

# ALLES ÜBER METAMATERIAL UND MÖBIUS BÄNDER

Prof. Dr. Ing. habil Ulrich L. Rohde

Technische Universität Brandenburg, Cottbus  
Bayerische Akademie der Wissenschaften, München

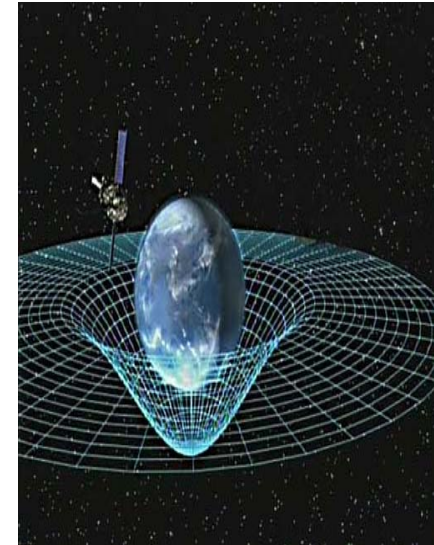
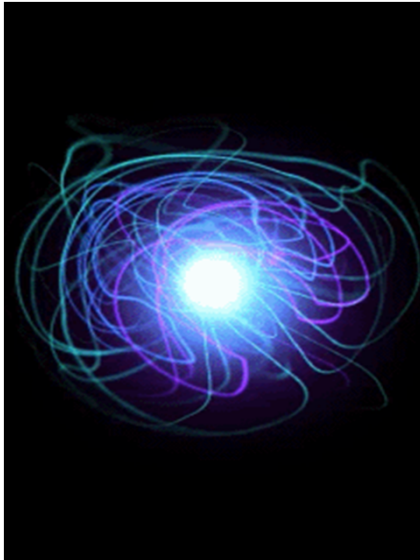


Bayerische  
Akademie der Wissenschaften



*Bayerische Akademie der Wissenschaften — gegründet 1759*

# Warum Metamaterial ?



“Häufig sagt man, dass sich jegliche fortgeschrittene Technologie nicht von Magie unterscheidet ”  
*Dirigieren von Stoffen und Energie: Herausforderungen für Wissenschaft und Vorstellung!!!*

## Metamaterialen:

Ein **Metamaterial** ist eine künstlich hergestellte **Struktur**, deren Durchlässigkeit für elektrische und magnetische Felder (Permittivität und Permeabilität) von der in der Natur üblichen abweicht. Das wird erreicht durch speziell angefertigte, meist periodische, mikroskopisch feine Strukturen (*Zellen, Einzelelemente*) aus elektrischen oder magnetisch wirksamen Materialien in ihrem Inneren.

## Potenzielle Anwendungen:

Imaging, Unsichtbarkeits-Tarnkappe, Sensoren, Photonen-Management, Nichtlineare Optik, Antennen, Wellen-Absorber...

# Was sind Metamaterialien (MM)?

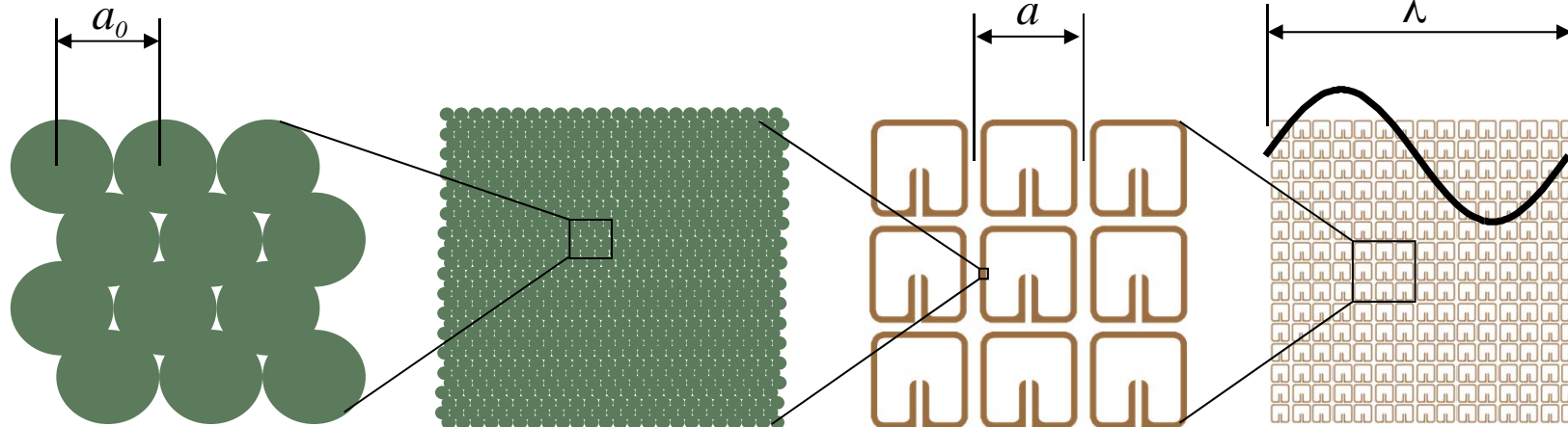
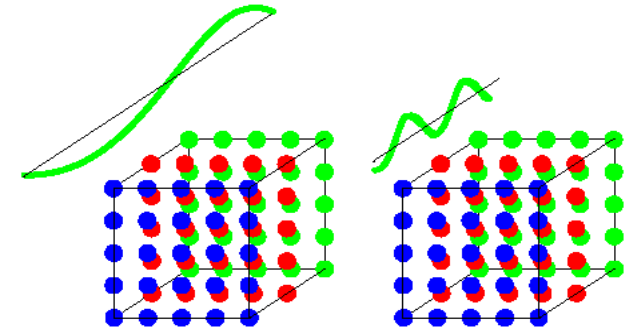
**MM:** Technisch veränderte Materialien mit Eigenschaften, die in der Natur nicht auftreten

Die Materialeigenschaften werden durch die Eigenschaften von deren Untereinheiten und deren räumlicher Verteilung bestimmt

Für  $a \ll \lambda \rightarrow$  effektive Medien-Theorie

Für  $a \sim \lambda \rightarrow$  photonische Effekte

$a_0 \ll a \ll \lambda$  (Größenordnung des Materialmaßstabs bestimmt die Eigenschaften)



Atomarer  
Maßstab

Atomare  
Homogenisierung

Metaatomarer  
Maßstab

Effektives Medium  
(zweite Homogenisierung)

# Materialklassifizierung

$$\begin{cases} \mathbf{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \mathbf{E} \\ \mathbf{B} = \mu_0 \mu \mathbf{H} \end{cases}$$

**D**= Dielektrische Verschiebung

**B**= Magnetische Flussdichte

$$\begin{cases} \varepsilon > 0 \\ \mu > 0 \end{cases}$$

Doppelpositives Substrat

**Ausbreitung**

$$\begin{cases} \varepsilon < 0 \\ \mu > 0 \end{cases}$$

**ENG**

Einfachnegatives Substrat

$$\begin{cases} \varepsilon > 0 \\ \mu < 0 \end{cases}$$

**MNG**

⏟

**Evanescence**

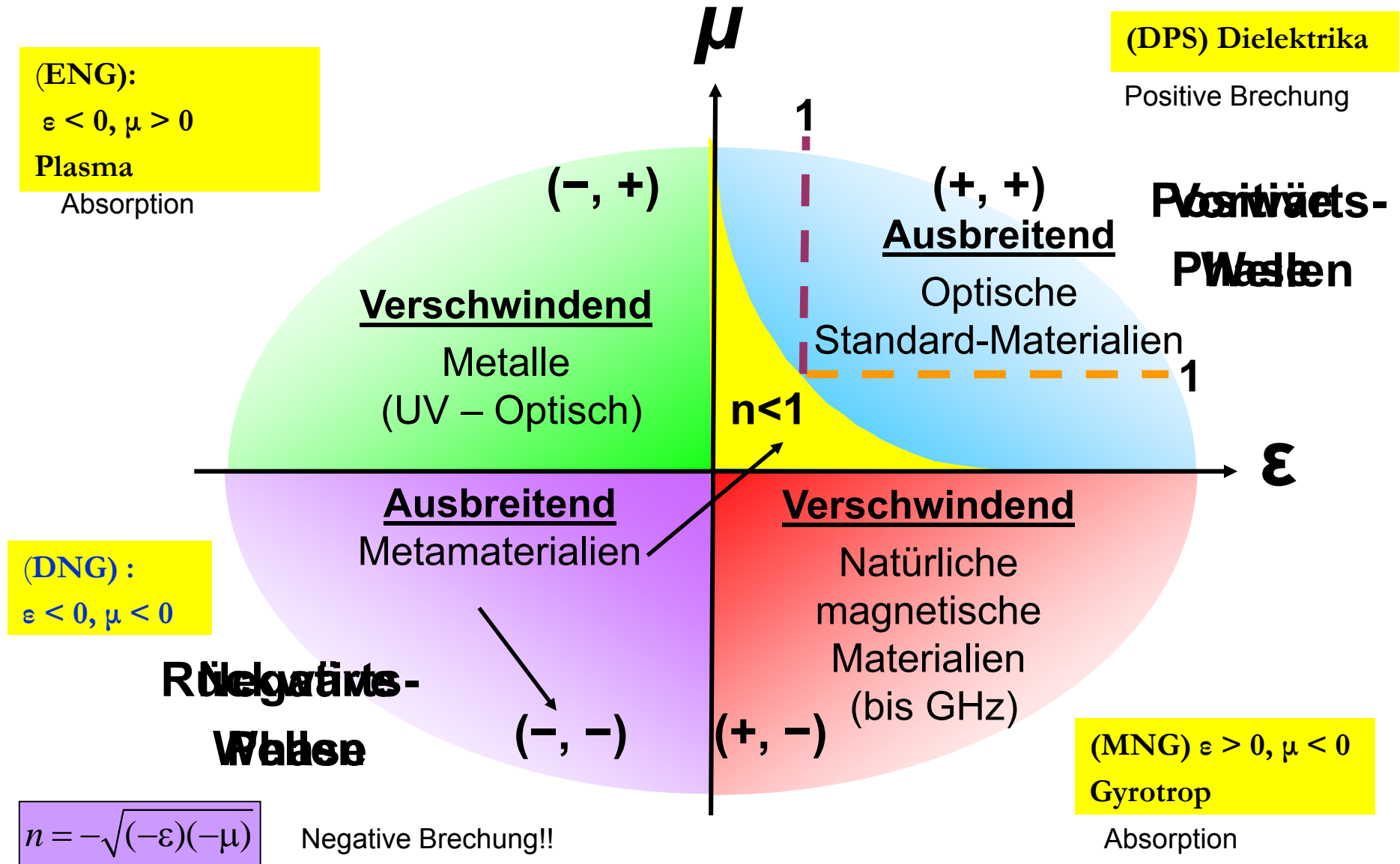
**Was bedeutet das auf Deutsch?**

$$\begin{cases} \varepsilon < 0 \\ \mu < 0 \end{cases}$$

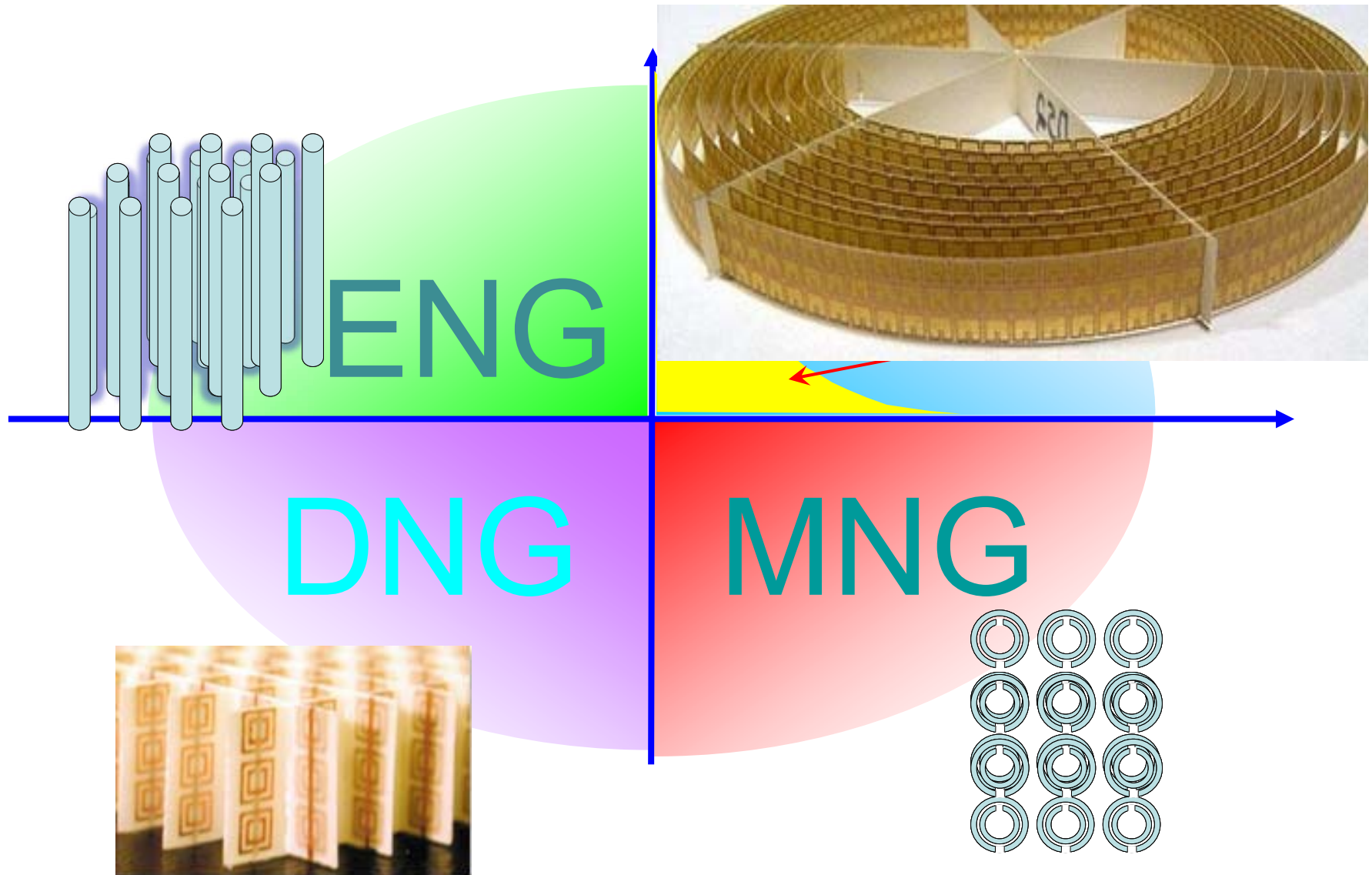
Doppelnegatives Substrat

**Ausbreitung**

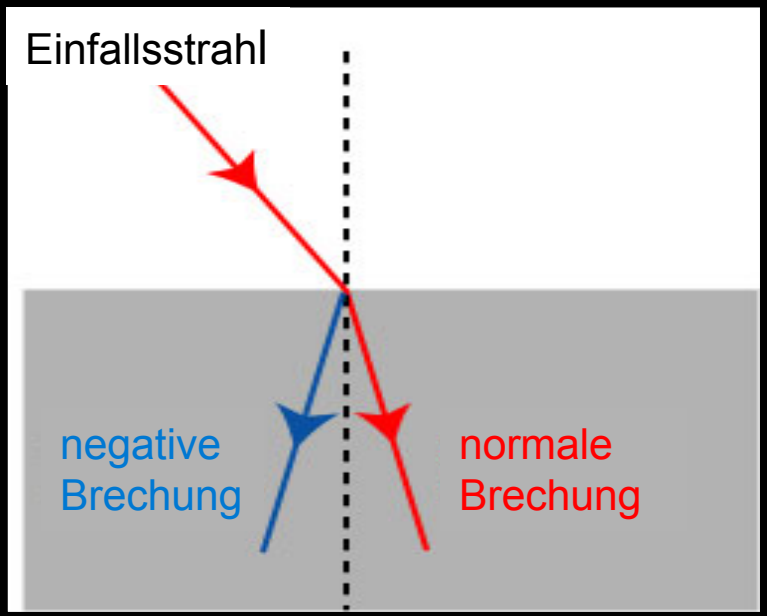
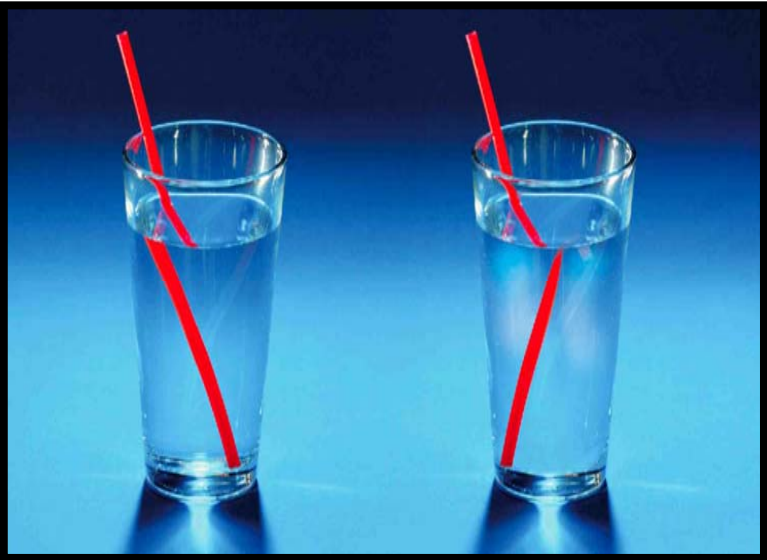
# Standard-Klassifizierung der Materialien



# Realisierung von Metamaterialien

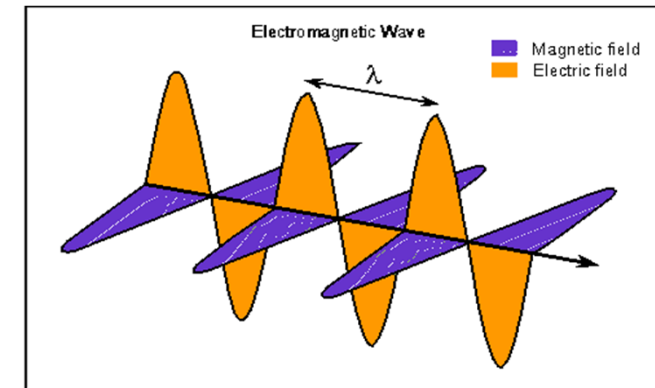
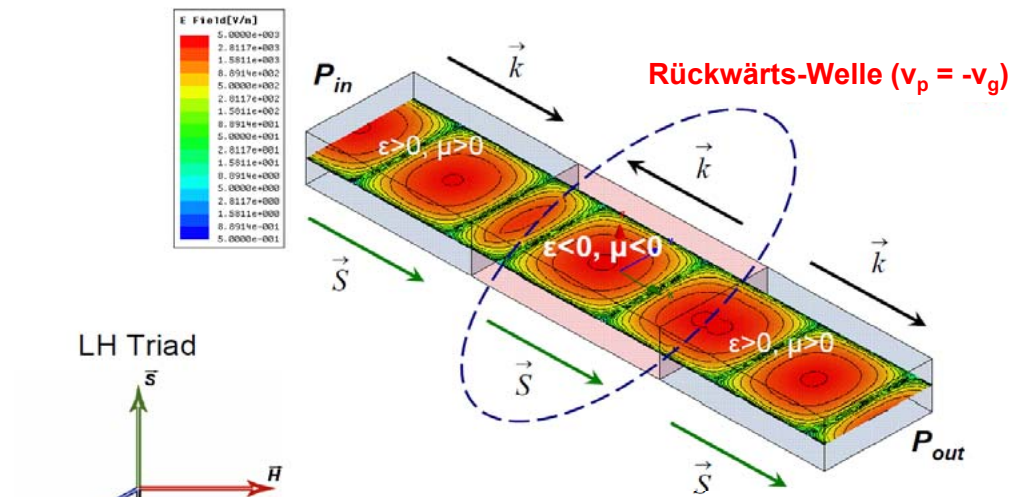


# Metamaterial-Physikalischer Effekt (Einbildung?)

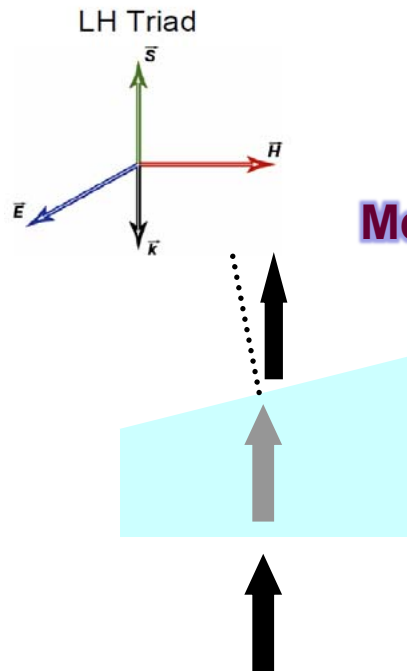


# Metamaterial-Charakteristiken

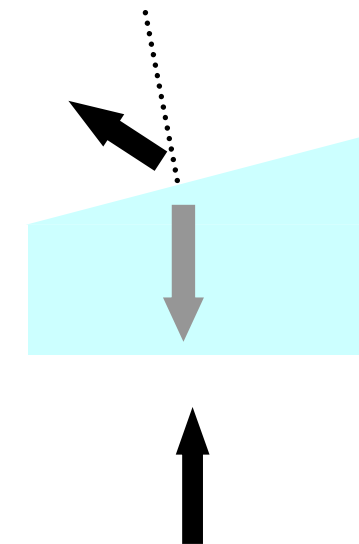
Negativindex-Material (Metamaterial) : **Löst Rückwärts-Welle aus**



**Metamaterial löst Rückwärts-Welle aus**



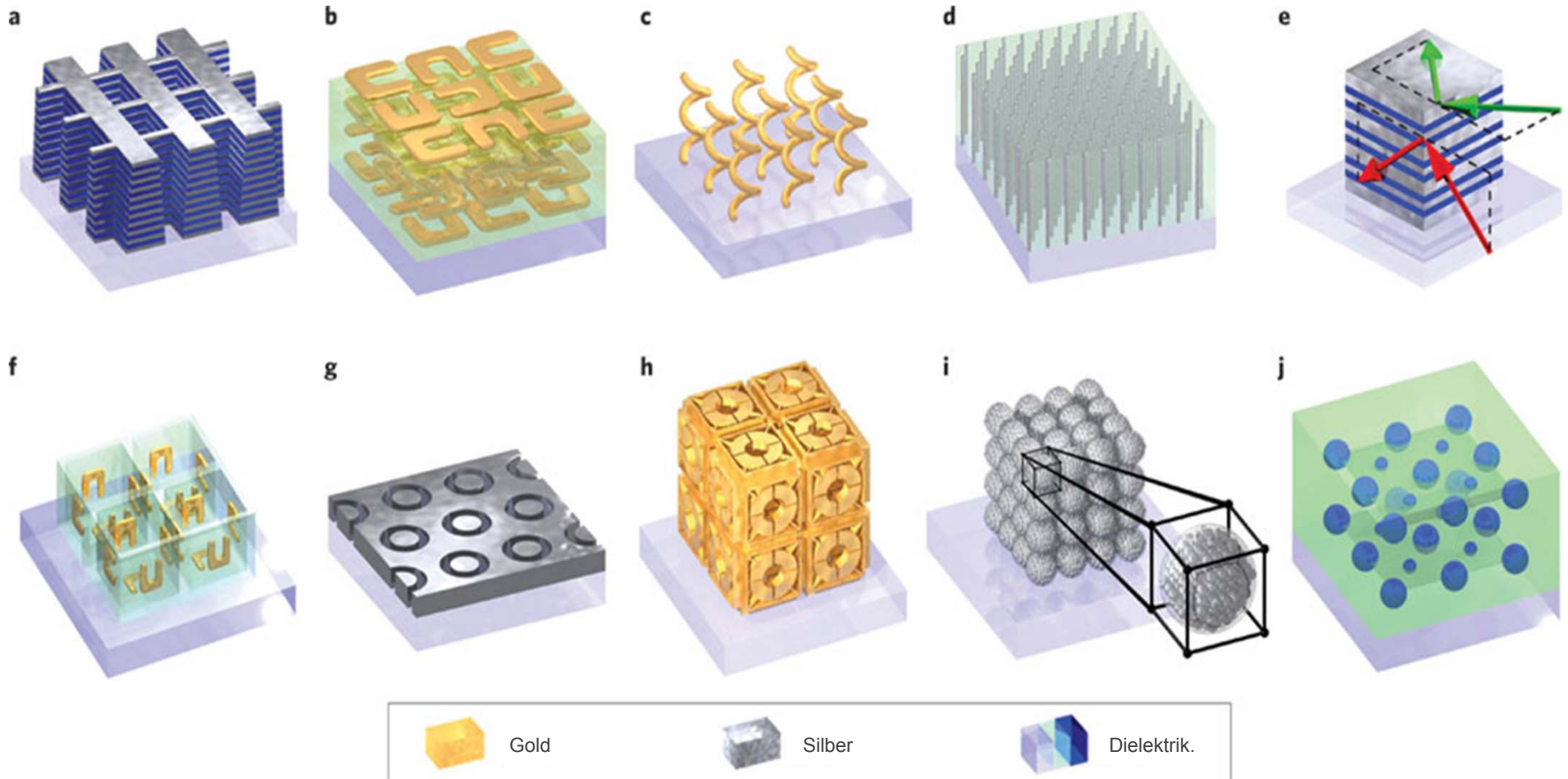
Positiver Brechungsindex



Negativer Brechungsindex

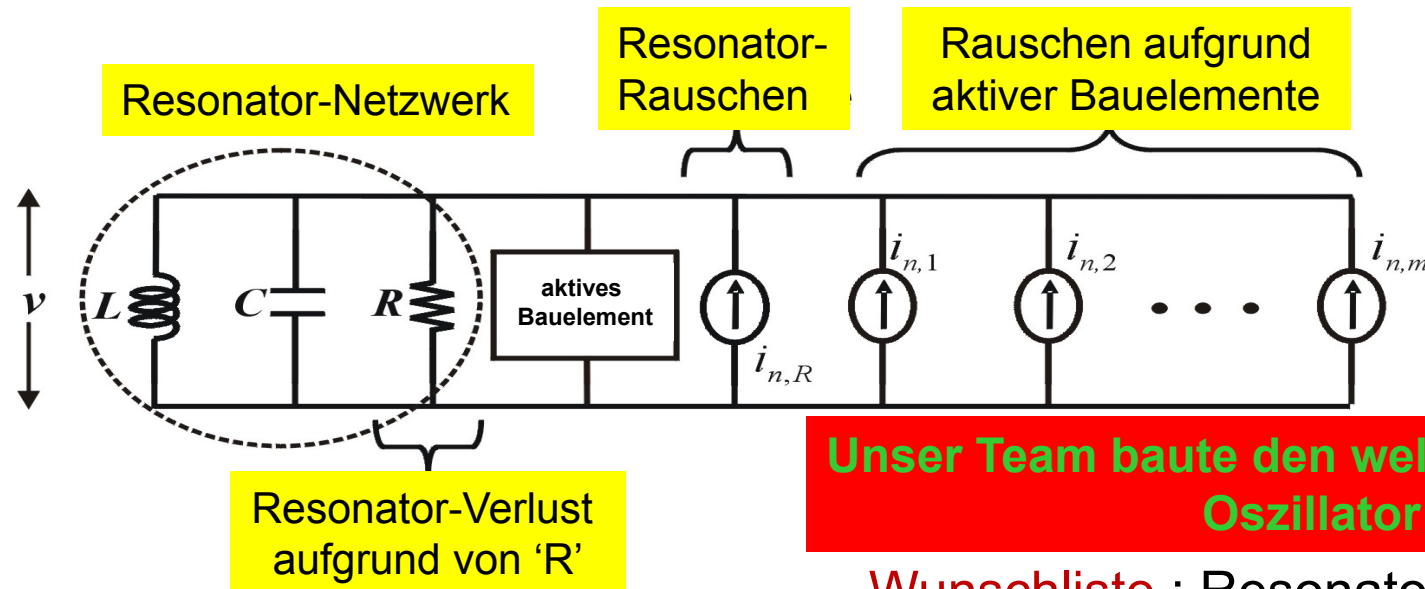


# Metamaterial-Struktur: Herstellungs-Technologien



# Mikrowellen-Oszillator: Unsere Beiträge

Typisches, vereinfachtes Modell für eine Mikrowellen-Oszillatorschaltung



## Design-Herausforderungen:

- Verlustarmer Resonator (hoher Gütefaktor)
- Planar & kompatibel mit ICs (Integrierte Schaltungen)
- Kompakte Größe und kosteneffizient
- Mehrband- & Mehrmoden-Betrieb
- Unempfindlich für Mikrophonie, Schock, Vibration

## Design-Aufgaben:

- Neue Typen von Hoch-Q-Faktor-Resonatoren
- **Metamaterial-Möbius-Streifen(MMS)-Resonator**
- Entwicklung von rauscharmen Oszillatoren
- Mehrband-, Mehrmoden-Oszillatoren

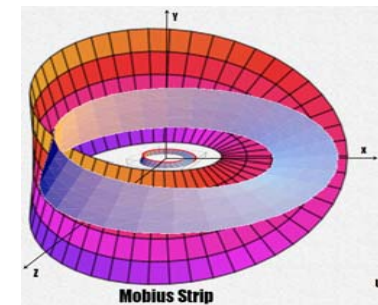
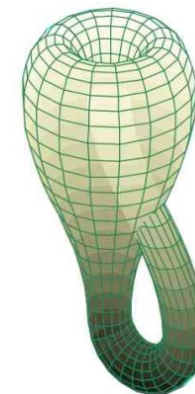
# Neuartige Lösung: Der Möbius-Resonator

Ein auf einem Möbius-Resonator basierender Oszillator bietet im Vergleich mit konventionellen planaren Resonatoren vorgegebener Größe einige Vorteile:

- hoher Q-Faktor und verbesserte Trennschärfe
- einfache Integration in MIC/MMIC-Technologien
- geringe Abmessungen und Gewicht
- Mehrband-Charakteristiken
- Relativ unempfindlich auf EMI und EMC

Die **Aufgabe** war es, teure Hoch-Q-Faktor SAW-, BAW-STW-, CR-, DR-, WGM-, YIG-, OE-Resonatoren für Referenz-Signalquellen und Synthesizer-Anwendungen zu ersetzen.

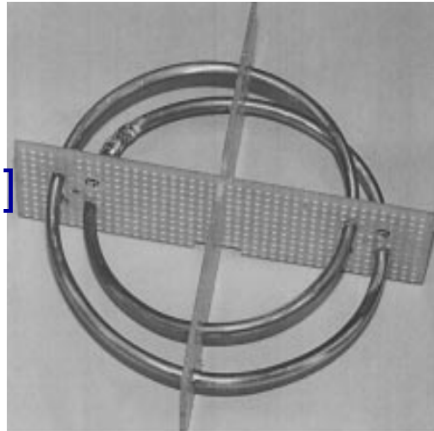
- Ein typischer Möbius ist eine Oberfläche mit nur einer Seite und nur einer Grenzkomponente, wobei deren mathematische Eigenschaften nicht orientierbar sind.
- Das Konzept der Möbius-Streifen basiert auf der Tatsache, dass ein in den Streifen eingekoppeltes Signal keinem Hindernis begegnen soll, wenn es die Schleife durchquert, und die Schleife soll sich wie eine unendliche Übertragungsleitung verhalten und dadurch eine sehr große Gruppenverzögerung aufweisen, die einen verbesserten Q-Faktor ergibt.
- **Herausforderung: 3-D-Struktur ist nicht für SMD-Soln zugänglich**



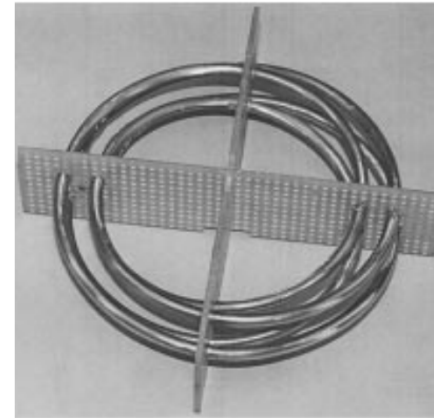
# Möbius-Streifen: Planare Struktur

## Nichtplanarer 3-D-Möbius-Drahtresonator

Dual-Modus [1]



Quad-Modus [2]



## Motivation

- Ein Möbius-Streifen vergrößert die **Umfangslänge** des Resonators mit demselben Radius für einen vorgegebenen konventionellen Ring-Resonator
- Dieses Charakteristikum einer Möbius-Schleife ermöglicht eine Miniaturisierung der physischen Abmessungen des Resonators und erhält dieselbe Resonanz-Frequenz
- Die neuartige Möbius-Streifen-Resonatorkonfiguration zeigt das **Mehrmodenresonanz**-Charakteristikum und die Fähigkeit, die Evaneszenz-Modus-Energie zu speichern, zum Verbessern der Gruppenverzögerung, des Q-Faktors, und zum Ermöglichen eines **Selbstinjektions-Modus & Phasenregelung**

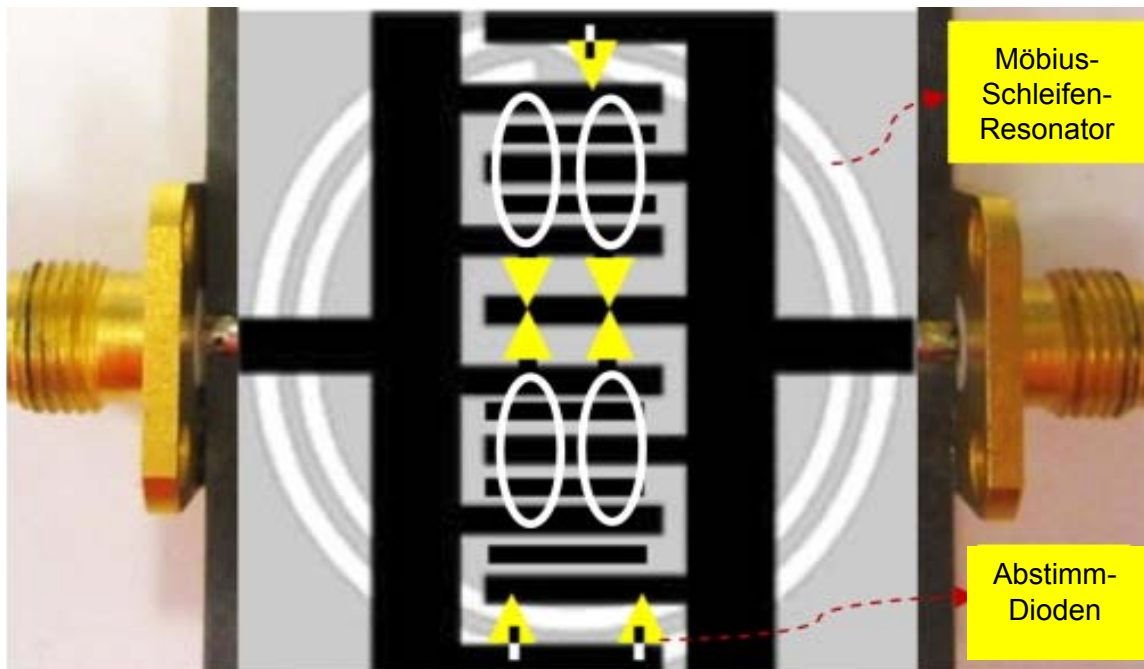
[1] J. M. Pond, "Mobius Dual Mode Resonators and Bandpass Filter", IEEE. Trans. of MTT Vol. 48, No.12, Dec 2000, pp 2465-2471.

[2] J.M.Pond, et.al. "Bandpass Filters Using Dual-Mode and Quad-Mode Mobius Resonators," IEEE Trans on MTT vol.49, pp.2363-2368, Dec.2001.

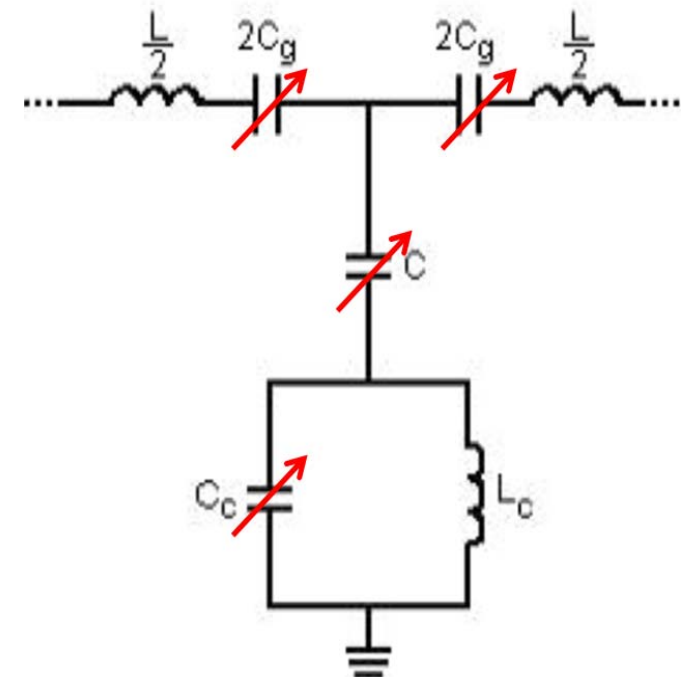
# Metamaterial zusammen mit Möbius-Streifen

Ein Möbius-Ring-Resonator zeigt eine topologische Halbdrehungs-Transformation, die sich in halbzahlige und ganzzahlige Normalmodenindizes aufteilt. Die Eigenfunktionen des Möbius-Resonators bilden eine Orthogonal-Basis; dies bietet eine interessante Möglichkeit für das Design eines Hoch-Q-Faktor-Resonators für die Anwendung in abstimmbaren Oszillatoren und Filterschaltungen.

## Gedruckter Möbius- & Metamaterial-Resonator



## Ersatz-Schaltung



# „MTT Student Design Competition“ Juni 2014



**IMS2014  
STUDENT DESIGN  
COMPETITION WINNER**  
Low Phase Noise X-band Oscillator

Won 1st Place by 30 dB PN Margin

## A Novel Low Phase Noise X-Band Oscillator

IMAGE LICENSED BY GRAPHIC STOCK © STOCKBYTE

Anisha M. Apte, Ajay K. Poddar,  
Matthias Rudolph, and Ulrich L. Rohde

Signal sources at the X-band are the keys for radio detection and ranging (radar) applications. To have good resolution and dynamic range for radar systems, the signal source or oscillator needs to have low phase noise [1]. Toward this end, resonators used in oscillator designs play a critical role. A resonator of high quality factor ( $Q$ ) implies low loss, thereby providing the capability to lower the phase noise of the oscillators.

A detailed phase-noise equation can be written for the general oscillator and is given by [2]

$$\mathcal{L}(f_m) = 10 \log \left[ 1 + \frac{f_0^2}{(2f_m Q_L)^2 (1 - Q_L^2)} \left( 1 + \frac{f_0}{f_m} \frac{FKT}{2P_o} \right) \right] \quad (1)$$

where  $\mathcal{L}(f_m)$  = ratio of sideband power in a 1-Hz bandwidth at  $f_m$  to total power in decibels,  $f_m$  = frequency

offset from the carrier,  $f_0$  = center frequency,  $f_c$  = flicker frequency,  $Q_L$  = loaded  $Q$  of the tuned circuit,  $Q_0$  = unloaded  $Q$  of the tuned circuit,  $F$  = noise factor,  $kT = 4.1 \times 10^{-21}$  at 300 K (room temperature), and  $P_o$  = average power at oscillator output.

From (1), the phase noise in oscillators is inversely proportional to the square of the resonator loaded  $Q$  factor, indicating that the insertion loss of the resonator can be linked and the figure of merit (FOM) can be given as

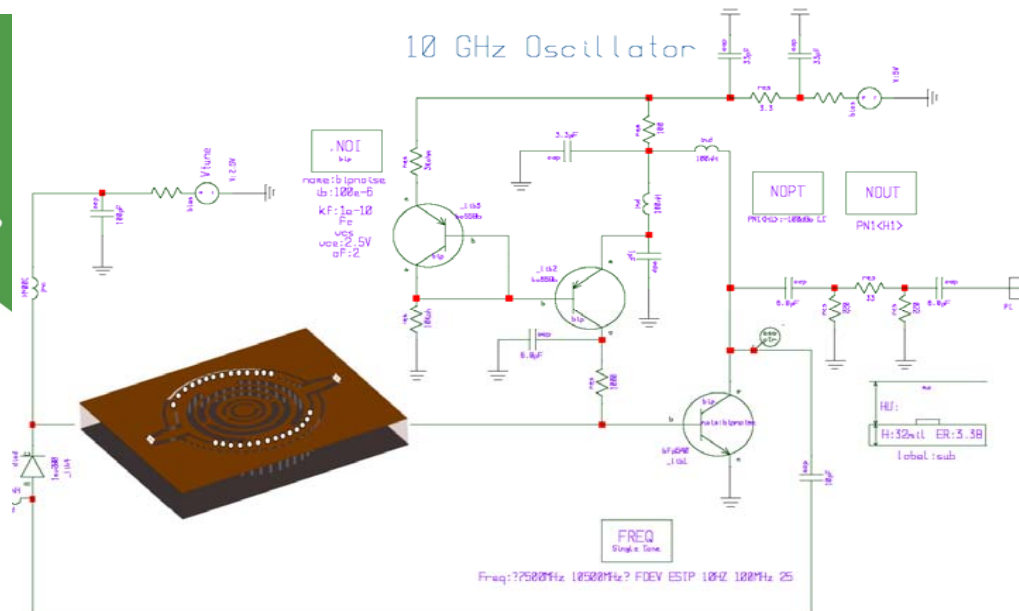
$$[\text{Resonator}]_{\text{FOM}} = 10 \log \left( \frac{\text{Insertion Loss}}{Q_L^2} \right). \quad (2)$$

From (2), for low phase noise, the designer should optimize the resonator FOM. At microwave frequencies, resonators can be passive or active, depending on the application.

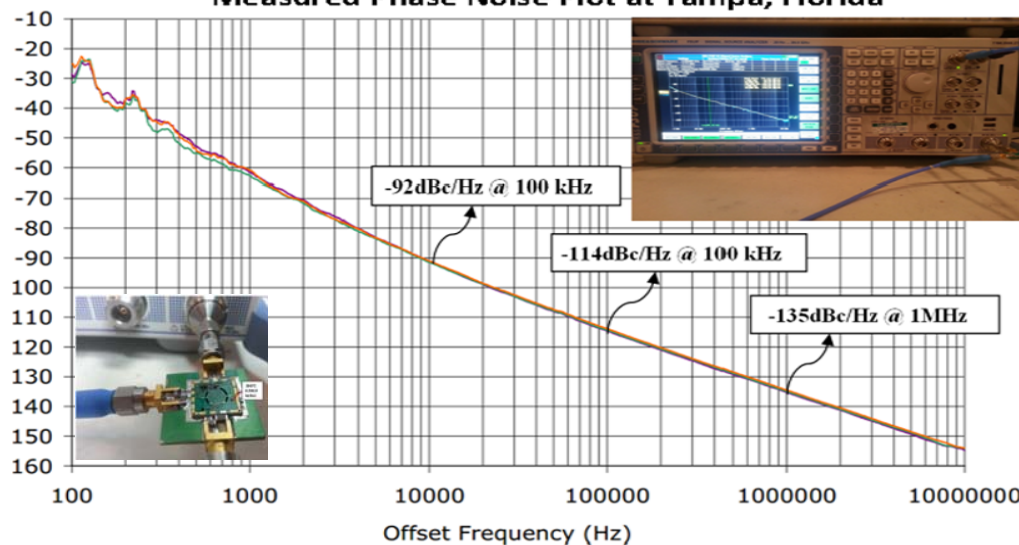
Anisha M. Apte (anisha\_apte@yahoo.com) and Matthias Rudolph (rudolph@tu-cottbus.de) are with Brandenburg University of Technology, Cottbus, Germany. Ajay K. Poddar (akpoddar@synergymwave.com) and Ulrich L. Rohde (ulr@synergymwave.com) are with Brandenburg University of Technology, Cottbus, Germany, and Synergy Microwave Corp., Paterson, New Jersey, United States.

Digital Object Identifier 10.1109/MMM.2014.2367957  
Date of publication: 14 January 2015

**Won 1st Place by 30 dB PN Improvement**



IMS 2014 STUDENT DESIGN COMPETITION: 10 GHz Oscillator  
Measured Phase Noise Plot at Tampa, Florida



— -40 Degree C      — +25 Degree C      — +85 Degree C

# „MTT Student Design Competition“ Juni 2014



Dr. Paul Khanna (Preisrichter) verifiziert die Phasenrausch-Messung



Anwendungstechniker von R&S unterstützen die Messung



Prof. Michael Wu, der den 2. Preis gewann, misst das Phasenrauschen

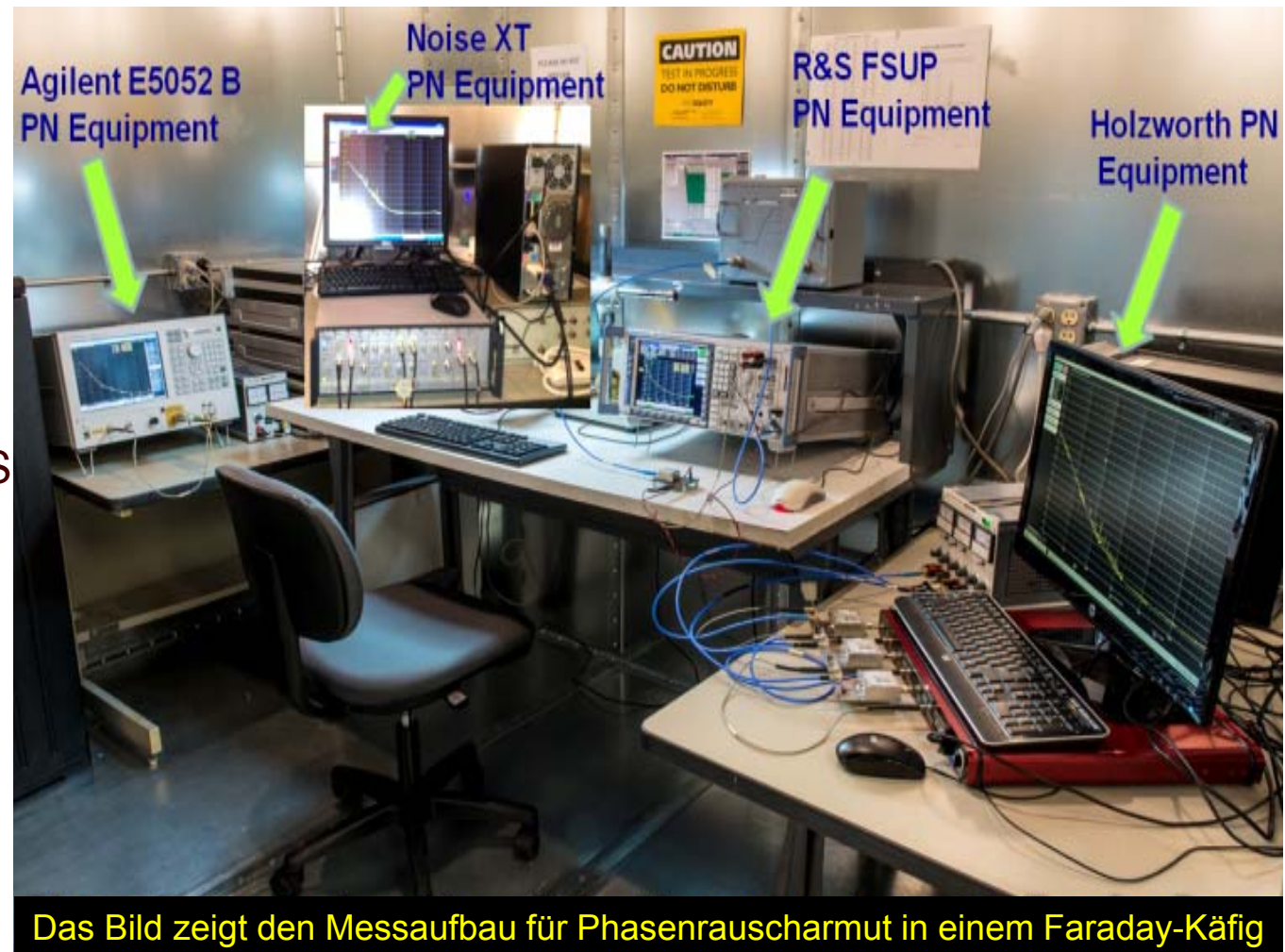


Frau Apte empfängt den 1. Preis von Prof. Rohde (Chef-Preisrichter)

# PN-Messung & Verifikation

PN-Messungen wurden mit verschiedenen Geräten in einem Faraday-Käfig durchgeführt:

1. Agilent E5052B
2. R&S FSUP
3. Holzworth HA7402-A
4. Noise XT DCNTS
5. Anapico APPH6000-IS





# Zeitablauf: Möbiusbasierter Metamaterial-HF-Resonator

---

- Am Ende des 19. Jahrhunderts hat es eine extensive Suche nach künstlichen Materialien zum Manipulieren elektromagnetischer Wellen gegeben.
- Theoretische Vorschläge für linkshändiges Material wurden 1968 zuerst von **Veselago** gemacht.
- **Mandelstam** veröffentlichte zuerst über negative Brechung, 1951 gefolgt von **Malyuzhinets**, der die Sommerfeld-Bedingung an Rückwärts-Wellen-Medien untersuchte.
- 1993-1995 entwickelten Sundarajan, Poddar und Rohde Möbius-Streifen für Sende-Empfangs-Antennen (INSAT B Satellit).
- **Pendry** et al verwendeten 1996 ein künstliches Draht-Medium, dessen Permittivität negativ ist, um ein künstliches elektrisches Plasma zu realisieren, 1999 gefolgt von einem mit einem **Spalt-Ring-Resonator** (SRR) realisierten magnetischen Plasma, dessen Permeabilität negativ ist.
- 2005 realisierten **Smith** et al ein Gradientenbrechungsindex-Medium, um elektromagnetische Wellen zu biegen. 2006 wird eine optische Transformation vorgeschlagen, um elektromagnetische Wellen zu steuern und zu manipulieren, und es gibt einen Vorschlag für eine unsichtbare Tarnkappe.
- 2012-2013 schlugen **Itoh** (UCLA, USA), **Rohde** (Uni Cottbus) und **Poddar** (Synergy Microwave) einen **Metamaterial-Möbius-Resonator** für ultra-phasenrauscharme Oszillator-Anwendungen vor (IEEE, IMS 2013, USA).
- 2013-2014 entwickelte **Google** eine **Superlinsen-Brille**, um die Sehfähigkeit zu verbessern.
- 2013-2014 entwickelte **Guy Lipworth** (Duke University, Carolina, USA) eine Superlinse aus magnetischem Metamaterial für vergrößerte Reichweite von drahtloser Leistungsübertragung.
- Im Januar 2015 berichtet das IEEE Microwave Magazine von einer 30 dB-Verbesserung des PN bei einer vorgegebenen Größe und Leistungsaufnahme, Synergy Microwave Corp. (Rohde's Doktorand Anisha Apte)

A composite image featuring a vibrant green grassy field in the foreground. The background is a deep blue, star-filled night sky with a prominent, glowing blue nebula or galaxy. A large, detailed planet with a blue and white atmosphere is positioned on the right side, with a smaller moon-like satellite orbiting it. Another smaller moon is visible in the center of the sky. The overall scene is ethereal and futuristic.

**Vielen Dank  
für  
Ihre Aufmerksamkeit**