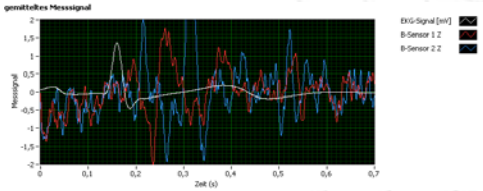
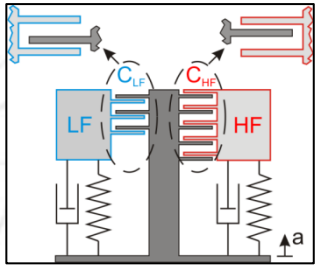
MEMS-Schwingungssensoren - Funktion und Applikation in Medizin und Technik

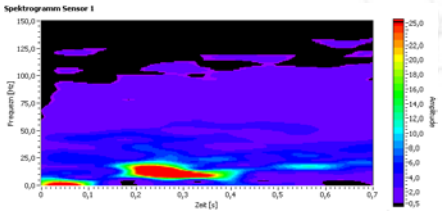


Technische Universität Chemnitz

Professur für Mikrosystem- und Gerätetechnik

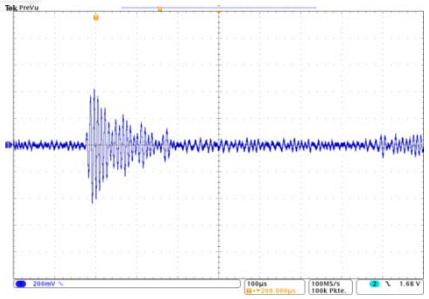
Dr.-Ing. Marco Dienel





www.tu-chemnitz.de/etit/microsys

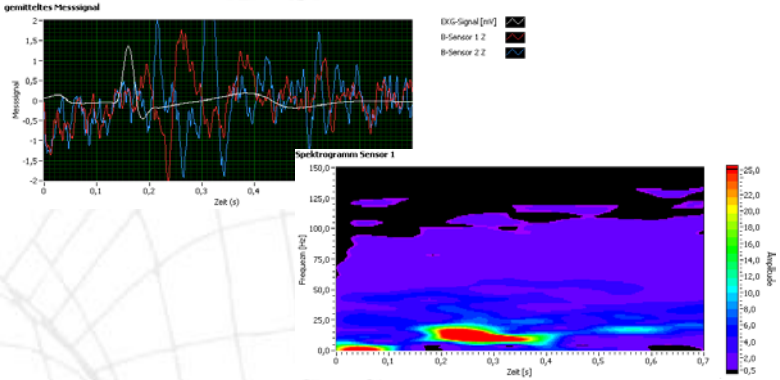
Marco.Dienel@etit.tu-chemnitz.de



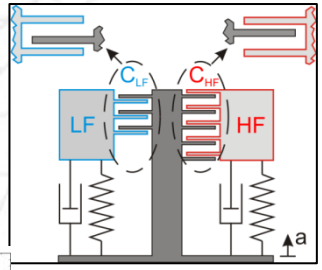
ISBN 978-3-00-038084-6

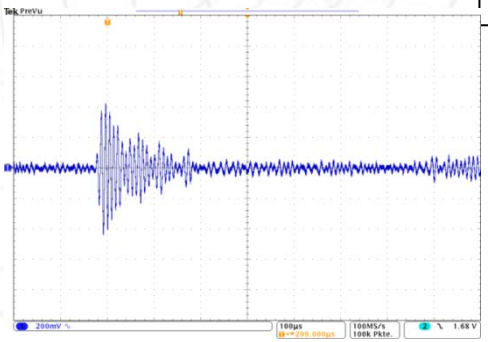
Gliederung des Vortrages

- MEMS-Sensor für die Herzdiagnose
  - Sensor
  - Systembeschreibung
  - Ergebnisse



- MEMS-Sensor zur Körperschallmessung
  - Grundlagen für Schwingungssensoren
  - Aufbau und Funktionsweise des Sensors
  - Messergebisse





ISBN 978-3-00-038084-6

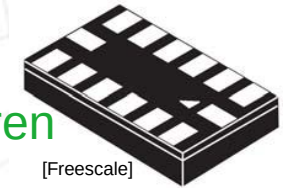
MEMS-Sensor für die Herzdiagnose
Hintergrund

- Abhorchen (Auskultation) des Herzes mittels Stethoskop etablierte Untersuchungsmethode
  - **Probleme:**
    - Auflösungsvermögen des menschlichen Ohrs ist begrenzt
    - Diagnosen sind abhängig von Erfahrung des Arztes

- Einsatz von elektronischen Stethoskopen (Mikrofon)
  - Signalverstärkung
  - Auswertung am PC
  - Geringe Empfindlichkeit bei geringen Frequenzen (<50 Hz)

⇨ Zusätzliche Untersuchungsmethoden notwendig (Echokardiographie)

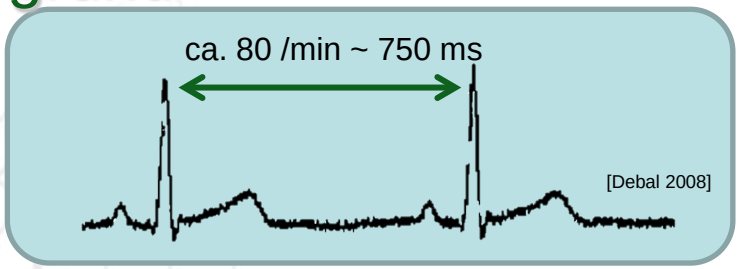
⇨ Einsatz von MEMS-Beschleunigungssensoren bzw. Schwingungssensoren



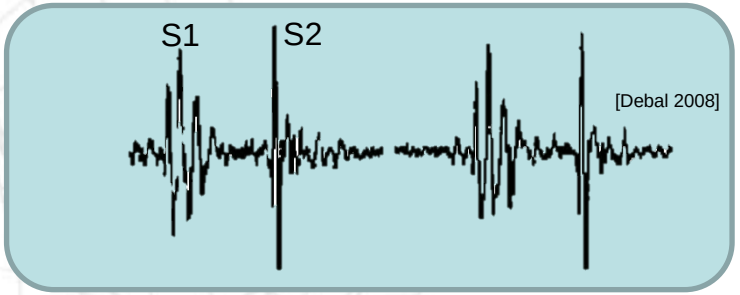
[Freescale]

MEMS-Sensor für die Herzdiagnose
medizinischer Hintergrund

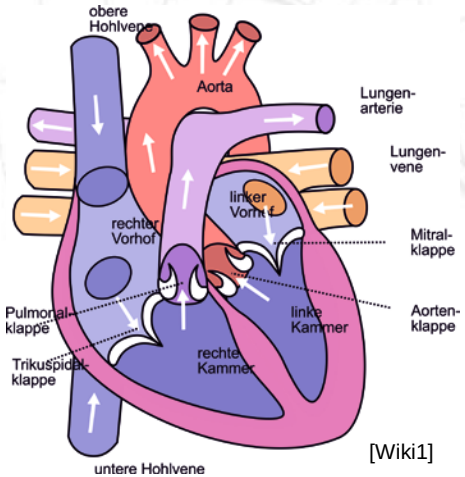
Elektrische Herzerregung messbar im EKG



Mechanische Herzaktion



- S1: Schließen von Mitral- und Trikuspidalklappe
- S2: Schließen der Aorten- und Pulmonalklappe



[Wiki1]

Ausbreitung von Schallwellen durch Brustkorb z.T. Lunge bis zur Hautoberfläche

ISBN 978-3-00-038084-6

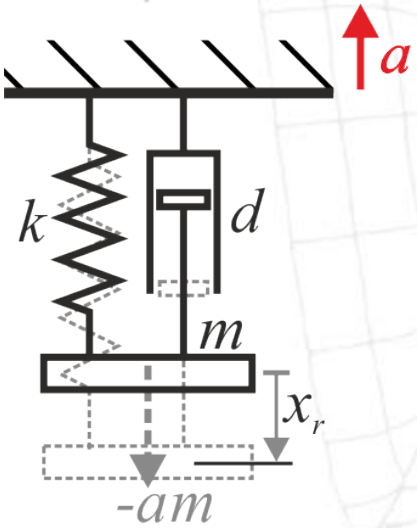
Dirk Tenholte
Marco Dienel

MEMS-Sensor für die Herzdiagnose
MEMS-Sensor

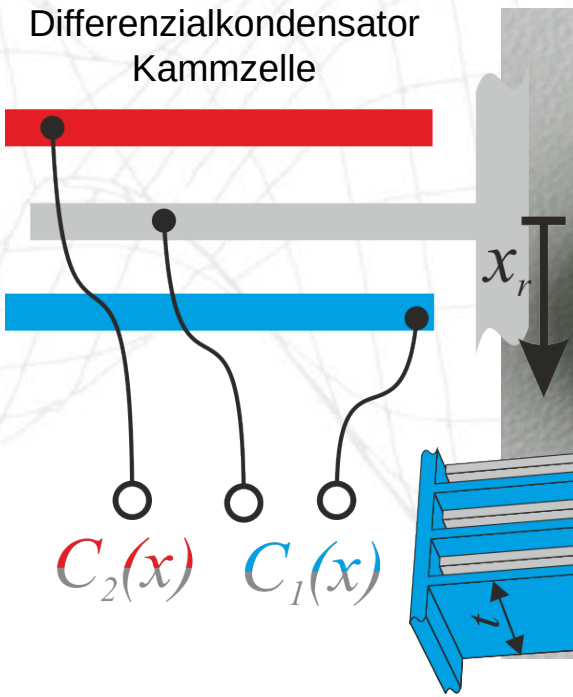
Technische Daten

- 3 achsiger mikromechanischer Beschleunigungssensor (±1,5g, 800mV/g)
- Grenzfrequenzen 3,4 kHz bzw. 6 kHz

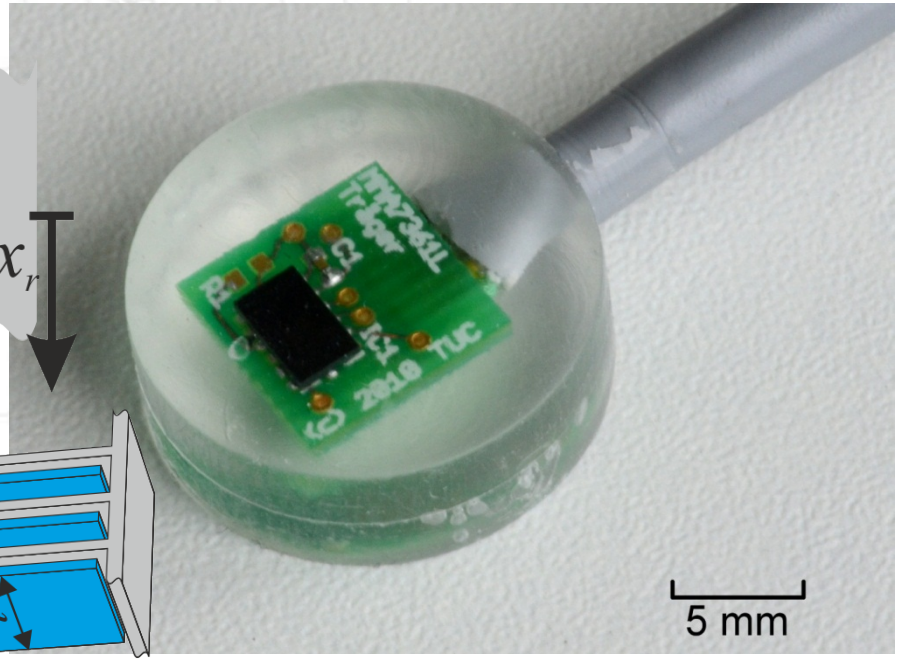
Prinzipieller Aufbau



Mechanisches Modell



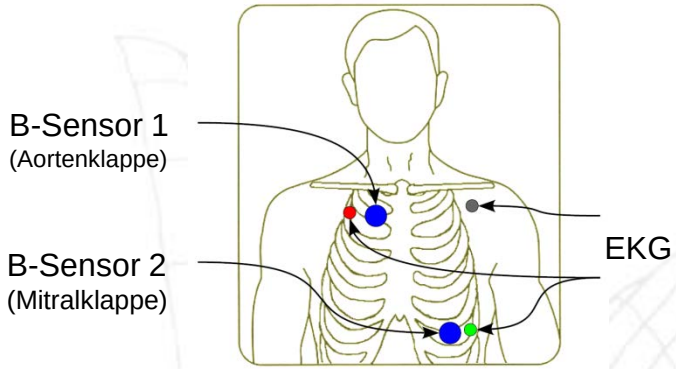
MEMS-Sensor mit Filter

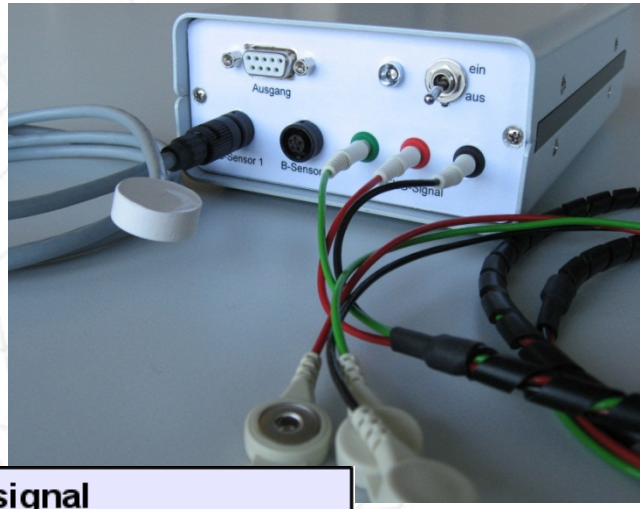


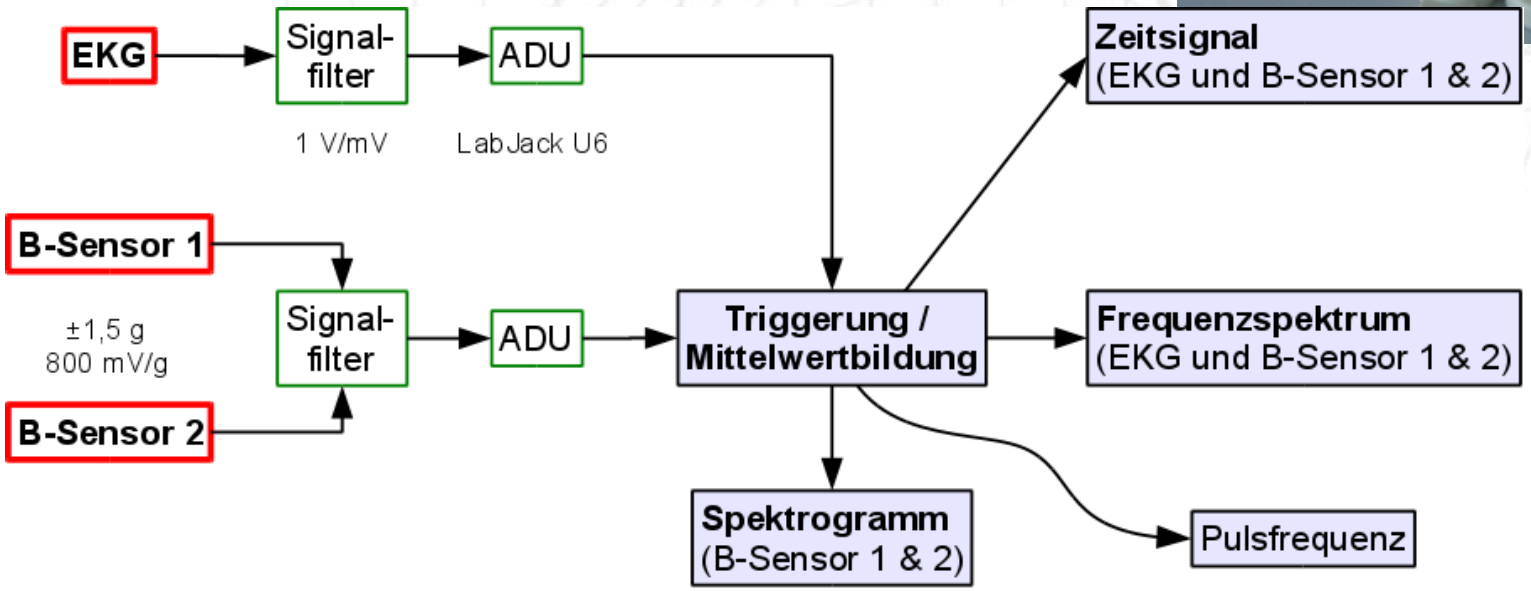
ISBN 978-3-00-038084-6

Dirk Tenholte
Marco Dienel

MEMS-Sensor für die Herzdiagnose
Messsystem



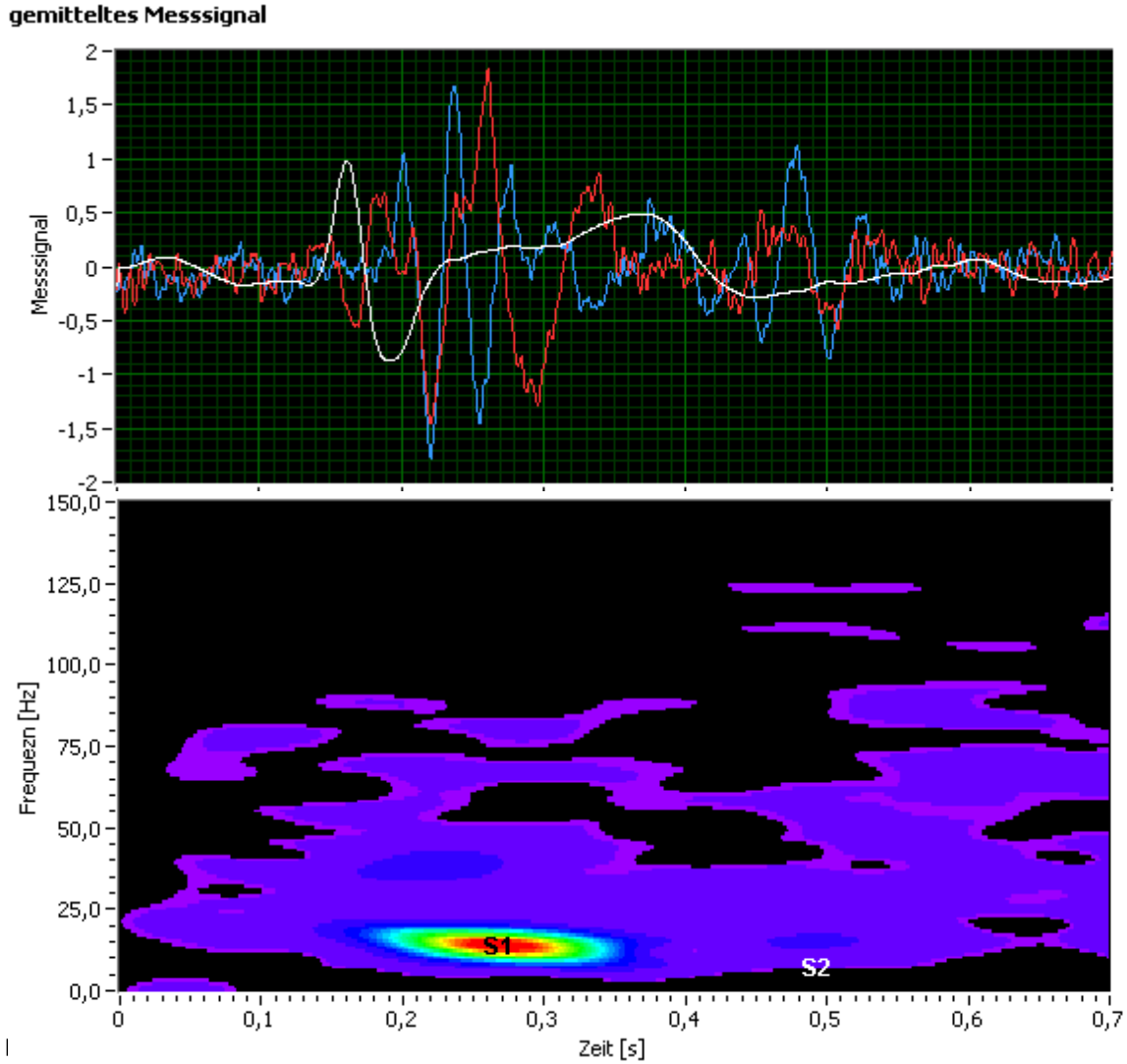


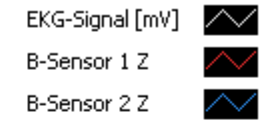


ISBN 978-3-00-038084-6

Dirk Tenholte
Marco Dienel

MEMS-Sensor für die Herzdiagnose
Referenzmessungen



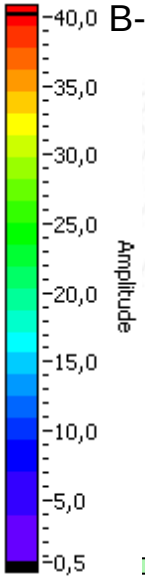


Messung

Messung EKG, Sensor 1 & 2
Trigger auf EKG

Messung in Ruhe im Sitzen

B-Sensor 1 (über Mitralklappe, S1)
B-Sensor 2 (über Aortenklappe, S2)

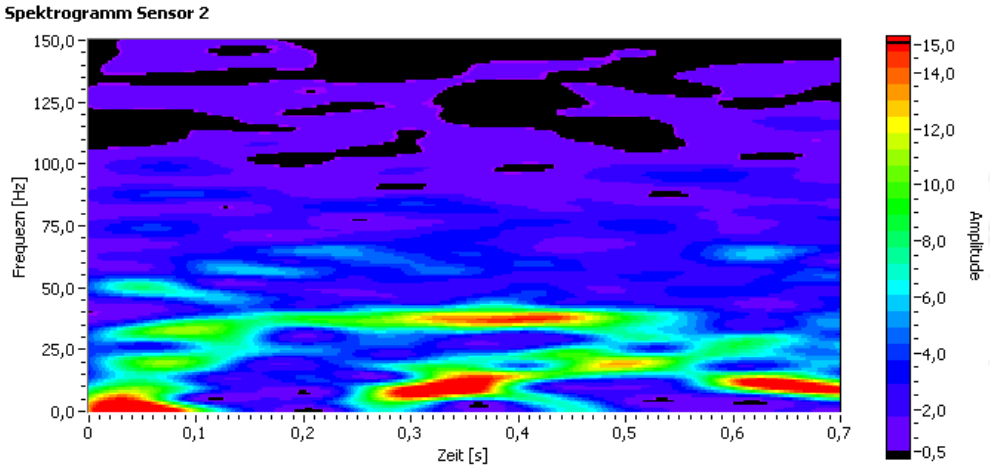


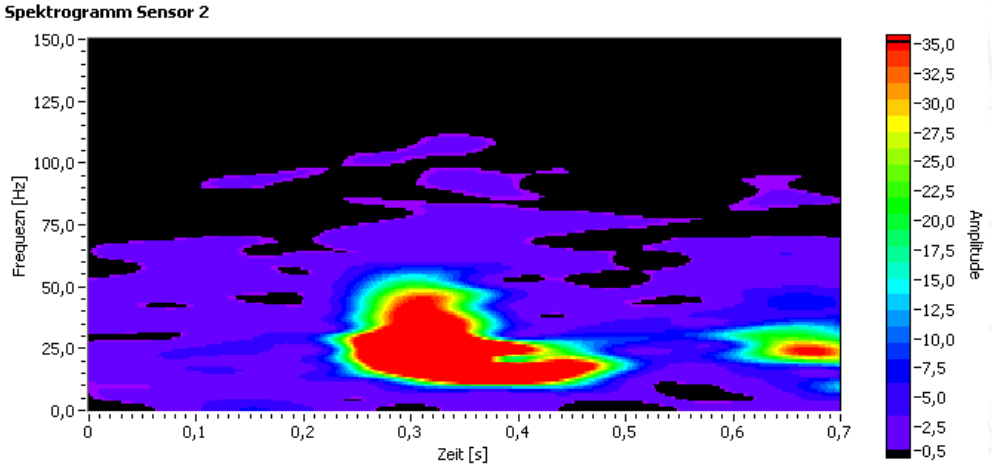
S1: 10-15 Hz
S2: ca. 15 Hz

ISBN 978-3-00-038084-6

Dirk Tenholte
Marco Dienel

MEMS-Sensor für die Herzdiagnose Herzklappeninsuffizienz





Patient 102606

- Weiblich, 72 Jahre alt
- Aortenklappenstenose III. Grades
- Aortenklapeninsuffizienz II. Grades
- Mitralklappeninsuffizienz I. Grades

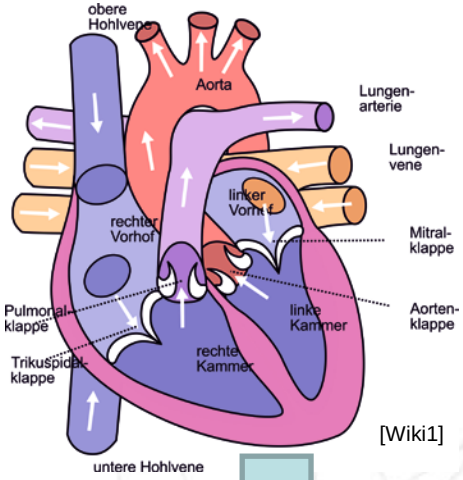
Patient 135751

- Weiblich, 71 Jahre alt
- Kippscheibenprothese in Mitralposition

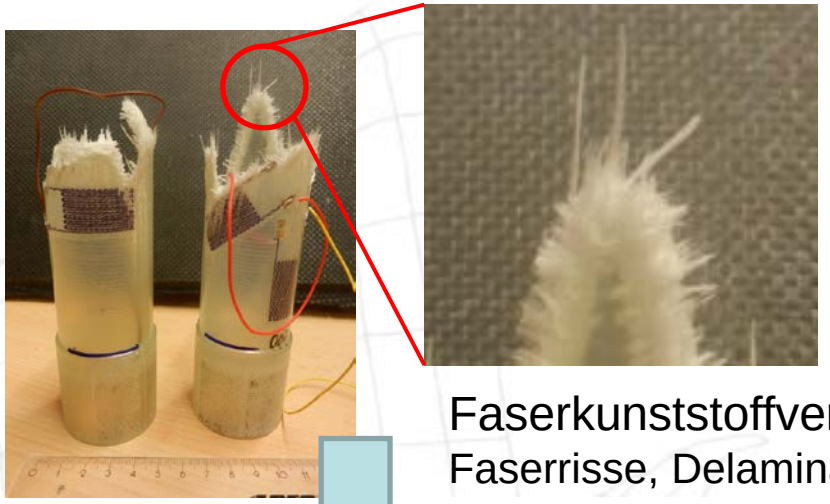
ISBN 978-3-00-038084-6

Dirk Tenholte
Marco Dienel

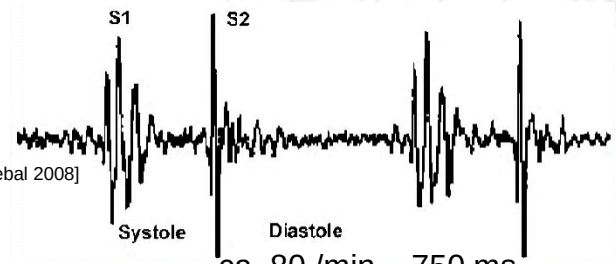
MEMS-Sensor zur Schwingungsmessung



[Wiki1]

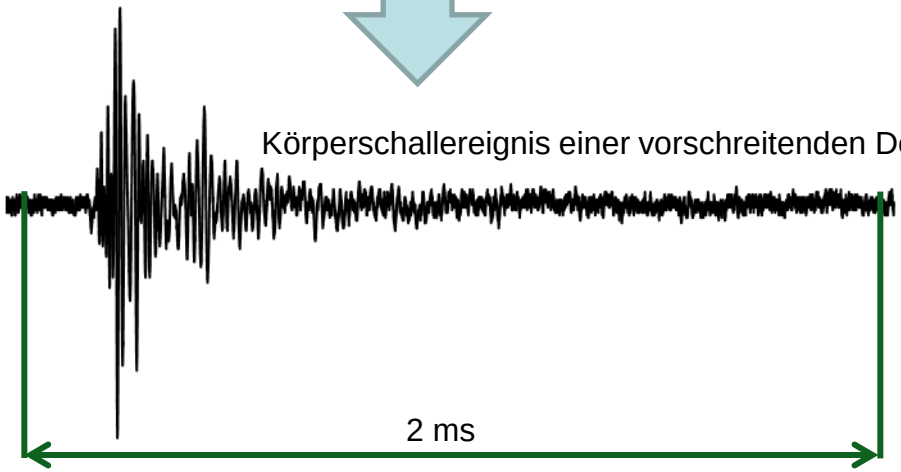


Faserkunststoffverbund
Faserrisse, Delamination



[Debal 2008]

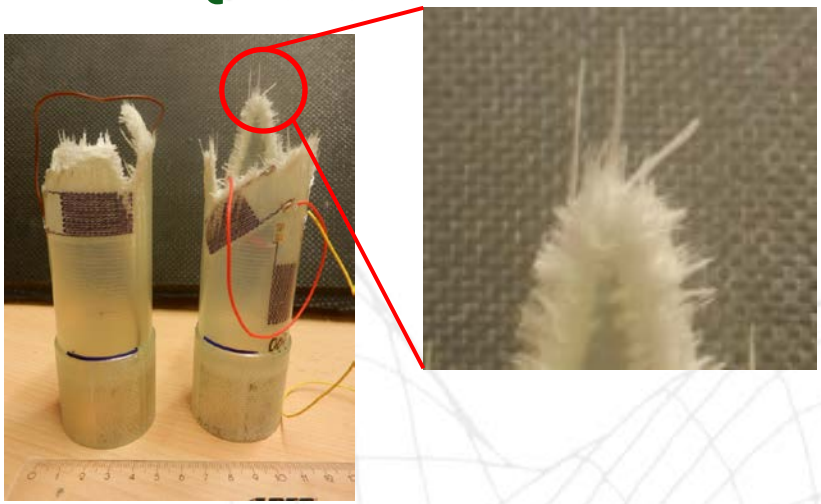
ca. 80 /min ~ 750 ms

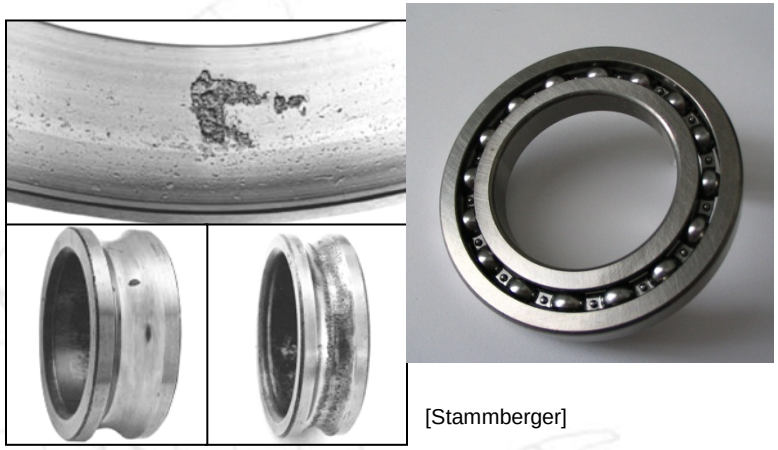


Körperschallereignis einer vorschreitenden Delamination

ISBN 978-3-00-038084-6

MEMS-Sensor zur Schwingungsmessung
Quellen und Ausbreitung der Körperschallwellen





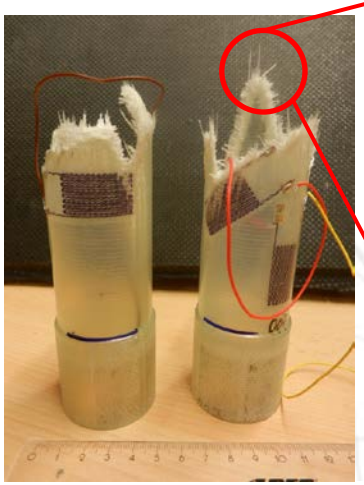
[Stammberger]

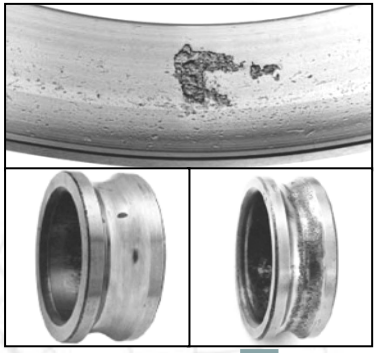
Körperschallemissionsquellen z.B.:

- Ausbreitung von Mikrorissen (z.B. in Kugellagerlaufflächen, Pittings)
- Faserrisse in FKV
- Delamination

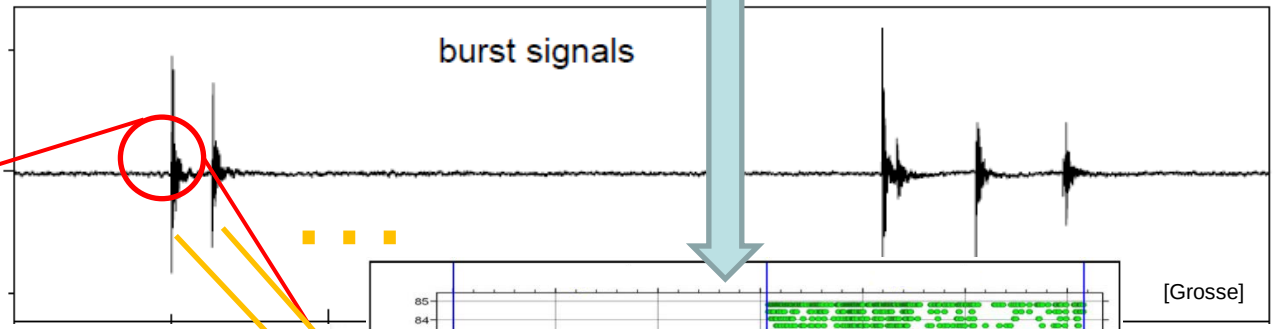
ISBN 978-3-00-038084-6

MEMS-Sensor zur Schwingungsmessung
Quellen und Ausbreitung der Körperschallwellen

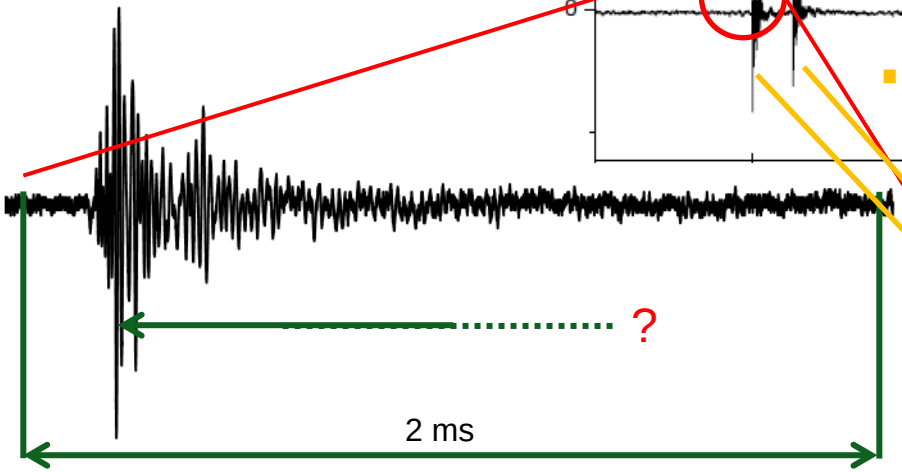


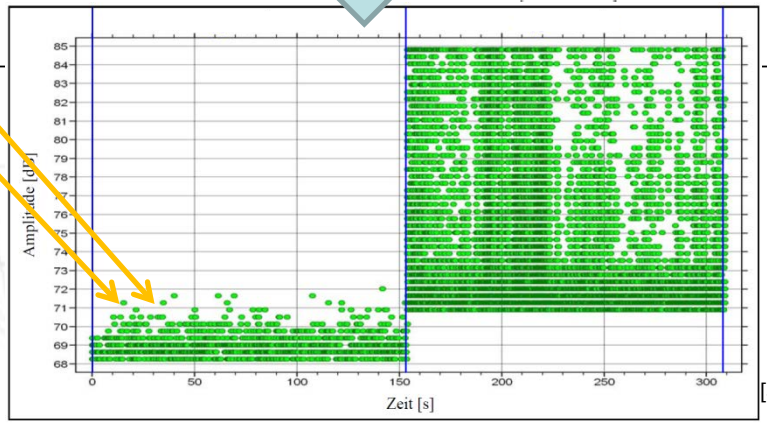


[FAG2000, Stammberger]



[Grosse]

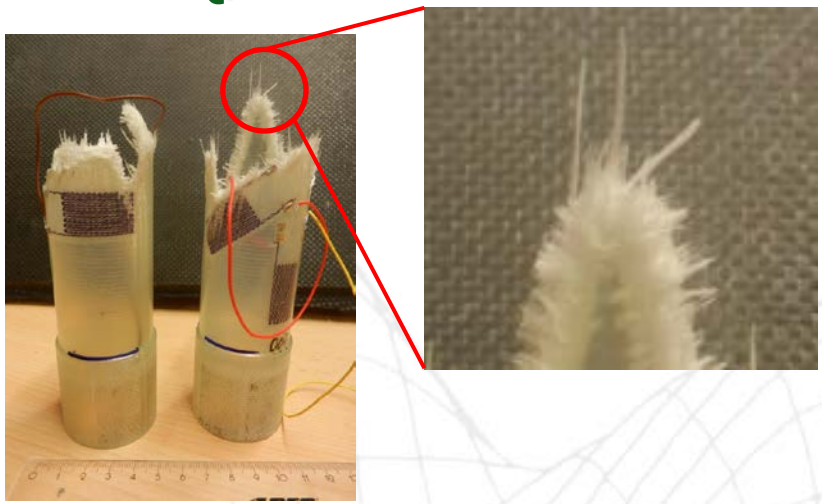


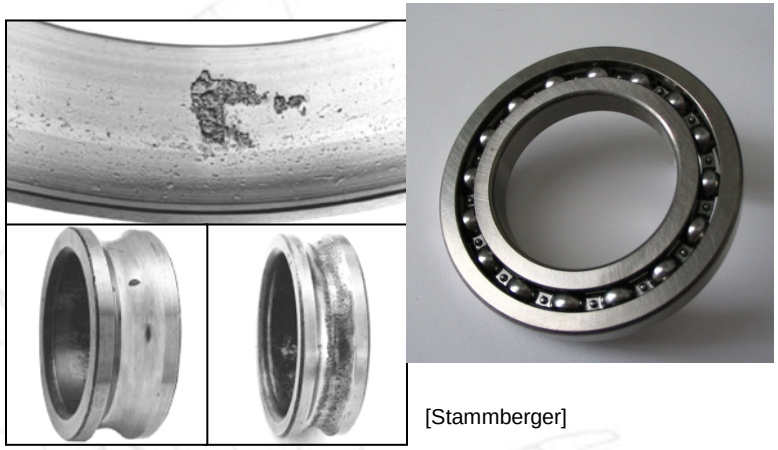


[Stammberger]

ISBN 978-3-00-038084-6

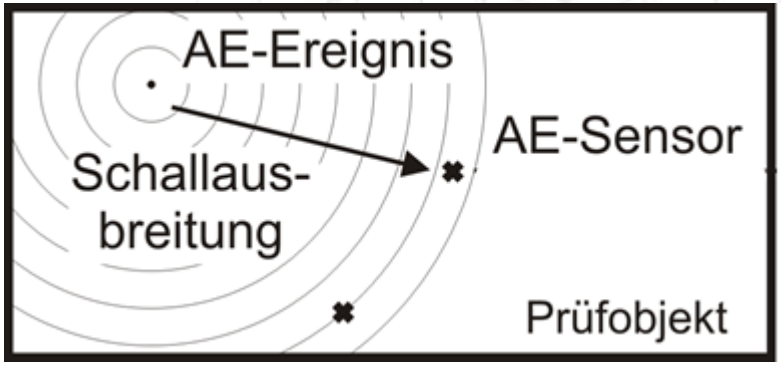
MEMS-Sensor zur Schwingungsmessung
Quellen und Ausbreitung der Körperschallwellen

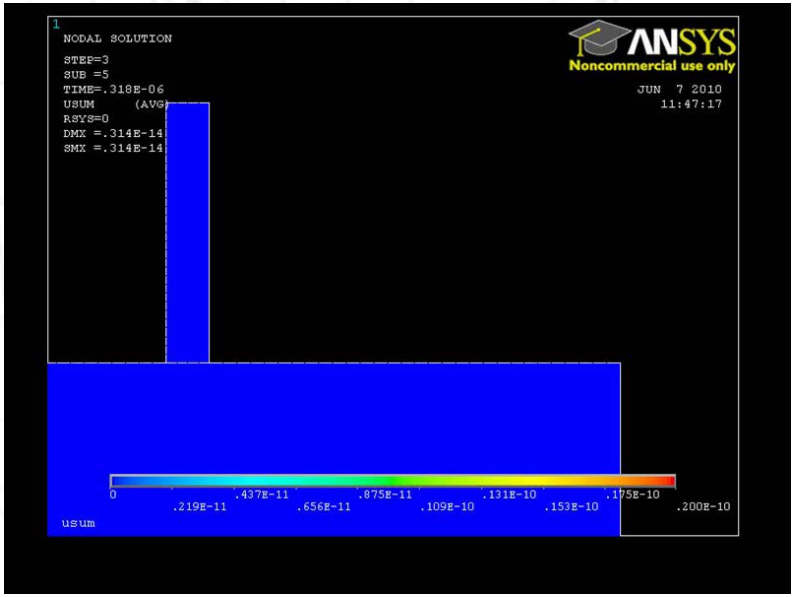




[Stammberger]

Körperschallwellenausbreitung

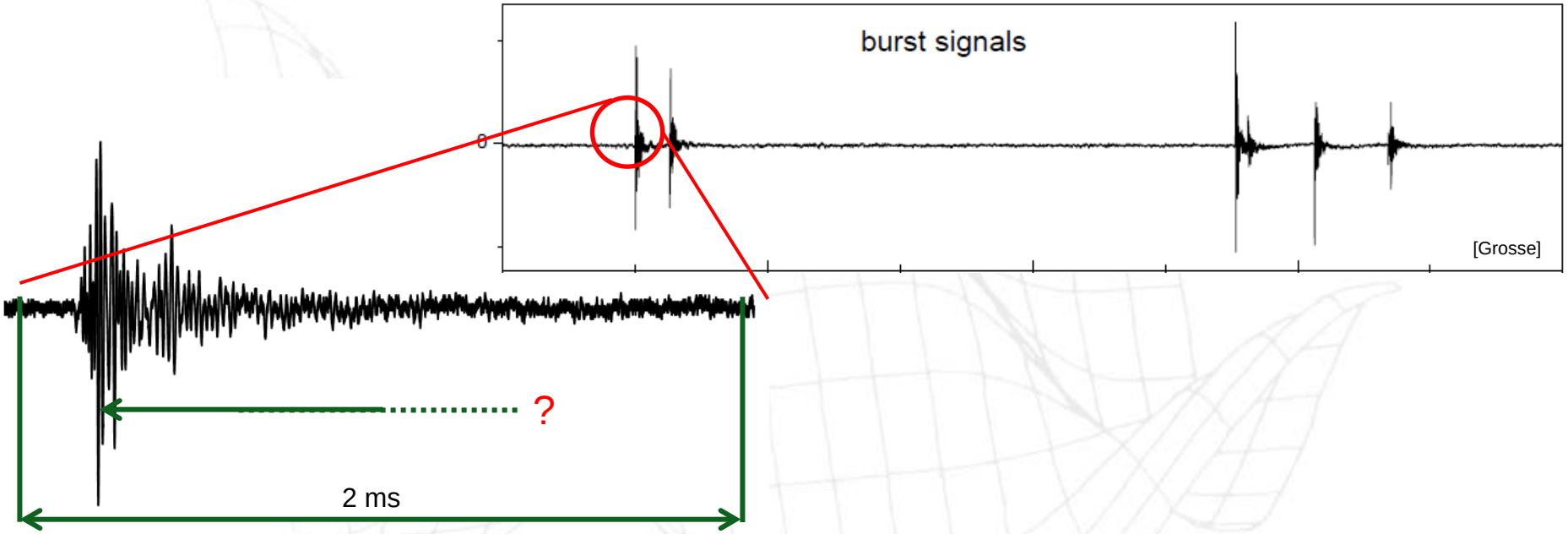




[Freitag]

ISBN 978-3-00-038084-6

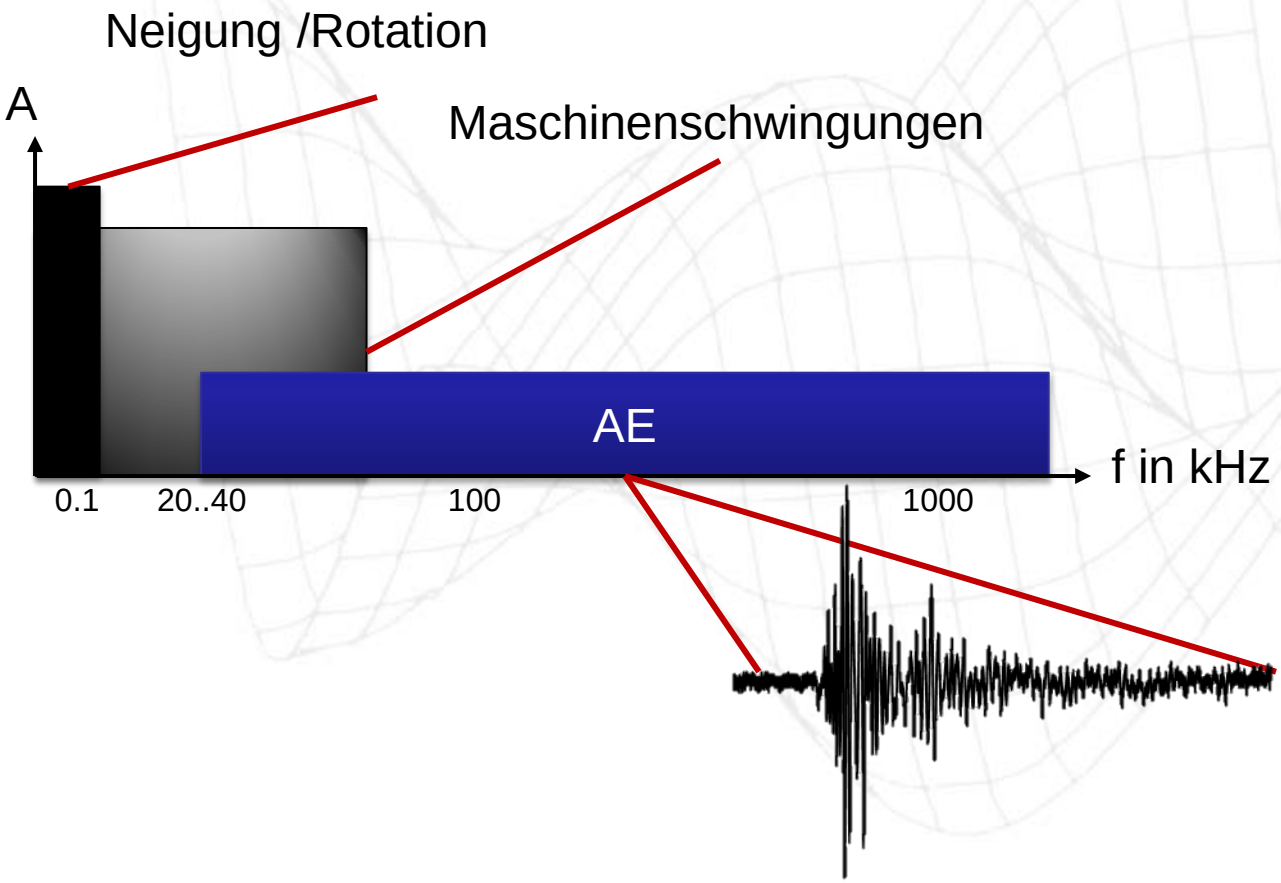
MEMS-Sensor zur Schwingungsmessung
Anforderung an den MEMS-Sensor



Hohe Bandbreite
Hoher Frequenzbereich >20 kHz bis ca. 1 MHz
Geringe Einschwingzeit
Hohe Empfindlichkeit

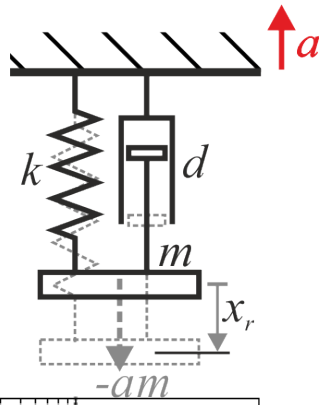
ISBN 978-3-00-038084-6

MEMS-Sensor zur Schwingungsmessung
Anforderung an den MEMS-Sensor



ISBN 978-3-00-038084-6

MEMS-Sensor zur Schwingungsmessung
Problematik beim Sensorentwurf



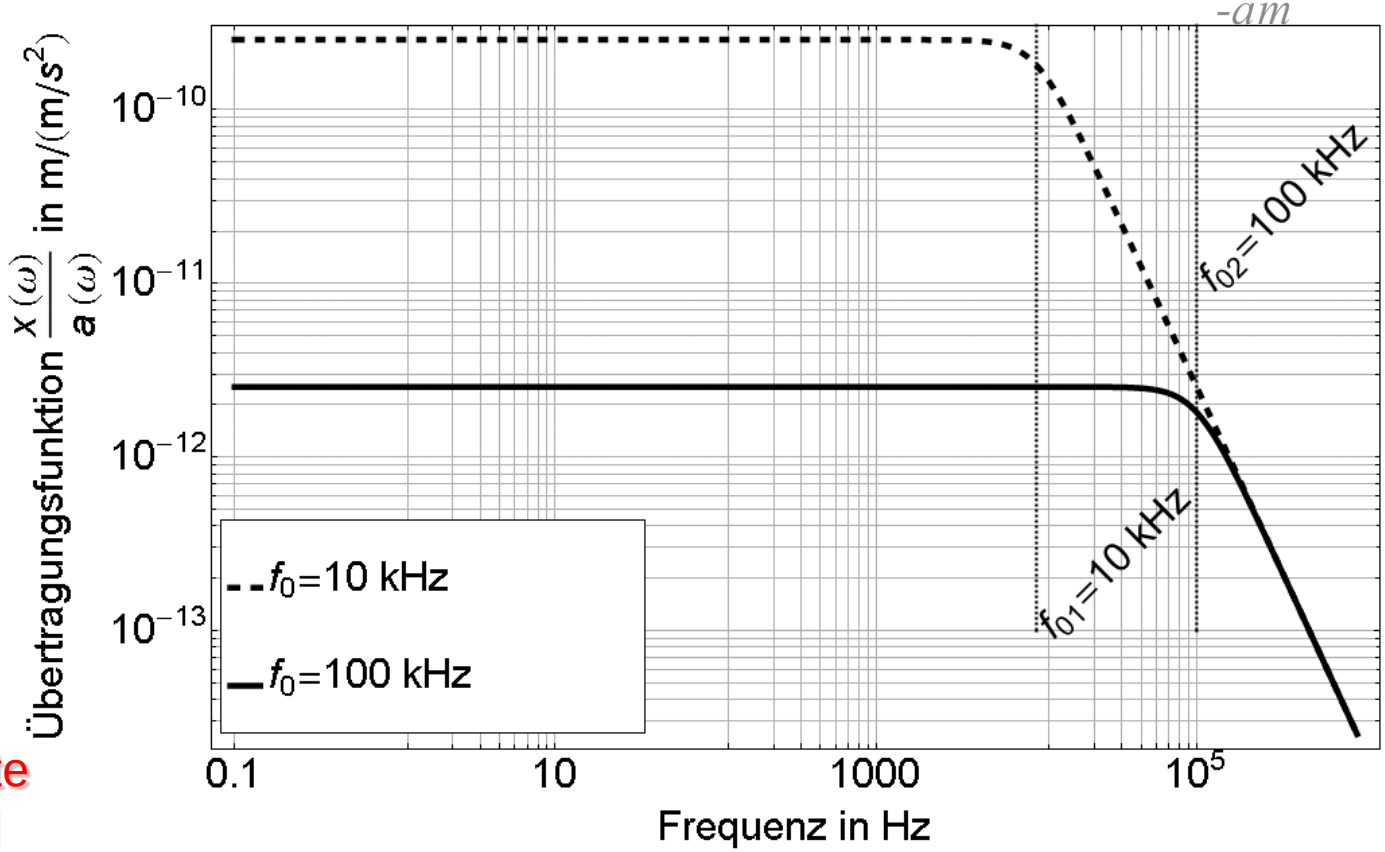
$$m\ddot{x} + d\dot{x} + kx = m\,a(t)$$

1DOF-System

$$f_0 \propto \sqrt{\frac{k}{m}} \qquad S = \frac{m}{k}$$

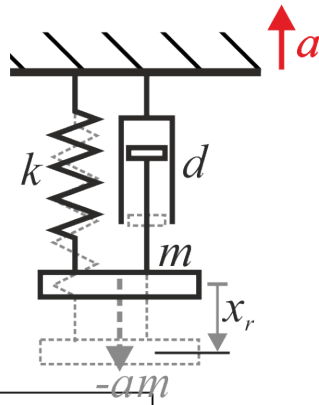
$$S \propto \frac{1}{{f_0}^2}$$

Bei hoher Bandbreite
geringes Nutzsignal



ISBN 978-3-00-038084-6

MEMS-Sensor zur Schwingungsmessung
Problematik beim Sensorentwurf



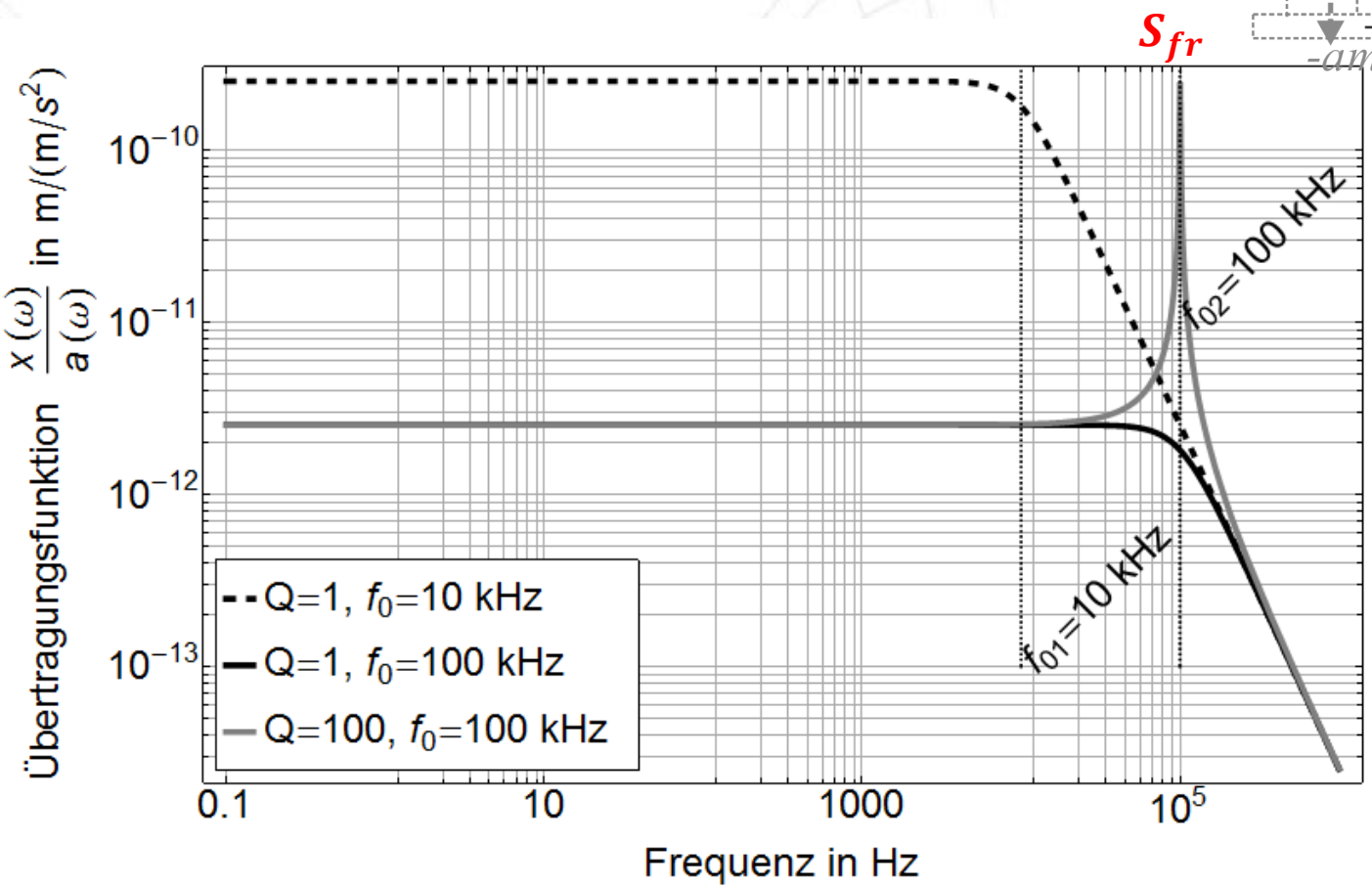
$$m\ddot{x} + d\dot{x} + kx = m\,a(t)$$ 1DOF-System

$$\underbrace{S_{fr} = Q\frac{m}{k}}$$

Hohes Nutzsignal

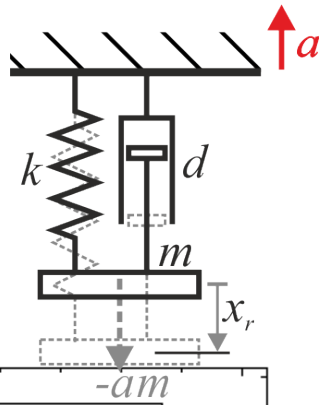
Sehr gute Filterwirkung

Sehr geringe Bandbreite



ISBN 978-3-00-038084-6

MEMS-Sensor zur Schwingungsmessung
Problematik beim Sensorentwurf



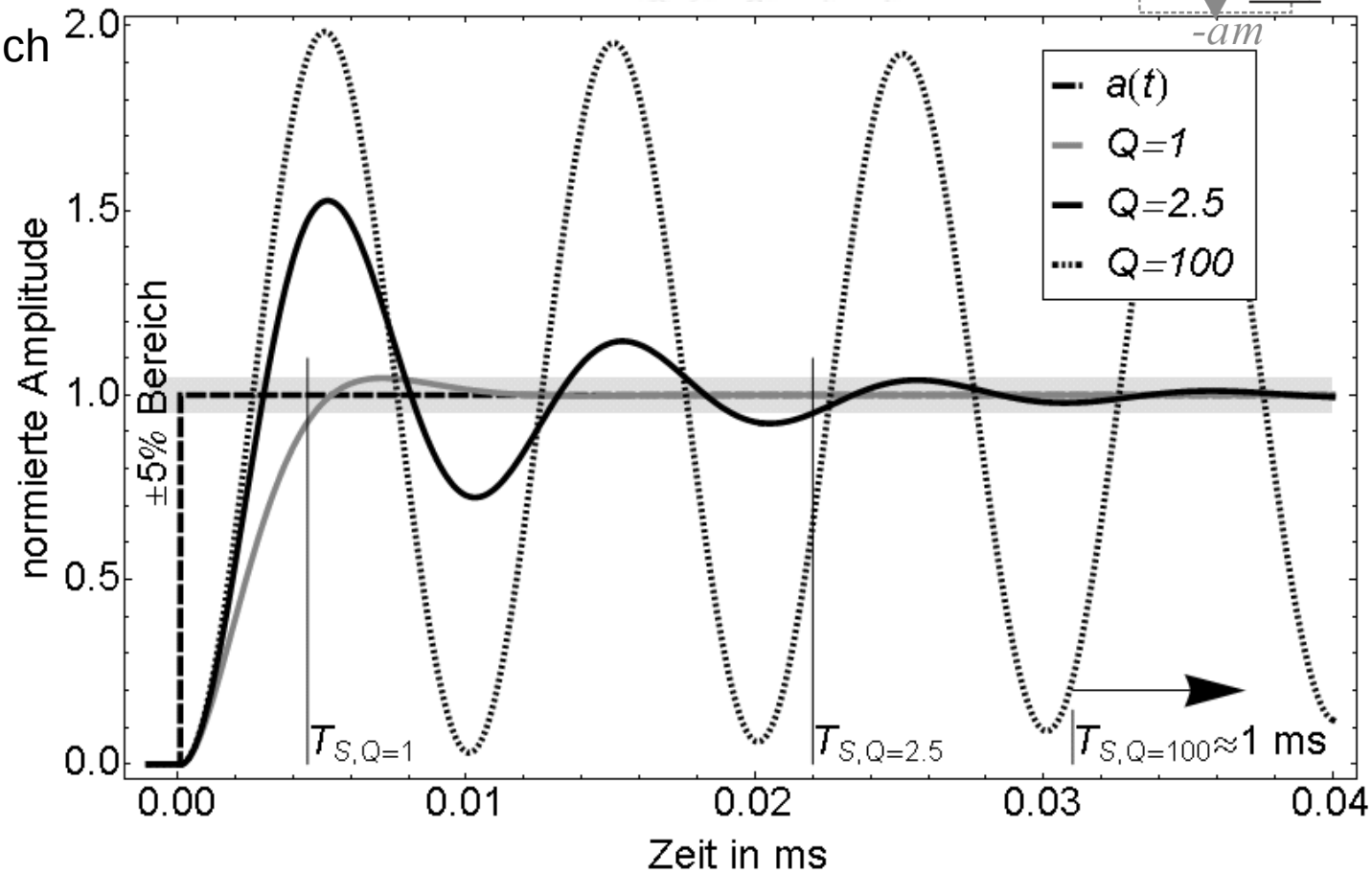
$$m\ddot{x} + d\dot{x} + kx = m\,a(t)$$ 1DOF-System

Antwort im Zeitbereich

$$T_S \approx \frac{3}{\pi}\frac{Q}{f_0}$$

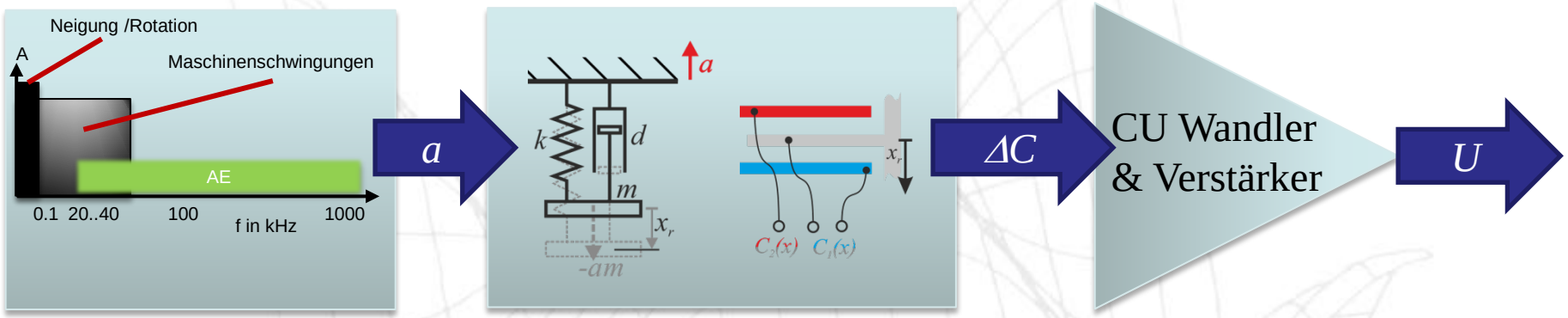
Für hohe Sensorgüte

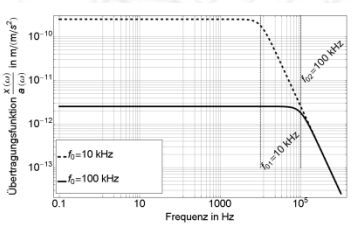
lange Einschwingzeit!

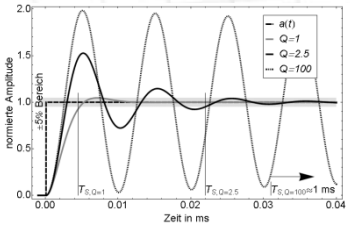


ISBN 978-3-00-038084-6

MEMS-Sensor zur Schwingungsmessung
Signalverarbeitung







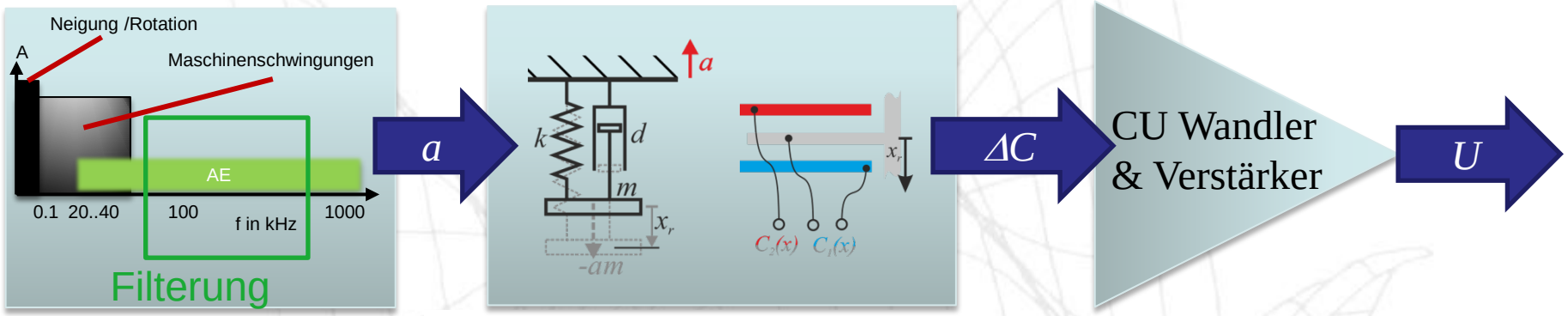
Ziele

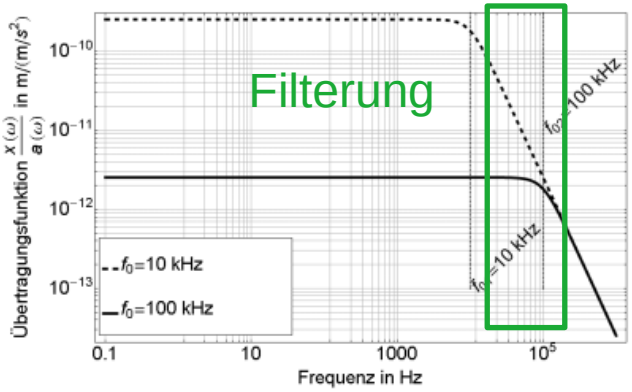
- hohes SNR
- keine Signalbeschneidung
- keine Störsignale

Signalselektion (Filterung) im MEMS → Optimale Auslegung der Verstärkerstufe

ISBN 978-3-00-038084-6

MEMS-Sensor zur Schwingungsmessung
Signalverarbeitung





Ziele

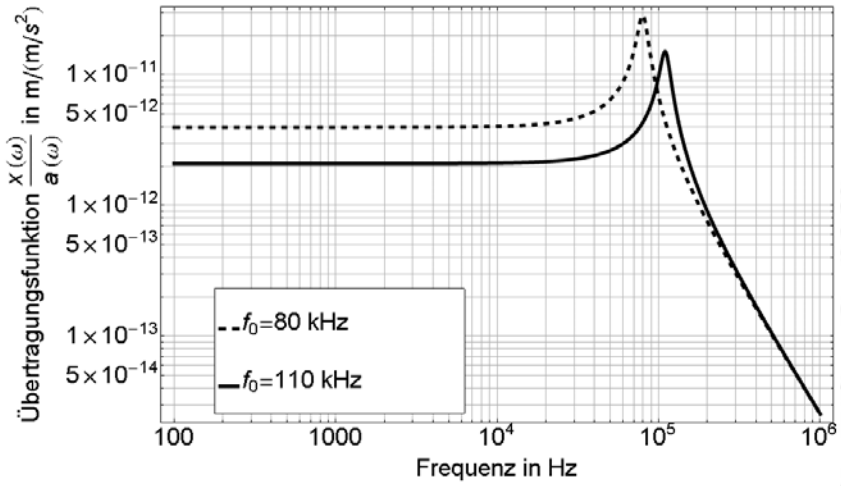
- hohes SNR
- keine Signalbeschneidung
- keine Störsignale

Signalselektion (Filterung) im MEMS
Mechanischer MEMS-Bandpass

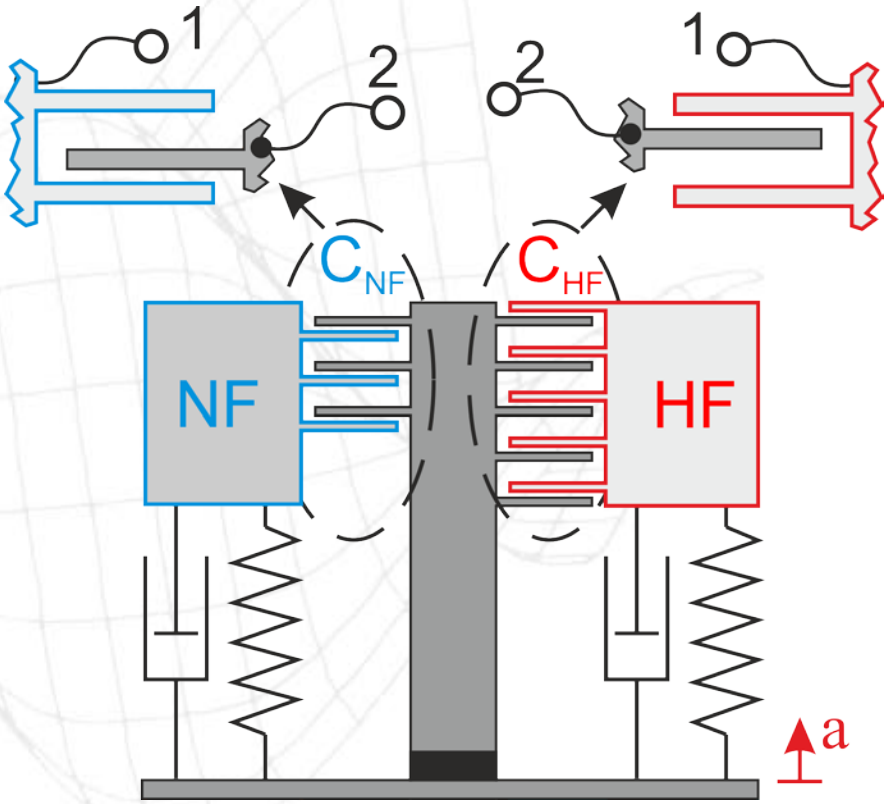
Optimale Auslegung der Verstärkerstufe

ISBN 978-3-00-038084-6

MEMS-Sensor zur Schwingungsmessung
MEMS-Bandpass Funktion

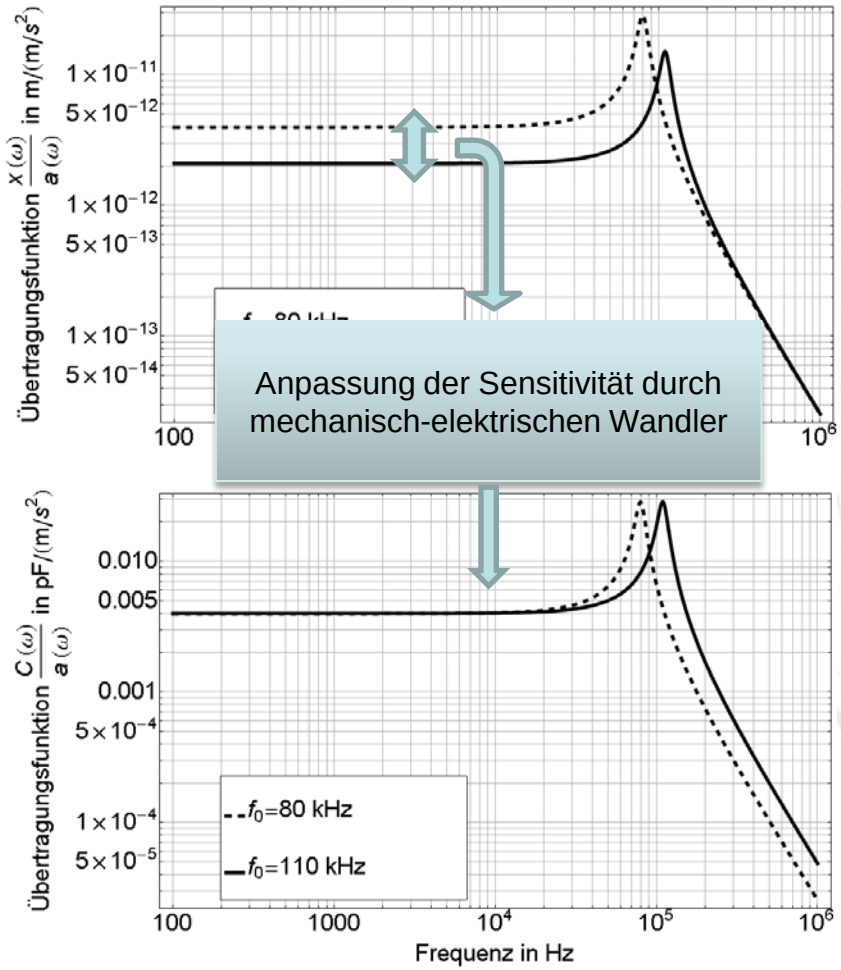


2 MEMS-Schwingungssensoren

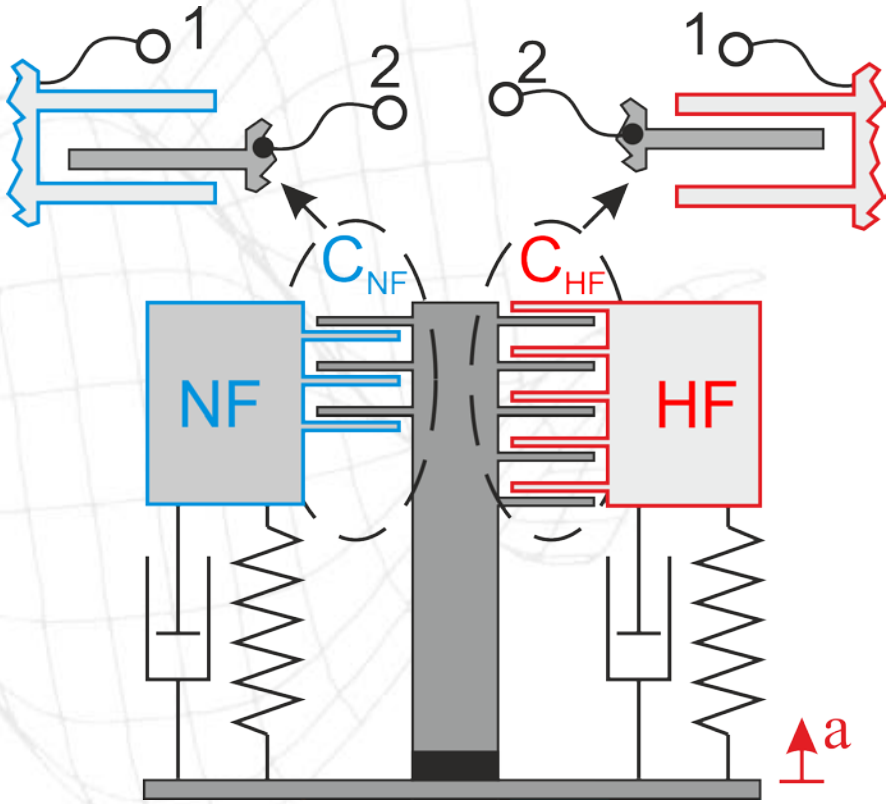


ISBN 978-3-00-038084-6

MEMS-Sensor zur Schwingungsmessung
MEMS-Bandpass Funktion



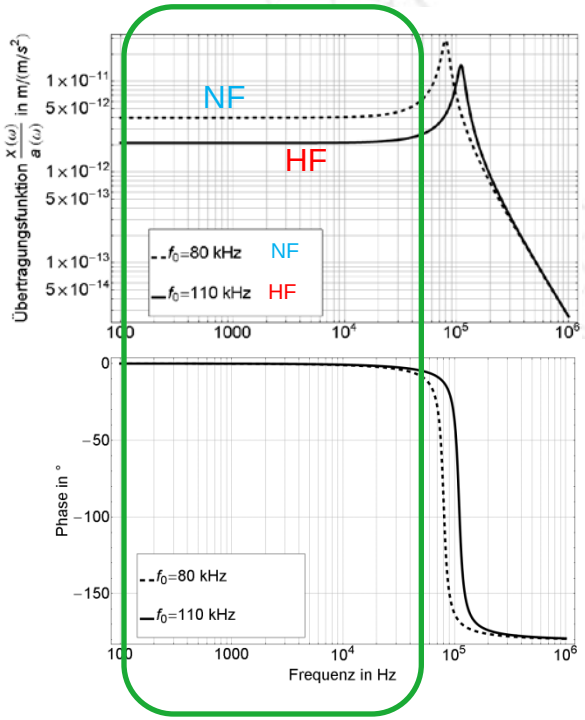
2 MEMS-Schwingungssensoren

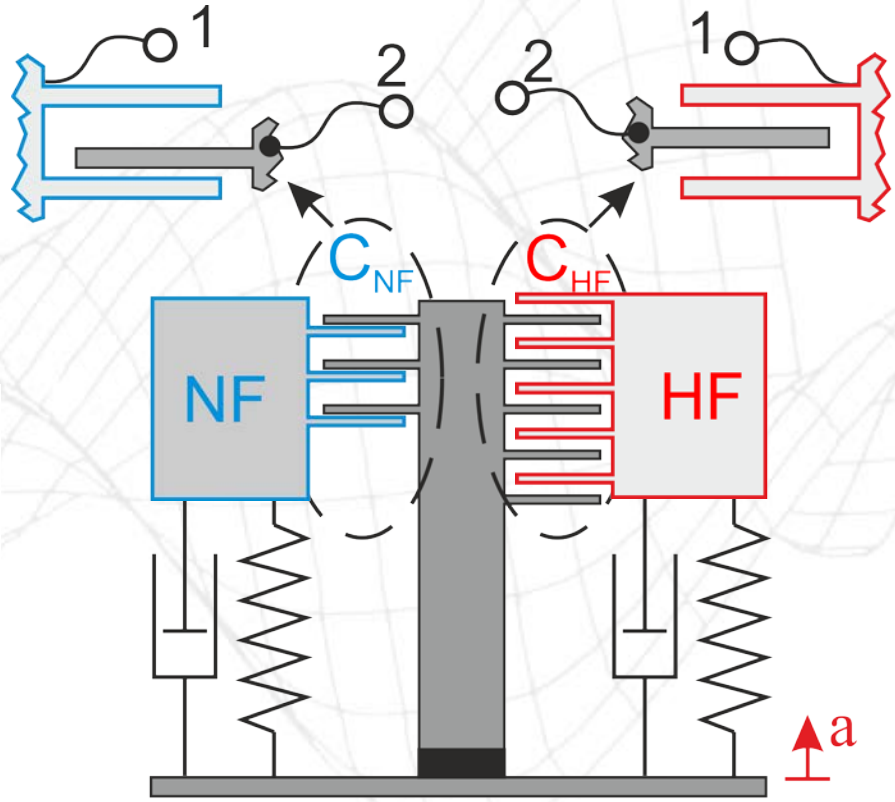


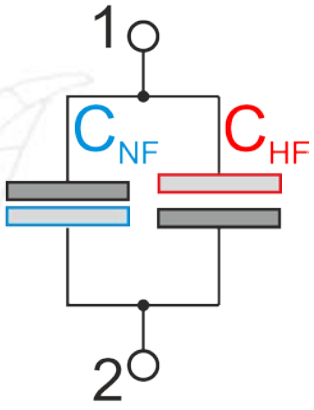
ISBN 978-3-00-038084-6

MEMS-Sensor zur Schwingungsmessung
MEMS-Bandpass Funktion

Gleichtaktbetrieb für Anregefrequenzen < $f_{0,\mathrm{NF}}$





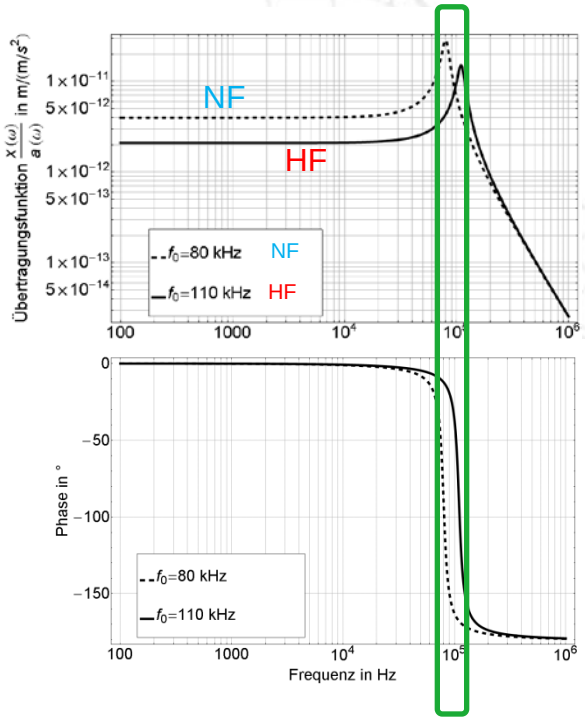


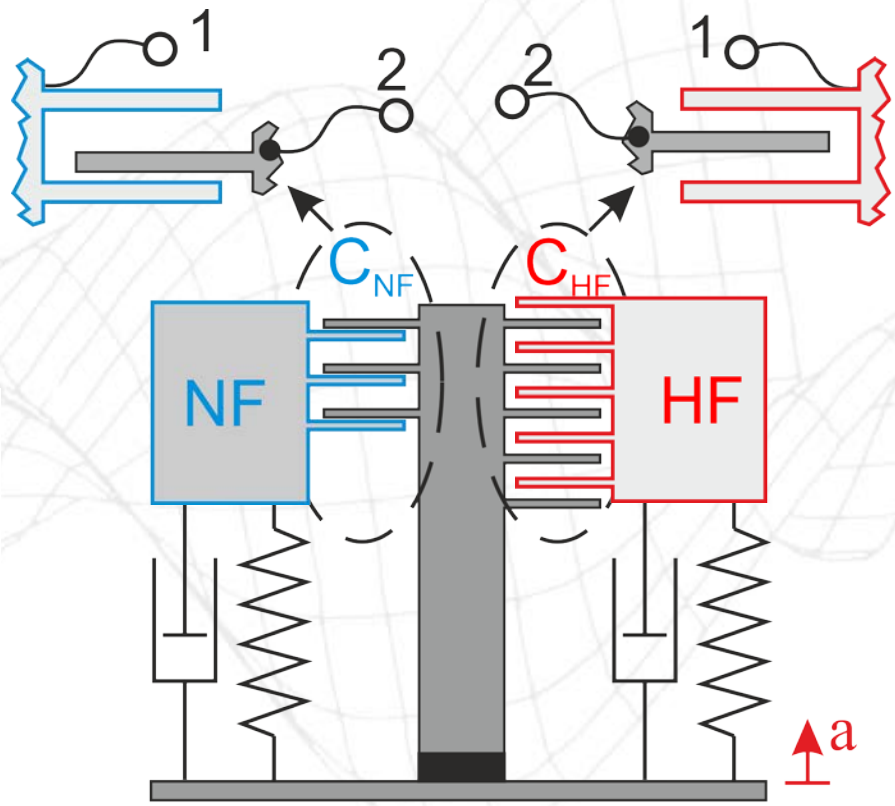
$\Delta C \approx 0$

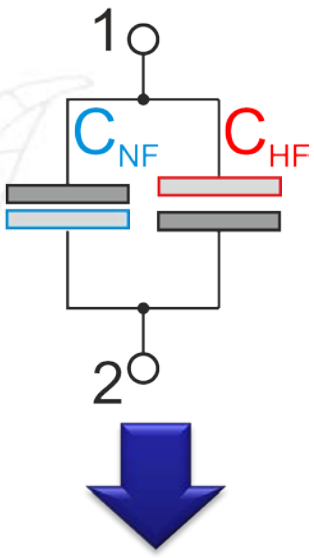
ISBN 978-3-00-038084-6

MEMS-Sensor zur Schwingungsmessung
MEMS-Bandpass Funktion

Gegentaktbetrieb (180° Phasenverschiebung) $f_{0,\mathrm{NF}} < f_{anreg} < f_{0,\mathrm{NF}}$





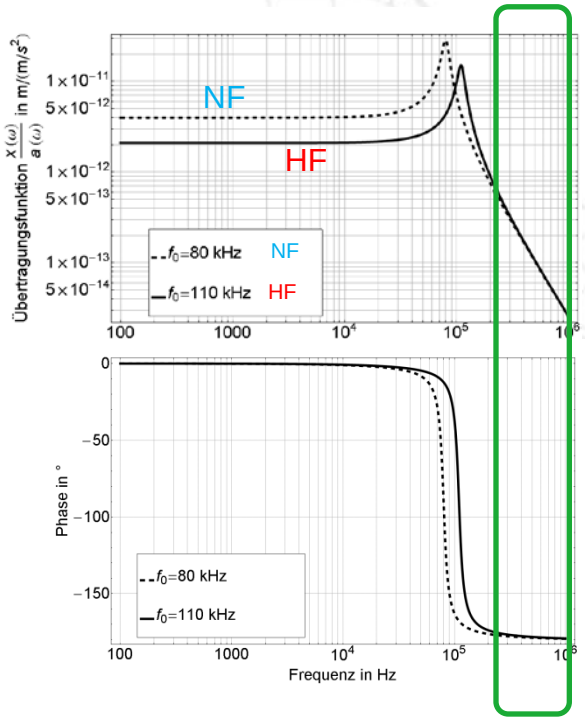


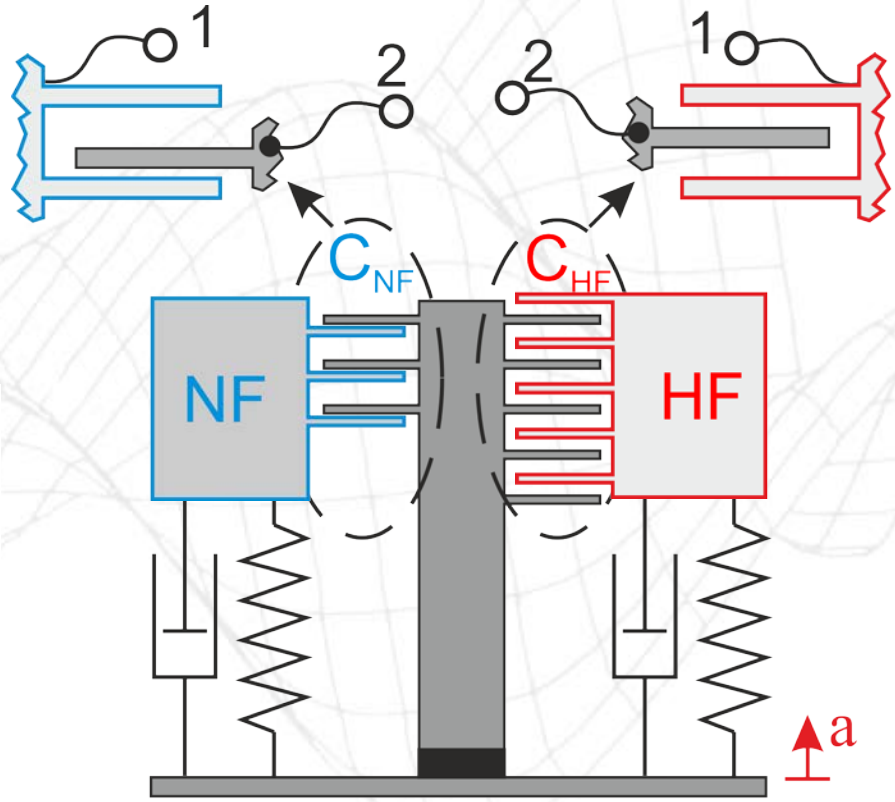
$\Delta C \propto a$

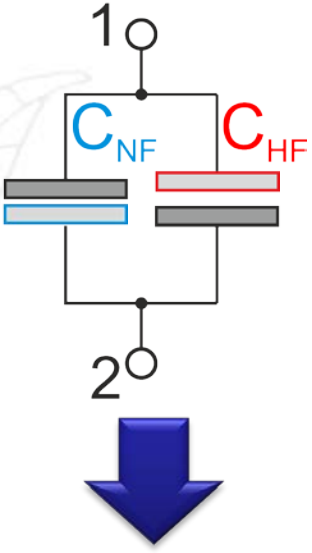
ISBN 978-3-00-038084-6

MEMS-Sensor zur Schwingungsmessung
MEMS-Bandpass Funktion

Gleichtaktbetrieb für Anregefrequenzen > $f_{0,\mathrm{HF}}$





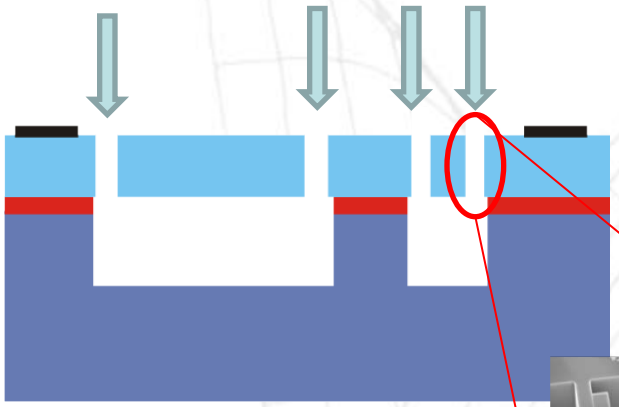


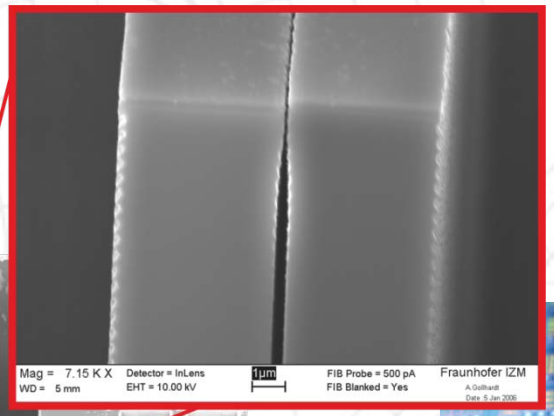
$\Delta C \approx 0$

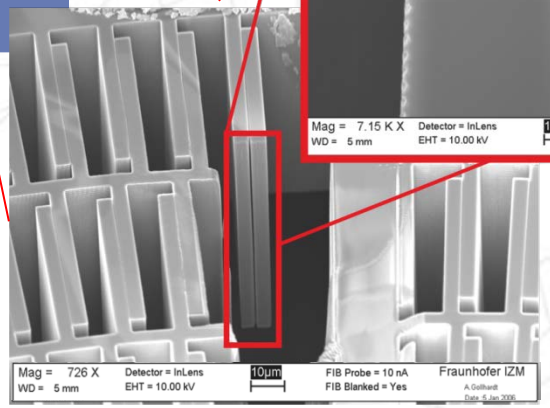
ISBN 978-3-00-038084-6

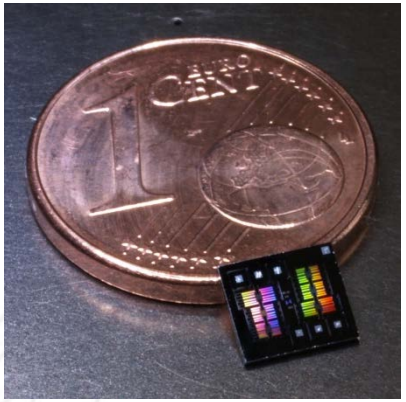
MEMS-Sensor zur Schwingungsmessung
MEMS-Bandpass Technologie

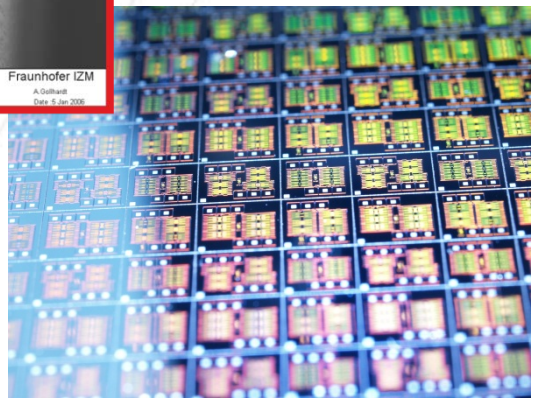
Wafer 2 maskieren und Sensorstruktur ätzen





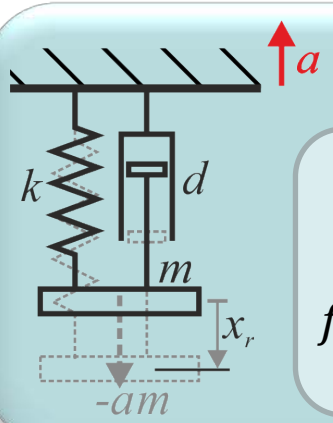






ISBN 978-3-00-038084-6

MEMS-Sensor zur Schwingungsmessung
MEMS-Bandpass Sensordesign



Grobentwurf

Mechanik

$$f_0 \propto \sqrt{\frac{k}{m}} \qquad S_{mech} = \frac{m}{k}$$

Elektrostatik

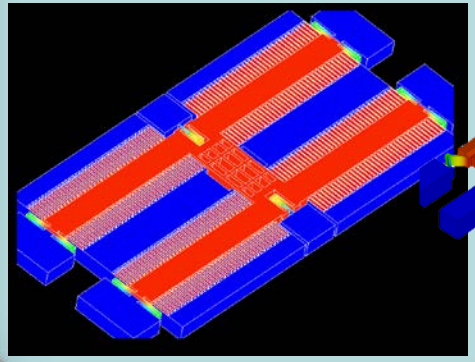
$$S_{elek} = \left.\frac{\partial C}{\partial x}\right|_{x=0} \propto n\frac{a\,t}{D^2}$$

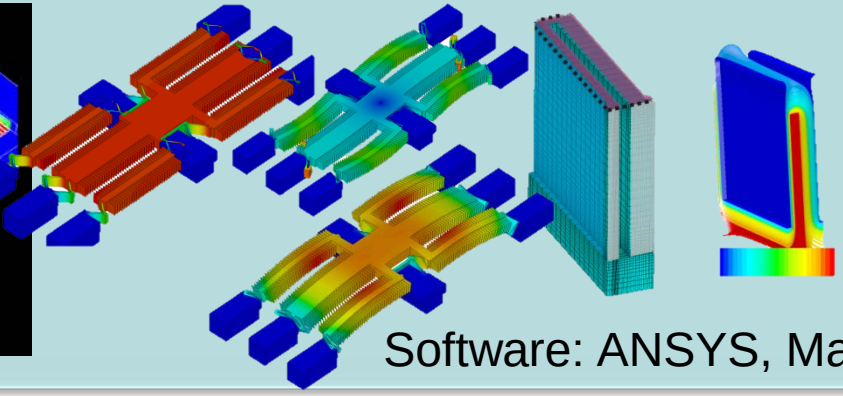
Fluidik/Dämpfung

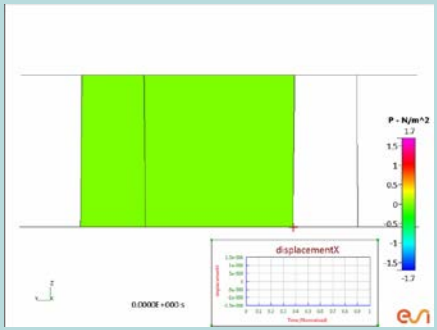
$$d \propto n\frac{t^3 a}{D^3} \text{ für } t < a$$

S,m,k → S,m,C → d

Feinentwurf und Optimierung (S, Modentrennung)



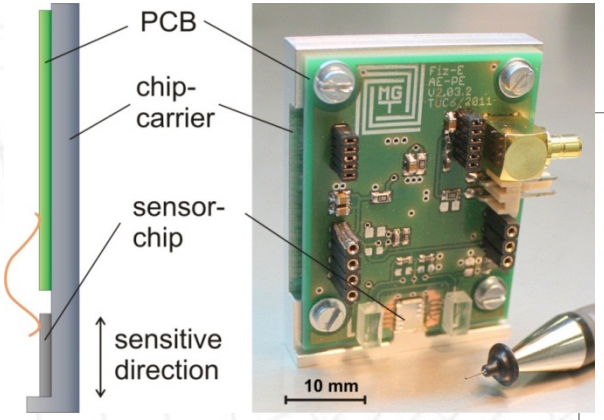


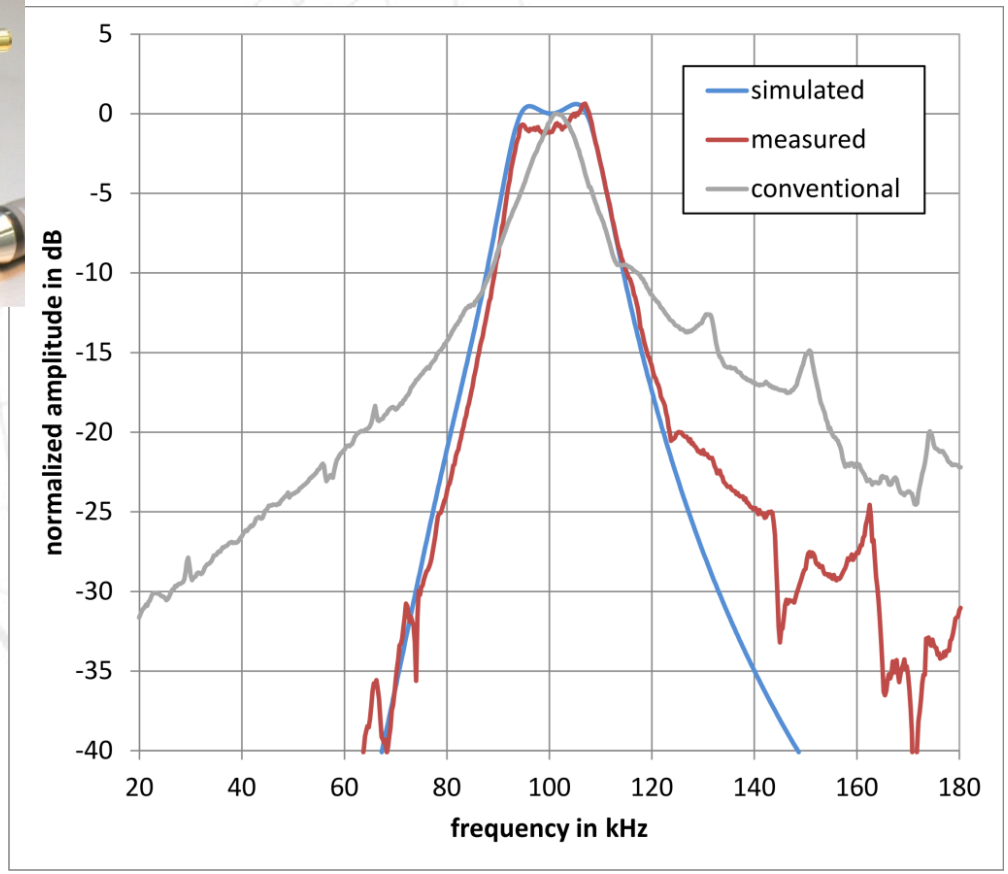


Software: ANSYS, MatLab, CFD-ACE

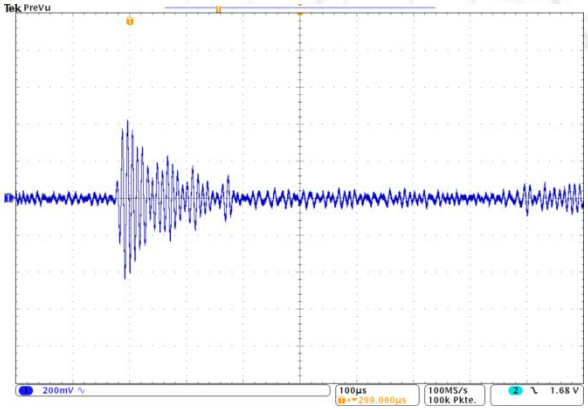
ISBN 978-3-00-038084-6

MEMS-Sensor zur Schwingungsmessung
MEMS-Bandpass Messergebnisse





Bleistiftminenbruchtest (PLB-Test)



ISBN 978-3-00-038084-6

Christian Auerswald
Marco Dienel

MEMS-Sensor zur Schwingungsmessung
Zusammenfassung und Ausblick

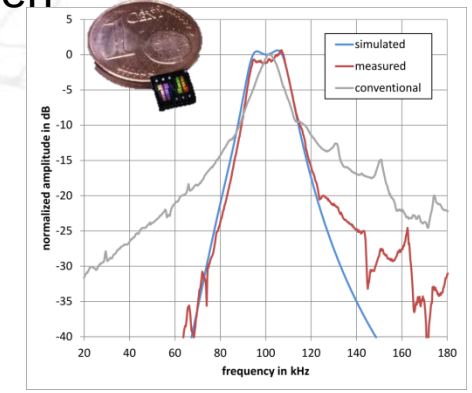
Herzton-Sensor

- ✓ Messung der Herzaktivität ist mittels MEMS-Beschleunigungssensor möglich
- ✓ Triggerung noch durch EKG

- Verbesserung der Differenzierbarkeit der Messergebnisse
- Implantierbares System zur Überwachung von Patienten mit Herzklappenersatz bzw. -fehlern

MEMS-AE-Sensor

- ✓ Realisierung eines elektrisch-mechanischen Bandpasses
- ✓ Darstellung der Entwicklungsproblematik
- ✓ Messung von Körperschallsignalen



- Vergrößerung der Sensorempfindlichkeit
- Anpassung der Auswerteelektronik
- Datenauswertung

ISBN 978-3-00-038084-6

MEMS-Schwingungssensoren
Funktion und Applikation in Medizin und Technik

Danksagung

Dr. Tenholte (TUC), Dr. Müller (Klinikum Chemnitz gGmbh)

Mitarbeitern des Zentrum für Mikrotechnologien

DI Auerswald, DI Freitag, Dr. Shaporin, DI Sorger, Prof. Mehner (TUC)

Teile der Arbeiten wurden durch das BMBF Programm ForMAT (03FO1202) gefördert

GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium für Bildung und Forschung

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

ISBN 978-3-00-038084-6

Quellen

[Grosse] Grosse, U.; Ohtsu, M.: Acoustic Emission Testing; Springer Verlag, 2008.

[Freitag] Freitag, M.: Simulation von Körperschallausbreitung. Projektarbeit, TU-Chemnitz, 2010.

[Freescale] Datenblatt: Freescale MMA7361L

[Wiki1] Jakov, http://commons.wikimedia.org/wiki/File%3ADiagram_of_the_human_heart_(cropped)_de.svg

[Debal 2008] Debbal, S.; Bereksi-Reguig, F.: *Time-frequency analysis of the first and the second heartbeat sounds.* Applied Mathematics and Computation, Vol. 184, 2008, pp. 1041-1052.

[Stammberger] Stammberger, K.:Technische und wirtschaftliche Betrachtung zur Erkennung von Lagerschäden an Standardmotoren, Diplomarbeit, TU Chemnitz, 2007

[FAG2000] FAG, Wälzlagerschäden, 2000, S. 28

ISBN 978-3-00-038084-6