

Verzadiging in Baluns door Herbert, PA0SU

Inleiding

Uit verschillende QSO's op 80 is mij gebleken dat er veel misverstanden bestaan over baluns en trafo's. Daarmee bedoel ik niet in de eerste plaats voedingstrafo's (al gelden daarvoor dezelfde wetten) maar eerder HF-trafo's: 1 : 1, 1 : 4, baluns en dat soort spul. Hoe groot moet de (ferriet) kern zijn, en hoeveel windingen moeten er op? Voor velen is dat zwarte kunst. Bovendien zijn er publikaties (vooral op Internet!) en zelfs boeken, waarin een verkeerde benadering wordt gekozen. Steeds wordt er gedacht dat de stromen in de wikkelingen de magnetische flux in de kern bepalen. Dat is een misverstand. Het gaat om de spanning over de wikkelingen! Ik zal dat stap voor stap duidelijk proberen te maken.

Een Spoel op een Ringkern

Laten we eenvoudig beginnen. Stel, we willen de uitgang van onze zender voor gelijkspanning aan aarde leggen zonder dat de HF-uitgangsspanning daardoor gehinderd wordt. Dat kan nodig zijn als we een buizeneindtrap met een π -filter aanpassen aan 50 Ω . Natuurlijk hebben we er - zonder verder op de bouw van dat π -filter in te gaan - netjes voor gezorgd dat de uitgang van de levensgevaarlijk hoge anodespanning gescheiden wordt door een koppelcondensator. Voor de veiligheid is dat niet genoeg. Als die koppelcondensator stuk gaat, komt de volle mep op de uitgang te staan, met als gevolg dat de hoogspanning zelfs op de antenne kan komen, wat levensgevaarlijk is voor mens en dier die de antenne kunnen aanraken. Het is daarom voorgeschreven dat er bij zulke eindtrappen over de uitgang een stevige spoel moet worden gezet. Als de koppel-C kapot mocht gaan, ontstaat er kortsluiting waardoor de hoogspanningsbeveiliging in de zender de boel uitschakelt. Ik hoor al een hoop gesputter. Stil maar, ik zoek alleen een duidelijk voorbeeld.

De kortsluitstroom zal eventjes groot zijn, zodat de ohmse weerstand van de spoel die we gaan maken, klein moet zijn; in ieder geval kleiner dan een ohm.

Ik stel voor dat we die spoel maken van een ferriet ringkern met daarop een wikkeling van dik draad of snoer. Hoe groot moet die ringkern dan zijn en hoeveel wikkelingen moeten er op?

Een vuistregel is dat de reactantie van de spoel (X_L) minstens vijf keer zo groot moet zijn als de impedantie waar hij over komt te staan om het hoogfrequent niet te veel te beïnvloeden. In ons voorbeeld hebben we het over 50 Ω .

De reactantie van een spoel is:

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \dots(\Omega) \quad \dots \quad [1]$$

waarin:

X_L de reactantie (= de 'wisselstroom-weerstand') van de spoel $\dots(\Omega)$,
 f de frequentie $\dots(\text{Hz})$, en
 L de zelfinductie $\dots(\text{H})$ is.

Wat betekenen die $\dots(\Omega)$, $\dots(\text{Hz})$ en $\dots(\text{H})$? Wel, als je de lengte van een gang in een gebouw opgeeft, is een getal als 20,23 niet voldoende. Ik geef toe, het zullen wel meters zijn maar als het een gang in een poppenhuis betreft, zal de gang eerder 20,23 cm lang zijn, niet? We schrijven dat als: de lengte $l \dots(\text{cm})$. Als daar dan 20,23 uitkomt, weten we dat het 20,23 cm is. Zo ook hier.

X_L moet dus minstens $5 \times 50 = 250 \Omega$ worden. Hoe groot is dan de zelfinductie van de spoel L ?

NB.: De reactantie van een spoel neemt toe met de frequentie. Kijk maar in formule [1]. We moeten onze spoel derhalve berekenen voor de **laagste** frequentie die uit de zender komt.

Voor de berekening van de zelfinductie moeten we formule [1] anders schrijven:

$$L = X_L / 2 \cdot \pi \cdot f \dots (H)$$

Als de laagste frequentie 3,5 MHz (= 3500.000 Hz) is wordt de zelfinductie:

$$L = 250 / 2 \times 3,14 \times 3500.000 = 0,0000113 \text{ H.}$$

Dat is een onhandig getal. Als we een boortje van 2,4 mm bedoelen, schrijven dat ook niet als 0,0024 m.

0,0000113 H = 0,0113 mH, of nog beter 11,3 μ H.

Mooi, we nemen een ringkerntje, zoeken in de tabel van Amidon of Philips, of wie-dan-ook, op hoeveel windingen er op dat kerntje moeten om die 11 μ H te maken, wikkelen die er op en klaar is Kees. Toch? Helaas.....

Een Luchtspoel

Voor alle volledigheid: als we een luchtspoel hadden gemaakt, waren we nu klaar. We zaten dan echter met een koker van enkele centimeters dik en wel 10 cm lang te kijken om die 11 μ H te verwezenlijken! Je kunt wel een klosje dun draad nemen, maar dan wordt de ohmse weerstand te groot. Om grote afmetingen te vermijden, kozen we voor een spoel op een ferroxcube ringkern, toch?

De Spanning over een Spoel

Voor degenen die dat vroeger op school geleerd hebben:

$$u = \delta\Phi/\delta t \dots (V)$$

waarin:

u de spanning over één winding $\dots(V)$,

Φ de magnetische flux $\dots(Vs)$ en

t de tijd $\dots(s)$ is.

Je spreekt dat uit als: 'u is défie détee'. Die delta-tekenen zijn differentiaal-tekenen in de wiskunde en betekenen 'zeer kleine verandering'. In feite staat er niets anders dan: de spanning over een wikkeling van een spoel is gelijk aan de zeer kleine fluxverandering in een zeer korte tijd (sverandering)'.
We hoeven dat niet allemaal te weten natuurlijk. Ik wil alleen maar laten zien dat de magnetische flux in een kern (kortweg: flux) **niets** te maken heeft met de stroom in de spoel doch uitsluitend samenhangt met **de spanning** over de spoel!

De flux in een ijzer- of ferrietkern kan echter niet onbeperkt groot worden anders treedt **verzadiging** op. Bij verzadiging zakt de zelfinductie van de spoel op die kern als een kaartenhuis in elkaar. Waarom dat zo is, leg ik misschien een andere keer uit. Bovendien komt er voor hoogfrequent een flinke ohmse component bij!

De flux in een ijzer- of ferrietkern kan echter niet onbeperkt groot worden anders treedt **verzadiging** op. Bij verzadiging zakt de zelfinductie van de spoel op die kern als een kaartenhuis in elkaar. Waarom dat zo is, leg ik misschien een andere keer uit. Bovendien komt er voor hoogfrequent een flinke ohmse component bij!

Wat gaat er fout? Ons spoeltje van 11 μ H op een klein kerntje over de uitgang van de zender raakt in verzadiging als de uitgangsspanning van de zender (bij de laagste frequentie) te groot wordt. Ergo, de zelfinductie zakt naar bv. 1 μ H met 20 Ω daaraan parallel waardoor de spoel geen reactantie van 250 Ω meer heeft maar nog slechts een **impedantie** van zo'n 15 Ω . Nu loopt er in de spoel meer stroom dan in de 50 Ω -belasting! Denk er om dat een verzadigde kern zich grotendeels ohms gedraagt zodat er bij verzadiging vermogen in gedissipeerd wordt. De kern wordt heet!

Is dat bij SSB nou zo erg? De verzadiging treedt toch alleen maar in de pieken van het signaal op? De verliezen zullen wel meevallen. Dat kan wel zijn maar er ontstaat ook vervorming in het ferriet. De spoel gedraagt zich immers niet meer lineair. Heb je net zo je best gedaan om de eindtrap netjes lineair te maken zodat het signaal mooi smal is en ook geen gepruttel in de andere zijband geeft en nu wordt de zaak verpest door die ene spoel! Jammer. Netjes maken dus!

Het komt er op neer dat je bij een 100 watt-eindtrap toch een 32 mm-4C6-ringkern met vijf windingen nodig hebt. Voor 400 watt zou ik er maar wat meer windingen op leggen, al geven veel windingen weer problemen bij 28 MHz. Twee kernen op elkaar plakken en er zeven windingen op leggen, kan ook. Met twee-op-elkaar wordt de kern-doorsnede (dat is dat zwarte vlakje waar je tegenaan kijkt als zo'n ding kapot valt) twee keer zo groot.

Wat hebben we tot nog toe geleerd?

Als we een spoel-met-ferrietkern over een impedantie (bv. 50 Ω) zetten zonder dat die impedantie noemenswaardig beïnvloed wordt, moet niet alleen de zelfinductie groot genoeg zijn (voldoende wikkelingen) maar ook de daar aanwezige spanning over die spoel kunnen staan. Die spanning kan alleen over de spoel staan als er in de kern voldoende flux opgewekt kan worden. De kerndoorsnede moet daarop berekend zijn zodat er geen verzadiging optreedt.

De Balun

Hierbij ontstaan de grootste misverstanden. Op www.qsl.net/iz7ath...etc. moet je helemaal maar niet kijken! In: en.wikipedia.org/wiki/Balun is het al niet veel beter. Je kunt op Internet 'alles' vinden, zeker, ook de grootste onzin!

Een 1 : 1 balun kan op twee manieren gemaakt worden: een bifilaire wikkeling (of een stuk coax) op een ringkern met of zonder 'hulpwikkeling'. De ene heet Guanella en de andere Routroff. Welke wat is, weet ik even niet. Doet er ook niet toe.

Een wijd verbreid misverstand is dat er bij de balun-zonder-hulpwikkeling geen flux in de kern zou ontstaan. De redenering is: 'De stromen in de beide wikkelingen zijn even groot en tegengesteld dus is de som nul en is er geen flux in de kern'. Ik zei al dat flux en stroom niets met elkaar te maken hebben! Laten we maar eens kijken.

In figuur 1 heb ik een doosje ('black box') getekend waarvan ik zeg dat het een verliesvrije 1 : 1 balun is. Als we er aan meten, blijkt dat ook zo te zijn. Aan de linkerkant zitten de aansluitingen 1 en 0, met 0 aan aarde. Aan de rechterkant zit de balans-uitgang met de aansluitingen 2 en 3. Als we 1 en 0 van deze balun op een 100-watt-zender met een 50 Ω-uitgang aansluiten en de balun tussen 2 en 3 belasten met 50 Ω, dan staat er tussen 1 en 0 ruim 70 volt. We noemen die spanning U_{10} . Over de 50 Ω-weerstand (tussen 2 en 3) staat ook 70 volt. Die spanning noemen we U_{23} . Als de maker van dit schoons de draadjes in het doosje goed gelegd heeft, is U_{23} in fase met U_{10} . Ergo $U_{23} = U_{10}$. Ze zijn immers even groot en in fase!

NB.: voor degenen die moeite hebben met deze notatie, verwijs ik naar de toegift aan het einde van dit verhaal. Bestudeer dat eerst als je dat wilt.

U_{23} is tov. aarde gebalanceerd. Dat betekent dat $U_{20} = U_{03} = \frac{1}{2}U_{10}$. Anders gezegd: $U_{20} = -U_{30}$. Het mintekentje geeft aan dat U_{30} in tegenfase is met U_{20} . U_{30} is dus $= -\frac{1}{2}U_{10}$.

Nu geldt:

$$U_{10} = U_{12} + U_{20} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad [2]$$

daarin was:

$$U_{20} = \frac{1}{2}U_{10} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad [3]$$

Vullen we [3] in in [2] dan krijgen we:

$$U_{10} = U_{12} + \frac{1}{2}U_{10} \text{ of}$$

$$U_{12} = U_{10} - \frac{1}{2}U_{10} = \frac{1}{2}U_{10}$$

Tussen de punten 1 en 2 staat dus de halve ingangsspanning. Hetzelfde geldt voor de punten 0 en 3 zagen we eerder.

Bij een 1 : 1 balun voor 50 Ω staat er over de in- en de uitgang 70 volt bij 100 watt.

Tussen de punten 1 en 2 en tussen de punten 0 en 3 staat dan 35 volt, **ongeacht wat voor balun er in de black box zit.**

Voor abstracte denkers is hiermee het verhaal klaar: het maakt dus niet uit of er wel of geen 'hulpwikkeling' in de balun zit als het gaat over de flux in de kern. Dit is wat onbevredigend, dus:

De Balun zonder Hulpwikkeling

We gaan nu in het doosje kijken. We vinden een ringkern met vijf wikkelingen coax. De binnenader zit tussen 1 en 2 en de buitenmantel tussen 0 en 3. Dat is in figuur 2 zeer schematisch weergegeven. Ik heb zelfs de aanduiding voor de kern weggelaten, maar de wikkelingen zijn magnetisch gekoppeld.

We zagen zoëven dat over die buitenmantel 35 volt staat (U_{03}). De zelfinductie van die 'spoel' is ongeveer 11 μH , zodat er nauwelijks stroom loopt. Bovendien is die stroom 90 graden verschoven tov. de spanning dus wordt er geen energie opgenomen in de balun.

De doorsnede van de kern is groot genoeg om de benodigde flux te kunnen maken voor die 35 volt zonder in verzadiging te raken.

Hangen we dezelfde balun achter een 1 kilowatt-zender, dan staat er geen 35 volt over de wikkeling tussen 0 en 3, maar 110 volt! De flux in de kern moet nu ongeveer drie keer zo groot zijn om de bijna drie keer zo grote spanning op te wekken. Als de doorsnede van de kern daar te klein voor is, raakt hij in verzadiging met de eerdergenoemde gevolgen.

Oh, er is dus een rechtstreeks verband tussen het te verwerken vermogen en de doorsnede van de ringkern? Ja en nee. In het geval we het in beide gevallen over een balancering bij 50 Ω hebben, is dat juist maar als de impedantie geen 50 Ω is, moeten we oppassen.

Als we bijvoorbeeld de stommiteit uithalen om deze balun tussen een asymmetrische tuner en een (symmetrische) open lijn te hangen, kan het grandioos fout gaan.

Een voorbeeld:

Stel dat de impedantie op de aansluitingen van de open lijn op 3,65 MHz in de shack 500 Ω is (en toevallig ook nog keurig ohms) dan zal de asymmetrische tuner aan de uitgang ook 500 Ω moeten zijn om een SWR = 1 op zijn 50 Ω -ingang te krijgen. Met een zender van 100 watt komt er over die 500 Ω te staan:

$$P = U_{10}^2/R, \text{ hier } 100 = U_{10}^2/500 \implies U_{10}^2 = 50000, \text{ dus } U_{10} = 224 \text{ V.}$$

Er is aan de balun niets veranderd dus is U_{03} weer de helft van U_{10} . Dat wil zeggen: over de buitenmantel (tussen 0 en 3) staat 112 volt. Dat is nog een graadje erger dan 1 kW bij 50 Ω !

Omdat je onderaan een open lijn nooit van te voren weet wat de impedantie zal zijn, is het dus verkeerd om een ringkern-balun tussen een asymmetrisch tuner en een open lijn te zetten, zelfs met QRP-vermogen. Als je toevallig 'in spanningsvoeding zit', zoals dat genoemd wordt, gaat de kern bij 10 watt al in verzadiging. Als het bij de ene frequentie nog goed gaat, garandeert dat niets voor een andere. Gewoon niet doen!

De Balun met Hulpwikkeling

In figuur 3 zien we die getekend. Ook hier zien we dat de buitenmantel van de coax tussen 0 en 3 zit en de binnenader tussen 1 en 2. Voor de spanningen daarover verandert er met een hulpwikkeling tussen 2 en 0 niets. We moeten alleen de spanning over de hulpwikkeling (U_{20}) nog controleren. Nu is:

$$U_{10} = U_{12} + U_{20} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad [4]$$

waarin eerder bleek dat:

$$U_{12} = \frac{1}{2}U_{10}$$

Vullen we dat in in [4] dan volgt:

$$U_{10} = \frac{1}{2}U_{10} + U_{20} \text{ of}$$

$$U_{20} = U_{10} - \frac{1}{2}U_{10} = \frac{1}{2}U_{10}.$$

Over de hulpwikkeling (met hetzelfde aantal windingen als 'de coax') staat dus ook de halve ingangsspanning. Geen vuiltje aan de lucht.

Dat kun je toch ook zó zien, hoor ik al zeggen. Pak de balun van figuur 3 bij pootje 1 en 3 vast en trek er eens aan. Je krijgt dan figuur 4. Ja, dan is het wellicht duidelijker. Je moet maar op het idee komen..... (zie Electron van november 1983).

Waarom WEL of GEEN hulpwikkeling?

Nu komen we bij de constructie van baluns, 1 : 4 trafo's al of niet gebalanceerd enz. Daar gaan we nu niet verder op in. Dat heb ik in 1983 al eens in Electron beschreven¹.

Voor de 1 : 1 balun geldt in ieder geval dat de hulpwikkeling *dwingend balans aan de uitgang oplegt*. Zonder hulpwikkeling wordt de symmetrie aan het toestel achter de balun overgelaten.

Voorbeeld 1:

We maken een balans (eind)trap die gestuurd wordt uit een asymmetrische bron. De twee buizen of transistoren willen we symmetrisch sturen. We willen echt dat beide buizen/transistoren dezelfde spanning (in tegenfase) krijgen. In dat geval moet de balun de symmetrie bepalen. De buizen/torren kunnen dat niet. Daarvoor heb je die hulpwikkeling nodig.

Voorbeeld 2:

Een dipool-antenne die voor één frequentie gebruikt wordt, is keurig op lengte gemaakt en laat in het voedingspunt 75Ω zien. Ohms dus! Of dat precies symmetrisch zal zijn, valt te betwijfelen: de ene poot hangt nu een keer 'anders' dan de andere. Het is dan verstandig om géén hulpwikkeling in de balun aan het voedingspunt van de antenne aan te leggen, anders gaat er balancerestroom in de 75Ω -coax naar de shack lopen en dat willen we om verschillende redenen niet. Een balun zonder hulpwikkeling wordt ook wel een *mantelstroomtrafo* genoemd. In Solid State Design noemen ze zo'n ding een 'sortabalun'.

(Hier moet je toch opletten. Omdat de balans aan de antennezijde ongewis is, kan de spanning tussen 3 en 0 van de balun groter zijn dan de halve ingangsspanning!)

Overbodig te zeggen dat een balun op een plaats waar de SWR groot is het middel erger is dan de kwaal: Een 80-meter dipool (met een balun bovenin) op 40 meter gebruiken, wordt dus een ramp. Oh, het werkt wel hoor, je kunt 'alles' aanpassen, maar vraag niet hoe breed het signaal dan wordt (als de kern van ellende niet uit elkaar spat).

Tot Slot

Electro-magnetisme blijft lastige materie. Ik heb geprobeerd met zo min mogelijk formules aanneemelijk te maken dat de *magnetische flux* in een kern de *spanning* over de wikkeling(en) bepaalt. Daar komt geen andere stroom aan te pas dan de 'voormagnetisatie-stroom'. Als de zelfinductie groot genoeg is, is die klein. Er wordt in ieder geval geen vermogen door opgenomen omdat deze stroom 90 graden naijlt op de spanning.

Als de spanning over de spoel groter moet worden dan de flux kan veroorzaken raakt de kern in verzadiging. Dan gaat er stroom in de spoel lopen omdat zijn eigenschappen totaal veranderen.

Bij transformatoren en baluns staat er over de wikkelingen spanning. Bij een 1 : 1 balun is de spanning over alle wikkelingen gelijk aan de halve ingangsspanning.

We kunnen alleen trafo's en baluns gebruiken in een goed gedefinieerde omgeving. De grootte (de doorsnede) van een ringkern wordt bepaald door de spanning per winding en de frequentie waarbij dat moet gebeuren. Natuurlijk zal die spanning bij grotere vermogens hoger zijn, maar de impedantie is zeker zo belangrijk. Kijk maar eens in een forse transistor-eindtrap die op 12 volt werkt. De impedanties zijn daar zeer klein, soms enkele ohm. Kijk eens hoe belachelijk klein de ferriet-trafo's zijn om een paar honderd watt te stoken, en denk er om dat daar vette stromen lopen!

¹ Breedband-ringkerntransformatoren en dergelijke voor de kortegolfbanden, 1983, Electron november, blz 576

Toegift: Een beetje Wiskunde

Wiskunde is niets anders dan 'een verkorte schrijfwijze'. Om ons probleem te lijf te gaan, zullen we daar gebruik van moeten maken. Ík kom er in ieder geval anders niet uit. We maken een aantal afspraken.

We stellen ons een huis voor met een pannendak. Dat huis heeft een voordeur en een kelder. De dakgoot zit 5 meter boven de straat, de voordeur is 2 meter hoog en de kelder is 2,5 meter hoog. Als we hoogteverschillen (bv. de hoogte van de deur tov. de keldervloer) willen berekenen, kunnen we dat zo uit het hoofd. Als de berekeningen wat ingewikkelder worden, gaat dat niet meer. Dan hebben we een verkorte (wiskundige) schrijfwijze nodig. We schrijven:

'de hoogte van de goot ten opzichte van de straat' als: $H_{\text{goot straat}}$ of nog korter: H_{gs} .

Op dezelfde manier wordt:

'de hoogte van de bovenkant van de (voor)deur boven de straat' = H_{ds} , en

'de hoogte van dakgoot boven de bovenkant van de deur: = H_{gd} .

Zo, dat is een stuk korter! Nu de kelder nog:

'de hoogte van de keldervloer boven de straat' = H_{ks} .

Oei, gaat dat goed? De keldervloer ligt **onder** het straat-niveau. H_{ks} zal dus een negatief getal zijn! In ons geval -2,5 m. Als we over 'de hoogte van de kelder is 2,5 m' praten, staan we wel in gedachten met onze voeten op de keldervloer! In feite hebben we het dan over 'de hoogte van de straat boven de keldervloer' en die noemen we H_{sk} , toch?

Oh, dus $H_{\text{ks}} = -H_{\text{sk}}$? Heel goed!

Het is belangrijk welk uitgangspunt we nemen. Ik deed dat stiekem al. Ik nam steeds de straat als referentie. Dat houden we vol.

Hoeveel is 'de hoogte van de goot boven de bovenkant van de voordeur'? Dat is 'de hoogte van de goot boven de straat' min 'de hoogte van de deur boven de straat': $5 - 2 = 3$ m.

Dat schrijven we als:

$$H_{\text{gd}} = H_{\text{gs}} - H_{\text{ds}} = 5 - 2 = 3 \text{ m. Dat is toch lekker kort!}$$

Nog even: wat is 'de hoogte van de goot boven de bovenkant van de deur' plus 'de hoogte van de bovenkant van de deur boven de straat'? De hoogte van de goot boven de straat natuurlijk. Dus:

$$H_{\text{gd}} + H_{\text{ds}} = H_{\text{gs}}$$

Wat is 'de hoogte van de bovenkant van de deur boven de keldervloer'?

$$H_{\text{dk}} = H_{\text{ds}} - H_{\text{ks}} = H_{\text{ds}} + H_{\text{sk}} = 2 + 2,5 = 4,5 \text{ m.}$$

Wat is dan 'de hoogte van de goot tov. de bovenkant van de deur' plus 'de bovenkant van de deur tov. de straat' plus 'de hoogte van de straat tov. de keldervloer'? De hoogte van de goot boven de keldervloer natuurlijk. Kijk maar:

$$H_{\text{gd}} + H_{\text{ds}} + H_{\text{sk}} = H_{\text{gk}}$$

Let nu op! Kijk eens goed daar de volgorde van de lettertjes die onderaan de H's hangen:

gd, ds, sk en gk.

Eerst gaan we van 'g naar d', dan van 'd naar s' en van 's naar k' en dat levert rechts van het '='-teken van 'g naar k' op, van de eerste (g) naar de laatste (k). We kunnen ons dat nu nog voorstellen met dat huis, maar we kunnen met de gevonden regels ook afstand nemen van het huis (ons abstraheren van het huis). Wiskundig blijft de regel gelden. Zonder dat we weten waar het over gaat kunnen we opschrijven:

$$H_{12} + H_{23} + H_{34} + H_{45} = H_{15}$$

Het hoeft niet altijd in die volgorde natuurlijk. Hetzelfde anders geschreven:

$$H_{12} + H_{34} + H_{45} + H_{23} = H_{15} \text{ of}$$

$$H_{12} - H_{43} + H_{45} + H_{23} = H_{15} \text{ of}$$

$$-H_{34} + H_{45} + H_{23} = H_{15} - H_{12}$$

Dat is het aardige, we hoeven niet te weten wat het voorstelt en er tòch aan kunnen rekenen.

Nog één keertje terug naar ons huis. Stel dat we weten wat 'de hoogte van de goot boven de bovenkant van de deur ($H_{\text{gd}} = 3$)' is en 'de hoogte van de goot boven de keldervloer ($H_{\text{gk}} = 7,5$)' en

ook nog 'de hoogte van de kelder ($H_{sk} = 2,5$). Hoe hoog is dan de deur (H_{ds})? Om nu zeker te zijn dat we geen fouten maken 'stapelen' we domweg alle hoogten op elkaar:

$$H_{ks} + H_{sd} + H_{dg} = H_{kg}$$

Eerst maar eens de lettertjes onderaan de H's in een volgorde zetten die ons wat zegt:

$$-H_{sk} - H_{ds} - H_{gd} = -H_{gk}$$

Al die '-'tekens... maar eens links en rechts van het '='teken met -1 vermenigvuldigen:

$$H_{sk} + H_{ds} + H_{gd} = H_{gk}$$

H_{ds} willen we uitrekenen, dus:

$$H_{ds} = H_{gk} - H_{sk} - H_{gd} = 7,5 - 2,5 - 3 = 2 \text{ m.}$$

Bent u er nog? Ik geef toe, dit is de meest domme manier om te werk te gaan. Ik wil alleen maar laten zien dat het werkt. In een elektrische schakeling heb je soms geen idee waar het heen gaat en moet je maar domweg beginnen om al rekenende tot een oplossing te komen. We gaan dan in een schakeling (waarvan de aansluitingen genummerd zijn) rond en tellen de spanningen op. Als we rond geweest zijn is de som van de spanningen = 0 (2^e wet van Kirchhoff). We doen dat een keer in figuur 1:

$$U_{01} + U_{12} + U_{23} + U_{30} = 0$$

Je kunt dat anders schrijven:

$$-U_{10} + U_{12} + U_{23} + U_{30} = 0$$

of:

$$U_{10} = U_{12} + U_{23} + U_{30}$$

Je kunt dus vele kanten op werken. Om gericht van de ene regel op de andere te komen, vraagt ervaring. Met de bovenstaande kennis kun je in ieder geval het betoog volgen en de schrijver op fouten betrapen als hij de boel flest.

Succes met de hobby.

73 de PA0SU,

Herbert.

pa0su@amsat.org