

Huidimpedantie en huidcapaciteit

experimenteel onderzocht

Burkhard Kainka (Duitsland)

Wat hebben condensatoren gemeen met draden die in het water hangen, of het aanraken van een metalen oppervlak met je vingers? Heel veel, zoals de auteur aan de hand van experimenten en metingen ontdekte. De huidimpedantie kan voor veel verschillende interessante toepassingen worden benut.

Vele jaren geleden merkte ik een paar vreemde zaken op bij draden die in het water hingen, en als ik met mijn vingers een metalen oppervlak aanraakte. Ik wilde toen het vochtgehalte van hout meten met behulp van roestvrijstalen schroeven in het hout. Helaas veranderde de karakteristiek van de contacten snel, waardoor er minder stroom liep. Het bleek zelfs mogelijk om een lading op die contacten op te bouwen, en ik kon gedurende enkele seconden na het losnemen van de voeding een spanning meten. Ik besloot dit een 'houtbatterij' te noemen. Pas later realiseerde ik me dat het hierbij ging om een dubbele laag watermoleculen die een dubbellaags condensator vormden. Ik heb dit mysterie nu opgehelderd met verdere metingen.

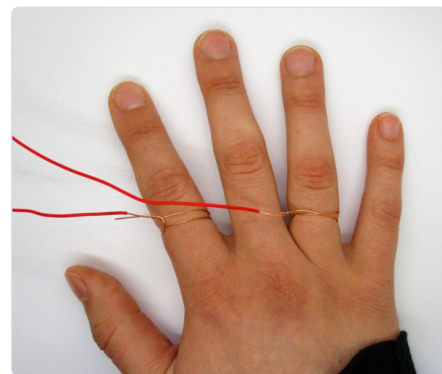
Het meten van de huidimpedantie

Het uitgangspunt voor de metingen was de ontwikkeling van een geleidingsmeter voor de menselijke huid (**figuur 1**) op basis van een

microcontroller, die uiteindelijk bedoeld was om als leugendetector te worden gebruikt. Ik voerde de metingen uit met een AC-sig-naal, of beter gezegd: een korte positieve puls gevolgd door een even korte negatieve puls. Het resultaat waren verbazend goede geleidingswaarden. Een normale multimeter geeft een weerstand van ongeveer 1 M Ω tussen de twee contactelektroden, maar het microcontroller-instrument leverde waarden van ongeveer 10 k Ω .

Als je op het internet naar dit onderwerp zoekt, zul je snel ontdekken dat de huidimpedantie frequentieafhankelijk is. Hoe hoger de frequentie, hoe hoger de geleiding. De impedantie daalt ook met toenemende spanning. Dit soort onderzoek wordt om verschillende redenen uitgevoerd. Ooit ging het om de gevaren van elektriciteit. Onderzoekers onderzochten hoeveel stroom onder verschillende omstandigheden door het menselijk lichaam kon lopen. Daarbij bleek dat de inwendige impedantie van hand tot hand slechts een paar

duizend ohm bedraagt, en dat de huidimpedantie daarbij domineert. Bij hoge wisselspanningen wordt de contactweerstand zeer klein en is de inwendige impedantie dus dominant. Dit betekent dat elektrische schokken gevaarlijker zijn dan je op grond van een ohmmeter zou denken.



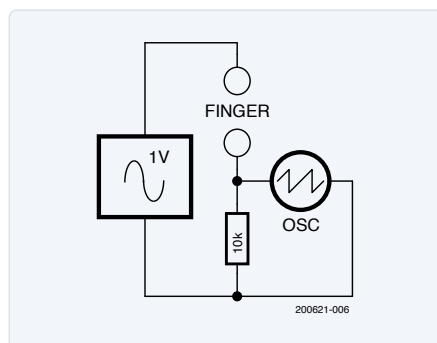
Figuur 1. Meten van de huidimpedantie.

Een ander belangrijk onderzoeksdomein is vooral medisch. Het doel daarbij is na te gaan hoe ECG-elektroden werken of welke conclusies uit de lichaamsimpedantie kunnen worden getrokken. Uit deze onderzoeken blijkt dat de contactweerstand tijdens het onderzoek als functie van de tijd kan veranderen en dat deze kan worden beïnvloed door een zoutoplossing. We kunnen in elk geval met zekerheid zeggen dat de huid een zeer complex orgaan is.

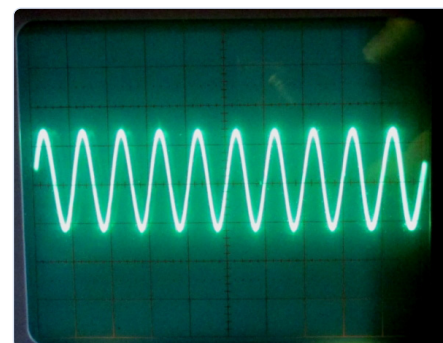
Vervangingsschema van de huid

Wat een elektronica-hobbyist of -professional eigenlijk wil is een bruikbaar vervangings-schema voor kleine signalen. Tot nu toe werd meestal uitgegaan van een weerstand in de orde van 100 k Ω tot 1 M Ω , maar dit geldt blijkbaar alleen voor gelijkspanningskjes tot ongeveer 9 V. Bij wisselspanningen is het gedrag van de huid anders. Daarom heb ik mijn sinus-generator aangezet en een spanningsdeler gebouwd bestaande uit twee vingers en een vaste weerstand van 10 k Ω .

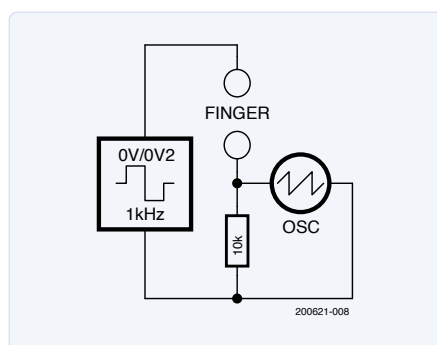
Metingen met kleine spanningen van zo'n 1 V (figuur 2) lieten een onvervormde sinus zien (figuur 3). Ik kon de sterke frequentie-afhankelijkheid ook bevestigen. Tussen 1 kHz en 10 kHz daalde de impedantie met ongeveer een factor 10. Mijn hand met de twee draad-elektroden gedroeg zich dus min of meer als een condensator. Vergelijkingen met verschillende condensatoren uit de onderdelenbak toonden aan dat een condensator van 3,3 nF een zeer vergelijkbaar gedrag vertoonde. Het hele meetproces kan worden vereenvoudigd door gebruik te maken van een blokgolf (figuur 4). Hiervoor heb ik het kalibratiesignaal van de oscilloscoop gebruikt, met een amplitude van 0,2 V en een frequentie van 1 kHz. Dit is geen wisselspanning, maar een pulserende gelijkspanning. De uitgangsspanning is gedurende 0,5 ms nul en daarna 0,2 V gedurende weer 0,5 ms. Dit signaal kan worden beschouwd als een gelijkspanning van 0,1 V met daarop gesuperponeerd een blokgolf met een topwaarde van 0,1 V. Zichtbaar zijn de typische naaldpulsjes van een RC-hoogdoorlaatfilter (figuur 5). Aangezien het meetsignaal een gelijkstroomcompo-



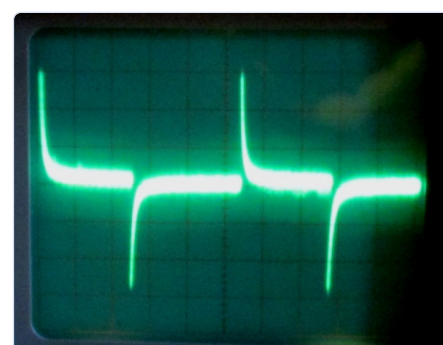
Figuur 2. Meting met een wisselspanning.



Figuur 3. De spanningsval over de weerstand.



Figuur 4. Meting met een blokgolf.

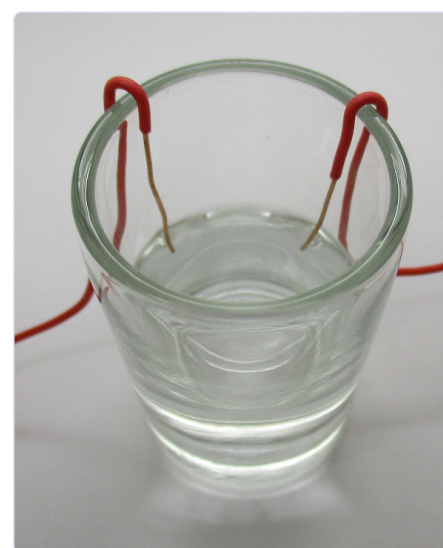


Figuur 5. Dezelfde signaalgolfvorm als bij een hoogdoorlaatfilter.

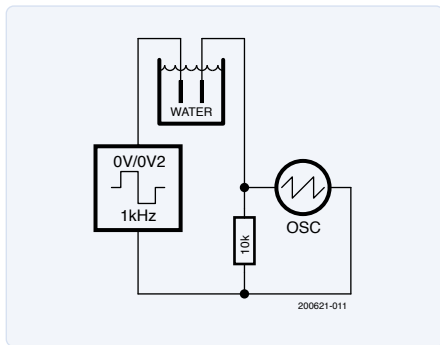
nent heeft, is het duidelijk dat de DC-geleiding onbeduidend is, want anders zou het signaal een duidelijke offset vertonen. Dit bevestigt ook dat de huid met twee draden als elektroden zich gedraagt als een condensator met een capaciteit van enkele nanofarad. Parallel daaraan staat dan een (grote) weerstand van ongeveer 1 M Ω .

De verklaring

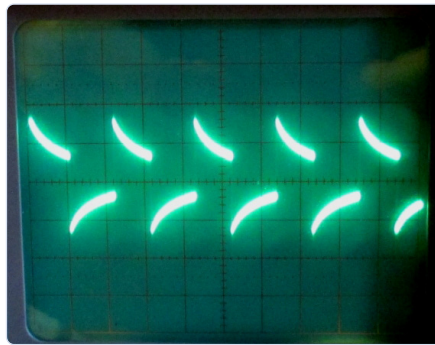
De grote capaciteit van enkele nanofarad, in combinatie met de zeer kleine contactoppervlakken van de draden, bracht mij op het idee dat ik hier in feite meteen dubbellaags condensator te maken had. Het vocht van de huid produceert een waterfilm op het metaaloppervlak. Op het grensvlak ontstaat dan een dubbele laag van gepolariseerde watermoleculen. Dat is precies hetzelfde als het werkingsprincipe van een supercondensator,



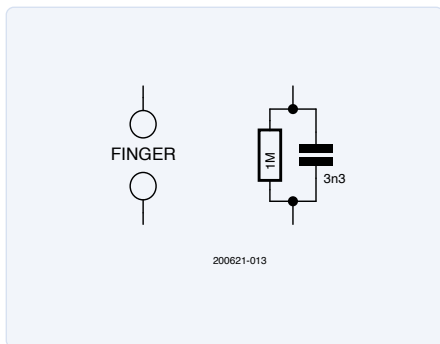
Figuur 6. Experimentele opstelling voor een dubbellaags-condensator.



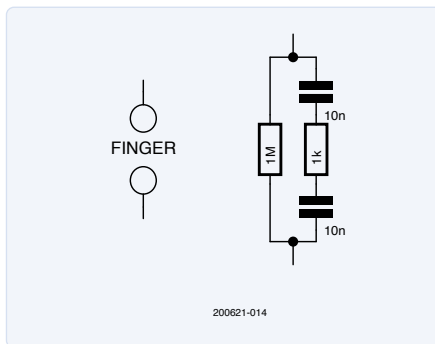
Figuur 7. De watercondensator met een blokgolf.



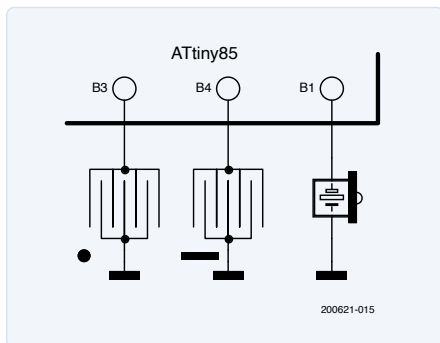
Figuur 8. Uitgangssignaal van het 'water-RC-netwerkje'.



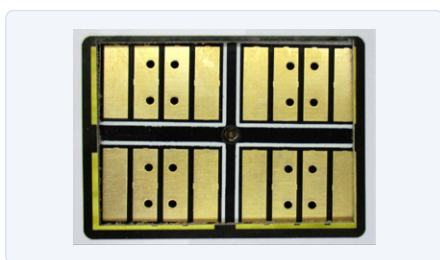
Figuur 9. De vereenvoudigde vervangingsschakeling.



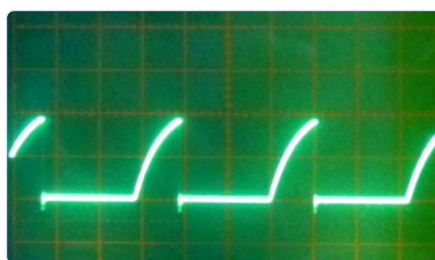
Figuur 10. De uitgebreide vervangingsschakeling.



Figuur 11. Een automatische morse-toets met aanraaksensoren.



Figuur 12. De aanraakcontacten.



Figuur 13. Het signaal op poort B3.

vergelijking met andere condensatoren. De watercondensator heeft ongeveer hetzelfde effect als een 47nF-filmcondensator, ondanks het zeer kleine oppervlak van de elektroden die slechts ongeveer 1 mm in het water steken. Als u om een of andere reden meer capaciteit nodig hebt, is dat geen probleem.

Samenvattend is het resultaat duidelijk: de impedantie van mijn twee vingers met draadcontacten komt overeen met het vervangingschema van **figuur 9**. Het exacte resultaat kan echter van persoon tot persoon sterk verschillen en is uiteraard zeer sterk afhankelijk van het contactoppervlak, het momentane huidvochtgehalte en de contactdruk.

Als we deze condensator nader bekijken, blijken het eigenlijk twee condensatoren te zijn. Het diëlektricum van deze condensatoren is de dunne waterlaag tussen de huid en de metalen elektrode. Daarnaast is er natuurlijk nog de inwendige impedantie van het lichaam, bijvoorbeeld tussen de ene vinger en de andere. Alles bij elkaar leidt dit tot een wat uitgebreider vervangingsschema (**figuur 10**). De inwendige impedantie is moeilijk te bepalen; omwille van de eenvoud veronderstellen we hier dat deze 1 k Ω is.

Als je de frequentie herhaaldelijk verhoogt, daalt de impedantie van de huidcondensator navenant. Dan krijgt de interne impedantie meer gewicht. Ik weet dit persoonlijk uit pijnlijke ervaringen bij radioamateurs. Als je per ongeluk de uitgangconnector van een kortegolfzender aanraakt, krijg je geen elektrische schok maar een verbrande vinger. Het verbrandingseffect is echter totaal anders dan bij het aanraken van een hete soldeerbout. Er is geen brandblaar zoals bij een soldeerbout, en het voelt heel anders aan. De verhitting vindt duidelijk plaats onder de opperhuid in het diepere huidweefsel waar het geleidingsvermogen groter is, met name daar waar de stroomdichtheid het hoogst is.

Toepassing: aanraaksensor

Een mogelijke toepassing voor de vingercondensator is een automatische morse-toets met aanraaksensoren. Ik gebruikte een ATtiny85 microcontroller (**figuur 11**) plus twee aanraaksensoren uit een FM-radio (**figuur 12**). In de radio werden de sensorstroompjes versterkt door transistoren, wat betekent dat de huidweerstand werd gedetecteerd.



Listing 1. Morse-sleutel.

'ELbug with touch sensors

```
$regfile = "attiny85.dat"
$crystal = 8000000
$hwstack = 8
$swstack = 4
$framesize = 4
dim n as byte
```

```
ddrB = &B00011010
Portb = 0
```

```
Do
  DDRB.3 = 0          ' B3 high impedance
  Portb.3 = 1          ' pullup
  waitus 10
  if PINB.3 = 0 then   ' still low after 10 µs?
    portb.3 = 0
    ddrb.3 = 1
    for n = 1 to 50    ' output dot
      PortB.1 = 1
      waitms 1
      portb.1 = 0
    
```

```
      waitms 1
    next n
    waitms 100
  end if
  portb.3=0           ' discharge B3
  ddrb.3 = 1

  DDRB.4 = 0          ' B4 high impedance
  Portb.4 = 1          ' pullup
  waitus 10
  if PINB.4 = 0 then   ' still low after 10 µs?
    portb.4 = 0
    ddrb.4 = 1
    for n = 1 to 150   ' output dash
      PortB.1 = 1
      waitms 1
      portb.1 = 0
      waitms 1
    next n
    waitms 100
  end if
  portb.4=0           ' discharge B4
  ddrb.4 = 1
  waitus 10
Loop
End
```

Dit heeft het nadeel dat vervuiling op een gegeven moment tot storingen kan leiden. Een methode waarbij de microcontroller de oplaadtijd meet van de condensator die door de vinger wordt gevormd, is aanzienlijk betrouwbaarder (zie **listing 1**). Hiervoor wordt eerst een poort (B3, B4) als uitgang geconfigureerd en laag gemaakt om de condensator te ontladen. Daarna wordt de poort hoogohmig gemaakt en wordt de interne pull-up (ongeveer 50 kΩ) ingeschakeld. De sensorcondensator wordt dan geladen. Het kritieke punt is wanneer de spanning van de poort boven de drempelwaarde van ongeveer $0,5 \times V_{CC}$ komt. Voor onze doeleinden is het voldoende om 10 µs te wachten en dan de toestand van de poort uit te lezen. Als op dat moment een laag niveau wordt gedetecteerd, wordt aangenomen dat de toets is ingedrukt. Hier wordt een blok golf als terugkoppelsignaal gegenereerd voor de piezoluidspreker die op B0 is aangesloten. **Figuur 13** toont de situatie wanneer de toets niet krachtig genoeg wordt aangeraakt. Dan neemt het puls niveau binnen 10 µs tot 4 V toe, zodat de toets als niet ingedrukt wordt beschouwd.

In het volgende nummer van *Elektor* (de Zomereditie 2022) zal ik nog twee andere toepassingen laten zien: de vingercondensator en het twee-vingerorgel. Tot die tijd wens ik u veel plezier met uw eigen experimenten! ◀

200621-03

Vragen of opmerkingen?

Hebt u technische vragen of opmerkingen naar aanleiding van dit artikel? Stuur een e-mail naar de auteur via b.kainka@t-online.de of naar de redactie van Elektor via redactie@elektor.com.



GERELATEERDE PRODUCTEN

- **B. Kainka, De basis van elektronica (Elektor 2020) (e-boek, SKU 19369)**
www.elektor.nl/19369

