



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
CHEMNITZ

9. Tagung „Feinwerktechnische Konstruktion“
12./13. November 2015 – Dresden

Anwendung von MEMS-Sensoren für tragbare Pulsfrequenzmesssysteme

Technische Universität Chemnitz
Professur Mikrosysteme und Medizintechnik
M.Sc. Daniel Wohlrab

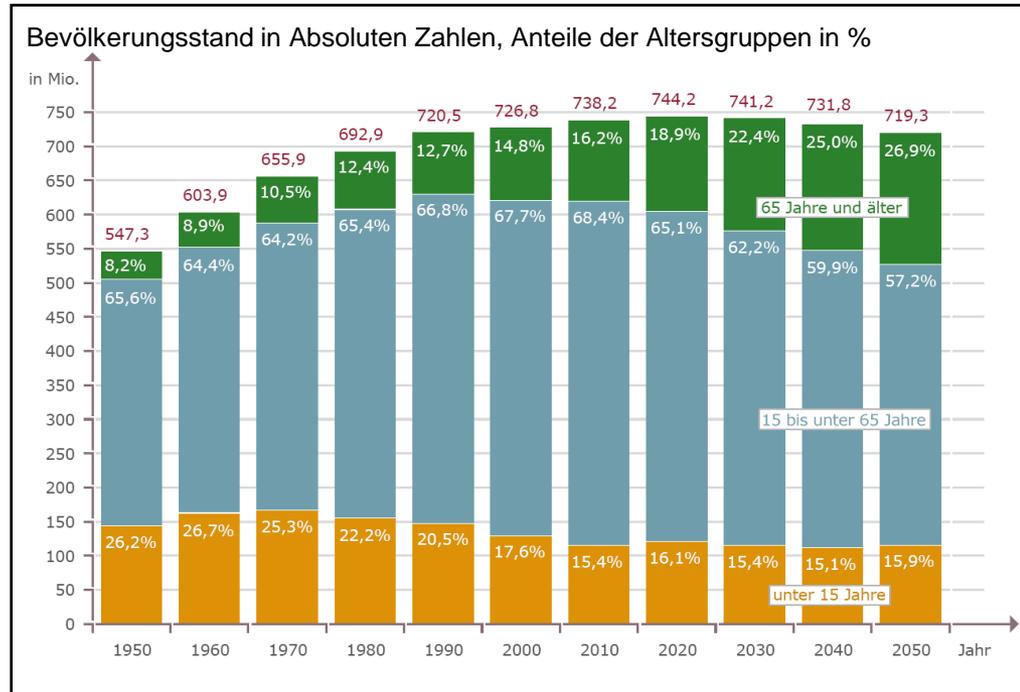
www.tu-chemnitz.de/etit/microsys
daniel.wohlab@etit.tu-chemnitz.de



Gliederung

- Motivation
- Entstehung der Pulswelle
- Messaufbau und Methoden
- Messergebnisse
- Analyse der Vitalparameter
- Zusammenfassung und Ausblick

Motivation



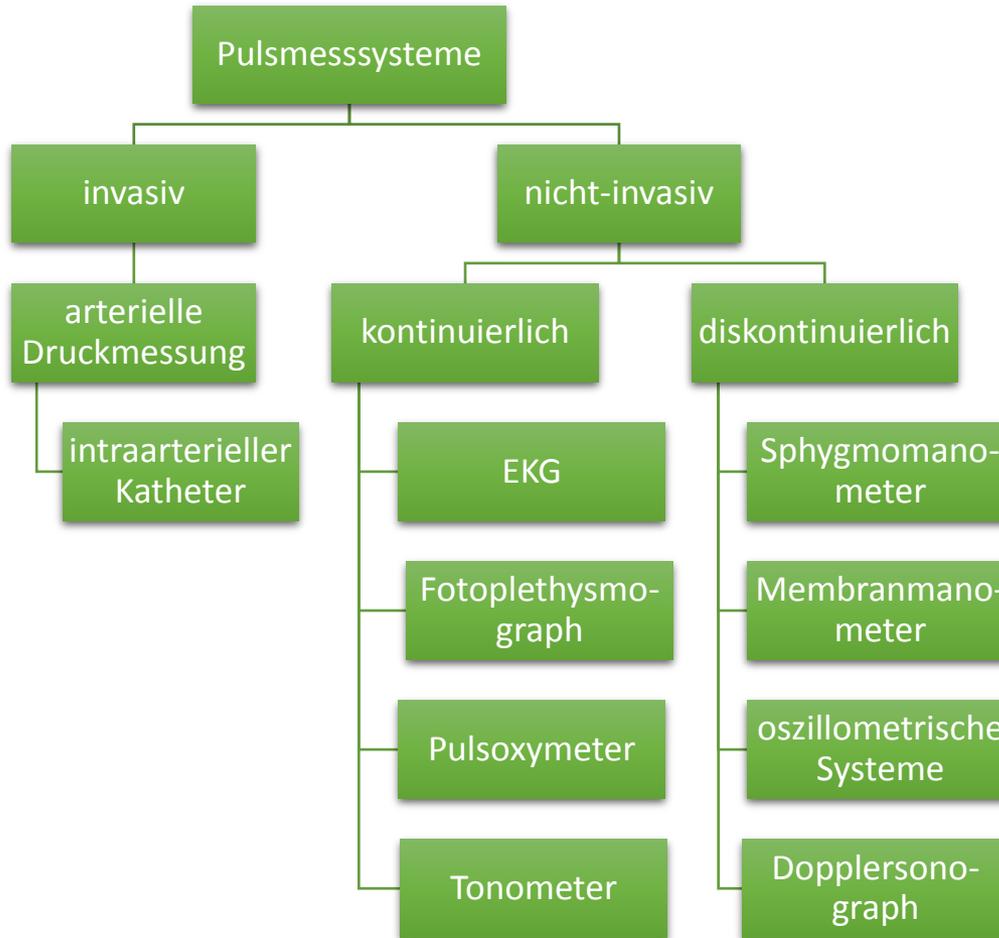
Altersstruktur und Bevölkerungsentwicklung in Europa 1950 – 2050 [1]

- Alterung der europäischen Gesellschaft
- autonomes Leben Zuhause gewünscht
- Mangel an Pflegepersonal abzusehen



unterstützender Einsatz von
Medizintechnik zur kontinuierlichen
Überwachung der Vitalparameter

Motivation



Nachteile:

- invasiv → Risiko für Patient
- Manschette → diskontinuierlich
- Bewegungseinschränkungen
- Abmessungen der Systeme
- hoher Energiebedarf

↓
komfortabel tragbare Integration
des Pulsmesssystems → Armband

↓
Miniaturisierung durch
MEMS-Sensoren

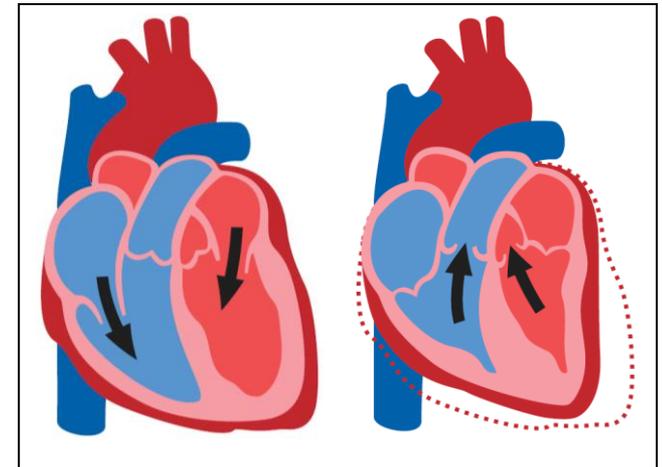
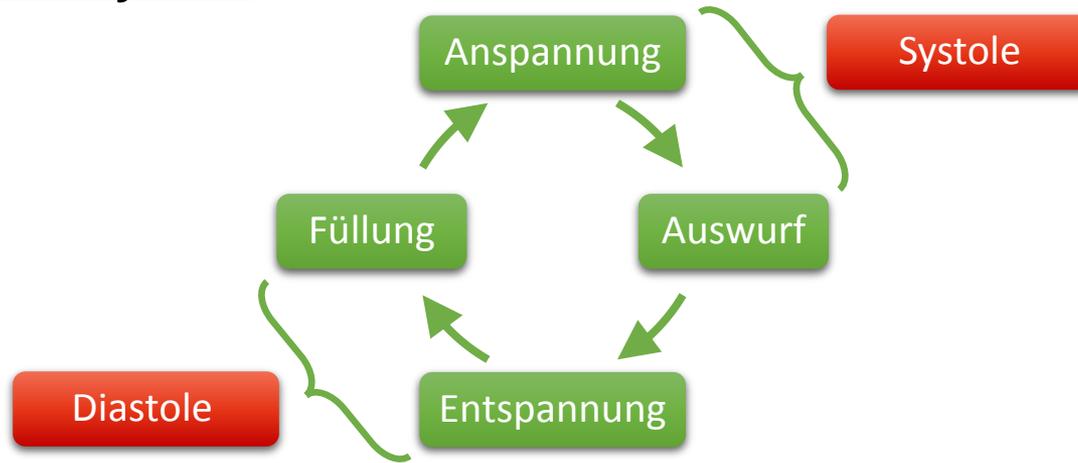
↓
Welche MEMS sind geeignet?

Gliederung

- Motivation
- **Entstehung der Pulswelle**
- Messaufbau und Methoden
- Messergebnisse
- Analyse der Vitalparameter
- Zusammenfassung und Ausblick

Entstehung der Pulswelle

Herzzyklus:



Füllungs- und Auswurfphase des Herzens [2]

- isovolumetrischer Druckanstieg im linken Ventrikel durch Anspannung
- sobald Aortendruck erreicht → Öffnung der Aortenklappe → Auswurf des Schlagvolumens
- Entspannung → steiler Druckabfall → Aortenklappe schließt
- Druck kleiner als im linken Vorhof → Öffnung der Mitralklappe → Füllung linkes Ventrikel

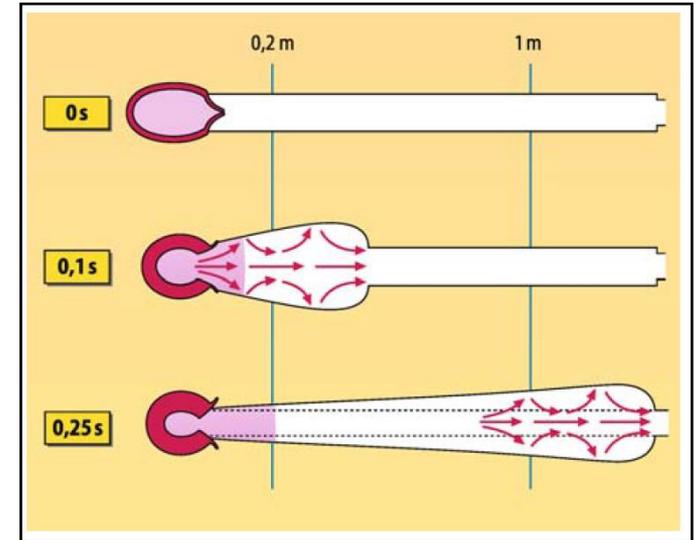
rhythmischer Blutausswurf des Herzens → Pulswellen

Entstehung der Pulswelle

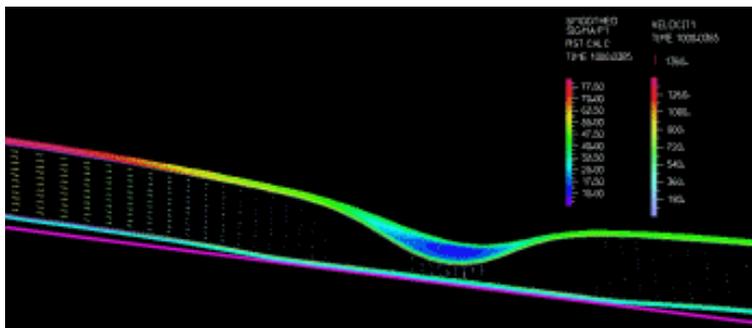
Pulswellen:

- Schlagvolumenauswurf → Druckanstieg mit lokaler Querschnittsänderung
- Ausbildung Druckgradient → Weiterbewegung des Blutes
- dehnender Differenzdruck → tangentielle Gefäßwandspannung erzeugt zirkumferenzielle Zugbelastung
- kontinuierlicher Vorgang → Pulswellen breiten sich über Gefäßsystem aus

➔ **Pulswellen erzeugen Arterienbewegungen**



Ausbreitung einer Pulswelle im Arteriensystem [3]



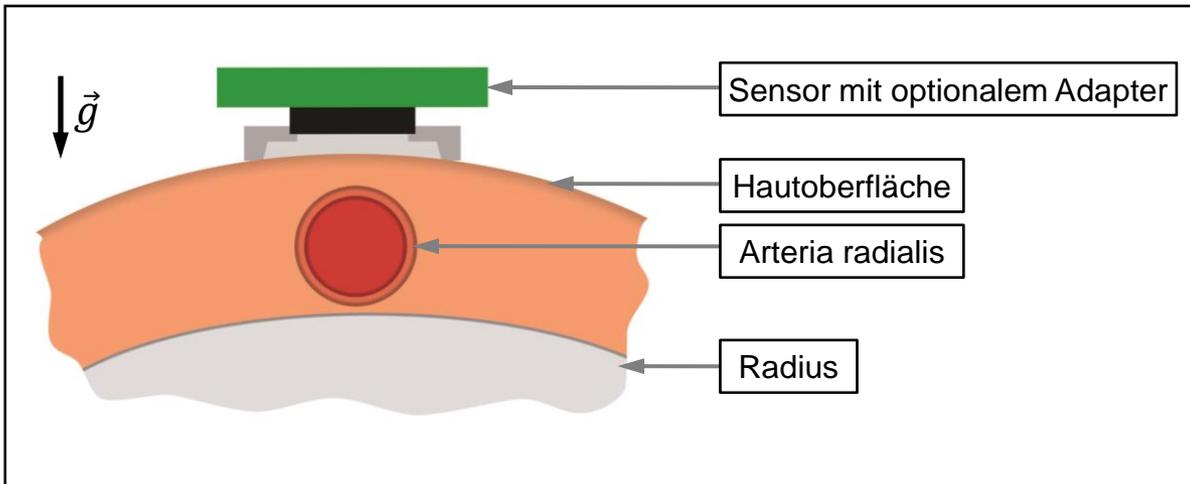
FEM-Simulation, Pulswelle passiert Engstelle der Arterie [4]

Gliederung

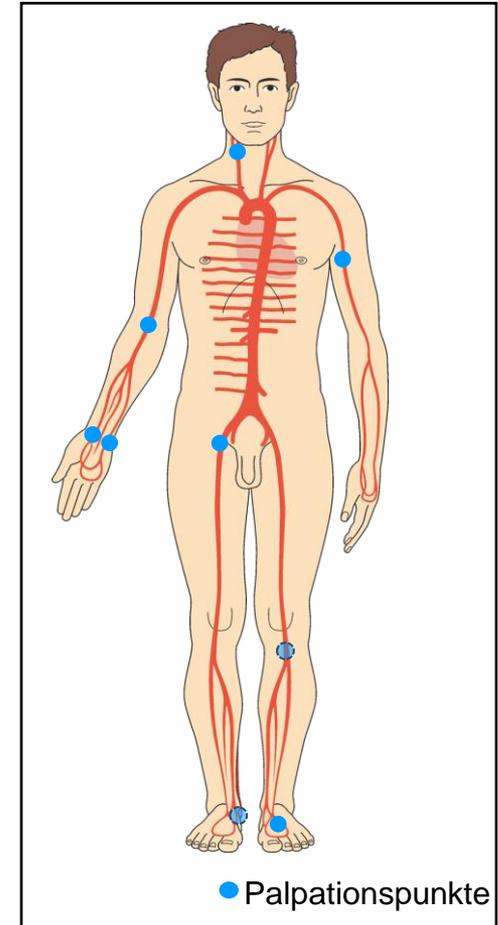
- Motivation
- Entstehung der Pulswelle
- **Messaufbau und Methoden**
- Messergebnisse
- Analyse der Vitalparameter
- Zusammenfassung und Ausblick

Sensorpositionierung

- transdermale Erfassung der arteriellen Bewegungen
→ Palpationspunkte → Positionierung auf Arteria radialis
- Befestigung der MEMS-Sensoren durch Klettband mit konstantem, leicht spürbarem Druck
→ nichtinvasive kontinuierliche Pulsmessung



Positionierung der Sensoren am Palpationspunkt (Schnittdarstellung)

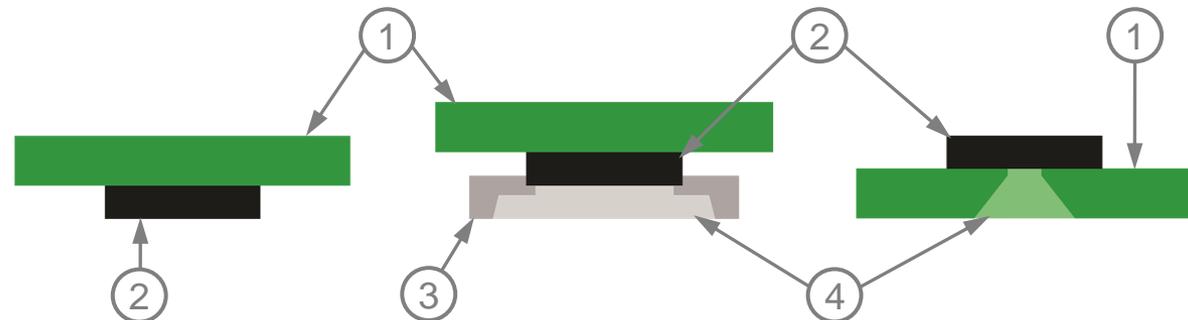


Beispiele für Palpationspunkte [5]

Getestete MEMS-Sensoren

Sensor	BMI055	BMP180	ADMP411
Sensorart	Beschleunigungs-sensor	Absolutdruck-sensor	Mikrofon
Einheit	g	Pa	V
Betriebsspannung	3,3 V	3,3 V	3,3 V
Betriebsstrom	max. 130 μ A	max. 1 mA	max. 250 μ A
Bandbreite	250 Hz	k.A.	28 Hz...20 kHz
Datenrate	500 Samples/s	100 Samples/s	5k Samples/s
Filterung	Butterworth-Bandpass 4. Ordnung mit Durchlassbereich 0,2 – 20 Hz		

Sensoraufbau
(Schnittdarstellungen)



1 – Leiterplatte, 2 – Sensor, 3 – Adapter, 4 - Aussparung

Getestete MEMS-Sensoren

maximal erfassbare Pulsfrequenz:

- Datenrate des Drucksensors
- minimale Anzahl der Messwerte pro Herzzyklus
- maximale Pulsfrequenz

$$DR_p = 100 \text{ Samples/s}$$

$$n_{HZ} = 25$$

$$f_{max} = \frac{DR_p}{n_{HZ}} \cdot 60 \text{ s} = \mathbf{240 \text{ min}^{-1}}$$

Energieaufnahme des Drucksensors:

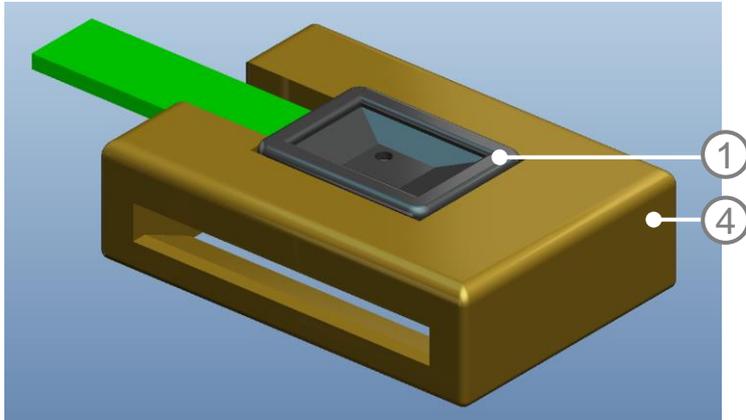
Sensorsystem	MEMS	PPG ¹
Messgröße	Druck	Lichtintensität
Betriebsspannung	3 V	
Standby-Strom	0,1 µA	20 µA
maximaler Strom	1 mA	20 mA
Messzeit	4,5 ms (inkl. ADC)	0,3 ms
Samplefrequenz	100 Hz	200 Hz
mittlere Stromaufnahme	0,45 mA	1,20 mA

¹ Werte siehe: Texas Instruments Inc., SLAA274B [6]

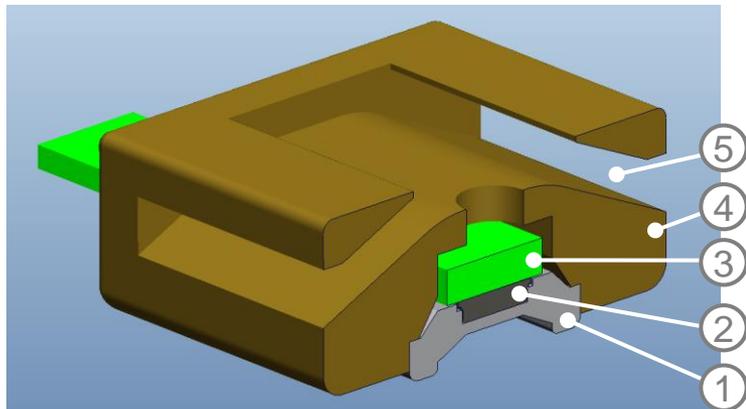


PPG-System hat
ca. 2,6-fach höhere
Energieaufnahme

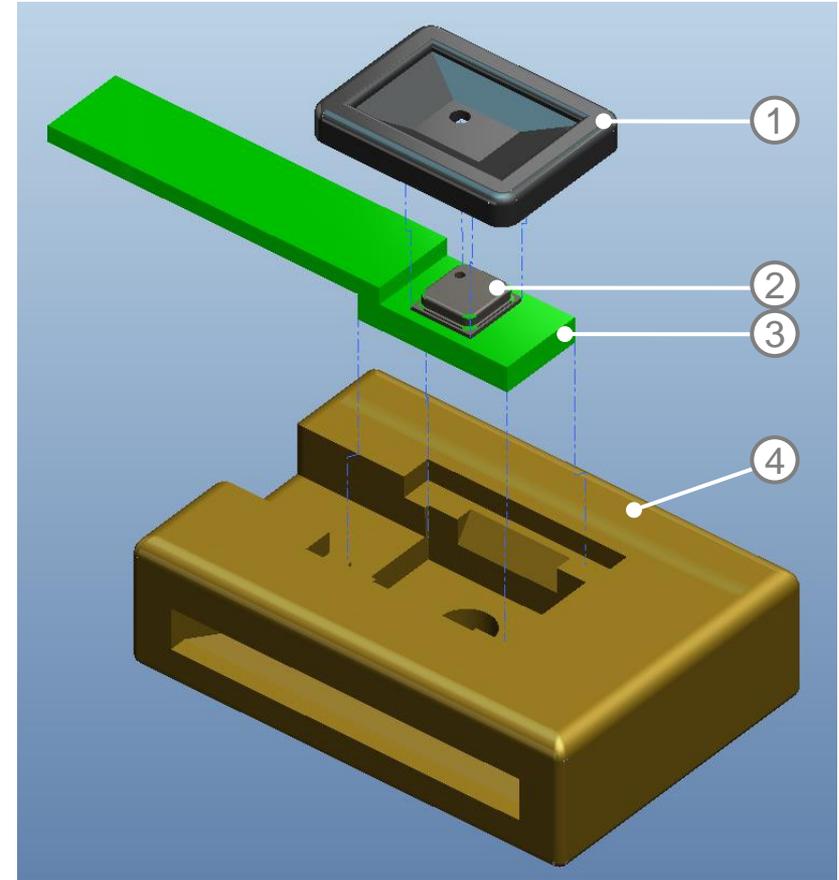
Demonstrator mit Drucksensor – 3D-Modell



Zusammenbau des Drucksensorsystems



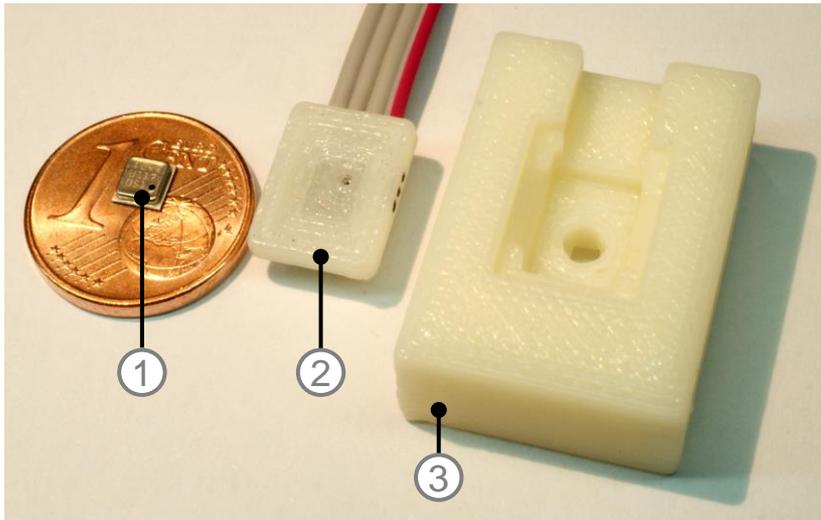
Schnittdarstellung des Drucksensorsystems



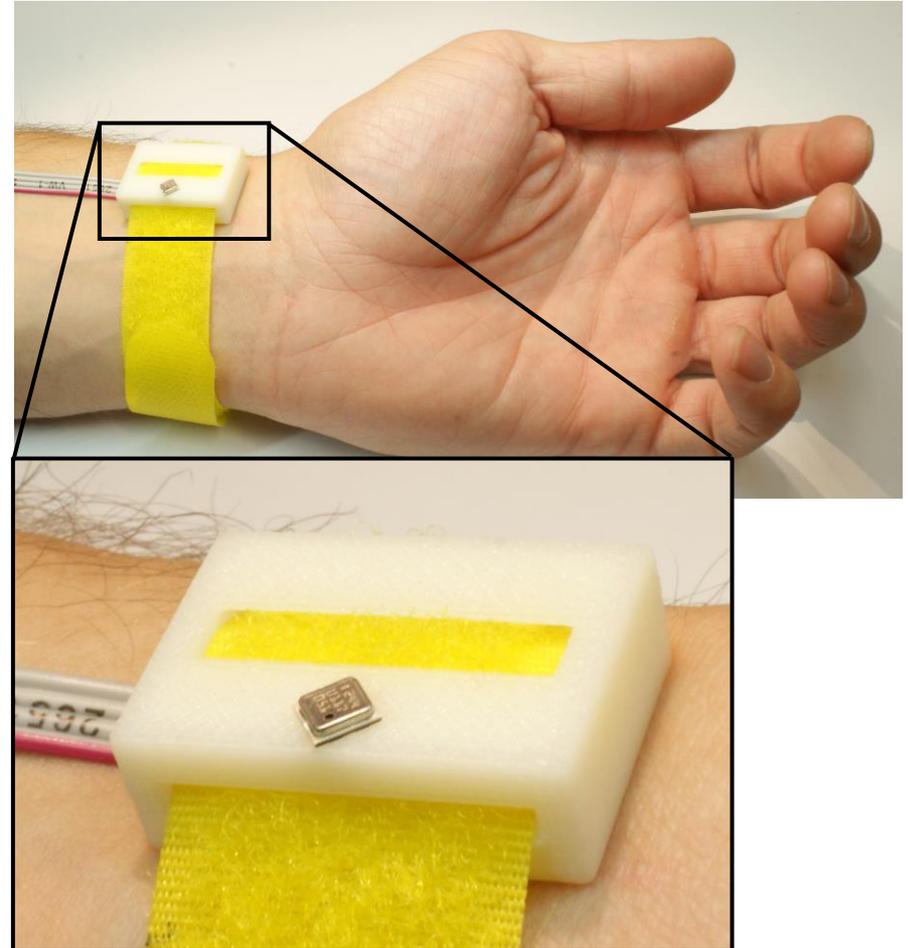
Explosionsdarstellung des Drucksensorsystems

- 1 – Adapter, 2 – Drucksensor, 3 – Leiterplatte mit Verbindungskabel,
4 – Halterung für verschiedene Sensoren zur Befestigung am Handgelenk, 5 – Durchführung für Armband

Demonstrator mit Drucksensor



Drucksensor (1) im Vergleich zu einem Euro-Cent;
mit 3D-Drucker gefertigter Adapter (2) und Halterung zur
Befestigung am Handgelenk (3)

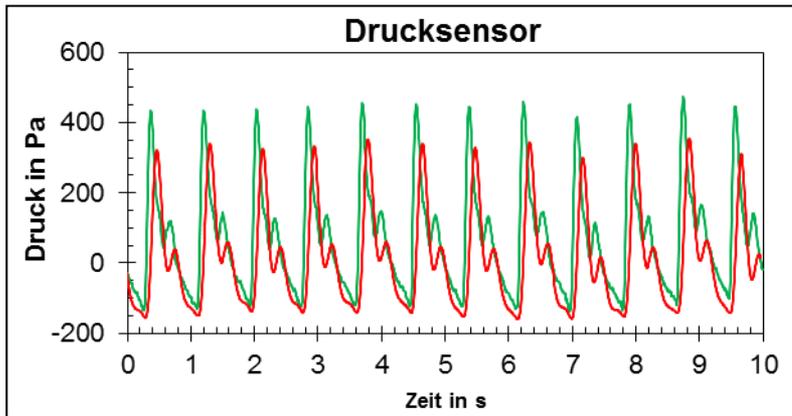
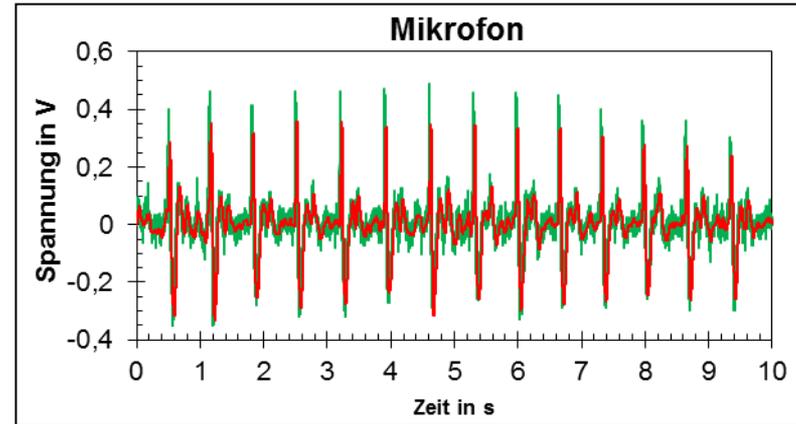
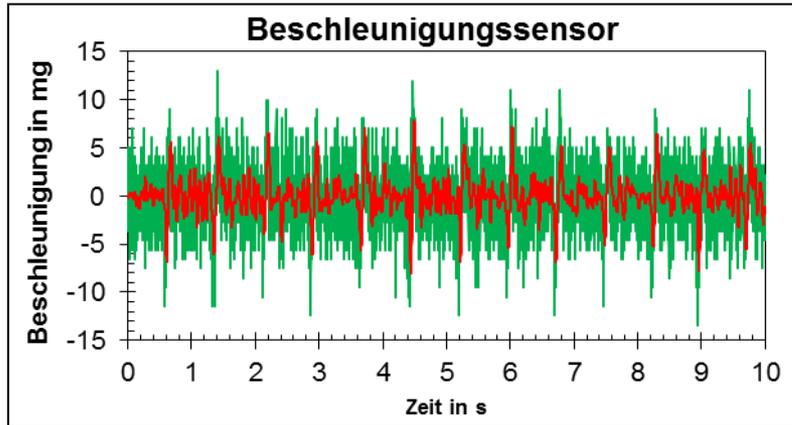


Drucksensor und am Handgelenk befestigter Demonstrator

Gliederung

- Motivation
- Entstehung der Pulswelle
- Messaufbau und Methoden
- **Messergebnisse**
- Analyse der Vitalparameter
- Zusammenfassung und Ausblick

Messergebnisse

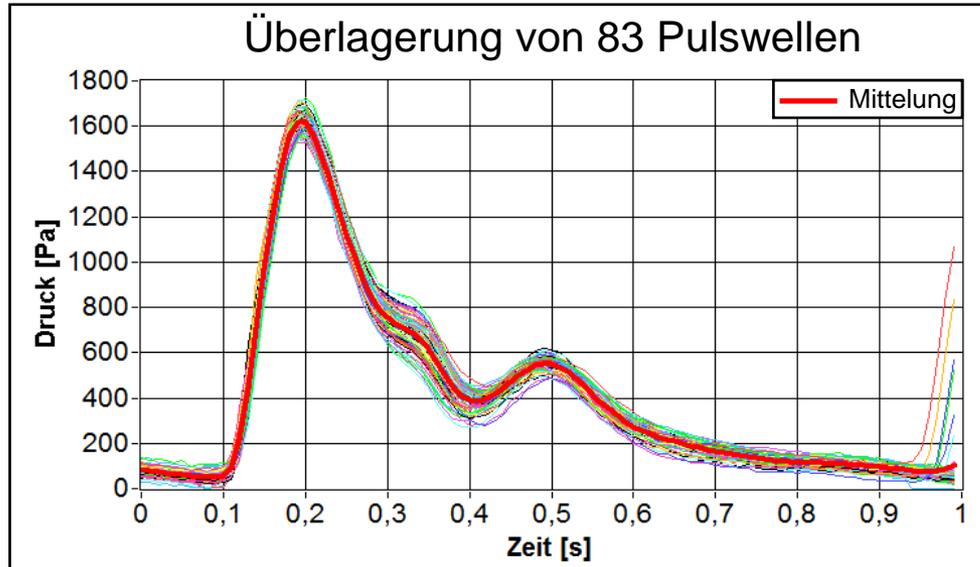


— ungefiltert — gefiltert

Tab.: charakteristische Signalparameter der MEMS-Sensoren

Sensor	BMI055	BMP180	ADMP411
Messgröße	Beschleunigung	Absolutdruck	Schalldruck
Offset	-1 g	99023 Pa	0 V
mittlere Peak-Peak-Amplitude	18,6 mg	570,5 Pa	734 mV
Effektivwert des Rauschens	2,8 mg	3,9 Pa	10 mV
Signal-Rausch-Verhältnis	1,4	31,8	20
Ermittlung der Pulsfrequenz	möglich	sehr gut	gut

Messergebnisse



- Druckverlauf von 83 aufeinanderfolgenden Pulswellen
- Ermittelte Herzfrequenz $64,5 \text{ min}^{-1}$

Vorteil der Messung mit Drucksensor

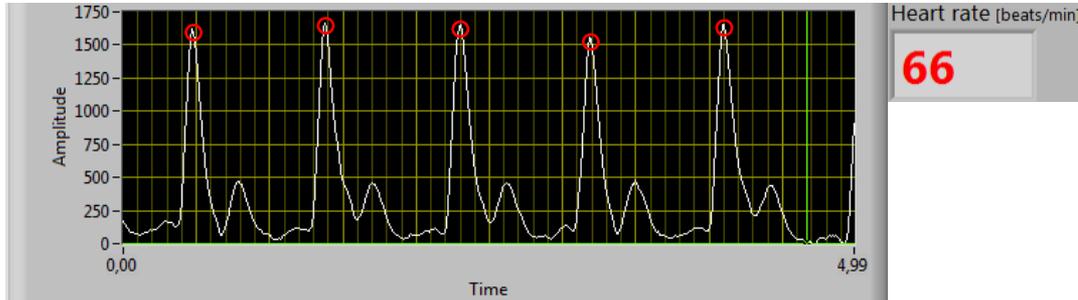
- Messung sehr gut reproduzierbar
- Bestimmung der Pulsfrequenz aus Zeitdifferenz zwischen den Peaks
- arterielle Pulswellenform kann erfasst werden → Beurteilung des Zustands der arteriellen Blutgefäße möglich [Solà 2011]

➔ MEMS-Drucksensor am besten geeignet

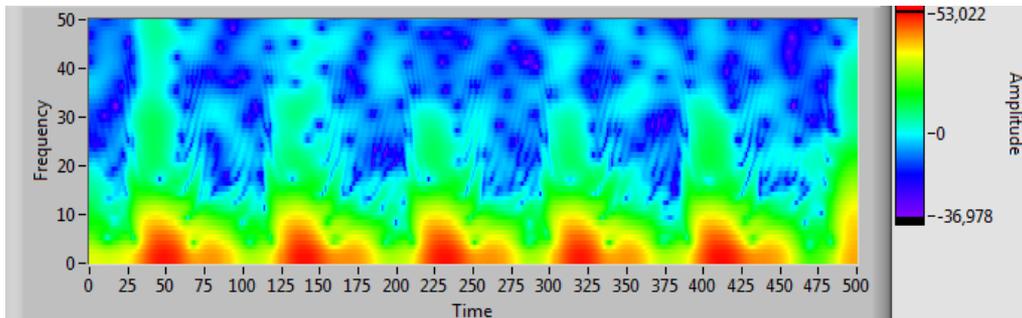
Gliederung

- Motivation
- Entstehung der Pulswelle
- Messaufbau und Methoden
- Messergebnisse
- **Analyse der Vitalparameter**
- Zusammenfassung und Ausblick

Analyse der Vitalparameter



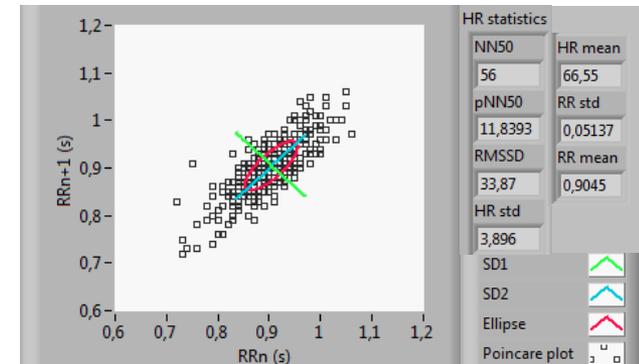
Bestimmung der Herzfrequenz



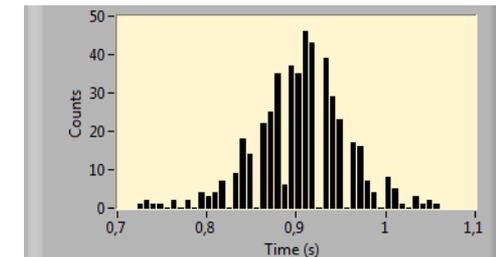
Analyse im Frequenzbereich mit Spektrogramm

mögliche Aussagen bezüglich:

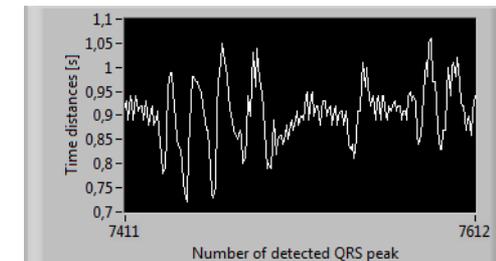
- Trainingszustand, wirkende Belastungen [7]
- vorliegende Erkrankung, Stress [7, 8]
- Herzrhythmusstörungen, Herzinfarkt [9]



Ellipsen-Fitting im Poincaré-Diagramm



RR-Intervall-Histogramm



zeitlicher Verlauf der RR-Intervalle

Gliederung

- Motivation
- Entstehung der Pulswelle
- Messaufbau und Methoden
- Messergebnisse
- Analyse der Vitalparameter
- **Zusammenfassung und Ausblick**

Zusammenfassung und Ausblick

- MEMS-Sensoren wurden auf Palpationspunkt der Arteria radialis angebracht
- Beschleunigungssensor ist für praktische Umsetzung in tragbarer Anwendungen ungeeignet
- Drucksensor und Mikrofon sind robust gegenüber Handbewegungen
→ Pulsfrequenzmessung realisierbar
- Erfassung des Pulswellenverlaufs mit Drucksensor möglich
- komfortabel tragbares Armband mit Drucksensor realisierbar

Zukünftig:

- Verbesserung der Ankopplung des Sensors auf der Hautoberfläche
- Optimierung des Filteralgorithmus
- Integration des Messsystems in eine Armbanduhr → kontinuierliche Pulsfrequenzmessung
- Untersuchung der Korrelation zwischen arteriellem Blutdruck und gemessenem Pulswellenverlauf

Literaturangaben

- [1] Bundeszentrale für politische Bildung: *Altersstruktur und Bevölkerungsentwicklung*. Online: <http://www.bpb.de/nachschlagen/zahlen-und-fakten/europa/70503/altersstruktur> [09.10.2015], 2011
- [2] Friederich, P.: *EKG-Monitoring der perioperativen Myokardischämie* [online]. Dräger Medical Deutschland GmbH, Lübeck, 2000. Erhältlich im Internet unter: <http://www.draeger.de/sites/assets/PublishingImages/Generic/Webinar/Booklet/ekg-monitoring-der-perioperativen-myokardischaemie.pdf> [Stand: 09.10.2015]
- [3] Schmidt, R.F. (Hrsg.); Lang, F. (Hrsg.): *Physiologie des Menschen mit Pathophysiologie*. 30. Aufl. Heidelberg : Springer Medizin Verlag, 2007
- [4] Dr. Heck Consulting and Engineering. *Druckwelle passiert Engstelle und erzeugt Oszillation* [online]. Erhältlich im Internet unter: http://www.dhcae.de/SER_FSI_EXP2.htm [Stand: 09.10.2015]
- [5] Anderhuber, F.(Hrsg.); Pera, F. (Hrsg.); Streicher, J. (Hrsg.) : *Waldeyer – Anatomie des Menschen*. 19. Aufl. Berlin/Boston : De Gruyter Verlag, 2012
- [6] Chan, V.; Underwood, S. : *A Single-Chip Pulsoximeter Design Using the MSP430*. SLAA274B. Dallas : Texas Instruments Inc., 2012
- [7] Löllgen, H.: *Herzfrequenzvariabilität*. In: Deutsches Ärzteblatt 1999, Vol. 96(31-32), 1999, S. 45-48.
- [8] Di Rienzo, M., Mancia, G., Parati, G., Pedotti, A., Zanchetti, A.: *Methodology and Clinical Applications of Blood Pressure and Heart Rate Analysis*. Amsterdam : IOS Press, 1999.
- [9] Kramme, R. (Hrsg.): *Medizintechnik, Verfahren – Systeme – Informationsverarbeitung*. 3. Aufl. Heidelberg : Springer Medizin Verlag, 2007



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
CHEMNITZ

9. Tagung „Feinwerktechnische Konstruktion“
12./13. November 2015 – Dresden

**Vielen Dank
für Ihre Aufmerksamkeit!**



Teile der Arbeiten wurden durch den
Europäischen Sozialfonds gefördert.

