

IA2109VM Volt-monitor

Inleiding. Voor het realtime monitoren (=toezicht houden) van het daadwerkelijk energieverbruik bij een PV-installatie moet voor een juiste energiemeting de netspanning gemonitord worden. Juist de kleine variaties in de netspanning maken het verschil tussen energie inkopen, of eigen energie verbruiken, danwel verkopen (terugleveren).



In Nederland **was** in de vorige eeuw de netspanning 220 volt wisselspanning (bij 380 volt krachtstroom). Volgens de normen mag deze niet meer dan 10% afwijken, ofwel niet zakken beneden 198 VAC en en niet stijgen boven de 242 volt. Maar..., vanwege Europese energie-uitwisseling is de enkelfase netspanning in de tachtiger jaren verhoogd naar 230 VAC, en de krachtstroom van 380 VAC naar 400 VAC.

De meeste elektronica kan **zeer slecht** tegen overspanning; bij verhoging van de netspanning zal deze fors eerder de geest geven. In Nederland is tijdens de overgangsfase de netspanning verhoogd naar de gewenste 230 VAC met een afwijking van 5% naar boven. De onderspanning mocht nog steeds 198 volt zijn en de nieuwe overspanning 241 volt. Inmiddels geldt vanaf 2004 binnen geheel Europa weer een toegestane afwijking van 10%, ofwel 207 volt als onderspanning en 253 volt overspanning. PV-inverters en huis-accu's mogen géén hogere spanning opwekken dan 253 volt! Boven deze spanning **moet** de inverter/accu zichzelf uitschakelen.

Tip; controleer vintage-apparaten op de juiste voedingsspanning. Vaak kan deze aangepast worden, of moet op de voedingstrafo een andere aansluiting gebruikt worden. Bij 230 VAC netspanning kan beter de 240V-aansluiting gebruikt worden; het apparaat zelf werkt dan meestal op een kleine onderspanning en gaat veel langer mee.



Februari 2023, Ontwerp codebesluit. De ACM heeft een ontwerp Netcode-besluit artikel 3.8 en 2.14 opgesteld om de overspannings-beveiligingseisen aan te passen, zodat zonnepanelen in laagspanningsnetten straks minder vaak afgeschakeld hoeven te worden. In beide artikelen is de drempelwaarde nu vastgesteld bij een netspanning die hoger is dan 110 procent van de momentele nominaal spanning, ofwel hoger dan 253 volt. Vanaf deze drempelwaarde moet de zonnepaneel met omvormer nu nog van het stroomnet worden afgeschakeld.

Het voorstel is de momentele waarde te vervangen door een voortschrijdend 10 minuten gemiddelde, en de overspanningswaarde vast te leggen op 115 procent, ofwel op 264,5 volt. Zo kan volgens de netbeheerders afschakeling van bijvoorbeeld zonnepaneelinstallaties door activering van de overspanningsbescherming worden voorkomen.

Concreet betekent dit dat 220 VAC apparaten blootgesteld worden aan een 44,5 volt hogere spanning!!, ofwel 20% overspanning. 230 VAC apparaten aan 34,5 volt, ofwel 15% overspanning! Voor de al geïnstalleerde omvormers en hun opbrengst verandert er echter niets, immers deze zullen zich boven de maximale 253 volt blijven uitschakelen. Tenzij de eigenaar ze kan omprogrammeren, hetgeen niet waarschijnlijk is.

Spanning-meetopnemer. Stroom gaat vloeien vanwege een spanningsverschil. Een Photo Voltaïc-installatie kan alleen energie leveren wanneer de PV-spanning groter is dan de netspanning (wetten van Kirchhoff). Wanneer de burens links en rechts een PV-installatie hebben en aan het net terugleveren, kan de normale netspanning van 230 VAC al snel oplopen tot 241 VAC. Om zelf zonneenergie te kunnen gebruiken, moet de eigen PV-installatie dan minstens meer dan 242 VAC opwekken.

PV-/Accu-omvormers veroorzaken dus een lokale netspanningsverhoging, en moeten zichzelf boven 253 VAC (nederland) binnen tien minuten afschakelen. Bij een netspanning hoger 264,5 VAC **moet** direct afgeschakeld worden. In de praktijk is bij een PV-installatie een 'huis-netspanning' van 245 VAC niet opzienarend hoog, en nog steeds binnen de leverings-norm! Voor het monitoren van de netspanning is het voldoende om de netspanning te meten binnen de toelaatbare grenzen. Bij een 230 VAC 'middenwaarde' en meetbare 15% afwijking bereik, moet de voltmonitor dan minimaal 195 VAC en maximaal 265 VAC kunnen meten.

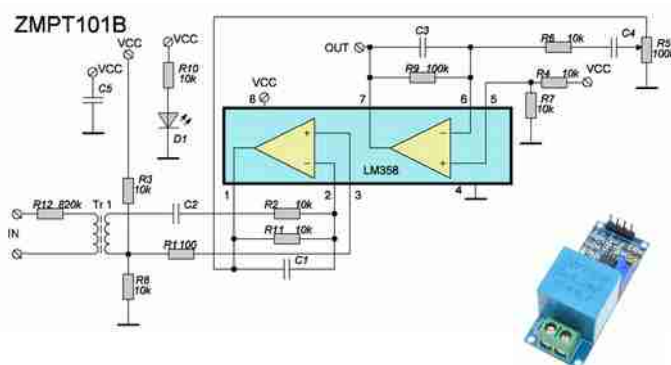
PV-omvormers maken van zonnepaneel-gelijkstroom een netspanning-wisselstroom. De opgewekte PV-frequentie moet gelijk en synchroon zijn aan de netspanningsfrequentie. De meeste omvormers zijn wereldwijd inzetbaar voor diverse netspanningen en -frequenties. Voor een maximale opbrengst moeten de omvormers echter wel op de juiste net-parameters ingesteld zijn! Een leuke hobby voor hackers is het via WiFi en standaard fabriekswachtwoorden wijzigen van andermans PV-omvormer-parameters.

De netfrequentie-variaties zijn voor spanning-monitoring niet van invloed; het aantal perioden wordt door het energiebedrijf geteld en eventueel jaarlijks europees bijgesteld voor net-synchrone apparaten. Bij een off-grid-installatie is frequentie-monitoring echter wel degelijk zinvol.

Bij een zelfstandig fysiek meetinstrument meestal onbelangrijk, maar software gestuurd belangrijke vraag, is de **meetduur** en de **meet-interval** (niet te verwarren met de sampling rate), ofwel moet de spanning continu (=real time) gemonitord worden?, over elke zoveel periode?, of per seconde?, of is elke 10 seconde de spanning controleren voldoende? Bedenk dat 230 VAC bij 50 Hz een leveringsnorm is; de netspanning is in principe een vast gegeven; alleen moet voor ons doel van voltmonitoren een afwijkende spanning opgemerkt worden. Afhankelijk van het monitor-gebruiksdoel is de vraag dus, hoe vaak en hoe lang de spanning gemeten moet worden? Ter indicatie; een fabrikant-PV-monitoring-systeem meet eenmaal per 15 minuten de prestaties.

PZEM-modules. Er bestaan de kant-en-klare modules uit de PZEM-series, zoals de ZMPT101B 230 VAC Voltage Sensor en de ZMPT107, maar beide kennen een bovengrens van max 250 VAC (clipping), en zijn voor ons doel dus eigenlijk niet geschikt. Het schema leert ons dat de sensor bestaat uit een transformator, met achterliggende versterkertrappen. Meer informatie op www.solarduino.com

Het nadeel van de PZEM-modules is de bijbehorende software; na een update kan een nieuwe module nodig zijn.



Spanning-opnemer. Voor het monitoren van de netspanning bestaan verschillende oplossingen, met elk hun eigen voor- en nadelen. Het maakt nogal wat uit of de netspanning op twee decimalen **geijkt** nauwkeurig herleid moet worden, of dat een indicatie al voldoende is. Afhankelijk van iemands opleiding, ervaring en mogelijkheden kiest de één voor een levensgevaarlijk direct aan het net hangen van de Arduino (niet aan te bevelen!!!), en gebruikt een ander een spanningstrafo met achterliggende elektronica.

Wanneer een trafo niet tot in verzadiging wordt belast (dus lineair blijft transformeren), kan in principe elke voedingstrafo als AC-spanning-meettrafo gebruikt worden. Kies voor een type met een zo laag mogelijk magnetisch (ijzer- en koper-)verlies, ofwel de trafo mag beslist niet te warm worden. Goed bruikbaar zijn de compacte laag vermogen dun gelamineerde of gesinterde (print)transformatoren uit een wekker(radio). Veel voorkomende secundaire spanningen zijn 18, 9, 6, 5 en 3 VAC, waarbij de 12 VAC en hoger vanwege de gewenste lineaire transformatie en meetbereik de voorkeur heeft.



De spanningsmeettrafo wordt via een zekering met de primaire 230 VAC aansluitingen met het lichtnet verbonden. Bij voorkeur aansluiten zo dicht mogelijk op de centrale verdeelrail op de **huisautomatiserings-eindgroep ('Domus')** van de huisinstallatie (bij voorkeur de eerste meterkastgroep).



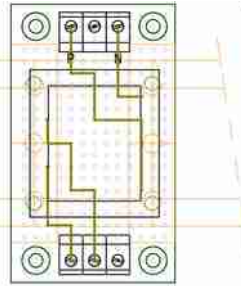
Om de meet- en fasehoek-afwijking zo klein mogelijk te houden, mag de secundaire spoel niet buiten de (meestal onbekende) trafo-ontwerpspecificaties belast worden. De printtrafo hienaast is een 1 VA-type bij 18 VAC, ofwel $I_{\text{secNom}} (P/U=1/18) = 50 \text{ mA}$. $R_{\text{nom}} (U/I=18/0,05) = 360 \text{ ohm}$. De transformatieverhouding is dan 230:18, ofwel 12,778 : 1.

Zelfbouw spanningopnemer In dit voorbeeld wordt als spanning-opnemer een oude printtrafo gebruikt, welke op een experimenteer-printplaatje is gemonteerd. Zorg voor voldoende afstand (minimaal 5 mm!) tussen de primaire en secundaire banen om spanningoverslag te voorkomen.

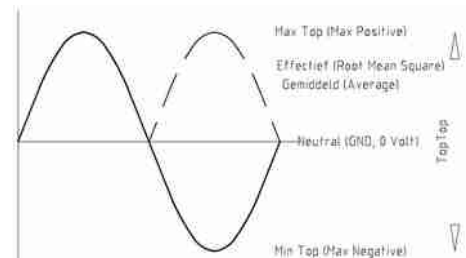
Een oude USB-kabel is gebruikt als afgeschermd meetkabel. De trafo, ofwel '*meetopnemer*', kan als een 'unit' op een 35 mm din-rail in een groepenkast worden geplaatst.

In twee Phoenix railklemmen zijn met de hete soldeerbout M3 moertjes geperst. De railklemmen worden achter op een unit-montageplaat met korte M3 moertjes vastgezet.

Vervolgens wordt de print voorzien van een elektrisch isolerende tussenplaat en met afstandhouders op de montageplaat vastgezet.

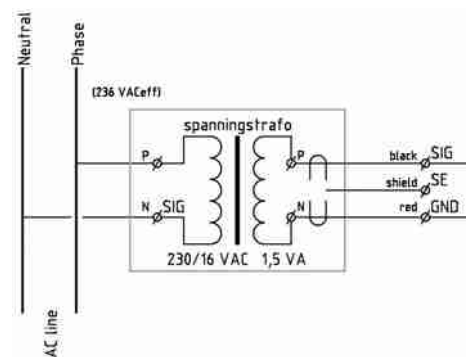


Meetprincipe. Omdat de 230 VAC netspanning een 'vast gegeven' is waarvan alleen de variatie van 195 tot 265 VAC gemeten moet worden, is het in principe al voldoende om binnen deze variatie te kunnen meten. In de meet- en regeltechniek wordt dan een *spanningsloop*-schakeling gebruikt. Voor onze toepassing en gewenste nauwkeurigheid is dit een onnodig gecompliceerde oplossing.

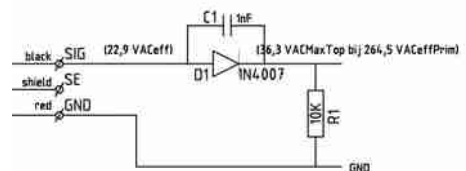


Omdat Arduino's analoge ingangen alleen maar positieve spanningen kunnen meten, moet de meetwisselspanning daar naar aangepast worden. Wanneer de wisselspanning enkelfasig gelijkgericht wordt, vervalt de onderste negatieve helft van de sinusvormige spanning. In de sketch wordt gezocht (gemonitort) naar de maximale spanning, ofwel MaxTop. Immers, wanneer MaxTop bekend is, kan de effectieve spanning eenvoudig teruggerekend worden.

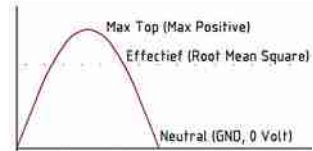
Zelfbouw spanningsensor. Om de transformatie-fase-fouthoek zo klein mogelijk te houden (normaal 180°), mag de secundaire spoel nauwelijks belast worden. Helaas zal een nauwelijks belaste secundaire spoel (afhankelijk van de kwaliteit magnetische kern) ook een veel hogere *nullastspanning* (*idle voltage*) opwekken. Een '16 volts' trafo levert dan gemakkelijk 22,9 VAC, hetgeen voor de Arduino veel te veel is. Voor een zo lineair mogelijke transformatie-curve mag de trafo niet te veel belast worden. Vanuit de trafo als *meetopnemer* wordt de secundaire spanning via een afgeschermd kabel naar een *meetvoorzet* gevoerd, die het signaal aanpast aan het Arduino-niveau. Het geheel vormt samen een *meetsensor*.



Gelijkrichting. Door één secundaire trafo-aansluiting met Arduino's GND te verbinden, wordt die aansluiting gelijk aan 0 VDC (niet te verwarren met een negatieve pool). Met het aan *massa* leggen van de (zwevende!) meetspanning, wordt de meetkring van de opnemer *vastgezet* (*grounded=GND*).



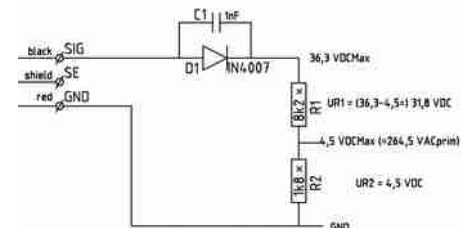
Met het vastzetten van de meetkring op nul volt wordt gelijktijdig de andere aansluiting een positieve ('gesuperponeerde') wisselspanning. De positieve wisselspanning van de andere trafo-aansluiting wordt met diode D1 enkelfasig gelijkgericht. Deze aansluiting wordt de **positieve pool** (+VDC). Door de enkelfasige gelijkrichting wordt alleen de eerste positieve helft van de wisselspanning doorgelaten.



Vóór de diode staat de secundaire wisselspanning, en ná de diode ontstaat bij een primair wisselspanningsmeetsignaal een pulserende halve gelijkspanningssinus. Voor het herleiden van de meetvoorzet, wordt de minimale trafobelasting op 10K gesteld (arbitraire waarde), ofwel R1 is een tijdelijke weerstand van 10k.

Sluit de opnemer aan, en meet de primaire en secundaire spanning;. Voorbeeld: Primair 236 VAC_{eff} geeft Secundair 22,9 VAC_{eff}. De **transformatieverhouding** bij een 10K belasting is dan: $22,9 : 236 = 1 : (236/22,9) = 10,305677$.

Voorzet-spanningsdeling. De enkelfasig pulserende gelijkspanning moet met een weerstands-spanningsdelers R1, R2 verlaagd worden naar een veilig niveau van maximaal 4,5 VDC, zodat het signaal door een analoge ingang van de Arduino gemeten kan worden. Voor dat doel wordt gebruik gemaakt van een weerstandsspanningsdelers R1 + R2.

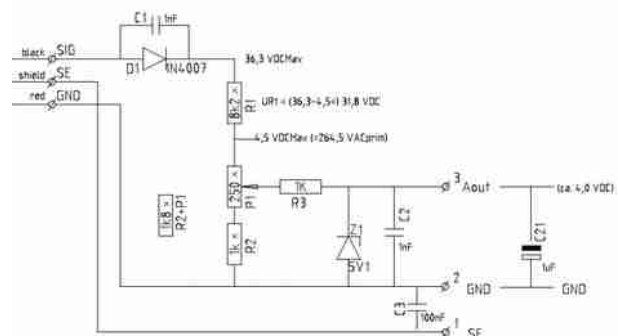


Bij een primaire maximaal spanning van 264,5 VAC_{eff} wordt de maximale secundair spanning $264,5 * 0,0970339 = 25,67$ VAC_{eff}. De Arduino meet alleen gelijkspanningen, zodat 25,67 VAC_{eff} overeenkomt met een maximale gelijkspanning van $(25,67 * \sqrt{2}) = 36,30$ VAC_{MaxTop} (=VDC_{max}). De maximale analoge ingangsspanning (bij 264,5 VAC primair) stellen we op 4,5 VDC, zodat R1 vervangen moet worden door twee weerstanden die samen een spaningsdelers van 10 K vormen.

Over R2 moet een spanning U_{R1} staan van 4,5 VDC_{Max}, wanneer VDC_{Max} 36,3 is. Over R1 valt dan een spanning U_{R1} van $(36,3-4,5) = 31,8$ VDC. De spaningsdelersverhouding is dan 4,5 : 31,8, ofwel 1 : 7,06. Anders gezegd, wanneer 36,3VDC_{Max} 10k is, is R1 $((31,8/36,3)*10K) = 8,76K$. Bij de 10% weerstandreeks wordt dit dan 8k2, en blijft 1k8 over voor de 4,5 VDC_{Max}.

Afregel-potmeter. Een weerstand uit de 10% reeks betekent alleen dat de daadwerkelijke weerstandswaarde 10% kan afwijken; **NIET** dat de weerstandswaarde zelf tijdens gebruik 10% in waarde varieert! Voor de schakeling zijn 1%-weerstandstypen daarom niet nodig.

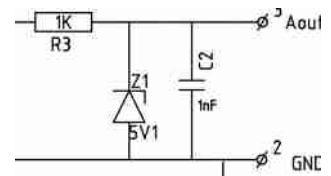
Om de Arduino een zo nauwkeurig mogelijke waarde aan te laten geven, zal het meetsignaal met een meerslags-instelpotmeter exact afgeregeld moeten worden. Ofwel R2 moet vervangen worden door een instelpotmeter P1 en een kleinere weerstand R2 die samen ca 1K8 zijn.



Voor P1 is gekozen een meerslags 500 ohm potmeter (juiste spanning makkelijk instelbaar), zodat R2 $(1800-500) = 1k3$ moet worden. Voor weerstand R2 is 1k2 gekozen. Bij controle bleek de uitgangsspanning al snel te hoog te zijn, zodat voor R2 een 1K waarde geplaatst is. Weerstand R3 is een stroombegrenzingsweerstand voor de analoge ingang van de Arduino.

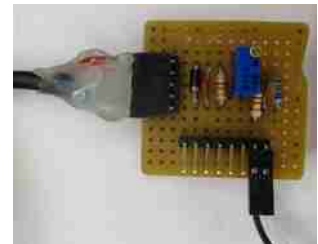
Omdat de software straks gaat zoeken naar U_{max}, is het van groot belang om ongewenste **spanningspulsen (spikes)** te onderdrukken. Tegelijkertijd met U_{max} wordt ook het tijdstip vastgelegd. De ontstoorcondensatoren C1 en C2 moeten zo klein mogelijk zijn om ongewenste tijdvertraging te voorkomen. Ontstoorcondensator C3 kan eventueel geplaatst worden wanneer geen separate SE-leiding beschikbaar is en er toch noch veel stoorsignalen opgepikt worden. Bij gebruik als losse meetvoorzet kan C3 vervangen worden door brugje naar GND.

Ingangsbeveiliging. Op de ingangen van de Arduino mag de spanning nooit hoger worden dan 5 VDC. Boven deze spanning zal de Arduino al snel (vaak gedeeltelijk) overlijden. Elke spoel (-zoals ook bij de meettrafo-) zal bij het uitschakelen een zelfinductiespanning opwekken die dubbel zo groot is als de aanlegde spanning was. Om te voorkomen dat de Arduino-ingang blootgesteld wordt aan een te hoge ingangsspanningspieken, worden deze door zenerdiode Z1 van 5,1 volt kortgesloten. Overigens, 4,8 volt een veiliger keuze.

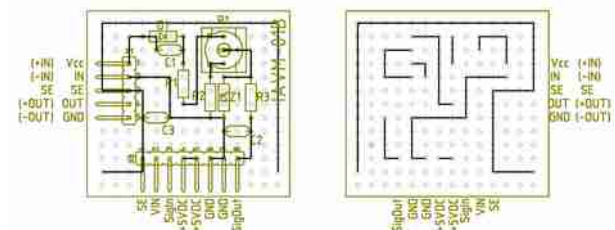


Samengevat: de waarden van spanningsdeler R1,P1,R2 zijn afhankelijk van de gebruikte trafo, diens secundair spanning en vermogen, en zal met meten, rekenen en uitproberen moeten worden vastgesteld. Plaats ter controle over de uitgang een tijdelijke condensator C21 van ca 1uF. Sluit de meetopnemer aan op ca 230 VAC. De potmeter moet bij een middeninstelling over C21 een 'uitgangsspanning' van 4,0 VDC maken. Na controle kan condensator C21 verwijderd worden.

Meetspanning-voorzet. De meetspanning-voorzet is op een printje (IAVM-01B) geplaatst, welke als insteek-module gebruikt kan worden. De trafomeetspanning wordt via een afgeschermd kabel (oude USB-kabel) naar een vijfpolige pinheader (X1) gevoerd. De kabel-afscherming (SE) wordt aan de trafozijde afgeïsoleerd, en aan het middelste contact van een female pinheader vastgezet. Nadat de overige anders vastgesoldeerd zijn, wordt met smeltlijm de female pinheader 'aangegoten'.



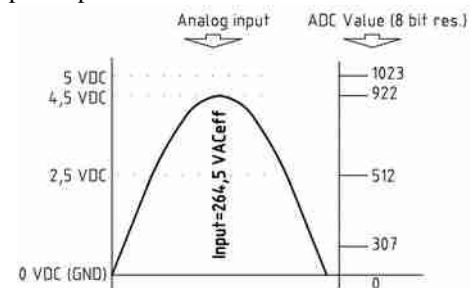
De pinning van de acht polige module-insteekheader is zodanig, zodat deze op een eenvoudig 'moederbordje-shield' ingeprikt kan worden. Dit is vooral handig tijdens de experimentele ontwikkelfase van apparaten.



Meetgevoeligheid. Arduino's Analog Digital Converter (ADC) verdeelt bij een Vcc van 5 VDC, de gemeten analoge ingangsspanning in 1024 stappen van $(5/1024) = 0,00488$ Volt, ofwel 4,88 mV per stap.

De voltmonitor moet maximaal $230 \text{ VAC} + (15\%) = 264,5 \text{ V}_{\text{eff}}$ kunnen meten. De maximale ingangsspanning U_{MaxTop} is dan $(264,5 * 1,4) = 370$ volt.

Voor Arduino's analoge ingang stellen we $370 \text{ V}_{\text{MaxTop}}$ gelijk aan 4,5 VDC, ofwel aan $(4,5/0,00488) = 922$ stappen. Anders gezegd; bij minimaal 0 VDC en maximaal 4,5 VDC als analoge ingangssignaal wordt het ADC meetbereik $(4,5/5 \text{ (vdc)} * 1024 \approx) 922$ stappen.



Samengevat; bij 922 stappen moet de Voltmonitor 264,5 VAC ($=370 \text{ V}_{\text{MaxTop}}$) aangeven. Dit geeft een meetnauwkeurigheid van $(264,5/922) = 0,2868764 \text{ VAC/stap}$. Een andere definitie voor meetnauwkeurigheid is het oplossend vermogen, ofwel de **sensor-gevoeligheid (sensitivity)** in volts per stap. De meetgevoeligheid wordt als parameter in de software gedefinieerd.

Sensor-kalibratie. Plaats eerst de sketch IA2109VM mk1. Zonder een regelbare wisselspanningstrafo is een primaire afregelspanning van 264,5 VAC_{eff} lastig te realiseren. Met de huidig gemeten netspanning als voorbeeld (bijvoorbeeld 230 VAC) laat zich de ADC-afregelspanning terugrekenen. Immers, bij 230 VAC moet de arduino op $(230/0,28687) = 802$ stappen worden afgeregeld.

Met de meettrafo met 230 VAC verbonden, is de ADC-afregelwaarde met potmeter P1 in te stellen op 230 VAC wat in theorie overeenkomt met 802 stappen.

IA2109VM mk1 Voltmonitor. Hieronder een eerste opzet voor het testen en afregelen van de meetvoorzet.

```
// IA2109VM_mk1_VoltMonitor, Harm J Seef, The Netherlands
// Proof of concept sketch monitoring grid-voltage
// with the IA2109 shield using a simple transformer.
//
// 2022 feb 17 HJS Designed for the IA2109 shield.
//
// =====

#include <LiquidCrystal.h> // Add library
const int rs=12, en=11, d4=8, d5=7, d6=5, d7=4; // Set vars for IA2109 interface pinning
LiquidCrystal lcd(rs, en, d4, d5, d6, d7); // Activate LiquidCrystal
//
int BackLed = A5; //
const int VoltSensor = A1; // Valid input A0, A1, A2, A3, A4, A5
float VoltSense = 0.2868764; // Analog input from 0...4,5 VDC measures 0...370 VMaxTop (=264,5 VACrms)
// StepMax = (4,5/5) * 1024 = 922
// VoltSense = 264,5/922= 0,2868764
//
unsigned long MeaStartTime = 0; // Time marker start measurement
int MeaCycleTime = 1000; // Measurement time in ms
//
int AnalogValue = 0; // 0...1023
int AnaMax = 0; // ADC's max measured value
//
float Voltage = 0.0; // calculated grid voltage
//
void setup() //
{ //
  digitalWrite(BackLed, HIGH); //
  pinMode(VoltSensor, INPUT); // set and connect Analog Input
  lcd.begin(16,2); // Initialize LCD...
  lcd.clear(); // Reset LCD
  lcd.setCursor(0,0); // First line first position
  lcd.print(" IA2109VM mk1"); // Show sketch name...
  lcd.setCursor(0,1); // Second line first position
  lcd.print(" Volt Monitor... "); // Show application...
  delay(2000); //
} //
//
void loop() // Main program...
{ // reset vars
  MeaStartTime = millis(); // mark time start measurement loop
  while(true) // Start voltage measurement loop
  { // read voltage sensor step (0...1023)
    AnalogValue = analogRead(VoltSensor); // if measurement higher
    if (AnaMax < AnalogValue) // if measurement higher
    { AnaMax = AnalogValue; } // update highest value
    if ((millis() - MeaStartTime) > // if measurement cycle time
        MeaCycleTime) // passed by
    { break; } // quit while loop
  } //
  lcd.setCursor(0,1); //
  lcd.print(AnaMax * VoltSense); // Vrms
  lcd.print(" VAC ("); // effective alternating voltage
  lcd.print(AnaMax); // ADC's maximum value
  lcd.print(") "); //
  delay(1); //
} //
```

Testen IA2109VM mk1 Voltmonitor. Zonder een netspannings-variac is de netspanning niet te wijzigen. Een doe-het-zelf-oplossing is door gebruik te maken van een stekker-contactdoos aangesloten op twee uitgerolde 20 meter verlengkabels. De monitor-opnemer meet de netspanning op de laatste stekker-contactdoos. Steek de stekker van een heteluchtbrander (een zware ohmse belasting) in deze stekkerdoos, en zie hoe de netspanning daalt door het inschakelen van de brander.



Arbeidsfactor (Cos φ). De voltmonitor wordt in één van de volgende hoofdstukken onderdeel van een vermogensmeter in Watt, waarvoor het nodig is om ook de stroom te monitoren.

Elektronen worden verplaatst door een potentiaalverschil, ofwel een spanningsverschil veroorzaakt een (elektronen)stroom. Bij een zuiver ohmse belasting zal bij een spanningsstijging de stroomgrootte exact gelijktijdig meestijgen; rekenkundig zijn spanning en stroom *in fase*, zodat $P = U \cdot I$, ofwel het *vermogen* in Watt.

