

Het hart pompt het bloed door het lichaam. Dit gebeurt doordat een elektrische prikkel de hartspier laat samentrekken. Tijdens de samentrekkingen treedt scheiding op van elektrische lading. Dit kun je meten en vervolgens zichtbaar maken met een elektrocardiogram (ECG). In figuur 1 is een ECG weergegeven van een gezonde persoon. Dit ECG is getekend door een pen die met een snelheid van 25 mm s^{-1} van links naar rechts beweegt. Figuur 1 is op ware grootte.

figuur 1

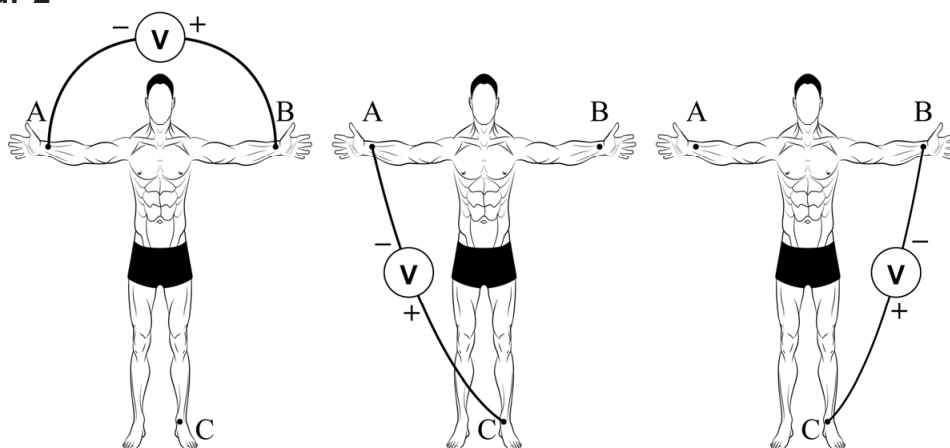


Het hartritme is gedefinieerd als het aantal slagen van het hart per minuut.

- 3p 8 Bepaal met behulp van figuur 1 het hartritme van deze persoon. Noteer je antwoord in twee significante cijfers.

Bij het maken van een ECG in het ziekenhuis worden er vaak drie elektroden op de huid van de patiënt geplakt: op de rechterarm (A), op de linkerarm (B) en op het linkerbeen (C). Zie figuur 2. De spanningen die tussen de elektroden worden gemeten leveren drie verschillende ECG's op.

figuur 2



De spanningsmeters in figuur 2 meten respectievelijk de spanning U_{AB} tussen A en B, de spanning U_{AC} tussen A en C en de spanning U_{BC} tussen B en C. De plus- en min aansluitingen van de spanningsmeters zijn aangegeven in figuur 2.

Het ECG van figuur 1 is een meting van de spanning tussen A en C. Dit ECG kan ook verkregen worden door de spanning tussen A en B en de spanning tussen B en C te meten en deze spanningen voor ieder tijdstip bij elkaar op te tellen.

- 2p **9** Leg dit uit met behulp van de spanningswet van Kirchhoff.

Bij mensen die een traag hartritme hebben, wordt vaak een pacemaker ingebracht. Dit apparaat meet voortdurend het hartritme en kan met kleine stroomstootjes het ritme bijsturen.

Voor het plaatsen van een pacemaker wordt een dun slangetje, een katheter, in het hart aangebracht. Om tijdens het inbrengen de katheter te volgen wordt een CT-scan van de patiënt gemaakt. Tegelijkertijd wordt de hartfunctie in de gaten gehouden met een ECG.

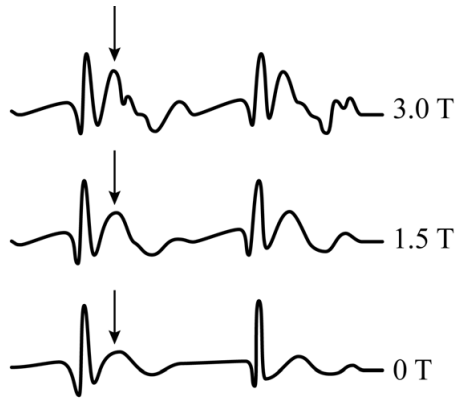
In plaats van gebruik te maken van een CT-scan zou het voor de patiënt beter zijn als het inbrengen van de katheter gevolgd zou worden met een MRI-scan.

- 1p **10** Geef een natuurkundige reden waarom dit beter is voor de patiënt.

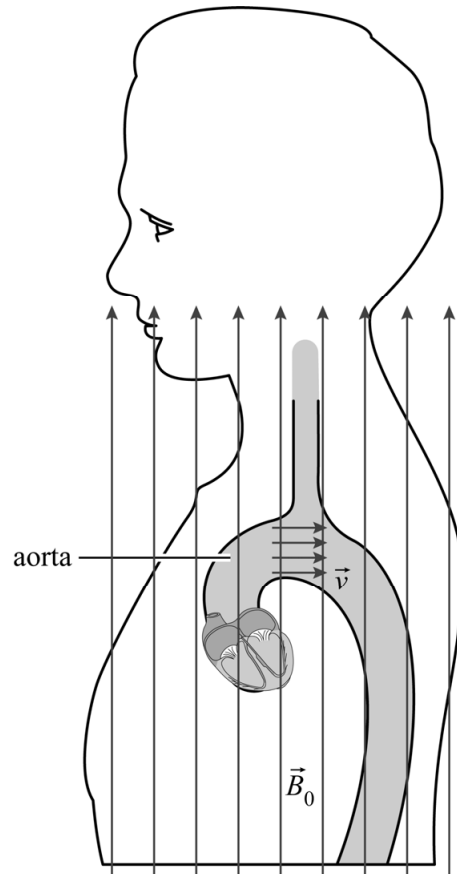
Het maken van een MRI-scan heeft ook nadelen. Het sterke magneetveld van de MRI-scanner zorgt ervoor dat het ECG van de patiënt er anders uitziet, zelfs als het hart normaal functioneert.

De verandering komt doordat in het bloed positieve en negatieve ionen zitten. Door de stroming van het bloed en het uitwendige magneetveld van de MRI-scanner ontstaat een lorentzkracht op de ionen. Hierdoor treedt in het bloed ladingsscheiding op waardoor een elektrische spanning ontstaat die de ECG-meting beïnvloedt. In figuur 3 staat een voorbeeld van de verandering van een ECG als het magneetveld verandert. Dit is vooral te zien bij de pijlen.

figuur 3



figuur 4



In figuur 4 is schematisch een doorsnede van de borstkas in zijaanzicht weergegeven. Het bloed verlaat het hart onder andere via het grootste bloedvat in het lichaam, de aorta. De aorta is in figuur 4 overdreven groot weergegeven.

Het uitwendige magnetisch veld $\vec{B}_0$ is aangegeven met pijlen die in de figuur van onder naar boven lopen. De horizontale pijlen in de aorta geven de stroomsnelheid $\vec{v}$ van het bloed aan.

In het bovenste deel van de aorta staan de stromingsrichting van het bloed en de richting van het magneetveld loodrecht op elkaar.

Figuur 4 staat ook op de uitwerkbijlage.

3p 11 Voer de volgende opdrachten uit:

- Geef in de cirkel in de figuur op de uitwerkbijlage de richting aan van de lorentzkracht op de positieve ionen.
- Leg uit dat er in de aorta ladingsscheiding optreedt.
- Leg hiermee uit op welke spanning (U_{AB} , U_{BC} of U_{AC}) de invloed van deze ladingsscheiding het grootst is.

Samira en Fatima willen controleren of de verandering in het ECG verklaard kan worden door de ladingsscheiding in de aorta als gevolg van het magneetveld in de MRI-scanner.

Ze leiden een formule af voor de spanning die ontstaat als gevolg van deze ladingsscheiding:

$$U_{\text{ls}} = v \cdot B_0 \cdot d \quad (1)$$

Hierin is:

- U_{ls} de spanning in de aorta als gevolg van de ladingsscheiding in V
- v de stroomsnelheid van het bloed in ms^{-1}
- B_0 de sterkte van het magneetveld in de MRI-scanner in T
- d de gemiddelde afstand tussen de positieve en negatieve lading in m

Samira en Fatima zien dat op een bepaald moment bij een magnetische veldsterkte van 3,0 T de toename van de spanning in het ECG 1 mV is ten opzichte van de situatie bij 0 T. Ze vinden in een informatieboek dat er op dat moment tijdens een hartslag per seconde 600 mL bloed door de aorta stroomt en dat de diameter van de aorta 3 cm is. Ze leiden af dat voor de stroomsnelheid in het bloed geldt:

$$v = \frac{Q}{A} \quad (2)$$

Hierin is:

- Q de hoeveelheid bloed die per seconde door de aorta stroomt in $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$
- A de oppervlakte van de dwarsdoorsnede van de aorta in m^2

Samira en Fatima realiseren zich dat de bovenstaande verklaring alleen kan kloppen als d kleiner is dan de diameter van de aorta.

- 4p **12** Leg met behulp van een berekening uit of de verandering van het ECG verklaard zou kunnen worden door ladingsscheiding in de aorta.