

Prof. Dr.-Ing. Dr. med. Steffen Leonhardt  
Helmholtz-Institut für Biomedizinische  
Technik, Pauwelsstr. 20,  
D-52074 Aachen, Germany  
Telefon: +49-(0)241-80-23211  
Telefax: +49-(0)241-80-82442  
E-Mail: [leonhardt@hia.rwth-aachen.de](mailto:leonhardt@hia.rwth-aachen.de)

Datum: 11. April 2011

## “Einführung in die Medizintechnik“

Vorlesung im SS: Mo., 14.00 – 15.30 Uhr, 11. April bis 11. Juli 2010  
Übung im SS: Mo., 15.45 – 16.30 Uhr, 11. April bis 11. Juli 2010  
Raum: 2352|021, Aula 2, EG, Ahornstraße 55

### Zeitplan Sommersemester 2011

Woche	Tag	Datum	Vorlesung	Bemerkung
1	Montag	11.04.2010	<u>Vorlesung 1:</u> Einführung	
2	Montag	18.04.2010	<u>Vorlesung 2:</u> Herz & Kreislauf	
3	Montag	25.04.2010	<i>Entfällt</i>	<i>Ostermontag</i>
4	Montag	02.05.2010	<u>Vorlesung 3:</u> EKG	
6	Montag	09.05.2010	<u>Vorlesung 4: <b>Gastvortrag:</b></u> Herzunterstützungssysteme	
8	Montag	16.05.2010	<u>Vorlesung 5: <b>Gastvortrag:</b></u> Herzschrittmacher	
9	Montag	23.05.2010	<u>Vorlesung 6:</u> Elektrische Sicherheit	
10	Montag	30.05.2010	<u>Vorlesung 7:</u> Bioimpedanz	
11	Montag	06.06.2010	<u>Vorlesung 8: <b>Gastvortrag:</b></u> Personal Healthcare	<i>Nicht im Skript enthalten – Handout</i>
12	Montag	13.06.2010	<i>Entfällt</i>	<i>Exkursionswoche</i>
13	Montag	20.06.2010	<u>Vorlesung 9: <b>Gastvortrag:</b></u> Einführung in die optoelektronische Medizintechnik	
14	Montag	27.06.2010	<u>Vorlesung 10:</u> Infrarotthermographie	Voraussichtlich in Raum 1830 004, Soziologie, Eilfschornsteinstraße 7; Leider nicht barrierefrei
15	Montag	04.07.2010	<u>Vorlesung 11:</u> Wärmetherapie & Temperaturregelung	Voraussichtlich in Raum 1830 004, Soziologie, Eilfschornsteinstraße 7 Leider nicht barrierefrei
16	Montag	11.07.2010	<u>Vorlesung 12: <b>Gastvortrag:</b></u> Diabetes	

Lehrstuhl für medizinische Informationstechnik  
Univ. Prof. Dr. Ing. Dr. med. Steffen Leonhardt  
Pauwelsstr. 20 52074 Aachen

# Übung

## „Einführung in die Medizintechnik“

### Herz und Kreislauf

### 18.04.2011

#### Aufgabe 1

(1 Punkt)

In Abbildung 1 ist der zeitliche Verlauf eines Herz-Zyklus dargestellt. Jede Teilphase ist oberhalb des Diagramms mit den Ziffern 1-7 durchnummeriert. Ordnen Sie den vier physiologischen Phasen eines Herz-Zyklus jeweils die entsprechenden Teilphasen (Zahlen) zu (teilweise sind auch mehrere Zahlen einer Phase zugeordnet!).

Anspannungsphase 2

Auswurfphase 3-4

Entspannungsphase 5

Füllungsphase 6-1

#### Aufgabe 2

(1 Punkt)

Zu welchem Zeitpunkt wird das linke Ventrikelmyokard am besten mit Sauerstoff versorgt?

5-2: Diastole

#### Aufgabe 3

(1 Punkt)

Wie erklärt sich die „Inzisur“ im Aortendruck?

Massenrückhub des Blutes

elektrisches Signal:

mechanisch Herz:

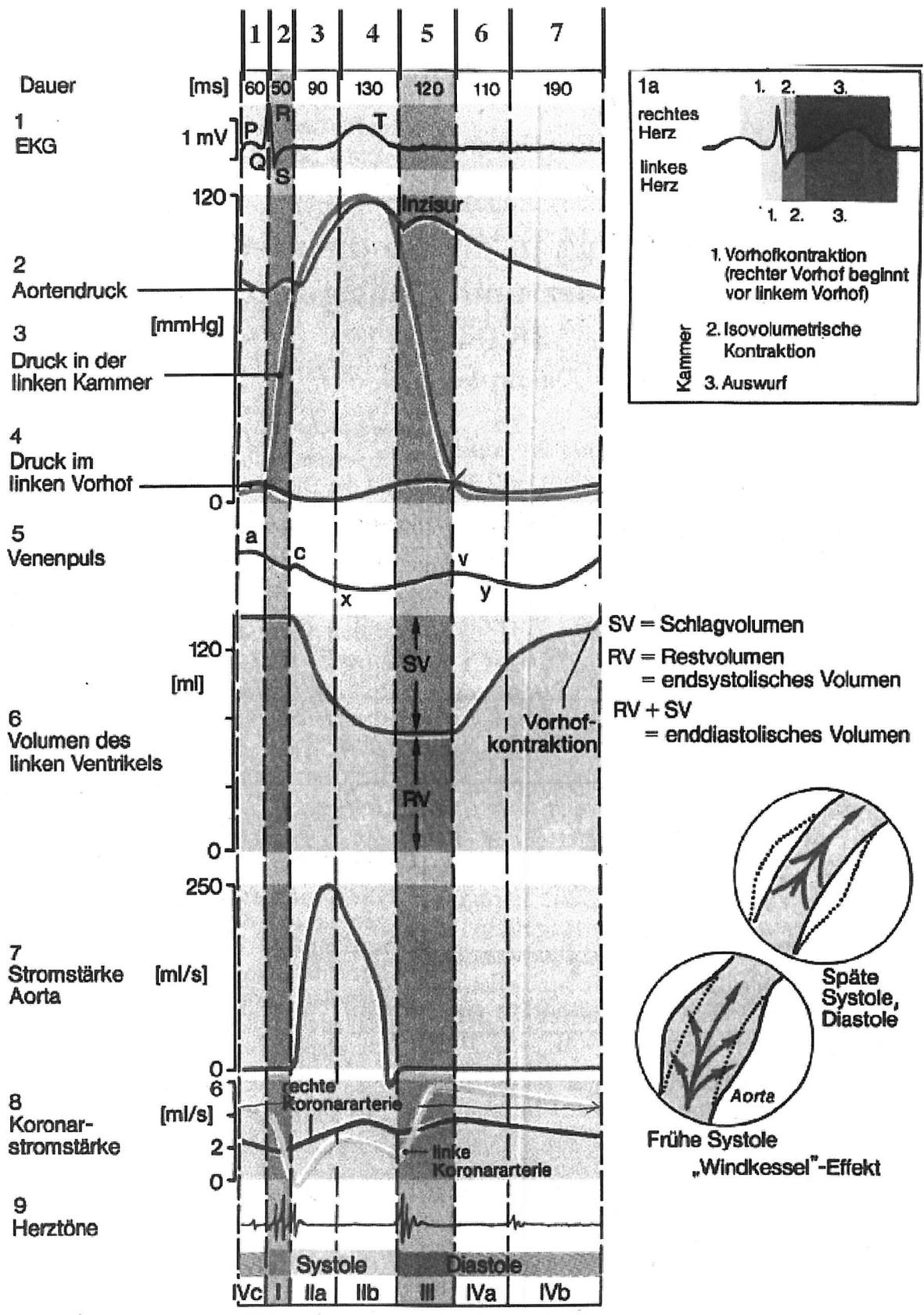


Abbildung 1: Druckverlauf

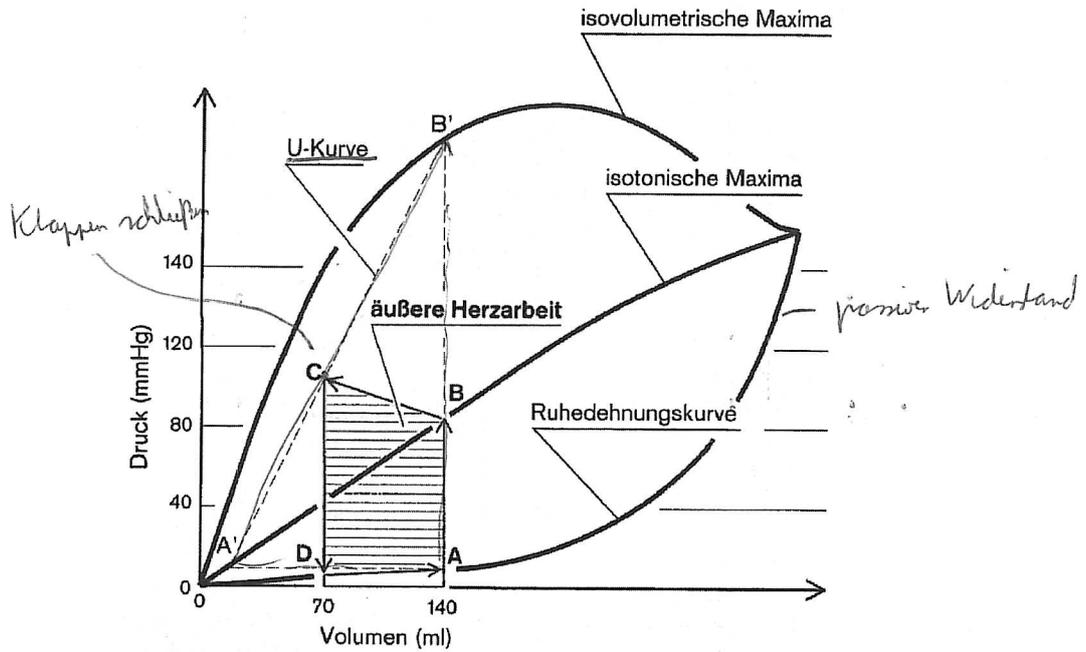


Abbildung 2: pV-Diagramm

**Aufgabe 4**

(1 Punkt)

Warum liegen Aortendruck und Ventrikeldruck (d.h. Kammerdruck) in Teilphase 3 nicht exakt aufeinander?

*Strömungswiderstand der Herzklappen*

**Aufgabe 5**

(1 Punkt)

In Abbildung 2 ist ein „normaler“ Herz-Zyklus als pV-Diagramm dargestellt.

(a) Erklären Sie das Zustandekommen der Kurven der isometrischen (bzw. isovolumetrischen) Maxima, der isotonischen (bzw. isobaren) Maxima und der U-Kurve!

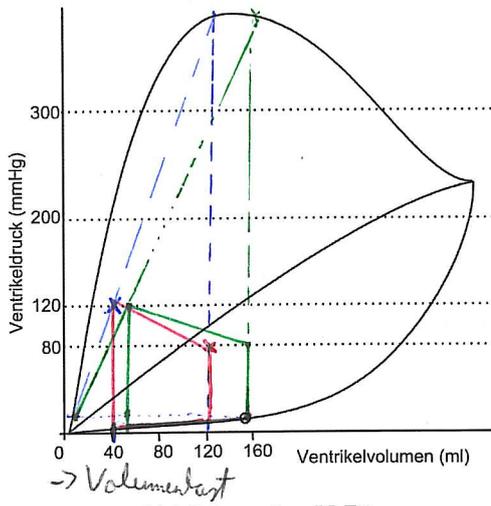
(b) Wie lauten die Kontraktionsformen in der Anspannungs- und Austreibungsphase?

*isovolumetrisch*                      *isoton*

(c) Liegt der Punkt B im zweiten Diagramm nur zufällig auf der Kurve der isotonischen Maxima? Begründen Sie Ihre Aussage.

*Zufall: B wird durch den Diastolischen-Blutdruck vorgegeben → Klappen auf*

A6)



A7)

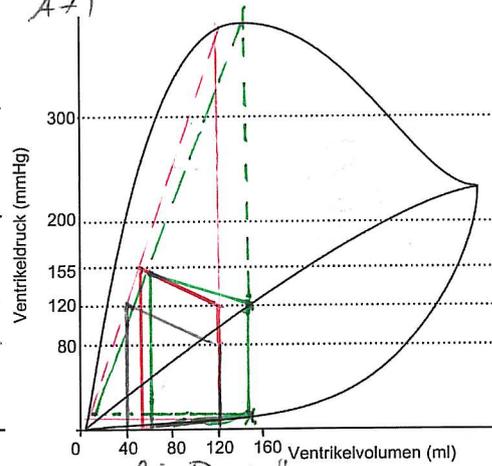


Abbildung 3: pV-Diagramm und Frank-Starling-Mechanismus

**Aufgabe 6**

(1 Punkt)

Tragen Sie in das linke Diagramm in Abbildung 3 die pV-Kurve des Herzens bei erhöhter Volumenlast ein. Das enddiastolische Füllvolumen des Herzens beträgt 120 ml, das Schlagvolumen 80 ml. Der diastolische Blutdruck beträgt 80 mmHg, der systolische Blutdruck 120 mmHg. Konstruieren Sie das pV-Diagramm für den Fall, dass die Volumenlast von 80 ml auf 115 ml ansteigt (neues enddiastolische Füllvolumen mit Kreis markiert).

**Aufgabe 7**

(1 Punkt)

Tragen Sie in das rechte Diagramm in Abbildung 3 die pV-Kurve des Herzens bei erhöhter Druckbelastung (erhöhte Nachlast) ein. In Ruhe gelten die gleichen Voraussetzungen wie in Aufgabe 6. Dann steigt der diastolische Blutdruck sprunghaft auf 120 mmHg. Zeichnen Sie die Veränderungen im pV-Diagramm! (Hinweis: Konstruieren Sie die auxotone Austreibungsphase durch Parallelverschiebung der Linie.)

**Aufgabe 8**

(1 Punkt)

Nach wie vielen Herzschlägen erfolgt jeweils die Anpassung auf veränderte Volumen- oder Druckbelastung?

Volumenlast: 1 Herzschlag  
Druckänderung: 2 Herzschläge

**Aufgabe 9**

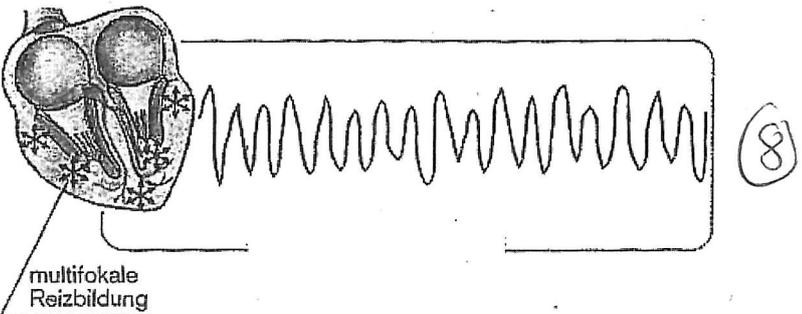
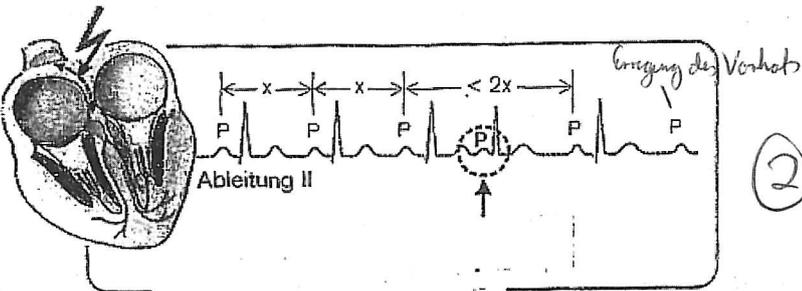
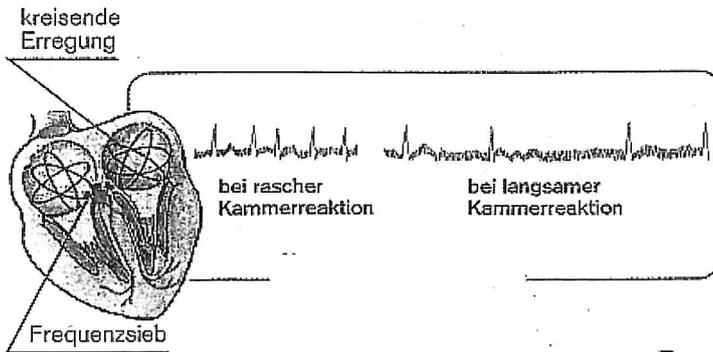
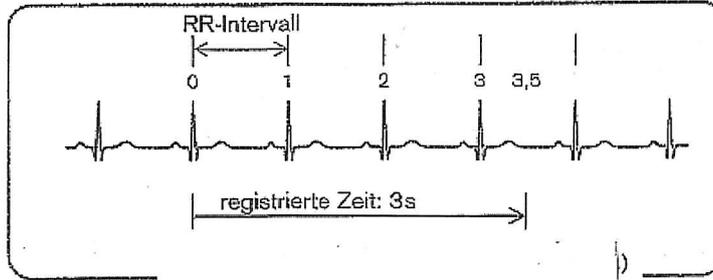
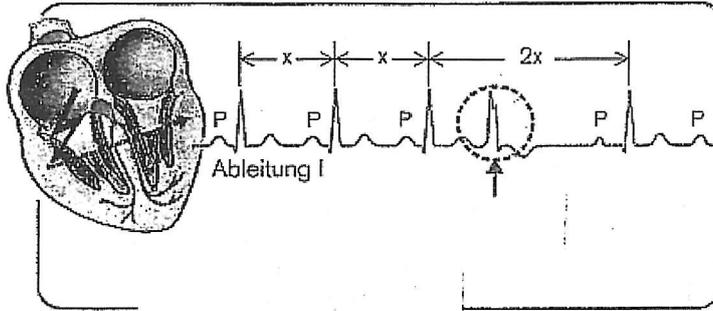
(1 Punkt)

Es sind acht verschiedene EKG-Kurven dargestellt. Ordnen Sie den Kurven folgende Krankheitsbilder zu:

1. Normales EKG
2. Supraventrikuläre Extrasystole
3. Ventrikuläre Extrasystole
4. AV-Block 1. Grades
5. AV-Block 2. Grades
6. AV-Block 3. Grades
7. Vorhofflimmern
8. Kammerflimmern

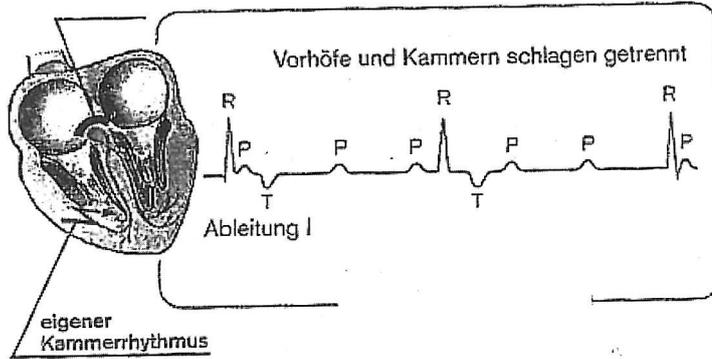
EKG-Diagramm

Krankheitsbild

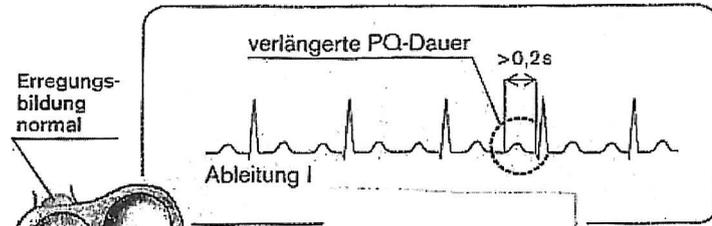


EKG-Diagramm

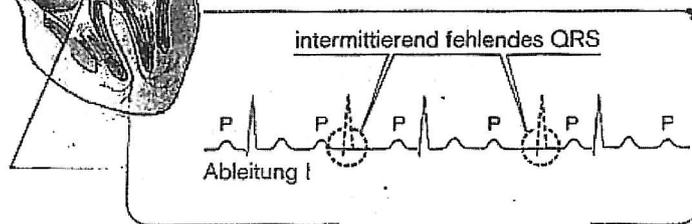
Krankheitsbild



6



4



5

# Medizintechnik Großübung 1

18.4.17

- Endocard: Innenwand des Herzens
- Myocard: Arbeitsmuskulatur
- Pericard:
- Aorta: Hauptschlagader
- Vena cava (Hohlvene)
- Rechtes / linkes Atrium: Vorhöfe („Turbotrade“)
- 4 Phasen des Herzschlages:
  - Anspannung (Kontraktion)
  - Auswurf
  - Entspannung
  - Füllung
- Ventrikelvolumen:
  - isotonische Maxima
  - isovolumetrische Maxima
  - > Klausur pV-Diagramm aufbauen.

pV-Diagramm:

$$\text{Arbeit: } J = N \cdot m$$

$$\text{Druck: } p_a = \frac{N}{m^2}$$

$$\text{Volumen: } m^3$$

- EKG - Ausprägungsmöglichkeiten:
  - Sinus - Tachykardie: Pulsrate erhöht
  - Sinus - Bradykardie: Pulsrate erniedrigt
  - Rhythmusstörungen (Arrhythmien)
    - ↳ Vorhofflimmern
    - ↳ Kammerflimmern
    - ↳ Extrasystolen

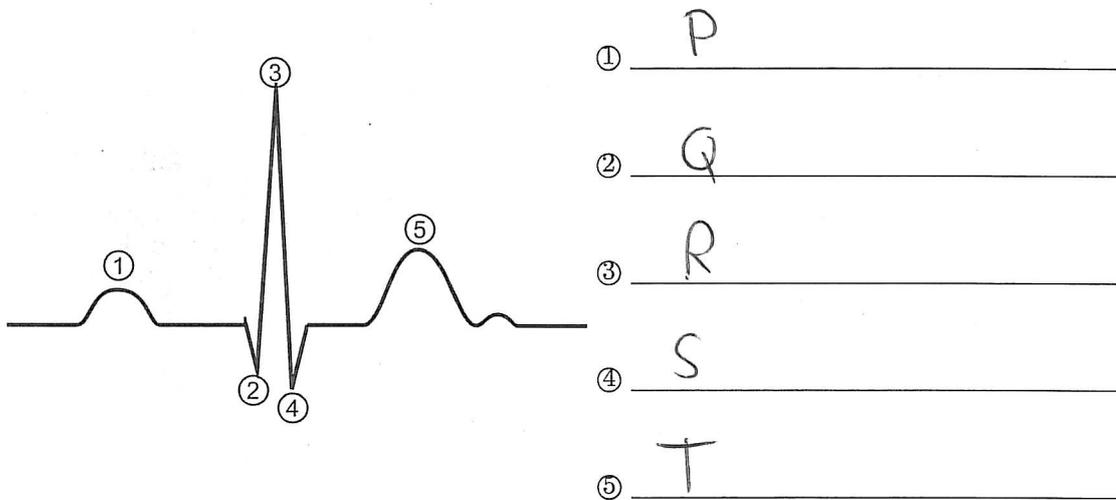
Lehrstuhl für medizinische Informationstechnik  
Univ. Prof. Dr. Ing. Dr. med. Steffen Leonhardt  
Pauwelsstr. 20 52074 Aachen

Übung  
„Einführung in die Medizintechnik“  
EKG  
02.05.2011

Aufgabe 1

(2½ Punkte)

Ergänzen Sie die Bezeichnungen der Ausschläge ①-⑤ im EKG.



Aufgabe 2

(3 Punkte)

Geben Sie zu den Ausschlägen im EKG aus Aufgabe 1 die physiologische Ursache an.

- ① Vorhoferregung
- ②-④ Kammerkontraktion
- ⑤ Kammerschlaffung

**Aufgabe 3**

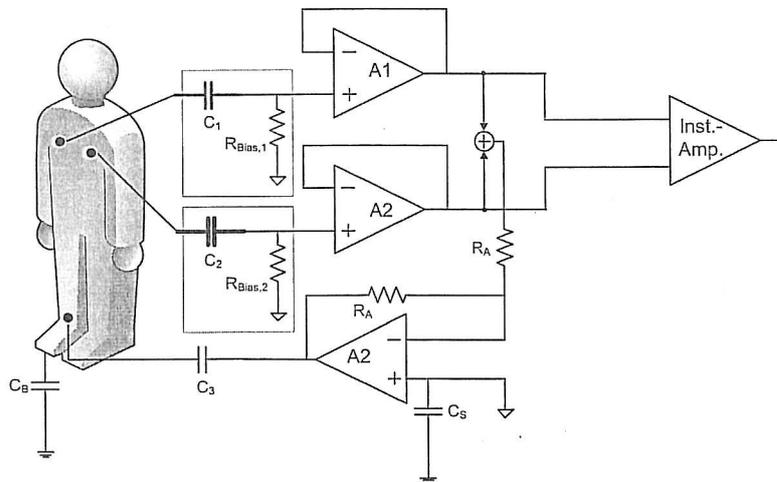
**(3 Punkte)**

- (a) Worüber kann ein EKG Auskunft geben?
  
- (b) Worüber kann ein EKG alleine keine Auskunft geben?

**Aufgabe 4**

**(3 Punkte)**

Welche Störeinflüsse wirken auf ein EKG? Nennen Sie eine Möglichkeit zur Kompensation und beschreiben Sie diese kurz.



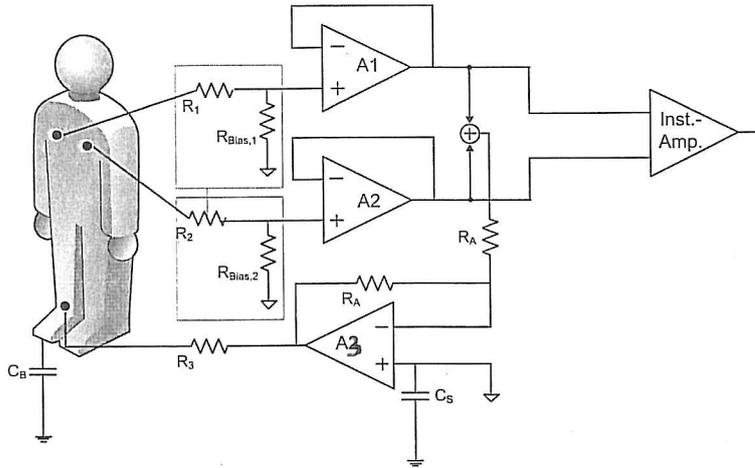
**Aufgabe 6**

(10 Punkte)

**Stabilitätsbetrachtung - kapazitives EKG**

Gegeben ist die Skizze zur kapazitiven Ableitung eines EKG mit „Driven Right Leg“.

- Zeichnen Sie das Ersatzschaltbild der skizzierten Messung?
- Stellen Sie die Übertragungsfunktion des aufgeschnittenen Rückkoppelkreises im Laplace-Bereich auf.
- Zeichnen Sie das Bodediagramm und bewerten Sie die Stabilität.



**Aufgabe 5**

(12 Punkte)

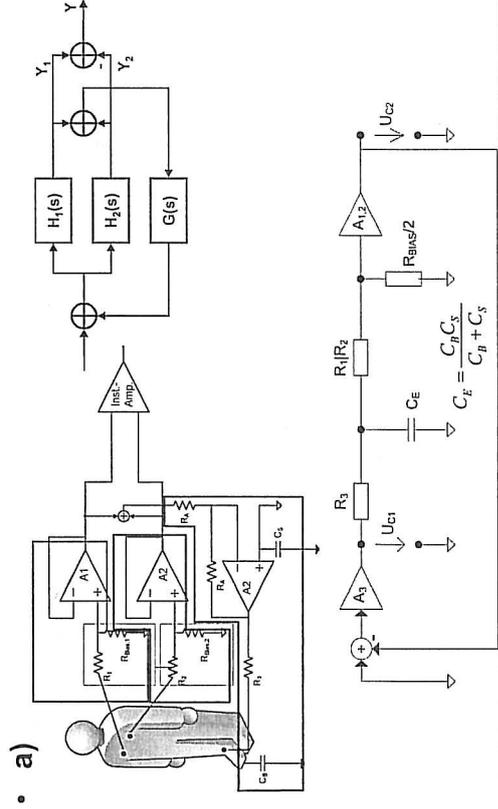
**Stabilitätsbetrachtung - konduktives EKG**

Gegeben ist die Skizze zur konduktiven Ableitung eines EKG mit „Driven Right Leg“.

- Zeichnen Sie das Ersatzschaltbild der skizzierten Messung?
- Stellen Sie die Übertragungsfunktion des aufgeschnittenen Rückkoppelkreises im Laplace-Bereich auf.
- Zeichnen Sie das Bodediagramm und bewerten Sie die Stabilität.
- Erläutern Sie eine mögliche Stabilitätsverbesserung

### Stabilitätsanalyse des rückgekoppelten EKG

### 5) Konduktives EKG



### Aufgaben

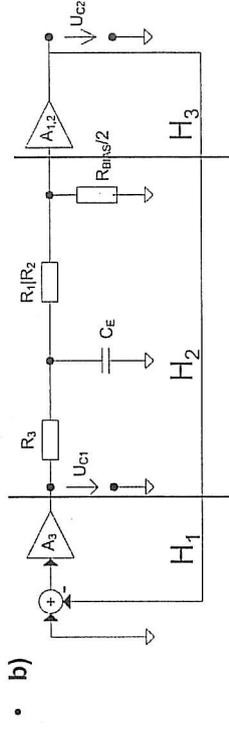
#### 5) Konduktives EKG

- Zeichnen Sie das Ersatzschaltbild der "Driven-Right-Leg"-Schaltung für das konduktive EKG.
- Stellen Sie die Übertragungsfunktion des aufgeschnittenen Rückkopplungskreises im Laplace-Bereich auf.
- Zeichnen Sie das Bodediagramm und bewerten Sie die Stabilität.
- Erläutern Sie eine mögliche Stabilitätsverbesserung.

#### 6) Kapazitives EKG

- Zeichnen Sie das Ersatzschaltbild der "Driven-Right-Leg"-Schaltung für das kapazitive EKG.
- Stellen Sie die Übertragungsfunktion des aufgeschnittenen Rückkopplungskreises im Laplace-Bereich auf.
- Zeichnen Sie das Bodediagramm und bewerten Sie die Stabilität.

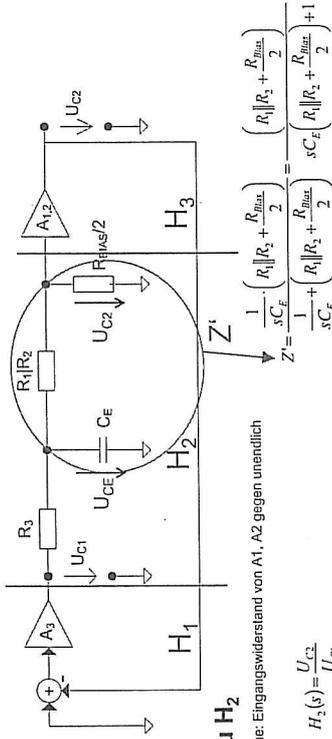
### 5) Konduktives EKG



$$H_{\text{konid}}(s) = H_1(s) \cdot H_2(s) \cdot H_3(s)$$

- Zu  $H_1$  und  $H_3$
- Invertierende Verstärker mit Verstärkung G
- Berücksichtigung des Verstärkungsbandbreitenprodukts B
 
$$\Rightarrow H_{\text{Transmitter}}(s) = \frac{G}{1 + \frac{2\pi B}{G} s}$$
- also:  $H_1(s) = \frac{G_{30}}{1 + \frac{2\pi B}{G_{30}} s}$ ,  $H_3(s) = \frac{1}{1 + \frac{2\pi B}{G_{10,20}} s}$ , mit  $G_{10,20} = 1$

### 5) Konduktives EKG



• Zu  $H_2$

Annahme: Eingangswiderstand von A1, A2 gegen unendlich

$$H_2(s) = \frac{U_{C2}}{U_{C1}}$$

$$\text{Spgs-teiler 1 } \frac{U_{C2}}{U_{C1}} = \frac{Z'}{R_3 + Z'}$$

$$\text{Spgs-teiler 2 } \frac{U_{C2}}{U_{CE}} = \frac{\frac{R_{Bias}}{2}}{R_1 \parallel R_2 + \frac{R_{Bias}}{2}}$$

$$H_2(s) = \frac{U_{C2}}{U_{C1}} = \frac{Z'}{R_3 + Z'}$$

$$Z' = \frac{1}{sC_E} \left( R_1 \parallel R_2 + \frac{R_{Bias}}{2} \right) + 1$$

$$= \frac{1}{sC_E} \left( R_1 \parallel R_2 + \frac{R_{Bias}}{2} \right) + 1$$

### 5) Konduktives EKG

$$H_2(s) = \frac{U_{C2}}{U_{C1}} = \frac{Z'}{R_3 + Z'} \cdot \frac{R_{Bias}}{R_1 \parallel R_2 + \frac{R_{Bias}}{2}}$$

$$R_1 = R_2 \Rightarrow R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1}{2} \Rightarrow Z' = \frac{R_1 \parallel R_2 + \frac{R_{Bias}}{2}}{sC_E (R_1 \parallel R_2 + \frac{R_{Bias}}{2}) + 1} = \frac{(R_1 + R_{Bias})}{sC_E (R_1 + R_{Bias}) + 2}$$

$$\Rightarrow H_2(s) = \frac{\frac{R_{Bias}}{sC_E (R_1 + R_{Bias}) + 2}}{R_3 + \frac{R_{Bias}}{sC_E (R_1 + R_{Bias}) + 2}} \cdot \frac{R_{Bias}}{R_1 \parallel R_2 + \frac{R_{Bias}}{2}} = \frac{R_{Bias}}{R_3 (sC_E (R_1 + R_{Bias}) + 2) + R_1 + R_{Bias}} \cdot \frac{R_{Bias}}{R_1 \parallel R_2 + \frac{R_{Bias}}{2}}$$

### 5) Konduktives EKG

$$H_{kond}(s) = H_1(s) \cdot H_2(s) \cdot H_3(s)$$

$$H_1(s) = \frac{G_{30}}{1 + \frac{G_{30}}{2\pi B} s}$$

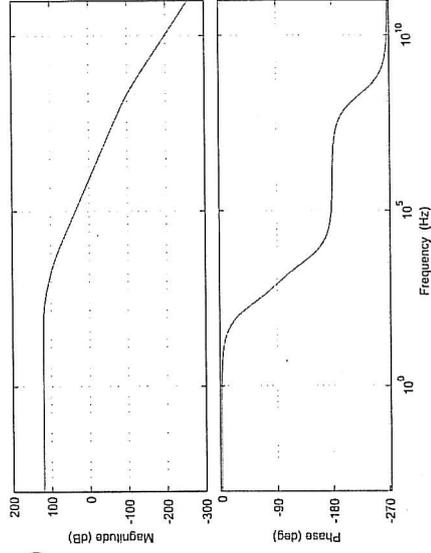
$$H_2(s) = \frac{R_{Bias}}{R_3 (sC_E (R_1 + R_{Bias}) + 2) + R_1 + R_{Bias}}$$

$$H_3(s) = \frac{1}{1 + \frac{1}{2\pi B} s}$$

$$H_{kond}(s) = \frac{G_{30}}{1 + \frac{G_{30}}{2\pi B} s} \cdot \frac{R_{Bias}}{R_3 ((R_1 + R_B) s C_E + 2) + R_1 + R_{Bias}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{2\pi B} s}$$

### 5) Konduktives EKG

Bode Diagram

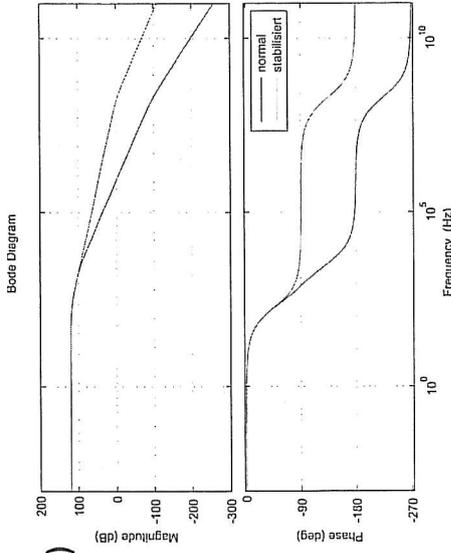


• c)

—  $\varphi_R = 0.014^\circ \rightarrow$  instabil

—  $PT_3$ -Übertragungsverhalten

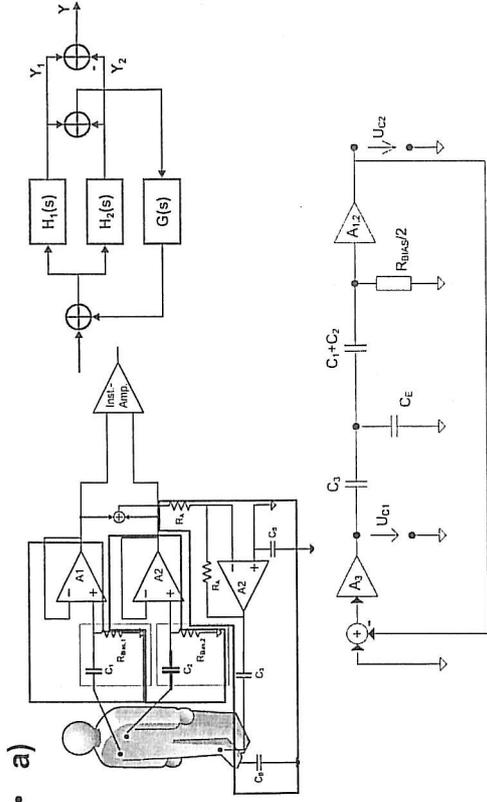
### 5) Konduktives EKG



d)

- Stabilisation durch Parallelschalten eines Kondensators zu  $R_3 \rightarrow \varphi_R = 53,7602^\circ$

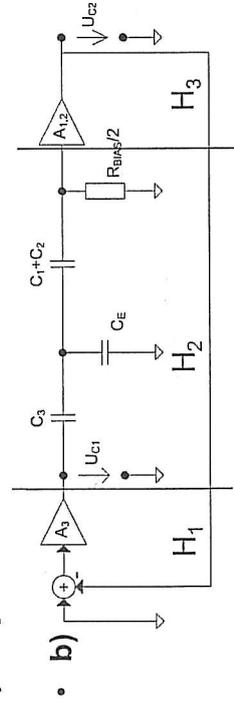
### 6) Kapazitives EKG



a)

Dipl.-Ing. Daniel Teichmann, 02. Mai 2011

### 6) Kapazitives EKG



b)

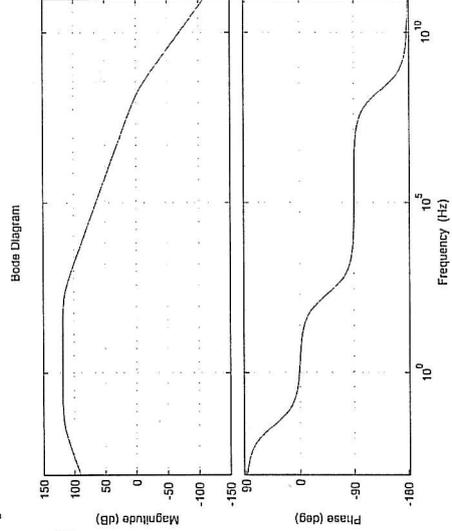
$$H_{kap}(s) = H_1(s) \cdot H_2(s) \cdot H_3(s)$$

- Berechnungsvorgehen wie bei 1) b)

...

$$H_{kap}(s) = \frac{G_{30}}{1 + \frac{G_{30}}{2\pi B} s} \cdot \frac{s C_3 R_{Bitts}}{1 + \frac{C_3}{C_1} + \frac{C_3}{C_1} s} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{2\pi B} s}$$

### 6) Kapazitives EKG



c)

- $\varphi_R = 55,5161^\circ \rightarrow$  stabil
- $DT_3$ -Übertragungsverhalten

Dipl.-Ing. Daniel Teichmann, 02. Mai 2011

# Medizintechnik Großübung 2

A3)

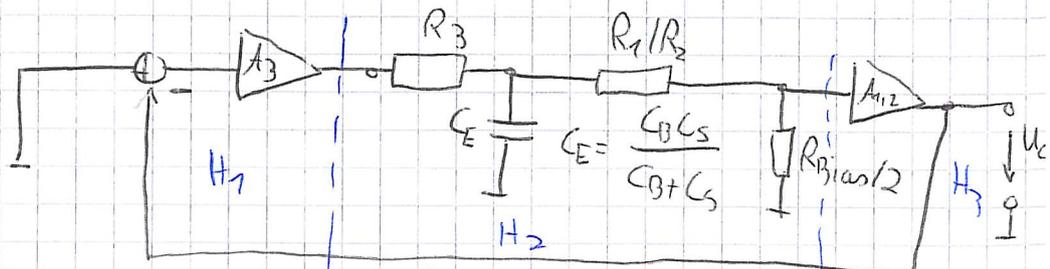
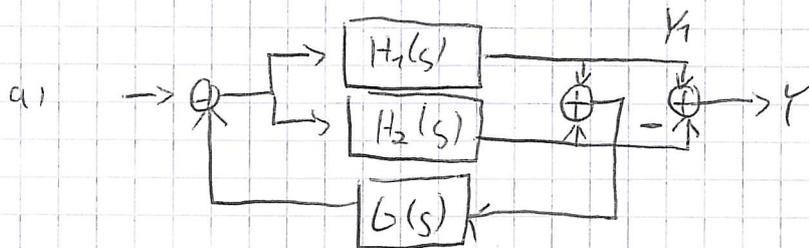
- a)
- Herzlage
  - Herzfrequenz
  - Erregungsrhythmus
  - Erregungsspannung
- b)
- Kontraktion
  - Pumpleistung

A4)

- a)
- Stromversorgungsmittel (CMRR)
  - Gleichabstörger

- b)
- Gleichabstörger kann durch "Driven-Right-Leg"-Schaltung
  - Prinzip: Der Mittelwert der beiden Elektroden wird gebildet und einem invertierenden Verstärker an den Patienten zurückgeführt.

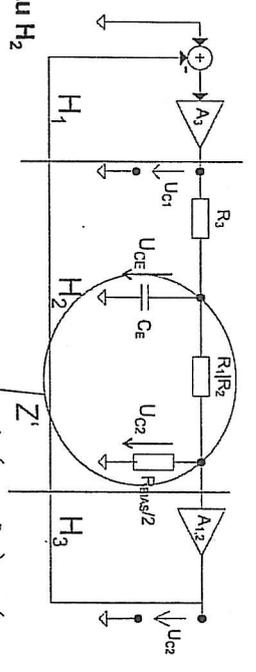
A5)



(für Klausur - sehr ähnlich) ↔ siehe Ausdruck



# 5) Konduktives EKG



• Zu  $H_2$

Annahme: Eingangswiderstand von  $A_1, A_2$  gegen unendlich

$$H_2(s) = \frac{U_{c2}}{U_{c1}} = \frac{Z'}{R_3 + Z'}$$

$$Z' = \frac{1}{\frac{1}{sC_E} + \frac{R_1 \parallel R_2 + \frac{R_{lim}}{2}}{R_1 \parallel R_2 + \frac{R_{lim}}{2}} + 1}$$

Sigs-leiter 1  $\frac{U_{c1}}{U_{c1}} = \frac{Z'}{R_1 + Z'}$

Sigs-leiter 2  $\frac{U_{c2}}{U_{c2}} = \frac{\frac{R_{lim}}{2}}{R_1 \parallel R_2 + \frac{R_{lim}}{2}}$

$$I_1(s) = \frac{U_{c2}}{U_{c1}} = \frac{Z'}{R_1 + Z'} \cdot \frac{\frac{R_{lim}}{2}}{R_1 \parallel R_2 + \frac{R_{lim}}{2}}$$

# 5) Konduktives EKG

$$H_2(s) = \frac{U_{c2}}{U_{c1}} = \frac{Z'}{R_3 + Z'} \cdot \frac{\frac{R_{lim}}{2}}{R_1 \parallel R_2 + \frac{R_{lim}}{2}}$$

$$R_1 = R_2 \Rightarrow R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1}{2}$$

$$\Rightarrow Z' = \frac{\left( R_1 \parallel R_2 + \frac{R_{lim}}{2} \right)}{sC_E \left( R_1 \parallel R_2 + \frac{R_{lim}}{2} \right) + 1} = \frac{\left( \frac{R_1}{2} + R_{lim} \right)}{sC_E \left( \frac{R_1}{2} + R_{lim} \right) + 2}$$

$$\Rightarrow H_2(s) = \frac{\frac{\frac{R_{lim}}{2}}{R_1 + \frac{R_{lim}}{2}} + 2}{\frac{R_1 + \frac{R_{lim}}{2}}{R_1 + \frac{R_{lim}}{2}} + 2} \cdot \frac{\frac{R_{lim}}{2}}{R_1 \parallel R_2 + \frac{R_{lim}}{2}}$$

$$= \frac{R_{lim}}{R_1 (sC_E (R_1 + R_{lim}) + 2) + R_1 + R_{lim}}$$

# 5) Konduktives EKG

$$H_{konf}(s) = H_1(s) \cdot H_2(s) \cdot H_3(s)$$

$$H_1(s) = \frac{G_{in}}{1 + \frac{G_{in}}{2\pi B} s}$$

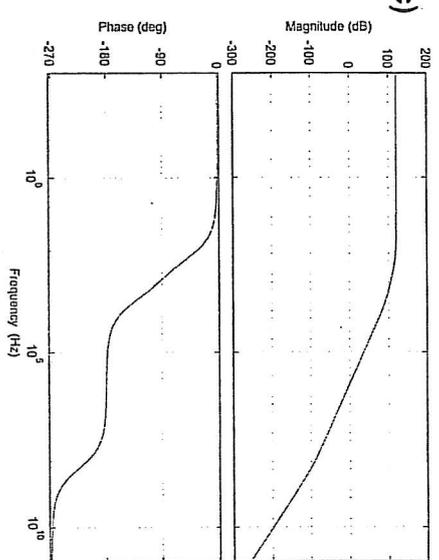
$$H_2(s) = \frac{R_{lim}}{R_1 (sC_E (R_1 + R_{lim}) + 2) + R_1 + R_{lim}}$$

$$H_3(s) = \frac{1}{1 + \frac{1}{2\pi B} s}$$

$$H_{konf}(s) = \frac{G_{30}}{1 + \frac{G_{30}}{2\pi B} s} \cdot \frac{R_{Bios}}{R_3 ((R_1 + R_B) sC_E + 2) + R_1 + R_{Bios}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{2\pi B} s}$$

# 5) Konduktives EKG

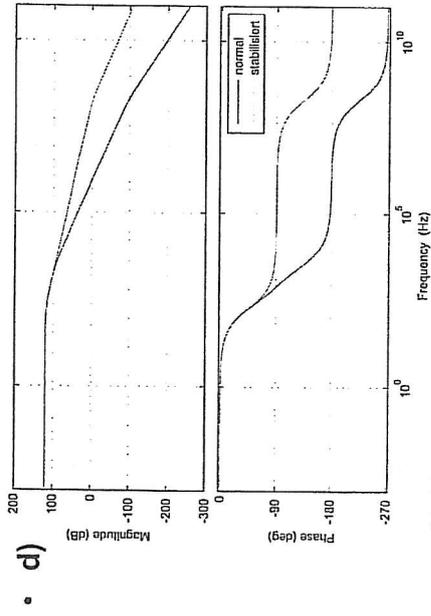
Bode Diagram



- c)
- $\varphi_R = 0.014^\circ \rightarrow$  instabil
- PT<sub>3</sub>-Übertragungsverhalten

# 5) Konduktives EKG

Bode Diagram

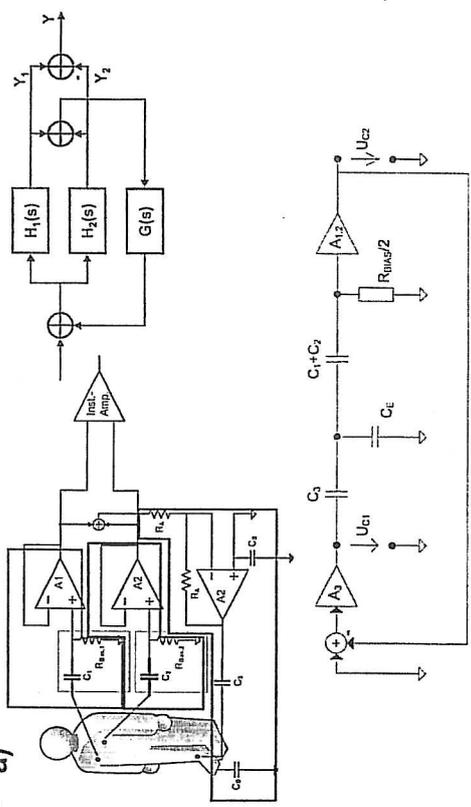


- d)

— Stabilisation durch Parallelschalten eines Kondensators zu  $R_3 \rightarrow \varphi_R = 53,7602^\circ$

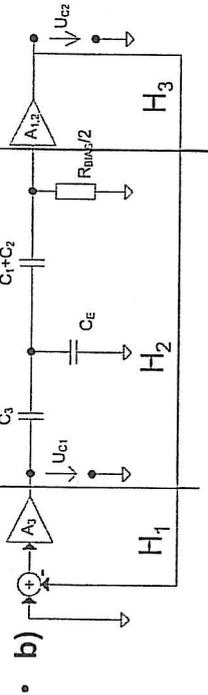
# 6) Kapazitives EKG

- a)



Dipl.-Ing. Daniel Teichmann, 02. Mai 2011

# 6) Kapazitives EKG



- b)

$$H_{Kap}(s) = H_1(s) \cdot H_2(s) \cdot H_3(s)$$

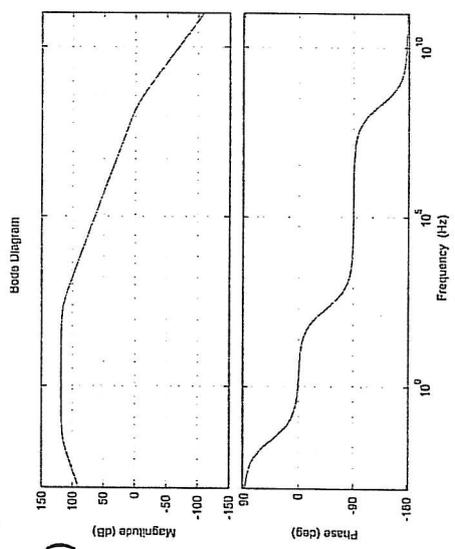
• Berechnungsvorgehen wie bei 1) b)

- ...

$$H_{Kap}(s) = \frac{G_{30} \cdot s C_3 R_{Bios}}{1 + \frac{G_{30}}{2\pi B} s} \cdot \frac{1}{s R_B (C_3 + C_E) + 2 + \frac{C_E}{C_1} + \frac{C_3}{C_1}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{2\pi B} s}$$

# 6) Kapazitives EKG

- c)



—  $\varphi_R = 55,5161^\circ \rightarrow$  stabil  
 —  $DT_3$ -Übertragungsverhalten

Großübung 3

Montag, 09. Mai 2011

## Aufgaben zur Übung „Herzunterstützungssysteme“

### 1.) Perkutane Herzunterstützung:

Sowohl die intraaortale Ballonpumpe („Gold Standard“), als auch die Impella<sup>®</sup> Blutpumpen sind perkutane Unterstützungssysteme.

- a. Beschreiben Sie die perkutane Implantation in Stichworten.
- b. Nennen Sie drei Kontraindikationen und begründen Sie die Gefährdung für den Patienten.
- c. Was sind mögliche Komplikationen der perkutanen Herzunterstützung

### 2.) Bewertung der Herzunterstützung:

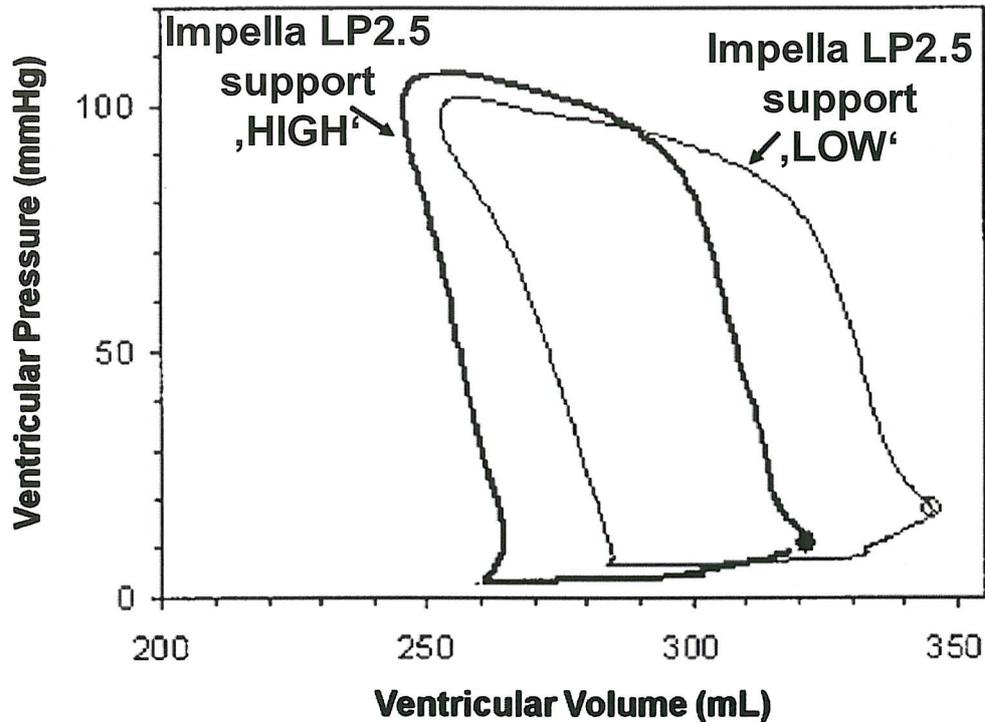
Ein Herzpatient (175cm, 87,5kg) wurde in die Kardiologie eingeliefert. Es wurde ein erhöhter Puls von 120bpm bei einem mittleren Blutdruck von 65mmHg festgestellt. Die Radiologische Untersuchung ergab ein max. Ventrikelvolumen von 170ml und eine Auswurfrate von 20%. Der Patient wird zur Stabilisierung mit einem Herzunterstützungssystem versorgt und anschließend wird eine perkutane Intervention durchgeführt. Die Unterstützungsleistung des Pumpsystems beträgt im Mittel 4l/min.

Nach einigen Stunden stabilisiert sich der Patient. Auf der Intensivstation wird ein mittlerer Blutdruck von 75mmHg bestimmt. Mit Hilfe des Fickschen Prinzips wird ein Herzminutenvolumen von ca. 6l/min bestimmt.

- a. Bestimmen Sie das Herzminutenvolumen und den Cardiac Power Index bei Einlieferung
- b. Bestimmen Sie die Leistung des Herzmuskels und die Leistung des Herzunterstützungssystems auf der Intensivstation.
- c. Wie wirkt sich die Herzunterstützung auf die Leistungsbilanz aus?

### 3.) Diskussion kontinuierliche Herzunterstützung im PV-Diagramm

Die Abbildung zeigt das PV-Diagramm für zwei verschiedene Betriebszustände einer Impella 2.5 Pumpe. Diese Pumpe kann bis zu 2,5 l/min Blut fördern und ist für die kardiologische Anwendung bestimmt. Das Diagramm wurde von Valgimigli et. al. in einem 57-jährigen Patienten aufgenommen. Im folgenden soll das Diagramm kurz diskutiert werden:



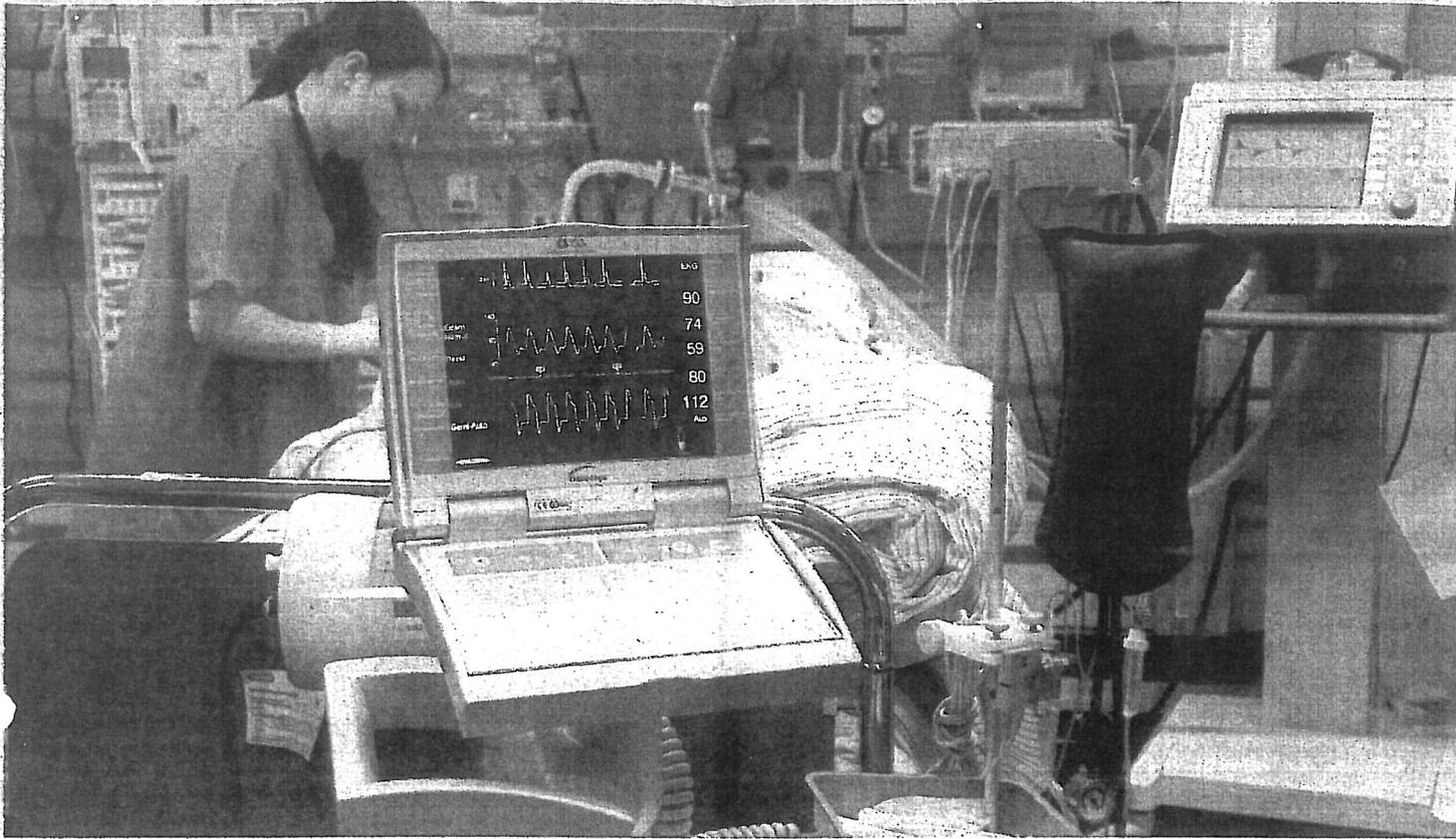
Quelle: Valgimigli et al. Catheterization and Cardiovascular Interventions 65: 263-267 (2005)

- Markieren Sie die markanten Punkte/Intervalle des Herzzyklus in die Abbildung ein:
  - Isovolumetrische Relaxation
  - Diastolische Füllung
  - Isovolumetrische Kontraktion
  - Öffnen der Aortenklappe
  - Auswurfphase
  - Schließen der Aortenklappe.
- Überlegen Sie, ob das Pumpsystem die Neigung der Kurve während der isovolumetrischen Kontraktion signifikant verändert.
- Warum verschiebt sich das PV-Diagramm nach links.
- Wie beeinflusst die Änderung der Pumpleistung die äußere Herzarbeit?
- Welchen Nutzen hat das Pumpsystem für den Patienten tatsächlich?

→ Fotos

Hinweis: Cardiac Output: Herzminutenvolumen

Frank-Starling-Prozess: Wiki



Alle Hände voll zu tun: Ärzte und Pflegepersonal kümmern sich rund um die Uhr um die Patienten in den 120 Intensivbetten des Klinikums. Fotos: UKA

# Wo jeder Notfall versorgt wird

An den kalten Tagen muss die Notaufnahme des Uniklinikums 20 Prozent mehr Patienten behandeln. Vor allem die Zahl der Herz-Kreislaufprobleme nimmt zu. Alle Intensivbetten wie immer belegt.

VON TOBIAS RÖBER

**Aachen.** In den Zimmern liegen schwerkranke Menschen. In ihren Körpern stecken Kanülen und Schläuche. Geräusche sind kaum zu hören, nur das monotone Piepsen der Geräte. Viele Ärzte und Pfleger kümmern sich um die Patienten, mehr als auf den normalen Stationen. Rund um die Uhr behandeln und überwachen sie die Patienten – persönlich und über Monitore. Die insgesamt 120 Intensivbetten des Aachener Klinikums sind stets gut ausgelastet. „Wir halten hier Hochleistungsmedizin vor und können damit vielen lebensbedrohlich Erkrankten oder Verletzten helfen“, erklärt Professor Gernot Marx, Anästhesiologe und Direktor der Klinik für operative Intensivmedizin Erwachsene. Selbst wenn zeitweilig ein erhöhtes Patientenaufkommen auftritt oder unvorgesehene Notfallpatienten eingeliefert werden, ist man in der Lage, alle zu versorgen. Erleichtert wird das durch die fächerübergreifende Organisation in der operativen Intensivmedizin. Dort werden vor

allem Patienten behandelt, die schwere Operationen hinter sich haben, aber auch Patienten nach schweren Unfällen, mit Sepsis oder Notfälle wie Hirnblutungen. Daneben haben die internistischen Fachkliniken eigene Intensivstationen, beispielsweise für Patienten mit kardiologischen oder neurologischen Erkrankungen.

Wenn die Patienten über die akut kritische Phase hinweg sind, aber weiter lebenswichtige Funktionen überwacht werden müssen,



„Jeder Notfall wird versorgt“, sagt Gernot Marx vom Aachener Uniklinikum.

kommen sie zunächst auf eine der Intermediate Care Stationen. 48 Plätze gibt es dort insgesamt. Auch die sind stark belegt. Die Fluktuation auf den Intensiv- und Intermediate Care Stationen ist hoch. 2,7 Tage bleiben die Patienten im Schnitt auf der Zwischenstation. 5,4 Tage sind es auf der Intensivstation.

Peter-Friedrich Petersen bekommt die Patienten, die notfallmäßig aufgenommen werden, als Leiter der Notaufnahme als erster zu Gesicht. Im Moment sind es besonders viele, eine steigende Zahl mit Herz-Kreislaufproblemen darunter. 20 Prozent mehr Patienten suchen die Notaufnahme auf. 130 Verletzte und Kranke kommen normalerweise täglich zu ihm und seinen Kollegen. Momentan sind es rund 150. „Das ist aber kein Problem“, sagt er.

Witterungsbedingte Knochenbrüche kann sich bei den eisigen und verschneiten und damit häu-

fig rutschigen Straßen und Wegen jeder erklären. Aber warum steigt die Zahl der Herzattacken in der kalten Jahreszeit? Professor Nikolaus Marx, Kardiologe und Direktor der Medizinischen Klinik I, erklärt: „Bei Kälte ziehen sich die Herzkranzgefäße leichter zusam-

„Wir halten hier Hochleistungsmedizin vor und können damit vielen lebensbedrohlich Erkrankten oder Verletzten helfen.“

**GERNOT MARX, LEITER DER OPERATIVEN INTENSIVMEDIZIN**

men. Das sorgt für Beschwerden.“ Das gilt vor allem, wenn ohnehin schon Probleme vorliegen, der Patient etwa bereits Engstellen an den Gefäßen hat. Ein weiteres Zusammenziehen sorgt dann für eine schlechte Versorgung des Herzens. Verstärkt wird das bei körperlicher Anstrengung, etwa beim Schneeschaukeln.

## Aufgabe 1: Kontraindikationen

Kalzifizierte Gefäße => Plaque in Hauptgefäßen

- Gefährdung:
- Ablösungen der Ablagerungen
  - Verminderte Gegenpulsationswirkung
  - Ruptur des intraaortalen Ballons

- Ursache:
- Katheter löst beim Verschieben Ablagerungen ab; künstliche Dehnung der steifen Aorta durch IABP
  - Ballon kann sich nicht vollständig ausdehnen
  - Scharfkantigen Ablagerungen durchstoßen Ballon während der Inflation

- Risiko:
- Embolie (Gefäßpfropf) => z.B. Hirnschlag, Herzinfarkt, Endorganversagen durch Mangelversorgung
  - Ineffiziente Therapie, Druckspitzen
  - Gasembolie (bei IABP): Treibgas (Helium) gelangt in den Blutkreislauf und verursacht eine Embolie



Illustration eines arteriellen Gefäßes mit Plaque. Quelle: www.nature.com/nature

# Aufgabe 1: Kontraindikationen

Aortenaneurysma => Aussackung der Aorta

- Gefährdung:**
- Aneurysma wird durchstoßen
  - Aneurysma platzt
- Ursache:**
- Katheter durchsticht Schwachstelle
  - Druckwellen überlasten Schwachstelle
- Risiko:**
- Patient verblutet (innerlich) auch meist bei schneller chirurgischen Versorgung



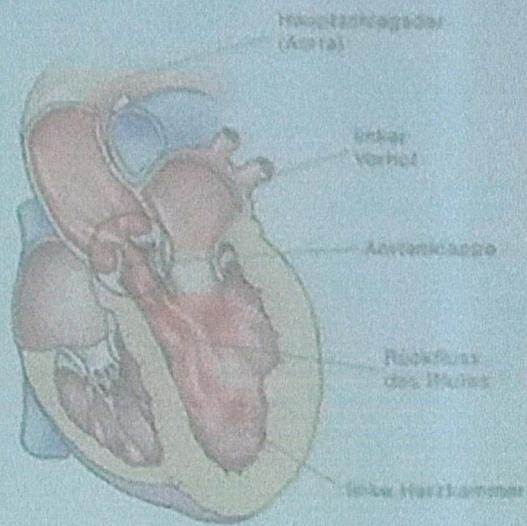
Quelle: Gefäßmedizin (Froschauer, St. Josef Hospital)



# Aufgabe 1: Kontraindikationen

Aortenklappeninsuffizienz => Aortenklappe schließt nicht vollständig  
=> Während der Diastole fließt Blut aus der Aorta in das linke Ventrikel zurück

- Gefährdung:**
- Blut strömt vermehrt in das linke Ventrikel zurück
- Ursache:**
- IABP: Druckwelle „verebbt“ während der isovolumet. Relaxation im linken Ventrikel
- Risiko:**
- Gegenpulsation unwirksam
  - erhöhte Belastung des linken Ventrikels



Das Blut fließt aus der Hauptschlagader durch die undichte Aortenklappe (siehe Kreis) zurück in die Herzkammer.

**Anmerkung:** Impella würde dann im Kreis fördern, aber doch AoP erhöhen



# Aufgabe 1: Komplikationen

1. Blutungsneigung => Patient blutet aus Wunde / Punktion => Blutverlust
2. Einführbesteck verlegt Beinarterie => Beinischämie
3. Rotationsblutpumpen: Blutschädigung (Hämolyse)
4. Impella: - Ansaugen => Läsion des Mykards  
- Klappe auf Ein/Auslass => Klappenschädigung
5. Intraaortelle Ballonpumpe: Ballon verlegt zuführende Arterien peripherer Organe (falsche Ballongröße, falsche Lage)
6. Intraaortelle Ballonpumpe: Falsche Triggerung => a) Die Nachlast des LV wird erhöht (LV muss gegen Gegenpulsationswelle auswerfen)  
b) Blut strömt aus den Koronarien in die Aorta zurück

## Aufgabe 2: Cardiac Indizes

a. Status bei Einlieferung:

geg: EDV = 170ml    => Enddiastolisches Volumen  
 EF = 20%            => Auswurfrate, 'Ejection Fraction'  
 HR = 120min<sup>-1</sup>    => Herzfrequenz  
 MAP = 65mmHg    => mittlerer aorteller Blutdruck  
 m = 87kg            => Gewicht  
 h = 175cm          => Größe

ges: HMV, CPI

Lös: Herzminutenvolumen bei Einlieferung

$$EF = (EDV - ESV) / EDV \times 100\% \Leftrightarrow ESV = EDV - (EF \times EDV / 100\%)$$

$$\Rightarrow ESV = EDV \times (1 - EF / 100\%)$$

$$= 170\text{ml} \times (1 - 0,2) = \underline{136\text{ml}}$$

$$\text{Schlagvolumen: } SV = EDV - ESV = 170\text{ml} - 136\text{ml} = \underline{34\text{ml}}$$

$$\text{Herzminutenvolumen: } HMV = HR \times SV = 120\text{min}^{-1} \times 34\text{ml} = \underline{4,08\text{lmin}^{-1}}$$

# Aufgabe 2: Cardiac Indizes

a. Status bei Einlieferung:

- geg: EDV = 170ml    => Enddiastolisches Volumen
- EF = 20%            => Auswurfrate, Ejection Fraction'
- HR = 120min<sup>-1</sup>    => Herzfrequenz
- MAP = 65mmHg    => mittlerer aorteller Blutdruck
- m = 87kg            => Gewicht
- h = 175cm          => Größe

ges: HMV, CPI

Lös: Cardiac Power Index (CPI) bei Einlieferung

$$CPI = CI \times MAP \times 0,0022$$

$$\text{Cardiac Index: } CI = HMV / BSA = 4,08l/min / 2,056m^2 = \underline{1,984 \text{ l/min/m}^2}$$

$$\text{Body Surface Area: } BSA = \frac{h[cm] \cdot m[kg]}{\sqrt{3600 \text{ cm} \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^{-2}}} = \frac{175 \text{ cm} \cdot 87 \text{ kg}}{\sqrt{3600 \text{ cm} \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^{-2}}} = 2,056 \text{ m}^2$$

$$CPI = 1,984 \text{ l/min/m}^2 \times 65 \text{ mmHg} \times 0,0022 = \underline{0,284 \text{ W/m}^2}$$

## Aufgabe 2: Cardiac Indizes

b. Status nach PCI auf Intensivstation:

geg:  $HMV = 6l/min$   $\Rightarrow$  Herzminutenvolumen

$MAP = 75mmHg$   $\Rightarrow$  mittlerer arterieller Blutdruck

$CO_{pump} = 4l/min$   $\Rightarrow$  mittlere Förderleistung der Pumpe

ges:  $CPO_{Herz}$ ;  $CPO_{pump}$

Lös: Cardiac Power Output der Pumpe nach PCI auf Intensivstation

$$CPO_{pump} = CO_{pump} \times MAP \times 0,0022 = 4l/min \times 75mmHg \times 0,0022 = \underline{0,66W}$$

Lös: Cardiac Power Output des Herzens nach PCI auf Intensivstation:

$$CPO_{total} = HMV \times MAP \times 0,0022 = 6l/min \times 75mmHg \times 0,0022 = \underline{0,99W}$$

$$CPO_{Herz} = CPO_{total} - CPO_{pump} = 0,99W - 0,66W = \underline{0,33W}$$

## Aufgabe 2: Cardiac Indizes

c. Status bei Einlieferung:

geg:  $HMV = 4,08\text{l/min} \Rightarrow$  Herzminutenvolumen

$HR = 120\text{min}^{-1} \Rightarrow$  Herzfrequenz

$MAP = 65\text{mmHg} \Rightarrow$  mittlerer aorteller Blutdruck

Status nach PCI auf Intensivstation:

geg:  $CPO_{\text{Herz\_intensiv}} = 0,33\text{W}$ ;  $CPO_{\text{pump\_intensiv}} = 0,66\text{W}$ ;  $CPO_{\text{total\_intensiv}} = 0,99\text{W}$

ges: Leistungsbilanzen

Lös: Cardiac Power Output Herz bei Einlieferung

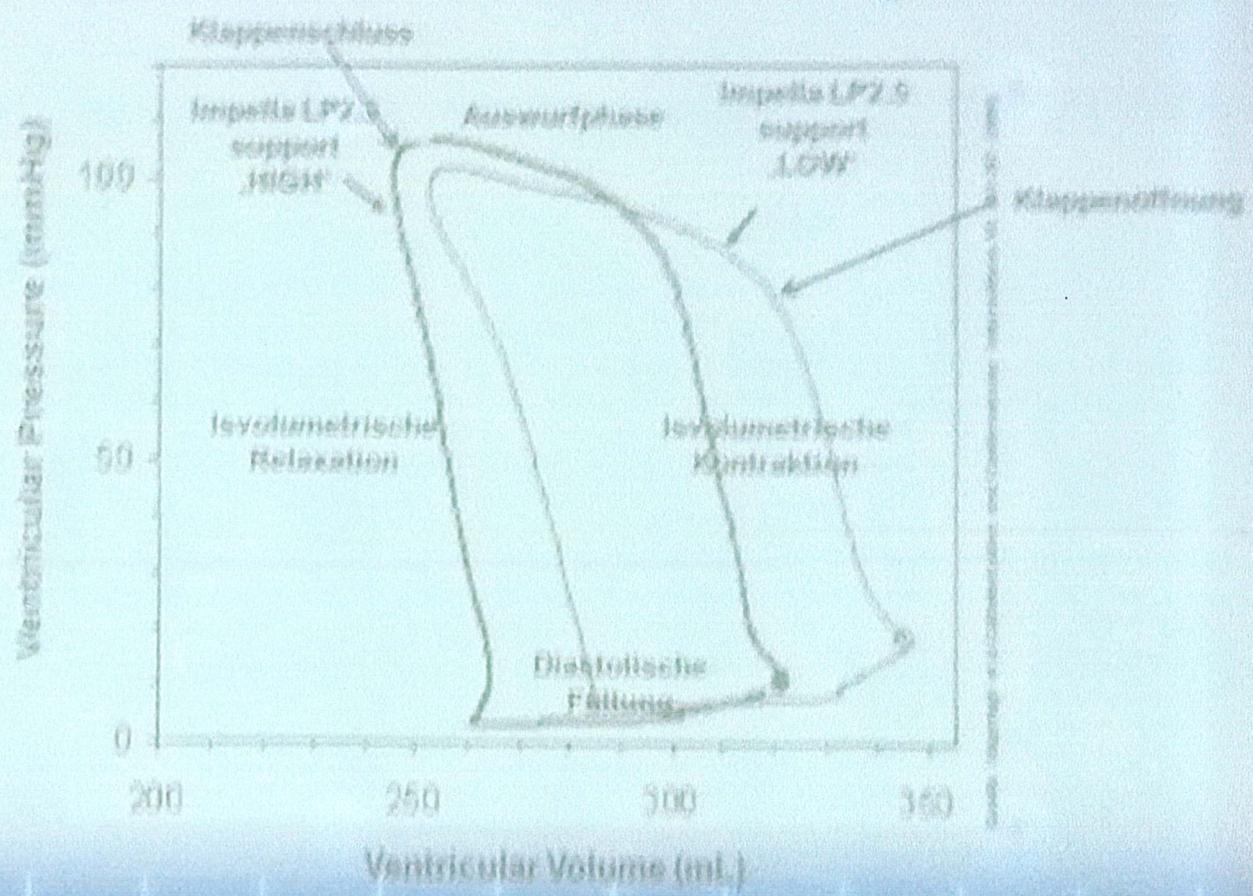
$$CPO_{\text{Herz\_einkl}} = HMV \times MAP_{\text{einkl}} \times 0,0022 = 4,08\text{l/min} \times 65\text{mmHg} \times 0,0022 = \underline{0,583\text{W}}$$

Lös: Vergleich der Herzarbeit bei Einlieferung und nach Behandlung:

$$CPO_{\text{Herz\_intensiv}} / CPO_{\text{Herz\_einkl}} \times 100\% = 0,33\text{W} / 0,583\text{W} \times 100\% = \underline{56,6\%}$$

$$CPO_{\text{total\_intensiv}} / CPO_{\text{Herz\_einkl}} \times 100\% = 0,99\text{W} / 0,583\text{W} \times 100\% = \underline{169\%}$$

# Aufgabe 3.a: Diskussion PV-Diagramm



## Aufgabe 3: Diskussion PV-Diagramm

- 3.b: Nein, das Pumpsystem verändert die Neigung der Kurve der isovolumetrischen Kontraktion nicht wesentlich denn:
- Die isovolumetrische Kontraktion dauert ca. 50ms
  - Fördert die Pumpe 2,5l/min, so fördert sie in 50ms:  

$$2,5\text{l/min} \times 50\text{ms} \times 1\text{min}/60\text{s} = \underline{2,08\text{ml}}$$
- => Keine wesentliche Änderung der Neigung der Kurve
- 3.c: Zwei Effekte:
- „Decreased Preload“ => umgekehrter Effekt der Volumenbelastung (siehe Franck Starling Effekt)
  - Unloading => Impella pumpt parallel zum Herzen
- 3.d: Überschlägige Schätzung: Die eingeschlossene Fläche ‚support High‘ ist ca. 5% kleiner als die Fläche ‚support Low‘  
=> 5% weniger Herzarbeit => leichte Entlastung des Herzmuskels
- zwei Effekte sind relevant:
- Erhöhter CO bei leicht erhöhtem AoP  
=> CPO ist signifikant gestiegen
  - Erhöhter AoP  
=> bessere Koronardurchblutung

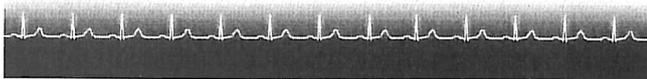
## Herzunterstützungssysteme (Übung zur Vorlesung)

Sebastian Schwandtner, Dipl.-Ing.

21. Mai 2014



Einführung in die Medizintechnik  
Lehrstuhl für Medizinische Informationstechnik



### Aufgabe 1: Kontraindikationen

**Aortenaneurysma** => Aussackung der Aorta

**Gefährdung:**

- Aneurysma wird durchstoßen
- Aneurysma platzt

**Ursache:**

- Katheter durchsticht Schwachstelle
- Druckwellen überlasten Schwachstelle

**Risiko:**

- Patient verblutet (innerlich) auch meist bei schneller chirurgischen Versorgung



© Sebastian Schwandtner, Abiomed 2010  
All rights reserved  
Block XX Seite 3

Herzunterstützungssysteme

### Aufgabe 1: Kontraindikationen

### Aufgabe 1: Kontraindikationen

**Kalzifizierte Gefäße** => Plaque in Hauptgefäßen

**Gefährdung:**

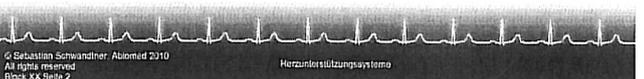
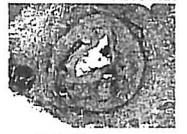
- Ablösungen der Ablagerungen
- Verminderte Gegenpulsationswirkung
- Ruptur des intraaortalen Ballons

**Ursache:**

- Katheter löst beim Verschieben Ablagerungen ab; künstliche Dehnung der steifen Aorta durch IABP
- Ballon kann sich nicht vollständig ausdehnen
- Scharfkantigen Ablagerungen durchstoßen Ballon während der Inflation

**Risiko:**

- Embolie (Gefäßpfropf) => z.B. Hirnschlag, Herzinfarkt, Endorganversagen durch Mangelversorgung
- Ineffiziente Therapie, Druckspitzen
- Gasembolie: Treibgas (Helium) gelangt in den Blutkreislauf und verursacht eine Embolie



© Sebastian Schwandtner, Abiomed 2010  
All rights reserved  
Block XX Seite 2

Herzunterstützungssysteme

### Aufgabe 1: Kontraindikationen

**Aortenklappeninsuffizienz** => Aortenklappe schließt nicht vollständig  
=> Während der Diastole fließt Blut aus der Aorta in das linke Ventrikel zurück

**Gefährdung:**

- Blut strömt vermehrt in das linke Ventrikel zurück

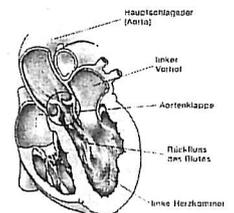
**Ursache:**

- IABP: Druckwelle „verebbt“ während der isovolomet. Relaxation im linken Ventrikel

**Risiko:**

- Gegenpulsation unwirksam
- erhöhte Belastung des linken Ventrikels

**Anmerkung:** Impella würde dann im Kreis fördern, aber doch AoP erhöhen



Das Blut fließt aus der Hauptschlagader durch die undichte Aortenklappe (siehe Kreis) zurück in die Herzkammer.



© Sebastian Schwandtner, Abiomed 2010  
All rights reserved  
Block XX Seite 4

Herzunterstützungssysteme

### Aufgabe 1: Komplikationen

1. Blutungsneigung => Patient blutet aus Wunde / Punktion => Blutverlust
2. Einführbesteck verlegt Beinarterie => Beinischämie
3. Rotationsblutpumpen: Blutschädigung (Hämolyse)
4. Impella: - Ansaugen => Läsion des Myokards  
- Klappe auf Ein/Auslass => Klappenschädigung
5. Intraaortelle Ballonpumpe: Ballon verlegt zuführende Arterien peripherer Organe (falsche Ballongröße, falsche Lage)
6. Intraaortelle Ballonpumpe: Falsche Triggerung => a) Die Nachlast des LV wird erhöht (LV muss gegen Gegenpulsationswelle auswerfen)  
b) Blut strömt aus den Koronarien in die Aorta zurück

© Sebastian Schwandtner, Abiomed 2010  
All rights reserved  
Block XX Seite 6

Herzunterstützungssysteme

### Aufgabe 2: Cardiac Indizes

a. Status bei Einlieferung:

geg: EDV = 170ml => Enddiastolisches Volumen  
EF = 20% => Auswurfrate, 'Ejection Fraction'  
HR = 120min<sup>-1</sup> => Herzfrequenz  
MAP = 65mmHg => mittlerer aorteller Blutdruck  
m = 87kg => Gewicht  
h = 175cm => Größe

ges: HMV, CPI

Lös: Herzminutenvolumen bei Einlieferung

$$EF = (EDV - ESV) / EDV \times 100\% \Leftrightarrow ESV = EDV - (EF \times EDV / 100\%)$$

$$\Rightarrow ESV = EDV \times (1 - EF / 100\%)$$

$$= 170\text{ml} \times (1 - 0,2) = 136\text{ml}$$

$$\text{Schlagvolumen: } SV = EDV - ESV = 170\text{ml} - 136\text{ml} = 34\text{ml}$$

$$\text{Herzminutenvolumen: } HMV = HR \times SV = 120\text{min}^{-1} \times 34\text{ml} = 4,08\text{lmin}^{-1}$$

© Sebastian Schwandtner, Abiomed 2010  
All rights reserved  
Block XX Seite 8

Herzunterstützungssysteme

## Aufgabe 2: Cardiac Indizes

ABIOMED

### a. Status bei Einlieferung:

geg: EDV = 170ml => Enddiastolisches Volumen  
 EF = 20% => Auswurfrate ‚Ejection Fraction‘  
 HR = 120min<sup>-1</sup> => Herzfrequenz  
 MAP = 65mmHg => mittlerer aorteller Blutdruck  
 m = 87kg => Gewicht  
 h = 175cm => Größe

ges: HMV, CPI

Lös: Cardiac Power Index (CPI) bei Einlieferung

$$CPI = CI \times MAP \times 0,0022$$

$$\text{Cardiac Index: } CI = HMV / BSA = 4,08l/min / 2,056m^2 = \underline{1,984 l/min/m^2}$$

$$\text{Body Surface Area: } BSA = \sqrt{\frac{h[cm] \cdot m[kg]}{3600 \text{ cm kg m}^{-2}}} = \sqrt{\frac{175cm \cdot 87kg}{3600 \text{ cm kg m}^{-2}}} = 2,056m^2$$

$$CPI = 1,9844l/min/m^2 \times 65mmHg \times 0,0022 = \underline{0,284W/m^2}$$

© Sebastian Schwandner, Abiomed 2010  
 All rights reserved  
 Block XX Seite 7

Herzunterstützungssysteme

## Aufgabe 2: Cardiac Indizes

ABIOMED

### b. Status nach PCI auf Intensivstation:

geg: HMV = 6l/min => Herzminutenvolumen  
 MAP = 75mmHg => mittlerer aorteller Blutdruck  
 CO<sub>pump</sub> = 4l/min => mittlere Förderleistung der Pumpe

ges: CPO<sub>Herz</sub>; CPO<sub>pump</sub>

Lös: Cardiac Power Output der Pumpe nach PCI auf Intensivstation

$$CPO_{\text{pump}} = CO_{\text{pump}} \times MAP \times 0,0022 = 4l/min \times 75mmHg \times 0,0022 = \underline{0,66W}$$

Lös: Cardiac Power Output des Herzen nach PCI auf Intensivstation:

$$CPO_{\text{total}} = HMV \times MAP \times 0,0022 = 6l/min \times 75mmHg \times 0,0022 = \underline{0,99W}$$

$$CPO_{\text{Herz}} = CPO_{\text{total}} - CPO_{\text{pump}} = 0,99W - 0,66W = \underline{0,33W}$$

© Sebastian Schwandner, Abiomed 2010  
 All rights reserved  
 Block XX Seite 8

Herzunterstützungssysteme

## Aufgabe 2: Cardiac Indizes

ABIOMED

### c. Status bei Einlieferung:

geg: HMV = 4,08l/min => Herzminutenvolumen  
 HR = 120min<sup>-1</sup> => Herzfrequenz  
 MAP = 65mmHg => mittlerer aorteller Blutdruck

Status nach PCI auf Intensivstation:

geg: CPO<sub>Herz\_Intensiv</sub> = 0,33W; CPO<sub>pump\_Intensiv</sub> = 0,66W; CPO<sub>total\_Intensiv</sub> = 0,99W

ges: Leistungsbilanzen

Lös: Cardiac Power Output Herz bei Einlieferung

$$CPO_{\text{Herz_einl}} = HMV \times MAP_{\text{einl}} \times 0,0022 = 4,08l/min \times 65mmHg \times 0,0022 = \underline{0,583W}$$

Lös: Vergleich der Herzarbeit bei Einlieferung und nach Behandlung:

$$CPO_{\text{Herz_Intensiv}} / CPO_{\text{Herz_einl}} \times 100\% = 0,33W / 0,583W \times 100\% = \underline{56,6\%}$$

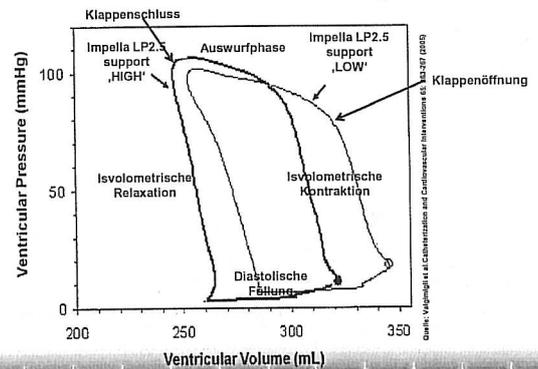
$$CPO_{\text{total_Intensiv}} / CPO_{\text{Herz_einl}} \times 100\% = 0,99W / 0,583W \times 100\% = \underline{184\%}$$

© Sebastian Schwandner, Abiomed 2010  
 All rights reserved  
 Block XX Seite 9

Herzunterstützungssysteme

## Aufgabe 3.a: Diskussion PV-Diagramm

ABIOMED



© Sebastian Schwandner, Abiomed 2010  
 All rights reserved  
 Block XX Seite 10

Herzunterstützungssysteme

## Aufgabe 3: Diskussion PV-Diagramm

ABIOMED

- 3.b: Nein, das Pumpsystem verändert die Neigung der Kurve der isovolometrischen nicht wesentlich denn:
- Die isovolometrische Kontraktion dauert ca. 50ms
  - Fördert die Pumpe 5l/min, so fördert sie in 50ms:  
 $5l/min \times 50ms \times 1min/60s = \underline{4,166ml}$   
 => Keine wesentliche Änderung der Neigung der Kurve
- 3.c: Zwei Effekte:
- ‚Decreased Preload‘ => umgekehrter Effekt der Volumenbelastung (siehe Franck Starling Effekt)
  - Unloading => Impella pumpt parallel zum Herzen
- 3.d: Überschlägige Schätzung: Die eingeschlossene Fläche ‚support High‘ ist ca. 5% kleiner als die Fläche ‚support Low‘  
 => 5% weniger Herzarbeit => leichte Entlastung des Herzmuskels
- 3.e: zwei Effekte sind relevant:
- Erhöhter CO bei leicht erhöhtem AoP  
 => CPO ist signifikant gestiegen
  - Erhöhter AoP  
 => bessere Koronardurchblutung

© Sebastian Schwandner, Abiomed 2010  
 All rights reserved  
 Block XX Seite 11

Herzunterstützungssysteme

End of presentation

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

ABIOMED  
 Recovering hearts. Saving lives.

LEHRSTUHL FÜR MEDIZINISCHE INFORMATIONSTECHNIK  
 medIT

© Sebastian Schwandner, Abiomed 2010  
 All rights reserved  
 Block XX Seite 12

Herzunterstützungssysteme

# Aufgabe 4: Prüfmessungen

## Aufgabe 3: Prüfmessungen

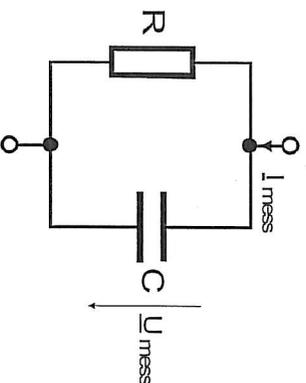
a)  $R = 1k\Omega$

$C = 0,15F$

$I_{mess} = \frac{U_{mess}}{|Z|}$

$U_{mess} \stackrel{!}{=} 100mV$

$Z = R \parallel \frac{1}{j\omega C} = \frac{R \cdot \frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{R}{1 + j\omega RC}$

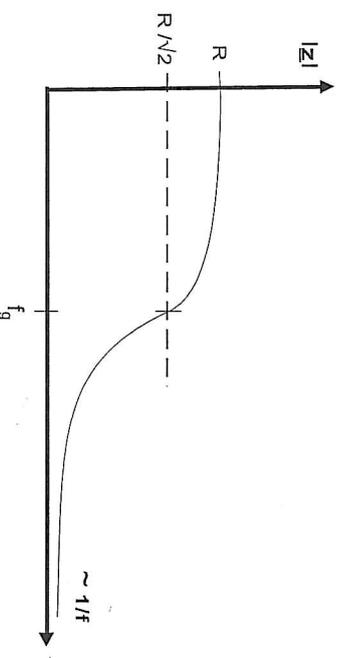


Tiefpass 1. Ordnung mit Grenzfrequenz  $f_g = 1 / (2\pi RC)$

$\rightarrow f_g \approx 1061 \text{ Hz} \approx 1 \text{ kHz}$

# Aufgabe 4: Prüfmessungen

$$|Z| = \frac{R}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} = \frac{R}{\sqrt{1 + (2\pi RCf)^2}} = \frac{R}{\sqrt{1 + (\frac{f}{f_g})^2}}$$



# Aufgabe 4: Prüfmessungen

$$I_{mess}(f) = \frac{U_{mess}}{|Z|} = \frac{100mV}{1k\Omega \sqrt{1 + (\frac{f}{f_g})^2}} = 0,1 \text{ mA} \cdot \sqrt{1 + (\frac{f}{f_g})^2} \text{ mit } f_g = 1kHz$$

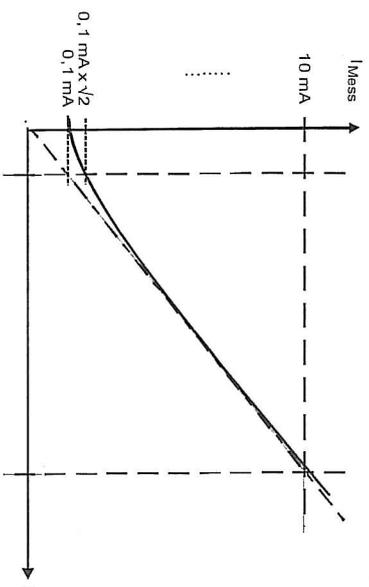
$I_{mess}(f = 0 \text{ Hz}) = 0,1 \text{ mA}$

$I_{mess}(f = f_g = 1kHz) = 0,1 \text{ mA} \cdot \sqrt{2}$

$I_{mess}(f \gg f_g) = 0,1 \text{ mA} \cdot \sqrt{(\frac{f}{f_g})^2} = 0,1 \text{ mA} \cdot \frac{f}{f_g}$

z.B.  $I_{mess}(f = 100 \text{ kHz}) \approx 10 \text{ mA}$

# Aufgabe 4: Prüfmessungen



Kurve wird recht gut angenähert für Frequenz  $f \leq 100 \text{ kHz}$

• Strom darf laut IEC 60601-1 niemals größer als 10 mA sein!

→ Es ist eine zusätzliche Absicherung nötig!

• Bei  $f_g$  ist  $I_{mess}$  um Faktor 2 zu hoch

Lehrstuhl für medizinische Informationstechnik  
 Univ. Prof. Dr. Ing. Dr. med. Steffen Leonhardt  
 Pauwelsstr. 20 52074 Aachen

# Übung

## „Einführung in die Medizintechnik“

### Elektrische Sicherheit

### 23.05.2011

**Aufgabe 1**

**(9 Punkte)**

Ein Mensch greift (auf Dauer) mit einer Hand an eine Spannungsquelle. Das Ersatzschaltbild seiner Körperinnenwiderstände ist in Abbildung 1.1 gegeben.

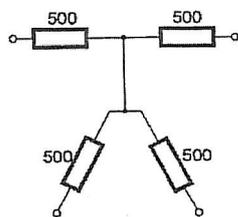


Abbildung 1.1

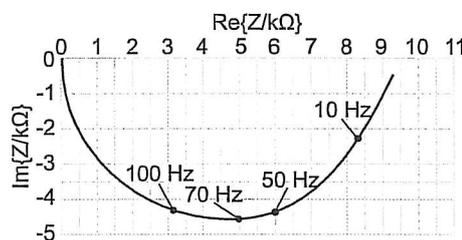


Abbildung 1.2

- (a) (7 Punkte) Berechnen Sie den Stromfluss durch den Körper für die folgenden Fälle. Berücksichtigen Sie dabei den Hautwiderstand gemäß beigefügter Ortskurve (Abb. 1.2).

**Fall 1: Hand-Hand**

- i) Es handelt sich um eine Gleichspannungsquelle von 60V.
- ii) Es handelt sich um eine Wechselspannungsquelle mit 60V und 60 Hz.

**Fall 2: Hand-Füße**

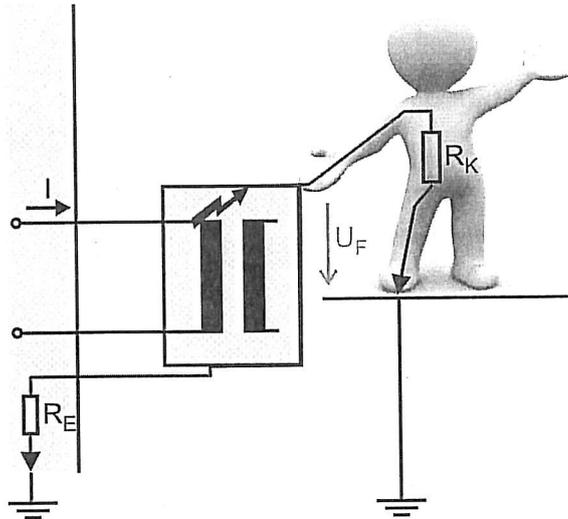
- i) Es handelt sich um eine Gleichspannungsquelle von 60V.
- ii) Es handelt sich um eine Wechselspannungsquelle mit 60V und 60 Hz.

- (b) (2 Punkte) Bewerten Sie den Stromfluss für die beiden Fälle aus a) im Hinblick auf elektrische Sicherheit.

**Aufgabe 2**

**(5 Punkte)**

Ein elektronisches Gerät ist mit einem Erdungswiderstand von  $R_E = 0,3 \Omega$  Schutzgeerdet. Es wird mit einer Netzspannung von 220V und 50Hz und einer 16A Sicherung mit 10-fachem Abschaltstrom betrieben. Eine Nullung ist vorhanden.

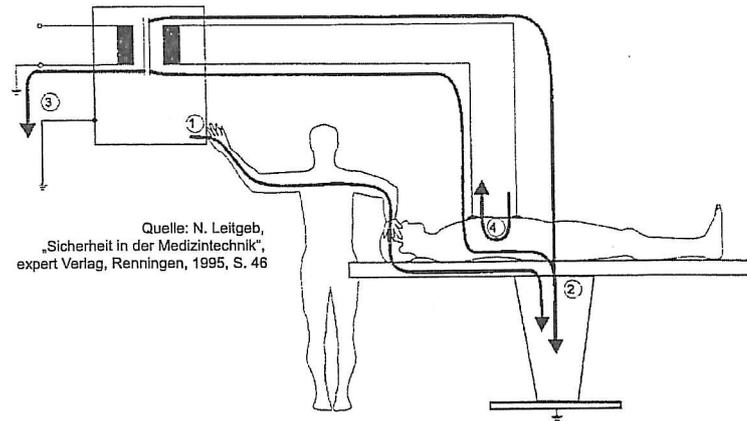


- (a) (3 Punkte) Bestimmen Sie die maximal mögliche Berührungsspannung  $U_F$ . Gehen Sie dabei für den Körperwiderstand  $R_K$  davon aus, dass  $R_K \gg R_E$ .
- (b) (2 Punkte) Bewerten (inkl. Begründung) Sie die Zulässigkeit dieser einfachen Schutzerdung für
- i) Haushaltsgeräte
  - ii) Medizingeräte

**Aufgabe 3**

(4 Punkte)

Benennen Sie die in der Abbildung eingezeichneten Ableitströme.



- ① Gehäuseableitstrom
- ② Patientenableitstrom
- ③ Erdableitstrom
- ④ Patientenhilfsstrom

**Aufgabe 4**

(6 Punkte)

Gegeben ist die in Abbildung 4.1 dargestellte Strommessschaltung, mit der beispielsweise der Berührungsstrom eines ME Gerätes gemessen werden soll. Inwieweit stimmt der Messstrom  $I_{mess}$  bei konstant gehaltenem  $U_{mess} = 100 \text{ mV}$  mit der in Abbildung 4.2 gezeigten Kurve überein?

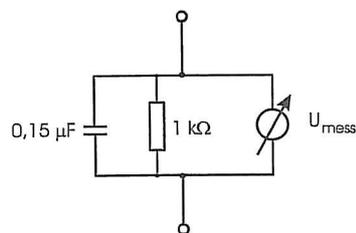


Abbildung 4.1

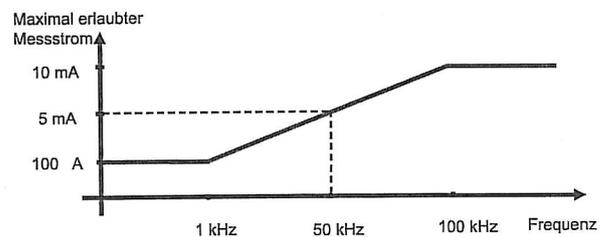
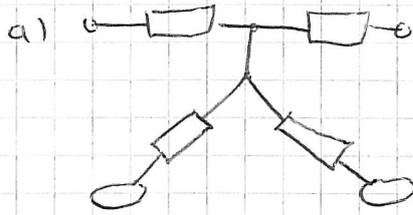


Abbildung 4.2

A1)



Fall 1: Hand-Hand

i) Gleichspannung

$$U = 60V \quad Z_H = 9,5 \text{ k}\Omega$$

$$I_{\text{ges}} = \frac{U}{Z_{\text{ges}}} = \frac{60V}{20 \text{ k}\Omega} = 3 \text{ mA}$$

$$Z_i = 2 \cdot 500 \Omega = 1 \text{ k}\Omega$$

$$Z_{\text{ges}} = Z_i + 2 \cdot Z_H$$

ii) Wechselspannung

$$U = 60V \quad f = 60 \text{ Hz}$$

$$Z_H = 5,5 \text{ k}\Omega - j4,5 \text{ k}\Omega$$

$$Z_i = 1 \text{ k}\Omega$$

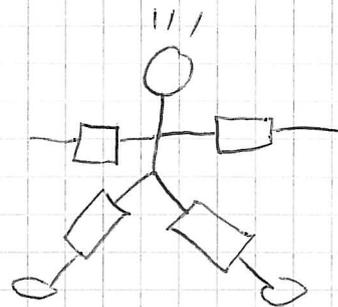
$$Z_{\text{ges}} = Z_i + 2Z_H = 12 \text{ k}\Omega - j9 \text{ k}\Omega$$

$$|I_{\text{ges}}| = \frac{U}{|Z_{\text{ges}}|} = \frac{60V}{\sqrt{(12 \text{ k}\Omega)^2 + (9 \text{ k}\Omega)^2}} = 4 \text{ mA}$$

Fall 2: Hand-Fiße

i)  $U = 60V$ 

$$Z_H = 9,5 \text{ k}\Omega$$



$$Z_i = 500 \Omega + 500 \Omega \parallel 500 \Omega$$

$$= 750 \Omega$$

$$Z_{\text{ges}} = Z_i + Z_H \parallel Z_H + Z_H = \cancel{750} + 4750 + 9500 = 15 \text{ k}\Omega$$

$$I_{gs} = \frac{60V}{15k\Omega} = 4mA$$

ii)  $U=60V \quad f=60Hz$

$$Z_H = 5,5k\Omega - j4,5k\Omega$$

$$Z_i = 750\Omega$$

$$\begin{aligned} Z_{gs} &= 750\Omega + \frac{2750}{3500}\Omega - j2250\Omega \\ &\quad + 5,5k\Omega - j4,5k\Omega \\ &= 9k\Omega - j6,75k\Omega \end{aligned}$$

$$I_{gs} = \frac{60V}{\sqrt{(9k\Omega)^2 + (6,75k\Omega)^2}} = 5,3mA$$

b)

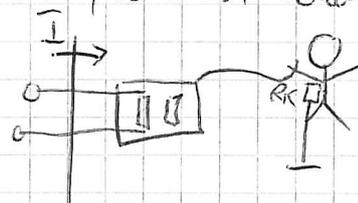
- > Hautwiderstand bildet den Hauptschutzfaktor
- Es besteht nahezu kein Unterschied zwischen den Fällen
- Strom liegt unterhalb der Schwellenschwelle

A2)

a)

$$U_{Netz} = 220V @ 50Hz \quad R_E = 0,3\Omega$$

16A Sicherung mit 10-fachen Abschaltstrom



Bei  $I_{AB}$  schaltet eine Sicherung in höchster

0,2 sec.

$$I_{iv} = 16$$

$$I_{AB} = 10 \cdot I_{iv} = 160A$$

$$U_{Fmax} = I_{AB} \cdot R_{gs} = 160A \cdot 0,3\Omega$$

$$R_H \gg R_E$$

$$R_K \parallel R_E \approx R_E$$

e)

i) okay, Schutzleiterspannung von 50V wird gerade so unterschritten.

ii)  $U_{\text{med, schutz}} = 25V < 48V$   
→ nicht zulässig!

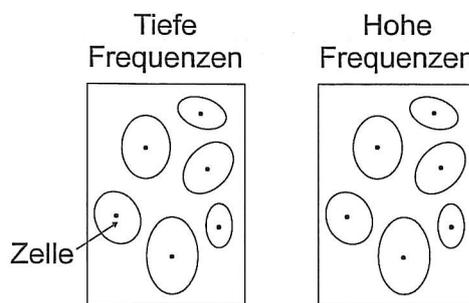
Lehrstuhl für medizinische Informationstechnik  
 Univ. Prof. Dr. Ing. Dr. med. Steffen Leonhardt  
 Pauwelsstr. 20 52074 Aachen

## Übung „Einführung in die Medizintechnik“ Bioimpedanz 30.05.2011

**Aufgabe 1**

(2 Punkte)

Zeichnen Sie die Strompfade für tiefe und hohe Frequenzen in die Abbildung ein.



**Aufgabe 2**

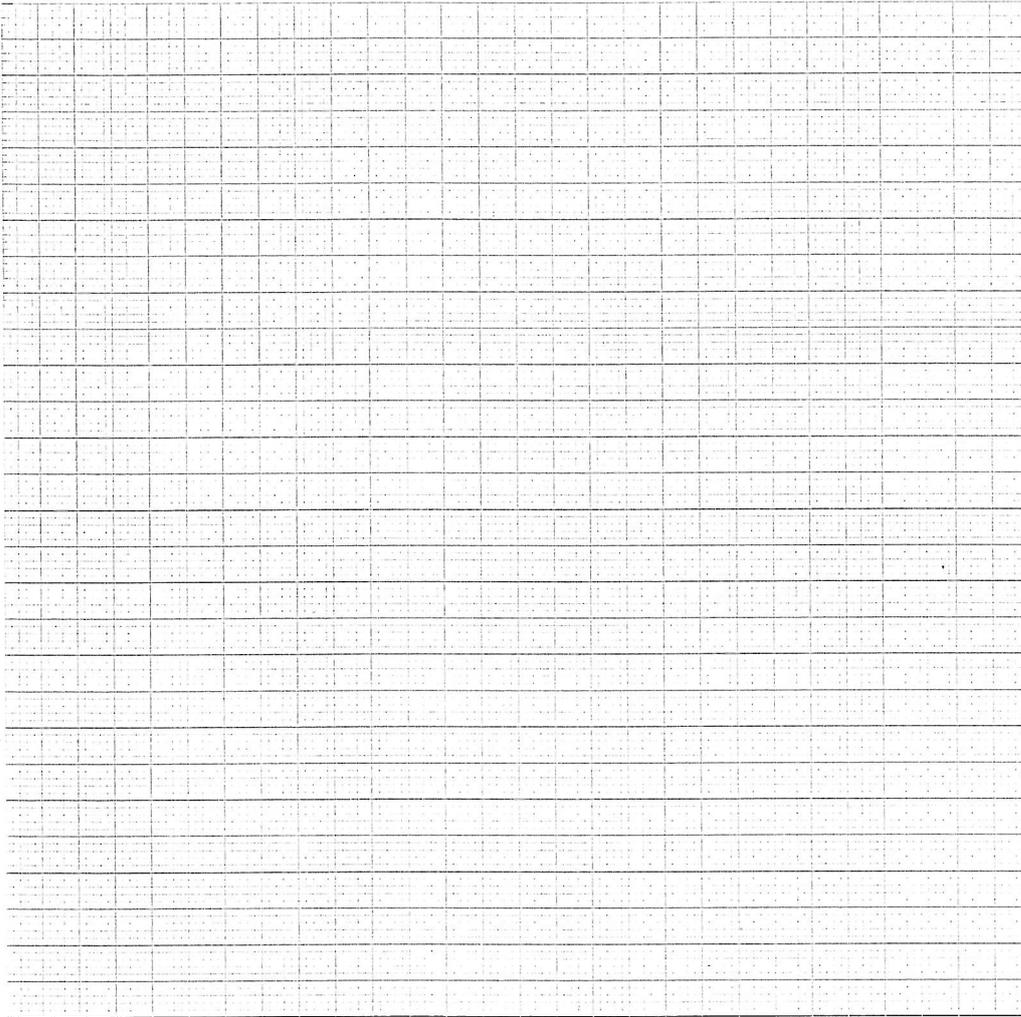
(12 Punkte)

Es soll das Cole-Cole-Diagramm der Gewebeimpedanz aus gegebenen Parametern berechnet werden. Dabei soll von dem Grundmodell nach Debye ausgegangen werden.

Die Parameter des Ersatzschaltbildes betragen:

- $R_e = 400 \Omega$
- $R_i = 600 \Omega$
- $C_m = 50 \text{ nF}$

- (a) (2 Punkte) Zeichnen Sie das Ersatzschaltbild der Gewebeimpedanz nach Debye.
- (b) (4 Punkte) Berechnen Sie die komplexe Impedanz  $Z(j\omega)$  des dargestellten Debye-Grundmodells in Abhängigkeit der Parameter  $R_e$ ,  $R_i$ ,  $C_m$  und  $\omega$ .
- (c) (2 Punkte) Berechnen Sie die Impedanz  $Z(j\omega)$  für die Frequenzen  $\omega_1 = 0 \text{ Hz}$  und  $\omega_2 = \infty \text{ Hz}$  mit den angegebenen Parametern des Ersatzschaltbildes.
- (d) (4 Punkte) Gegeben sei zusätzlich  $Z(j\omega)_{\omega=\omega_3} = 320 \Omega - j80 \Omega$  mit  $\omega_3 = 20000 \frac{1}{s}$ . Hierbei handelt es sich um den Punkt mit dem betragsmäßig größten Imaginärteil. Zeichnen Sie in das Millimeterpapier das Cole-Cole-Diagramm. Beginnen Sie mit den Achsen, beschriften Sie die Achsen und tragen Sie die Impedanzen für die drei Frequenzen  $\omega_1, \omega_2$  und  $\omega_3$  ein. Zeichnen Sie dann durch diese drei Stützstellen den charakteristischen Cole-Cole-Plot und kennzeichnen Sie mit einem Pfeil die Richtung steigender Frequenz.



**Aufgabe 3** **(5 Punkte)**

Die Impedanz von biologischem Gewebe wird durch eine 2-Punkt-Messung ermittelt.

- (a) (2 Punkte) Zeichnen Sie das Ersatzschaltbild der 2-Punkt-Messung.
- (b) (1 Punkt) Geben Sie die gemessene Gesamtimpedanz an.
- (c) (2 Punkte) Beschreiben Sie den Nachteil der 2-Punkt-Messung?

**Aufgabe 4** **(6 Punkte)**

Die Impedanz von biologischem Gewebe wird durch eine 4-Punkt-Messung ermittelt.

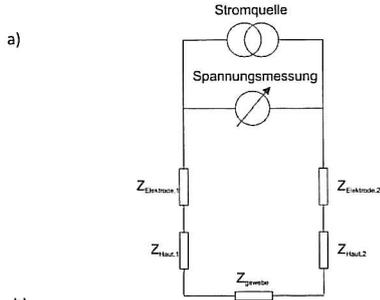
- (a) (2 Punkte) Zeichnen Sie das Ersatzschaltbild der 4-Punkt-Messung.
- (b) (1 Punkt) Geben Sie die gemessene Gesamtimpedanz an.
- (c) (2 Punkte) Was ist der Vorteil der 4-Punkt-Messung gegenüber der 2-Punkt-Messung?
- (d) (1 Punkt) Berechnen Sie den relativen Fehler der 2-Punkt-Messung gegenüber der 4-Punkt-Messung.

**Aufgabe 5** **(6 Punkte)**

Gesucht ist die bei einer Bioimpedanzmessung auftretende Übergangsimpedanz von Elektrode zu Haut.

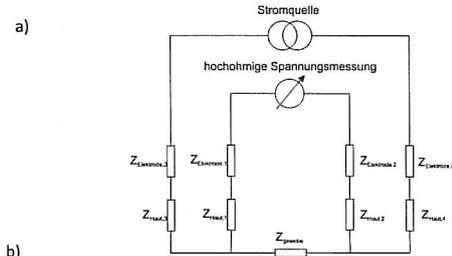
- (a) (2 Punkte) Geben Sie das elektrische Ersatzschaltbild der Haut an.
- (b) (2 Punkte) Geben Sie das elektrische Ersatzschaltbild der Elektrode an.
- (c) (2 Punkte) Berechnen Sie die Gesamtübergangsimpedanz von Elektrode zu Haut.

## 1) 2-Punkt Messung



b) Durch die Übergangsimpedanzen der Elektroden  $Z_{\text{Elektrode}}$  und der Haut  $Z_{\text{Haut}}$  können Messfehler entstehen.

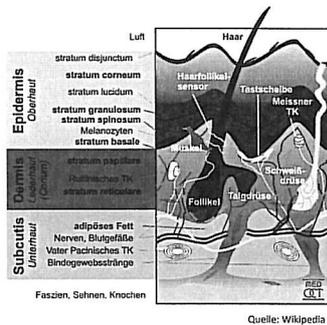
## 2) 4-Punkt Messung



b) Um Messfehler durch die Impedanzen der Elektroden und der Haut zu vermeiden, muss der Stromfluss in ihnen zu Null gebracht werden. Dies erreicht man durch die Spannungsmessung zwischen zwei Elektroden festen Abstands mit einem hochohmigen Messinstrument und der separaten Stromspeisung über zwei weitere außen liegende Elektroden.

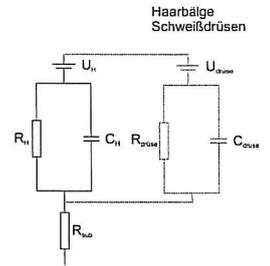
## 3a) Aufbau der Haut

- Epidermis
  - dünn
  - Oberflächlich
  - Epithelgewebe
- Lederhaut (Corium)
  - dick
  - Faserstruktur
  - Nerven- und gefäßreich
  - Fettgewebefrei
- Schweißdrüsen und Talgdrüsen
- Gefäßnetz
  - Reicht nur von Lederhaut bis Subcutis



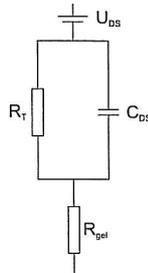
## 3a) ESB der Haut

- Geschichteter Aufbau der Haut => Kondensator  $C_H$ 
  - Widerstandswerte von der Frequenz der Messströme abhängig
- Kanäle der Schweißdrüsen und Haarbälge verbinden gesamte Hautstruktur => ohmscher Widerstand  $R_H$
- Subkutane Schicht ist gut durchblutet => gleichmäßige Leitfähigkeit =>  $R_{\text{sub}}$  in Serie
- Stratum corneum ist semipermeable Membran => Differenz der Ionenkonzentration => Spannungsquelle in Serie  $U_H$ 
  - Konstanter Offset
- Aktivität der Schweißdrüsen => weitere parallel geschaltete Bauelemente
  - Flüssigkeit der Schweißdrüsen besteht aus Natrium-, Kalium-, Chlor-Ionen in anderer Konzentration als extrazellulär =>  $U_{\text{offset}}$
  - Lügendetektoren messen u.a. die Aktivität der Schweißdrüsen

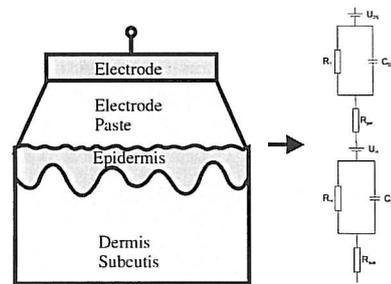


## 3b) ESB der Elektroden

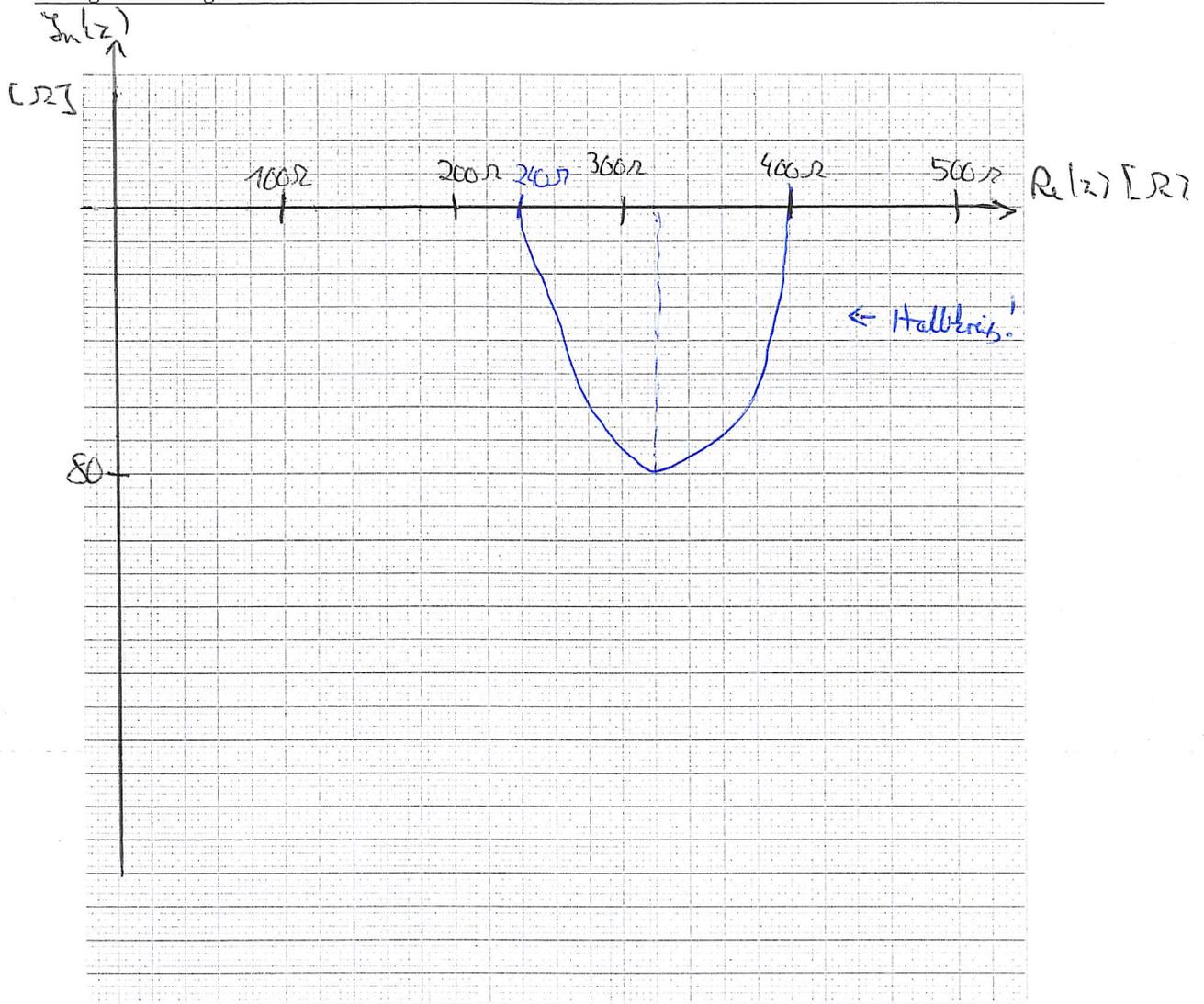
- Elektroden sind mehrphasige Systeme
  - Austausch von Ladungsträgern zwischen zwei Phasen
  - Elektrisch leitende Phasen hintereinander geschaltet => elektrochemisches Gleichgewicht
  - Konstante Potentialdifferenz an der Phasengrenze (Helmholtz-Doppelschicht)



## 3c) Gesamt-Übergangsimpedanz



$$Z_{\text{Ges}} = \frac{R_t}{1 + j\omega R_t C_{DS}} + R_{\text{Gel}} + \frac{R_H}{1 + j\omega R_H C_H} + R_{\text{sub}}$$



**Aufgabe 3**

(5 Punkte)

Die Impedanz von biologischem Gewebe wird durch eine 2-Punkt-Messung ermittelt.

- (a) (2 Punkte) Zeichnen Sie das Ersatzschaltbild der 2-Punkt-Messung.
- (b) (1 Punkt) Geben Sie die gemessene Gesamtimpedanz an.
- (c) (2 Punkte) Beschreiben Sie den Nachteil der 2-Punkt-Messung?

**Aufgabe 4**

(6 Punkte)

Die Impedanz von biologischem Gewebe wird durch eine 4-Punkt-Messung ermittelt.

- (a) (2 Punkte) Zeichnen Sie das Ersatzschaltbild der 4-Punkt-Messung.
- (b) (1 Punkt) Geben Sie die gemessene Gesamtimpedanz an.
- (c) (2 Punkte) Was ist der Vorteil der 4-Punkt-Messung gegenüber der 2-Punkt-Messung?
- (d) (1 Punkt) Berechnen Sie den relativen Fehler der 2-Punkt-Messung gegenüber der 4-Punkt-Messung.

**Aufgabe 5**

(6 Punkte)

Gesucht ist die bei einer Bioimpedanzmessung auftretende Übergansimpedanz von Elektrode zu Haut.

- (a) (2 Punkte) Geben Sie das elektrische Ersatzschaltbild der Haut an.
- (b) (2 Punkte) Geben Sie das elektrische Ersatzschaltbild der Elektrode an.
- (c) (2 Punkte) Berechnen Sie die Gesamtübergansimpedanz von Elektrode zu Haut.

Lehrstuhl für medizinische Informationstechnik  
 Univ. Prof. Dr. Ing. Dr. med. Steffen Leonhardt  
 Pauwelsstr. 20 52074 Aachen

# Übung

## „Einführung in die Medizintechnik“

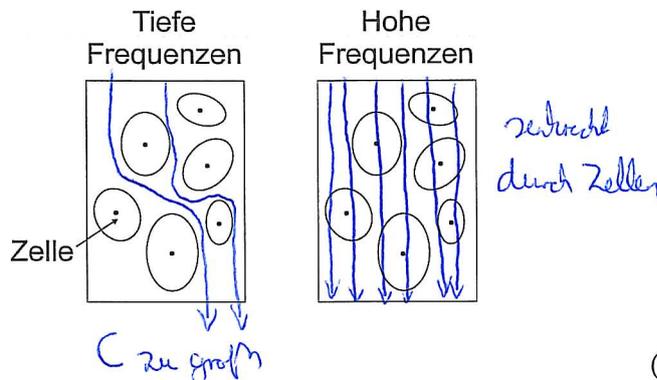
### Bioimpedanz

### 30.05.2011

**Aufgabe 1**

(2 Punkte)

Zeichnen Sie die Strompfade für tiefe und hohe Frequenzen in die Abbildung ein.



**Aufgabe 2**

(12 Punkte)

Es soll das Cole-Cole-Diagramm der Gewebeimpedanz aus gegebenen Parametern berechnet werden. Dabei soll von dem Grundmodell nach Debye ausgegangen werden.

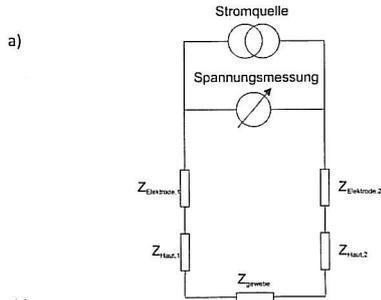
Die Parameter des Ersatzschaltbildes betragen:

- $R_e = 400 \Omega$
- $R_i = 600 \Omega$
- $C_m = 50 \text{ nF}$

- (a) (2 Punkte) Zeichnen Sie das Ersatzschaltbild der Gewebeimpedanz nach Debye.
- (b) (4 Punkte) Berechnen Sie die komplexe Impedanz  $Z(j\omega)$  des dargestellten Debye-Grundmodells in Abhängigkeit der Parameter  $R_e$ ,  $R_i$ ,  $C_m$  und  $\omega$ .
- (c) (2 Punkte) Berechnen Sie die Impedanz  $Z(j\omega)$  für die Frequenzen  $\omega_1 = 0 \text{ Hz}$  und  $\omega_2 = \infty \text{ Hz}$  mit den angegebenen Parametern des Ersatzschaltbildes.
- (d) (4 Punkte) Gegeben sei zusätzlich  $Z(j\omega)_{\omega=\omega_3} = 320 \Omega - j80 \Omega$  mit  $\omega_3 = 20000 \frac{1}{s}$ . Hierbei handelt es sich um den Punkt mit dem betragsmäßig größten Imaginärteil. Zeichnen Sie in das Millimeterpapier das Cole-Cole-Diagramm. Beginnen Sie mit den Achsen, beschriften Sie die Achsen und tragen Sie die Impedanzen für die drei Frequenzen  $\omega_1, \omega_2$  und  $\omega_3$  ein. Zeichnen Sie dann durch diese drei Stützstellen den charakteristischen Cole-Cole-Plot und kennzeichnen Sie mit einem Pfeil die Richtung steigender Frequenz.

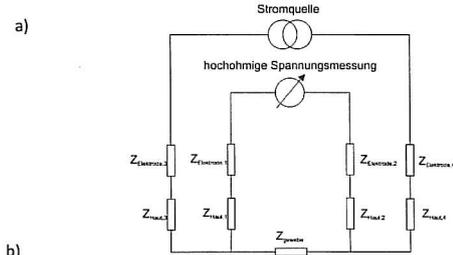
*Für Klausur: nur wissen qualitativ was es macht. Kreis wird gezeichnet*

## 1) 2-Punkt Messung



b) Durch die Übergangsimpedanzen der Elektroden  $Z_{\text{Elektrode}}$  und der Haut  $Z_{\text{Haut}}$  können Messfehler entstehen.

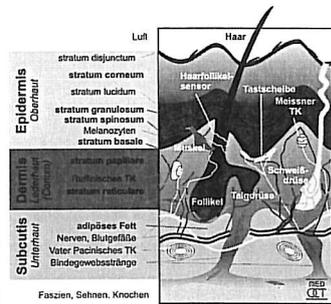
## 2) 4-Punkt Messung



b) Um Messfehler durch die Impedanzen der Elektroden und der Haut zu vermeiden, muss der Stromfluss in ihnen zu Null gebracht werden. Dies erreicht man durch die Spannungsmessung zwischen zwei Elektroden festen Abstands mit einem hochohmigen Messinstrument und der separaten Stromspeisung über zwei weitere außen liegende Elektroden.

## 3a) Aufbau der Haut

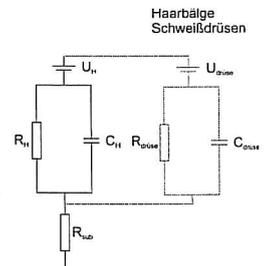
- Epidermis
  - dünn
  - Oberflächlich
  - Epithelgewebe
- Lederhaut (Corium)
  - dick
  - Faserstruktur
  - Nerven- und gefäßreich
  - Fettgewebefrei
- Schweißdrüsen und Talgdrüsengänge
  - Reichen von der Hornschicht bis in die Subcutis
- Gefäßnetz
  - Reicht nur von Lederhaut bis Subcutis



Quelle: Wikipedia

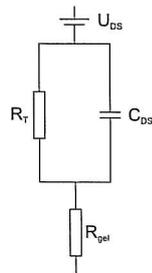
## 3a) ESB der Haut

- Geschichteter Aufbau der Haut => Kondensator  $C_H$ 
  - Widerstandswerte von der Frequenz der Messströme abhängig
- Kanäle der Schweißdrüsen und Haarbälge verbinden gesamte Hautstruktur => ohmscher Widerstand  $R_H$
- Subkutane Schicht ist gut durchblutet => gleichmäßige Leitfähigkeit =>  $R_{\text{sub}}$  in Serie
- Stratum corneum ist semipermeable Membran => Differenz der Ionenkonzentration => Spannungsquelle in Serie  $U_H$ 
  - Konstanter Offset
- Aktivität der Schweißdrüsen => weitere parallel geschaltete Bauelemente
  - Flüssigkeit der Schweißdrüsen besteht aus Natrium-, Kalium-, Chlor-Ionen in anderer Konzentration als extrazellulär =>  $U_{\text{drüse}}$
  - Lügendetektoren messen u.a. die Aktivität der Schweißdrüsen

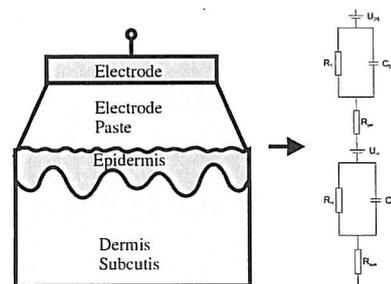


## 3b) ESB der Elektroden

- Elektroden sind mehrphasige Systeme
  - Austausch von Ladungsträgern zwischen zwei Phasen
  - Elektrisch leitende Phasen hintereinander geschaltet => elektrochemisches Gleichgewicht
  - Konstante Potentialdifferenz an der Phasengrenze (Helmholtz-Doppelschicht)



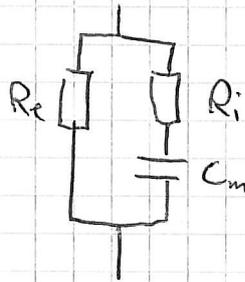
## 3c) Gesamt-Übergangsimpedanz



$$Z_{\text{Ges}} = \frac{R_T}{1 + j\omega R_T C_{DS}} + R_{\text{Gel}} + \frac{R_H}{1 + j\omega R_H C_H} + R_{\text{sub}}$$

A2)

a) Grundmodell.



b)

$$Z(j\omega) = R_e \parallel \left( R_i + \frac{1}{j\omega C_m} \right)$$

$$= \frac{R_e \left( R_i + \frac{1}{j\omega C_m} \right)}{R_e + R_i + \frac{1}{j\omega C_m}} \quad \left| \cdot \frac{j\omega C_m}{j\omega C_m} \right.$$

$$= \frac{R_e + R_e R_i j\omega C_m}{1 + j\omega C_m (R_e + R_i)}$$

c)

$$\omega_1 = 0 \text{ Hz} \quad \omega_2 \rightarrow \infty \text{ Hz}$$

$$Z(j\omega) \big|_{\omega=0 \text{ Hz}} = R_e = R_0 = 400 \Omega$$

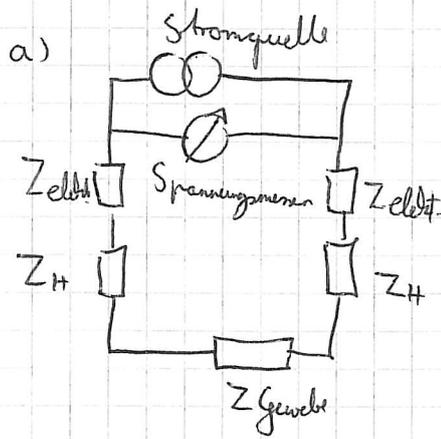
$$Z(j\omega) \big|_{\omega \rightarrow \infty \text{ Hz}} = \frac{R_e R_i}{R_e + R_i} = R_{\infty} = 240 \Omega$$

d)

$$Z(j\omega) \big|_{\omega=\omega_3} = 320 \Omega - j80 \Omega \quad (\text{betragsm. grösste Imag. Teil})$$

$$\omega_3 = 20000 \text{ Hz}$$

A3)

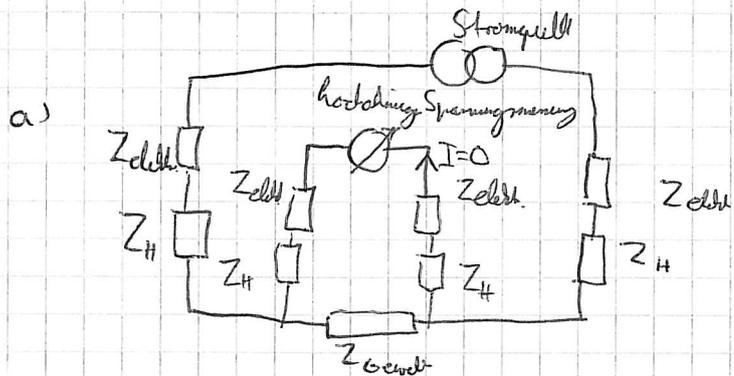


b)

$$Z_{2P} = 2(Z_H + Z_{elkt.}) + Z_{Gewebe}$$

c) Durch die Übergangsimpedanz der Elektroden und der Haut können Messfehler entstehen.

A4)



b)

$$Z_{bezw} = Z_{4P}$$

c)

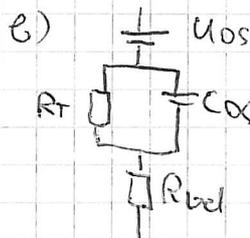
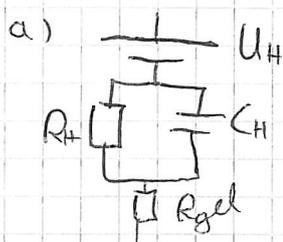
nicht Ausdruck

d)

$$\text{rel. Fehler} = \frac{Z_{2P} - Z_{4P}}{Z_{bezw}} = \frac{2(Z_{elkt.} + Z_H) + Z_{Gewebe} - Z_{Gewebe}}{Z_{Gewebe}}$$

$$= \frac{2(Z_{elkt.} + Z_H)}{Z_{Gewebe}}$$

A5)



$$Z_{\text{ges}} = Z_{\text{Lad}} + Z_{\text{Haut}}$$

$$= \frac{R_T}{1 + j\omega R_T C_{DS}} + R_{\text{bel}} + \frac{R_H}{1 + j\omega R_H C_H} + R_{\text{Sel}}$$