Lineaire en a-lineaire dB-schalen — Simon van der Salm

Lineaire dB-schalen

Een kennis van mij, die het grootste deel van zijn werkende leven heeft doorgebracht als geluidstechnicus in de Wisseloord Studio's in Hilversum, merkte kortgeleden op: "Is je weleens opgevallen hoe weinig dB-schalen op analoge elektrotechnische meetinstrumenten lineair zijn?".

Figuur 1 toont een voorbeeld van zo'n betrekkelijk zeldzame analoge meter met een *lineaire* dB-schaal, de HP 400 FL, zoals door professionele geluidstechnici werd gebruikt in het pre-digitale tijdperk. Zo'n vraag geeft natuurlijk aanleiding tot wat onderzoek. Wat meet men ook al weer met dB's? Waar komen die merkwaardige a-lineaire dB-schaalverdelingen, zoals in figuren 2 en 3 vandaan? Waarom hebben zo weinig analoge elektrotechnische meters een lineaire dB-schaal?

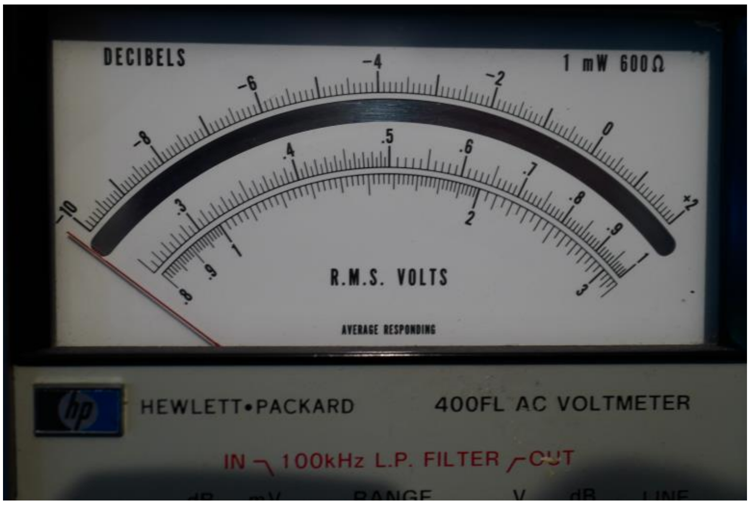

Fig. 1. Een analoge meter met lineaire dBu-schaalverdeling (bovenste schaal). De twee spanningsschalen daaronder tonen de effectieve waarde van sinusspanningen (RMS = Root Mean Square). Die spanningsschalen hebben de logaritmische indeling die we ook van rekenlinialen kennen.
Foto: Gerrit Arends, Amsterdam.

.

Fig. 2. Een analoog meetinstrument met de meest gebruikte – steeds wijder wordende – dBu-schaal in blauw. Merk op: -3 dBu halverwege de schaal, bij verticale stand van de wijzer.
Foto van:
ttp://www.cdvandt.org/magnetophon-restoartion-5.htm

Zo'n lineaire dBu-schaal op een analoge elektrotechnische meter is inderdaad tamelijk zeldzaam. Een zoektocht op internet toont bijna uitsluitend meters met (varianten van) de bekende a-lineaire dBu-schaal zoals in figuur 2 wordt getoond.

Die a-lineaire dBu-schaal wordt vaak logaritmisch (of exponentieel) genoemd, maar is dat beslist niet. Dat is te zien als men bijvoorbeeld de C-schaal van een rekenliniaal vergelijkt met deze schaal. Op de C-schaal worden de afstanden tussen twee opeenvolgende gehele waarden steeds kleiner, naarmate ze verder naar rechts liggen, terwijl op de dBu-schaal van de meter in figuur 2 de afstand tussen twee opeenvolgende gehele waarden naar rechts daarentegen steeds groter wordt. Vergelijk ook de twee zwarte lineaire spanningsschalen in figuur 2 met de twee logaritmische spanningsschalen in figuur 1.

VU-meter

Nog een fraai, nostalgisch voorbeeld van zo'n a-lineaire schaal toont de gestandaardiseerde analoge VU-meter (Volume Unit), ook een dB-meter, die tot in de jaren zeventig veel op audioversterkers voor consumenten werd aangebracht om die apparatuur een professionelere uitstraling te geven. Dat de gemiddelde consument vermoedelijk geen flauw idee had wat die VU-meter nou eigenlijk mat, of hoe die moest worden gebruikt, dat deed niet terzake; versterkers en bandrecorders met een VU-meter waren niettemin een commercieel succes. Zie figuur 3.

Fig. 3. De VU-meter (Volume Unit) zoals in de jaren zestig en zeventig op veel consumenten audioapparatuur voorkwam.
Bij een goed ontworpen VU-meter ligt de waarde -4 dBVU (ook vaak -3 dBVU) precies onder de verticale stand van de wijzer. Deze meter heeft geen dB-aanduiding.

Digitale apparatuur

Ook digitale meetapparatuur kent dB-schalen, alhoewel die niet direct als schalen zichtbaar zijn. Een voorbeeld toont figuur 4, met een foto van de digitale functiegenerator die ikzelf gebruik in mijn hobby elektronica-labje.

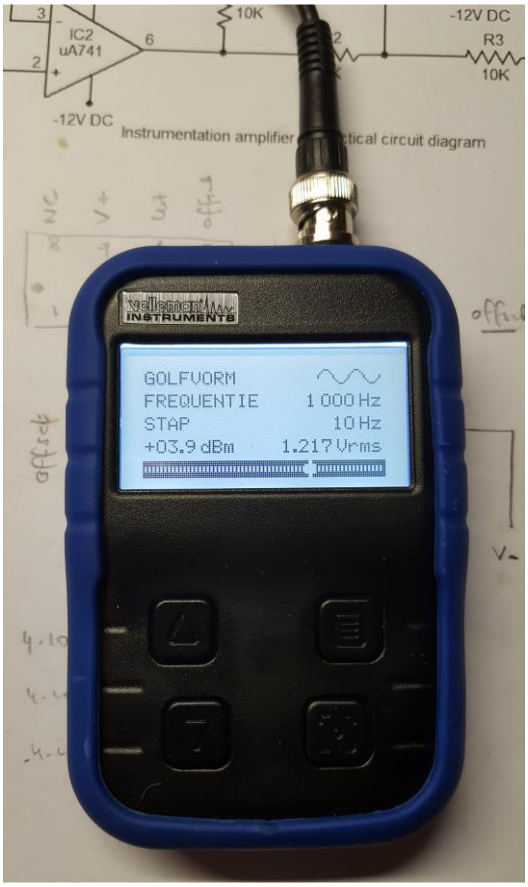

Fig. 4. Effectieve uitgangsspanning van een functiegenerator in dBm (dBu) en Vrms.

Figuur 5 toont het beeldscherm van mijn digitale mini oscilloscoop met twee verschillende dB-niveau-aanduidingen: dBm en dBV.

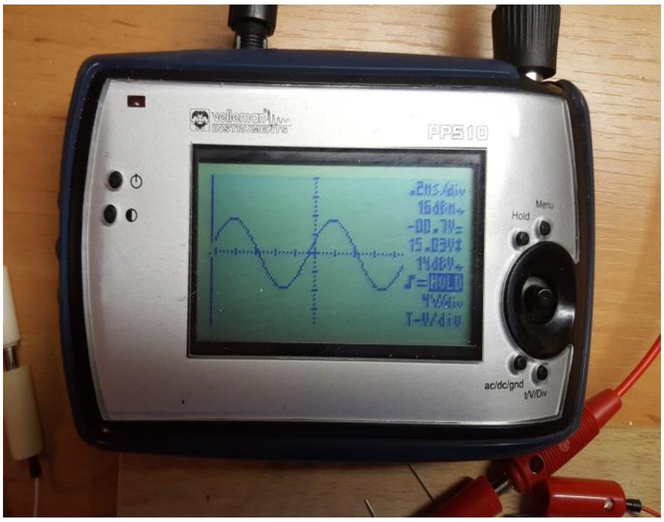

Fig. 5. Spanning in twee verschillende dB's (dBm en dBV met hoofdletter V!) op het scherm van een digitale mini oscilloscoop.

Decibels, decibels en decibels

Wie in de Engelse Wikipedia het lemma *decibel* opzoekt, ziet een lange lijst met verschillende dB's. Iedere dB heeft zijn eigen toepassingsgebied; toch hebben al die dB's de *logaritme* van een verhouding gemeen.

De decibel is een *niveau-aanduiding* (ook wel pseudo-eenheid genoemd) die oorspronkelijk in de telefoontechniek werd gebruikt en daarom is genoemd naar de uitvinder van de telefoon Alexander Graham Bell.

Onder het *Bel-niveau L* (Level) van een *vermogen P*, ten opzichte van een specifiek *referentievermogen* P_{ref}, verstaat men de logaritme van de verhouding van de twee vermogens:

$$L_{P,Bel} = \log\left(\frac{P}{P_{ref}}\right) \ \text{B} \tag{1}$$

Men nam de logaritme van de verhouding omdat (Wet van Weber) de sterkte van een fysiologische indruk veelal lineair toeneemt bij een vermenigvuldiging van de waarde van de fysische grootheid die aanleiding tot de fysiologische indruk geeft.

Omdat 1 B een tamelijk grove niveau-indeling levert, maakt men gebruik van de 10 maal kleinere *decibel*:

$$L_{P,dB} = 10 \cdot \log\left(\frac{P}{P_{ref}}\right) \ \text{dB} \tag{2}$$

In plaats van vermogens kan men de formules (1) en (2) ook gebruiken voor bijvoorbeeld intensiteit of vermogensdichtheid of andere grootheid die recht evenredig met vermogen is. Heel bekend is bijvoorbeeld de dB voor geluidsniveau, waarbij de referentie-intensiteit gelijk is aan 1 pW/m^2, de gemiddelde drempelintensiteit van het menselijk gehoor.

Er zijn dus veel verschillende dB's. De oorzaak ligt in de (door de praktijk ingegeven) keuze van het *referentievermogen*. In de elektriciteitsleer is waarschijnlijk het meest bekend het referentievermogen 1 mW (over een weerstand van 600 Ω), zoals te zien is in de figuren 1 en 2. Men duidt daarbij het niveau *L* van het vermogen ten opzichte van dat referentievermogen aan met dBm:

$$L_{P,dBm} = 10 \cdot \log\left(\frac{P}{10^{-3}}\right) \ \text{dBm} \tag{3}$$

In de klassieke analoge audio- en telefoontechniek heeft men te maken met gestandaardiseerde weerstandswaarden van 600 Ω, vandaar dat op meetinstrumenten voor de elektrotechniek, naast het referentievermogen 1 mW, ook die *referentieweerstand* van 600 Ω wordt vermeld. Zie bijvoorbeeld figuur 1. In de telecommunicatie daarentegen heeft men te maken met de referentieweerstand 75 Ω en definieert men 1 dBm als 1 mW over 75 Ω. Er bestaan dus verschillende definities van de dBm!

Door uit te gaan van een specifieke *referentieweerstand*, zoals de al genoemde R = 600 Ω of 75 Ω, kan men ook het niveau van de effectieve waarde van een spanning (of stroom, of andere veldgrootheid) in dB uitdrukken. Immers:

$$L_{U,dB} = 10 \cdot \log\left(\frac{U^2 / R}{U_{ref}^2 / R} \right) = 20 \cdot \log\left(\frac{U}{U_{ref}} \right) \text{ dB} \tag{4}$$

Aangezien een effectieve spanning (RMS) van $\sqrt{0,6} \approx 0,775$ V een vermogen van 1 mW aan een weerstand van 600 Ω levert, geldt:

$$L_{U,dBm} = 20 \cdot \log\left(\frac{U}{\sqrt{0,6}} \right) \text{ dBm} \tag{5}$$

Die waarde van de referentiespanning 0,775 V over 600 Ω wordt vaak vermeld op het meetinstrument, zoals figuren 1 en 2 tonen. Gezien de verschillende definities van de dBm is dat geen overbodige luxe.

Een 10 maal zo groot vermogen *P* levert een toename van het vermogensniveau *L* met 10 dBm en tevens levert 10 dBm stijging van het spanningsniveau eveneens 10 dBm toename van het vermogens-niveau.

Het merkwaardige van deze gang van zaken is dat de uitdrukking dBm, die eigenlijk voor vermogens is bedoeld, ook wordt gebruikt voor de effectieve waarde van spanningen (en andere veldgrootheden). Figuur 4 laat zien dat dat zelfs het geval is bij moderne digitale meetapparatuur, waarbij de referentie-weerstand van 600 Ω volledig buiten beeld is geraakt. Hier is feitelijk sprake van een derde definitie van dBm.

Men wil kennelijk het niveau van de effectieve waarde van een spanning aan kunnen duiden, ongeacht de specifieke referentieweerstand van 600 Ω. Dat is een nogal verwarrende situatie. Een oplossing wordt geboden door het invoeren van andere notatie. Aanvankelijk gebruikte men wel dBv (v van Volt, maar met een kleine letter geschreven, dBV betekent iets anders), tegenwoordig gebruikt men liever dBu. Dus:

$$L_{U,dBu} = 20 \cdot \log\left(\frac{U}{\sqrt{0,6}} \right) \text{ dBu} \tag{6}$$

onafhankelijk van enige referentieweerstand. Dat de wortel uit 0,6 is afgeleid van het vermogen van 1 mW in 600 Ω hoeft men strikt genomen niet te weten.

Fig. 6. Een VU-meter met decibel-aan-duiding. https://help.uaudio.com/hc/en-us/arti-cles/206020696-The-Mysteries-of-Me-tering-Revealed

Volume Units: VU of dBVU

Ook de VU-meter (zie figuren 3 en 6) is een dB-meter, alhoewel men vaak de aanduiding dB weglaat. In geluidsstudio's spreekt men over bijvoorbeeld 0 VU in plaats van over 0 dBVU. Vergelijk figuur 6 met figuur 3.

De (dB)VU-standaard is rond 1940 in Amerika ontstaan in een poging om de wirwar aan verschillende uitgangsspanningen in audio-apparatuur, onafhankelijk van een referentieweerstand, te reduceren tot één standaard. Men koos voor 0 VU ≡ 4 dBu, oftewel VU = dBu – 4.

Uit:

$$4 = 20 \cdot \log\left(\frac{U_{ref,VU}}{\sqrt{0,6}}\right) \text{ dBu} \tag{7}$$

volgt de referentiespanning van de (dB)VU:

$$U_{ref,VU} = 10^{0,2} \cdot \sqrt{0,6} \approx 1,23 \text{ V} \tag{8}$$

De VU-schaal is dus een verschoven dBu-schaal.

Additief en multiplicatief domein

Om te kunnen begrijpen hoe de a-lineaire dBu-schaal ontstaat, is het onderscheid tussen *multiplicatief* en *additief* domein handig. Denk hierbij bijvoorbeeld aan de C- en D-schaal van een rekenliniaal, of, in dit verband aan spanningsverhoudingsschalen, zoals de bovenste schaal in figuur 7. De rekenkundige bewerkingen die men in een multiplicatief domein verricht, zijn delen, vermenigvuldigen, het bepalen van verhoudingen en machten: dat zijn multiplicatieve bewerkingen. De *logaritmische* indeling van de getallenas is daarbij een voor de hand liggende, maar niet noodzakelijke, schaalverdeling. Zie bijvoorbeeld de bovenste schaal van de Aristo 852 voor telefoontechniek in figuur 7.

De *logaritmen* van de getallen op C- en D- vinden we op de gebruikelijke (komt niet voor in figuur 7) *lineaire* schaal L, waar optellen en aftrekken de dominerende rekenkundige bewerkingen zijn: de L-schaal is een additief domein. Belangrijk is dus zich te realiseren dat de logaritmen zelf op een *lineaire* schaal worden voorgesteld, niet op een logaritmische!

Dat betekent dat ook dB's (immers gedefinieerd als logaritmen) op rekenlinialen langs een *lineaire* schaal staan. Zie de onderste schaal in figuur 7. De (rode!) cijfers van de *logaritmische* D-schaal van de Aristo 852 corresponderen volgens formule (4) met de rode cijfers op de *lineaire* dB-schaal. De zwarte cijfers op de dB-schaal corresponderen met de bovenste logaritmische schaal met spanningsverhoudingen op de voorkant van de liniaal, eveneens volgens formule (4). Bij die schalen is dus geen sprake van een specifieke referentiespanning, maar kijkt men uitsluitend naar een verhouding.

De middelste *logaritmische* mV-schaal op de achterkant van de tong, met maar liefst vijf, iets verschoven decaden (0,775, en niet 1, valt samen met 10 op D), correspondeert, via de referentiespanning van 0,775 V, met de zwarte *lineaire* dB-schaal. De dBu-waarde vinden we door 100 dB af te trekken van de (zwarte) aangewezen dB-waarde. Die waarde van 100 dB ligt voor de hand omdat de grenzen van de vijf decaden de verhouding 1000 mV:0,01 mV = 10^5 vormen, een verschil van 100 dB. En daarmee worden negatieve getallen op de dB-schaal voorkomen.

Dat ook de versterkertechnicus uitgaat van dB's langs een lineaire schaal laat figuur 8 zien, met een kenmerkend voorbeeld uit de elektronica: de frequentiekarakteristiek van een differentiaalversterker. De versterking in dB staat langs een *lineaire* as uit (een additief domein) en frequentie langs een logaritmische as (een multiplicatief domein).

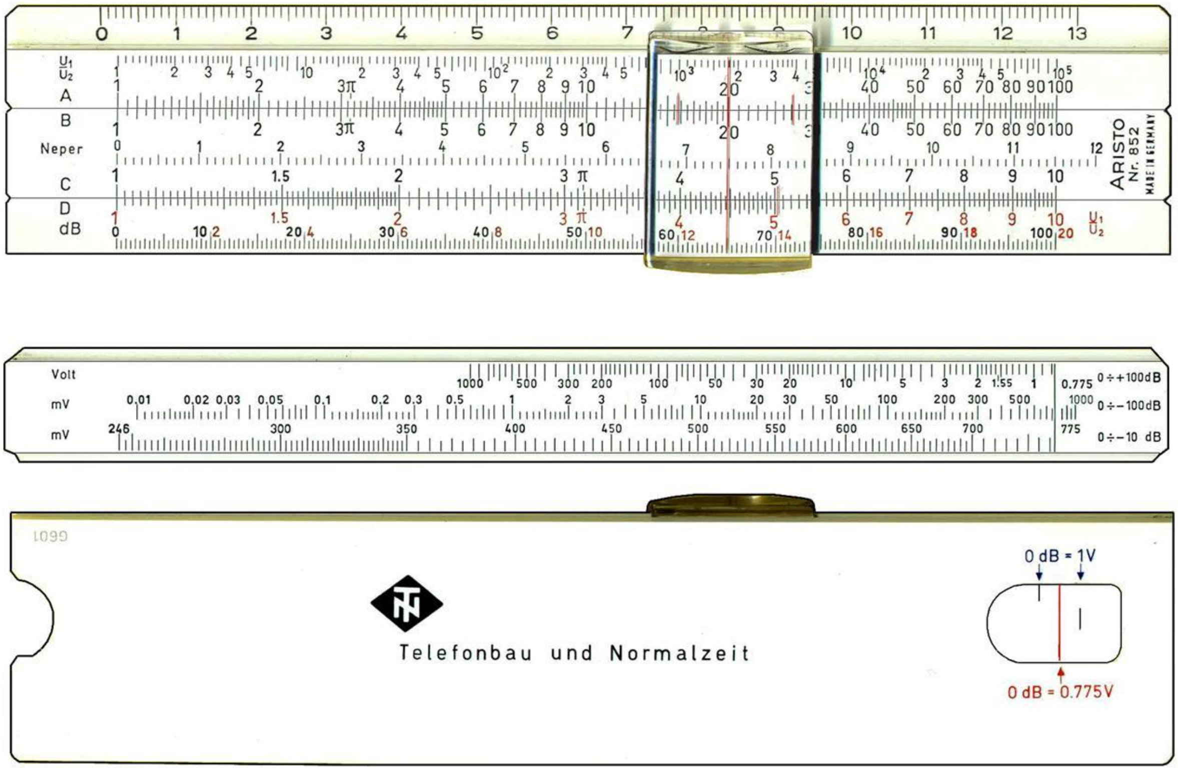

Fig. 7. De Aristo 852 voor de telfoontechniek, met lineaire dB (en ook lineaire Np) schaal.
http://www.sliderulemuseum.com/HSRC/36571.jpg

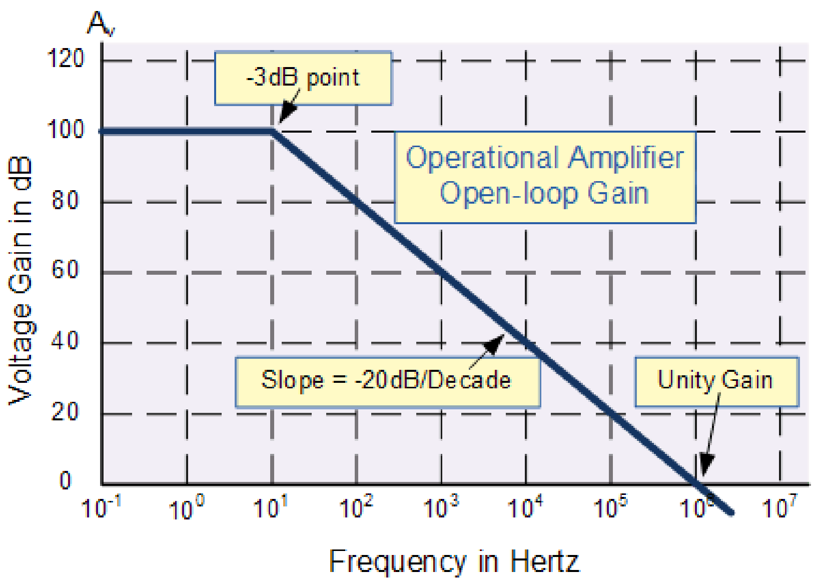

Fig. 8. De typische frequentiegrafiek van een operationele versterker. Merk op dat de frequentie langs een logaritmische as wordt voorgesteld (multiplicatief domein), maar versterking in dB (0 dB = versterking van 1) langs een lineaire as (additief domein). Bron: https://www.electronics-tutorials.ws/opamp/opamp_1.html

Nu doet zich bij de meeste multimeters voor elektrische toepassingen een *dubbelzinnig* fenomeen voor. Elektrische spanning wordt gewoonlijk langs een lineaire schaal voorgesteld, zoals in figuur 2, waardoor het domein van de spanningswaarden dus (impliciet) als een *additief* domein wordt opgevat, terwijl dat domein, in relatie tot dBu's, feitelijk *multiplicatief* is en bij voorkeur zou moeten worden voorgesteld langs een logaritmische schaal.

De elektrotechnische meter in figuur 1 doet dat daadwerkelijk wel. Daar zijn dBu's langs een lineaire schaal uitgezet en spanningswaarden langs een logaritmische schaal, analoog aan de schalen van rekenlinialen. Een (oude) geluidstechnicus vat dus spanningswaarden op als waarden in een *multiplicatief* domein en dBu-waarden in een *additief* domein. Hij redeneert in multiplicatieve rekenkundige bewerkingen op spanningen, zoals: een *vermenigvuldiging* van een spanning met wortel uit 2 is 3 dBu toename; een *deling* door 10 is een afname van 20 dBu, enzovoorts. De geluidstechnicus werkt dus het liefst met een dB-meter zoals in figuur 1 met spanningswaarden langs een logaritmische schaal en dBu's langs een lineaire schaal. Daarom werkte hij ook zo graag met een rekenliniaal!

Maar helaas, die multiplicatieve spanningswaarden staan gewoonlijk langs een lineaire schaalverdeling, zoals in figuur 2, in plaats van langs een logaritmische, zoals in figuur 1. Daardoor ontstaat de typische a-lineaire en niet-logaritmische 1-op-1 relatie tussen dBu-waarden en lineair voorgestelde spanningen, zoals in figuur 2. Feitelijk is er sprake van een lineair meetinstrument dat ook dBu-waarden op een afgeleide schaal kan aanwijzen en niet van een dBu-meter.

En daarmee vinden we ook een mogelijk (nogal prozaïsch) antwoord op de vraag waarom zo weinig lineaire dBu-schalen op elektrotechnische meetinstrumenten voorkomen. Analoge meetinstrumenten maken gebruik van draaispoelmeters (galvanometers) waarvan de wijzeruitslag, na gelijkrichting, via de gemiddelde waarde van de stroom door de meter, recht evenredig is met de effectieve waarde van de spanning en dus niet recht evenredig met het spanningsniveau in dB ten opzichte van een specifieke referentiespanning. Om in analoge meetapparatuur met draaispoelmeter een lineaire dBu-schaal, en dus een logaritmische spanningsschaal, zoals in figuur 1, te verkrijgen was tamelijk veel - en destijds dure – analoge elektronica nodig. De meeste elektrotechnici moesten zich behelpen met de goedkopere a-lineaire dBu-schaal, zoals in figuur 2.

Aanvullende opmerkingen over de Aristo 852

1. De Aristo 852 heeft ook een Neper-schaal (Napier). Het Neper-niveau van een spanningsverhouding is $L_{Np} = \ln\frac{U_1}{U_2}$, van een vermogensverhouding $L_{Np} = \frac{1}{2}\ln\frac{P_1}{P_2}$.

   De Np wordt veel minder gebruikt dan de dB, ondanks het feit dat die niveau-aanduiding veel beter past bij de theorie van de elektrotechniek, waar veel grootheden worden uitgedrukt in het natuurlijk grondgetal *e*.
2. De aanduidingen aan de rechterkant van de schalen op de achterkant van de tong zijn nogal cryptisch. Als we de schalen 1, 2 en 3 nummeren, dan is de middelste schaal 2 te beschouwen als basisschaal. Noemen we de zwarte getallen op de dB-schaal $\mathrm{dB}_{\mathrm{schaal}}$.
3. Voor de spanningen op schaal 2 in mV geldt dan: $dB_{schaal} = 20\log\frac{U(\mathrm{mV})}{775} + 100$. Dus $dB_{schaal} = dBu + 100 \rightarrow dBu = dB_{schaal} - 100$.
4. De schaalverdeling van schaal 3 is een factor 10 groter dan van schaal 2. Er geldt dus: $dB_{schaal} = 200\log\frac{U(\mathrm{mV})}{775} + 100$ waaruit volgt: $dBu = \frac{1}{10}dB_{schaal} - 10$.

5. De spanningen van schaal 1 worden in V gegeven en de getallen nemen van rechts naar links toe, in plaats van, van links naar rechts.

   Er geldt dus: $dB_{schaal} = 20\log\frac{U(\mathrm{V})}{0,775} - 100$, dus $dBu = dB_{schaal} + 100$.
6. Waarom de 0 dB-streep op de onderkant van de liniaal rood, is mij niet duidelijk. De dB-waarden, die met de schalen 1, 2 en 3 te maken hebben, zijn immers zwart.
7. Zoals de onderkant van de liniaal laat zien bestaat er een dB met 1 V als referentiespanning, de dBV (met hoofdletter V). Aangezien $20\log 0,775 \approx -2,21$ dB is dBV = dBu – 2,21. Zetten we het kleine streepje midden in het venster op de spanning op schaal 2, dan kunnen we via de grote streep de corresponderende dBV-waarde aflezen: $dBV = dB_{schaal} - 102,21$.
8. Omdat de bovenste schaal 1 van rechts naar links loopt, staat het bovenste kleine streepje in het venster links van de grote streep. Nu geldt: $dBV = dB_{schaal} + 97,79$