

# Mikrosensoren und direkt gekoppelte Sensor-Aktor-Systeme in der Medizintechnik



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

Roland Werthschützky



**Leibniz-Konferenz 2014**  
Lichtenwalde, 16.10.2014

- A) Forschungsprofil des FG Mess- und Sensortechnik an der TU Darmstadt
  - A1) Institut EMK an der TU Darmstadt
  - A2) Kompetenzfelder des FG Mess- und Sensortechnik (MuST)
  - A3) MuST-Kompetenzgruppen
- B) Mikrosensoren in der Medizin
  - B1) Nichtelektrische Messtechnik in der Medizin
  - B2) „Eigener“ Einstieg in die Medizintechnik
  - B3) MuST-Entwicklungen von Mikrosensoren
- C) Direkt gekoppelte Sensor-Aktor-Systeme in der Medizin – Haptische Systeme
- D) Fazit + Ausblick

# A) Forschung am FG Mess- und Sensortechnik

## A1) Fachgebiete des Instituts EMK \*)

Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

### Lichttechnik



**Prof. Khanh**

**ab 2006**

### Mikrotechnologie & MEMS – M&MEMS



**Prof. Schlaak**

**ab 1999**

### Mess- und Sensor- technik - MuST



**Prof. Werthschützky**

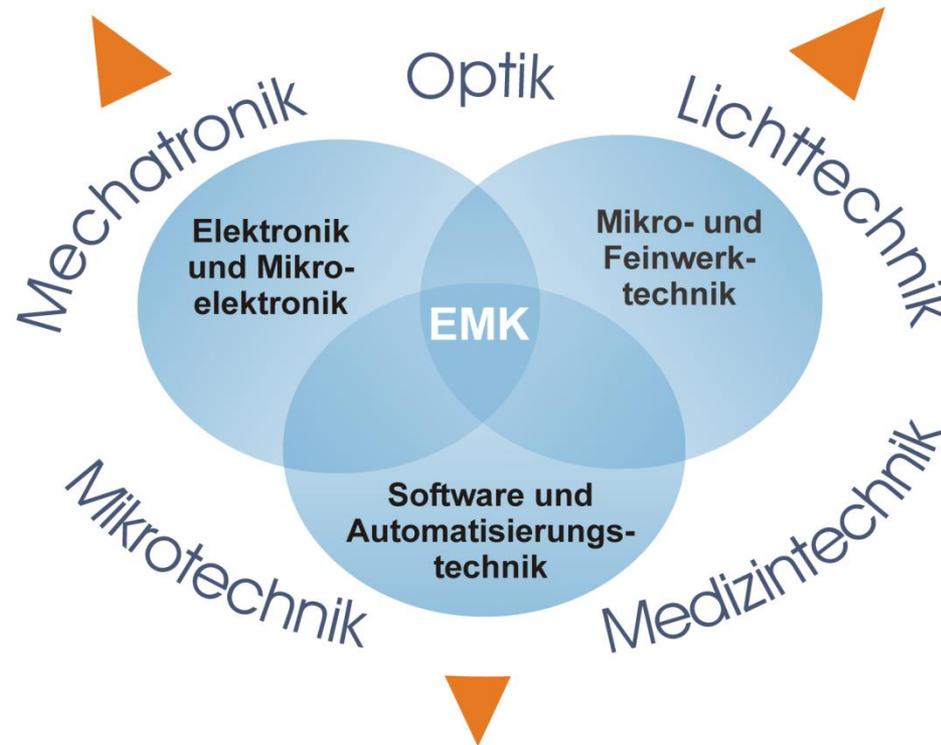
**ab 1995**

\*) EMK: Institut für Elektromechanische Konstruktionen

## Mechatronische Systeme in der Mikro- und Feinwerktechnik

**Sensoren** FG: MuST

**Aktoren** FG: MEMS



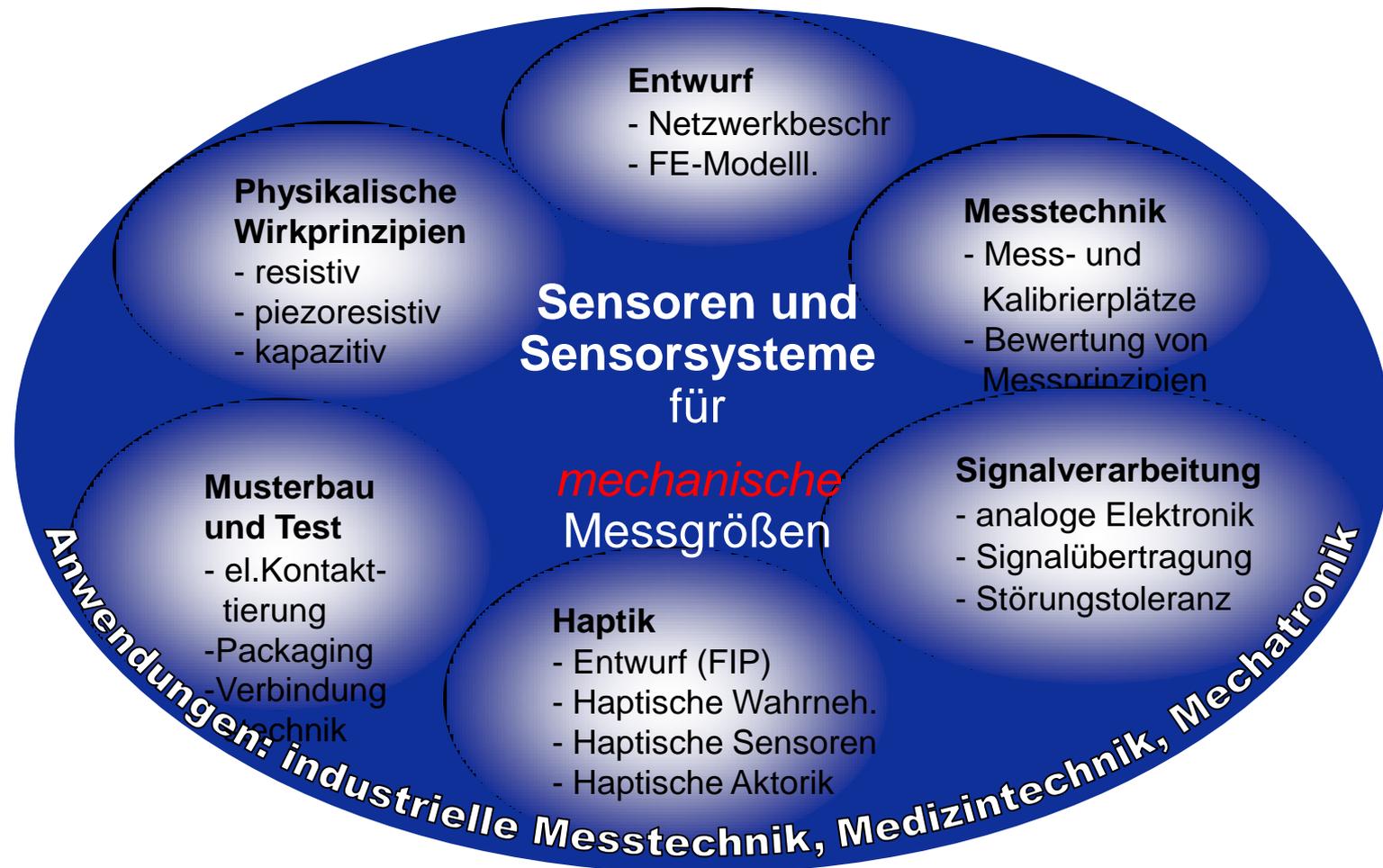
**Sensor-Aktor-Systeme** MuST & MEMS

# A2) Kompetenzfelder des FG Mess- und Sensortechnik (MuST)

Prof. Roland Werthschützky



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



## A3) MuST-Kompetenzgruppen

### **Mikrosensoren:**

*Dr. Thorsten Meiß → Dipl.-Ing. Jan Lotichius*

- piezoresistive Silizium-Dehnungs-, Kraft- und Drucksensoren  
→ *Forschungskooperation mit CiS-Erfurt*
- AVT, elektrische Kontaktierung, Packaging
- integrierte Sensorsignalverarbeitung (Primärelektronik)
- drahtlose Signal- und Energieübertragung (RFID)

### **Haptische Systeme:**

*Dr.-Ing. Christian Hatzfeld*

- direkt gekoppeltes Sensor-Aktor-System
- Analyse der haptischen Wahrnehmung
- Ableitung von Entwurfsgrundlagen für haptische Systeme
- Entwurf und Realisierung medizinischer Assistenz- und Telemanipulationssysteme

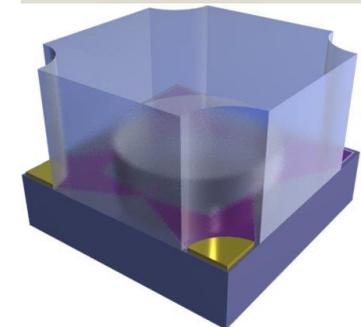
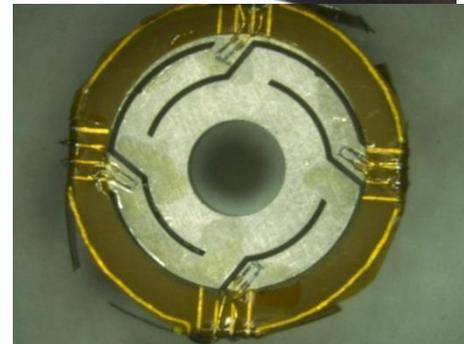
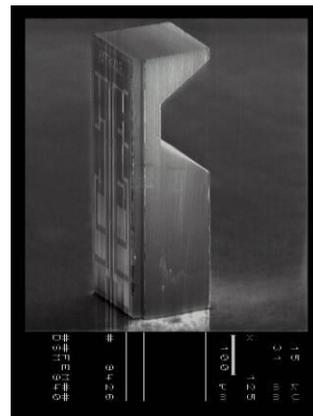
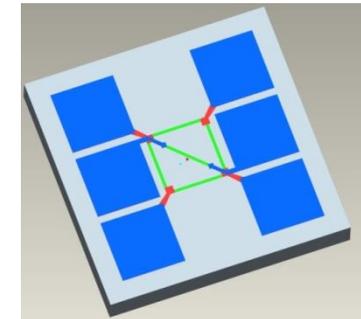
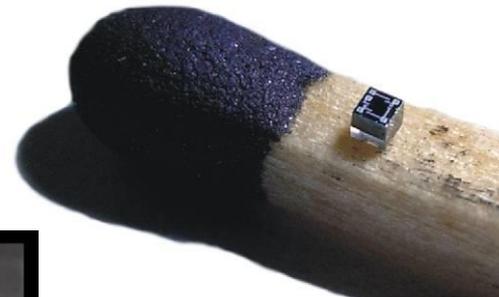
## B) Mikrosensoren in der Medizin

### Silizium-Primärsensoren:

- Piezoresistives Wirkprinzip
- Mikro-Kraftsensoren
- Miniaturisierte Drucksensoren
- Silizium-Dehnmesselemente

### Anwendungen:

- Automatisierungstechnik
- **Medizintechnik**



## Nichtelektrische Messgrößen in der Medizin

### Druck

- Blutdruck
- Zungendruck
- Hirndruck
- Augendruck

### Schall

- Cochlea-Implant
- Herzklappenfunktion
- Blut-Durchfluss
- Bildgebung

### Kraft/Drehmoment

- Orthesen/Prothesen
- Zahnspangen
- OP-Werkzeuge
- Chirurgie-Roboter

### Durchfluss

- Blutdurchfluss
- Ein- und Ausatmungsvolumen

### Temperatur

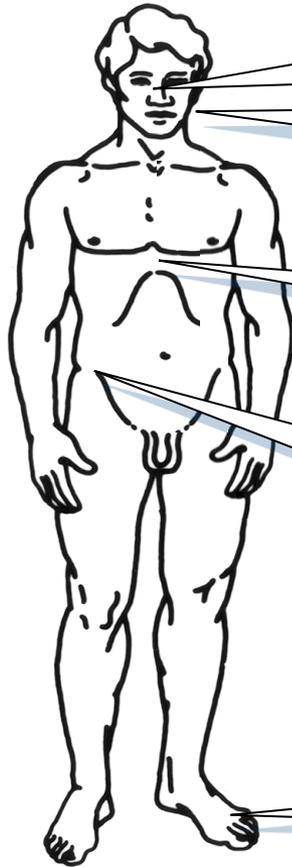
- Körpertemperatur
- Anemometry
- Verdünnung

### Konzentration

- Blut-Sauerstoffaufn.
- Blut-Glukosekonz.
- Krebs-Indikatoren
- Antikörper-Konz.

blau: Messgrößen mit eigenen Forschungsarbeiten

# Messung **mechanischer** Größen im und am menschlichen Körper



## In natürlich Öffnungen

3. Augendruck
4. Zungendruck
5. Bisskraft

## Ständig im Körper

6. Pulmonalarterie-Drucksensor

## Zeitweise im Körper

7. Kraftsensoren für MIC-Instrumente
8. Druck- und Kraftsensoren für Katheter

## Am Körper

1. Bewegungssensoren
2. Fußkraftsensoren

# B2) „Eigener“ Einstieg in die Medizintechnik

## Piezoresistiver Silizium-Blutdruckwandler

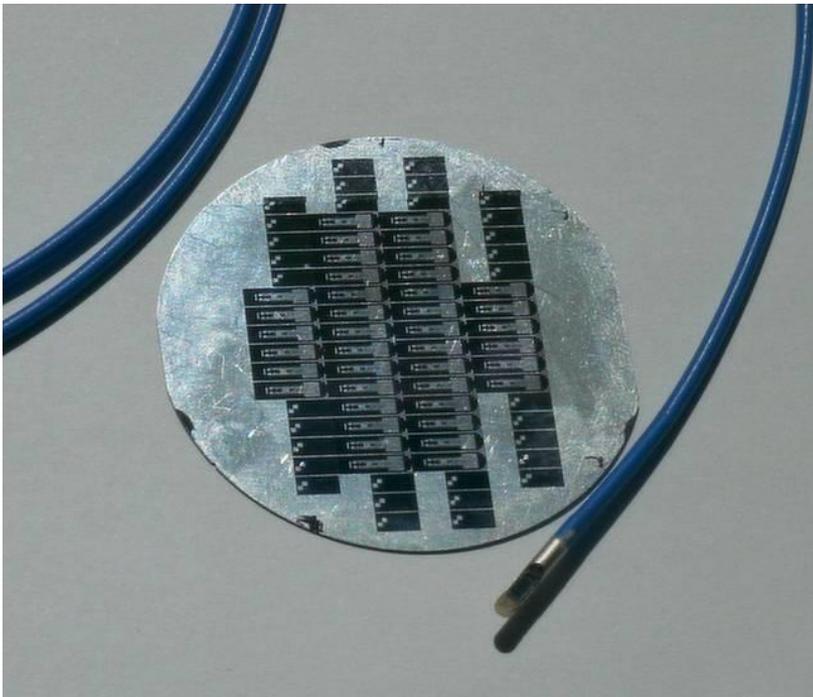
TU Dresden (1972 – 1981): Grundlagen: A.Lenk, B.Irrgang,

Medizinischer Minatordruckwandler (1978):

Druckmessung rechte Herzseite, venös

→ ab 1984 Messgerätekwerk Zwönitz

→ heute “Raumedic” (REHAU)



G.Pfeifer, R. Werthschützky: **Drucksensoren**,  
6.3 Drucksensoren in der Medizin, S. 255 – 265  
Verlag Technik, Berlin 1989

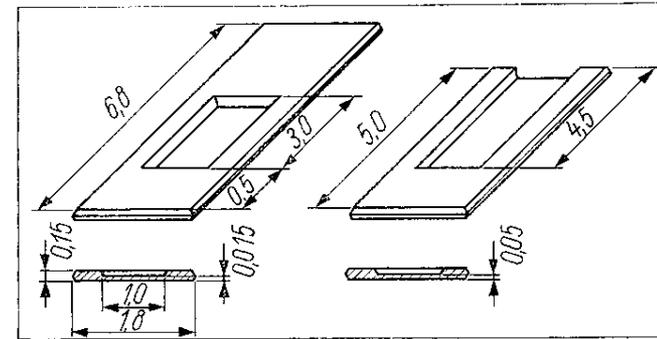
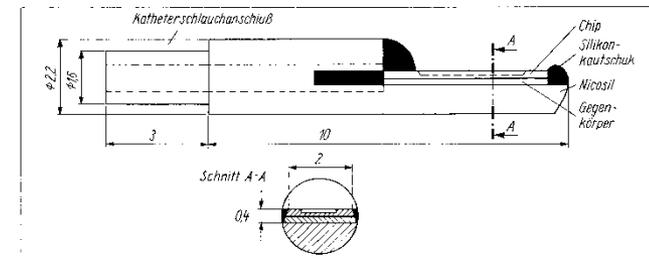


Bild 1 Wandlerchip und Gegenkörper



R. Werthschützky: Piezoresistive  
Miniaturdruckaufnehmer für Anwendungen  
in der Medizin. Feingerätetechnik 28  
(1979) 5, 202.

# B3) Entwicklung von Mikrosensoren am FG MuST

## B31) Sensorsystem zur Zungendruck-Messung

DFG Projekt (2007- ...):

I. Stöhr



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



### Ziele:

- Erfassung des Druckprofils der Zunge am Gaumen
- Korrektur von Zungenfehlstellungen
- Gezielte Behandlung von Sprachstörungen

1. Variante: 4 Drucksensoren mit Funkübertragung und Batterie



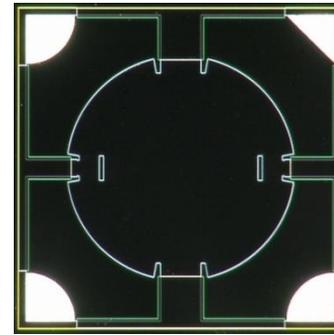
Zahnspange mit 4 Silizium-Sensoren für die Zungendruckmessung (2008)

# Zungendruck-Messung

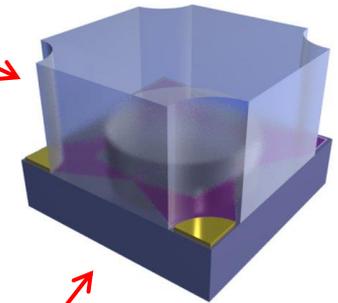
## 2. Variante: Absolutdrucksensor für FlipChip-Montage

- Si-Wafer vom CiS strukturiert
  - Abmessungen:  $(0,5 \times 0,5) \text{ mm}^2$
- Glaswafer
  - Bearbeitung mit Excimer-Laser
  - Durchgangslöcher  $470 \text{ }\mu\text{m}$
  - Anodisches Bonden
- Aktuelle Arbeiten
  - Messtechnische Charakterisierung
  - 2. Durchlauf am CiS

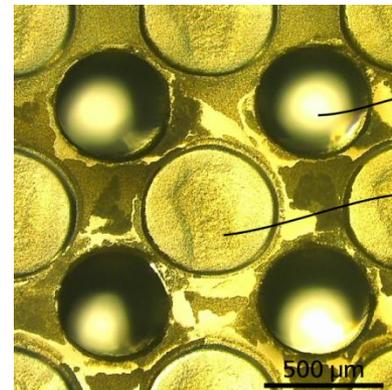
Si-Messelement



$0,5 \times 0,5 \text{ mm}$



Borosilikat-Glas



Durchgangslöcher

Sackloch für Kavität

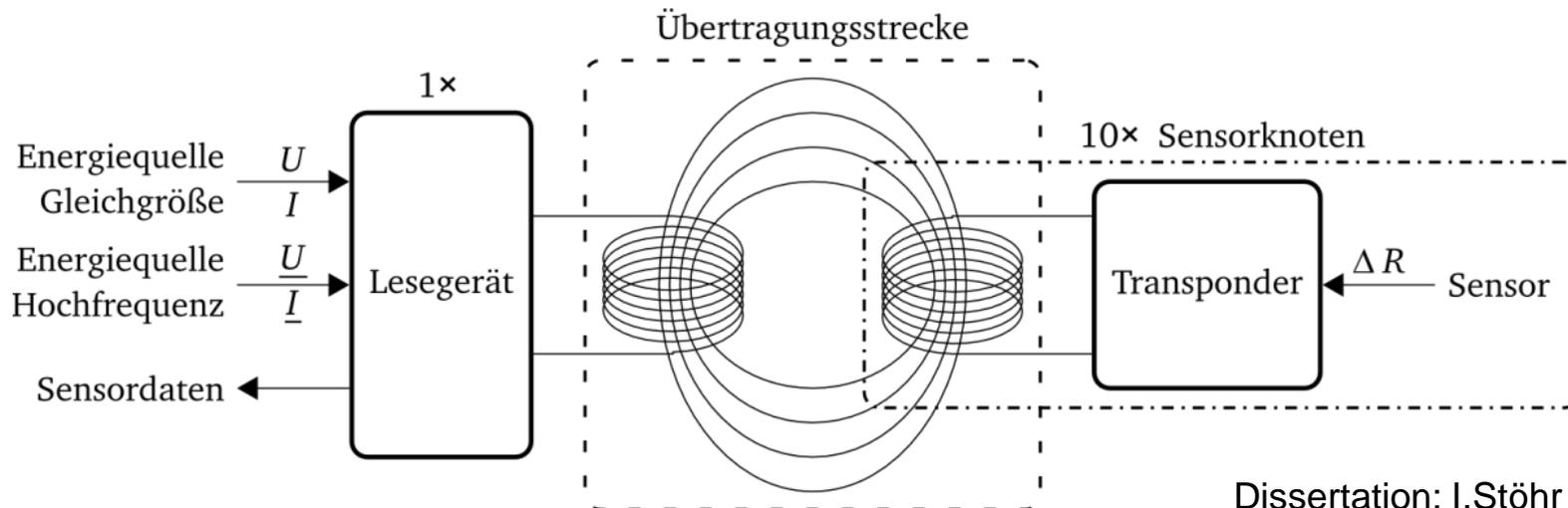
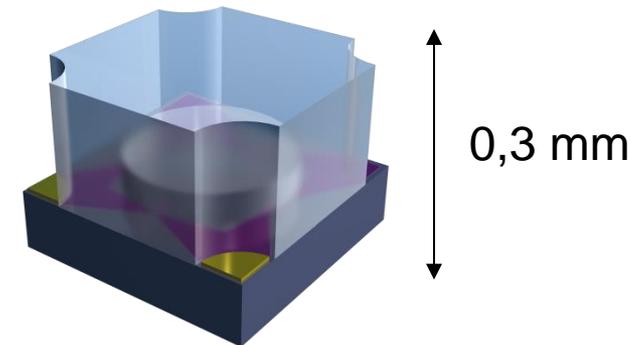
500  $\mu\text{m}$

# Zungendruck-Messsystem

Aktuelles Muster mit induktiver Energie- und Signalübertragung

## Signalübertragung:

- Mehrere drahtlose Sensorknoten
- Induktive Übertragungsstrecke für Energie und Daten
- Integration besonders flacher, piezoresistiver Drucksensoren



# B32) Silizium-Mikrokraftsensoren für Führungsdrähte

DFG Projekt (2007- ....): Dissertation T.Meiß

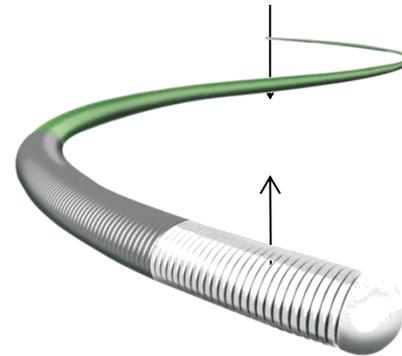
## Katheter



**D = 2.3 mm**  
**L = 1.0 m**

[www.endoprotec.com](http://www.endoprotec.com)

## Führungsdrähte



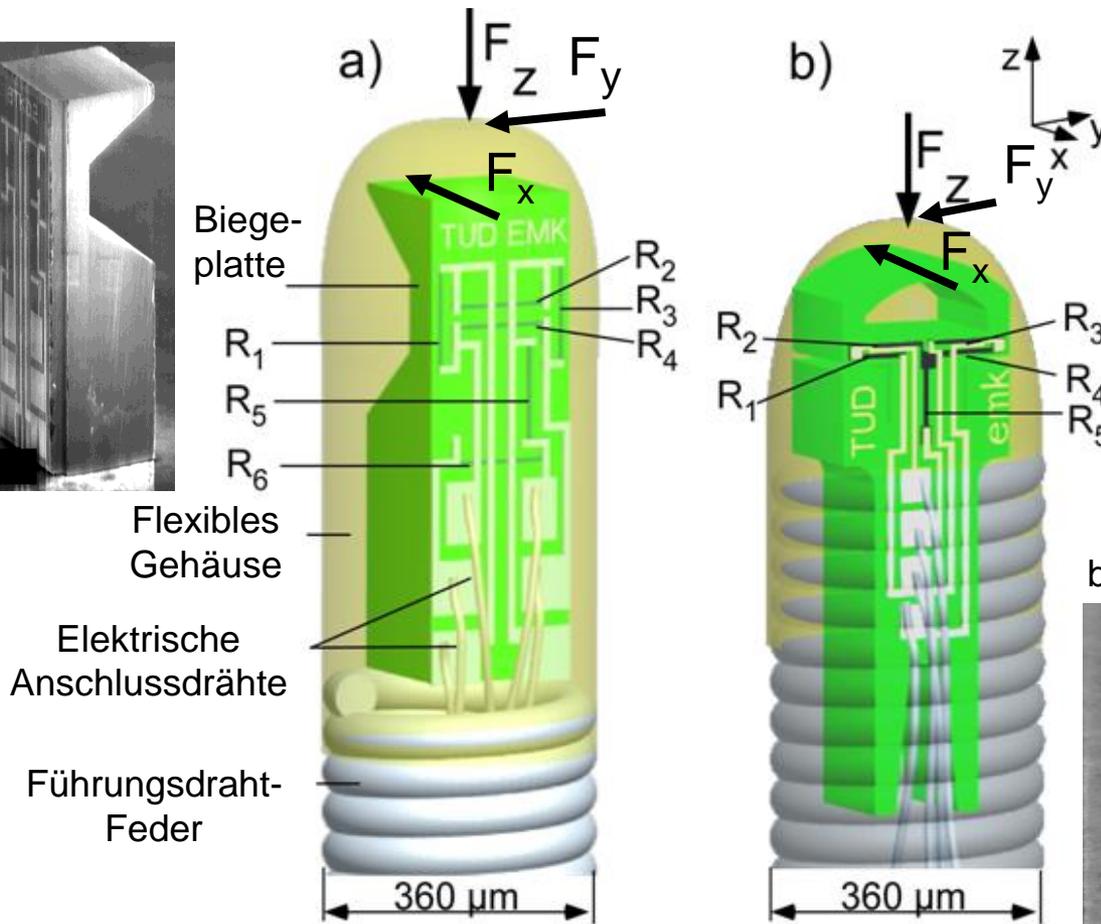
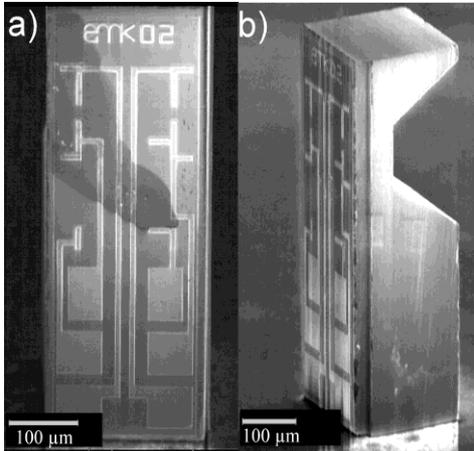
**D = 0.36 mm**  
**L = 1,8 m**

[www.scitechmed.com](http://www.scitechmed.com)

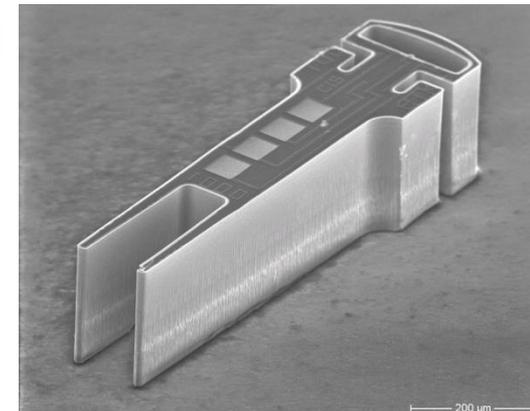
# Silizium-Mikrokraftsensor

## 2 Varianten

a) EMK 01

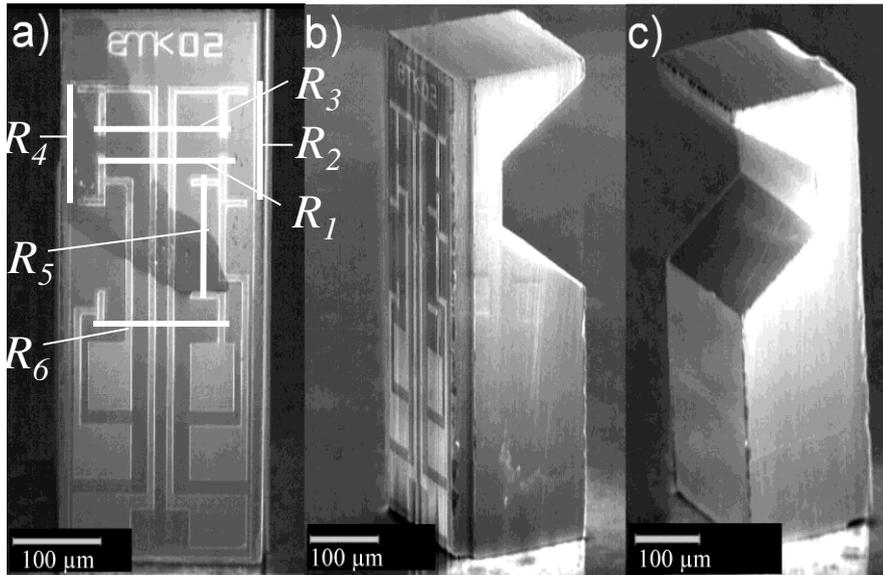


b) EMK 02



# Silizium-Mikrokraftsensor-EMK 01

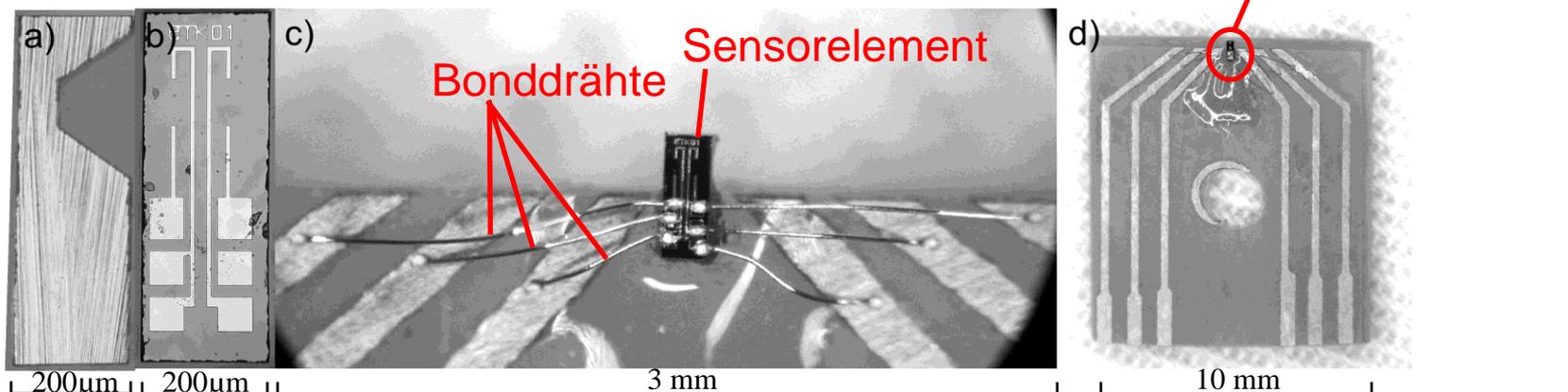
## Asymmetrische Elemente



### Herstellung:

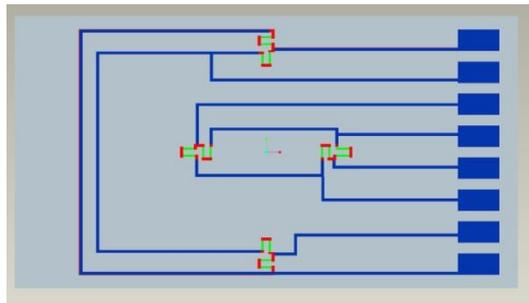
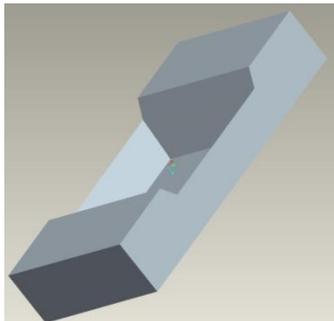
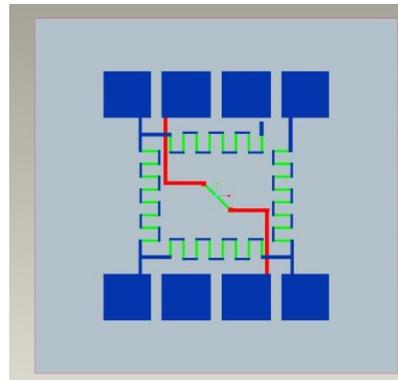
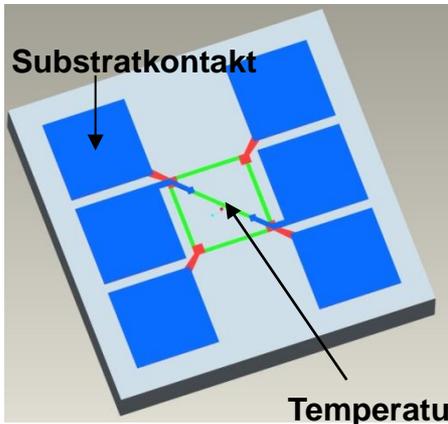
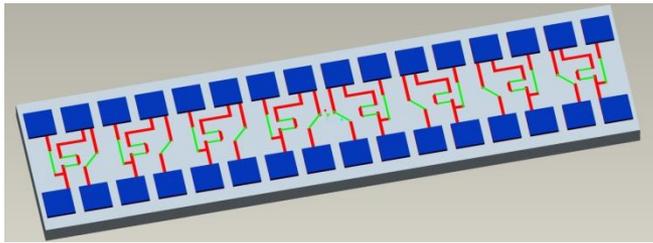
- Dotieren von Piezowiderständen
- Strukturierung von Leiterbahnen
- Anisotropes Nassätzen (KOH)
- Vereinzeln der Sensorelemente

→ *Präparation am CiS*



# B33) Piezoresistive Dehnmesselemente für MIC-Instrumente

Vier Grundvarianten, BMBF-Projekt(2007-2012) : Dissertation J.Rausch



- 68  $\mu\text{m}$  dicke Si-Elemente
- Grundwiderstand:  
 $R_0 \approx 9,9 \text{ k}\Omega$  bzw.  $R_0 \approx 2,9 \text{ k}\Omega$
- Kantenlänge
  - quadratisch: 0,5 mm bzw. 1 mm
  - rechteckig: 2 mm x 0,5 mm
  - mit abgedünnter Rückseite: 1 mm x 2 mm
- Applizierung – Kleben 2-K-Epoxid
- Kontaktierung:
  - Drahtbonden oder Kleben (anisotrop leitfähiger Kleber)

## Legende:

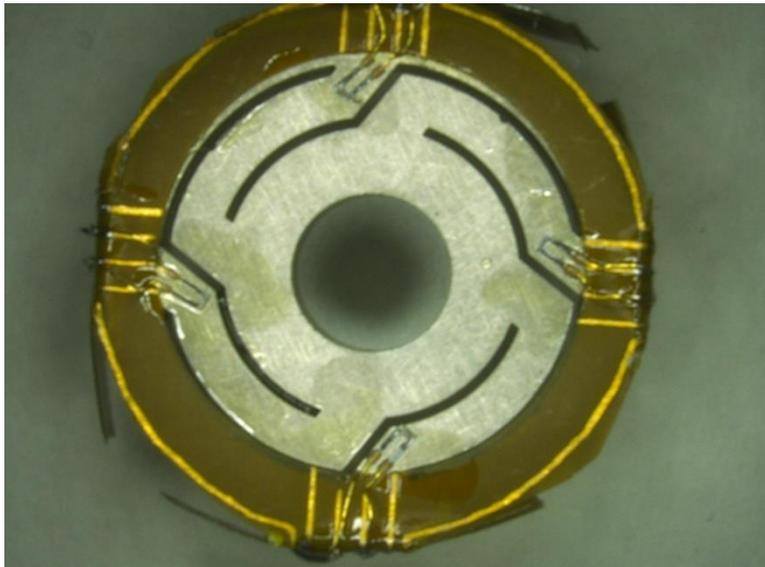
- grün: Widerstandsgebiete
- blau: Aluminium, bzw. Ni-Au
- rot: hochdotiert

# Anwendung der Dehnmesselemente in MIC-Instrumenten

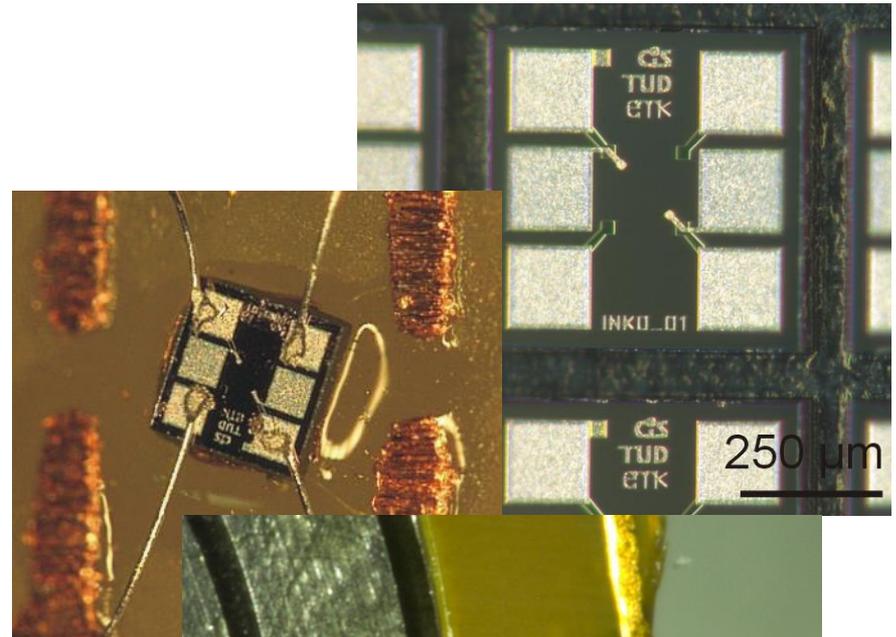
Projekt: INKOMAN-Kraftsensor



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

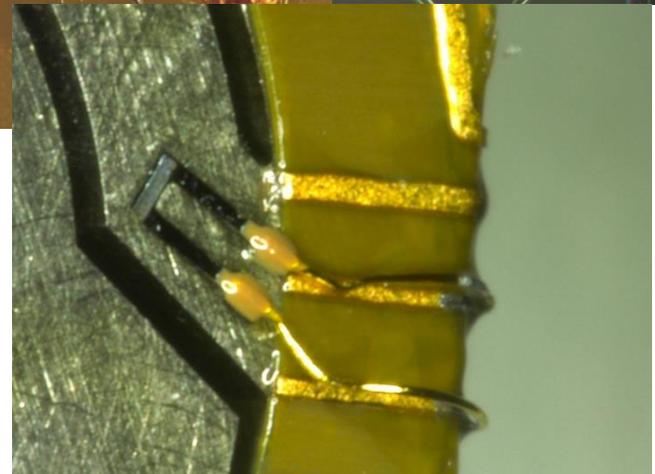


8 mm



## Merkmale des Sensors:

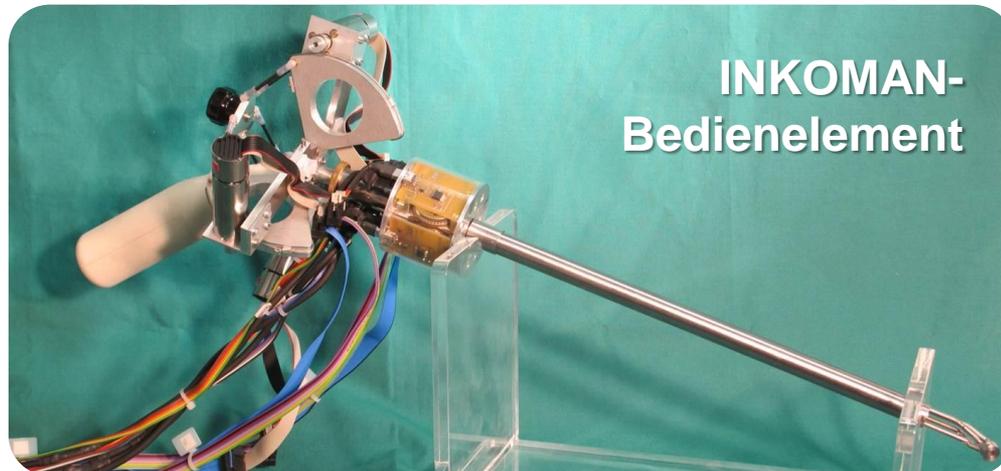
- Kraftmessung in drei Freiheitsgraden (x,y,z)
- 3-axialer Verformungskörper
- Piezoresistive Dehnmessstreifen mit kompletter Messbrücke



# C) Direkt gekoppelte Sensor-Aktor-Systeme - Haptische Bediensysteme

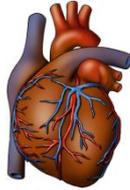
Medizinische Assistenz- und Telemetriesysteme

- Analyse der haptischen Wahrnehmung
- Entwurfsmethodik haptischer Systeme und ihrer Komponenten
- Mess- und Evaluationsmethoden für haptische Anwendungen
- **Forschungskooperation:**
  - Kinematik + Aktorik: FG M&MEMS
  - Sensorik + Haptik: FG MuST
  - Mediziner



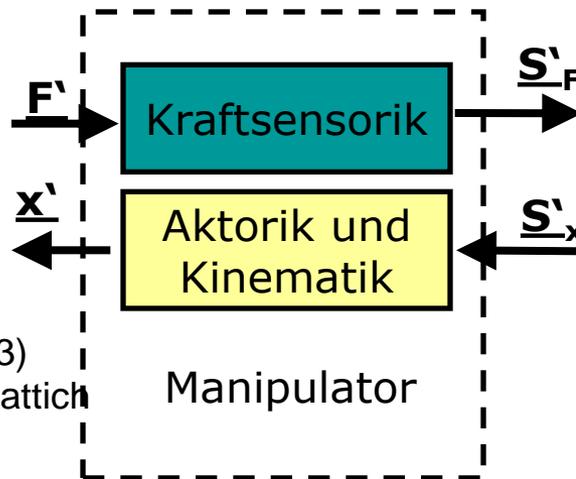
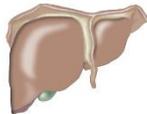
# Signalstrukturen **haptischer** medizinischer Assistenz- und Telemetriesysteme

Assistenz  
(HapCath)

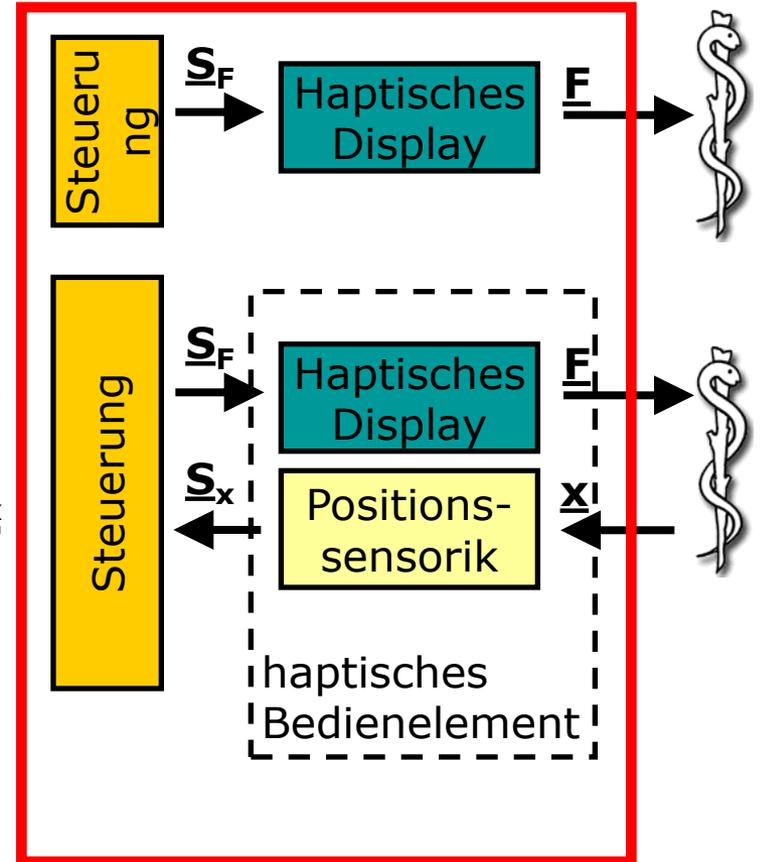


Dissertation: T. Meiß + S.Sindlinger(2012) + T.Opitz

Telepräsenz  
(INKOMAN,  
FlexMIN)



Dissertation: S. Kassner (2013)  
C. Neupert, S:Mattich



## Entwicklungsaufgaben

- Sensorik & Aktorik
- Steuerungs- / Regelalgorithmen
- Mechanik zur Kraftübertragung

Haptische Mensch-  
Maschine-Schnittstelle

# C1) Haptisches Assistenzsystem – Projekt: HapCath

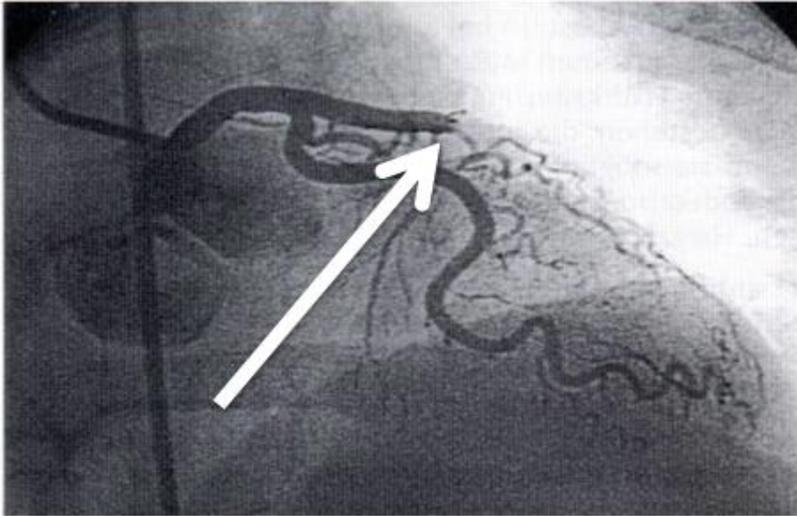
DFG-Projekt (ab 2004): T.Meiß, N.Stefanova, T.Rossner, T.Opitz

## Medizinische Situation

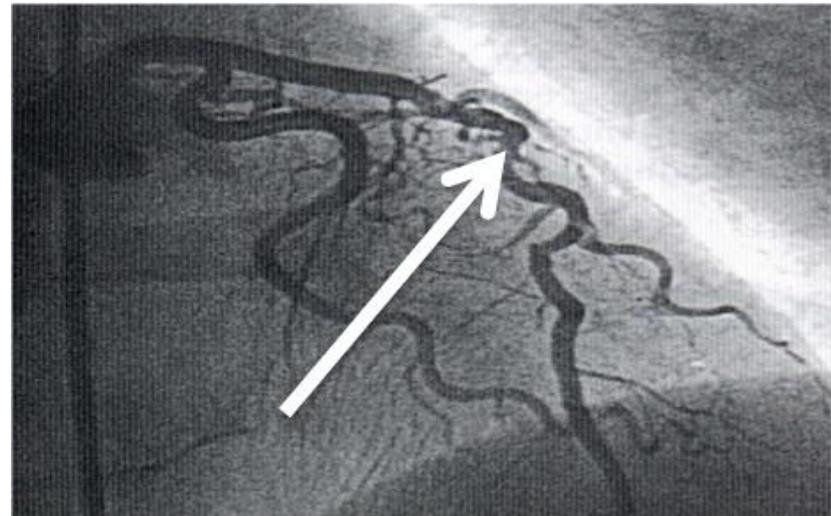


TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

Verschlossenes Herzkranzgefäß



Herzkranzgefäß nach Setzen des Stents



### → Herzinfarkt:

- Verschluss der Herzkranzgefäße (Stenose)
- ca. 280.000 Fälle p.a. in Deutschland
- Setzen eines bzw. mehrerer Stents



# Haptisches Assistenzsystem für Katheterisierungen

DFG-Projekt HapCath

## ▪ Ziel

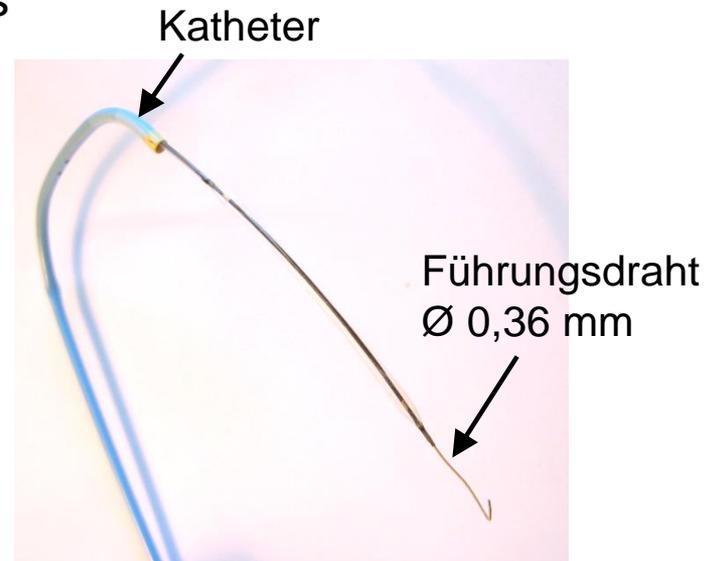
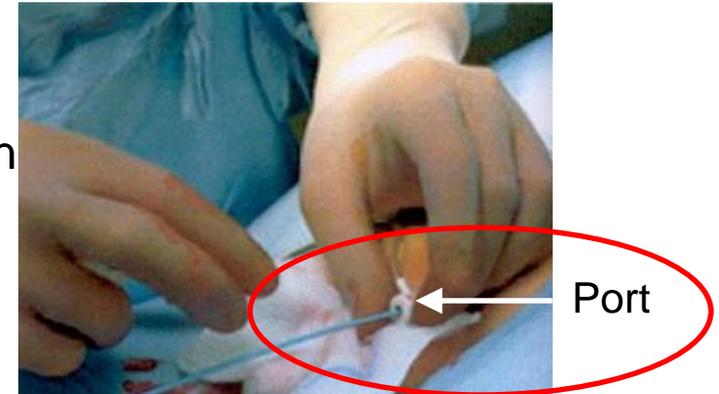
- Darstellung der Kräfte an der Spitze eines Führungsdrahtes oder Katheters für Kardiologen

## ▪ Forschungsschwerpunkte

- Präparation von weiterentwickelten Mustern des **Silizium-Kraftsensorchips**
- Montage der kontaktierten Mikro-Kraftsensoren in angepasste, biokompatible Führungsdrähte
- Entwicklung der Aktorik zur extrakorporalen Darstellung der Kräfte für den Kardiologen

## ▪ Anwendung

- Medizinische Herz-Diagnostik und Therapie

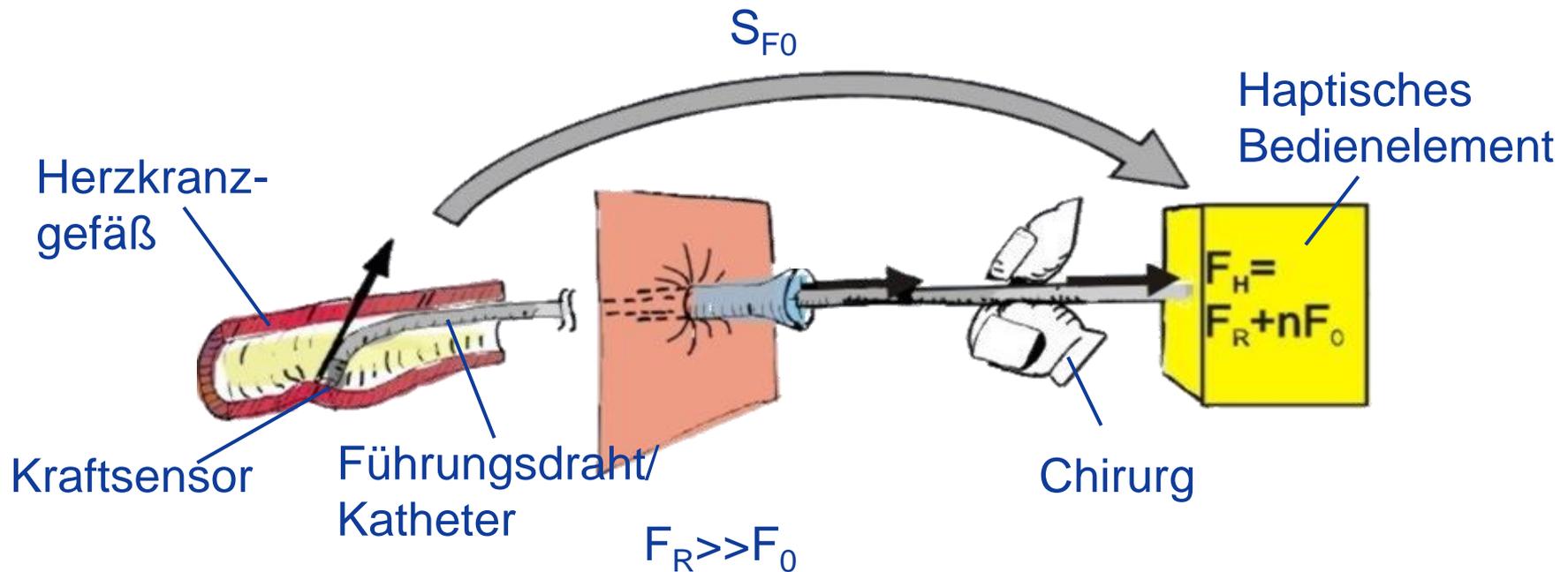


# Projekt „HapCath“

## Konzeptidee

### HapCath Projekt: Haptisches Feedback für den Kardiologen

- Miniatur-Kraftsensor an der Spitze des Führungsdrahtes
- Gemessene Kräfte werden skaliert auf Führungsdraht rückgekoppelt



# Projekt „HapCath“

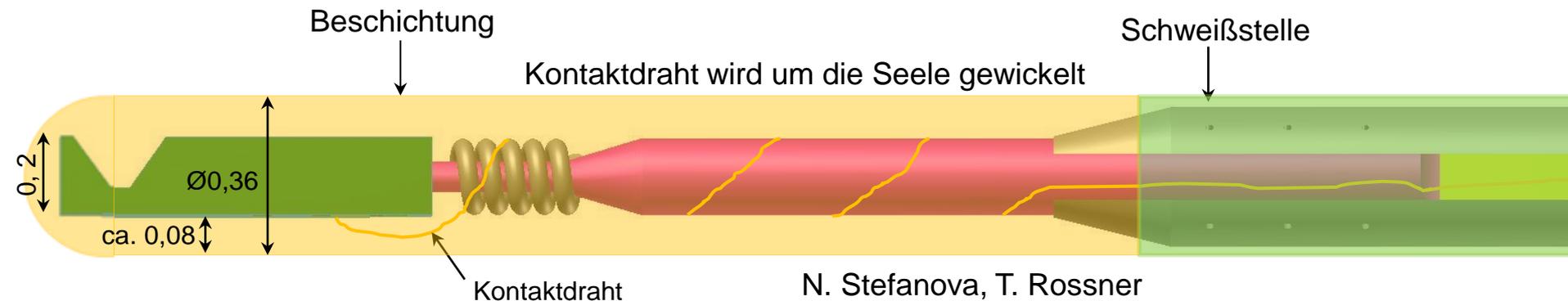
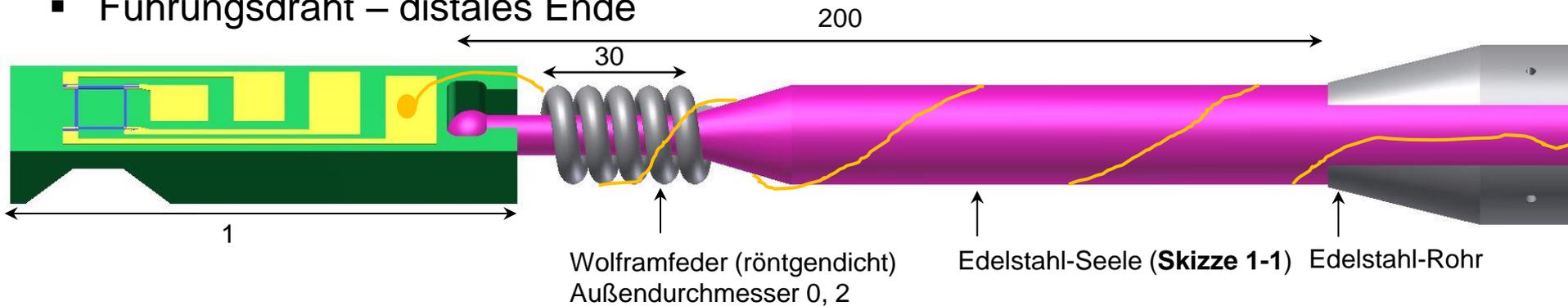
Integration Kraftsensor in Führungsdraht ( $\varnothing 0,014''$ )



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



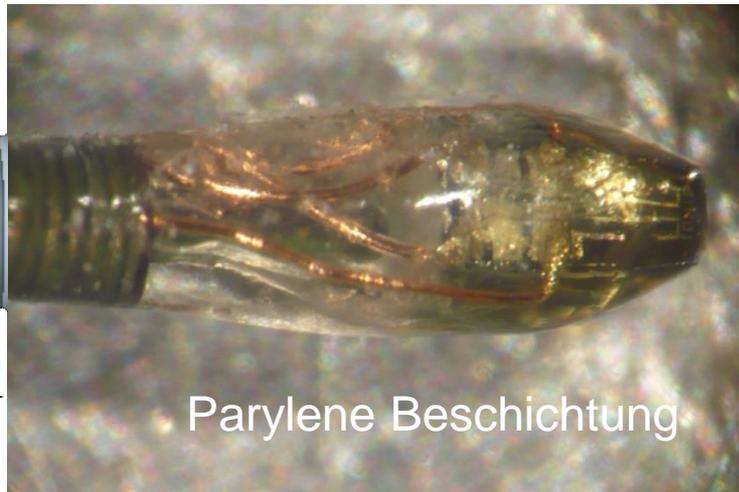
## ■ Führungsdraht – distales Ende



# Projekt „HapCath“

## Packaging-Mikrokraftsensor + haptisches Display

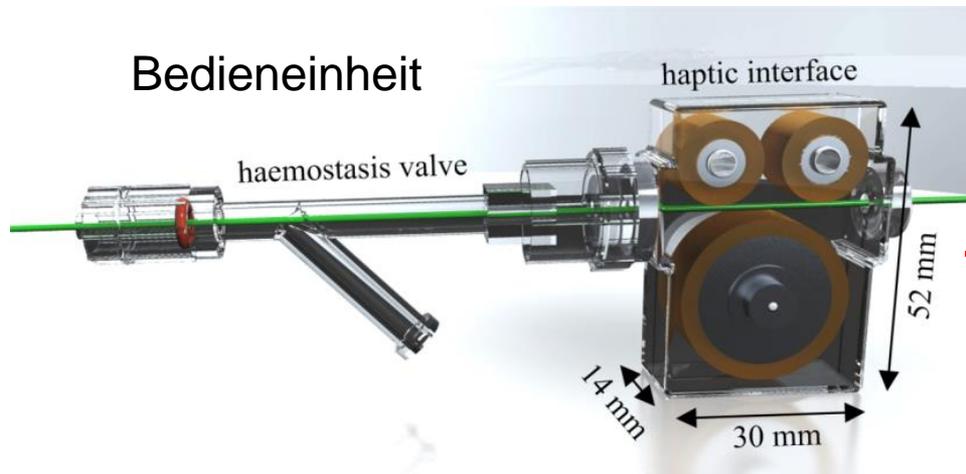
Silizium-  
Kraftsensor



### Kennwerte:

- max. Kraftübertragung: 1 N
- Arbeitsfrequenzbereich: DC bis 1 kHz
- Ankopplung an hämostatisches Ventil (Y-Stück)
- Beibehaltung des üblichen Workflows im Herzkatheterlabor

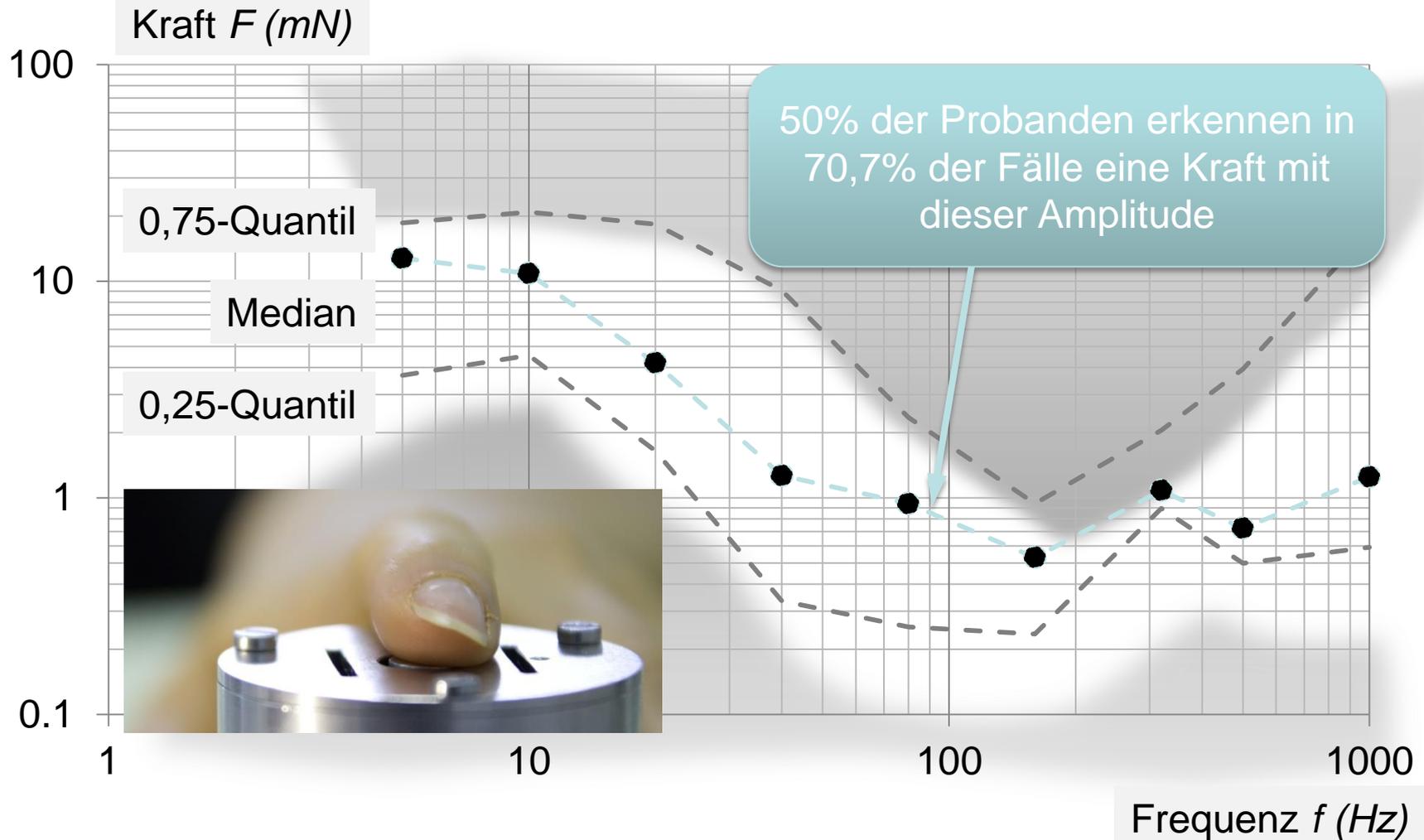
Bedieneinheit



Dissertation: T.Opitz

# Analyse der haptischen Wahrnehmung

## Absolute Kraftwahrnehmungsschwelle (27 Probanden)



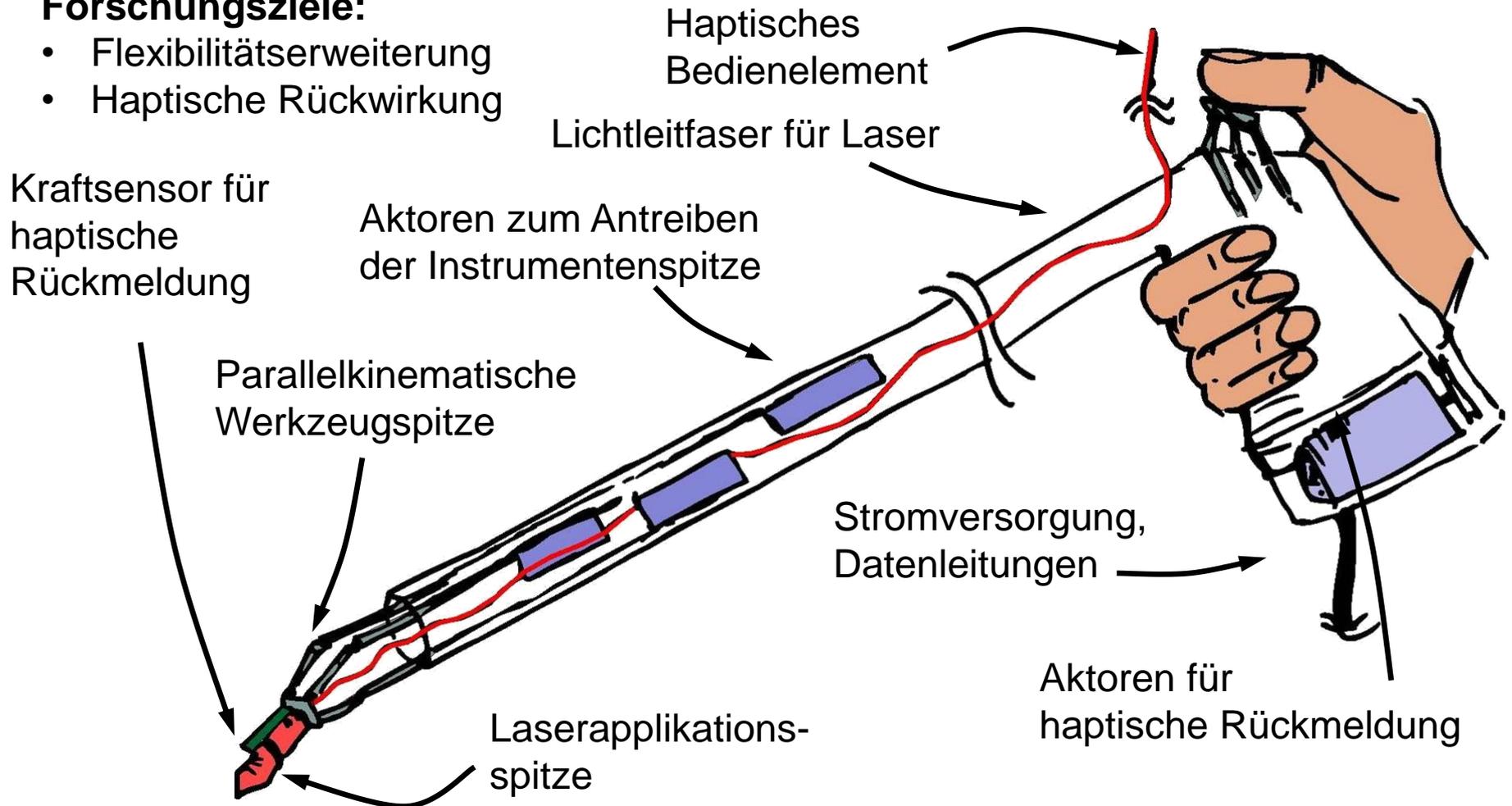
# C2) Minimalinvasiver Manipulator - Projekt „INKOMAN“

## Laserdissektion der Leber

BMBF-Projekt (2006 – 2012): A.Röse, J.Rausch, S.Kassner

### Forschungsziele:

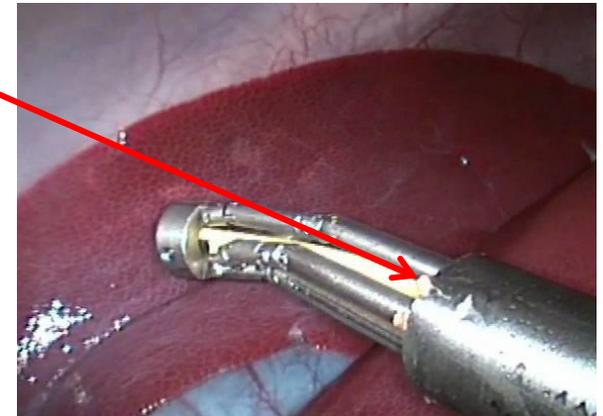
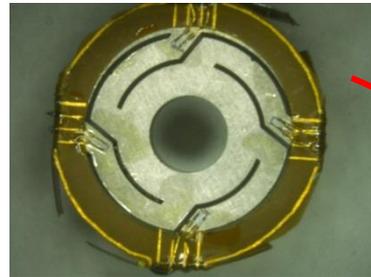
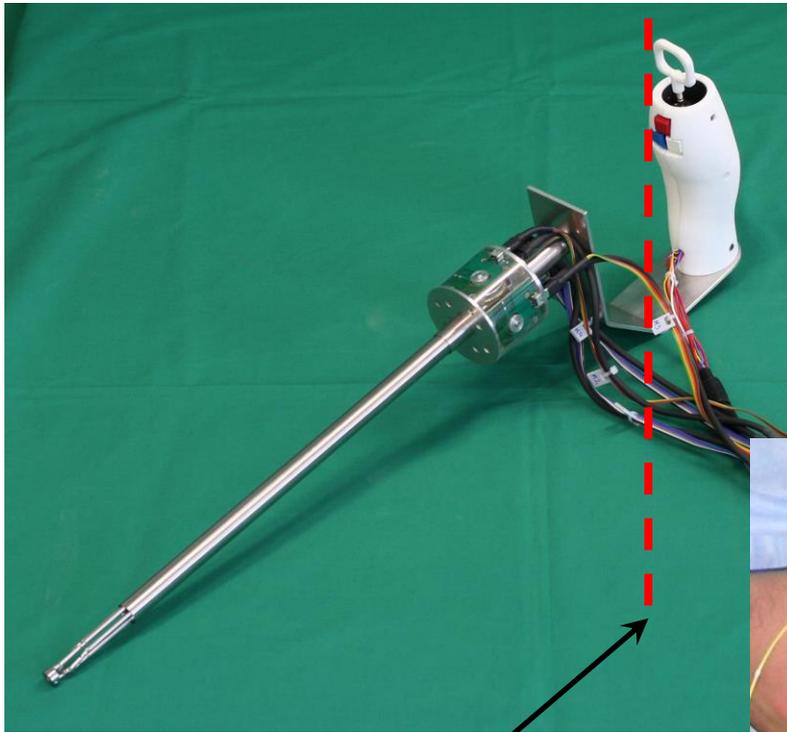
- Flexibilitätserweiterung
- Haptische Rückwirkung



# Projekt „INKOMAN“

## Erprobung im Tierexperiment

- INKOMAN Erprobung: Im Tierexperiment, Uni Lübeck



Noch drahtgebundenes Instrument

# C3) Telepräsenzsystem - Projekt „FlexMIN“

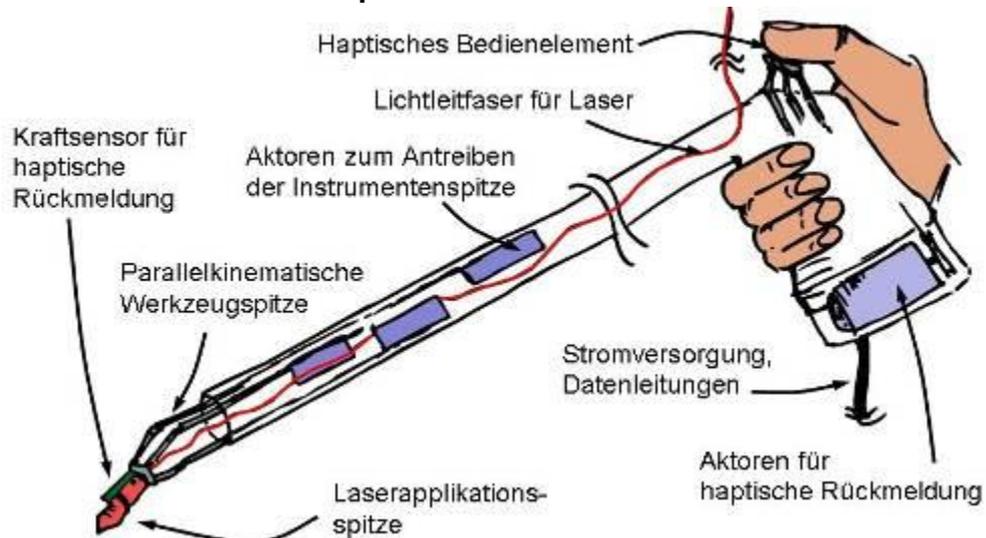
## Haptischer Manipulator als Telepräsenzsystem

DFG-Projekt (ab 2011): C. Neupert, S. Mattich, P. Pott + Uni Tübingen

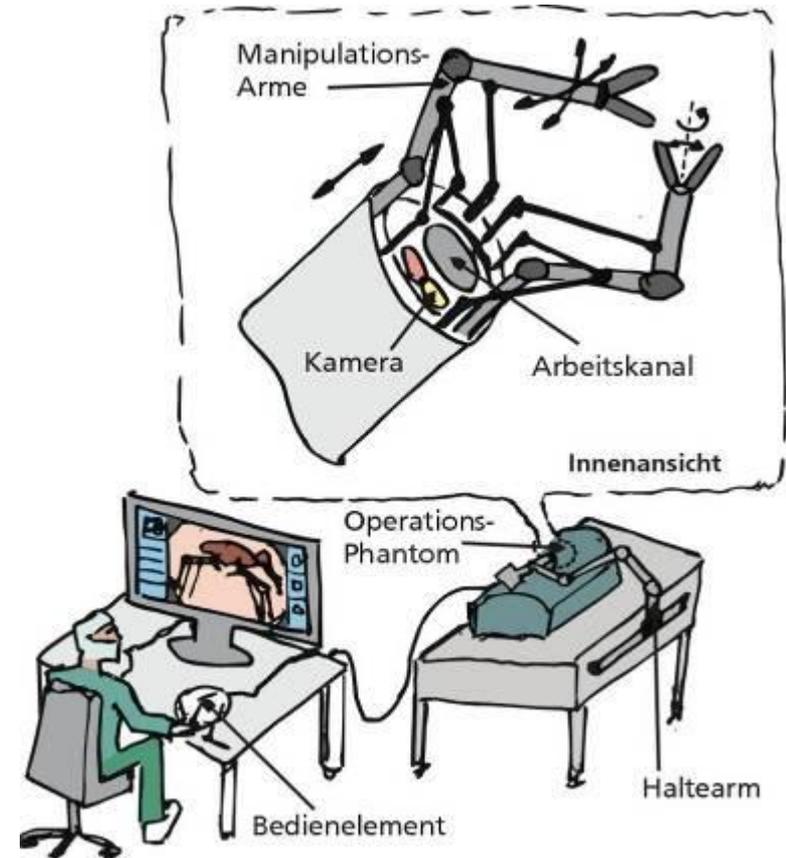


TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

### INKOMAN-Manipulator



### FlexMIN-Telepräsenzsystem

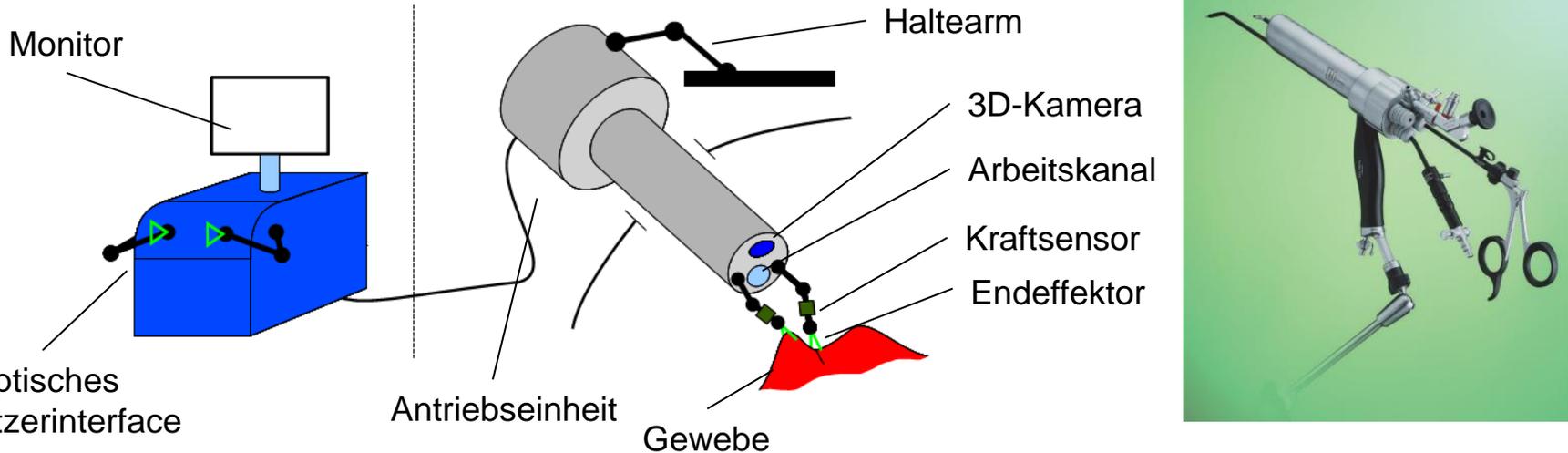


# Flexibilitätserweiterung in der Minimalinvasiven Chirurgie

Projekt: „FlexMIN“

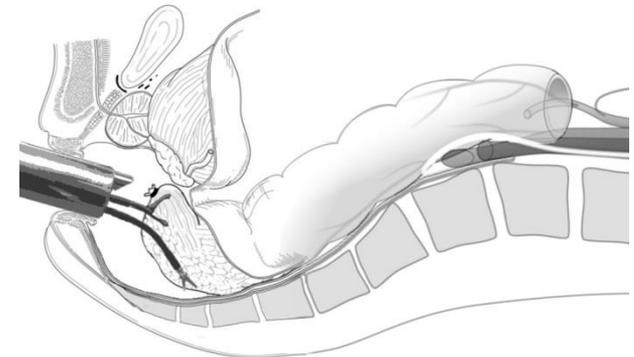
Bedienkonsole

Single-Port Robotik System

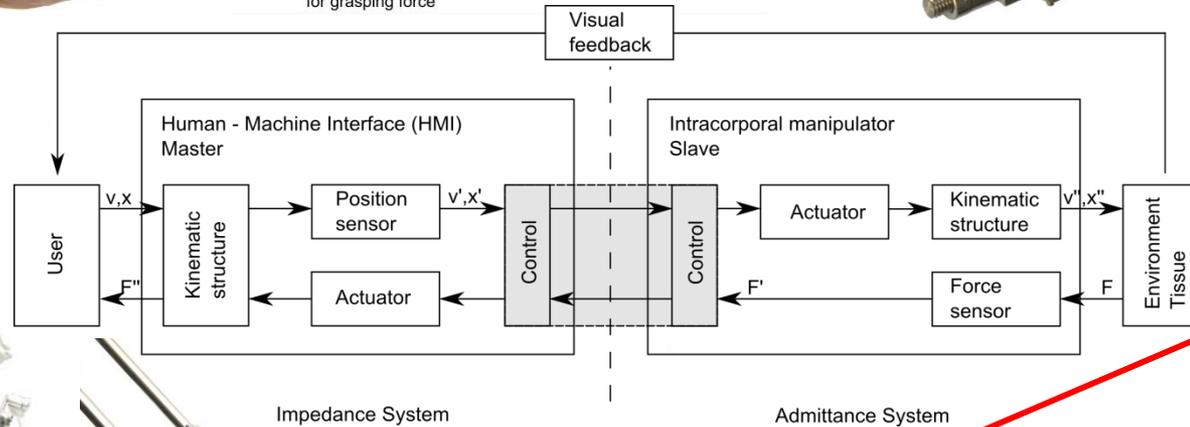
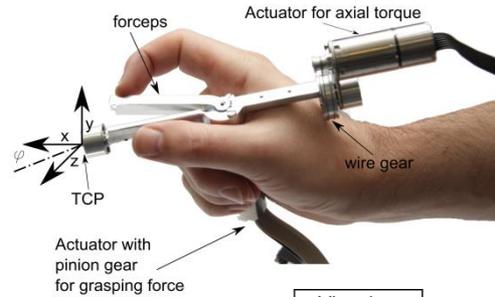


## Teleoperationssystem für transanale Rektumresektion:

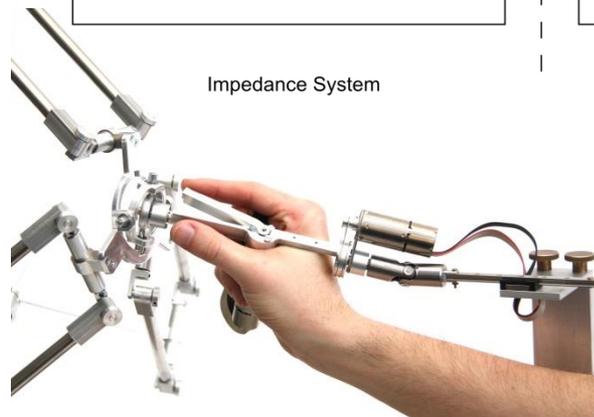
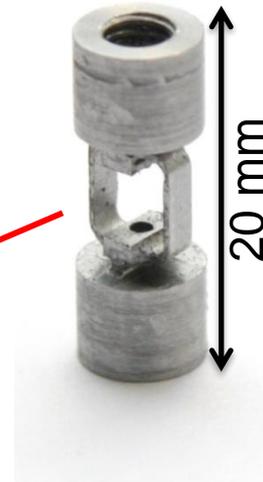
- Bedieneinheit mit haptischem Feedback
- Parallelkinematische Strukturen
- Strukturintegrierte Sensorik



# Komponenten von FlexMIN



Kraftsensor



## B4) Adaptive Orthese mit Leistungsabgabe

Forschungskooperation: MEMS-AUT-Biomechanik Uni HD

DFG-Projekt (2011-2016): J.Hielscher, R.Müller, A.Grün



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

### Konzeptidee:

- Orthese = Exoskelett, hier für's Bein
- Unterstützung von Menschen mit geschwächter Muskulatur bei belastungsintensiven Bewegungen (Aufstehen, Treppensteigen) durch externes Kniemoment

Dabei unterstützt die Orthese...

- Nur in Bedarfssituationen („adaptiv“)
- Prozentual (30%) zum vom Nutzer selbst aufbrachten Kniemoment

### Sensorik:

- Erkennen der Bedarfssituation
- Berechnung des Kniemomentes

→ Messgrößen:

- Winkel am Knie und Sprunggelenk
- Gelenkmoment
- Muskelaktivität
- Kraft unter den Füßen nach Betrag, Richtung und Angriffspunkt



# Adaptive Kniegelenk-Orthese

Angepasste Sensorik: J.Hielscher

## Muskelaktivitätssensoren

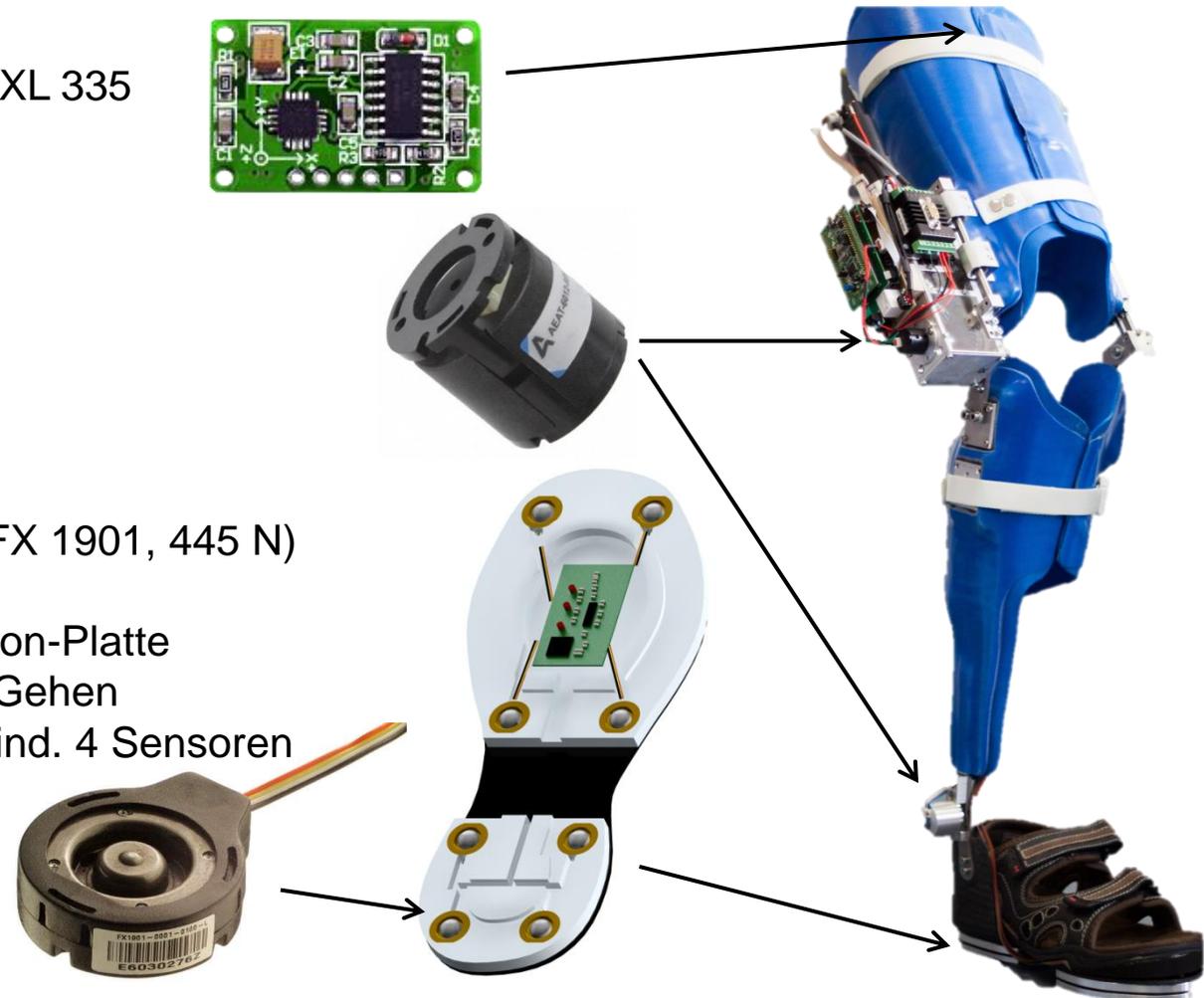
2 Beschleunigungssensoren ADXL 335

## Winkelsensoren:

Magnetischer Encoder  
(Avago AEAT 6012, 12 Bit)

## Kraftsensoren:

8 Kraftsensoren (Meas. Spec., FX 1901, 445 N)  
Integriert in zwei Alu-Segmente  
Montiert auf einer flexiblen Carbon-Platte  
→ Erleichtert das Abrollen beim Gehen  
→ Garantiert den Kontakt von mind. 4 Sensoren  
beim Treppensteigen



# B5) Exoskelett für orthopädische Chirurgie

Forschungskooperation: MEMS-Uni Mannheim

BMBF-Projekt (2012 - ...): M. Hessinger, P.Pott

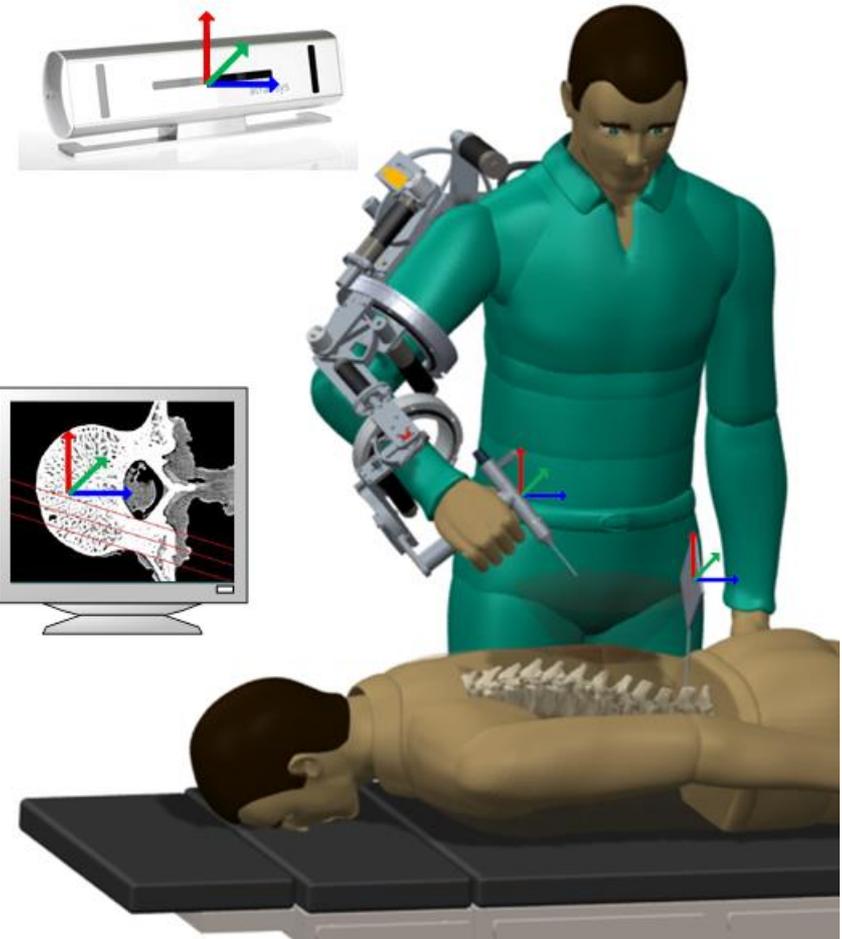
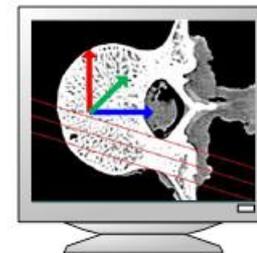
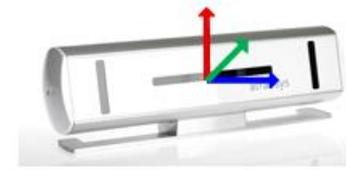


TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

- Aktives Exoskelett mit sieben Freiheitsgraden
- Pedikelverschraubung an der Wirbelsäule
- Chirurgisches Assistenzsystem
  - Geführte Bewegung zur Bohrposition
  - Fehlerkorrektur
  - Interaktive Arbeitsweise zwischen Exoskelett und Operateur

## Forschungsaspekte

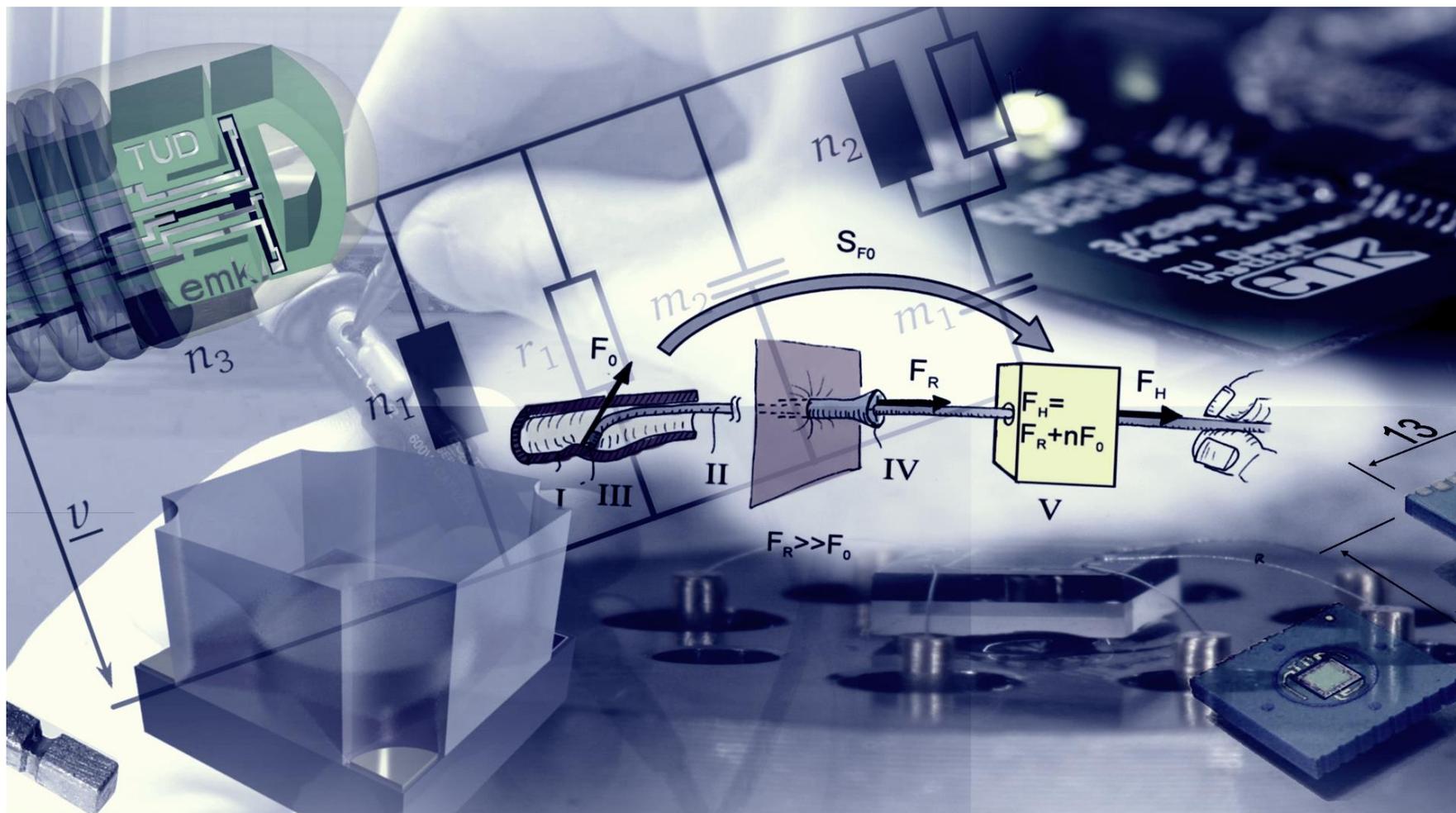
- Kinematische Strukturen
- Antriebsmechanismen
- Integrierte Drehmoment-/ Kraftsensorik
- Leichtbauweise
- Nutzerinteraktion, Haptisches Feedback
- Navigation, Echtzeit Tracking



## E) Fazit + Ausblick

- **Grundlagen : Dynamischer Entwurf gekoppelter Sensor-Aktor-Systeme**
  - R. Ballas, G. Pfeifer, R. Werthschützky: *Electromechanical Systems in Mikrotechnology and Mechatronics*. Springer Verlag, 2011
  - C. Hatzfeld; T. Kern: *Engineering Haptic Devices*. Springer Verlag, 2. Edition, 2014
- **Anwendungen: Medizinische Sensorik & Haptik:**
  - Hochinnovatives Forschungsgebiet der Mikrotechnik + MEMS
  - Trend in Richtung autarke Sensor-Aktor-Systeme → Mikroimplantate
  - Haptische Assistenz- und Telemetriesysteme
  - Für Studenten und Mitarbeiter hoch motivierend
- **Mittelfristige Forschungsaufgaben: (2015 bis 2017)**
  - **Begleitung von ca. 10 Promovenden**
  - **Sicherung von DFG- und BMBF-Projektabschlüssen:**
    - HapCath (Hapscher Führungdraht): 2016
    - Adaptive Kniegelenkorthese: 2016
    - Flexibles Telemtriesystem: 2017
    - Chirurgisches Exoskelett 2017

# Herzlichen Dank für die Aufmerksamkeit!



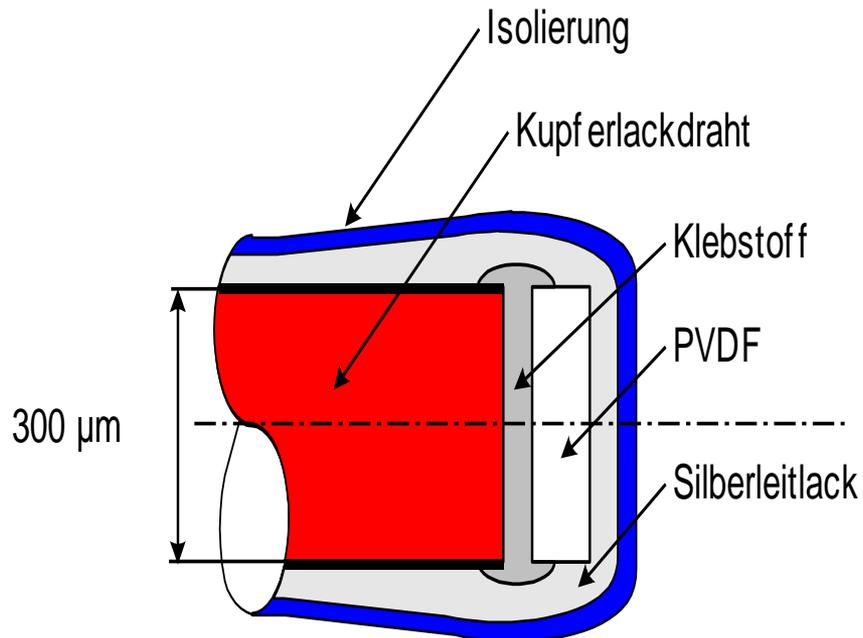
# B3) Mikrosensoren am FG MuST

## B31) Piezoelektrisches Sondenhydrofon

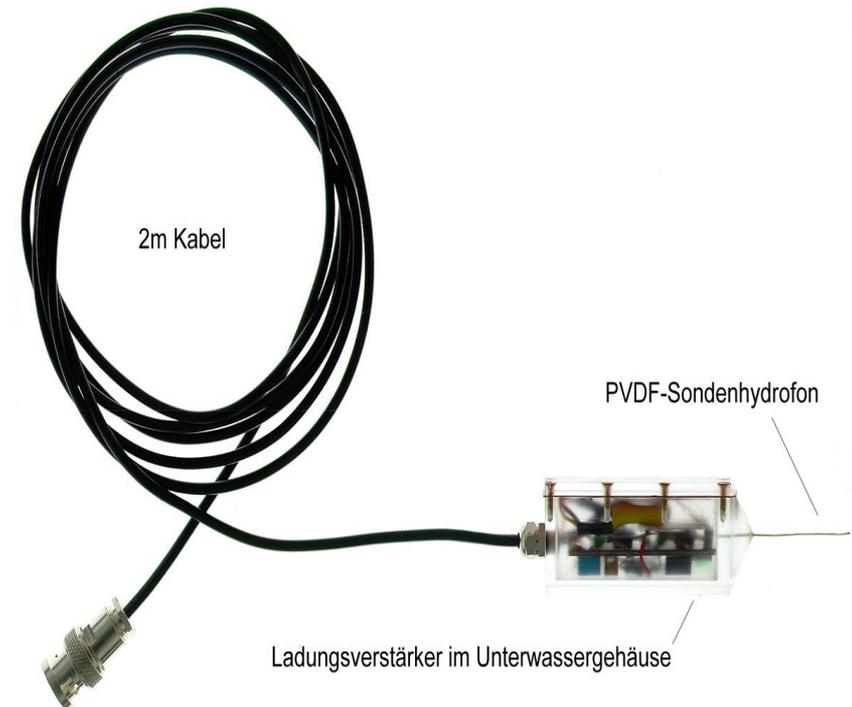
(1993-1998): Dissertation S. Schrähler

**Ziel:** Ausmessen des Schallfeldes von Lithotriptoren im Wasserbecken

Prinzipieller Aufbau des piezoelektrischen Hydrofons:



PVDF-Sondenhydrofon



# B32) Selbsttonometer zur kontaktlosen Augeninnendruckmessung (NCT) → *weglassen*

Fa. Mechatronic (2003 – 2008): Dissertation T.Weber

## Ziele

- Ableitung eines Lösungskonzepts für ein miniaturisiertes, berührungsloses Tonometer
- Reduzierung der Messunsicherheit

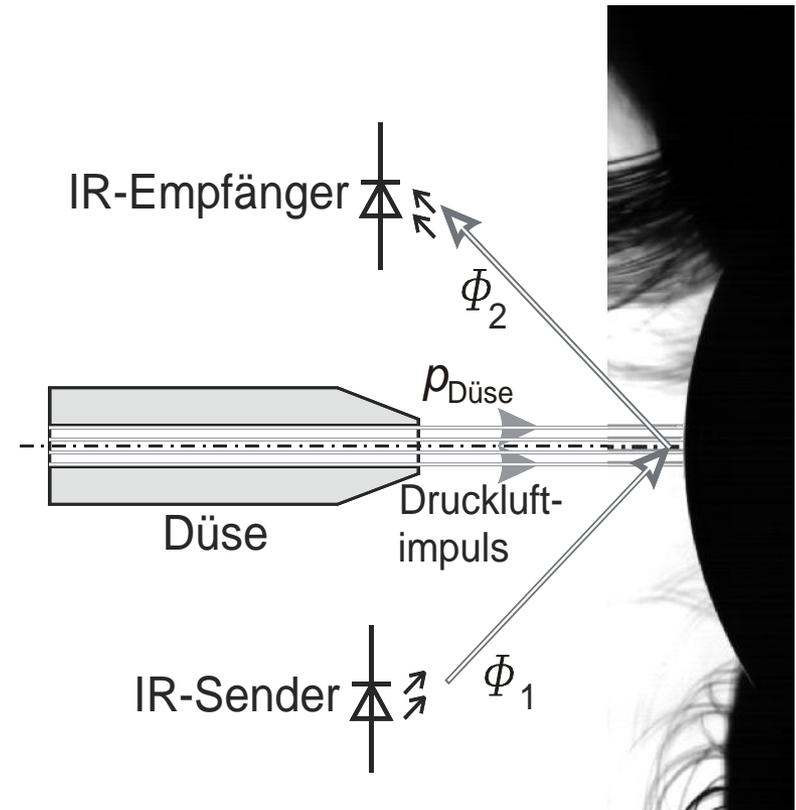
## Anwendung

- Überwachung Augendruck
- Diagnose und Therapie Glaukom

## Forschungsschwerpunkte

- Analyse der Messfehler eines druckbasierten Tonometers durch mechanische Beschreibung des Auges
- Entwicklung eines miniaturisierten direkt gekoppelten Sensor-Aktor-Systems für ein Tonometer

Messprinzip eines druckluftbasierten Tonometers:



## Reduzierung der Messunsicherheit:

- messbedingte Druckerhöhung
- Einfluß der Hornhautdicke
- Massenbeschleunigung

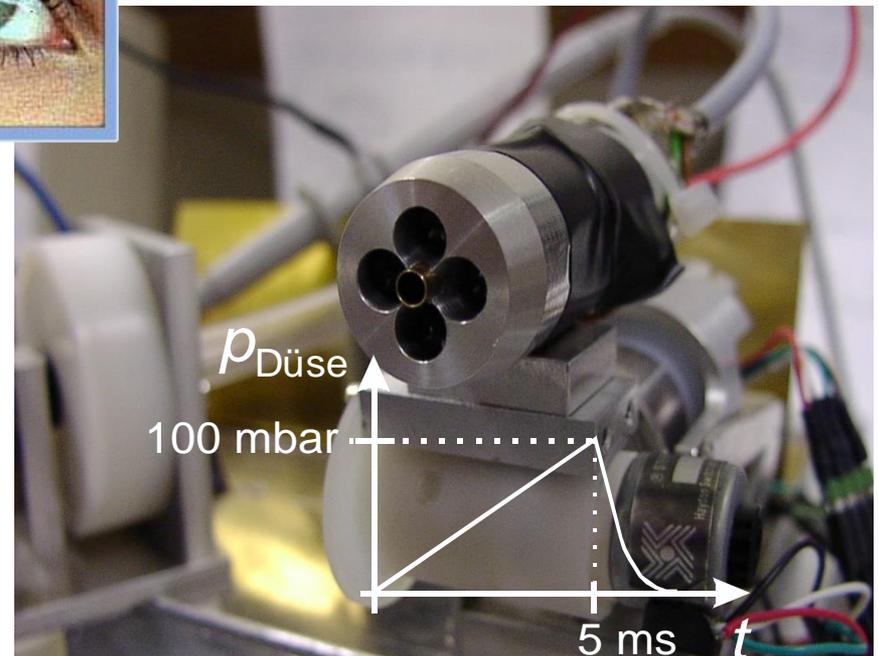


## Messsystem:

- direkt gekoppeltes Sensor-Aktor-System
- optische Positionssensorik
- 3D Positioniersystem
- optische Erfassung der Hornhautverformung

## Kennwerte:

- Messdruck: max. 100 mbar
- Rampendauer: ca. 5 ms
- Dauer Messablauf: ca. 3 s



# Zungendruck-Messsystem

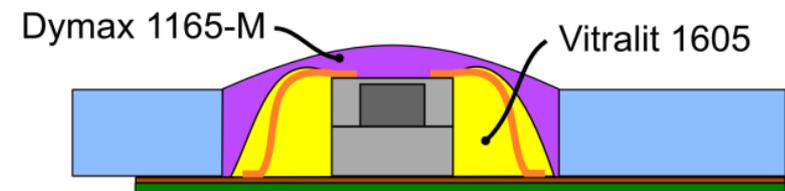
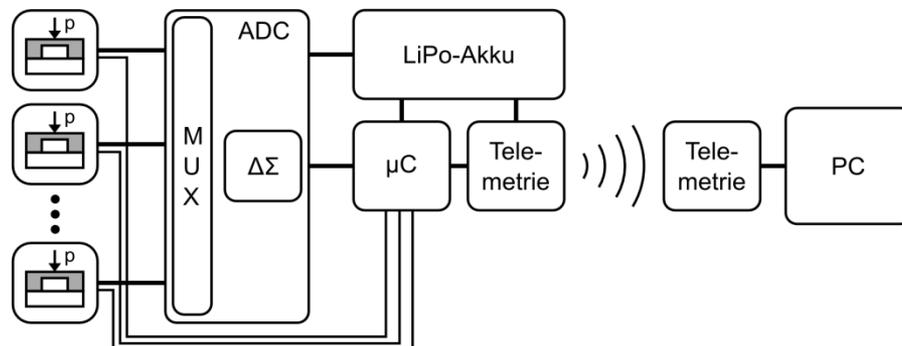
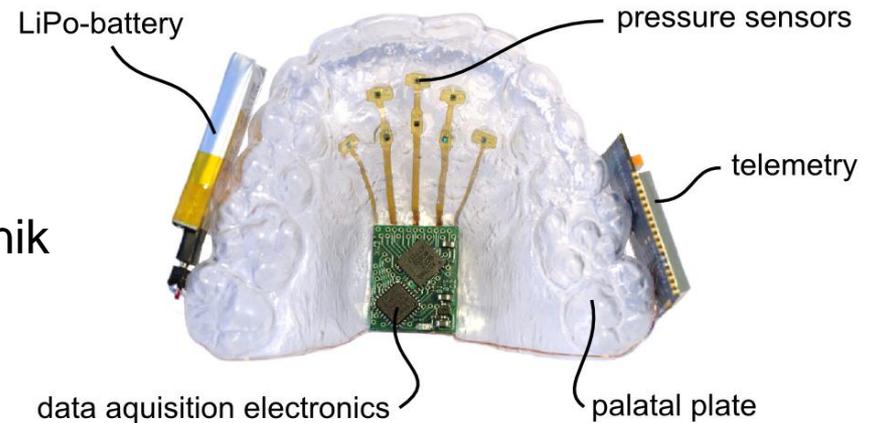
## 1. Variante

### Zielstellung:

Drahtloses Messsystem zur Erfassung des orts aufgelösten Drucks der Zunge gegen den oberen Gaumen.

### Lösungsansatz:

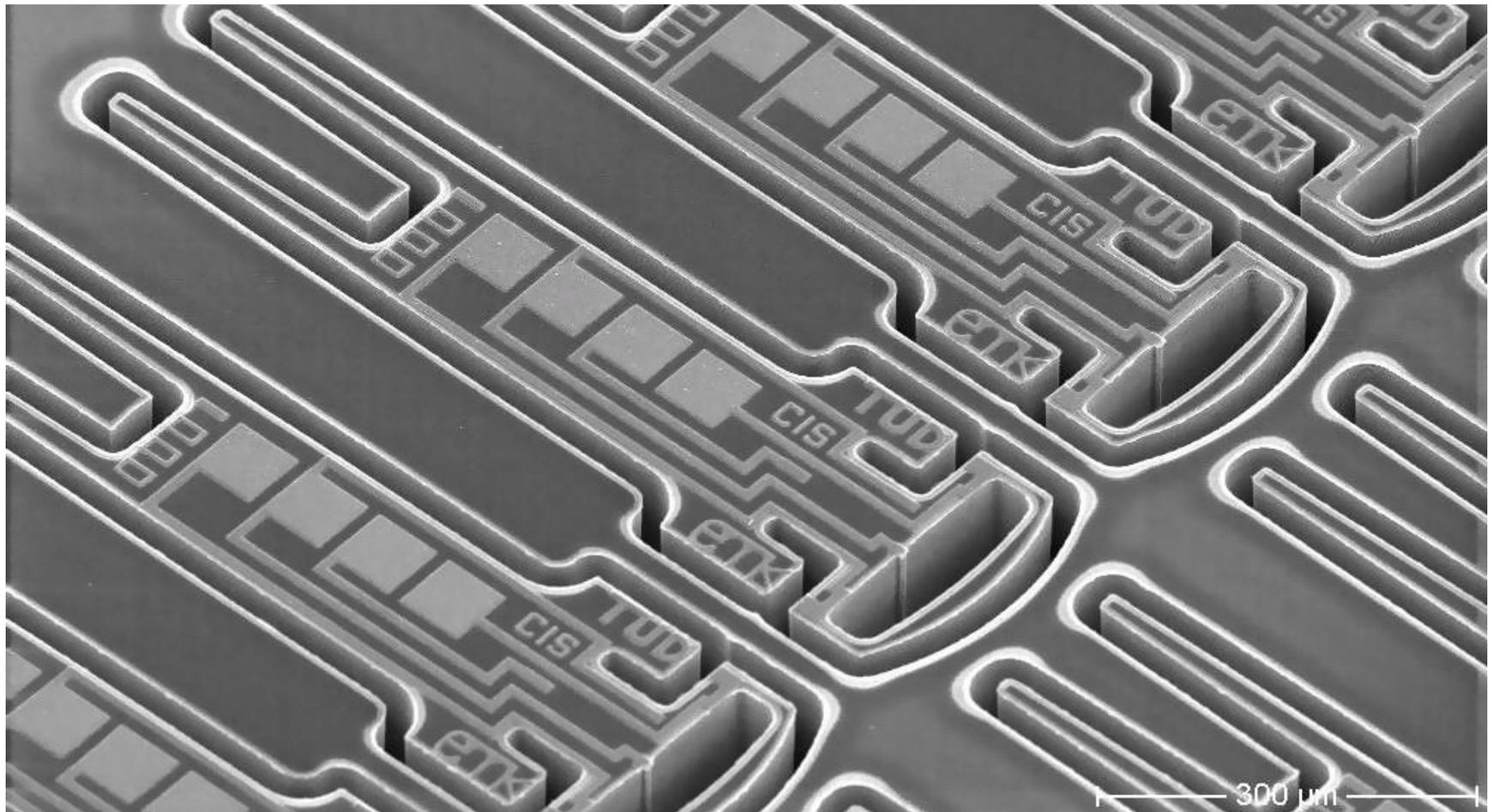
- 8 **piezoresistive** Absolutdrucksensoren-
- energie- und platzsparende Elektronik
- polymerbasiertes Packaging



# Silizium-Mikrokraftsensor



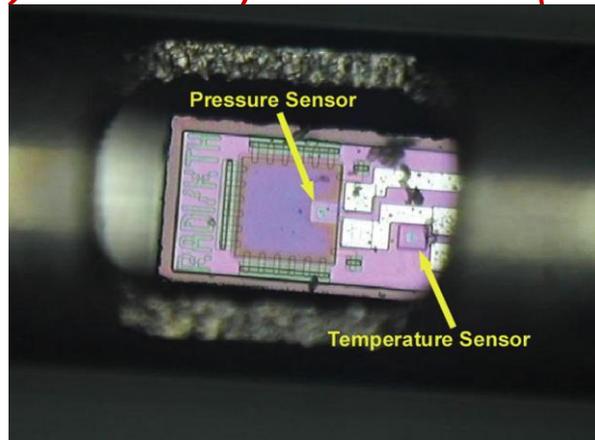
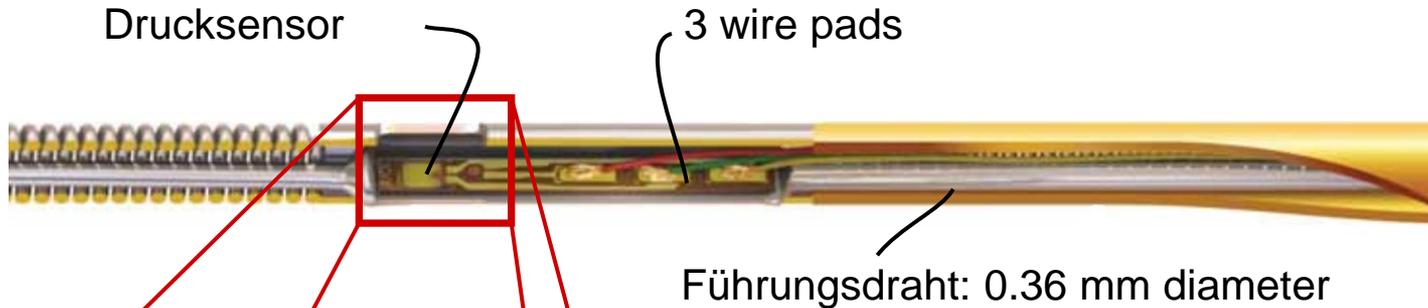
# Silizium-Mikrokraftsensor: EMK II



Dissertation: T.Meiß (2012)

# Drucksensoren in Führungsdrähten

(Stand der Forschung)

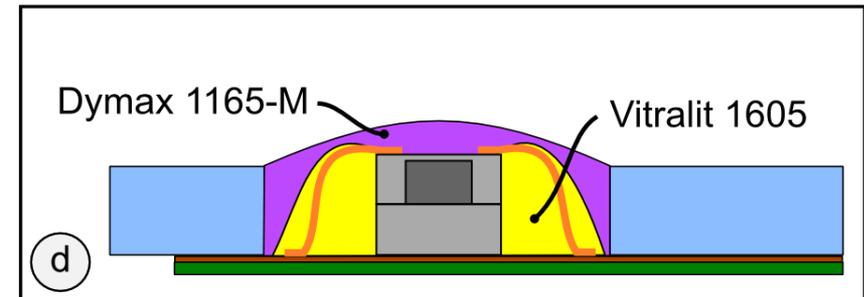
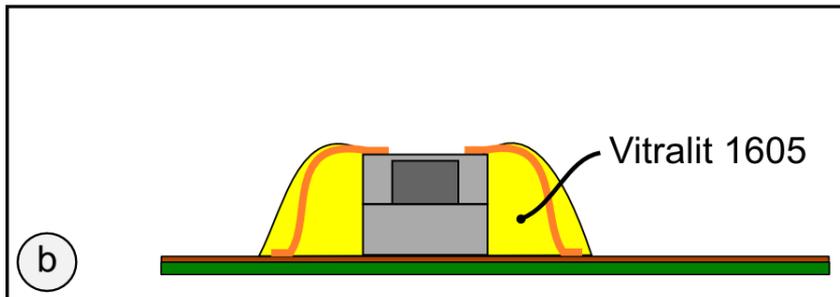
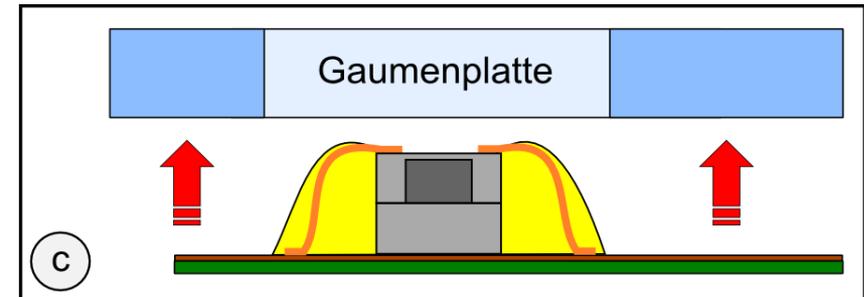
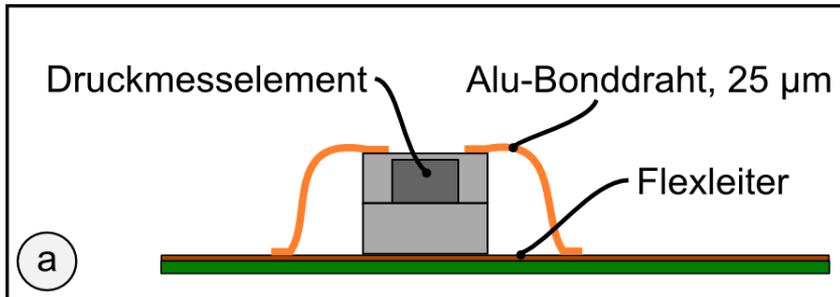


RADI, Schweden

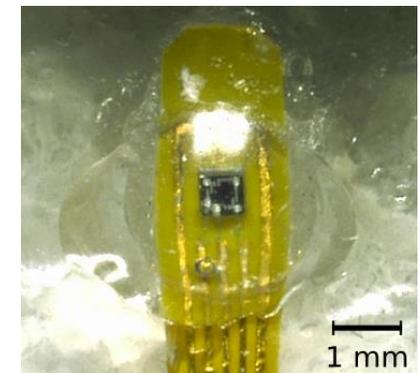
- Extrem kleiner Drucksensor:  
→  $(0.15 \times 1.5) \text{ mm}^2$
- Kurzzeit-Packaging
- Montiert in stainless steel tube

# Zungendruck-Messung

## Packaging der Druckmesselemente



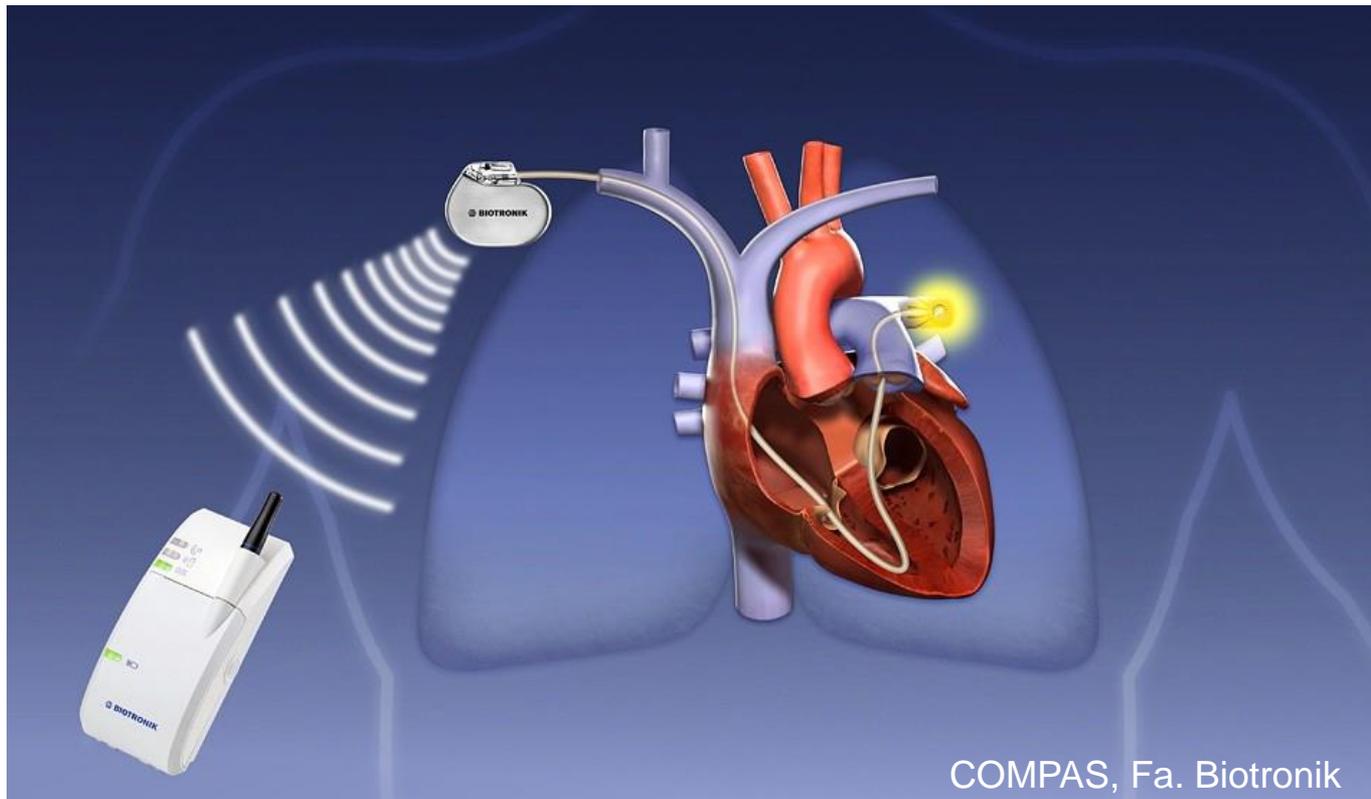
- Schutz der Bonddrähte bei Montage
- Änderung Empfindlichkeit < 5,5 %



# Sensoren für Mikroimplantate

## Langzeitanwendungen im Körper

(Stand der Forschung)

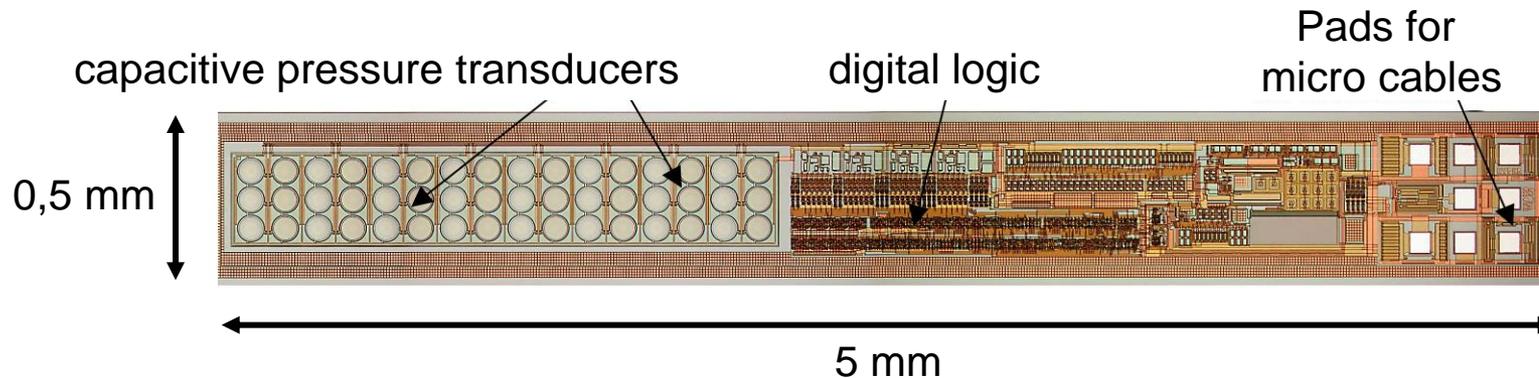


# Sensoren für Mikroimplantate

## Implantierbare Drucksensoren

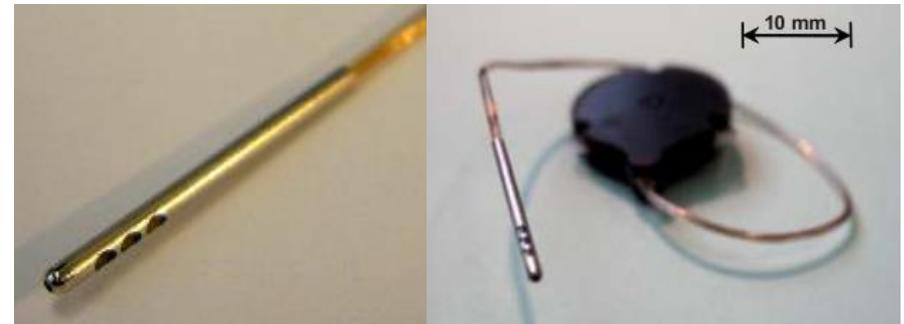
(Stand der Forschung)

### Sensorelemente und Elektronik in Oberflächenmikromechanik Fraunhofer IMS



Stabilität Packaging mehrere Jahre

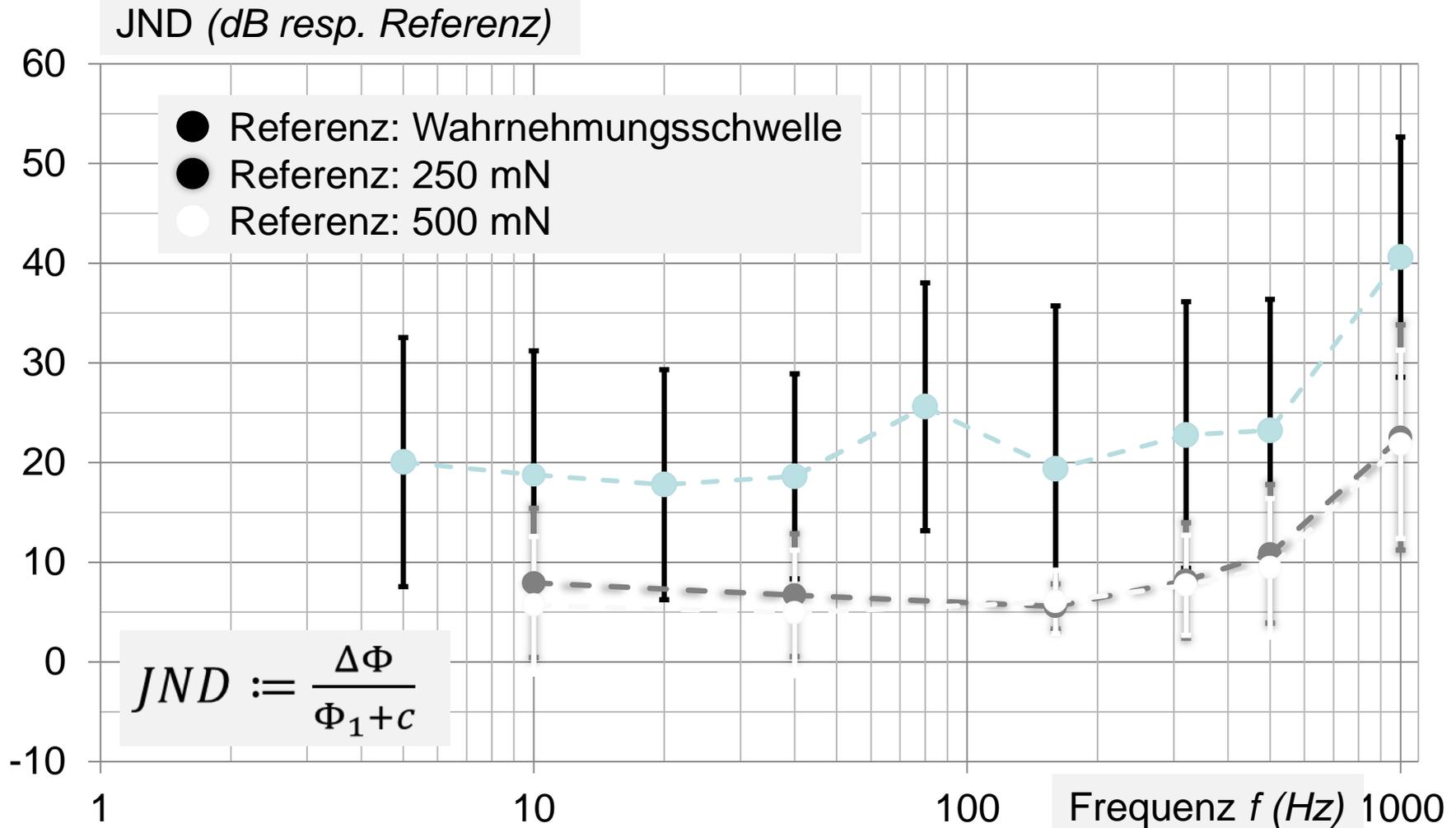
- Sehr geringe Diffusionskoeffizienten
- Mechanisch rückwirkungsfreies Packaging!



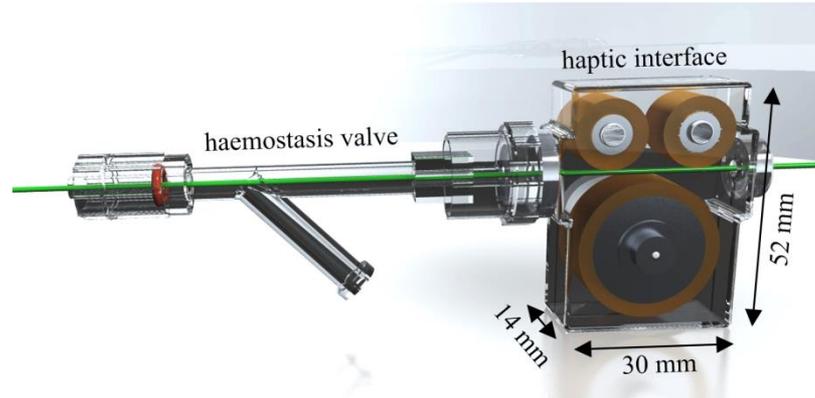
Fraunhofer IMS / Dr. Osypka GmbH

# Analyse der haptischen Wahrnehmung

## Differentielle Kraftwahrnehmungsschwelle



# Projekt „HapCath“ Bedieneinheit



Erstes Konzept der haptischen Bedieneinheit (CAD)

## Kennwerte:

- max. Kraftübertragung: 1 N
- Arbeitsfrequenzbereich: DC bis 100Hz
- Ankopplung an hämostatisches Ventil (Y-Stück)
- Beibehaltung des üblichen Workflows im Herzkatheterlabor

Dissertation: T.Opitz



Funktionsbaugruppe (36x46x33 mm<sup>3</sup>)



Aktuelles Funktionsmuster  
der haptischen Bedieneinheit

# Adaptive Kniegelenk-Orthese

Erkennen von Muskelaktivität, Dissertation: J.Hielscher

## Stand der Technik: Elektromyografie (EMG)

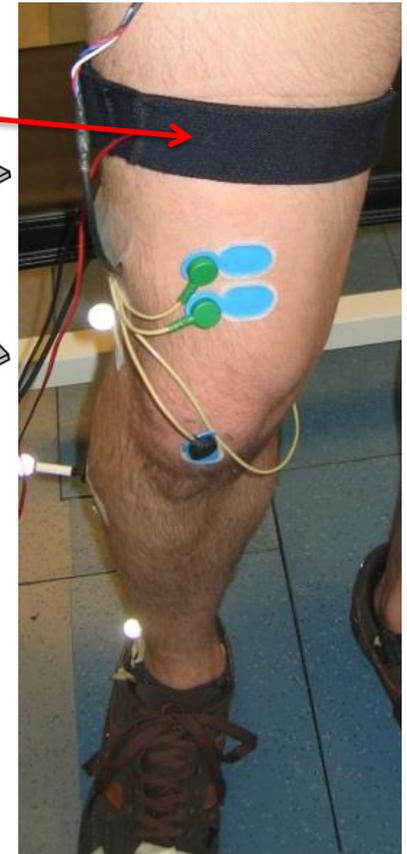
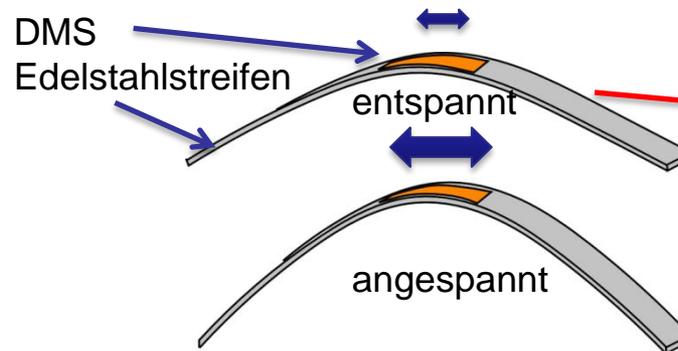
- geklebte Elektroden
- nicht langzeitstabil
- Fachwissen zur Applikation nötig

## Neuer Ansatz:

Erfassung der Muskelaktivität über Formänderung der Muskulatur

## Nutzung zur:

- Erkennung des Nutzerwunsches (Beginn oder Abbruch der Bewegung)
- Berechnung des Kniemoments



# Adaptive Kniegelenk-Orthese

## Verteilte Kraftmessung



- Messung der Kräfte unter dem Fuß des Nutzers
- in drei Komponenten ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ )
  - flächig durch verteilte Kraftsensoren (Sensormatrix)

Ziele im Projekt Orthese:

- Bestimmung der Bodenreaktionskräfte
- Erkennen ungesunder Scherkräfte im Schuh und den Anlageflächen der Orthese

