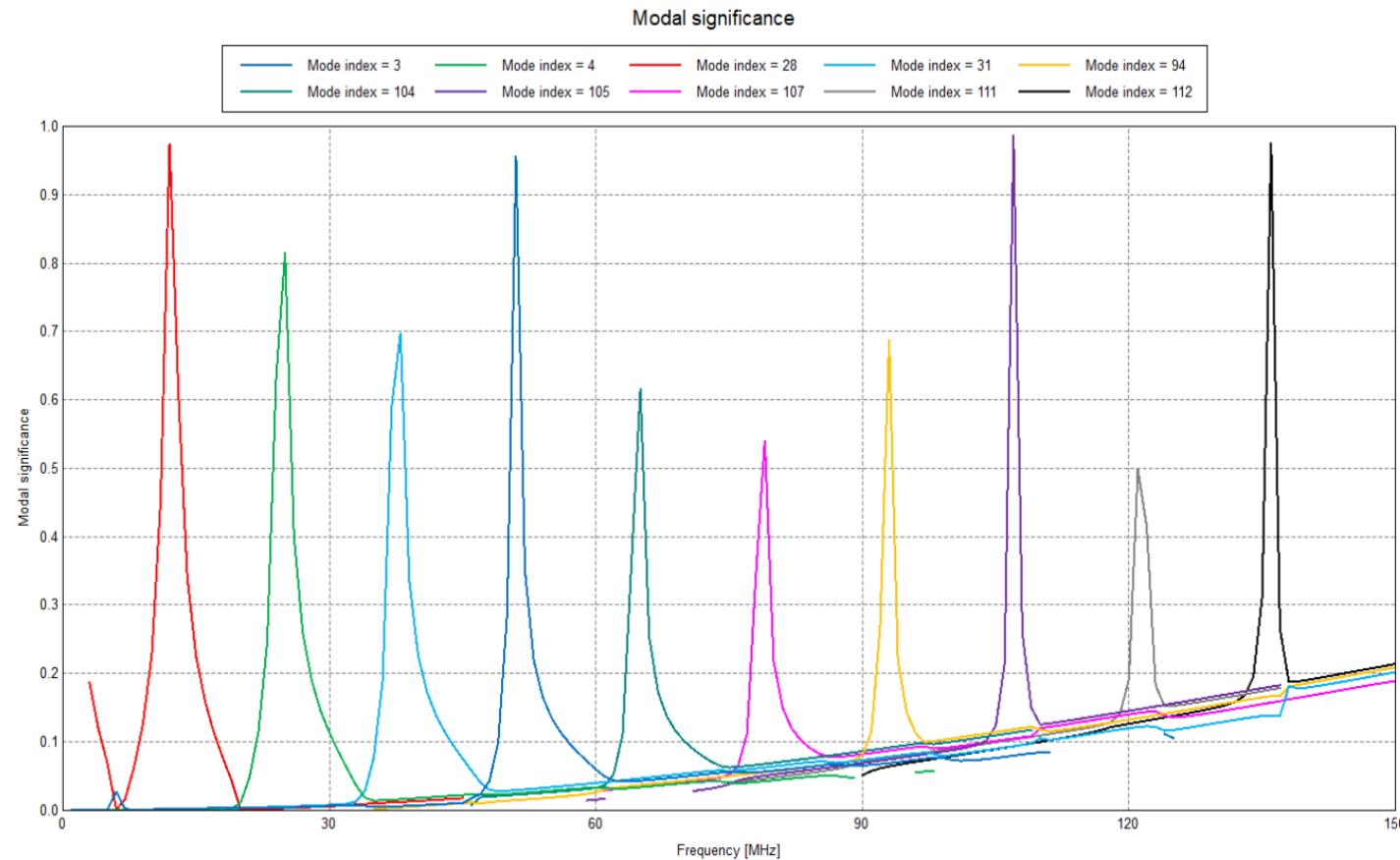
Modenindex	Frequenz in MHz, bei denen die modale Signifikanz ein Maximum erreicht	Approximativ analytische Resonanzfrequenz in MHz
1	28	30
2	58	60
3	88	90
22	118	120
132	148	150
329	178	180
467	208	210
616	238	240
724	268	270
892	298	300

## Eine weitere einfache Beispielkonfiguration

„Dicker Draht über Grund mit  
direkter Stromeinspeisung“



## Beurteilung charakteristischer Moden mit modaler Signifikanz



## Frequenzen der Charakteristischen Moden

Modenindex	Frequenz in MHz, bei denen die modale Signifikanz ein Maximum erreicht	Approximativ analytische Resonanzfrequenz in MHz
28	12	14
4	25	29
31	38	43
3	51	58
104	65	72
107	79	86
94	93	100
105	107	115
111	122	130
112	136	144

# Überblick

1. Komplexe Probleme der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) und Elektromagnetische Simulationen
2. EMV-Störfestigkeitstests im Resonanzbereich und numerische Berechnung von Charakteristischen Moden
3. Anwendungsbeispiel: Vergleich gestrahlter und stromeinspeisender EMV-Störfestigkeitstests mittels Charakteristischer Moden
4. Erfahrungen und Zusammenfassung

## Erfahrungen und Zusammenfassung

- Die Charakteristische Modenanalyse, wie in FEKO implementiert, erlaubt ein bequemes Untersuchen resonanter Strukturen, hier illustriert am Beispiel von EMV-Störfestigkeitstests im Resonanzbereich (und nicht am Beispiel des Antennenentwurfs)
- Bei etwas komplizierteren Strukturen kann das Auffinden interessierender Moden recht umständlich werden - einfacheres Postprocessing möglich?
- Lassen sich mit der Charakteristischen Modenanalyse neben der Resonanzfrequenz auch die Resonanzbreite bestimmen?

**Vielen Dank für Ihre Zeit und Aufmerksamkeit!**