

3 Het ontwerpen van ESL-weergevers

Een elektrostatische weergever besraat in zijn meest elementaire vorm uit:

- de hoogspannings-unit,
- de audiotransformator, en
- één of meerdere ESL-elementen.

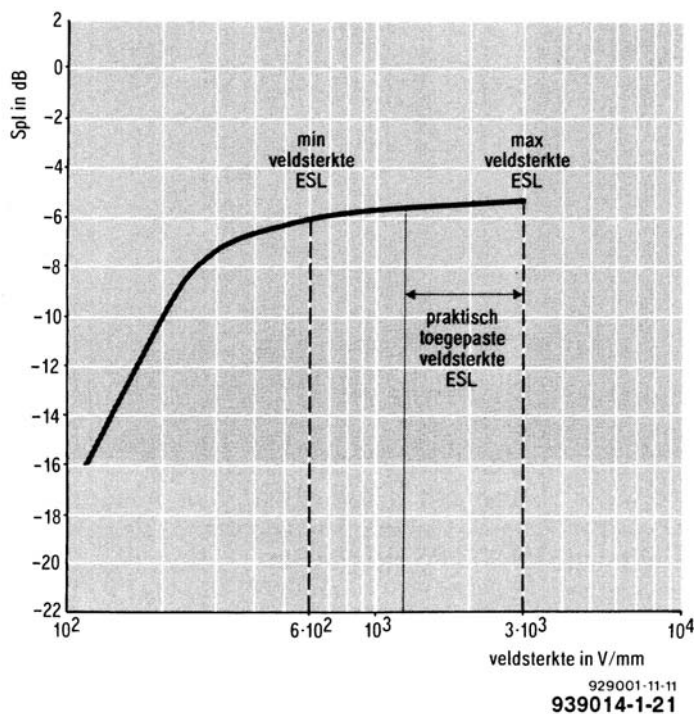
Deze drie systeemelementen en een aantal daarmee samenhangende zaken zullen nu vervolgens behandeld worden.

3.1. Elektrische veldsterkte en rendement

De elektrische veldsterkte E geeft de verhouding aan tussen de op het membraan aangelegde spanning U (AC plus DC!!) en de afstand membraan -stator d , volgens de formule $E = U / d$.

Bij een spanning op her membraan van 6000 V en een afstand van membraan tot stator van 3 mm is E gelijk aan

$6000 : 3 = 2000 \text{ V/mm} = 2 \text{ kV/mm} = 2 \text{ MV/rn}$. Bij gelijke audiospanning tussen membraan en statoren neemt de geluidsdruk van een ESL tot een veldsterkte van circa 340 V/mm toe met 6 dB (een factor twee dus) bij een verdubbeling van de veldsterkte. Zie figuur 3.1. Vanaf een veldsterkte van circa 600 V/mm neemt de geluidsdruk slechts in geringe mate toe voor elke verdubbeling van de veldsterkte.



Figuur 3.1. Het verband tussen het rendement van een elektrostaat en de veldsterkte tussen membraan en statoren.

De veldsterkte kan overigens niet onbeperkt worden opgevoerd. Lucht heeft een doorslagspanning van ca. 3 kV/mm. Boven deze veldsterkte treden ionisatieverschijnselen op en kunnen vonken overslaan van het membraan naar een stator. Dit noemen we het doorslaan van de elektrostaat.

De veldsterkte in een ESL-element is meestal hoger dan de genoemde 600 V/mm. De reden daarvoor is dat bij een hogere veldsterkte de vervorming gering is, en dat de gevoeligheid voor veranderingen van de diëlektrische eigenschappen van lucht ten gevolge van vocht afneemt.

De kracht die op het membraan wordt uitgeoefend, is evenredig met $(U/d)^2$. Met andere woorden: de kracht op het membraan is evenredig met het kwadraat van de veldsterkte. Maken we de veldsterkte dus twee maal zo groot, dan neemt de kracht op het membraan toe met een factor vier. Voor een zo hoog mogelijk rendement moet men dan ook uitgaan van een zo hoog mogelijke veldsterkte. De in de praktijk gebruikte waarden voor de veldsterkte liggen dan ook tussen 1500 en 2500 V/mm.

3.2 Hoogspanning

Voor een ESL-weergever is een hoogspannings-unit nodig, die de hoogspanning kan leveren die tussen het membraan en de statoren wordt aangelegd.

In bijna alle gevallen bestaat deze uit een Cockcroft-Walton-cascadeschakeling, die bestaat uit een cascade van dioden en condensatoren (zie figuur 3.2).

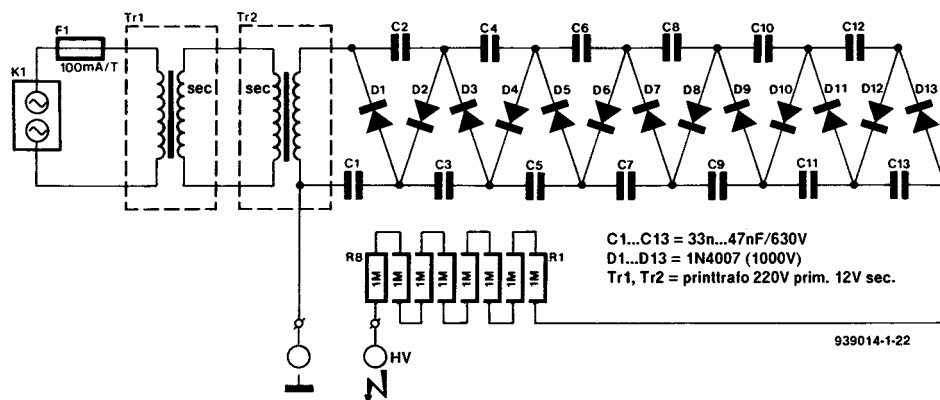
Voor het opwekken van de hoogspanning zijn voor de zelfbouwprojecten in dit boek twee hoogspannings-units ontworpen, met een hoogspanning van 3500 V (unit #1), respectievelijk 7500 V (unit #2), zie figuur 3.3 en 3.4.

Voor het opwekken van een hoogspanning van 3500 V. respectievelijk 7500 V zijn 13, respectievelijk 27 dioden en even veel condensatoren nodig.

Aan de ingang zijn twee printtrafo's achter elkaar geschakeld (via de 12 V-wikkeling met elkaar verbonden), die op deze wijze voor een dubbele galvanische scheiding zorgen tussen het lichtnet en de cascade.

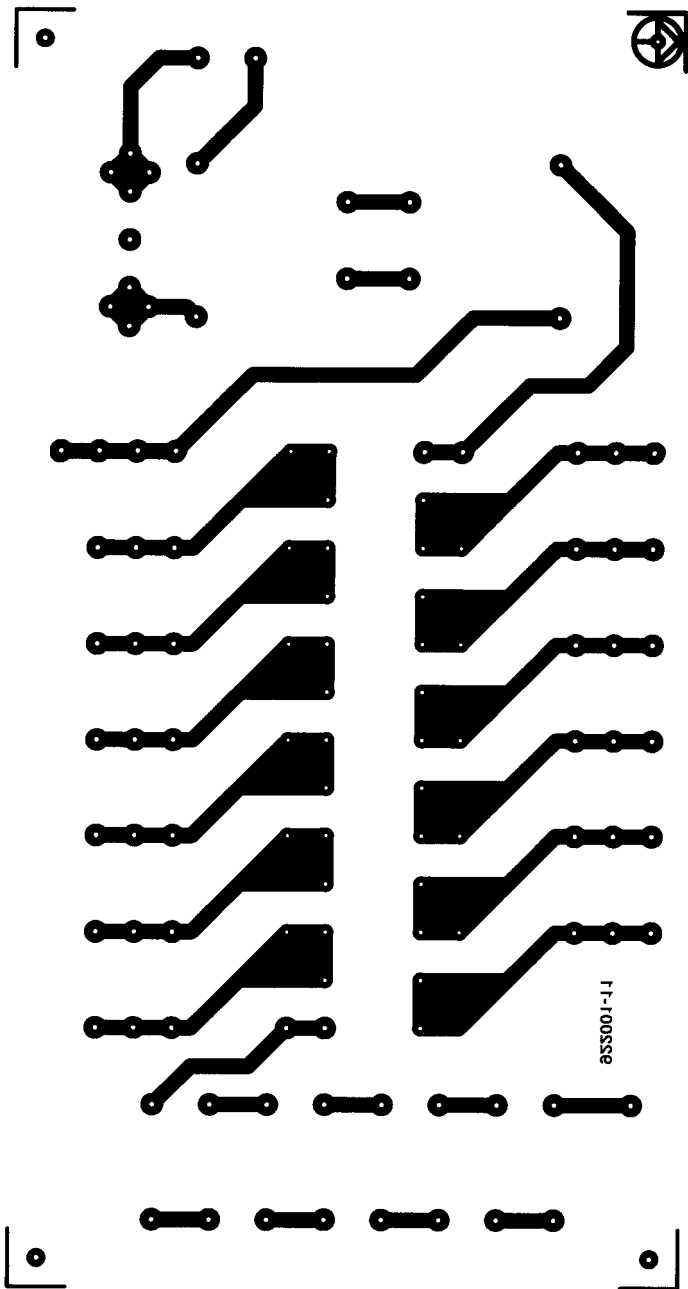
Acht in serie geschakelde weerstanden van 1 MOhm dienen als stroombegrenzing aan de uitgang.

Deze weerstanden dragen tevens bij aan het ontstaan van een constante lading op het ESL-element.



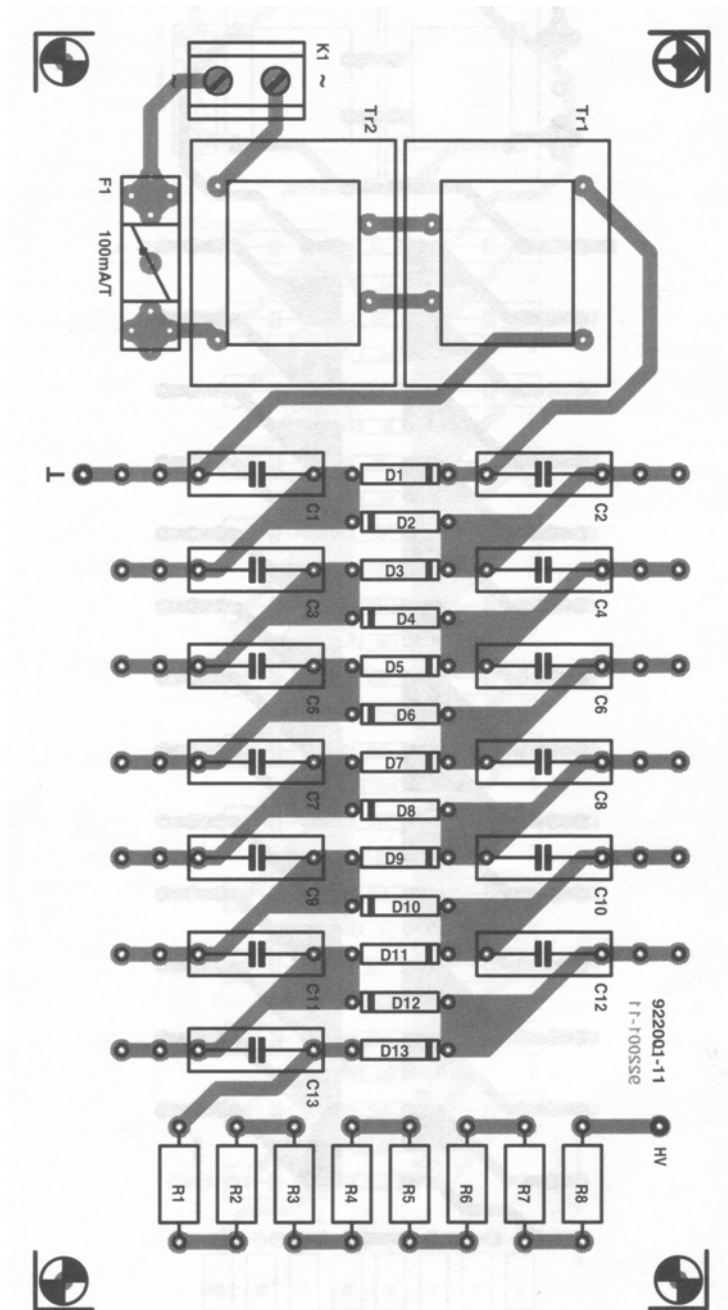
Figuur 3.2. Deze hoogspanningsunit levert ca. 3500 V.

Rectificatie: De diodes zijn op deze tekening in het boekje van E. Fikier verkeerd om getekend. Als men de ESL volgens deze schakeling aansluit zal de ESL prima werken. Echter, de geleidende laag op het membraan zal zeer snel aangetast worden en verdwijnen. Als men echter alle diodes omdraait, dus met een “streepje” bij D13 eindigt, dan zal de polariteit van het membraan de geleidende laag op het membraan niet aantasten.



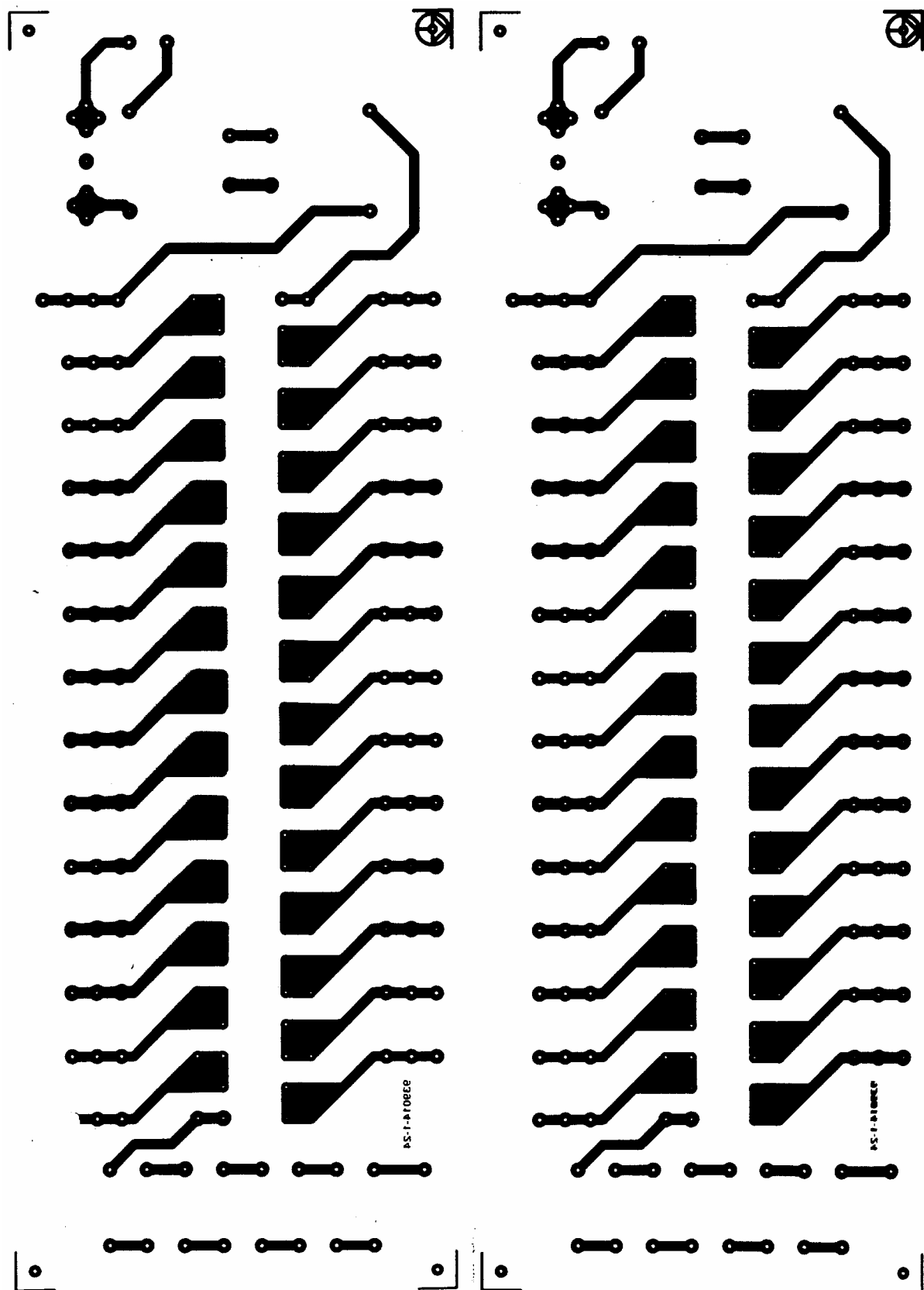
Figuur 3.3. De Print voor de hoogspanningsunit schaal 1:1 van figuur 3.2.

Opmerking. Deze print twee keer uitprinten op transparant overheadsheet materiaal. Vervolgens kun je met die twee vellen over elkaar heen (om voldoende "zwarting" te krijgen) fotografisch een print belichten, ontwikkelen en etsen. De letters moeten goed om leesbaar zijn aan de koperzijde !



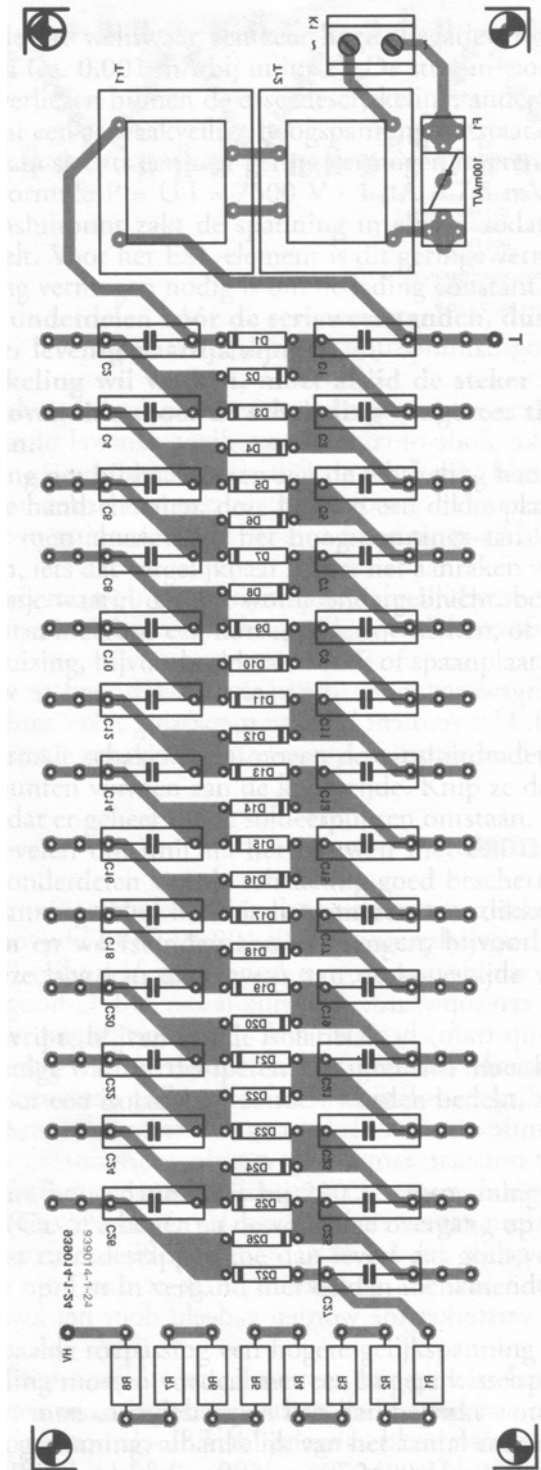
De opstelling van de componenten op de bovenkant van de print.

Rectificatie: Alle diodes staan hier met de streepjes naar de verkeerde zijde getekend !



Figuur 3.4. Deze hoogspanningsunit levert ca. 7500 V. Voor het gemak zijn er hier twee weergegeven, op een A4 printplaat kunnen ze dan in één keer worden gemaakt. *Opmerking. Deze print twee keer uitprinten op transparant overheadsheet materiaal. Vervolgens kun je met die twee vellen over elkaar*

heen (om voldoende “zwarting” te krijgen) fotografisch een print belichten, ontwikkelen en etsen. De letters moeten goed om leesbaar zijn aan de koperzijde !



Figuur 3.5. De print voor de hoogspanningsunit van figuur 3.4. Schaal 1:1,33
De opstelling van de componenten op de bovenkant van de print.

Rectificatie: Alle diodes staan hier met de streepjes naar de verkeerde zijde getekend !

Veiligheid

De cascadeschakeling levert weliswaar een zeer hoge (negatieve) gelijkspanning, maar een zeer geringe stroom (ca. 0,001 mA bij unit #2). De stroom wordt enerzijds beperkt door de grote interne verliezen binnen

de cascadeschakeling, anderzijds door de beveiligingsweerstand, zodat een aanraakveilige hoogspanning ontstaat.

De cascadeschakeling kan slechts een zeer gering vermogen leveren. Voor unit #2 is het vermogen volgens de formule $P = U \cdot I = 7500 \text{ V} \cdot 1 \mu\text{A} = 7,5 \text{ mW}$. Bij aanraking van het hoogspannings-aansluitpunt zakt de spanning in elkaar, zodat men de hoogspanning vaak niet eens voelt. Voor het ESL-element is dit geringe vermogen geen bezwaar, omdat slechts een gering vermogen nodig is om de lading constant te houden.

Het aanraken van die onderdelen v66r die serieweerstanden, dus die dioden en condensatoren, kan echter levensgevaarlijk zijn!!

Als men aan die schakeling wilt werken, moet altijd de stekker uit het stopcontact worden getrokken. Bovendien moet de schakeling ongeveer tien minuten die tijd krijgen om te ontladen

Het verdient aanbeveling om bij het werken aan de schakeling handschoenen te dragen (bijvoorbeeld zuurvaste handschoenen; deze hebben een dikke plastic isolatielaag). Dit om te voorkomen dat men abusievelijk het hoogspannings-aansluitpunt aanraakt en daardoor zou schrikken, iets dat vergelijkbaar is met het aanraken van schrikdraad.

Denk erom dat het kastje waarin de unit wordt ondergebracht, beslist niet geaard mag worden. Het beste kunt u hiervoor een kunststofkastje nemen, of de unit inbouwen in een geheel houten behuizing, bijvoorbeeld van MDF of spaanplaat.

Afwerking

In tegenstelling tot normale schakelingen mogen de aansluitdraden van de componenten geen uitstekende punten vormen aan de koperzijde. Knip ze daarom vrij kort af en gebruik zoveel soldeer dat er geheel ronde soldeerpunten ontstaan.

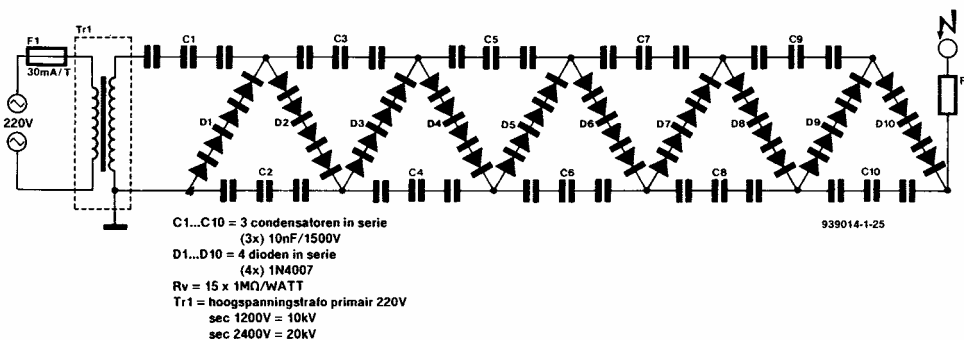
Het is sterk aan te bevelen om de unit na het bouwen met een isolatielak of spray te behandelen, zodat de onderdelen van de schakeling goed beschermd zijn tegen vocht, en u tegen de hoogspanning. Nog beter is het om een zeer dikke isolatielaag over de dioden, condensatoren en weerstanden aan te brengen, bijvoorbeeld een dikke laag polyurethaan-lijm. Deze laag kan dan tevens aan de koperzijde van de print worden aangebracht.

De print trafo's dienen vrij te blijven van de isolatielak.

Deze zullen namelijk enige warmte dissiperen, die uiteraard moet kunnen worden afgevoerd. Als de trafo's door een isolatielaag zouden worden bedekt, zouden deze te warm worden en defect taken.

De maximaal bereikbare hoogspanning is bij 220 V netspanning als voeding voor de cascade circa 7500 V. (Ca. 5% hoger na de volledige overgang op een netspanning van 230 V). Past men meer cascdestappen toe dan levert dat geen verdere verhoging van de hoogspanning meet op. Dit in verband met de dan toenemende verliezen binnen de cascadeschakeling.

Wil men voor een bepaalde toepassing een hogere gelijkspanning dan 7500 V, dan zal men de cascadeschakeling moeten voeden met een hogere wisselspanning; bijvoorbeeld 1000 V of hoger. Het aantal cascdestappen kan dan beperkt worden gehouden, waardoor de bereikbare hoogspanning, afhankelijk van het aantal cascdestappen kan toenemen tot 10.....20 kV. Bij een wisselspanning van 2400 V en zes cascdestappen (dus 6 dioden en 6 condensatoren) is circa 10 kV haalbaar. Verhoogt men bij deze wissel-



Figuur 3.6. Deze hoogspanningsunit levert 10.. .20 kV.

Opmerking: Hier staan de diodes wel goed om getekend.

spanning het aantal cascdestappen naar tien, dan bedraagt de bereikbare hoogspanning circa 20 kV. Elke diode of condensator dient dan wel uit meerdere componenten te bestaan (bijvoorbeeld vier dioden of drie condensatoren in serie geschakeld; hoogohmige bleederweerstand parallel aan de condensatoren zorgen voor een gelijke spanningsverdeling). Dit in verband met de hoge spanning over elke component (zie figuur 3.5).

De ruimte tussen de verschillende componenten op de print dient vergroot te worden tot ongeveer 1 cm, ter voorkoming van spanningsoverslag tussen de verschillende componenten.

Het aantal beveiligingsweerstand dient tevens verhoogd te worden naar 15 (weerstanden 1 M Ω / 1 W). Het verdient bij deze toepassing zeker aanbeveling om de volledige cascadeschakeling in te gieten in epoxy hars of polyester hars.

3.3 Audiotransformator

De versterker kan niet rechtstreeks op het ESL-element worden aangesloten. Deze levert een veel te lage signaalspanning. (Bij 100 W in 8 Ω bijvoorbeeld 28 V effectief.) Voor de ESL is een wisselspanning van honderden volts nodig. (De absoluut maximale wisselspanning heeft een topwaarde die gelijk is aan de DC-hoogspanning.)

De audiotrafo (step-up-trafo) heeft de taak om de uitgangsspanning van de versterker **tot** de benodigde waarde omhoog te transformeren. Dit gebeurt met een bepaalde transformatieverhouding n , ook wel wikkilverhouding genoemd. Een neveneffect daarvan is dat de impedantie aan de ESL-kant van de trafo met een factor n^2 omlaag wordt getransformeerd. Zo ontstaat aanpassing van de voornamelijk capacatieve impedantie van de ESL aan de voor de versterker wenselijke belastingsimpedantie.

Als een ESL-element een capaciteit heeft van 10 nF, dan is zijn impedantie bij een frequentie van 20 kHz gelijk aan $1 : 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C = 796 \Omega$. Bij een frequentie van 50 Hz is de impedantie dan 318,3 k Ω . De audiotrafo zorgt er dan voor dat deze relatief hoge impedanties naar de versterker toe worden gedeeld door het kwadraat van de transformatieverhouding.

Is de transformatieverhouding van een audiotrafo bijvoorbeeld $1 : n = 1 : 50$, dan wordt de impedantie van het ESL-element aan de primaire kant van de trafo gedeeld door 2500. Het in het voorbeeld aangehaalde ESL-element krijgt dan een getransformeerde impedantie bij 20 kHz van $796 : 2500 = 0,32 \Omega$. Bij 50 Hz wordt de getransformeerde impedantie dan $318300 : 2500 = 127 \Omega$.

Nemen we nu een audiotrafo met een transformatieverhouding van $1 : 200$, dan wordt de getransformeerde impedantie bij 20 kHz 0,02 Ω , en bij 50 Hz 7,95 Ω .

Door de zeer lage getransformeerde impedanties bij het toepassen van audiotrafo's bij 20 kHz, is het voor veel versterkers moeilijk om het ESL-element aan te sturen. Bij hogere frequenties lijkt de belastingsimpedantie immers aardig op een kortsluiting.

Om de versterker dan niet te zwaar te belasten is het dan noodzakelijk om de belastingsimpedantie te verhogen, bijvoorbeeld door een weerstand van bijvoorbeeld 1,8 Ω in serie te schakelen met de primaire wikkeling van de audiotrafo.

Een andere mogelijkheid is het toepassen van een LCR-parallel-resonantiekring (zie hoofdstuk 4.10). Een veel gestelde vraag is waarom het ESL-element niet rechtstreeks op de versterker kan worden aangesloten. Afgezien van de noodzakelijke impedantie aanpassing en het galvanisch van de versterker gescheiden aansluiten van de hoogspanning, is dit bij een normale transistor of buizenversterker onmogelijk, omdat een normale versterker niet in staat is om de benodigde hoge stuurspanning te leveren.

Toch is de vraag niet zo gek als ze lijkt. Er zijn namelijk speciale buizenversterkers, die een zeer hoge uitgangsspanning leveren; tot enkele kV. Deze buizenversterkers worden rechtstreeks op de statoren aangesloten, zonder tussenkomst van een audiotrafo (Acoustat, zie hoofdstuk 2).

Aan de hand van het volgende voorbeeld zal duidelijk worden gemaakt waarom een ESL-element aangestuurd moet worden met zeer hoge spanningen.

Een ESL-element vormt feitelijk twee voor DC parallel geschakelde luchtcondensatoren. (Voor AC staan ze 66k parallel, maar ze worden in tegen-fase aangestuurd.) De lading Q op één van de condensatoren is gelijk aan de capaciteit C tussen een stator en het membraan, vermenigvuldigd met de spanning U tussen stator en membraan. Dus:

$$Q = C \cdot U.$$

Omdat de lading op beide condensatoren constant moet worden gehouden voor goede werking van het ESL-element, beschouwen we deze dan ook als constant.

Als we nu de spanning op een condensator veranderen, dan is C de enige factor in de formule $Q = C \cdot U$, die kan veranderen. Dat wil zeggen dat bij een spanningsverandering de capaciteit van de condensator zal veranderen, en wel zodanig dat het product gelijk is aan Q.

De capaciteit van een condensator is evenredig met de plaatoppervlakte en omgekeerd evenredig met de afstand tussen de platen: $C = A / d$.

Om de capaciteit te veranderen zou A groter of kleiner moeten worden, wat natuurlijk onmogelijk is, of d verandert. Als nu één van de platen van deze condensator flexibel kan bewegen (het membraan), dan zal een spanningsverandering aan de stator (een signaal) het membraan evenredig met die spanningsverandering van positie doen veranderen, dus de membraanuitslag is evenredig met de signaalspanning. Dat geldt natuurlijk alleen als de lading constant is.

Als voorbeeld nemen we een ESL-element met een capaciteit van 0,5 nF tussen membraan en stator, waarbij de afstand tussen membraan en stator gelijk is aan 5 mm. Tussen membraan en stator staat 6000 kV, aangesloten via een zeer hoogohmige weerstand. De lading op deze condensator is volgens de formule $Q = C \cdot U$ gelijk aan $1/2 \text{ nF} \cdot 6 \text{ kV} = 3 \text{ } \mu\text{As}$ (1 Coulomb = 1 As). Als nu op een stator een signaalspanning staat van 1 kV (AC), dan is de spanning (AC + DC) gelijk aan $6 \text{ kV} - 1 \text{ kV} = 5 \text{ kV}$. Dus: een C van $3 \text{ } \mu\text{As} : 5 \text{ kV} = 0,6 \text{ nF}$ (Voor de capaciteit tussen membraan en de andere stator geldt via de balanswerking een optelsom AC + DC van $6 \text{ kV} + 1 \text{ kV} = 7 \text{ kV}$. Deze capaciteit verandert van 0,5 nF naar ca. 0,43 nF.)

Met andere woorden: als er op de statoren een signaalspanning wordt aangesloten van 1 kV, dan verandert de capaciteit tussen het membraan en de stator van 0,5 nF naar 0,6 nF. De oppervlakte van de condensatorplaten kan uiteraard niet veranderen, zodat daaruit volgt dat d verandert. De afstand van membraan tot stator verandert dus bij een verhouding AC: DC van 1 : 6 in een verhouding 6/5, respectievelijk 6/7. De verplaatsingen zijn relatief groot ten opzichte van de statische afstand, die zonder AC, dus zonder audiospanning, 5 mm bedraagt. Bij een signaalspanning van +1 kV, respectievelijk -1 kV op de statoren maakt het membraan een uitslag in de grootteorde van 1...2 mm. Dit zijn, gegeven het stralend oppervlak, realistische waarden.

We zien in de ene richting een afstandsverandering van 6/5 (+20%), in de andere richting 6/7 (-14,3%). In het voorbeeld zijn de uitwijkingen dus niet gelijk. De lineariteit verbetert door de verhouding AC: DC kleiner te maken. Dus: $\delta d \ll \delta$, $\delta C \ll C$.

Overigens: in dit voorbeeld is sprake van totaal 2 kV (1 kV + 1 kV) audio wisselspanning. Dat is 33% van de polarisatiegelijkspanning tussen het membraan en de beide statoren.

Zoals we al eerder hebben kunnen zien is de uitslag van het membraan bij een constante lading evenredig met de signaalspanning. Daaruit volgt dat de geproduceerde geluidsdruk van een ESL-weergever bij een gegeven uitgangsspanning van de versterker mede afhankelijk is van de hoogte van de signaalspanning, en daarmee van de transformatieverhouding van de audiotrafo. Volgens de formule $F = U \cdot Q : (d1 + d2)$ (zie hoofdstuk 1) is de kracht op het membraan evenredig met de hoogte van de signaalspanning U. Bij een twee maal zo hoge transformatieverhouding wordt F dan ook twee maal zo hoog (Q en de som van d1 en d2 zijn immers constant). Bij een signaalspanning uit de versterker van 10 V en een transformatieverhouding van 1 : 50 wordt de secundaire trafospanning dan 500 V. Bij een transformatieverhouding van 1 : 150 wordt de secundaire trafo spanning dan 1500 V. Bij het zelfbouwproject ESL 175 stijgt bij het gebruik van hetzelfde ESL-element en bij een hoogspanning van 7,5 kV de geluidsdruk bij 2,83 V op 1 meter van 82 naar 88 dB bij het gebruik van een 1:150-trafo in plaats van een 1 :50-trafo. Dat wil zeggen dat bij een verhoging van de transformatieverhouding met een factor drie het rendement van deze weergever met 6 dB stijgt. Voor het bereiken van een hoog rendement van de ESL-weergever is naast het toepassen van een hoge veldsterkte (E), bijvoorbeeld 2.. 2,5 kV/mm, ook een hoge transformatieverhouding nodig.

Het verhogen van de transformatieverhouding n heeft echter, zoals we hebben gezien, het neveneffect dat de getransformeerde ESL- capaciteit die de versterker ziet, eveneens sterk toeneemt. (Als C de ESL- capaciteit is, dus twee keer de capaciteit tussen membraan en stator, dan ziet de versterker een capaciteit $C \cdot n^2$.) En een weerstand in serie met de primaire wikkeling van de audiotrafo verhoogt het rendement nou ook niet bepaald...

3.4 De audiotrafo

De belangrijkste kenmerken van een audiotrafo zijn het frequentiebereik en de transformatieverhouding. Onder frequentiebereik verstaan we die frequenties waarbij de secundaire spanning van de audiotrafo met een factor $1 : \sqrt{2} = 0,707$ is gedaald; de zogenaamde 3dB-frequenties. De constructie, het gebruikte kernmateriaal en de step-up-ratio bepalen in hoge mate het doorlaatbereik van een audiotrafo. De lage grensfrequentie wordt bepaald door de zelfinducties van de wikkelingen; voor het gedrag bij hoge frequenties spelen spreidingszelfinductie en wikkelcapaciteiten, en eventuele resonanties tussen die twee soorten reactanties, een rol.

Voor het weergeven van het middenhoog is een minimale transformatieverhouding nodig van $1 : 40$; dit in verband met de benodigde stuurspanning en impedantie transformatie. Er zijn audiotrafo's leverbaar die een beperkt frequentiegebied doorlaten, bijvoorbeeld van 500 tot 20 kHz (-3 dB). Het spreekt vanzelf dat deze trafo's alleen kunnen worden ingezet voor het weergeven van het midden en hoog. Er zijn ook full-range audiotrafo's in de handel met een beperkte transformatieverhouding van $1 : 40$ tot $1 : 60$. Deze trafo's kunnen naast het midden en hoog ook ingezet worden voor full-range weergave. Als voorbeeld nemen we de ST 101 audiotrafo van Amplimo. Deze trafo heeft een doorlaatbereik van 10 tot 90 kHz, bij een transformatieverhouding van $1 : 50$ en een maximaal vermogen van 100 VA in 8 Ohm. Deze trafo kan dan zowel voor het midden en hoog als voor full-range weergave worden ingezet. Voor het weergeven van lage frequenties of voor full-range weergave kan men het beste gebruik maken van een audiotrafo met een hogere transformatieverhouding, $1 : 75$ tot $1 : 150$. Dit houdt verband met het feit dat voor het weergeven van lage frequenties grote membraanuit-slagen nodig zijn, waardoor de afstand van membraan tot stator toeneemt. Om een redelijk rendement te houden dient dan de transformatieverhouding evenredig toe te nemen met de toename van d . De meeste audiotrafo's met een hoge n , van $1 : 100$ tot $1 : 200$, hebben in verband met de gebruikte constructie een beperkt doorlaatbereik van 10 Hz tot 10 kHz. Deze trafo's worden dan gebruikt voor de weergave van het laag in een tweeweg ESL of als ESL- subwoofertrafo. Naast trafo's met een beperkt frequentiebereik zijn er ook audiotrafo's in de handel die naast een hoge transformatieverhouding een doorlaatgebied hebben dat vrijwel het hele hoorbare audio spectrum omvat. Als voorbeeld nemen we de audiotrafo 2-0404 van de firma Tranex (VS). Deze trafo heeft een doorlaatbereik van 30 Hz tot 15 kHz (-3 dB) bij een transformatieverhouding van $1 : 150$.

Naast speciale audiotrafo's voor elektrostaten kan in sommige gevallen ook gebruik worden gemaakt van uitgangstransformatoren voor buizenversterkers. De transformatieverhouding dient dan wel minimaal $1 : 40$ te zijn. In een aantal ontwerpen zijn dergelijke trafo's met succes toegepast. (Unitran type 9U14 voor 2 x EL84. Primair: $9 \text{ k}\Omega$ secundair $4 \text{ }\Omega$ $n = \sqrt{(9000 : 4)} \approx 47$.)

De kwaliteit van de trafo dient zeer goed te zijn omdat de kwaliteit van de trafo van grote invloed is op de uiteindelijke weergavekwaliteit van de ESL. Het is in verband met de complexiteit van de audiotrafo dan ook niet aan te bevelen om die zelf te wikkelen. Met recht: te ingewikkeld.