

Aktuelle Entwicklungen auf dem Gebiet der Mikrosystemtechnik

Technische Universität Chemnitz
Professur für Mikrosystem- und Gerätetechnik
Prof. Dr.-Ing. habil. Jan Mehner
<http://www.tu-chemnitz.de/etit/microsys>
jan.mehner@etit.tu-chemnitz.de



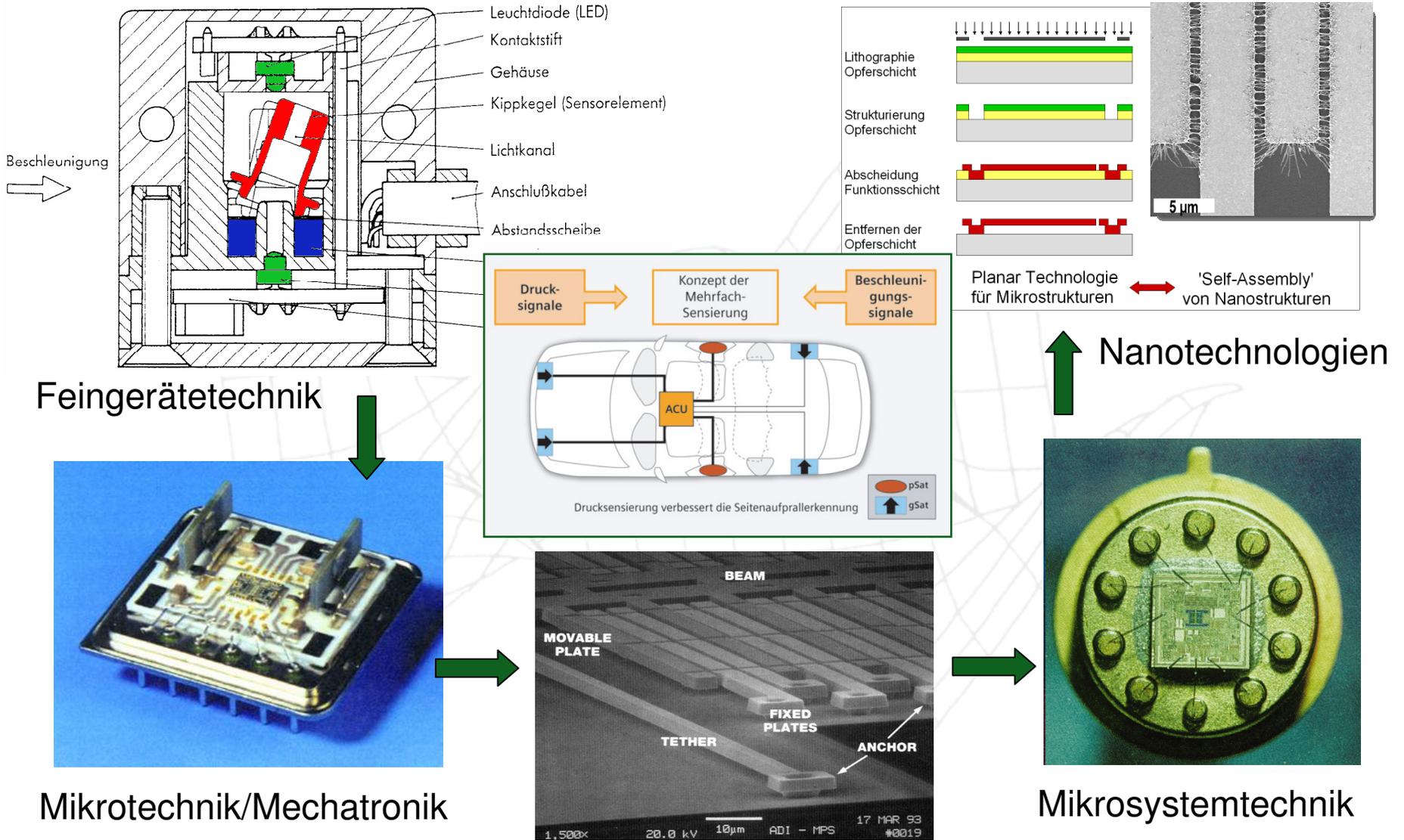
Gliederung des Vortrages

- Was sind Mikrosysteme? Welche Vorteile bringen diese Technologien?
- Kommerzielle Produkte der Mikrosystemtechnik, Entwicklungstendenzen
- Herausforderungen beim Entwurf und der Charakterisierung
- Ausbildung und Forschung an der TU Chemnitz

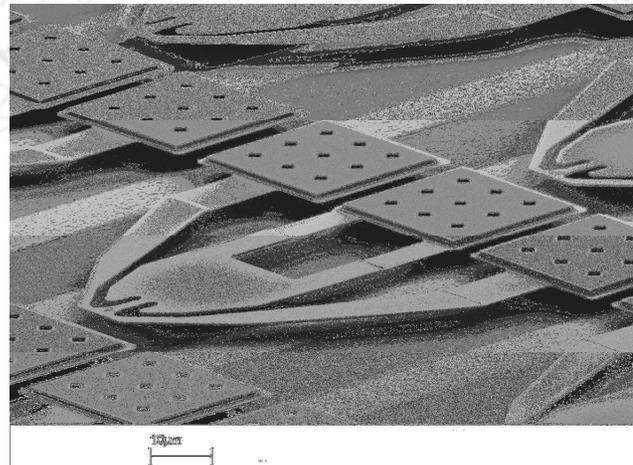
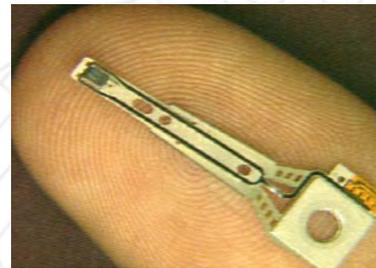
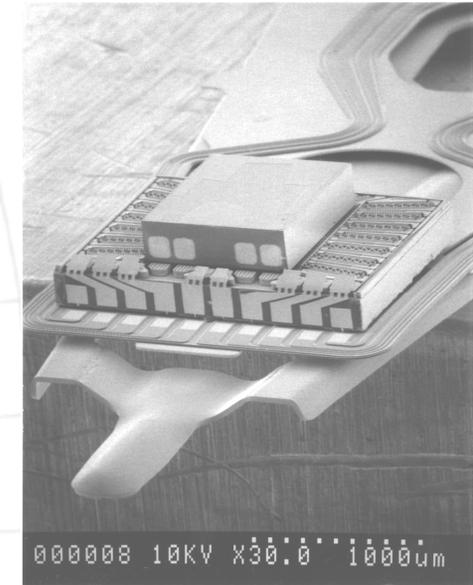
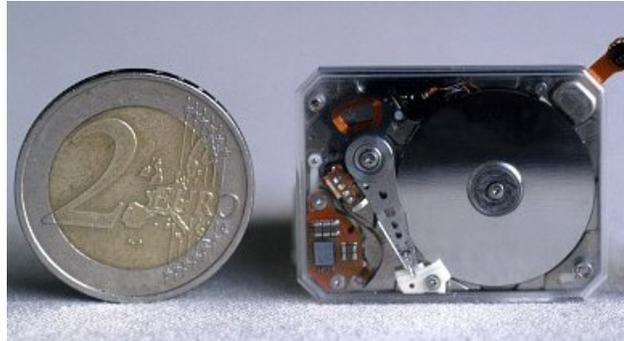


Das kleinste Elektroauto der Welt: Nippondenso 1995 (Motordurchmesser 0,67 mm)

Fortschreitende Miniaturisierung elektromechanischer Systeme



Fortschreitende Miniaturisierung elektromechanischer Systeme



"Millipede"-Projekt, IBM Research Zürich

Was sind Mikrosysteme? Welche Vorteile ergeben sich?

Mikrosysteme, Micro-Electro-Mechanical-Systems (MEMS):

- sind miniaturisiert (typische Strukturabmessungen → wenige Mikrometer)
- vereinigen elektrische, mechanische, optische, fluidische Komponenten
- Integration von Elektronik und Mikrosystem (monolithisch oder hybrid)
- Herstellung durch Halbleitertechnologien und –materialien (oft Si basierend)

Sinnvolle Anwendungen sind Sensoren und Aktuatoren (Skalierungsgesetze, keine Miniaturisierung um jeden Preis).

Vorteile:

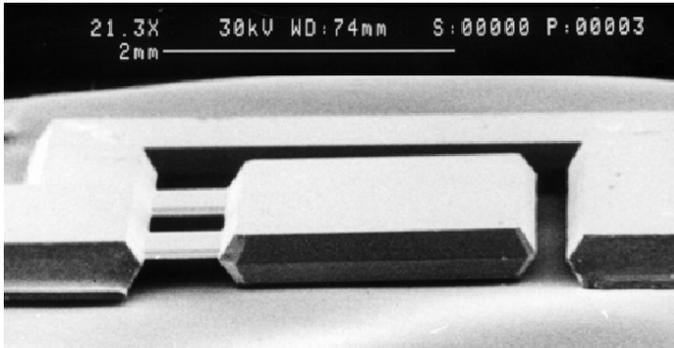
- kleine Strukturabmessungen, direkte Integration in die Bauteile (rückwirkungsfrei)
- hohe Integrationsdichte von heterogenen Funktionen auf einem Chip (multifunktional)
- geringe Fertigungskosten bei Massenproduktion (aber hohe Entwicklungskosten)
- Funktionseigenschaften können sich verbessern (Energieverbrauch, Reaktionszeiten)

Mikrosystemtechnik-Lieferanten haben jährliche Steigerungsraten von über 16%.

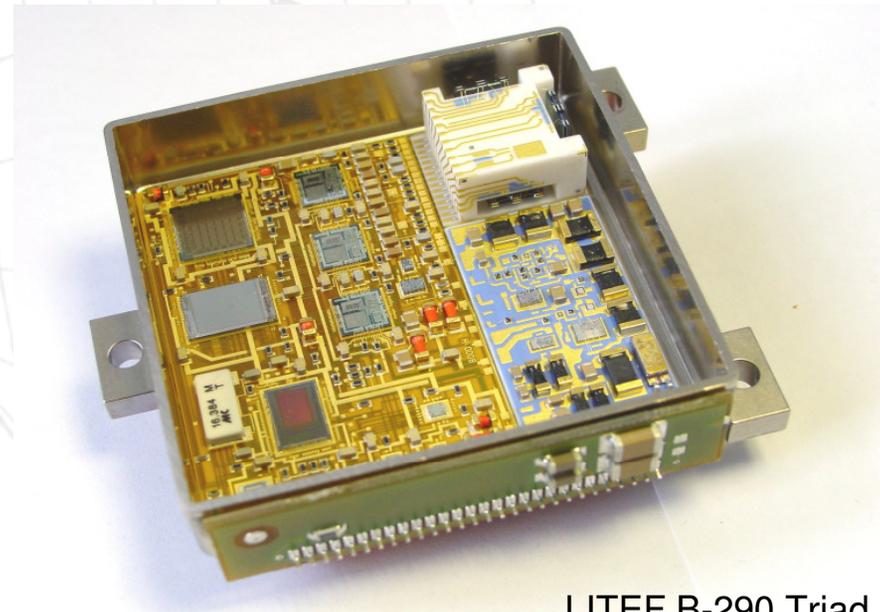
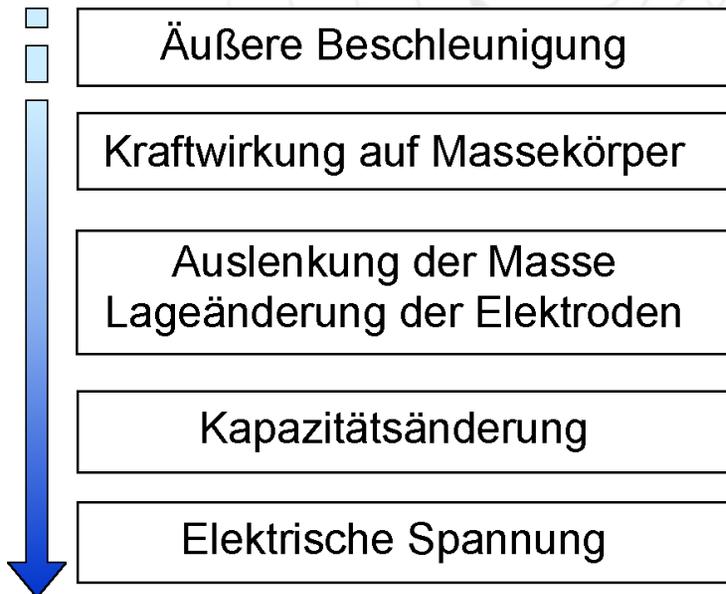
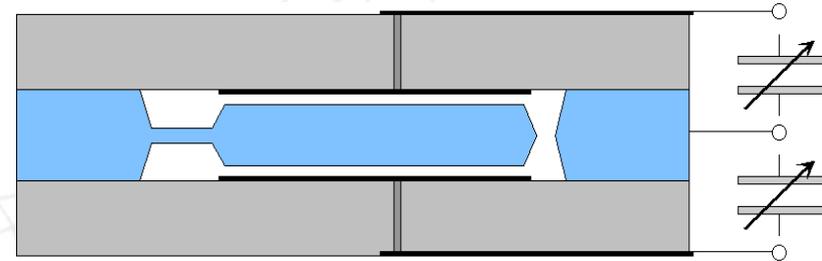
Anwendungen (Mikromechanik): Automobiltechnik, Industrieautomatisierung und Konsumgüter



Produktbeispiel: Beschleunigungssensoren

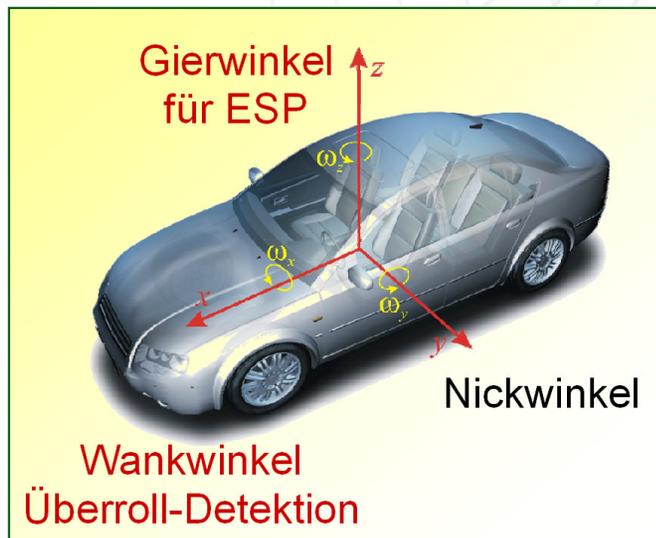
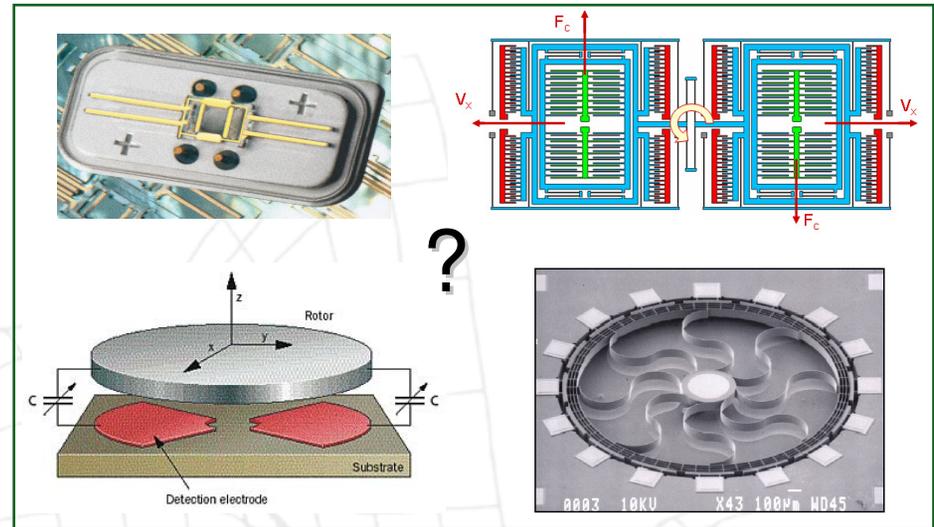
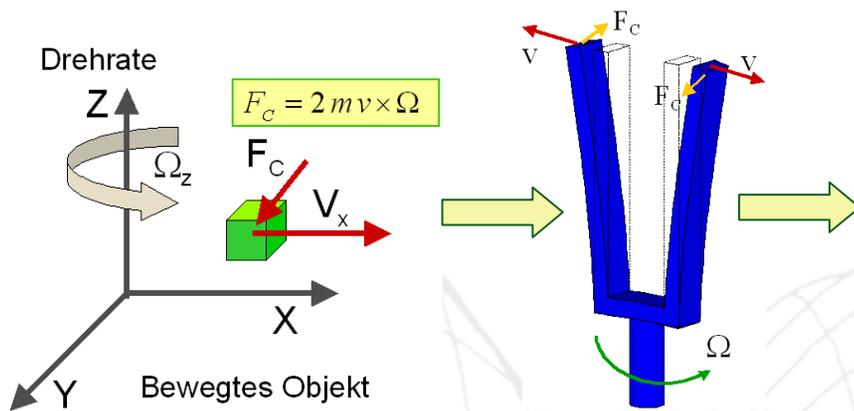


Bulk-Beschleunigungssensor (1992, TUC):

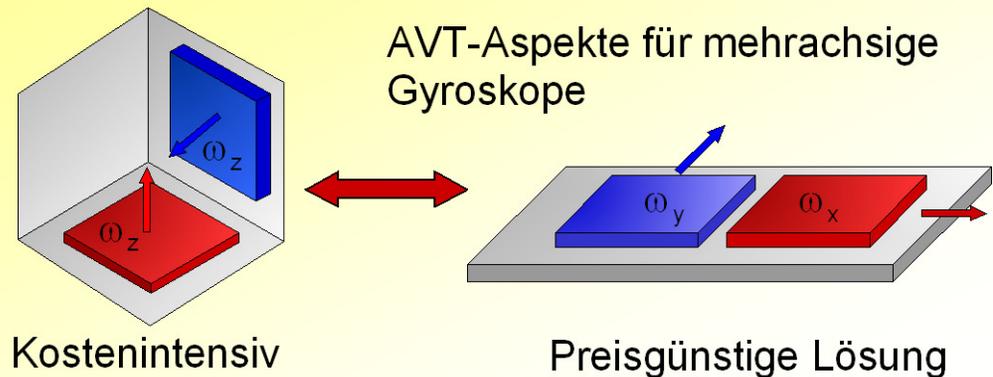


Produktbeispiel: Drehratesensoren (Gyroscope)

Das Coriolis-Prinzip:

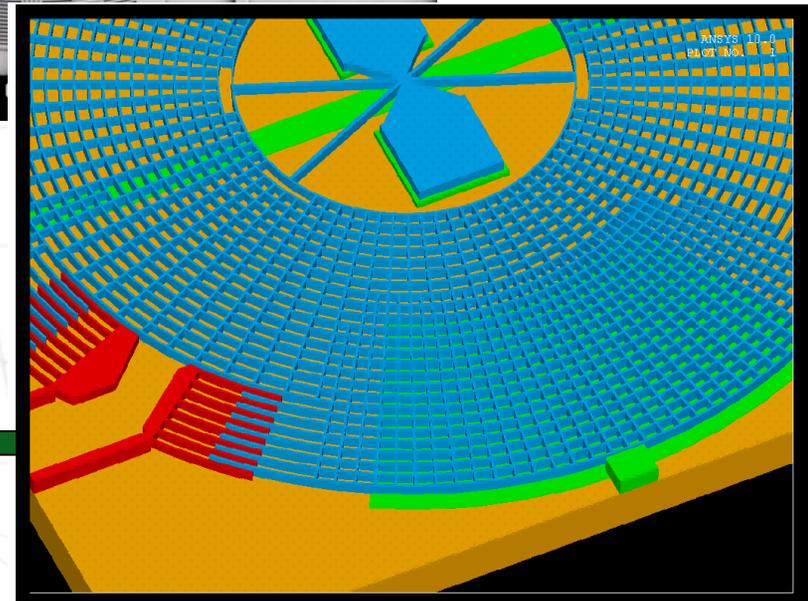
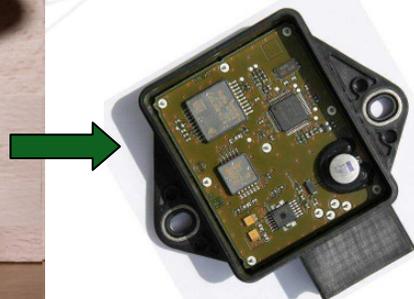
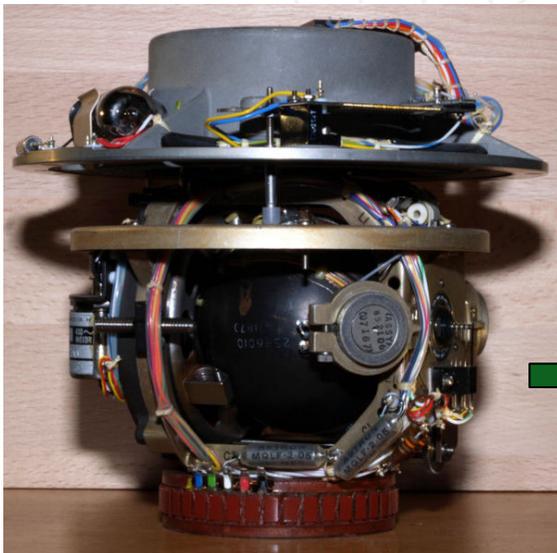
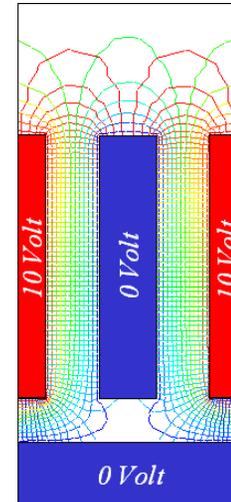
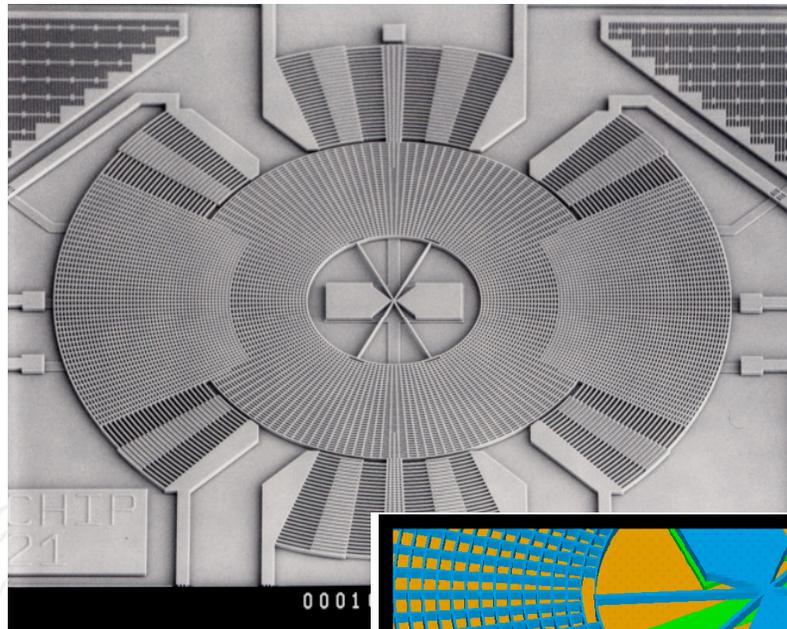
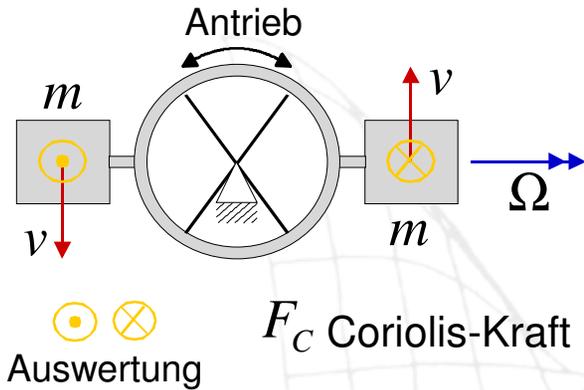


Problem: Nahezu alle Gyroskope sind z-Achsen sensitiv.
(Antriebs- und Auswertebewegung in einer Ebene)

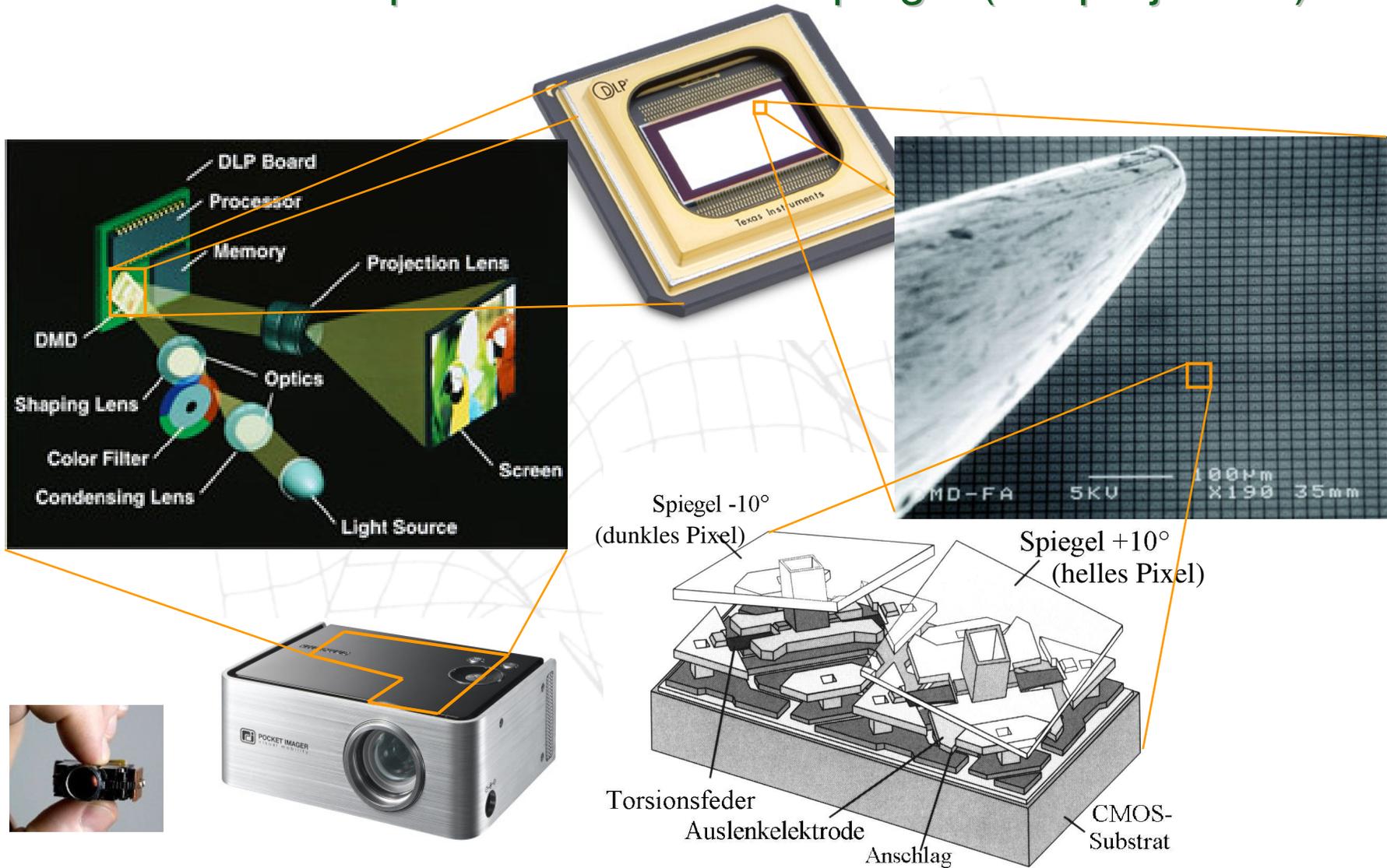


Produktbeispiel: Drehratesensoren (Gyroscope)

$$F_C = 2 \cdot m \cdot v \times \Omega$$



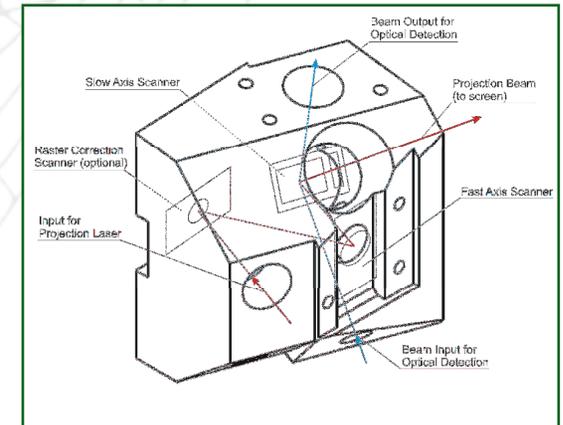
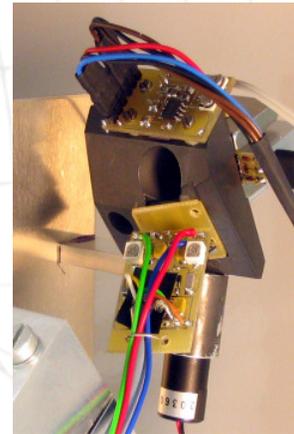
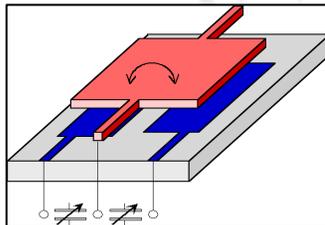
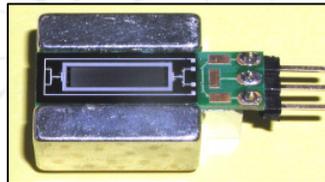
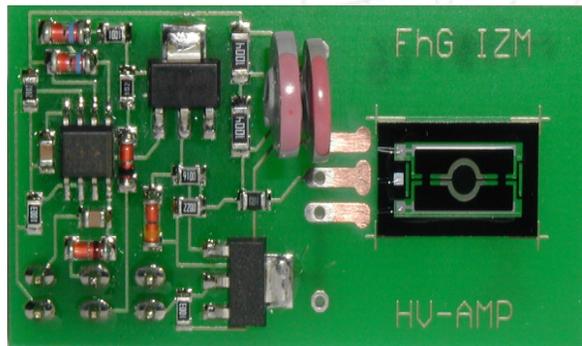
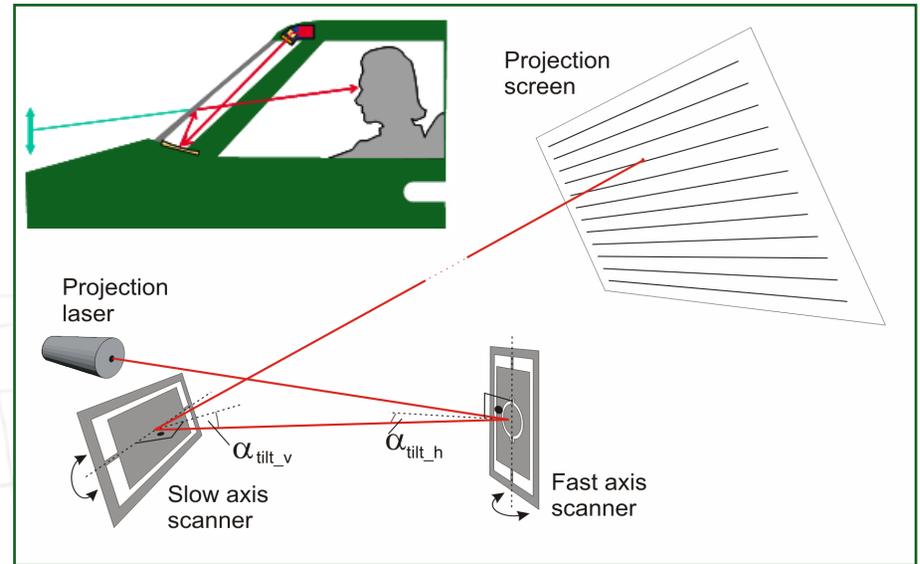
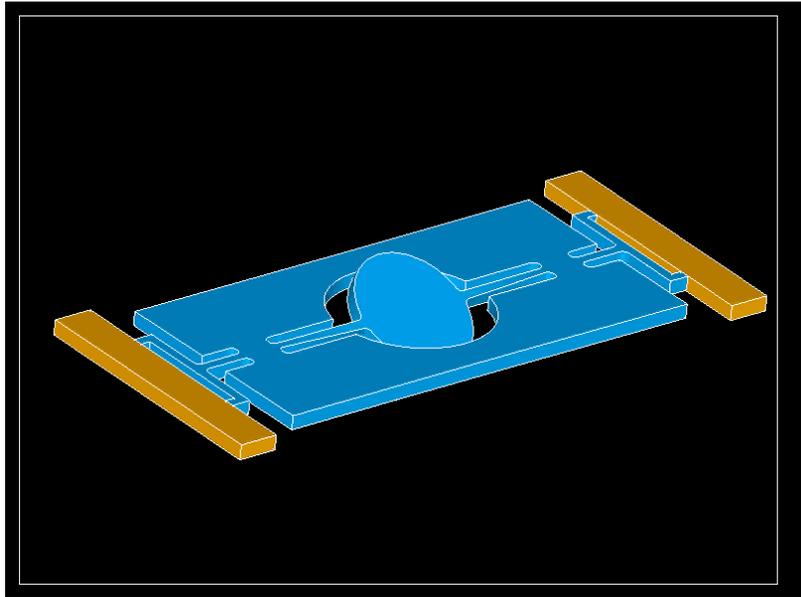
Produktbeispiel: Mikroschwenkspiegel (Bildprojektion)



Pico projector

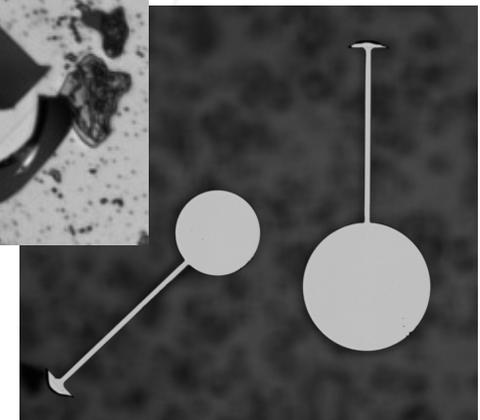
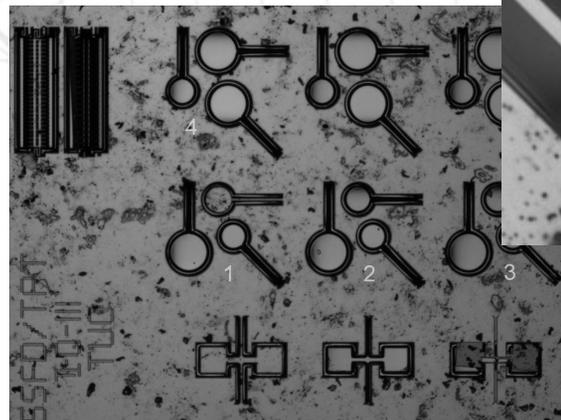
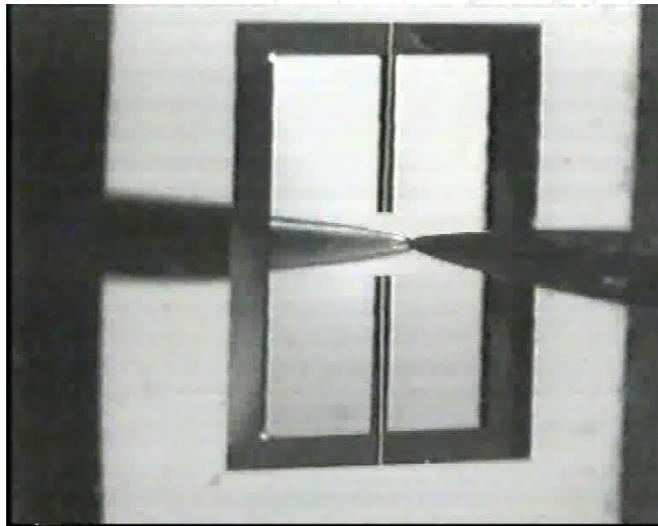
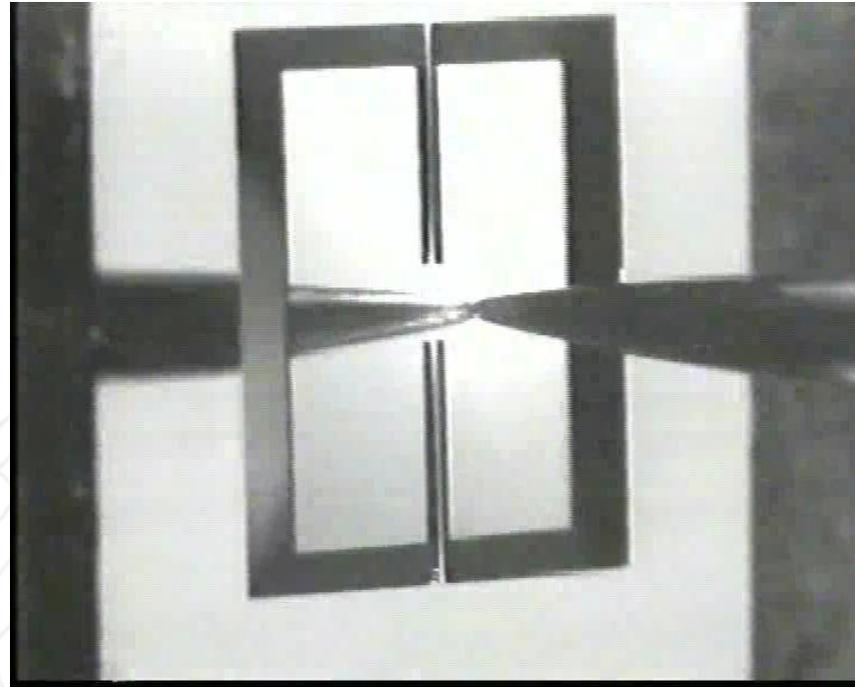
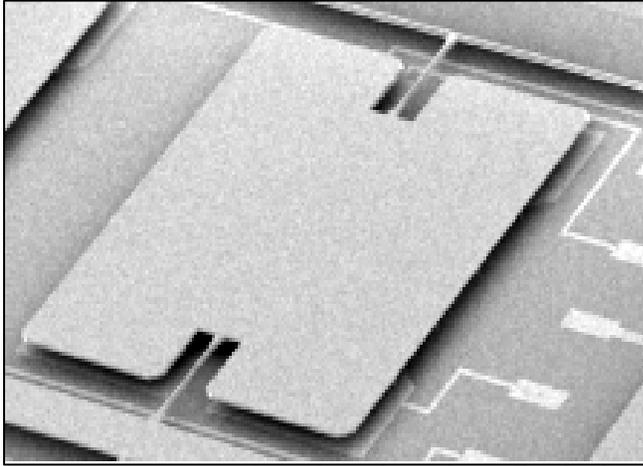
Produktbeispiel: Mikroschwenkspiegel (Bildprojektion)

Komponenten des Projektionssystems:



Produktbeispiel: Mikroschwenkspiegel (Bildprojektion)

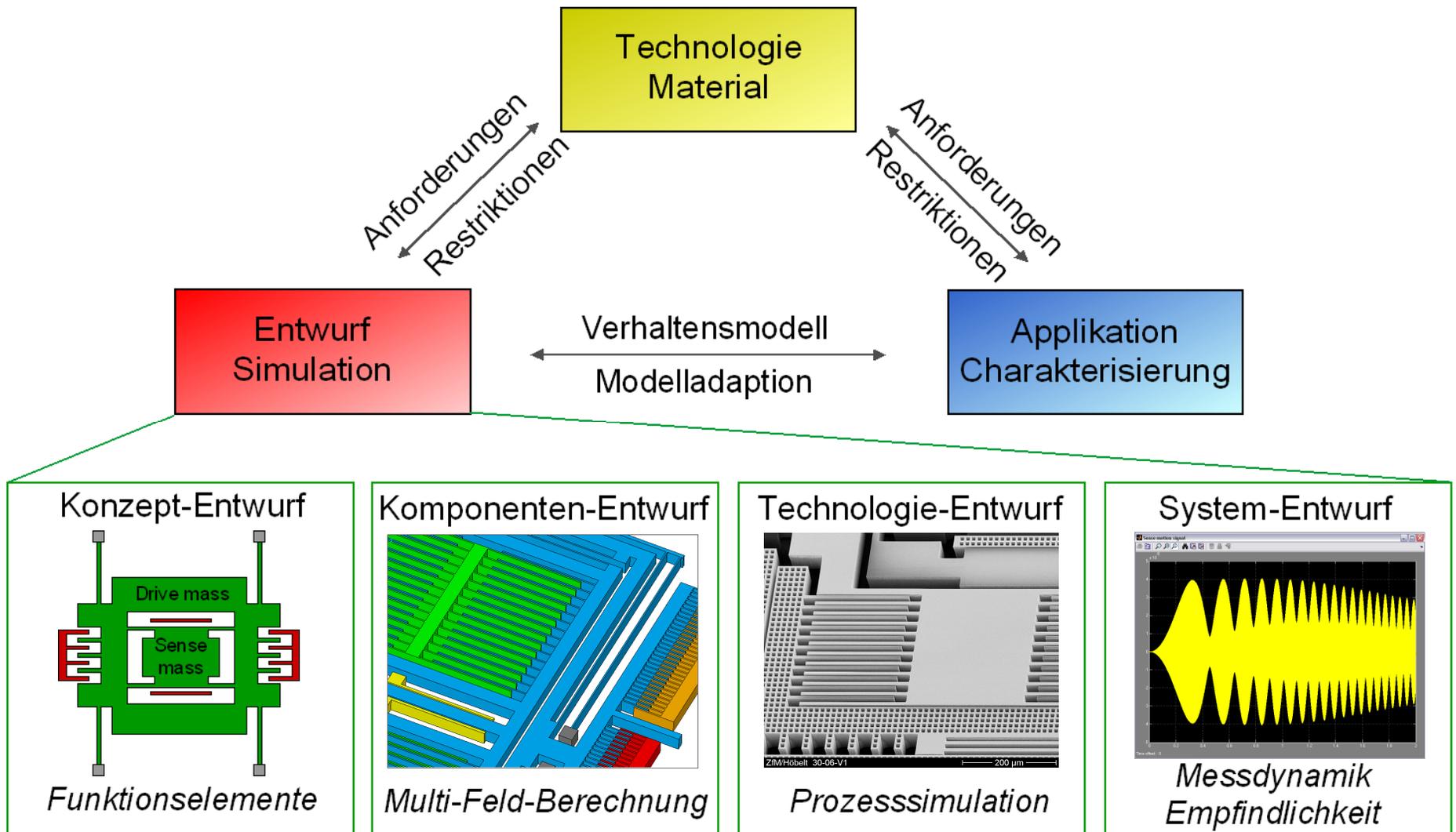
Mikromechanische Ablenkspiegel:



Leistungsfähigkeit heutiger Mikrosysteme



Methoden und Werkzeuge zum Entwurf von Mikrosystemen

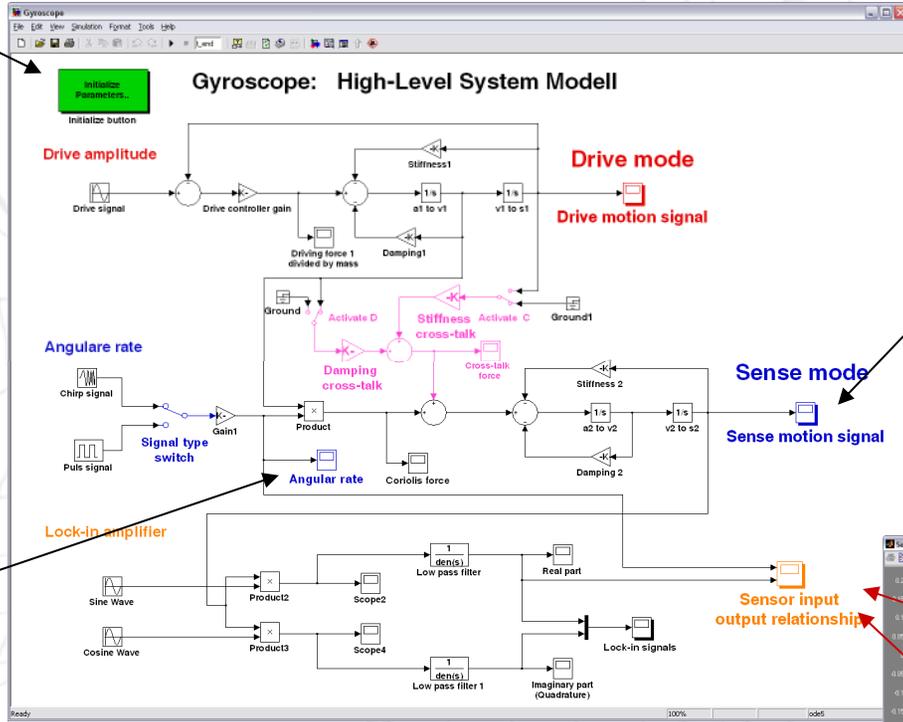
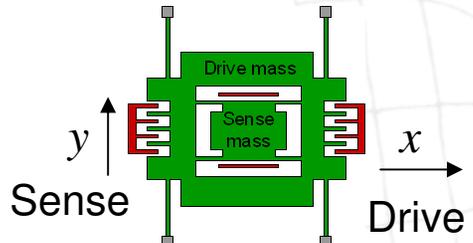
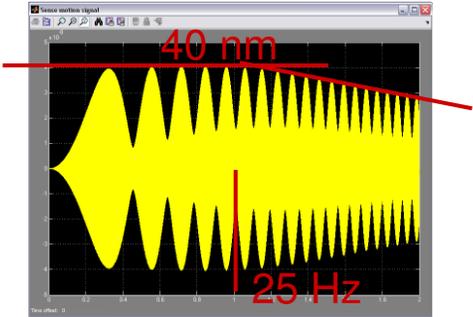


Konzeptentwurf: Bestimmung physikalischer Parameter

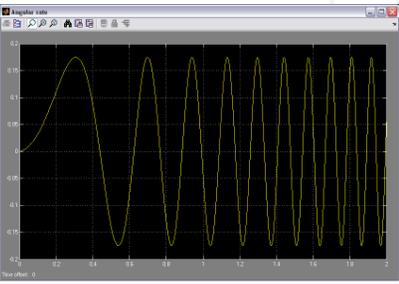
```

1 Clear all;
2
3 f_m0 = 10000; % Mechanical eigenfrequency sense system
4 om0 = 2*pi*f_m0; % Circular eigenfrequency
5 Q = 1000; % Quality factor sense system
6 BW = f_m0/Q; % Bandwidth of the sense system
7
8 dz = BW/2; % Offset drive frequency
9 phase_ang = -pi/4; % Phase angle of drive force
10
11 f_d = f_m0 + dz; % Drive frequency
12 f_c1 = BW*0.5/100; % Start of Coriolis sweep frequency
13 f_c2 = BW; % End of Coriolis sweep frequency
14 % Evice of signal bandwidth
15 ang_rate = 100*(2*pi/360); % Angular rate amplitude
16 drive_amp1 = 10e-6; % Drive mode amplitude
17
18 num_step = 25; % Number of steps per cycle
19 sts = 1/(num_step*f_m0); % Integration time step size
20 t_end = 20 / BW; % End of simulation time
21 f_lim = 2 * BW; % Bandwidth of the low pass filter
22
    
```

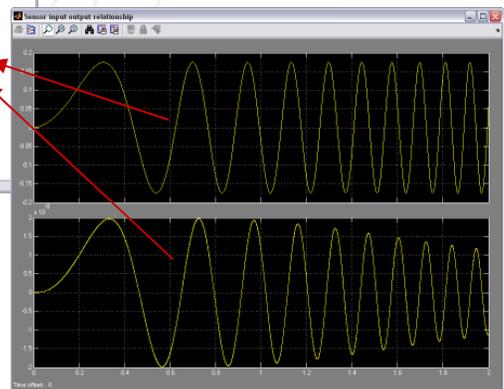
$$|y| = \frac{2 \Omega}{\omega^2} Q |\dot{x}| \quad BW_S = 0,5 \frac{\omega}{2 \pi Q}$$



Drehrate-Signal:



Sensorverhalten:

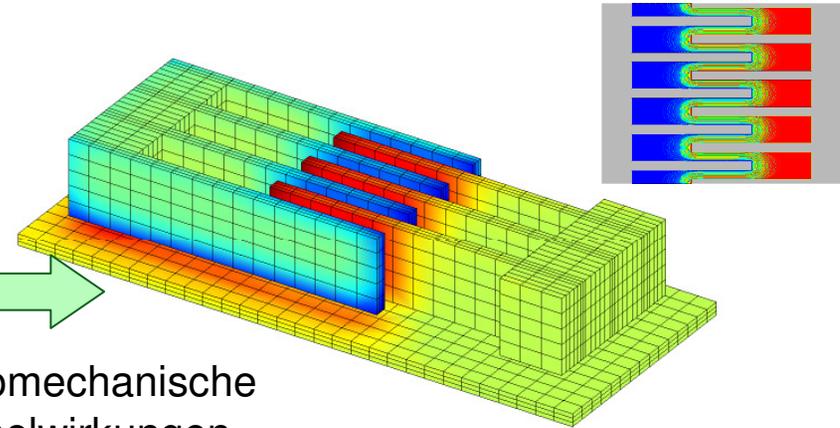
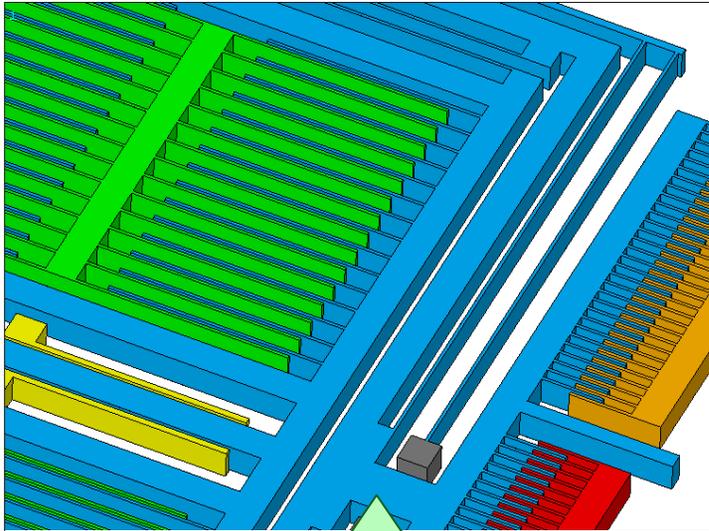


$$\begin{bmatrix} m_x & 0 \\ 0 & m_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_x & d_c \\ d_c & d_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_x & k_c \\ k_c & k_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} +2 m_x \Omega_z \dot{y} \\ -2 m_y \Omega_z \dot{x} \end{bmatrix}$$

0 Hz 50 Hz

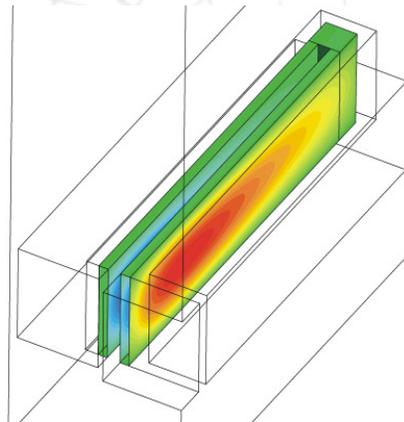
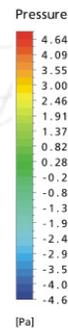
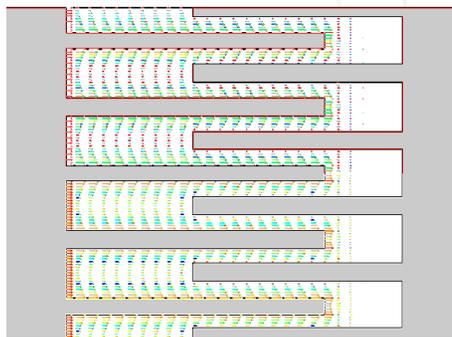


Komponentenentwurf: Finite Elemente Modellierung



Elektromechanische Wechselwirkungen

Fluidmechanische Wechselwirkungen



Stand der Technik (FEM):

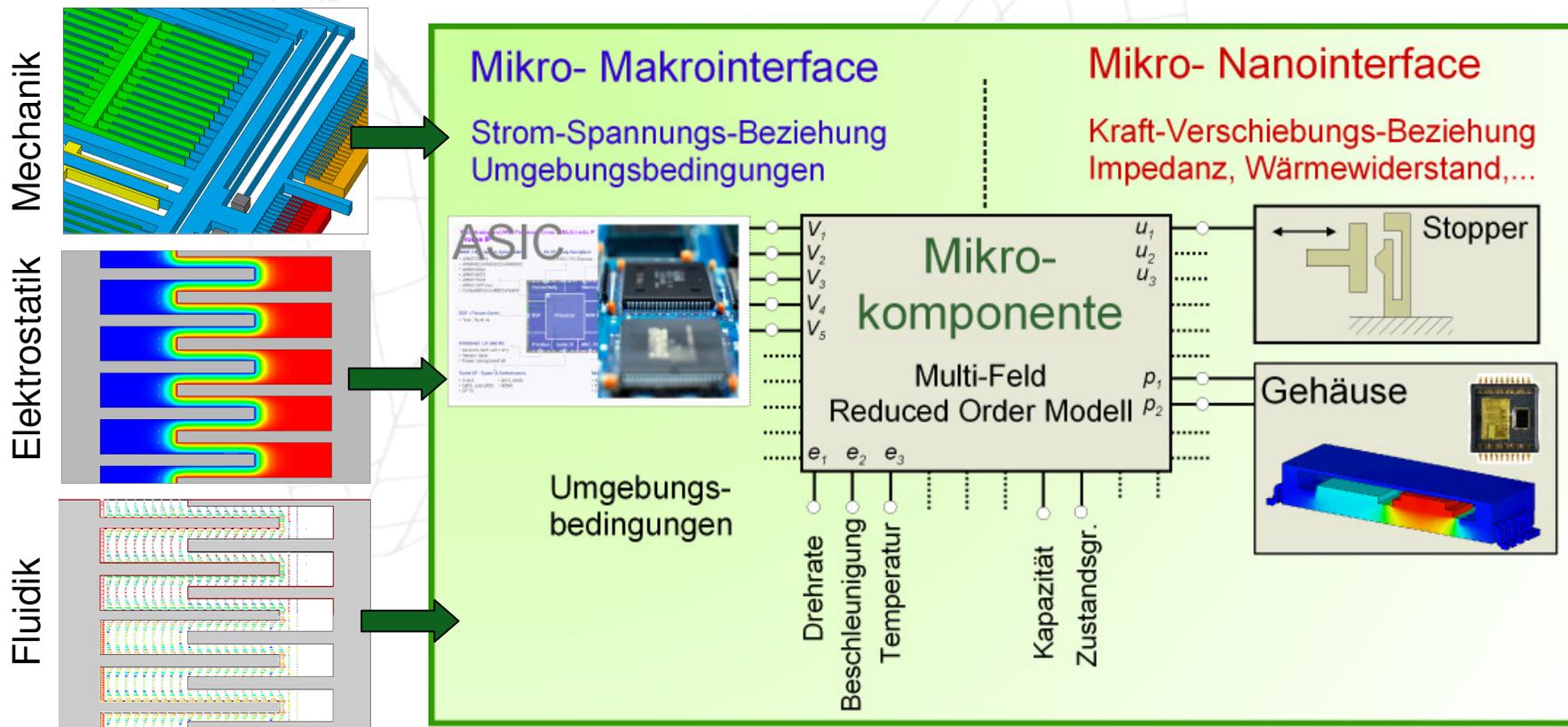
Genauere Ermittlung charakteristischer Systemkennwerte (Eigenfrequenzen, Kapazitäten, Dämpfung) ist möglich

Probleme:

- Exakte Modellierung sehr aufwändig
- Feldkopplungen eingeschränkt
- Zeitintensive Berechnungsverfahren
- Keine Kopplung mit Elektronik/Regler

Komponenten- und Systemsimulation durch Makromodelle

The ultimate goal of design is to capture correct dynamical behavior in a compact model that can be readily inserted into a system simulator, and to do so in an automated and computationally efficient manner as possible.



Ordnungsreduktion – Methode der Modalen Superposition

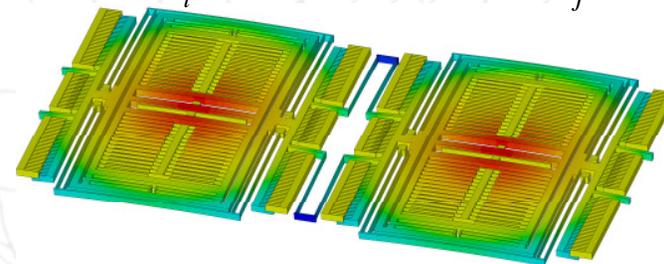
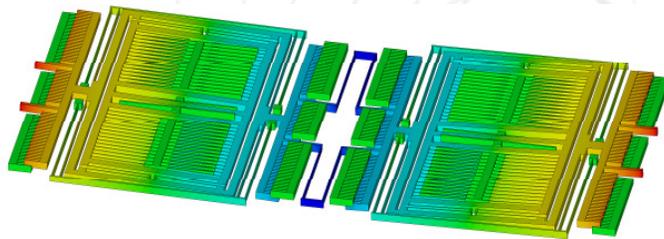
Originalsystem:

$$\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & \cdots & M_{1n} \\ M_{21} & M_{22} & \cdots & M_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{n1} & M_{n2} & \cdots & M_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \\ \vdots \\ \ddot{u}_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & \cdots & D_{1n} \\ D_{21} & D_{22} & \cdots & D_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ D_{n1} & D_{n2} & \cdots & D_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \\ \vdots \\ \dot{u}_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \cdots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \cdots & K_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{n1} & K_{n2} & \cdots & K_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_n \end{bmatrix}$$

Modale Verhaltensbeschreibung:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \\ \vdots \\ \ddot{q}_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2\xi_1\omega_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 2\xi_2\omega_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 2\xi_m\omega_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \vdots \\ \dot{q}_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_1^2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \omega_2^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \omega_m^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_m \end{bmatrix}$$

Transformation der Kräfte und Verschiebungen: $f_j = \sum_i \phi_i^{(j)} F_i$ $u_i = \sum_j \phi_i^{(j)} q_j$



i... Knoten
j... Mode

Die Modale Superposition repräsentiert sowohl die Starrkörperbewegungen als auch die Deformationen der Formelemente (Verwölbung) mit hoher Genauigkeit.

Ordnungsreduktion – Kapazitiv gekoppelte Systeme

Erstellung der mechanischen Bewegungsgleichung:

$$\ddot{q}_i + 2 \xi_i \omega_i \dot{q}_i + \omega_i^2 q_i = \sum_r \frac{\partial C_{ij}}{2 \partial q_i} (V_i - V_j)^2 + f_i S_i$$

Elektrostatische
Kräfte

Eine Gleichung
pro Eigenvektor

Strom-Spannungs-Beziehung:

$$I_i = \frac{\partial Q_i}{\partial t} = \sum_r \left(\frac{\partial C_{ij}}{\partial t} (V_i - V_j) + C_{ij} \left(\frac{\partial V_i}{\partial t} - \frac{\partial V_j}{\partial t} \right) \right) \quad \frac{\partial C_{ij}}{\partial t} = \sum_k \frac{\partial C_{ij}}{\partial q_k} \dot{q}_k$$

Bewegungsinduzierter
Stromanteil

Strom durch
Spannungsänderung

Eine Gleichung
pro Elektrode

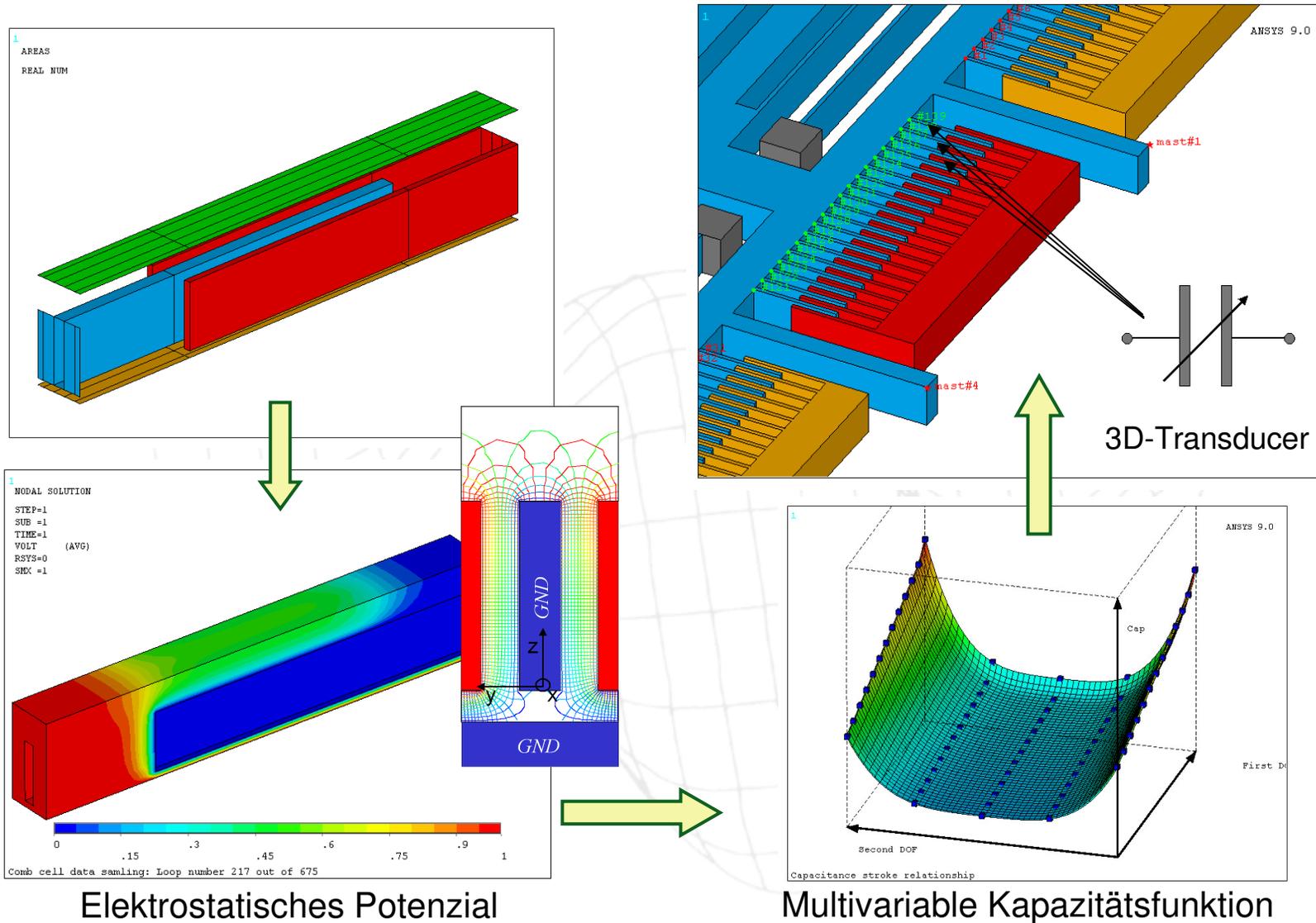
Berechnung der wirklichen Verschiebungen (Rücktransformation):

$$u(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^m q_i(t) \varphi_i(x, y, z)$$

Amplituden der Eigenmoden Eigenvektoren

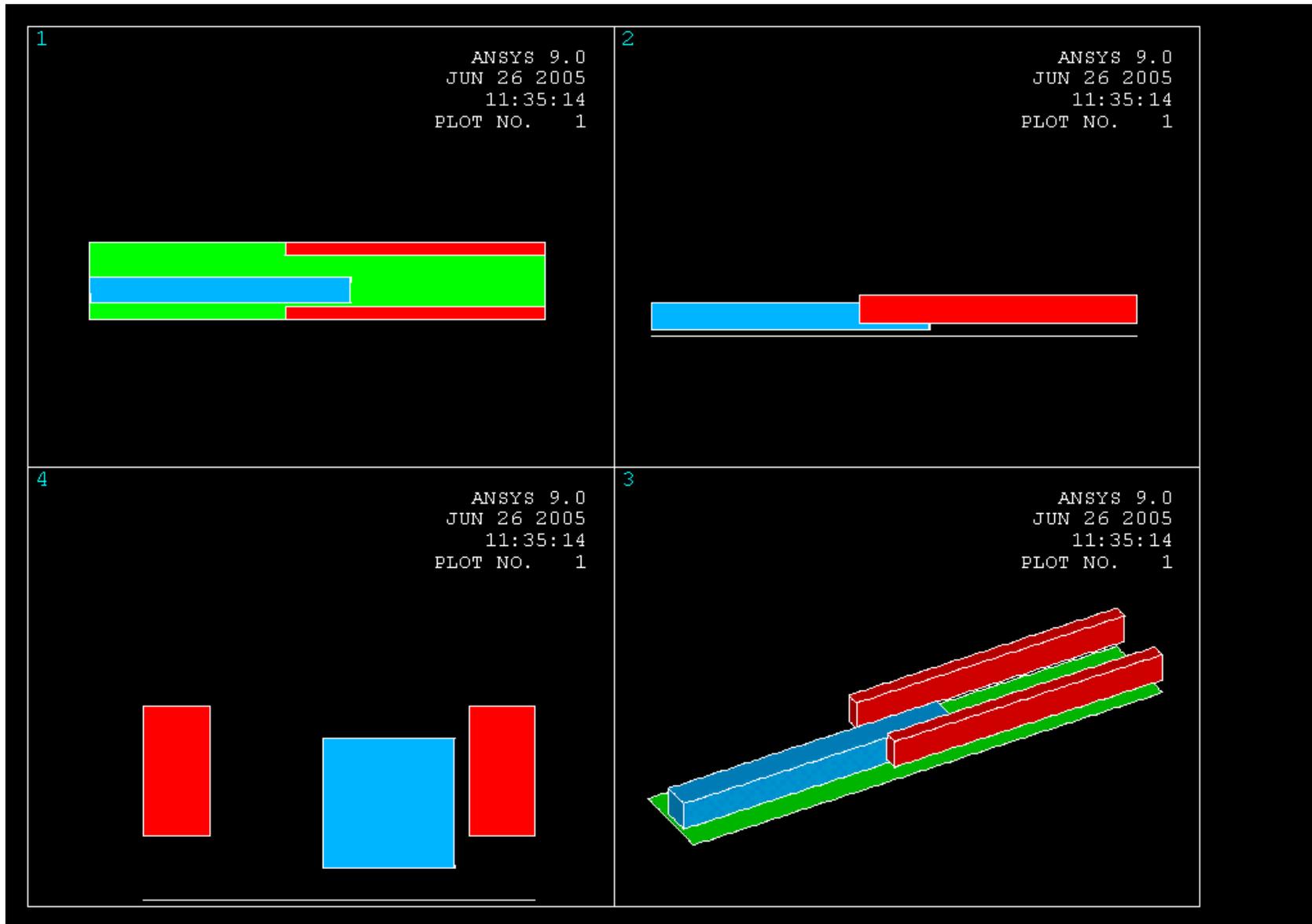


Ordnungsreduktion – Ermitteln der Kapazitätsfunktionen

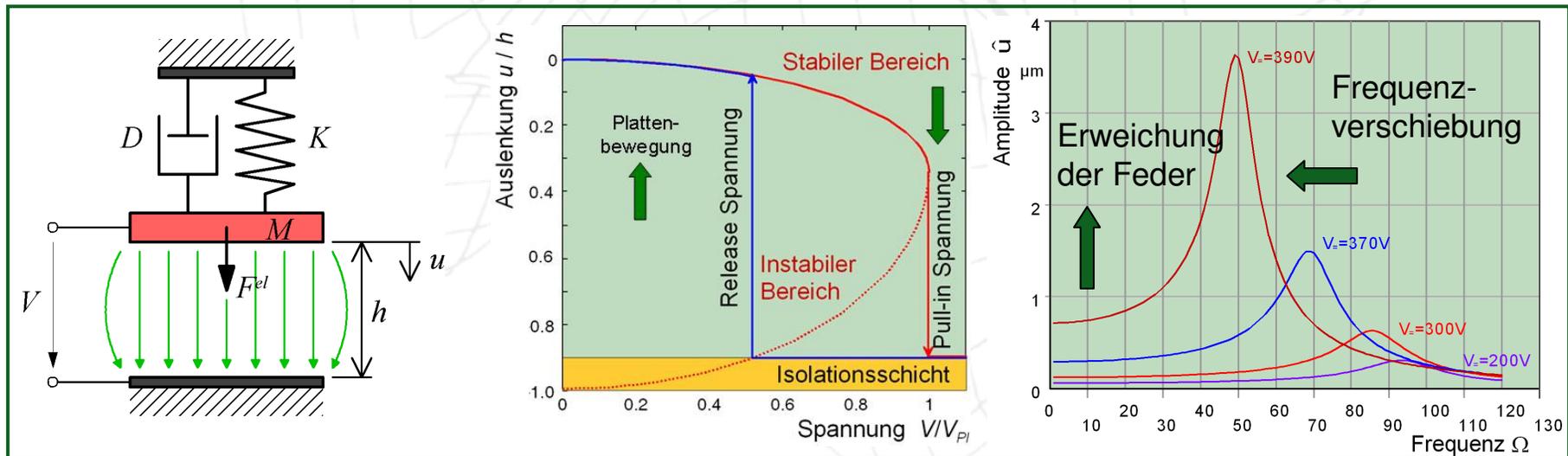
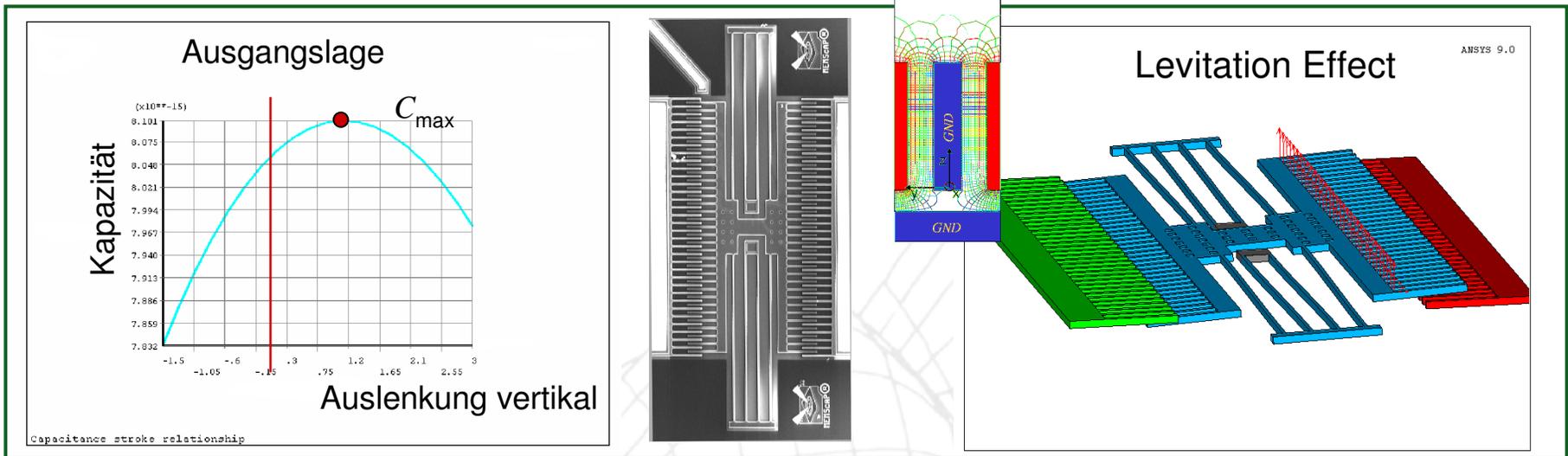


Elektrostatishes Potenzial

Multivariable Kapazitatsfunktion



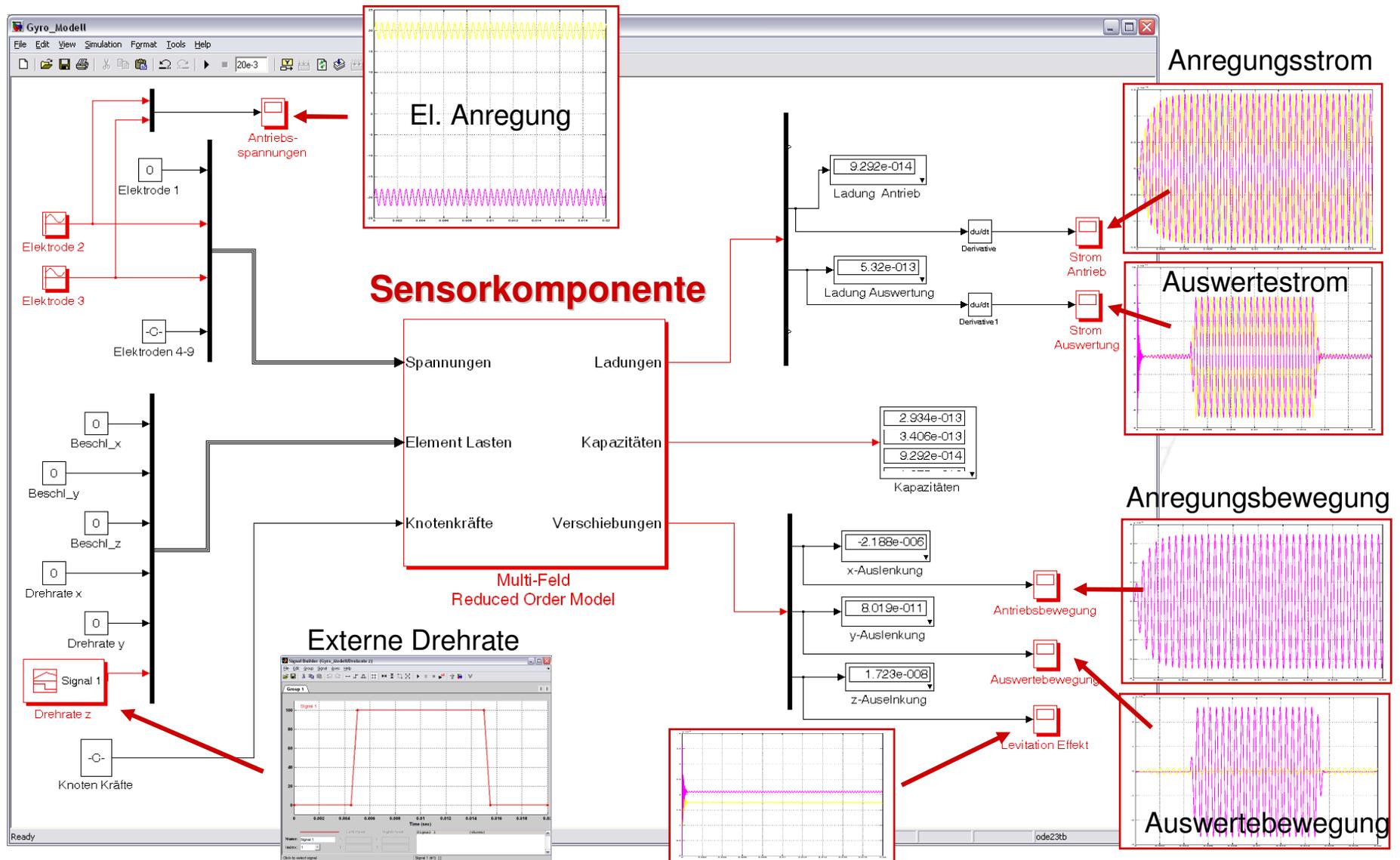
Ordnungsreduktion – Ermitteln der Kapazitätsfunktionen



Kapazitätsfunktionen müssen bis zur zweiten Ableitung stetig differenzierbar sein.

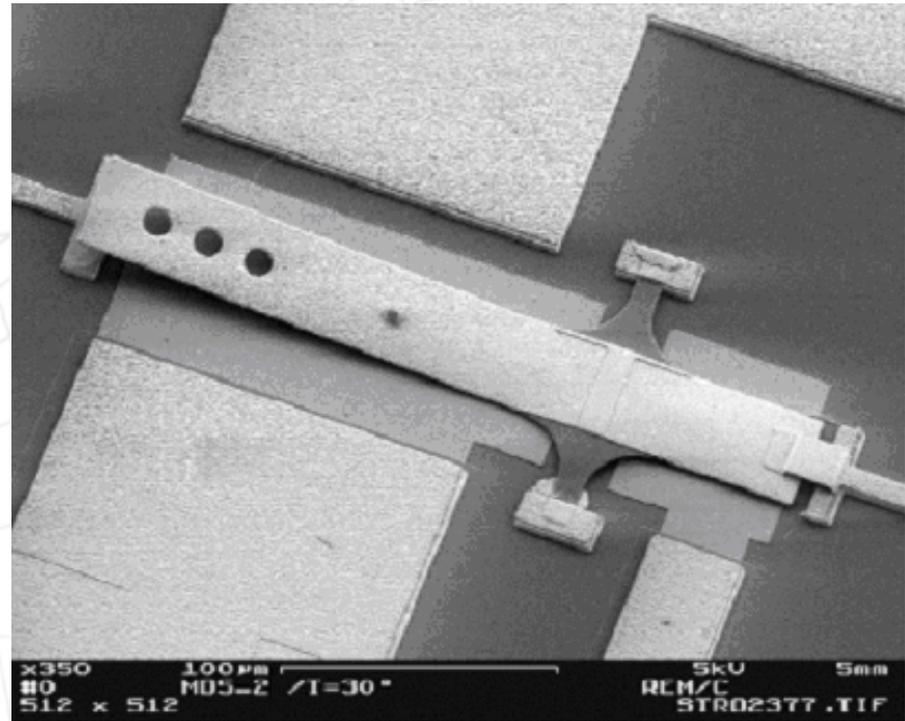
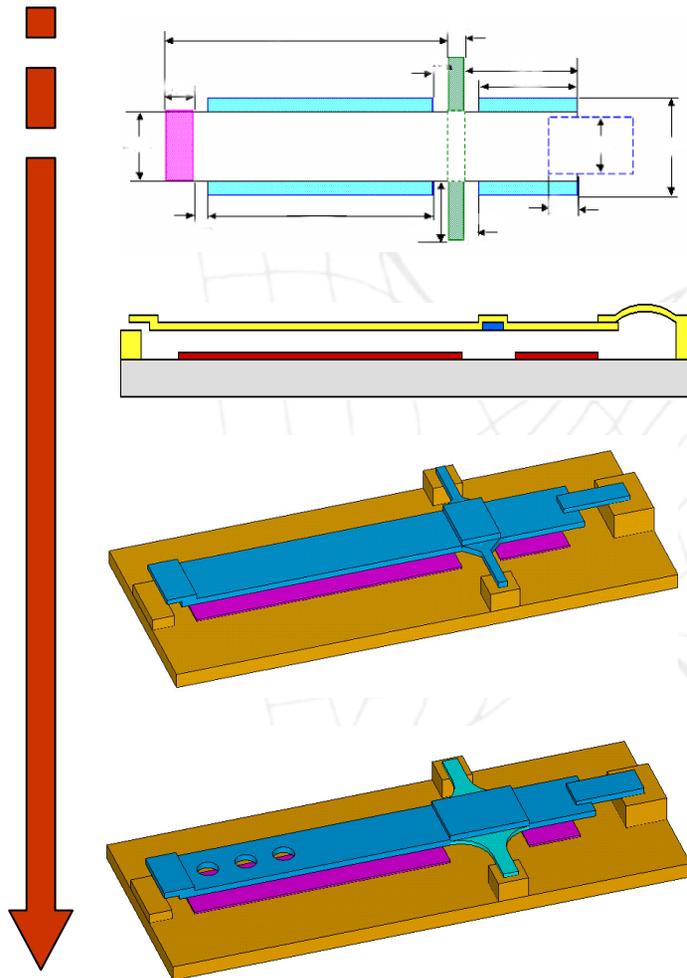


Automatisch reduzierte Makromodelle in Matlab/Simulink



Ordnungsreduktion eines RF-MEMS Schalters

Ergebnisse einzelner Optimierungszyklen:

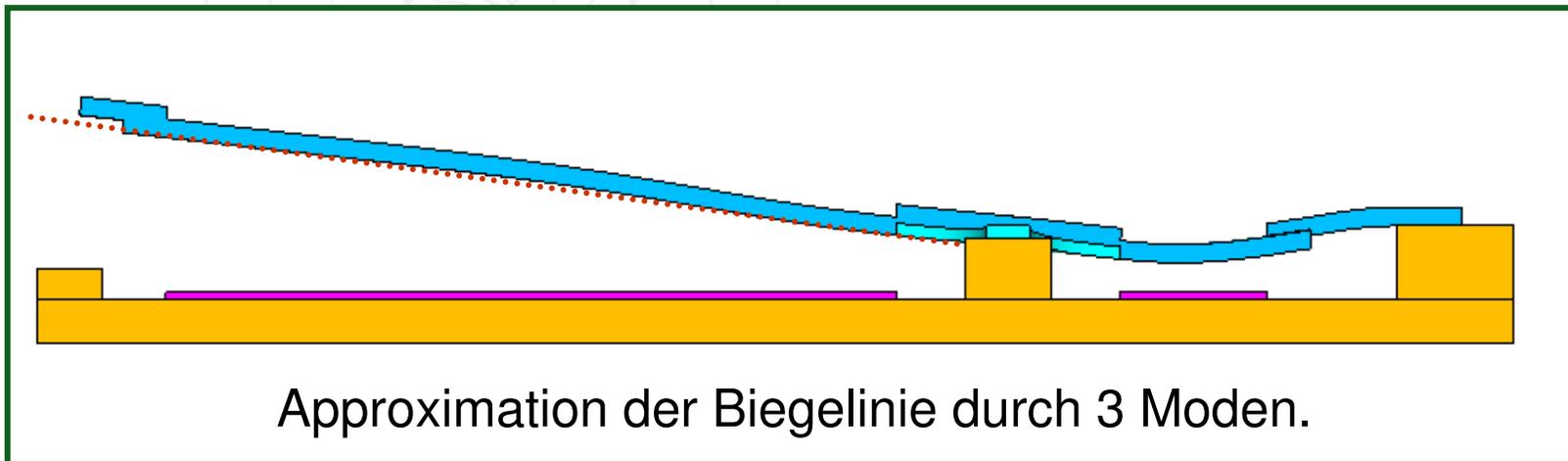
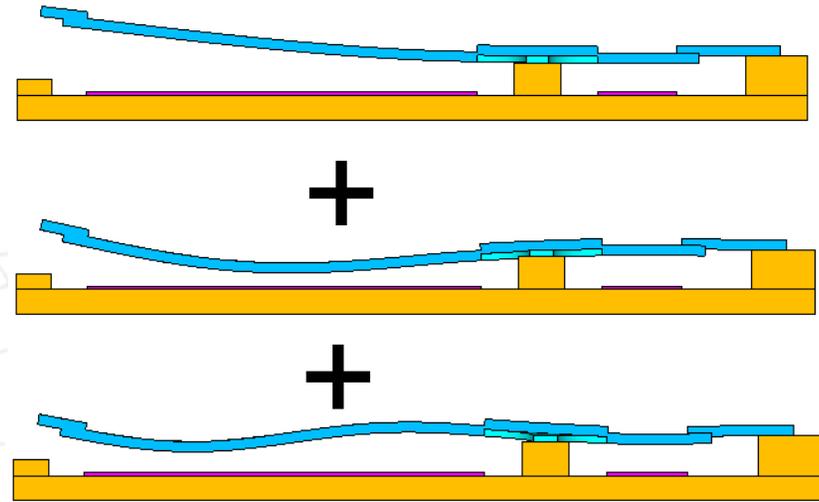


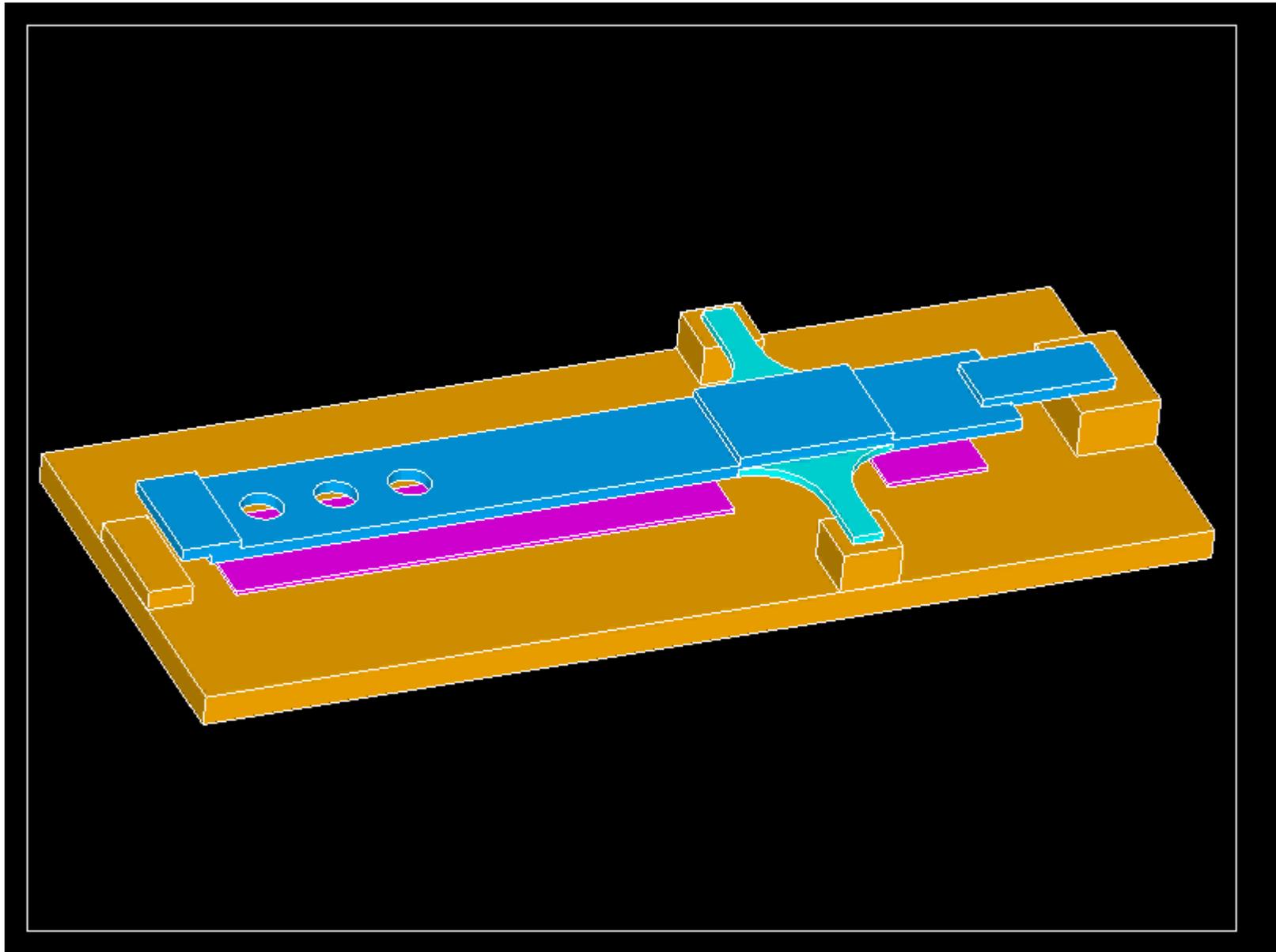
By courtesy of Daimler/Chrysler Research Center Ulm

B. Schauwecker, K. Strohm, W. Simon, J. Mehner, J.-F. Luy:
"A new type of high bandwidth RF MEMS switch - Toggle
Switch", Journal of Semiconductor Technology and Science,
Special Issue on MEMS, Vol. 2, No. 4, pp. 237 - 245;
December 2002

Ordnungsreduktion eines RF-MEMS Schalters

Wie genau kann das Bewegungsverhalten durch die Modale Superposition abgebildet werden?



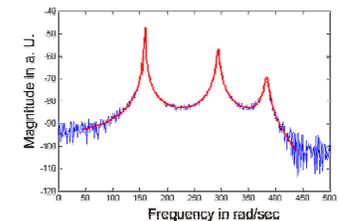
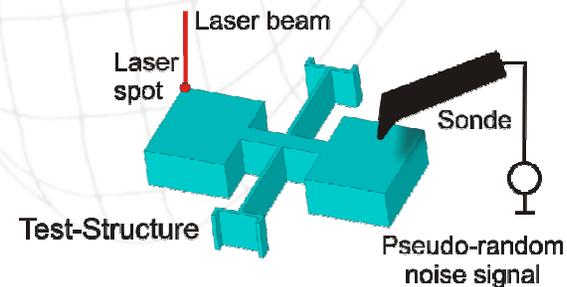
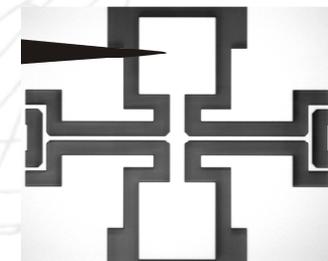
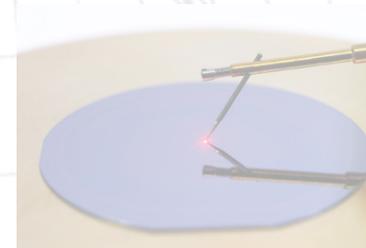
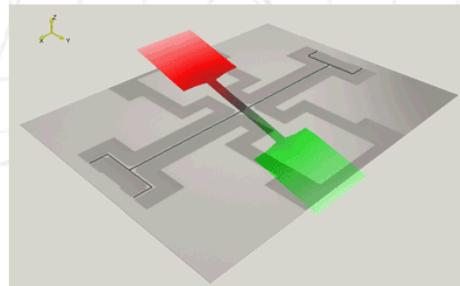
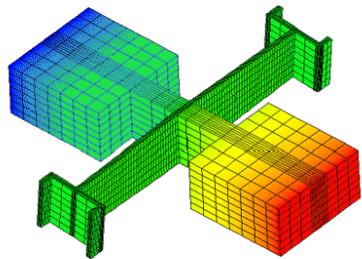


Experimentelle Validierung der Simulationsergebnisse

MSA 500 Micro System Analyzer:



3D-Bewegungsanalyse:



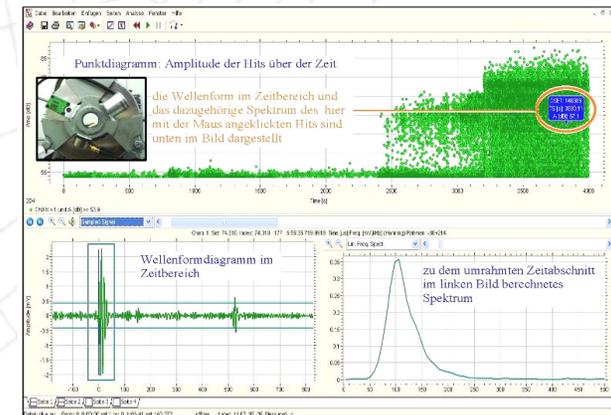
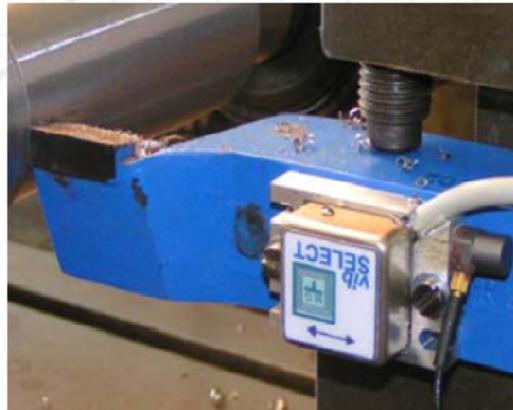
Studieren an der Technischen Universität Chemnitz

Bachelor:

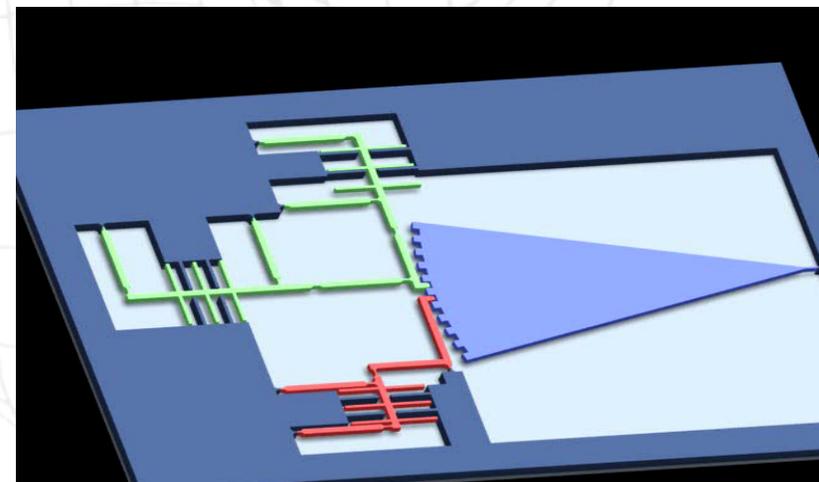
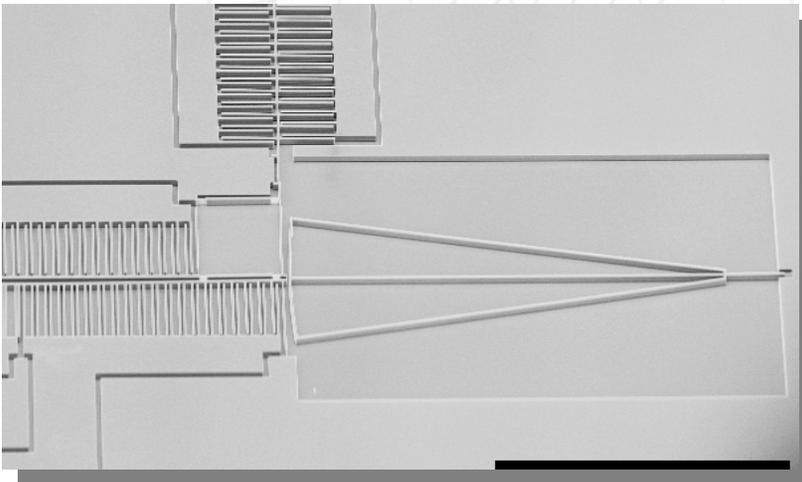
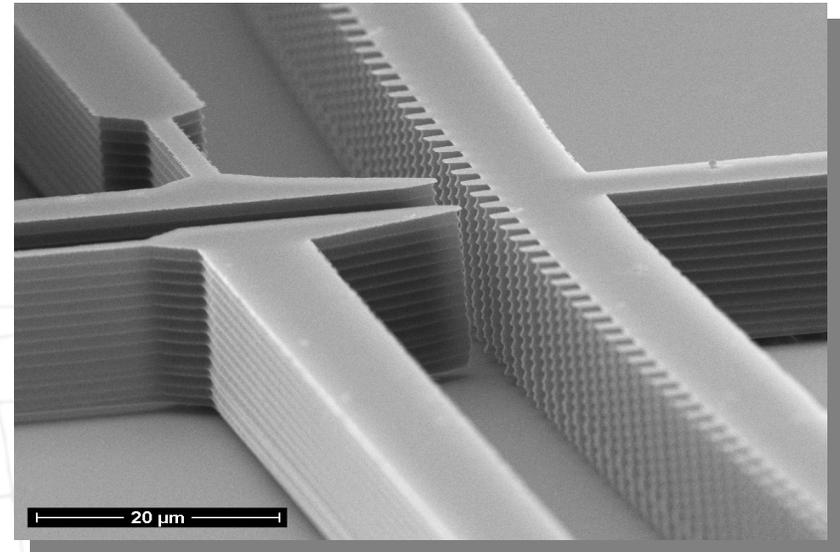
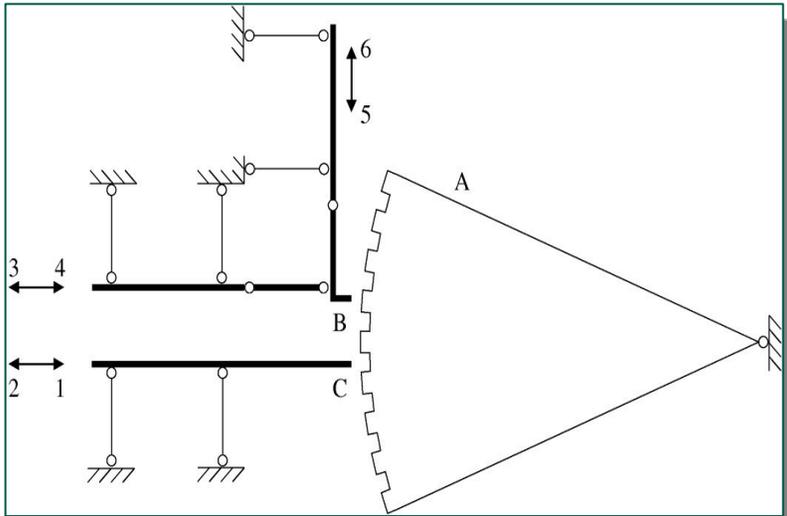
- Elektrotechnik (4 Berufsfelder im 5. und 6. Semester)
- Informations- und Kommunikationstechnik
- Mikrotechnik/Mechatronik (mit Maschinenbau)
- Wirtschaftsingenieur Elektrotechnik (mit Wirtschaftswissenschaften)

Master:

- Mikrosysteme und Mikroelektronik (zwei Berufsfelder ab 2. Semester)
- Micro and Nano Systems (englischer Studiengang)
- Energie- und Automatisierungstechnik
- Informations- und Kommunikationstechnik



Wirkprinzipien der Feingerätetechnik in Mikrosystemen



schrittwerk_ani.mpg



