

# Mechatronik im Mittelohr

Modellbildung und Simulation  
zur Produktentwicklung von Hörimplantaten

Alexander Hellmuth MSc

Vortrag im Rahmen des VDI Arbeitskreises Mechatronik

München, 09. Mai 2012

# Mechatronik im Mittelohr

Modellbildung und Simulation zur Produktentwicklung von Hörimplantaten

1. Hörimplantate
2. Modellbildung
3. Systemdesign
4. Systemanalyse

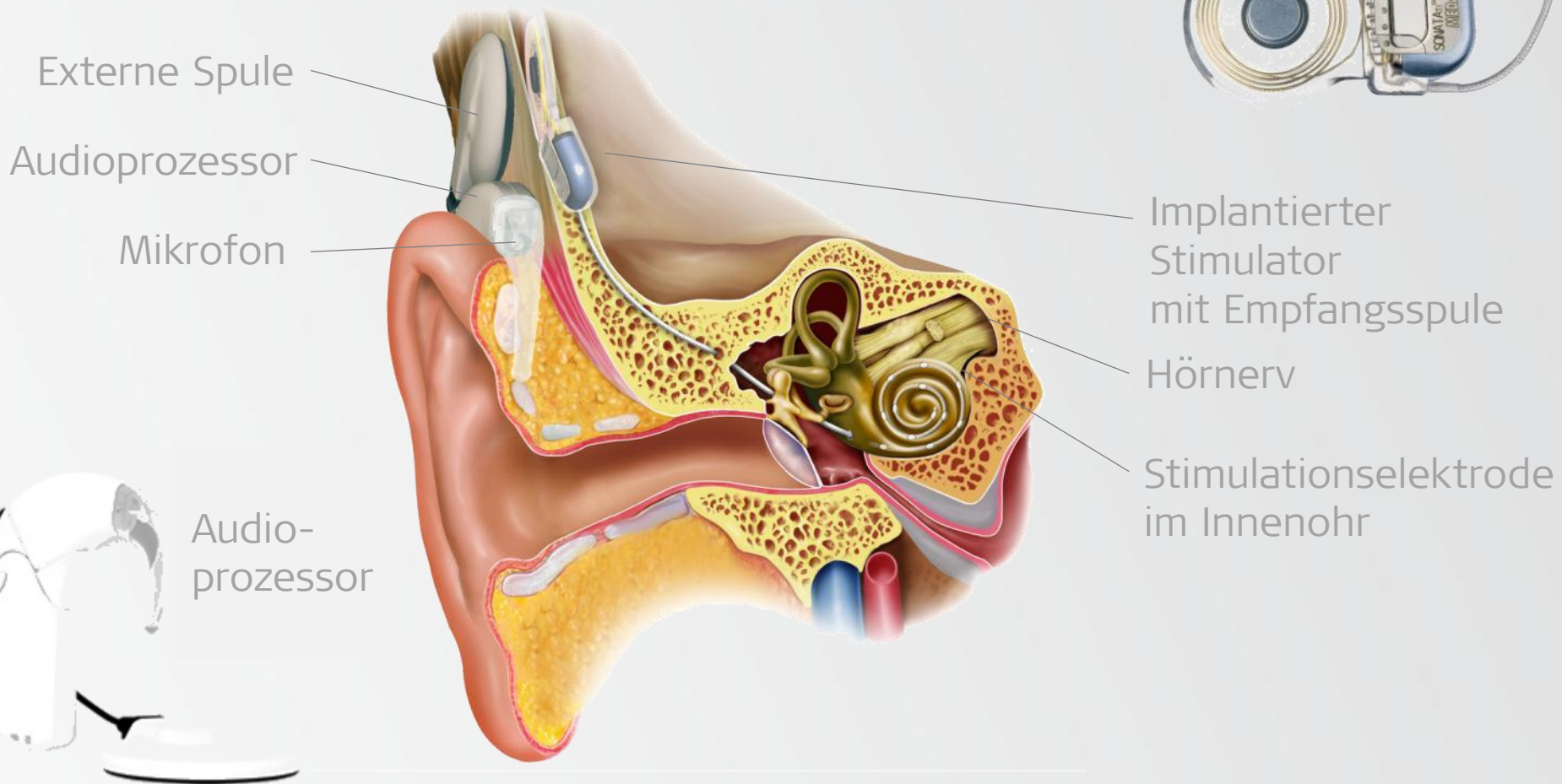
# Mechatronik im Mittelohr

Modellbildung und Simulation zur Produktentwicklung von Hörimplantaten

- 1. Hörimplantate**
2. Modellbildung
3. Systemdesign
4. Systemanalyse

# 1. Hörimplantate

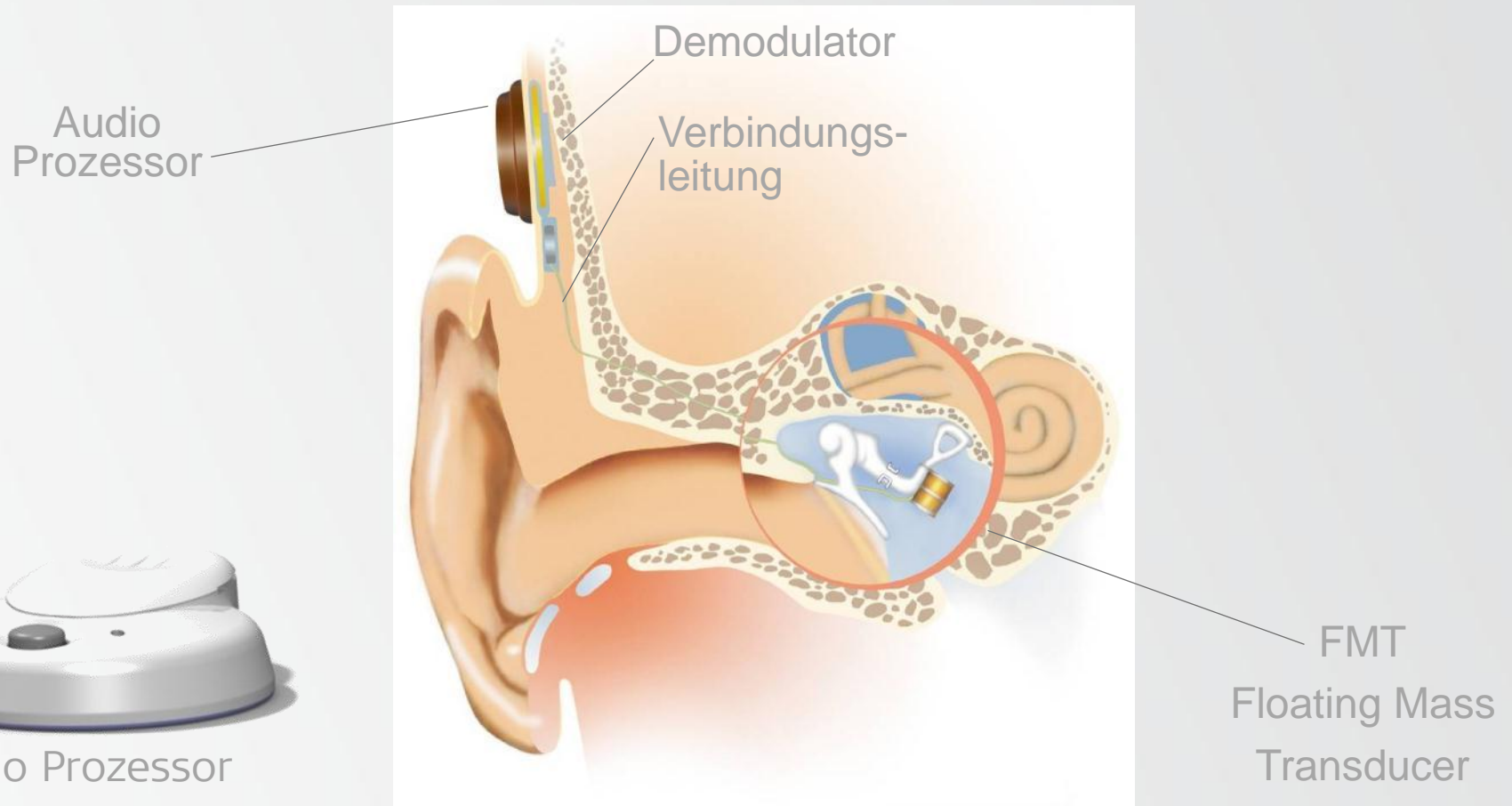
## Cochlea Implantate



# 1. Hörimplantate

## Mittelohr Implantate

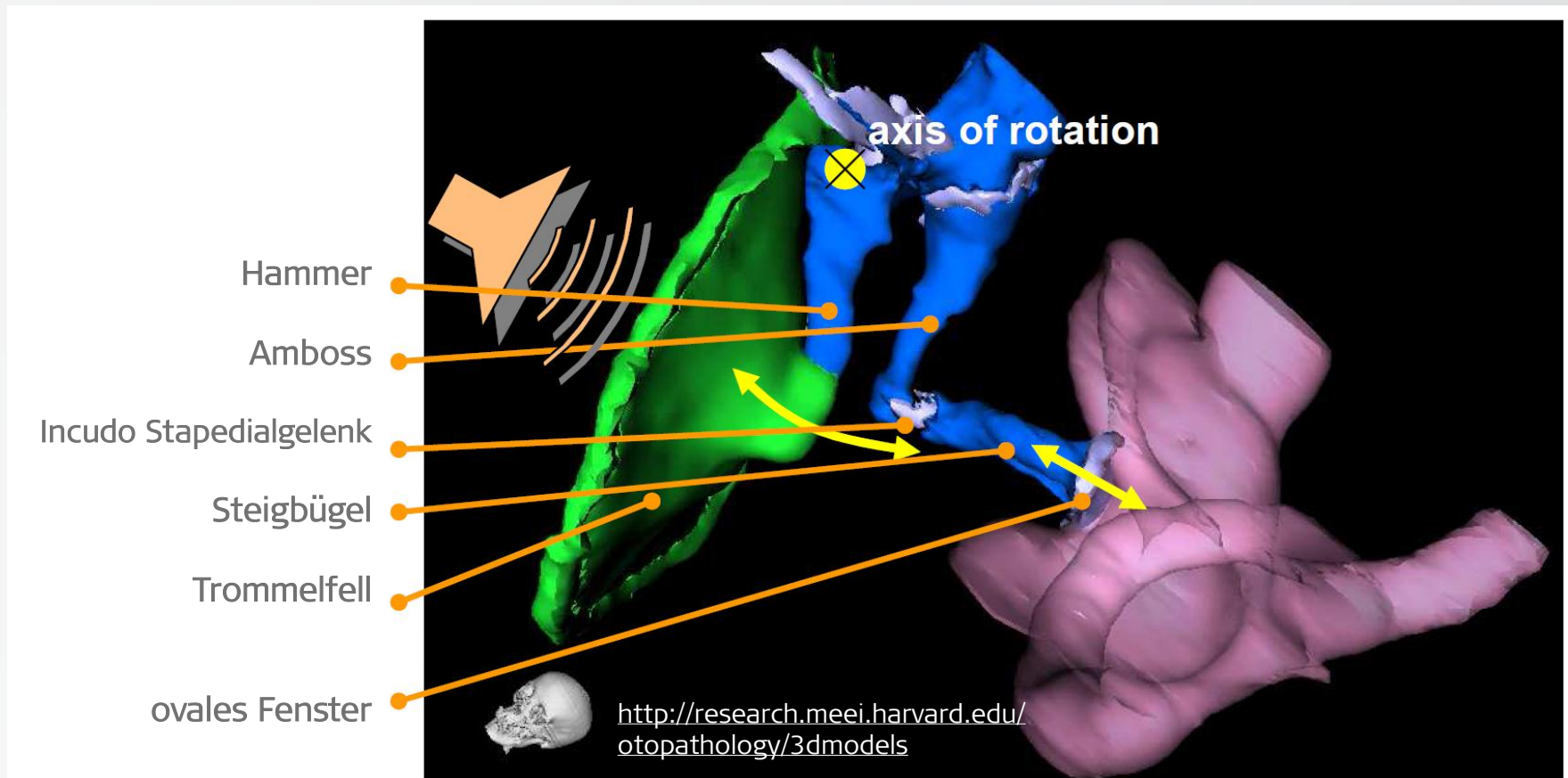
VIBRANT SOUNDBRIDGE



Audio Prozessor

# 1. Hörimplantate

## Mittelohrmechanik

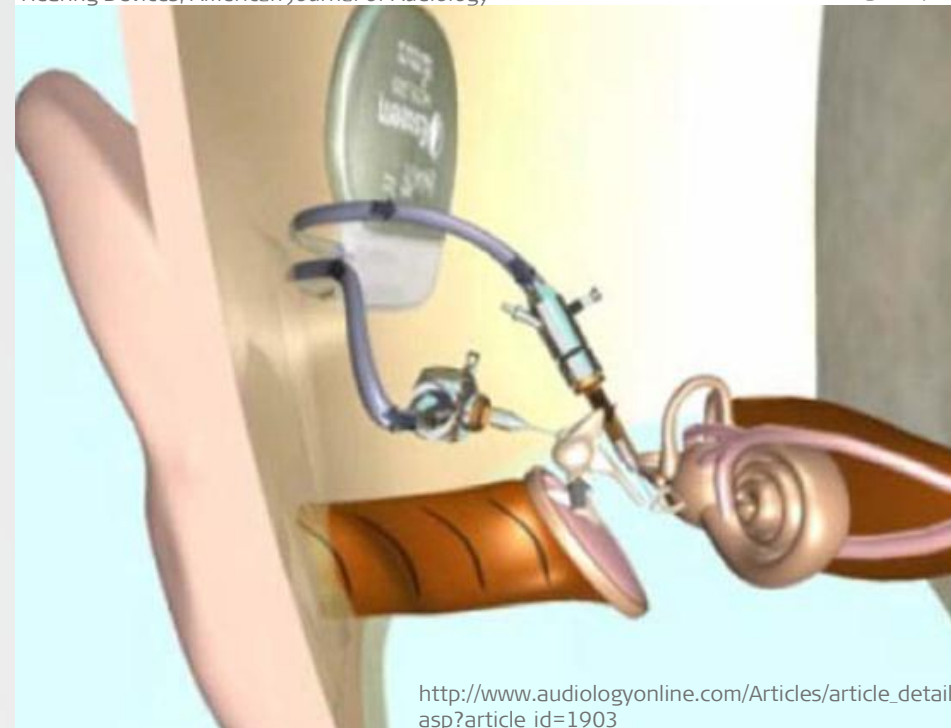
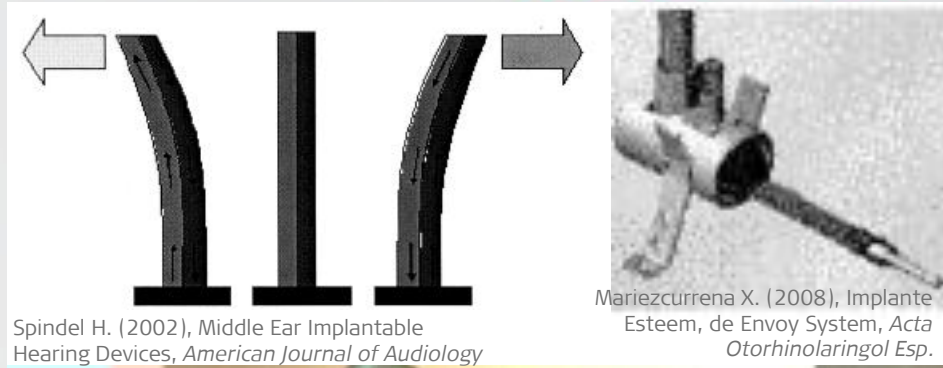


# 1. Hörimplantate

## Beispiele mechatronischer Baugruppen im Mittelohr

Firma: Produkt

- **St. Croix Medical: Envoy Esteem**
- Implex: TICA
- Otologics: Carina
- Vibrant MED-EL: VIBRANT SOUNDBRIDGE



Piezoelektrischer Bimorph Sensor & Actuator

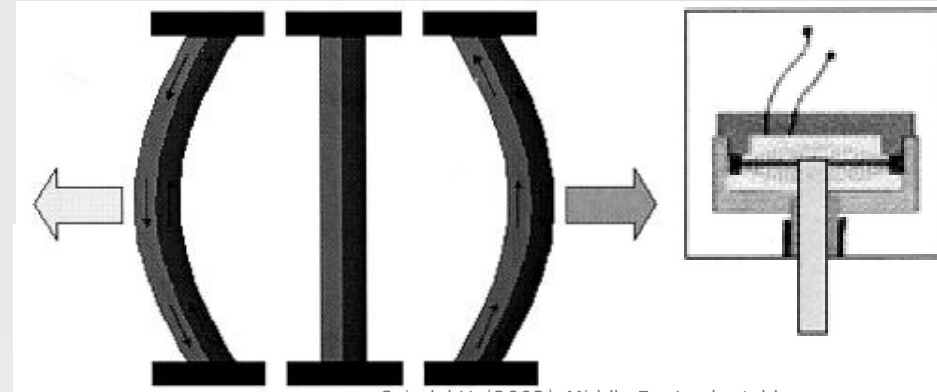


# 1. Hörimplantate

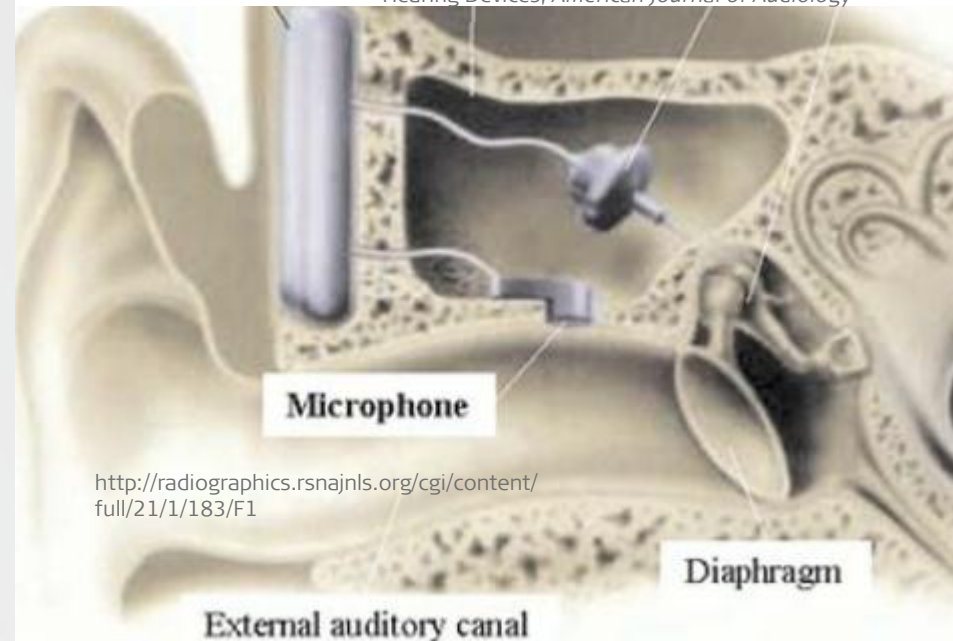
## Beispiele mechatronischer Baugruppen im Mittelohr

Firma: Produkt

- St. Croix Medical: Envoy Esteem
- **Implex: TICA**
- Otologics: Carina
- Vibrant MED-EL: SOUNDBRIDGE



Spindel H. (2002), Middle Ear Implantable Hearing Devices, *American Journal of Audiology*



Piezoelectrischer Monomorph Aktuator

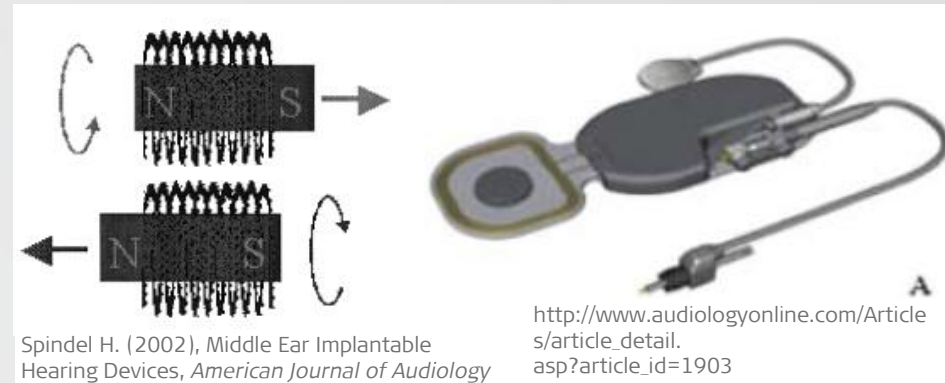


# 1. Hörimplantate

## Beispiele mechatronischer Baugruppen im Mittelohr

Firma: Produkt

- St. Croix Medical: Envoy Esteem
- Implex: TICA
- **Otologics: Carina**
- Vibrant MED-EL: VIBRANT SOUNDBRIDGE



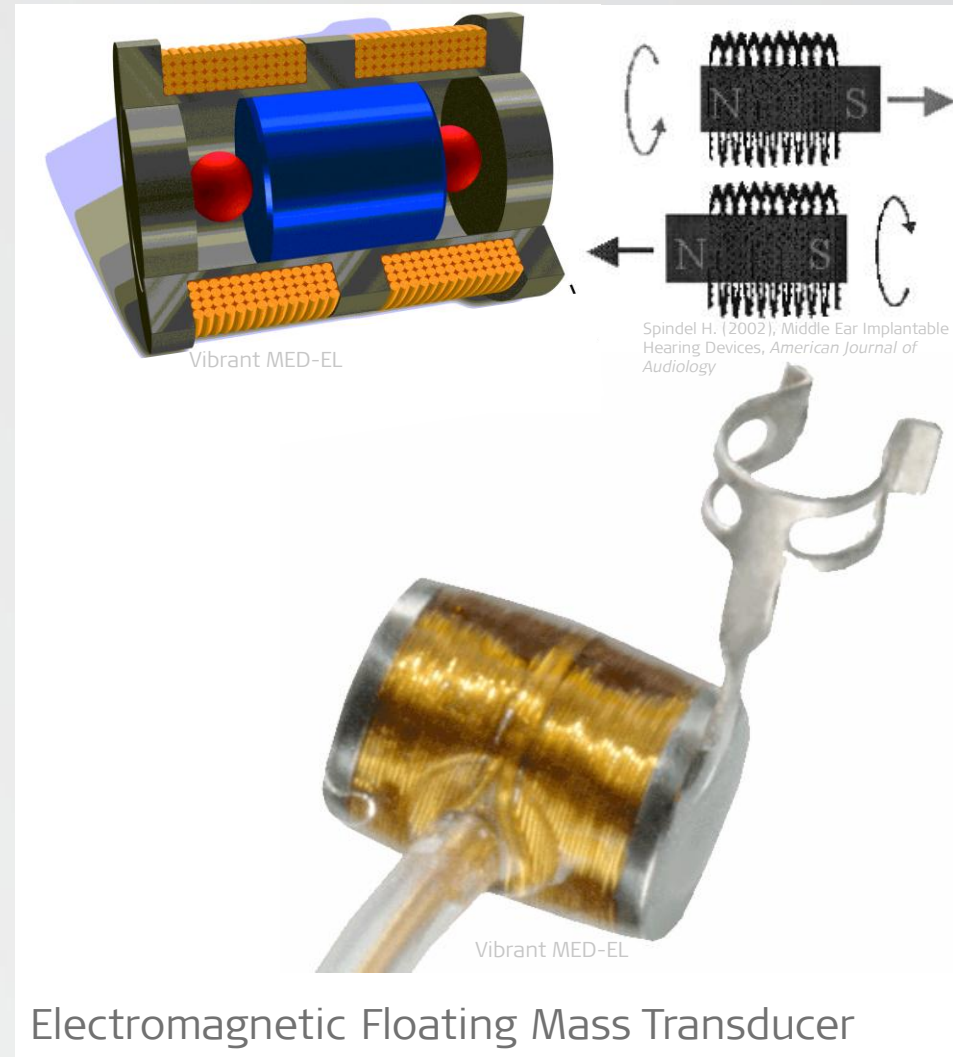
Elektromagnetischer Kolbenaktuator

# 1. Hörimplantate

## Beispiele mechatronischer Baugruppen im Mittelohr

Firma: Produkt

- St. Croix Medical: Envoy Esteem
- Implex: TICA
- Otologics: Carina
- **Vibrant MED-EL: VIBRANT SOUNDBRIDGE**



# 1. Hörimplantate

## Modellbildung in der Produktentwicklung

- Wie kann man ein im Mittelohr implantierbares System anhand einfacher, in der Produktion messbarer Akzeptanzkriterien so auslegen, spezifizieren und herstellen, dass in möglichst jedem Mittelohr der gewünschter Hörerfolg sichergestellt ist?
- Wie kann man erreichen, dass die Systembeschreibung von allen beteiligten Disziplinen nachvollzogen werden kann?

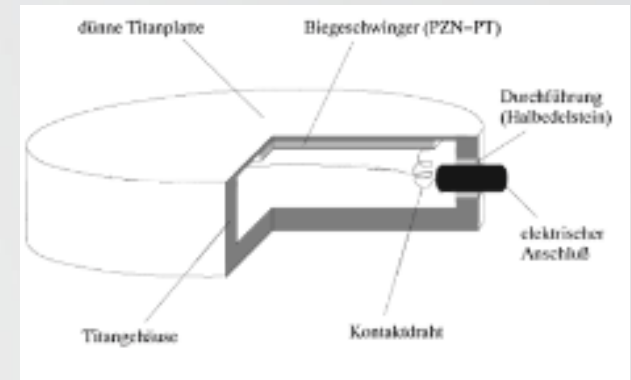
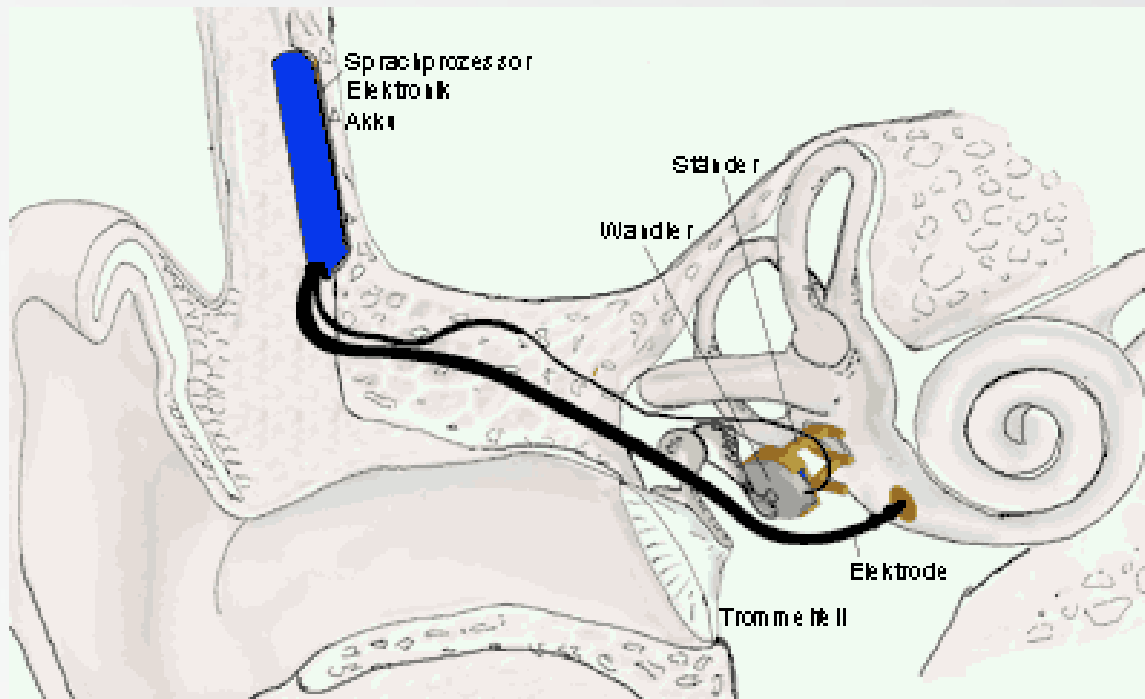
# 1. Hörimplantate

## Modellbildung in der Produktentwicklung

### Mögliche Antworten

- Zu liefern ist eine nachvollziehbare jedoch möglichst realitätsnahe Beschreibung des geplanten komplexen Systems.
- Gefordert ist eine nachvollziehbare jedoch möglichst realitätsnahe Beschreibung durch ein veranschaulichendes Systemmodell.

# Beispiel: implantierbarer Mikrofonsensor



<http://www.uniklinikum-dresden.de/das-klinikum/kliniken-polikliniken-institute/hno/forschung/forschungslabor-gehör/projekte/mikrofon>

# Inhalt

1. Hörimplantate
2. **Modellbildung**
3. Systemdesign
4. Systemanalyse

## 2. Modellbildung

### Methodik (Beispiel)

I.

Modellbeschreibung eines gesunden Mittelohres

II.

Modellverifizierung gegen bekannte Eigenschaften eines gesunden Mittelohres

III.

Modellmodifikation zur Vorhersage der Eigenschaften des chirurgisch modifizierten biologischen Systems



# 2. Modellbildung

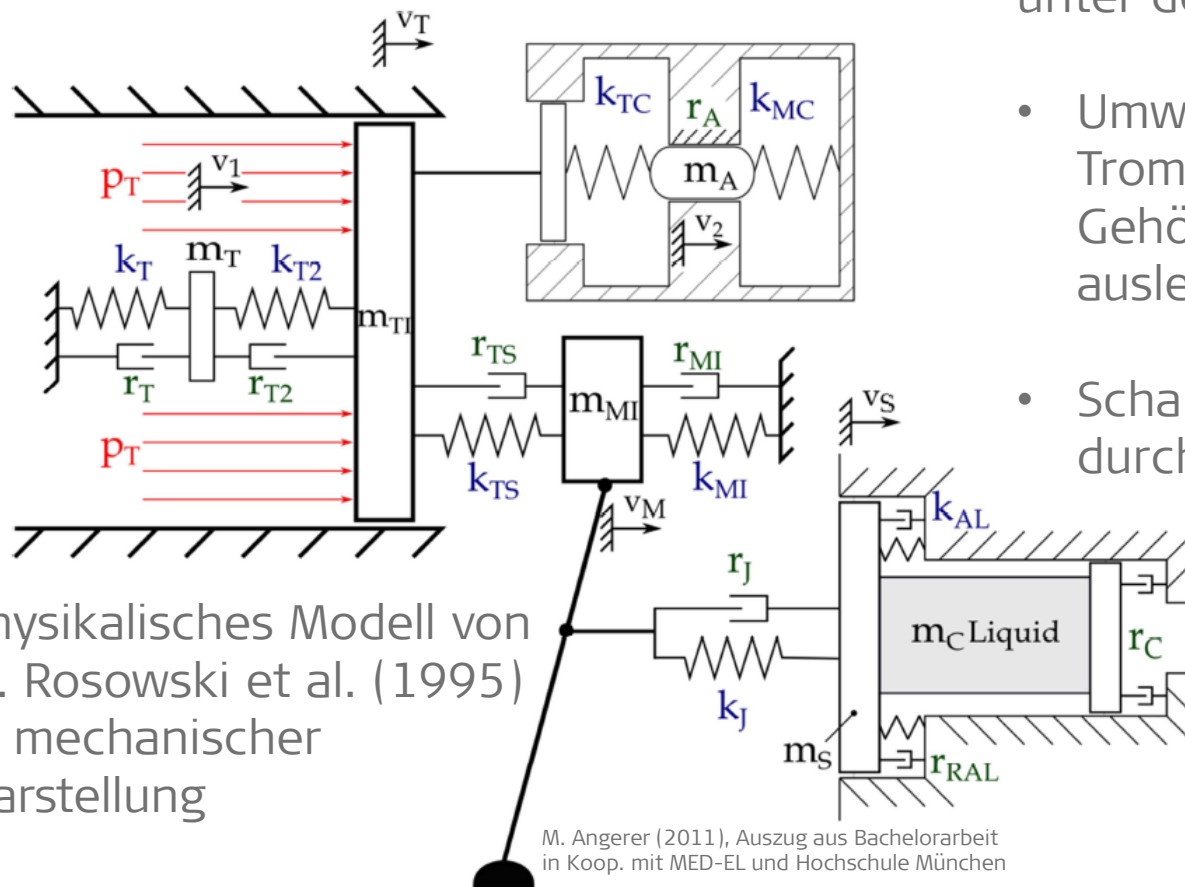
## Physikalisches Systemmodell des Mittelohres

### I. Modellebeschreibung eines gesunden Mittelohres

#### Aufgabenstellung:

Ausreichend genaues Abbild des realen Systems Mittelohr unter dem Aspekt der

- Umwandlung von Trommelfellschalldruck in Gehörknöchelchenauslenkung (Umbo, Stapes)
- Schallinduzierter Kraftfluss durch den Stapes



Physikalisches Modell von J.J. Rosowski et al. (1995) in mechanischer Darstellung

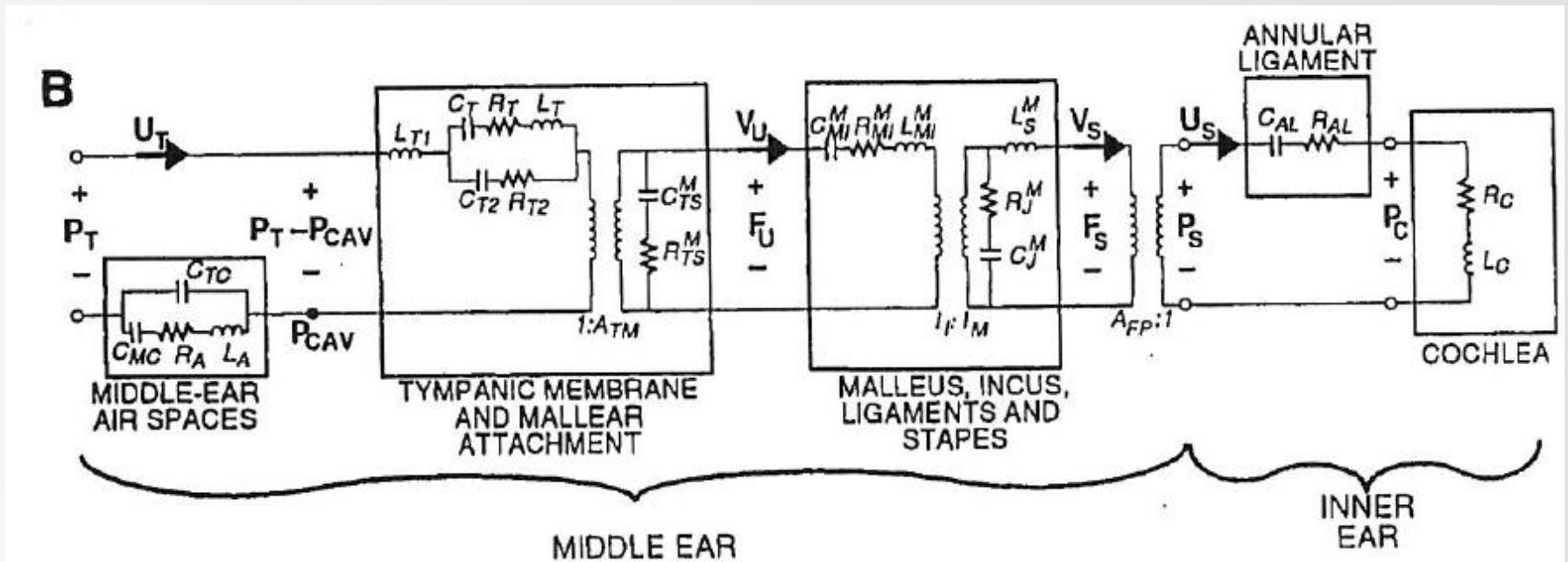
M. Angerer (2011), Auszug aus Bachelorarbeit in Koop. mit MED-EL und Hochschule München

Festlegen der

- Größen &
- Wertebereiche (Frequenzband, Dynamik)

## 2. Modellbildung

### Physikalisches Systemmodell des Mittelohres



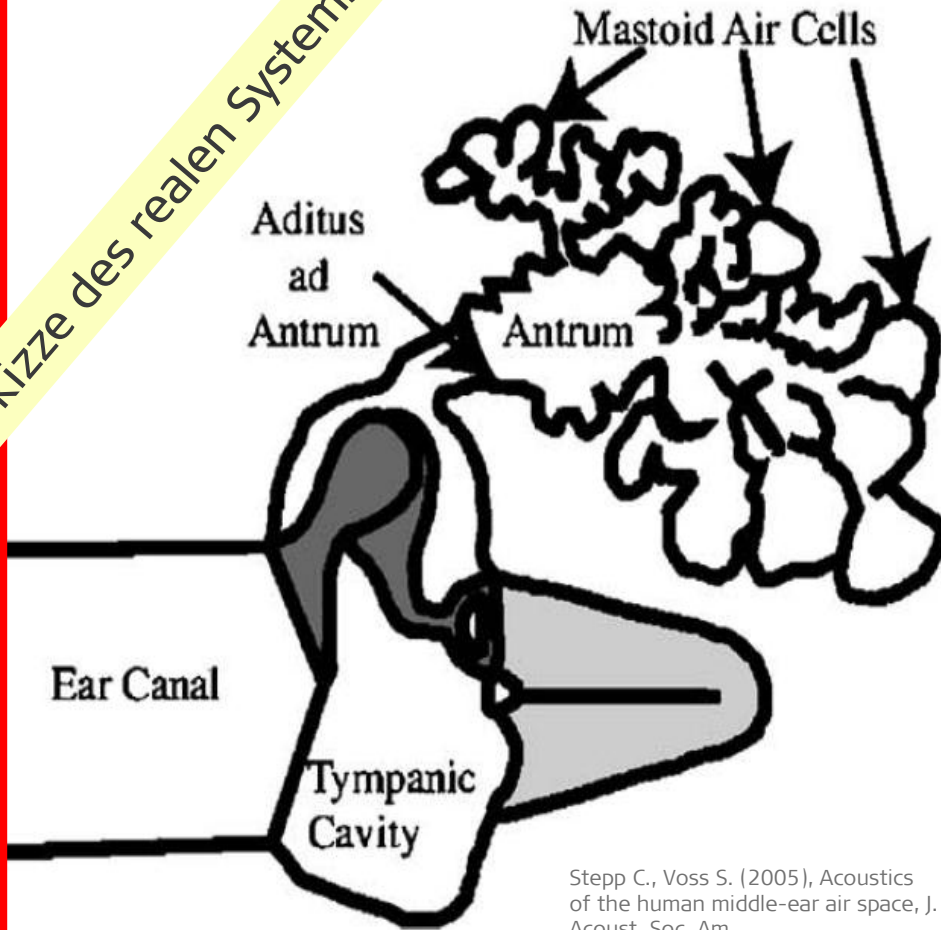
Mechanical and Acoustic Analysis of Middle ear Reconstruction J.J. Rosowski, S.N. Merchant(1995)

## 2. Modellbildung

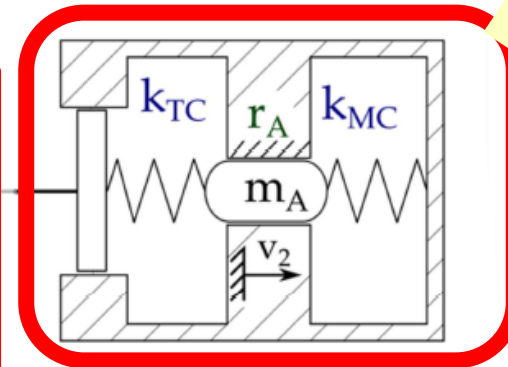
Beschreibung der Funktionselemente des Mittelohres durch konzentrierte Bauteile

### Hohlräume des Mittelohres

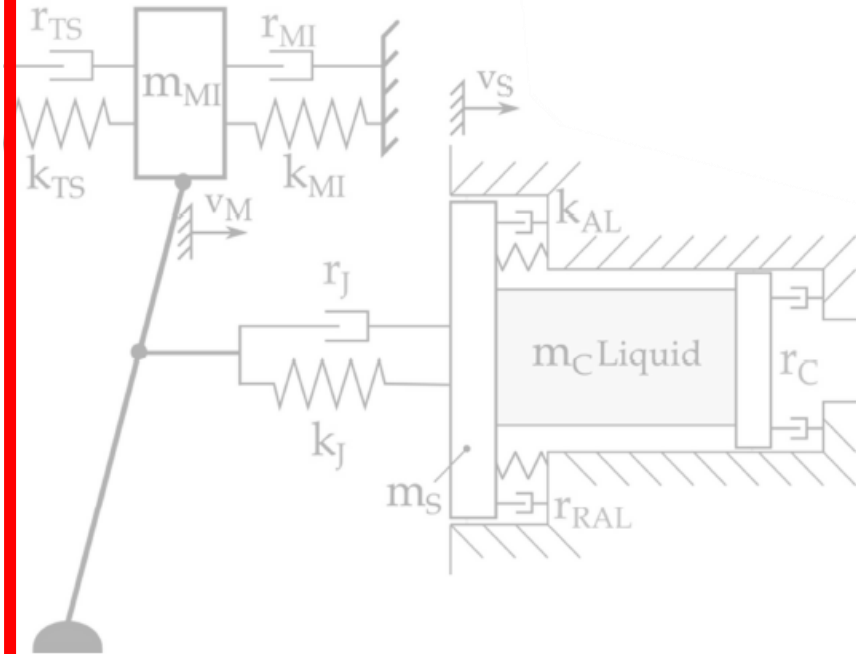
Skizze des realen Systems



Stepp C., Voss S. (2005), Acoustics of the human middle-ear air space, J. Acoust. Soc. Am



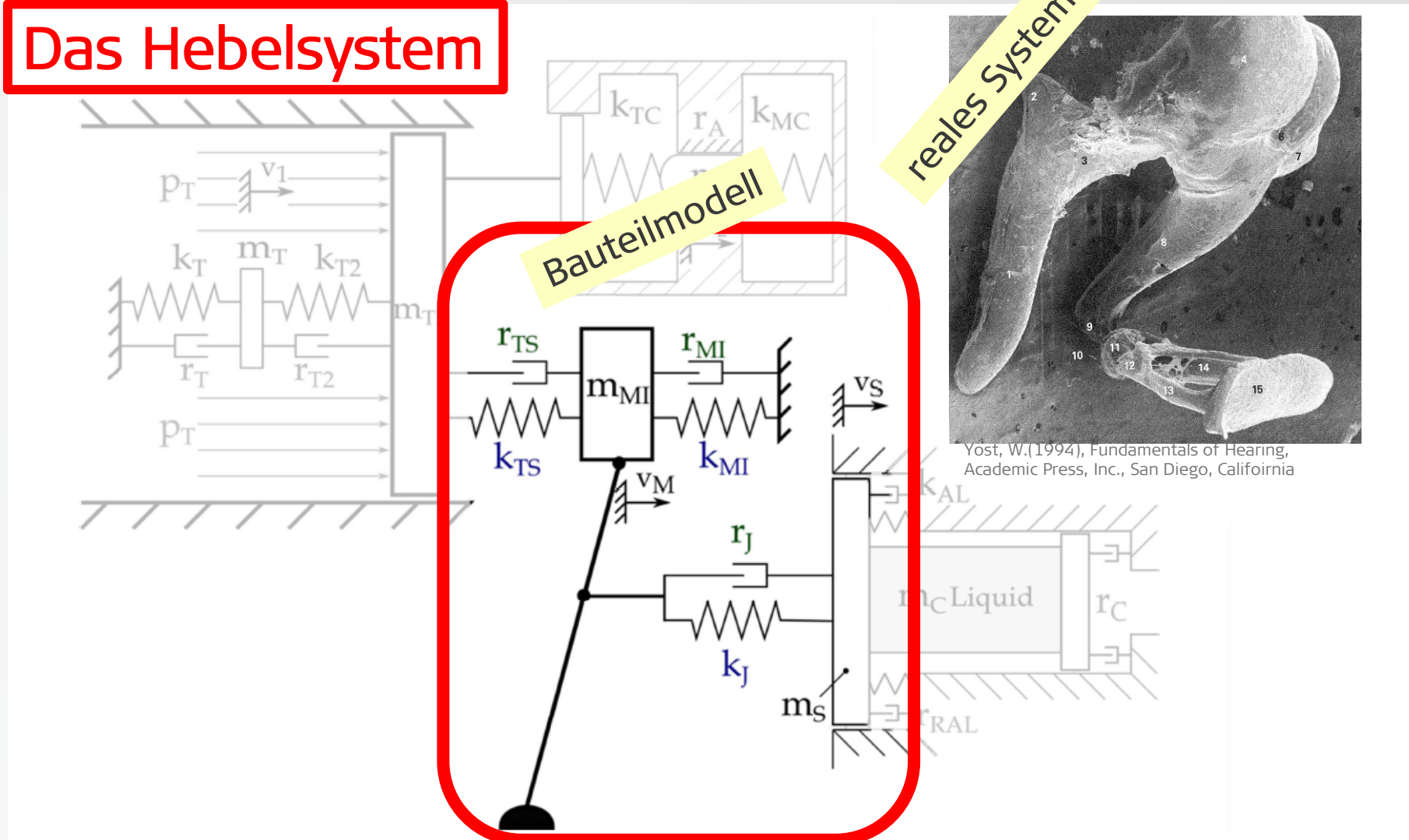
Bauteilmodell



# 2. Modellbildung

Beschreibung der Funktionselemente des Mittelohres durch konzentrierte Bauteile

## Das Hebelsystem

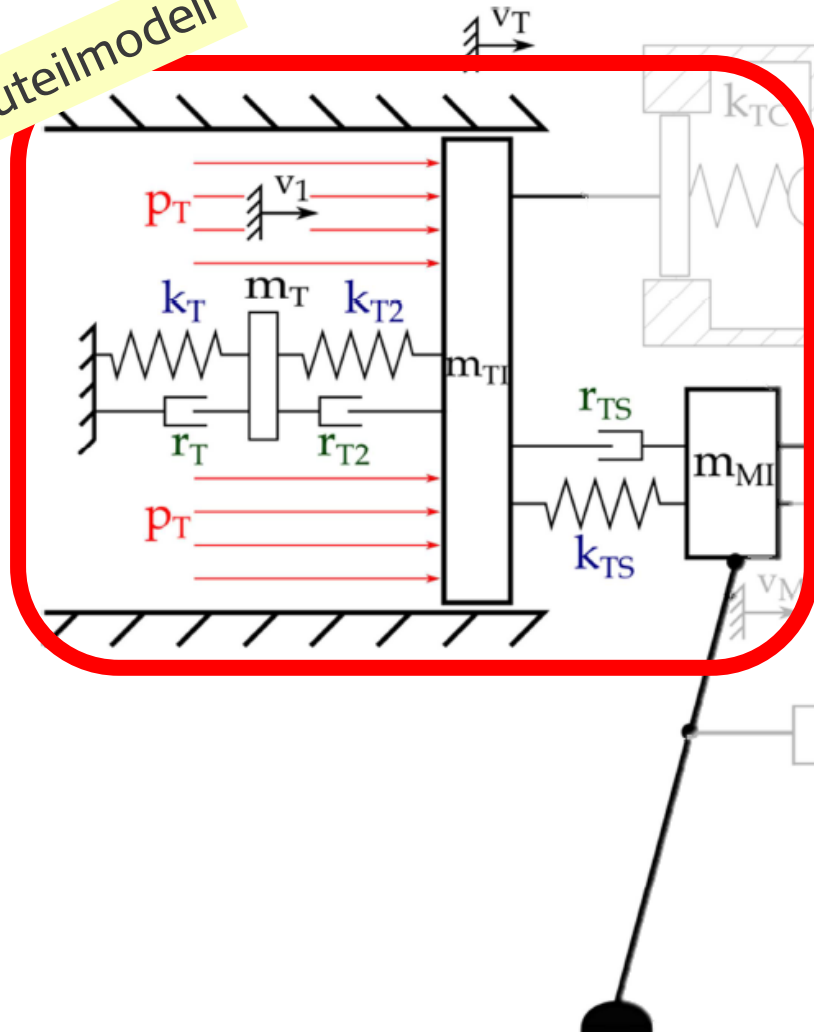


Yost, W. (1994), Fundamentals of Hearing, Academic Press, Inc., San Diego, California

# 2. Modellbildung

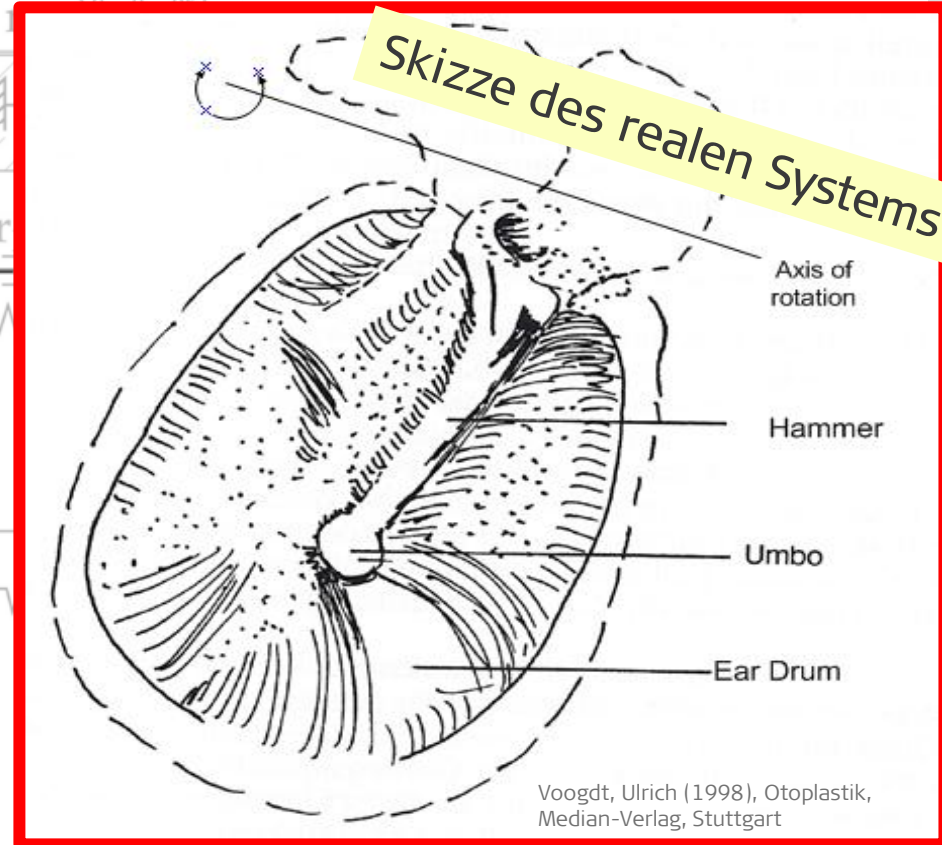
Beschreibung der Funktionselemente des Mittelohres durch konzentrierte Bauteile

Bauteilmodell



Trommelfell und dessen Verbindung mit dem Malleus

Skizze des realen Systems

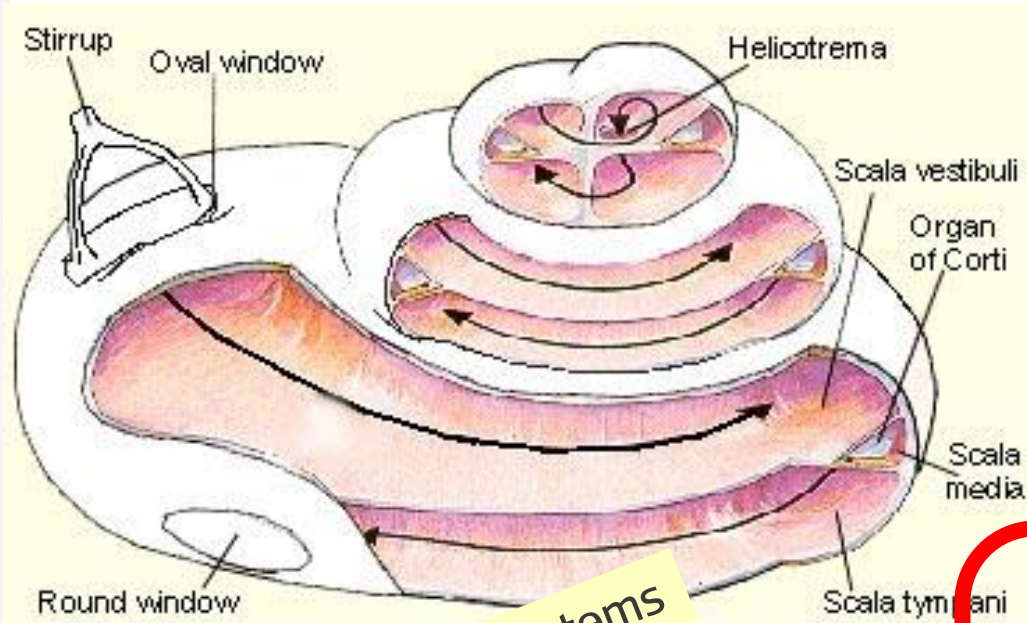


Voogdt, Ulrich (1998), Otoplastik, Median-Verlag, Stuttgart



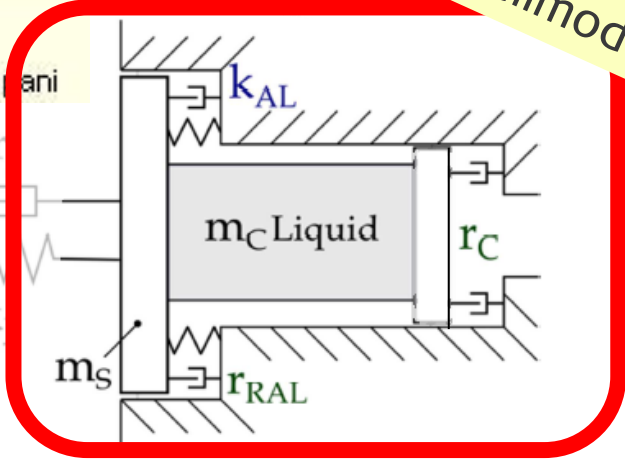
# 2. Modellbildung

## Beschreibung der Funktionselemente des Mittelohres durch konzentrierte Bauteile



Cochlea

Bauteilmodell

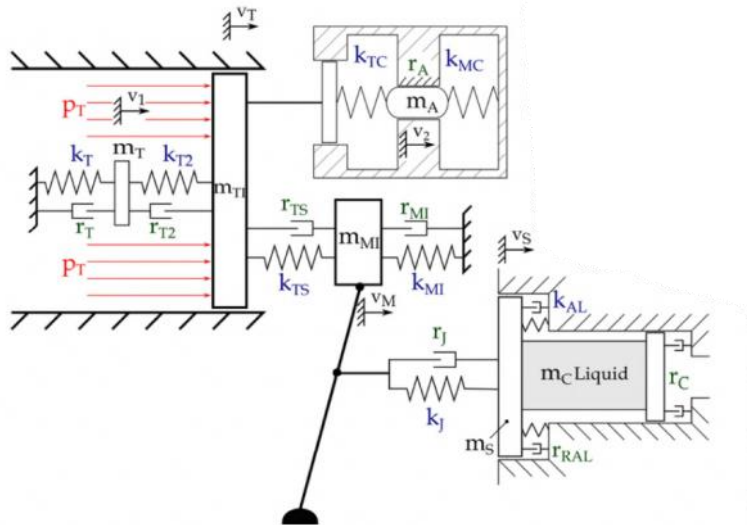


Skizze des realen Systems

www.hearingcentral.com

# 2. Modellbildung

## Systemmodell des Mittelohres



Vom Physikalischen Systemmodell des Mittelohres zum Mathematischen Modell

- Definition der Größen, Richtungen
- Bilanzgleichungen
- Bewegungsgleichungen in Zustandsnormalform

M. Angerer (2011), Auszug aus Bachelorarbeit in Koop. mit MED-EL und Hochschule München

**Zustandsgleichung:**

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \vdots \\ \dot{x}_n(t) \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix}}_A \underbrace{\begin{pmatrix} x_1(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{pmatrix}}_{\text{Zustandsvariablen}} + \underbrace{\begin{pmatrix} b_{11} & \cdots & b_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1} & \cdots & b_{nn} \end{pmatrix}}_B \underbrace{u_1(t)}_{\text{Eingangvariable}}$$

**Ausgangsgleichung:**

$$\underbrace{\begin{pmatrix} v_1(t) \\ \vdots \\ v_n(t) \end{pmatrix}}_{\text{AusgangsvARIABLEN}} = \underbrace{\begin{pmatrix} c_{11} & \cdots & c_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n1} & \cdots & c_{nn} \end{pmatrix}}_C \underbrace{\begin{pmatrix} x_1(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{pmatrix}}_{\text{Zustandsvariablen}} + \underbrace{(0)}_D u_1(t)$$



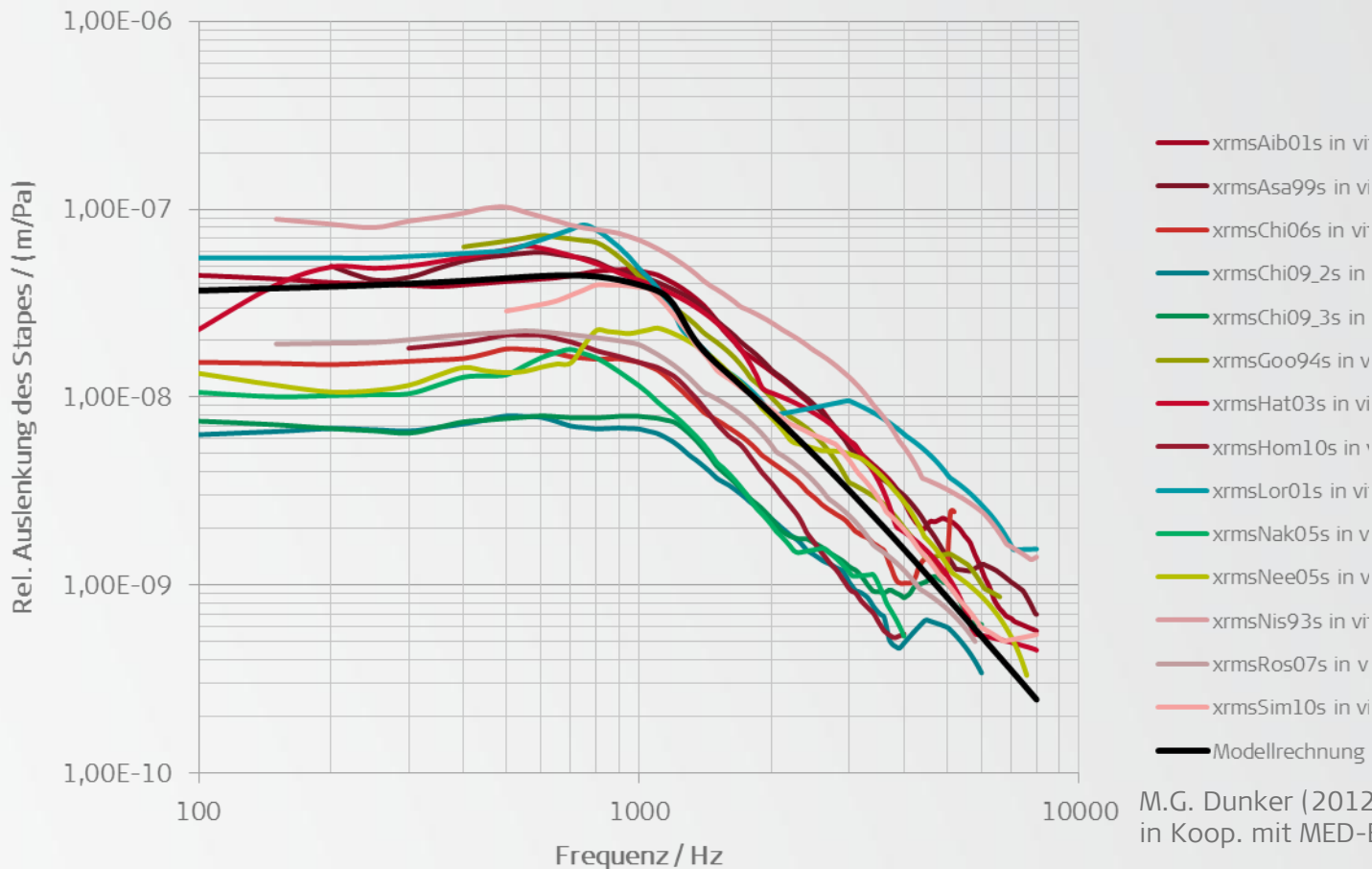
# 2. Modellbildung

## Systemmodell des Mittelohres



Modellverifizierung gegen bekannte Eigenschaften eines gesunden Mittelohres

Vergleich Literaturdaten - Modellrechnung



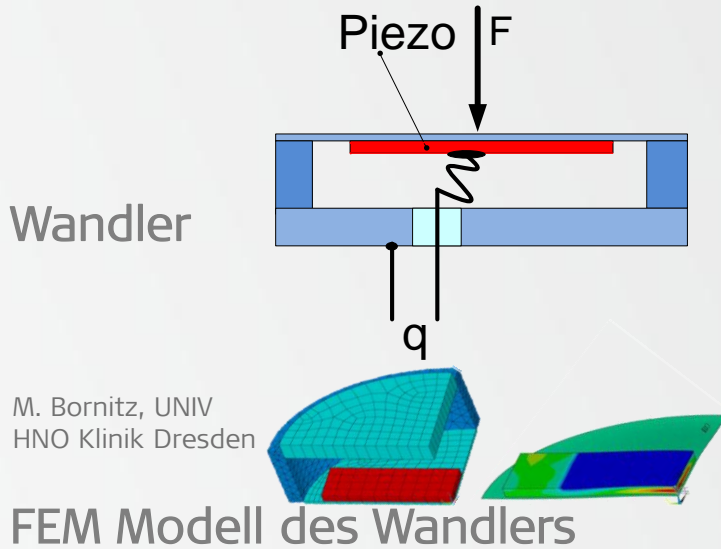
M.G. Dunker (2012), Auszug aus Bachelorarbeit in Koop. mit MED-EL und Hochschule München

# Inhalt

1. Hörimplantate
2. Modellbildung
3. **Systemdesign**
4. Systemanalyse

# 3. Systemdesign

## FEM Modell und mechanisches Bauteilmodell des Sensors

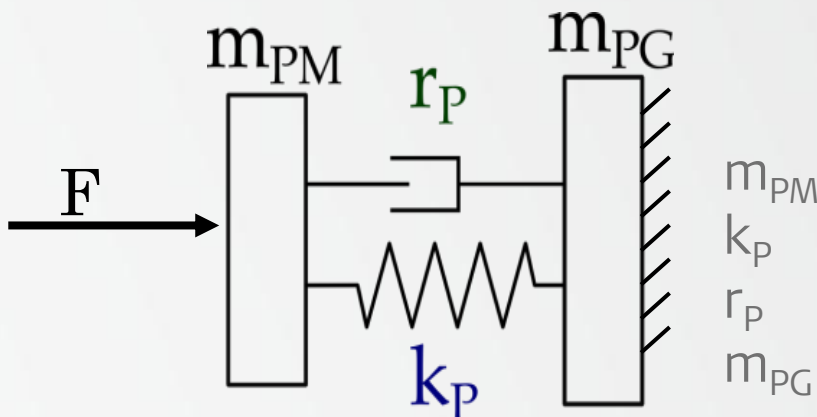


$K_{pq}$  = Ladungsertrag in pC/N

$$K_{FQ} = \left| \frac{q_a}{F_e} \right|$$

$K_{pu}$  = Spannungsertrag in mV/N

$$K_{FU} = \left| \frac{u_a}{F_e} \right|$$



- $m_{PM}$  = konzentrierte Membranmasse
- $k_P$  = konzentrierte Membransteifigkeit
- $r_P$  = konzentrierte laminare Reibung
- $m_{PG}$  = Sensorgehäusemasse

Vereinfachtes mechanisches Bauteilmodell des Wandlers

# 3. Systemdesign

## Systemmodell

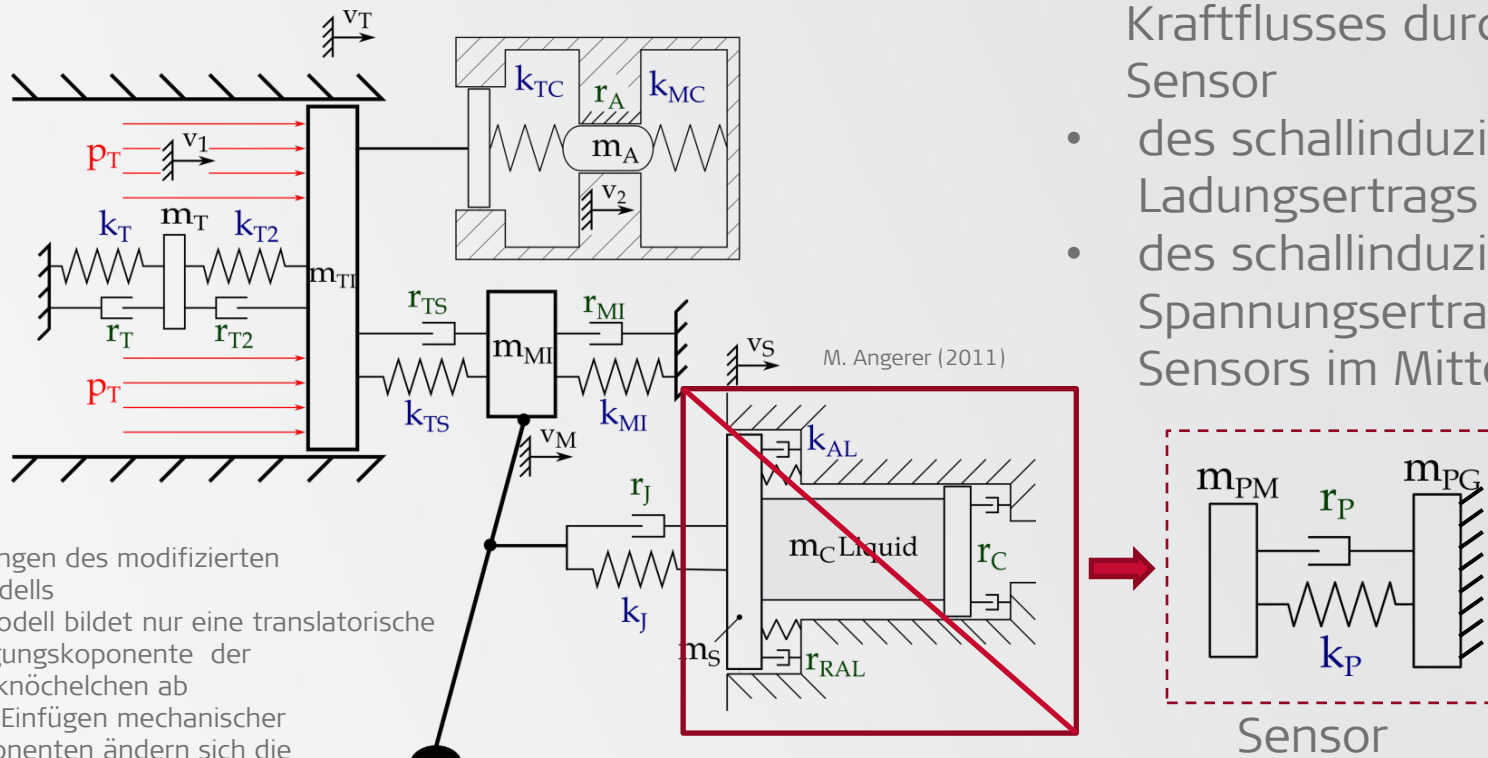
III.

Modellmodifikation zur Vorhersage der Eigenschaften des Gesamtsystems

### Aufgabenstellung:

Ausreichend genaues Abbild des realen Systems Sensor im Mittelohr unter dem Aspekt

- des schallinduzierten Kraftflusses durch den Sensor
- des schallinduzierten Ladungsertrags
- des schallinduzierten Spannungsertrags des Sensors im Mittelohr



Ersatz des Bauteilmodells der Cochlea durch das Modell des Sensors

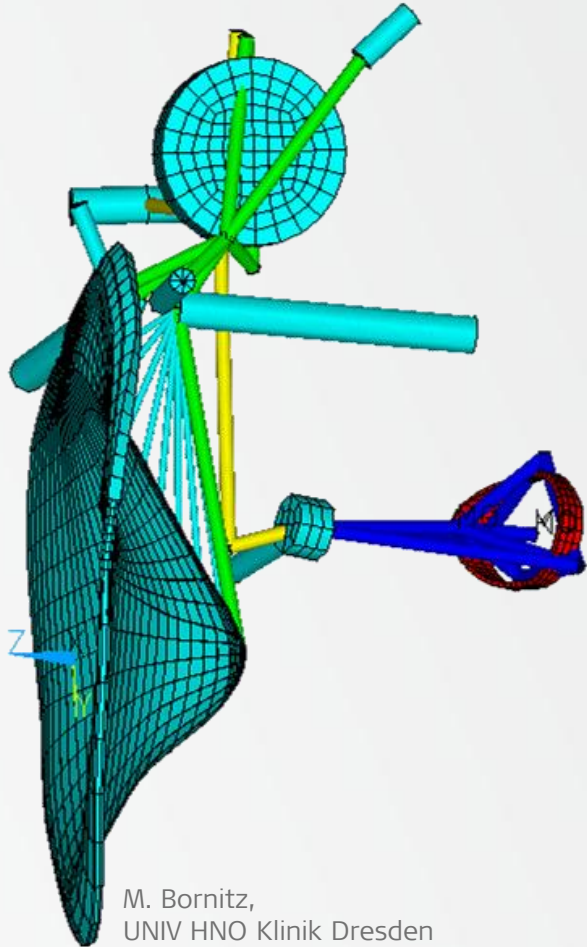
Einschränkungen des modifizierten Mittelohrmodells

- Das Modell bildet nur eine translatorische Bewegungskomponente der Gehörknöchelchen ab
- Durch Einfügen mechanischer Komponenten ändern sich die Rotationsachsen und die Vorspannungen der nichtlinearen Steifigkeiten, die Bauteilparameter müssen entsprechend angepasst werden.

# Inhalt

1. Hörimplantate
2. Modellbildung
3. Systemdesign
4. **Systemanalyse**

Ist das Systeminbetriebnahmeverhalten anhand der formulierten Akzeptanzkriterien korrekt spezifiziert?



M. Bornitz,  
UNIV HNO Klinik Dresden

Ergebnisvergleich

FEM vs. Systemmodell

- Kraftfluss zu Schalldruck
- Ladungsertrag zu Schalldruck
- Spannungsertrag zu Schalldruck

Ergebnisvergleich

Reale Felsenbeinmessung vs.

Systemmodell

- Ladungsertrag zu Schalldruck
- Spannungsertrag zu Schalldruck

Beispiel für eine Anwendung von Modellbildung und Simulation zur Produktentwicklung von Hörimplantaten

## Strukturmodell

Abgespeckte Systembeschreibung

- Einfach nachvollziehbar
- Konzentrierte Parameter, LZI
- Leicht Modifizierbar
- Beschreibung
  - aller wesentlichen Produkteigenschaften
  - Worst Case / Best Case Eigenschaften
- Spezifizierung messbarer Akzeptanzkriterien, die die geforderten Systemeigenschaften sicherstellen.

## Analysemodell

Detailanalyse

Bauteile und Gesamtsystem

- FEM
- Berücksichtigung räumlich verteilter Effekte und nichtlinearer Eigenschaften
- Berücksichtigung aller Betriebszustände
- Berechnung von Parametern des Einfachmodells
- Verifizierung der Systembeschreibung



## Themen für Studien und Abschlussarbeiten

### Mechatronik im Mittelohr

- Erstellung und Modifikation von domäneübergreifenden Systemmodellen in SimScape
- Animation der Systemdynamik
- Parametervariation zur Berücksichtigung anatomischer Streuungen
- Modellerweiterung zur Berücksichtigung der Gehörgangresonanz
- Modellerweiterung zur Berücksichtigung der rotatorischen Bewegungskomponente der Stapesbewegung

Vielen Dank für  
Ihr Interesse



hearLIFE