

## MASTER

### Dimensionering, met experimentele en theoretische controle, van een Hoog-Spannings pulsgenerator voor een capacitieve belasting

Chin Kwie Joe, A.J.S.T.

*Award date:*  
1991

[Link to publication](#)

#### **Disclaimer**

This document contains a student thesis (bachelor's or master's), as authored by a student at Eindhoven University of Technology. Student theses are made available in the TU/e repository upon obtaining the required degree. The grade received is not published on the document as presented in the repository. The required complexity or quality of research of student theses may vary by program, and the required minimum study period may vary in duration.

#### **General rights**

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain

FACULTEIT DER ELEKTROTECHNIEK

Vakgroep Elektrische Energiesystemen

**Dimensionering, met experimentele en theoretische  
controle, van een Hoog-Spannings pulsgenerator  
voor een capacatieve belasting.**

A.J.S.T. Chin Kwie Joe

De Faculteit der Elektrotechniek van de  
Technische Universiteit Eindhoven aanvaardt  
geen verantwoordelijkheid voor de inhoud  
van stage- en afstudeerverslagen.

Afstudeerwerk verricht o.l.v.:  
Dr.Ir. E.M. van Veldhuizen  
Prof.Dr. W.R. Rutgers  
Eindhoven, Februari 1991

Afstudeerperiode:  
1990.05.01 - 1991.02.01

## Samenvatting

Door in rookgas streamer corona ontladingen op te wekken en ammoniak toe te voegen kunnen de zuurvormende oxyden in het gas als vaste stof verwijderd worden. Om de ontladingen te maken met zo min mogelijk elektrische energie levert de voedingsbron een gepulste spanning, eventueel bovenop een gelijkspanning. Het effectieve vermogen van de pulsgenerator is te berekenen uit de stroom en de spanning.

De metingen van de stroom en de spanning ( in verschillende gassen) zijn verricht op de plaats waar de pulsgenerator met de testsectie verbonden is. In de testsectie stroomt het gas door een buis en worden de streamer corona ontladingen opgewekt langs een draad die op de as van de testsectie loopt. De metingen gedaan voor verschillende stijgtijden, spanningsmaxima en met een DC-offset zijn erg duidelijk. De pulsgenerator blijkt ook goed instelbaar te zijn bij deze veranderingen.

Uit de metingen blijkt dat de minimale stijgtijd van de spanningspuls uit de pulsgenerator  $\pm 19$  ns bedraagt, maar deze metingen hebben zulke grote oscillaties dat zij niet bruikbaar zijn. Vanaf een stijgtijd van 80 ns zijn de metingen wel goed. Pas bij stijgtijden vanaf 300 ns ( met een stijgweerstand van 2 k $\Omega$ ) is er naast een capaciteieve stroom ook streamer corona zichtbaar bij een spanning van 20 kV en meer. Dit geldt voor verschillende spanningspulsen met en zonder extra gelijkspanning. De metingen blijken nog zoveel variatie te hebben dat er nog geen echte conclusies uit te trekken zijn voor de lading injectie. Dit geldt voor de lading van de capaciteieve en de coronastroom.

Om de pulsgenerator beter te begrijpen is er een theoretisch model van gemaakt voor simulatie op een computer. Dit model omvat ook de belasting van de pulsgenerator, de testsectie. De berekende resultaten komen erg goed overeen met de gemeten waarden. De demping van de berekende stromen is nog wel te klein. Ook is het model veel gevoeliger voor extra parasitaire inductiviteiten.

De resultaten van de ladingsmetingen kunnen verbeterd worden door de streamer corona ontladingen te vergroten. Er zijn ook meer metingen nodig om de parameter afhankelijkheid te bepalen. Om de simulaties te verbeteren zijn er nog wat aanpassingen van het model nodig.

## Voorwoord

15-2-1991

Een goed verstaander heeft maar een half woord nodig. Doch om het lezen te vergemakkelijken zullen de woorden voluit geschreven worden maar het aantal zinnen wordt klein gehouden.

Voor het vinden van de inhoud van dit verslag hebben anderen mij hulp verleend. Deze hulp was onder andere mechanisch ( -technisch), computer technisch en gewoon wetenschappelijk. Toch aardig al die hulp op één etage is te vinden.

Om het zoeken naar de inhoud vlot te laten verlopen waren er allerlei luxe voorzieningen. Enkele daarvan zijn: de aardige mensen, de goede koffie en de lekkere gebakjes.

Het ordenen van de inhoud werd sterk bemoeilijkt door de golfoorlog. Via CNN, met het wonder-medium televisie, zijn vele uren doorgebracht in hete, stoffige woestijnen.

Maar als de geleerden beweren dat het heelal eindig is moet het ook mogelijk zijn dit verslag af te ronden wat heden is geschied.

Abhin Kwie

## Inhoudsopgave

| Hoofdstuk                                  | Pagina |
|--|--------|
| Samenvatting                               | i      |
| Voorwoord                                  | ii     |
| 1: Inleiding                               | 1      |
| 2: De rookgas reiniger                     | 2      |
| 2.1 De totale opstelling                   | 2      |
| 2.2 De chemische reacties                  | 3      |
| 2.3 De meetopstelling                      | 4      |
| 2.4 De testsectie                          | 5      |
| 2.5 De pulsgenerator                       | 6      |
| 2.6 De metingen                            | 8      |
| 2.7 De streamer corona                     | 10     |
| 3: De meetresultaten van lucht en rookgas  | 12     |
| 3.1 Metingen bij verschillende spanningen  | 12     |
| 3.2 Metingen bij verschillende stijgtijden | 15     |
| 3.3 Metingen met een extra DC spanning     | 16     |
| 3.4 Metingen met een extra zelfinductie    | 18     |
| 3.5 De gemeten ladingen                    | 19     |
| 4: De simulatie methoden                   | 22     |
| 5: De simulatie resultaten                 | 25     |
| 6: Conclusies                              | 28     |
| 7: Aanbevelingen                           | 29     |
| <br>                                       |        |
| <b>Bijlagen</b>                            |        |
| Literatuurlijst                            | i      |
| Grafieken                                  | iii    |
| Spice input file                           | xxxii  |

## 1: Inleiding

Om ons milieu te ontzien moet de mens proberen zo weinig mogelijk schadelijke stoffen te produceren. Dit geldt voor alles wat wij doen; van huishoudens tot fabrieken.

Een producent van schadelijke ( hoofdzakelijk gasvormige) stoffen is de kolengestookte electriciteitscentrale. Zij produceert onder andere vlieggas, zwavel- en stikstofverbindingen en grote hoeveelheden kooldioxyden.

De zwavel- en stikstofverbindingen in het rookgas komen uiteindelijk naar de aarde terug als zure regen. Gezien de omvang van dit probleem moet men trachten te voorkomen dat deze verbindingen in het milieu terecht komen. De wet heeft voor de uitstoot al normen vastgesteld, maar deze worden regelmatig zwaarder.

Van de bovengenoemde verbindingen is het zwaveldioxyde uit het gas te verwijderen door het te laten reageren met kalk tot gips. Deze methode wordt al grootschalig toegepast. Men kan de verbindingen ( hoofdzakelijk de stikstofoxyden) ook laten reageren met katalysatoren die na reiniging opnieuw gebruikt worden. Nieuwere methoden maken gebruik van electronen van hoge energie om chemische reacties te activeren.

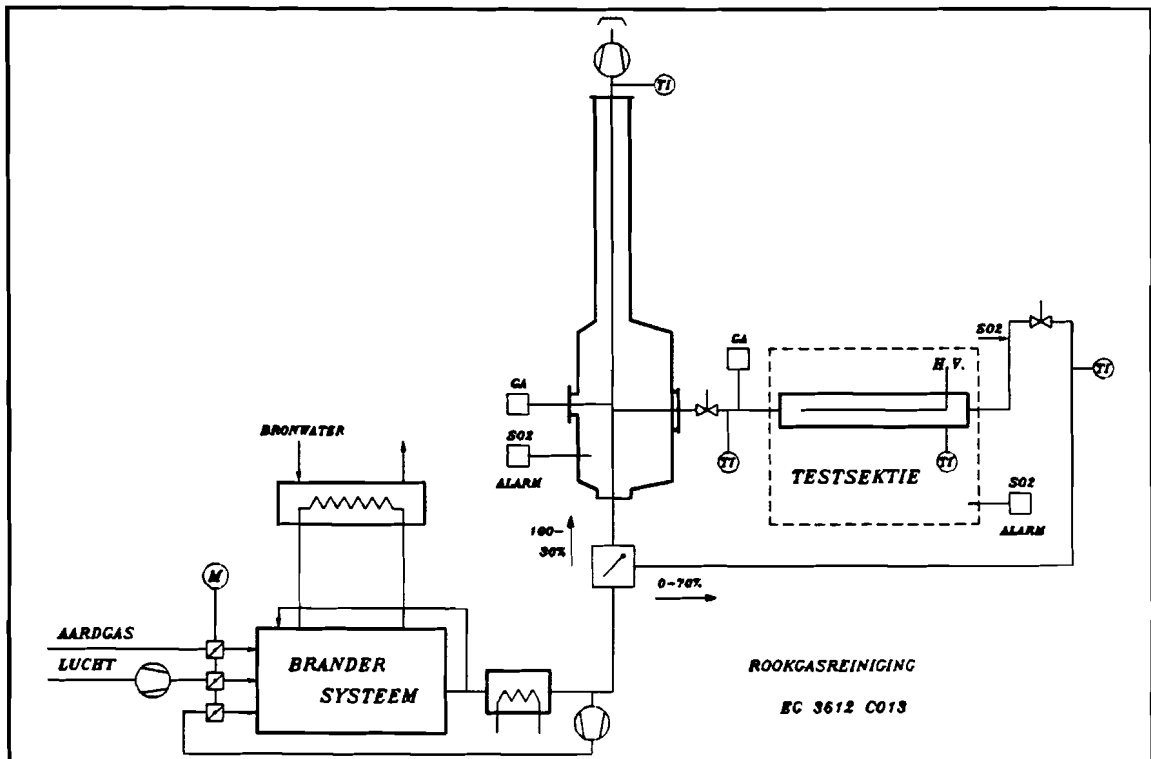
Bij de elektrische methode maken de electronen OH-radicalen ( uit watermoleculen) die op hun beurt met de verbindingen oxyderen. Door toevoeging van ammoniak worden de gevormde zuren geneutraliseerd tot zouten die makkelijk uit het rookgas te filteren zijn.

De moleculen krijgen hun energie door electronen injectie via een externe bron of streamer corona ontladingen in het te reinigen gas. Doel van het hier beschreven werk is het dimensioneren van een voeding die gebruikt wordt om streamer corona ontladingen in rookgas te maken. De voeding is instelbaar voor zijn stijgtijd, zijn spanningsmaximum en zijn DC-offset waarde. Het verslag bevat experimentele metingen en numerieke simulaties van een opstelling bestaande uit de voeding en een capacitieve belasting waarin de streamer corona ontladingen zich ontwikkelen. Een klein deel van dit verslag handelt over de energie die gebruikt wordt voor het opspanning brengen van de opstelling en de energie die in de ontladingen gaat zitten. Deze laatste zorgt voor de chemische reacties.

## 2: De rookgas reiniger

### 2.1 De totale opstelling

De hieronder aangebrachte figuur ( nummer 1) is een schematische weergave van de reinigings installatie.



Figuur 1: De gebruikte rookgas reinigings installatie.

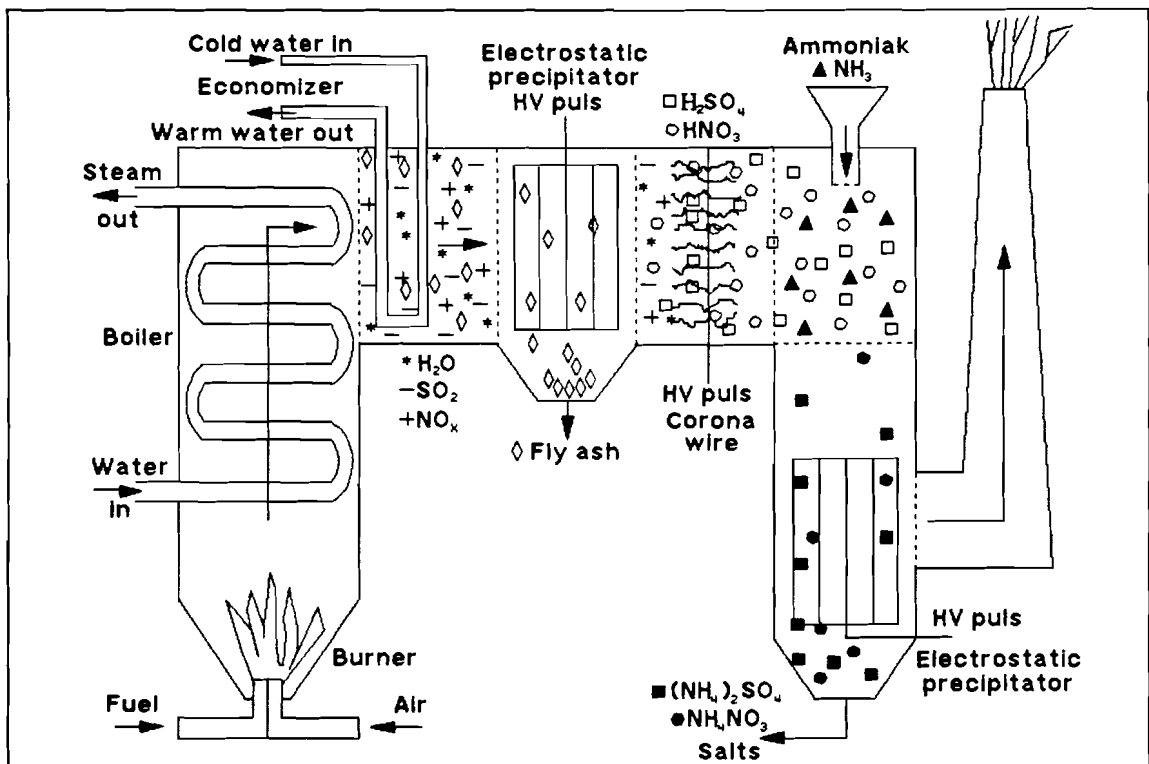
De installatie bestaat uit een brander, een  $\text{SO}_2$  ( zwaveldioxyde) en  $\text{NO}_x$  ( stikstofoxyden; niet getekend) injecteersysteem, een testsectie met een hoogspanningsvoeding ( HV), een schoorsteen, enkele gasalarmen, een massaspectrometer en een rookgasanalysator ( GA).

Met de laatste twee apparaten kan de samenstelling van het gas gemeten worden, voor en na de testsectie. De alarmen dienen voor de veiligheid in verband met het giftige  $\text{SO}_2$ . Door injectie van  $\text{SO}_2$  en  $\text{NO}_x$  is hun aanwezigheid goed te controleren. De brander werkt op aardgas, heeft een verbrandingsgas flow- en temperatuur regelaar en produceert zelf weinig afvalstoffen ( zoals as,  $\text{SO}_2$  en  $\text{NO}_x$ ).

Met deze opstelling kan worden nagegaan hoe goed het rookgas gereinigd wordt en welke elektrische energie daar voor nodig is. Dit verslag handelt hoofdzakelijk over de stromen en spanningen van de voeding, die de elektrische energie voor de testsectie levert. Op grond van referentie 1 en 2 ( in de bijlagen) is er voor een voeding gekozen die hoogspanningspulsen levert waarvan de spanningshoogte en stijgtijd variabel zijn.

## 2.2 De chemische reacties

Het is nog lang niet bekend welke reacties zich allemaal in het gas afspeelen. Ook de reacties met  $\text{SO}_2$  en  $\text{NO}_x$  zijn niet volledig bekend. Figuur 2 laat de reactieproducten zien, afhankelijk van de plaats in een schematisch weergegeven centrale.

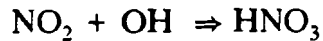


Figuur 2: De reactieproducten en hun vindplaatsen.

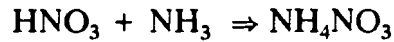
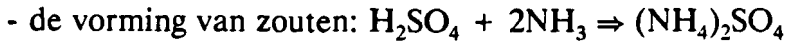
Als uitgangspunt gelden de volgende reacties:

- de streamer corona ontlading; deze levert energierijke electronen ( in een tijdschaal van nanoseconden) met een gemiddelde energie van  $\pm 10$  eV.
- de dissociatie van water:  $e^- + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow e^- + \text{OH} + \text{H}$ . Binnen enkele microseconden worden OH-radicalen gevormd.
- de oxydatie van de componenten:  $\text{SO}_2 + 2\text{OH} \Rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4$





binnen enkele milliseconden. Het resultaat is zwavel- en salpeterzuur.



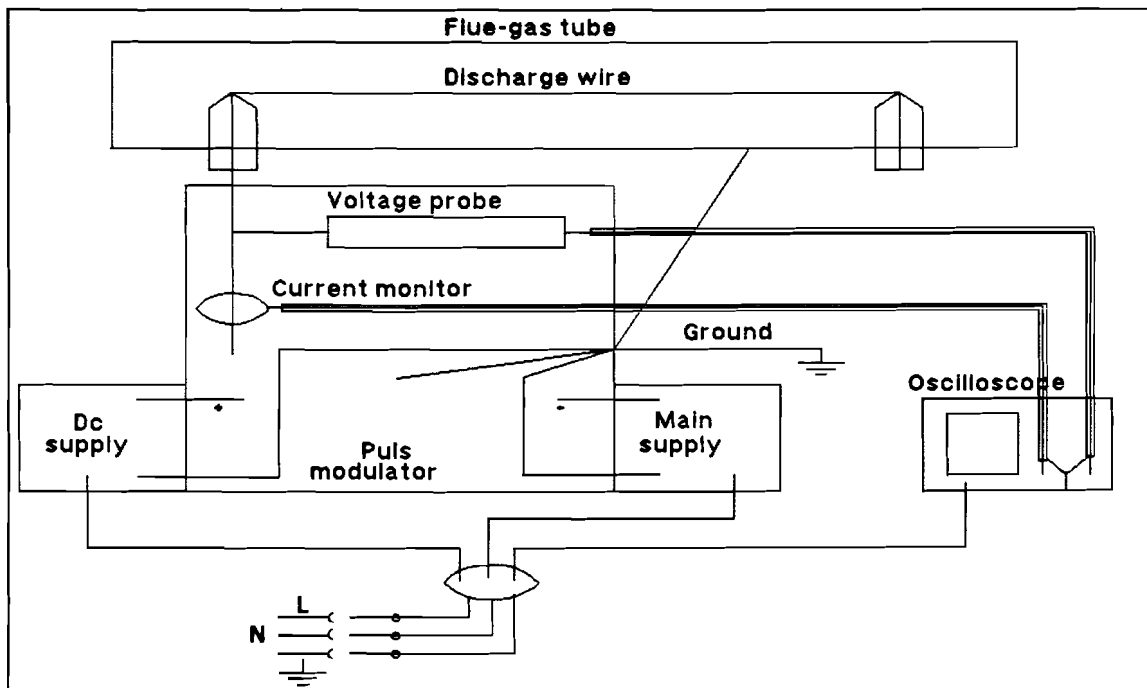
Dit gebeurt binnen enkele seconden.

- en als laatste de verwijdering van de zouten ( vaste stof) door bijvoorbeeld een electrostatische stofvanger ( in enkele seconden).

Dit zijn enkele mogelijke reacties; de reactieproducten blijven wel steeds hetzelfde ( zie ook referentie 3 in de bijlagen).

### 2.3 De meetopstelling

De volgende figuur ( nummer 3) toont de gebruikte meetopstelling voor het meten van de spanningspulsen en de stromen tussen de HS-pulsgenerator en de testsectie.



*Figuur 3: De meetopstelling.*

Om de EM-storing ( via de lucht) te beperken, is om de pulsgenerator een metalen kist geplaatst. De kist is met de aarde verbonden door middel van een litze. De spanning- en stroomprobes zitten in de kist en geven hun signaal via afgeschermd ( met koper litze) coaxkabels ( 50  $\Omega$ ) door aan de oscilloscoop. De coaxkabels en hun afscherming zijn op de oscilloscoop geaard.

De gelijkspanningsvoedingen, de vonkbrug en de testsectie zijn samen op de kist doorverbonden ( het sterpunt). Door deze leidingen lopen de vereffeningstromen. Het sterpunt is via de kist aan aarde verbonden. De gelijkspanningsbronnen en de oscilloscoop worden vanuit hetzelfde spanningspunt ( met aarde) van het openbare net gevoed.

Nu volgt een lijst van de belangrijkste onderdelen:

De voeding:

- Gamma High Voltage Regulated DC Power Supply,
- maximale spanning van 100 kV,
- maximale gelijkstroom van 6 mA.

De spanningsprobe:

- Tektronix, type P6015,
- ingang van 100 M $\Omega$  en 3 pF,
- maximaal 40 kV gepulst en 20 kV DC,
- 1 op 1000 deler,
- minimale stijgtijd van 4 ns.

De stroommonitor:

- Pearson, type 2877,
- frequentie bereik van 300 Hz tot 200 MHz,
- maximaal 100 A,
- minimale stijgtijd van 2 ns,
- gevoeligheid van 1 V/A bij 50  $\Omega$  afsluiting.

Het meetapparaat:

- Tektronix digitizer, type DSA 601,
- ingangsfiler van 300 MHz.

Deze is gekoppeld aan een computer voor het verwerken van de metingen.

De DC-offset voeding:

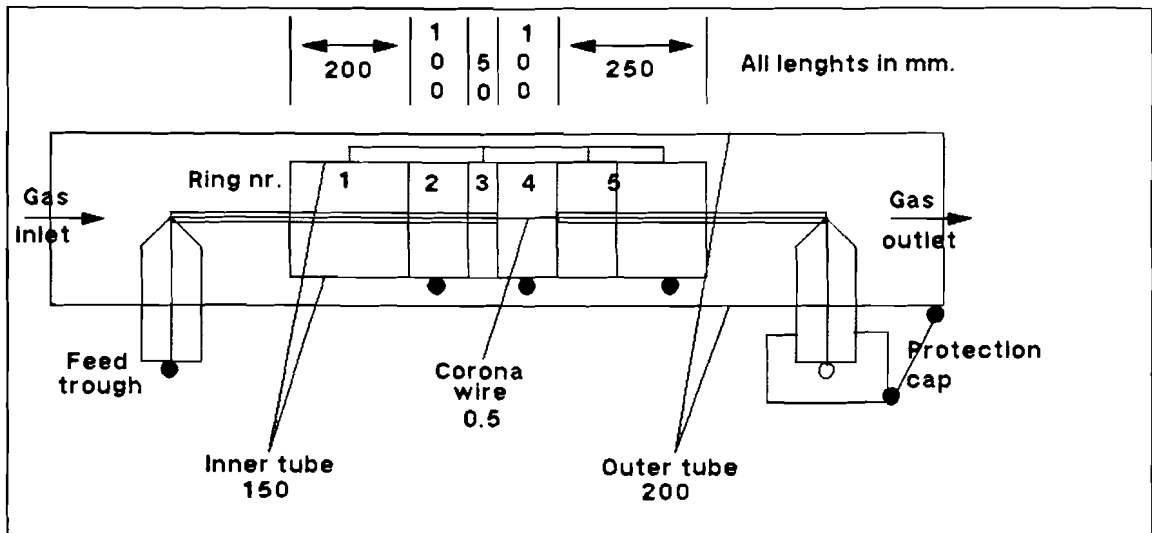
- Kilovolt Corporation, type KV30-5S,
- maximale spanning van 30 kV,
- maximale gelijkstroom van 5 mA.

De onderdelen van de pulsgenerator worden in § 2.5 beschreven.

## 2.4 De testsectie

In figuur 4 ( op pagina 6) is een schematische voorstelling van de testsectie te zien.

Het grootste onderdeel is een roestvrij stalen buis met een diameter van 200 mm.



Figuur 4: De testsectie.

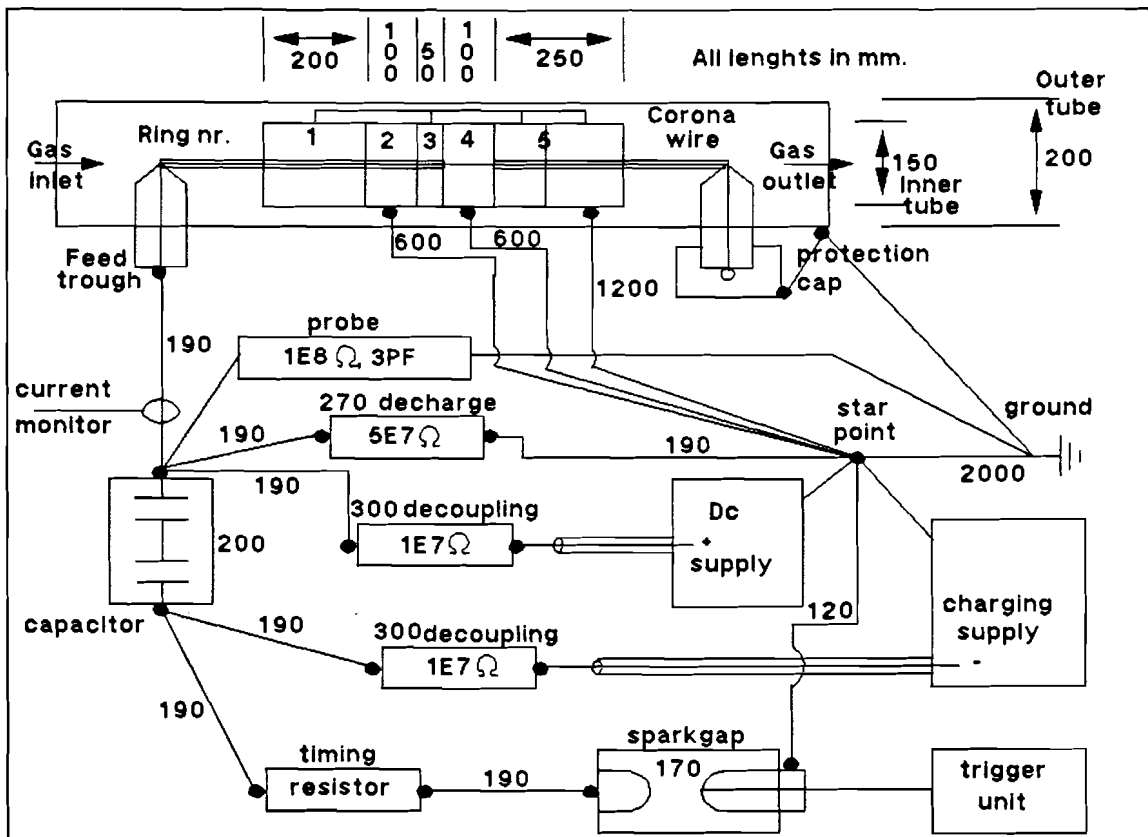
Hier door stroomt het gas. In deze buis zijn vijf geïsoleerde ringen aangebracht. Deze zijn zowel ten opzichte van de wand als van elkaar geïsoleerd. Hun binnendiameter bedraagt 150 mm. Om stroommetingen te verrichten hebben ring nummer 2 en 4 dezelfde configuratie. De andere ringen zijn elektrisch met elkaar doorverbonden. De binnenbuis bestaat nu uit drie elektrische delen. Zij vormen de retourleiding, naar de aarde, van de stroom door de ontladingsdraad.

Door het midden van de buis loopt een stalen draad met een diameter van 0.5 mm. Deze draad ( de ontladingsdraad) komt door de buitenste buis naar het midden via twee teflon isolatoren. De tweede doorvoer dient als steun en om de opstelling karakteristiek af te sluiten. De draad is voor een groot deel geïsoleerd met teflon. Er kan geen stroom naar de aarde ( de ringen) lopen door het teflon maar alleen via ring nummer 4 waar er een blank stuk draad is. Dit is gedaan voor de stroommeting ( zie § 2.6).

## 2.5 De pulsgenerator

Figuur 5 ( op pagina 7) laat alle componenten zien waar de voeding uit bestaat; ook zijn belasting is meegetekend. De pulsgenerator is al eerder gebruikt ( zie referentie 4 in de bijlagen) in een kleinere opstelling, waar het naar tevredenheid heeft gewerkt.

Bij deze pulsgenerator wordt de onderkant van de condensator via de ontkoppelweerstand met een negatieve gelijkspanningsbron gevoed. Omdat de bovenkant van de condensator door een ontladweerstand aan aarde ligt, wordt hij opgeladen als de



Figuur 5: De componenten van de pulsgenerator samen met zijn belasting.

vonkbrug niet geleidt. Als de vonkbrug werkt, verbindt hij de onderkant van de condensator via een stijgweerstand met de aarde. De draad, die aan de bovenkant van de condensator is bevestigd, krijgt nu een positieve puls bovenop de spanning, geleverd door de tweede gelijkspanningsbron.

Met behulp van de stijgweerstand kan de stijgtijd tussen de 20 en 1000 ns worden ingesteld terwijl de daaltijd enkele ms bedraagt. Door aan de bovenkant van de condensator ook een (daal-) weerstand en een vonkbrug naar aarde te plaatsen, kan de pulsduur vastgelegd worden (dit is niet getekend). Dit geschiedt door de tweede vonkbrug op een zeker moment in geleiding te brengen. De condensator wordt dan ontladen met een neergaande flanksnelheid die door de daalweerstand wordt bepaald.

De weerstanden van 10 en 50 M $\Omega$  zijn zelf gemaakt en bestaan uit enkele rijen in serie gesoldeerde weerstanden. Door hun bouw hebben deze weerstanden veel parasitaire capaciteit en inductiviteit, maar dit heeft weinig invloed op de pulsvorm. De reden hiervan is dat zij niet in dat deel van het circuit zitten, welke de hoge snelle stroompuls te verwerken krijgt. Bovenbedoeld circuitdeel bestaat uit de testsectie, de

capaciteit ( met tussen deze twee de spanningsprobe en de stroommonitor), de stijgweerstand, de vonkbrug en de draden naar het sterpunt ( voor de vereffeningsstromen) en de aarde.

Om de parasitaire inductie en capaciteit te beperken zijn alle aansluitingen van de pulsgenerator zo kort mogelijk en van een dikke draad ( 6 mm<sup>2</sup>) gemaakt. Om ongewenst sproeien tegen te gaan zijn alle verbindingen met geleidende bolletjes afgeschermd ( veldverzwakking). De plaats van de componenten wordt zolang veranderd totdat een goed meetsignaal is verkregen.

De stijgweerstand heeft een lage inductiviteit ( 50 nH) om oscillaties en demping te voorkomen. Hij bestaat uit weerstanden van 1 k $\Omega$  van het merk MCB en het type RCEC-250-1k $\Omega$ -10%. Per stuk kunnen zij 12 kV aan. De 2 condensatoren ( in serie) hebben een erg lage zelfinductie ( afhankelijk van zijn lengte) en een waarde van 5 nF (merk CSI, type 40A025). Zij zijn gemaakt voor een spanning tot 40 kV en een frequentie van maximaal 1000 pulsen per seconde.

## 2.6 De metingen

Met de spanningsprobe en de stroom monitor worden de spanning en de stroom gemeten. Dit geschiedt bij de verbinding van de pulsgenerator met de HS-doorvoer op de testsectie. De spanning wordt afgelezen bij de gelijkspanningsbron. Doordat deze meter niet nauwkeurig is, hebben niet alle metingen dezelfde spanning. Door de kleine weerstand van de pulsgenerator en de testsectie ( kleine spanningsval) is de aangelegde spanning bijna gelijk aan de spanningspuls op de draad. Aannemende dat de capaciteit van de buis ongeveer 25 pF ( zie hoofdstuk 6) bedraagt kan men een RC-tijd uitrekenen bij bijvoorbeeld 500  $\Omega$  ( dit is de laagste gebruikte weerstand). De RC-tijd is nu ongeveer 12 ns, zodat het meetsysteem geen belemmering vormt ( zie § 2.3). Ook de stroommeting ondervindt geen hinder van de meetcomponenten.

In de testsectie is de draad plaatselijk door een dun teflon buisje omgeven. Deze isolatie zorgt ervoor dat de streamer corona slechts op een klein deel van de draad kan ontstaan ( bij ring nummer 4 is er 10 cm blanke draad). Door nu de stroom te meten die door deze ring naar aarde stroomt ( capacitieve en streamer corona stroom samen) en het af trekken van de stroom bij ring nummer 2 ( alleen de capacitieve stroom), blijft alleen de streamer corona stroom over. De configuratie van deze beide ringen is gelijk om de capacitieve stroom gelijk te maken. Deze meting bleef echter zoveel ( erg grote) oscillaties behouden dat hij niet erg bruikbaar was.

Alle metingen zijn gedaan in stromend gas. De stroomsnelheid van lucht en rookgas is vastgelegd door een afzuigventilator ( in de schoorsteen) op een constant toerental te laten draaien. Door het stromend gas hebben de metingen minder last van wolken geïoniseerde deeltjes.

Om de invloed van de testsectie te bepalen is er een capaciteit gemaakt van  $\pm 25$  pF ( een stuk coaxkabel) die met de pulsgenerator wordt verbonden. Deze waarde is ongeveer gelijk aan de geometrisch berekende voor de testsectie ( zie § 6). De metingen met deze coaxkabel en die met de complete testsectie vertoonden weinig verschil. De testsectie introduceert dus geen oscillaties in de metingen.

Uit referentie 5 ( in de bijlagen) is voor de waarde van de streamer coronaweerstand 1.5 tot 0.4 k $\Omega$  gemeten ( deze metingen werden gedaan bij een pulsspanning van 15 tot 35 kV en een draad-buis configuratie met diameters van respectievelijk 0.4 en 100 mm bij een lengte van 2 meter). Met de tweede doorvoer ( aan het einde van de ontladingsdraad in de testsectie) kan een weerstand naar aarde worden aangelegd om zo de meting karakteristiek af te sluiten. Dit kan enkele oscillaties voorkomen. De spanningspuls zakt nu wel veel sneller in. Deze metingen zijn daarom niet verder uitgewerkt.

Om te controleren of de stijgweerstand goed is, zijn metingen gedaan met andere weerstanden ( een ander merk). Ook zijn de condensatoren vervangen door een ander merk. De resultaten waren allen hetzelfde, zodat geconcludeerd kan worden dat deze twee componenten zelf niet voor extra oscillaties in de metingen zorgen.

Er zijn ook stroommetingen gedaan over shunts, op verschillende plaatsen in dat deel van het circuit dat de stroompulsen verwerkt. Deze hadden allemaal veel last van de hoge pulsen ( grote EM-storingen) en leverden dan ook resultaten met veel oscillaties. Ook met de stroommonitor op andere plaatsen hebben de metingen iets meer oscillaties maar hoofdzakelijk oscillaties van een grotere amplitude. Deze komen hoogstwaarschijnlijk door het circuit van de pulsgenerator zelf. Bij de doorvoer naar de testsectie is de totale weerstand van de leidingen net zo hoog dat het de amplituden van de oscillaties op een minimum houdt.

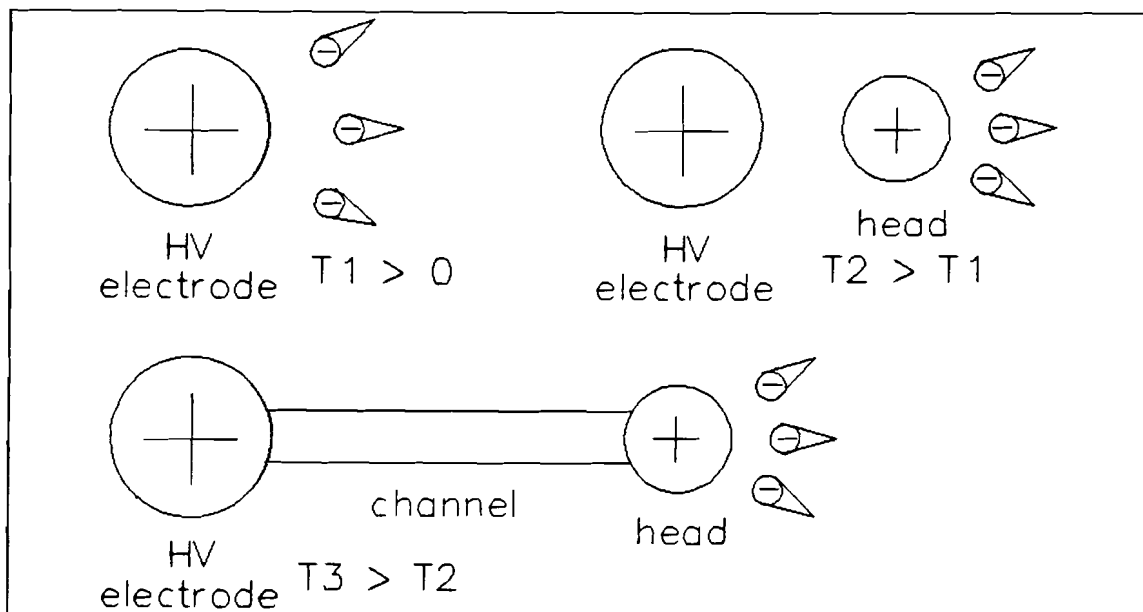
De spanning is ook op andere punten gemeten. Een punt dicht bij de vonkbrug geeft, net als bij de stroom het geval is, meer ( ongewenste) oscillaties in de metingen. Bij metingen aan de onderkant van de condensator is een bijkomend nadeel dat de puls van een negatieve waarde ( de bron) naar nul gaat ( de aarde door-

verbonden via de vonkbrug). Ook zal, bij metingen met een extra DC-waarde op de doorvoer naar de testsectie, de DC spanning niet zichtbaar zijn in de spanningsmetingen.

De metingen met een constante instelling geven een redelijk overeenkomend beeld. De streamer corona ontledingen hebben echter een vrij grote spreiding. Dit komt omdat er voor het ontstaan van een streamer corona een vrij electron nodig is. Dit electron is niet altijd even snel voorhanden. Daarom zijn alle metingen single shot ( het zijn dus geen gemiddelden).

### 2.7 De streamer corona

In figuur 6 staat een model van de hier bedoelde en geproduceerde streamer corona. De streamer corona is een partiële ontleding die ontstaat in een niet homogeen electrisch veld. Het wordt een positieve gepulste streamer corona ontleding genoemd als de positieve electrode het hoogste veld ( om zich) heeft. Door de gepulste voeding ontstaat er een krachtige gepulste streamer corona. De electroden zijn hier de draad ( diameter 0.5 mm) en de binnenbuis ( diameter 150 mm). De draad heeft de spanning van de pulsgenerator en de buis ligt aan aarde.



**Figuur 6: Een positieve streamer corona ontleding.**

De streamer corona ontstaat als er electronen naar de electrode toe worden getrokken. Dit proces wordt lawine genoemd en gebeurt binnen 1 ns ( op T1 in figuur 6) in

een electricch veld dat zo hoog is dat er vermenigvuldiging van het aantal electronen optreedt. Op T2 zijn de eerdere electronen al naar de electrode gegaan, maar daarvoor laten zij een positief geladen wolk achter. De reden hiervoor is dat positieve deeltjes ( hoofdzakelijk ionen) veel langzamer bewegen vanwege hun grotere massa. De wolkjes ontstaan in  $\pm 10$  ns. Door fotoïonizatie worden nieuwe electronen gevormd, die weer tot nieuwe lawines leiden. Hierdoor "verplaatst" de streamer kop zich ( T3) van de draad naar de wand ( in een tijd van  $\pm 100$  ns ) terwijl erachter een streamer kanaal ontstaat.

Van de streamer corona is ook bekend dat de electronendichtheid van het kanaal  $\pm 10^{19} - 10^{20}/\text{m}^3$  en van de kop zo'n  $10^{21}/\text{m}^3$  bedraagt. Het bijbehorende electriche veld is respectievelijk 2.5 kV/cm in het kanaal en 75 - 245 kV/cm vlak voor de kop. Deze laatste waarde is veel groter dan het aangelegde electriche veld met behulp van de pulsgenerator. De energie van de electronen vlak bij de kop bedraagt  $\pm 10$  eV. Een uitgebreidere omschrijving van de streamer corona staat in referentie 6 in de bijlagen.



### 3: De meetresultaten

Er zijn vier verschillende meetseries uitgevoerd. Bij deze series wordt respectievelijk veranderd de spanning, de stijgtijd, het nul-niveau en de inductiviteit van de verbindingen in de pulsgenerator. Het doel van deze metingen is na te gaan hoe de pulsgenerator reageert bij verschillende pulsen of inwendige bouw terwijl hij dezelfde capacatieve belasting voedt.

Uit de stroommetingen is ook de lading van de capacatieve - en de streamer coronastroom te berekenen. Bij de metingen wordt dan gekeken welke instelling van de pulsgenerator de meeste streamer coronalading produceert. Er kan ook gezocht worden naar de beste verhouding van streamer coronalading/capacatieve lading. Dit dient om het elektrische rendement te bepalen.

De metingen met veranderende stijgtijd en spanning zijn gedaan in lucht en rookgas. De metingen in lucht ( serie 1) zijn achter elkaar uitgevoerd binnen een dag. De metingen met rookgas ( serie 2) zijn ook op een dag uitgevoerd. De metingen van de spanningen en stromen bij respectievelijk een extra DC-waarde ( serie 3) en een extra inductiviteit ( serie 4) zijn ook op twee verschillende dagen gemaakt.

#### 3.1 Metingen bij verschillende spanningen

Streamer corona ontladingen ontstaan pas boven een bepaalde elektrische veldsterkte. Dan kunnen de vrije electronen genoeg energie uit het veld krijgen voor vermenigvuldiging en om de streamer corona te laten ontstaan. De minimale elektrische veldsterkte is in referentie 6 ( in de bijlagen) gegeven en bedraagt ongeveer 75 kV/cm vlak bij de draad ( de gemiddelde veldsterkte is dan nog onder de 10 kV/cm).

De grafieken 1, 2, 3 en 4 ( in de bijlagen) tonen de stroom en de spanning, gemeten in lucht ( dunne lijn ) en rookgas ( de vetgedrukte lijn) bij de spanningspulsen van respectievelijk 10, 20, 30 en 40 kV en een weerstand van 4 k $\Omega$ . De stijgtijd van de spanningspuls bedraagt nu ongeveer 600 ns.

Bij verhoging van de spanning kan de streamer corona ontsteekspanning al bereikt zijn voordat de spanning de maximale waarde heeft. Nu kan de streamer corona al ontstaan tijdens de opgaande flank van de spanning. Dit is ook het geval als de spanning langzaam stijgt ( zie de volgende paragraaf). De beginspanning moet zodanig

hoog zijn dat het elektrisch veld om de draad heen een waarde van  $\pm 75$  kV/cm haalt; dit geschiedt bij een voedingsspanning van 18 kV en meer.

Grafiek 1 laat alleen de metingen in rookgas zien omdat die van lucht per ongeluk gewist zijn. Bij deze spanning ( 10 kV) is nog geen streamer corona te maken. De stroompiek bestaat alleen uit de capacitieve stroom. Zijn flank valt samen met die van de spanning en de stroom wordt weer nul als de spanning zijn maximum heeft bereikt ( dit komt doordat  $I = C * \frac{dU}{dT}$  ). Het lijkt dus dat de capaciteit constant is. De spanning is net onder de 10 kV vanwege de spanningsval in de verbindingen en de onnauwkeurigheid bij het instellen van de voedingsspanning.

In grafiek 2 zijn de metingen van lucht ( dun) en rookgas ( dik) bij elkaar gezet. Opvallend is het tweede stroompiekje dat beide metingen vertonen. Dit is de streamer corona stroom. De lading van dit piekje komt uit de condensator zodat op hetzelfde moment een dip in de spanning valt waar te nemen (  $I = C * \frac{dU}{dT}$  ).

De vormen van de stroompieken komen goed overeen ( ook de oscillaties zijn gelijk). De streamer corona komt niet op een vast moment maar tussen de 500 en 3000 ns na de start van de HS-puls. In de stroommetingen met lucht en rookgas zitten nog oscillaties. Deze oscillaties versterken het maximum van de capacitieve stroom bij de metingen gedaan in lucht van serie 1. Bij serie 2 ( in rookgas) verzwakken deze oscillaties juist het maximum van de capacitieve stroom. Bij de zichtbare streamer corona lijkt het maximum in lucht ook iets groter dan in het rookgas wat ook het gevolg kan zijn van de oscillaties. De frequentie van de oscillaties in de capacitieve en de streamer corona piek zijn wel gelijk.

Bij sommige stroomcurven ( zoals bij grafiek 2 de meting in lucht) is in het begin een opstapje te zien. Dit komt door onregelmatigheden in de vonkbrug en zijn triggering.

Voordat er streamer corona ontstaat, zijn er al heel wat ionisatie-processen om de draad door het aanwezige hoge elektrisch veld. Deze ionisatie begint ongeveer bij 24 kV/cm. De ionisatie-processen kunnen er voor zorgen dat de geleidbaarheid van het gas plaatselijk toeneemt en daardoor loopt er meer stroom.

De samenstelling van lucht en rookgas verschillen hoofdzakelijk in de hoeveelheid van kooldioxyde, zuurstof en waterdamp. Van de laatste twee is in lucht de hoeveelheid respectievelijk hoger en lager dan in rookgas. Bij spanningen tot  $\pm 30$  kV is de ionisatie van zuurstof het belangrijkste. Boven de 30 kV ( tot ongeveer 80 kV) zijn de

ionisatie-processen van de waterdamp dominant. Hierdoor kan het komen dat het stroom-maxima in lucht en rookgas niet hetzelfde zijn. Deze processen staan uitgebreid beschreven in referentie 7 ( in de bijlagen).

De spanningen van beide metingen hebben dezelfde vorm. De dip ten gevolge van de streamer corona stroom ligt op een andere plaats doordat de streamer corona stromen op verschillende tijdstippen ontstaan. De streamer corona is namelijk een random proces en de variatie in het begintijdstip neemt toe als de spanning dichterbij de ontsteekspanning van de streamer corona ( hier is dat 18 kV) komt.

Nadere vergelijking van de metingen geschiedt in § 3.5, waar onder andere wordt ingegaan op de ladingen van de capacitieve en de streamer corona stroom.

De metingen gedaan bij 30 kV ( grafiek 3 in de bijlagen) vertonen hetzelfde beeld als die van grafiek 2 ( zie de bijlagen). De streamer corona ontladingen beginnen nu al tijdens de opgaande flank van de spanning. Zij zijn ten opzichte van het maximum veel groter en er komen meerdere na elkaar. Dit geeft ook meerdere dips in de spanning. Vreemd genoeg lijkt de lading van enkele streamer corona ontladingen negatief. Hoogstwaarschijnlijk komt dat door oscillaties van de pulsgenerator. De spreiding in het tijdstip van optreden van de streamer corona ontladingen is minder groot. Binnen 2  $\mu$ s na de start van de HS-puls zijn alle streamer corona ontladingen te zien en vaak beginnen zij op hetzelfde tijdstip.

Het verschil in topwaarde van de spanning is het gevolg van een andere afstelling van de gelijkspanningsbron ( de spanningsmeter op de bron is niet nauwkeurig af te lezen). De voeding had dus een iets lagere spanning. Dit kan ook een klein verschil in de topwaarde van de stroom geven. De stijg- en daaltijden van de metingen komen wel goed overeen. Dit betekent dat de diëlectrische constante van de gassen in de testsectie niet veel verschillen.

Grafiek 4 toont de metingen bij 40 kV. Door de grote oscillaties zijn de verschillende stromen moeilijk te onderscheiden. Of de oscillaties van het meetsysteem of de puls-generator komen, is niet onderzocht. Het kan ook dat de storingen het gevolg zijn van corona ontladingen in het circuit aan de andere kant van de condensator. Deze corona kan ontstaan tussen de geleidende delen en de aarde ( van de kist). Aangezien de corona aan dezelfde voorwaarden moet voldoen als die in de buis kan hij op hetzelfde moment ontstaan. De gemeten stromen en spanningen komen verder wel goed overeen. Ook het maximum van de stroom is haast gelijk.

De maximale stroomwaarden van de metingen zijn bij een hoger aangelegde spanning groter, terwijl het circuit en de RC-tijd niet veranderen. Aangezien  $I = C \cdot \frac{dU}{dt}$  moet de stroompiek ook groter zijn zonder dat de pulsduur van de capacitieve stroom verandert ( deze is alleen afhankelijk van de RC-tijd). De pulsduur van de verschillende metingen liggen ook dicht bij elkaar ( rond de 1300 ns).

Uit de formule blijkt dat de stroom evenredig moet toenemen met de spanning. De gemeten maximale stroompieken zijn respectievelijk: 1.5, 3, 4 en 5 A. Dit komt redelijk overeen met de spanningen die 10, 20, 30 en 40 kV zijn.

Het verschil tussen de metingen in lucht en rookgas is erg klein. De enige verandering is het vervangen van lucht door rookgas dat andere elektrische eigenschappen heeft. De verschillen zijn echter klein omdat de RC-tijden van de metingen nauwelijks verschillen. Al deze resultaten laten zien dat de capaciteit van de opstelling constant is.

### 3.2 Metingen bij verschillende stijgtijden

Om een goed rendement uit de reiniger te halen, moet ook gekeken worden hoe snel de puls moet stijgen. De stijgtijd wordt gevarieerd met de stijgweerstand. De waarden van de voorschakel weerstanden zijn: 0, 0.5, 2 en 4 k $\Omega$  en de metingen staan in de bijlagen als grafiek 5 tot en met 8. Alle metingen van deze serie zijn gedaan bij 20 kV in lucht ( dun) en in rookgas ( dik).

Als er nauwelijks demping in het circuit zit ( geen extra weerstand), zijn de oscillaties die gemeten worden erg groot ( door tijdgebrek is dit probleem niet opgelost). Zie hiervoor grafiek 5 in de bijlagen. De stroommeting geeft nu geen goede informatie. Deze metingen zijn daarom niet meer uitgevoerd ( daardoor is alleen de meting in lucht te zien). Wel is duidelijk dat de frequentie van de gemeten oscillaties in de stroom en spanning goed overeenkomen. De stijgtijd ( de tijd waarin de spanning van 10 naar 90% van zijn maximale waarde gaat) van deze meting ligt rond de 15 ns bij een flanksnelheid van 990 V/ns.

Bij een flanksnelheid van 280 V/ns ( gemaakt met een stijgweerstand van 0.5 k $\Omega$ ) en een stijgtijd van 80 ns, zijn de grote ongedempte oscillaties verdwenen zoals in grafiek 6 is te zien ( waarom de stromen hier niet op nul beginnen en uitkomen is niet bekend). Na de stroompiek zijn er nog kleine oscillaties in stroom en spanning. Hoewel 20 kV voldoende moet zijn om streamer corona ontladingen te laten ontstaan, is het

in deze grafieken niet zichtbaar.

Het verschil tussen de meting in lucht en rookgas is erg klein. De maxima van de stromen vallen samen, terwijl die van de spanningen verschillen doordat de bron verschillend is ingesteld. De oscillaties lijken dezelfde frequenties te hebben terwijl de stijgtijden goed overeenkomen.

Met een stijgweerstand van  $2 \text{ k}\Omega$  daalt de flanksnelheid tot  $120 \text{ V/ns}$  en komt de stijgtijd rond de  $300 \text{ ns}$ . Er is streamer corona zichtbaar ( zie grafiek 7 in de bijlagen). De stroompieken in lucht ( dun) zijn hoger dan die in rookgas ( dik), terwijl de stijgen- en afvaltijden van de metingen haast gelijk zijn. Het verschil in de maxima kan een gevolg zijn van de oscillaties in de metingen. Deze oscillaties lijken wel van dezelfde frequentie. De zichtbare streamer corona ontlading in rookgas is kleiner dan die van de lucht ( dit kan het gevolg zijn van andere elektrische eigenschappen van het rookgas ten opzichte van lucht).

Door de langzame stijgtijd van de spanning, bereikt het elektrisch veld al een waarde groot genoeg voor het maken van streamer corona ontladingen, voordat de maximale spanning is gehaald. Hierdoor kan de streamer corona al ontstaan voordat de spanning zijn maximum heeft bereikt.

De metingen met de langzaamste stijgtijd (  $600 \text{ ns}$  bij  $60 \text{ V/ns}$  en met weerstand van  $4 \text{ k}\Omega$ ) kunnen op dezelfde manier beschreven worden als die bij een weerstand van  $2 \text{ k}\Omega$  ( grafiek 8 in de bijlagen).

Met de verschillende weerstanden zijn de maximale  $\frac{dU}{dT}$  respectievelijk:  $990, 280, 120$  en  $60 \text{ V/ns}$ . De stijgtijden ( het 10 naar 90% punt) zijn respectievelijk:  $15, 80, 300$  en  $600 \text{ ns}$ . Deze tijden zijn evenredig met de RC-tijd van het circuit. De stijgweerstand is hier respectievelijk:  $0, 0.5, 2$  en  $4 \text{ k}\Omega$ . De evenredigheid is hier redelijk terug te vinden. Ook in de pulsduur moet dezelfde evenredigheid aan te treffen zijn. De capacitieve stromen hebben een pulsduur van respectievelijk  $300$  ( dit is de uitdempingstijd van de oscillatie),  $220, 780$  en  $1500 \text{ ns}$ . Weer is de evenredigheid terug te vinden. De capaciteit van de testsectie is dus constant.

### 3.3 Metingen met extra DC spanning

Deze metingen zijn gedaan in lucht bij een spanningspuls van  $20 \text{ kV}$ , een stijgweerstand van  $2 \text{ k}\Omega$  en een extra gelijkspanning van  $0$  tot en met  $15 \text{ kV}$ , in stappen van

2.5 kV. De totale spanningshoogte varieert dus van 20 tot en met 35 kV. De maximale DC-waarde ligt onder de ontsteekspanning van de corona.

Grafiek 9 in de bijlagen is een vergelijkende meting. Samen getekend zijn de meting in lucht (dun) uit de vorige paragraaf (20 kV en 2 k $\Omega$ ) tegen een nieuwe meting (dik) met een extra gelijkspanningsvoeding die op 0 is ingesteld (bij 20 kV en 2 k $\Omega$ ). Opnieuw valt te zien dat de instelling van de spanning bij de voeding niet nauwkeurig is. De nieuwe meting heeft namelijk een lager spanningsmaximum. Dit zorgt er voor dat de maximale stroompiek iets lager wordt. Ook de atmosferische omstandigheden (temperatuur, vochtigheid) hebben invloed op de capacitieve en de streamer coronastroom doordat zij de ionisatie processen beïnvloeden. De oscillaties kunnen het maximum van de stroompieken versterken of verzwakken hetgeen tot hogere of lagere pieken leidt. De vorm van de stroompulsen komen wel goed overeen.

De grafieken 10 tot en met 15 (in de bijlagen) hebben een extra gelijkspanning van 2.5 tot en met 15 kV in stappen van 2.5 kV. Alle grafieken van deze serie zijn samen getekend met die waarbij de extra gelijkspanning op de testsectie 0 volt bedraagt (uit grafiek 9).

De herhalingsfrequentie van de pulsen is ongeveer 1 Hz. Bij de langzaamste stijgtijd is de spanning na een 100-tal ms weer tot de DC-waarde gedaald. De meeste tijd staat dus gewoon de DC-waarde op de draad in de testsectie.

In de grafieken van deze serie is te zien dat de capacitieve stroom niet veranderd. Dit komt doordat de capacitieve stroom alleen afhankelijk is van de spanningsverandering. De spanningscurve verandert ook niet (in stijgtijd) maar verschuift met het niveau van de gelijkspanningsbron.

De streamer corona lijkt groter te worden bij een extra gelijkspanning van 5 kV. Tot 10 kV komt er weinig verandering in de vorm van de streamer corona ten opzichte van die van 5 kV. De streamer corona begint wel eerder ten opzichte van de curve zonder extra gelijkspanning. Bij een gelijkspanning groter dan 10 kV lijkt de streamer corona weer af te vallen.

De corona is afhankelijk van de totale spanning. Dus de som van de DC-waarde en de spanningspuls bepalen de grote van de corona. Hier lijkt de corona niet constant toe te nemen bij een grotere DC-waarde. Het kan zijn dat de corona bij hogere totale

spanning vlakker wordt en daarom moeilijker is te zien.

### 3.4 Metingen met een extra zelfinductie

Om inzicht te krijgen in de parasitaire oscillaties en de gevoeligheid voor lange verbindingen zijn metingen gedaan met een extra inductiviteit op alle fysiek bereikbare plaatsen (bij alle verbindingsdraden). De stroom en spanning worden hier op de eerder genoemde plaatsen gemeten terwijl de stijgweerstand en de spanning op hetzelfde niveau blijven, respectievelijk  $2\text{ k}\Omega$  en  $20\text{ kV}$ , hetgeen een stijgtijd van de spanningspuls levert van  $300\text{ ns}$ .

Bij deze serie is er een spoel van ongeveer  $500\text{ nH}$  aangebracht op de volgende plaatsen:

- tussen de stijgweerstand en de vonkbrug,
- tussen de stijgweerstand en de onderkant van de condensator,
- tussen de ontkoppelweerstand (van de voeding) en de onderkant van de condensator,
- tussen de bovenkant van de condensator en de ontladweerstand,
- tussen de bovenkant van de condensator en de doorvoer,
- tussen het sterpunt en de binnenbuis.

De spoel is bedoeld als extra zelfinductie (wat gelijk is aan een langere leiding) en als extra parasitaire capaciteit. Eigenlijk wordt er dus gekeken hoe compact de bouw moet zijn.

In de bijlagen geeft grafiek 16 een vergelijking tussen een meting uit § 3.2 (met een spanningspuls van  $20\text{ kV}$  en een weerstand van  $2\text{ k}\Omega$  in lucht) en één onder dezelfde condities maar op een ander dag genomen (de dik getrokken kromme).

Het verschil in de spanning komt weer door slecht aflezen van de meters. Het stroommaximum is lager bij de nieuwe meting, wat het gevolg kan zijn van de lagere spanning, andere atmosferische omstandigheden (zoals de temperatuur en de vochtigheid; zie referentie 7 in de bijlagen) en de oscillaties.

De meting zonder extra zelfinductie (dun) en de meting met de extra spoel tussen de bovenkant van de condensator en de doorvoer, zijn samen in grafiek 21 getekend. Dit is de enige meting in de serie die een duidelijk verschil toont (alleen in de stroom). Het aantal oscillaties van hoge frequentie neemt af, terwijl die met een lage frequentie een grotere amplitude krijgen.

De inductie van de verbindingsdraden ( lengte  $\pm 190$  mm) uit figuur 5 ( op pagina 7) is ongeveer 150 nH. De extra zelfinductie van 500 nH staat voor een extra draad langer dan 500 mm. Doordat de metingen in deze serie weinig van elkaar verschillen ( op grafiek 21 na), kan men concluderen dat de lengte van de verschillende verbindingsstukken geen groot probleem vormt. Wel moet de condensator van de pulsgenerator zo dicht mogelijk op de doorvoer van de testsectie komen om zo min mogelijk last te hebben van de oscillaties.

### 3.5 De gemeten ladingen

Er wordt van uit gegaan dat de testsectie een constante capaciteit heeft. In de paragrafen 3.1, 3.2 en 3.3 is te zien dat deze veronderstelling gegrond is.

Als er nog geen streamer corona of ionisatie is, geeft de meting een goed beeld van de capacitieve lading. Deze metingen zijn verricht bij 10 kV. Door de lineariteit is de capacitieve lading bij een hogere spanning evenredig met die van 10 kV zoals uit de nu volgende formules blijkt:  $I = C \cdot \frac{dU}{dT}$ ,  $Q = I \cdot dT \Rightarrow Q = C \cdot dU$ . De totale streamer corona lading is dus de totale integraal minus de berekende capacitieve lading.

Tabel 1 ( op pagina 20) geeft de capacitieve- en de coronalading van de metingen gedaan in lucht en rookgas. Deze metingen zijn gemaakt bij verschillende spanningen en stijgtijden. De streamer corona wordt over een draad van 10 cm lengte geproduceerd.

In de tabel zijn de metingen met een weerstand van  $0 \Omega$  weggelaten omdat zij geen relevante informatie ( zie grafiek 5) leveren. Ook de ladingen van de metingen bij 20 kV en  $0,5 k\Omega$  zijn niet gegeven omdat deze niet nauwkeurig bepaald kunnen worden doordat de beide metingen niet op nul eindigen ( zie grafiek 6 in de bijlagen). De ladingen in de tabel met een \* staan voor een meetcurve die nog niet uitgedempt is als de meting stopt ( hij gaat dus nog verder). De capacitieve ladingen van de metingen met 20 kV en meer zijn allen berekend met de hierboven gegeven formules uit de lading bij 10 kV.

Uit de tabel volgt dat de gemiddelde capacitieve lading bij 10 kV gelijk is aan 458 nC. Dit geeft voor de spanningen van 20, 30 en 40 kV respectievelijk 916, 1375 en 1833 nC.



Tabel 1: De lading ( in nC) van de capacitieve en de streamer corona stroom als functie van de spanning ( in kV) en de stijgweerstand ( in k $\Omega$ ).

| Spanning<br>Weerstand<br>kV    k $\Omega$ |     | Lucht      |        | Rookgas    |        |
|---|-----|------------|--------|------------|--------|
|   |     | Capacitief | Corona | Capacitief | Corona |
| 10  | 0.5 | 457        |        | 462        |        |
|   | 2   | 463        |        | 452        |        |
|   | 4   |            |        | 457        |        |
| 20  | 2   |            | 95     |            | -2     |
|   | 2   |            | 95     |            | -19*   |
|   | 4   | 916        | 9*     | 916        | 4      |
|   | 4   |            |        |            | 3      |
|   | 4   |            |        |            | -118   |
| 30  | 0.5 |            | 292    |            | 169    |
|   | 2   |            | 221    |            | 186    |
|   | 2   | 1375       |        | 1375       | 340    |
|   | 4   |            | 109    |            | 164*   |
|   | 4   |            | -22    |            |        |
| 40  | 0.5 |            | 736    |            | 475    |
|   | 2   |            | 167    |            | 0*     |
|   | 2   | 1833       |        | 1833       | -432   |
|   | 4   |            | 55*    |            | -75    |
|   | 4   |            |        |            | -1013  |

Volgens referentie 2 ( in de bijlagen) moet er meer streamer corona zijn als de stijgtijd kleiner wordt en als de spanning toeneemt. Dit klopt aardig bij de resultaten van streamer corona in lucht. In rookgas is er geen regelmaat te ontdekken. Dit toont weer aan dat er een grote variantie in de metingen zit. Om een beter beeld te krijgen zullen er veel meer metingen gedaan moeten worden.

De grote oscillaties in de metingen kunnen een negatieve integraal hebben. Hierdoor is de totale lading soms kleiner dan de capacitieve. Dit geeft dan een negatieve streamer corona lading. Bij de metingen in rookgas hebben de oscillaties vaker een grotere negatieve integraal dan in lucht. Dit verschijnsel is niet onderzocht.

De metingen bij 40 kV eindigen rond de 38 kV. Als deze eindwaarde wordt gebruikt voor het berekenen van de capacitieve lading is er maar een klein verschil met de

waarden in tabel 1.

In tabel 2 is de streamer corona lading uitgezet tegen een DC-offset. Doordat de totale spanning toeneemt moet ook de streamer corona lading toenemen. In de tabel is te zien dat er wel een toename is maar dat er nog veel variantie in zit.

Tabel 2: De lading ( in nC) van de streamer corona stroom als functie van een extra DC-offset bij een capacitieve lading van 916 nC.

| Spanning<br>kV | Corona<br>nC | Spanning<br>kV | Corona<br>nC |
|----------------|--------------|----------------|--------------|
| 0              | 33           | 7.5            | 90           |
| 0              | 113          | 7.5            | 82           |
| 2.5            | 29           | 10             | 116          |
| 2.5            | 16*          | 10             | 117          |
| 5              | 47           | 12.5           | 155          |
| 5              | 77           | 12.5           | 168          |
| 5              | 103          | 15             | 126          |

In de grafieken 9 tot en met 15 ( in de bijlagen) is zichtbaar dat de streamer corona het grootst lijkt bij een DC-waarde tussen de 5 en 10 kV. Boven de 10 kV neemt het maximum van de streamer corona af, terwijl zijn breedte toeneemt. Hierdoor kan zijn lading nog steeds toenemen hoewel het op het eerste gezicht niet zo lijkt.

De metingen liggen ongeveer 2 kV onder de ingestelde spanningspuls. De puls is dus maar 18 kV hoog. Dit heeft echter geen grote invloed op de conclusies voor tabel 2.

Er zijn ook nog acht metingen gedaan met een extra zelfinductie op verscheidene plaatsen ( zie § 3.4). De berekende streamer corona ladingen bevinden zich tussen de -19 en 40 nC. Er is dus nog steeds sprake van een grote variatie in de metingen.

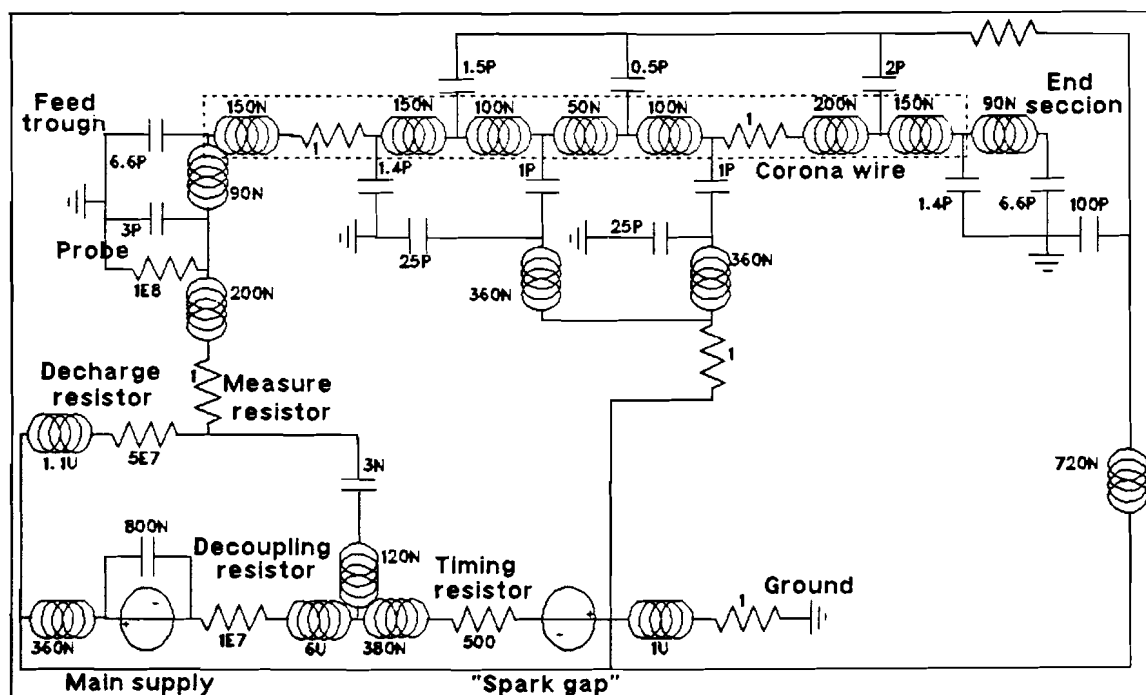
Uit de voorgaande tabellen kan geconcludeerd worden dat de ladingen nog niet goed bepaald kunnen worden. Dit komt omdat de metingen gedaan zijn voor spanningen vlak bij de ontsteekspanning van de streamer corona ( respectievelijk 20 en 18 kV). Hierdoor treedt er een grote variantie op in de streamer corona. Ook draagt de meetopstelling bij aan de oscillaties die de nauwkeurigheid verkleinen. Het elektrisch rendement is dus nog niet te bepalen.

#### 4: De simulatie methoden

Voor het berekenen van de stroom en spanning in het elektrisch circuit van de puls-generator en de testsectie is gebruik gemaakt van de simulatie pakketten Microcap en Spice. De stroom en de spanning worden berekend op dezelfde plaats als waar zij gemeten worden in het circuit. Hiervoor was nodig een representatie van het elektrisch circuit met alle componenten van de voeding en de testsectie. Veel parasitaire inductiviteiten en capaciteiten zijn ook meegenomen.

Het schema van de pulsgenerator is verkregen door, naast de discrete componenten, de geometrische afmetingen te gebruiken voor de berekening van de parasitaire capaciteiten en de inductiviteiten. Hierbij is gebruik gemaakt van de formules uit referentie 8 ( in de bijlagen).

Als eerste is Microcap gebruikt omdat dit op een PC kan draaien. Het schema dat daarbij wordt getest is te zien in figuur 7.



Figuur 7: Het schema dat aan Microcap wordt opgegeven.

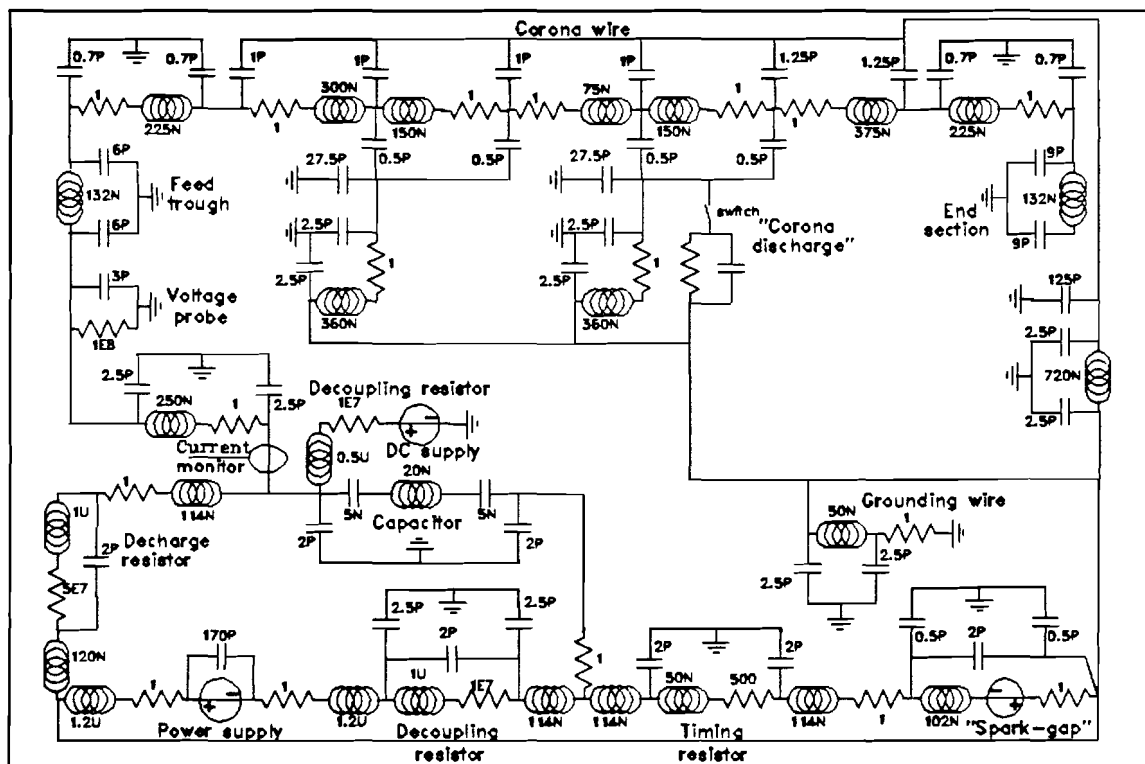
Een groot nadeel van dit programma is dat het de aanwezige capaciteiten langzaam moeten opladen omdat het snelle veranderingen erg slecht kan verwerken. Hierdoor bestond een simulatie eerst uit het opladen van de opstelling en dan het ontladen. Dit

kon uren rekentijd vergen. Sneller werken kon door het vergroten van de onnauwkeurigheden.

De resultaten van de simulaties bij een spanningspuls van 20 kV en een stijgweerstand van 0.5 kΩ kwamen redelijk overeen met de gemeten waarden. Vreemd genoeg zat er een factor 1.5 verschil in de stijgtijd van de spanning, het maximum van de stroom en haar pulsduur. Dit was ook zo bij simulaties van 2 of 4 kΩ.

Na een analyse van de berekeningen bleek dat Microcap grote problemen ondervond bij het opladen van de condensator die de lading voor de puls van de testsectie bevat. Het bleek, dat in de simulatie, de spanning aan beide zijden van de condensator precies gelijk was hetgeen nooit tot goede resultaten kan leiden.

Hierdoor is later gekozen voor Spice. De resultaten waren direct beter en veel sneller beschikbaar ( enkele minuten). Al gauw bleek dat het simpele schema dat in Microcap gebruikt werd, bij Spice niet voldeed. Het nieuwe schema staat in figuur 8.



Figuur 8: Het input schema voor Spice.

Er was een veel te groot verschil tussen de berekende en de gemeten grafieken. In de theoretische curve was de stijgtijd van de stroom- en de spanningspuls veel kleiner. Dit kan worden opgelost door meer parasitaire capaciteiten bij te voegen. Om de

amplitude van de oscillaties in de berekende capaciteve stroompiek te verkleinen werden ook vele parasitaire inductiviteiten toegevoegd ( zie figuur 8 op pagina 23).

Alle verbindingen hebben nu een capaciteit naar aarde gekregen en worden met  $\pi$ -secties weergegeven. Alle waarden zijn oorspronkelijk afgeleid uit de geometrie. De verschillende inductiviteiten zijn aangepast aan de hoge frequentie ( bij voorbeeld: de inductiviteit van de ontladingsdraad is bij 40 MHz, de maximale frequentie van de metingen, 1.5 maal groter dan bij gelijkspanning).

Uit figuur 8 valt af te lezen dat de capaciteit van de testsectie ongeveer 25 pF draagt. Dit is ook de waarde die in § 2.6 gebruikt wordt.

Voor de vonkbrug is een spanningsbron genomen, die in een bepaalde tijd, van een waarde gelijk aan die van de bron, naar nul springt. Deze tijd is op 10 ns gekozen naar aanleiding van referentie 9 en 10 ( in de bijlagen). Er moest zo een oplossing worden gekozen omdat Spice geen schakelaars kent ( en Microcap kan een schakelaar op die plaats niet aan).

Alle onderdelen van de voeding ( uit figuur 5 van pagina 7) zijn in het schema ( figuur 8 op pagina 23) weergegeven. Ze zijn allemaal als  $\pi$ -secties uitgevoerd. De testsectie wordt ook met  $\pi$ -secties gesimuleerd. Een streamer corona ontlading is te simuleren met een parallelle weerstand en capaciteit, die op een bepaald tijdstip inschakelen. Door tijdgebrek is dit hier niet gedaan.

Het Spice schema is geoptimaliseerd voor een puls van 20 kV en een stijgweerstand van 0.5 k $\Omega$ . Deze waarde is gekozen omdat er van uit wordt gegaan dat er dan vrijwel geen streamer corona is. Dit optimaliseren gebeurt door de waarde van alle componenten één voor één te veranderen van erg kleine ( in de beurt van 0) tot erg grote waarde ( 2 tot 3 maal groter dan de standaardwaarde) en het resultaat wordt dan met de standaard berekening vergeleken.

Het uiteindelijke schema is niet veel veranderd ten opzichte van de geometrische waarden. Dat wil zeggen dat alle veranderingen later aan de hand van de bouw konden worden verklaard. Als voorbeeld: de capaciteit van de tweede doorvoer is groter omdat deze door een geaard scherm wordt omringt.

## 5: De simulatie resultaten

Grote invloed op de resultaten van de simulaties hebben de vonkbrug ( de daaltijd van de spanningsbron), de aardkabel en de doorvoeren. Door de vonkbrug langzamer te laten "schakelen" neemt de maximale frequentie van de oscillaties af. Verkleinen van de inductie van de aardkabel, verwijdert de oscillaties met een lage frequentie. De capaciteit van de doorvoer beïnvloed de stijgtijden sterk.

De capaciteiten naar aarde langs het ontladingscircuit ( bestaande uit de testsectie, de condensator, de stijgweerstand en de vonkbrug) hebben allen invloed op de stijgtijd van de spanning en de stroom. De inductiviteiten ( vooral die in de testsectie) hebben meer invloed op de frequentie van de parasitaire oscillaties.

Van belang voor de secundaire pieken zijn de parasitaire capaciteiten parallel aan de hoge weerstanden. Deze zitten niet in het ontladingscircuit en dragen weinig bij aan de eerste piek. De capaciteiten ontstaan door de bouw van de weerstanden.

De eerste simulaties ( met het circuit van figuur 8 op pagina 23) zijn gedaan voor een spanning van 20 kV en een stijgweerstand van 0.5 k $\Omega$ . Deze waarden zijn gekozen omdat de stroom dan volledig capacitief is ( dat wordt aangenomen, zie § 3.2). Er hoeft dus nog geen model voor de streamer corona opgesteld te worden.

In grafiek 23 zijn de gemeten (dik) en berekende (dun) curves te zien bij een spanning van 20 kV en een stijgweerstand van 0.5 k $\Omega$ . In de stromen is te zien dat de oscillatie frequenties elkaar niet veel ontlopen. Door de kleinere stijgtijd van de berekende spanning is ook de stroompiek hoger. Het grote verschil in de stroompieken kan ook het gevolg zijn van te weinig dempweerstand in het simulatie schema ( verandering van de weerstand van de verbindingsdraden van 1 naar 2  $\Omega$  heeft echter geen invloed). Doordat de berekende stroom en spanning een kleinere stijg- en daaltijd hebben, zal er nog een verandering in de RC-waarden moeten komen. Door tijdgebrek is de plaats van deze weerstand of capaciteit niet bepaald.

Grafiek 24 toont de curves bij 10 kV en 0.5 k $\Omega$ . De verschillen zijn gelijk aan die bij grafiek 23. Het schema voor deze simulatie is blijkbaar onafhankelijk van de spanning. Het maximum van de stroom is twee maal kleiner, zoals te verwachten is via  $I = C \cdot \frac{dU}{dt}$ . Hieruit volgt ook dat de pulsduur van de stroom en de stijgtijd niet mogen veranderen. Vergelijking van grafiek 23 en 24 laat zien dat aan deze voorwaarde

wordt voldaan.

Als de stijgweerstand wordt veranderd, gaat de RC-tijd mee. Dit heeft ook gevolgen voor de stijgtijden en dus de maximale frequenties die kunnen optreden.

In grafiek 25 is een simulatie (dun) te zien bij een stijgweerstand van  $0 \Omega$  en een spanningspuls van 20 kV. Uit de vorige grafieken kon men al vermoeden dat de dempweerstand van de berekeningen te klein is en dat wordt hier eigenlijk bevestigd. De berekende stroom (dun) dempt veel langzamer uit dan de gemeten waarde (dik). De oscillatie-frequenties in de stromen komen goed overeen, terwijl in de berekende spanning meerdere oscillatie-frequenties zichtbaar zijn.

In grafiek 26 heeft de stijgweerstand een waarde van  $2 \text{ k}\Omega$  en de spanning bedraagt 20 kV. De berekende curve (dun getrokken) heeft oscillaties met een grotere amplitude, terwijl de frequenties redelijk goed overeen komen. De demping zal hier ook invloed hebben. De berekende curven hebben wel een kleinere stijgtijd dan de gemeten grafieken.

Als laatste wordt er bij de simulatie van 20 kV en  $2 \text{ k}\Omega$  een DC-offset van 5 kV toegevoegd. Grafiek 27 laat nu de resultaten zien van de berekende en de gemeten (de meting van grafiek 11) stromen en spanningen. Ook hier is er een grote overeenkomst, met alweer een kleinere dempfactor voor de berekeningen. De curves hebben dezelfde verschillen als in grafiek 26.

De berekende spanning begint niet op 5 kV door de spanningsval over de ontkoppelweerstand (van  $10 \text{ M}\Omega$ ) van de gelijkspanningsbron. De curve eindigt ook niet op 25 kV omdat de voeding van de pulsgenerator ook een spanningsval over zijn ontkoppelweerstand heeft.

In § 3.4 zijn metingen gedaan bij  $2 \text{ k}\Omega$  en 20 kV met een extra zelfinductie tussen de verbindingsdraden. Bij de simulatie met een weerstand van  $0.5 \text{ k}\Omega$  en 20 kV heeft een extra inductie op de hierboven genoemde plaatsen geen invloed. Een simulatie bij  $2 \text{ k}\Omega$  daarentegen is erg gevoelig voor kleine variaties van de inductiviteit van de verbindingsstukken. De frequentie van de oscillatie kan, na het aanbrengen van 100 nH extra, wel 2 keer zo hoog worden terwijl ook de amplitude omhoog gaat.

Om de invloed van parasitaire capaciteiten op de simulatie resultaten te bekijken zijn er ook berekeningen gemaakt met een extra capaciteit van 5 pF naar aarde. Deze

berekeningen zijn alleen gedaan voor een spanningspuls van 20 kV en een stijgweerstand van 0.5 k $\Omega$ . De berekeningen verschilden niet van de standaard zodat dit in theorie geen invloed heeft. De invloed op de praktische opstelling is niet getest.

Uit de vergelijkingen van de berekeningen en de metingen blijkt dat zij erg goed overeenkomen. Vooral bij een stijgweerstand van 0.5 k $\Omega$  is de gelijkenis groot. Bij grotere stijgweerstand ( hier alleen 2 k $\Omega$ ) komt er een groter verschil. Dit is vooral merkbaar als in het simulatie schema kleine veranderingen van inductiviteiten en capaciteiten plaats vinden. Het schema en de methode zijn wel goed genoeg om mee door te gaan.



## 6: Conclusies

Met deze opstelling van de pulsgenerator en zijn belasting, zijn goede resultaten behaald. Ten eerste is de stijgtijd netjes in te stellen ( via de stijgweerstand). Dit betekent dat hetzelfde schema ( van de pulsgenerator met een kleinere proefopstelling uit referentie 4 in de bijlagen) ook voor grotere opstellingen gebruikt kan worden.

Ten tweede zijn de stroom en de spanning erg goed te meten. Een nadeel van de stroommeting is dat deze de capacatieve- en de streamer corona stroom tegelijk meet. Een nadeel van de spanningsmeting is dat de spanning op de plaats van de streamer corona niet gemeten wordt.

Doordat de installatie nog niet compleet is zijn er geen metingen gedaan voor het reinigen zelf. Er kan dus nog niets gezegd worden over de efficiëntie.

Uit de tabellen van de gemeten lading blijkt dat er nog grote verschillen zijn tussen de metingen. Dit is ook een gevolg van de kleine gemeten stromen ( vooral de streamer corona stromen zijn erg klein omdat maar 10 van de 80 cm van de draad meedoet).

De simulatieresultaten lijken veel op de gemeten signalen. Het kan dus een goed hulpmiddel zijn voor de dimensionering van een pulsgenerator voor een capacatieve belasting. Duidelijk is wel dat er in het huidige simulatiecircuit nog wat extra dempweerstand moet worden aangebracht. Ook moeten de simulaties nog verbeterd worden bij pulsen met een stijgweerstand van  $2 \text{ k}\Omega$ . Omdat de gebruikte computer vaak kapot was, was het niet mogelijk om meer simulaties te maken.

## 7: Aanbevelingen

Voor een nauwkeurigere meting moet de spanning op een andere manier worden ingesteld. Een mogelijkheid is om dit op de oscilloscoop te doen. De spanning wordt dan gemeten bij de verbinding van de condensator met de doorvoer van de ontlaadingsdraad. De meting geeft nu de spanning vlak voor de testsectie ( de ohmse spanningsval in de pulsgenerator wordt omzeild).

De spanning kan ook gemeten worden in de testsectie. Dit kan met een zogenaamde capacitieve spanningsdeler. Deze bestaat uit een geïsoleerde ( cirkelvormige) elektrode in de wand van de buis die het dichtst bij de spanningsbron ( de draad) ligt.

Om een betere benadering te krijgen van de capacitieve lading moeten er veel meer metingen per situatie worden gedaan. Deze metingen moeten worden gedaan bij een lage spanning. Er mag nog geen corona zijn. Deze waarde is belangrijk omdat hiermee de streamer corona lading kan worden geschat, door van de totale lading ( van de stroommeting) de capacitieve lading af te trekken. Eerder is al gezegd dat de lading in theorie evenredig met de spanning toeneemt. Bij meer metingen kan ook hiervan een veel beter beeld gekregen worden.

Om de verandering van het gas in de testsectie te elimineren, zou voor iedere serie een aantal metingen moeten worden gedaan die geen streamer corona ontladingen hebben. Dit kan bijvoorbeeld bij 10 kV. Uit de gemeten stromen kan dan de gemiddelde capacitieve lading voor die serie bepaald worden.

Door er voor te zorgen dat er meer streamer corona komt kan ook de variatie van zijn lading beter bepaald worden. Een simpele oplossing is de geïsoleerde en vrije delen van de draad om te keren. Dan zal dus alleen het kleine stuk draad bij ring nr. 4 geïsoleerd zijn ( de isolatie moet wel blijven bij de stukken draad die niet in de binnenbuis hangen). De verschilmeting zoals genoemd in § 2.6 is dan nog steeds mogelijk. Ook een hogere spanning heeft meer streamer corona tot gevolg.

Bij het bekijken van de streamer corona ontladingen in de testsectie is te zien dat er ook ontladingen zijn aan het einde van de draad ( waar de doorvoer de draad vasthoudt) en dat de ontladingen zich concentreren op de plaats waar de isolatie van de draad stopt. Dit kan verholpen worden door bij de doorvoeren grotere geleidende bolletjes te plaatsen en door de isolatie om de draad te vervangen door een dikkere

geleidende laag. Het laatste heeft een kleiner elektrisch veld om zich heen en produceert dus geen streamer corona.

Om elektrische energie te besparen kan de pulsduur verkleind worden. Dit kan door een kleinere condensator te nemen. Als het afvallen van de spanning met een bepaalde snelheid moet gebeuren, dan kan dit door aan de bovenkant van de condensator een dalweerstand en een vonkbrug naar aarde te plaatsen.

Door het sterpunt en de aarding te veranderen kan men proberen de oscillaties te verwijderen. Misschien helpt het ook als de onderdelen van de pulsgenerator dichterbij elkaar worden gebracht maar daar zijn geen aanwijzingen voor ( zie § 3.4); behalve dan de verbinding tussen de pulsgenerator en de testsectie.

Door het simulatieschema van de pulsgenerator te vereenvoudigen zou het misschien overzichtelijker worden. Dit kan ook tot betere simulatieresultaten leiden. Het beste is echter een pakket te gebruiken dat schakelaars wel kan simuleren omdat dan de vonkbrug beter te definiëren is ( uit § 5 blijkt dat de vonkbrug grote invloed op de resultaten van de simulaties heeft).

## **Bijlagen**

|                  |      |
|------------------|------|
| Literatuurlijst  | i    |
| Grafieken        | iii  |
| Spice input file | xxxi |

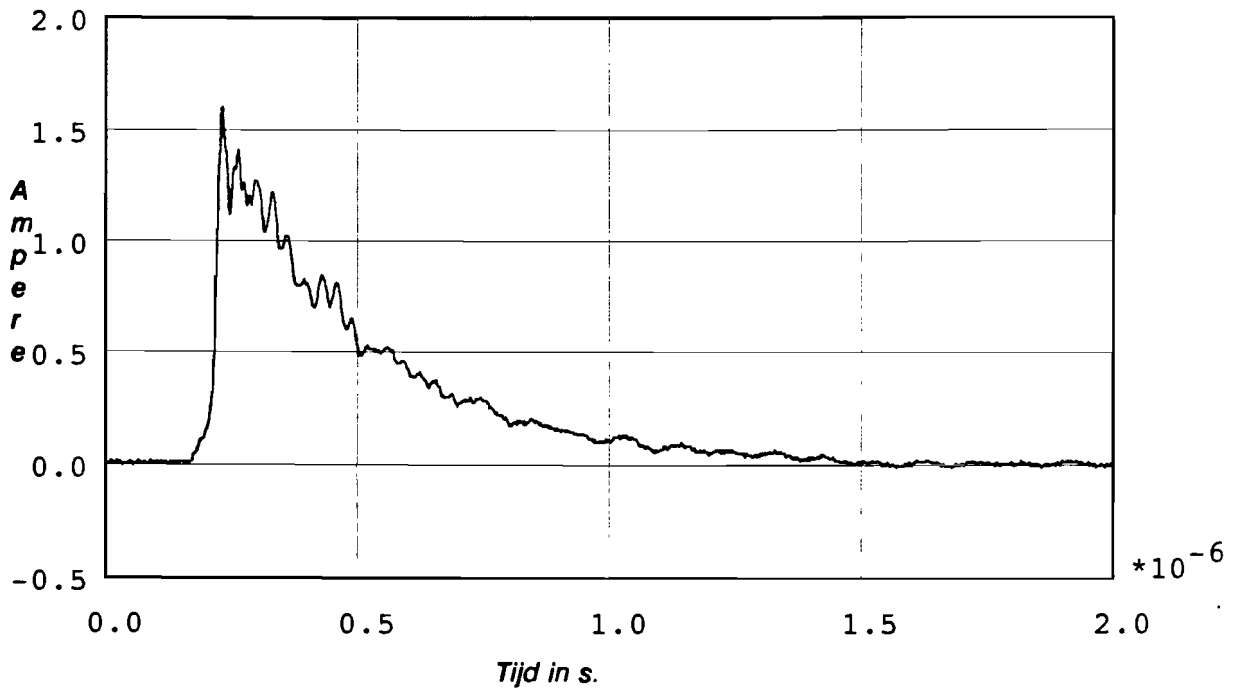
## Literatuurlijst

- | <u>Referentie nummer</u> | <u>Titel</u>  |
|--------------------------|---|
| 1                        | <p>The impact of pulse energization on electrostatic precipitation performance; Review<br/>J.K. Nelson and L. Salasoo.<br/>IEEE Transaction on Electrical Insulation, Vol. EI-22 No. 6,<br/>December 1987.</p>  |
| 2                        | <p>Combined removal of SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> and fly ash from simulated flue gas using pulsed streamer corona.<br/>J. Sidney Clements, Akira Mizuno, Wright C. Finney and Robert H. Davis.<br/>IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 25, No. 1, pp. 62-69.<br/>January/February 1989.</p> |
| 3                        | <p>High resolution schlieren study of pulsed corona.<br/>E. M. van Veldhuizen, Y.L.M. Creighton and W.R. Rutgers.<br/>Proc. of the 4th Int. Conf. on Electrostatic Precipitation,<br/>sept. 14-17, 1990, Beijing, China.</p>  |
| 4                        | <p>Processes in pulsed electrostatic precipitators.<br/>H.J.F. Kloth, E.J.M. van Heesch and P.C.T. van der Laan.<br/>Proc. 5th Int. Symp. on High Voltage Engineering, Braunschweig,<br/>24-28 Aug. 1987, Paper 91.05.</p>  |
| 5                        | <p>Pulse corona characteristics.<br/>Rea Massimo and Tomio Fujii.<br/>Conference record of the 1989 IEEE Industry Applications Society annual meeting, Part ii, pp. 2185-2189.<br/>San Diego, California, USA.</p>  |
| 6                        | <p>High-voltage engineering: fundamentals.<br/>E. Kuffel and W.S Zaengl.<br/>Pergamon press, 1984.</p>  |

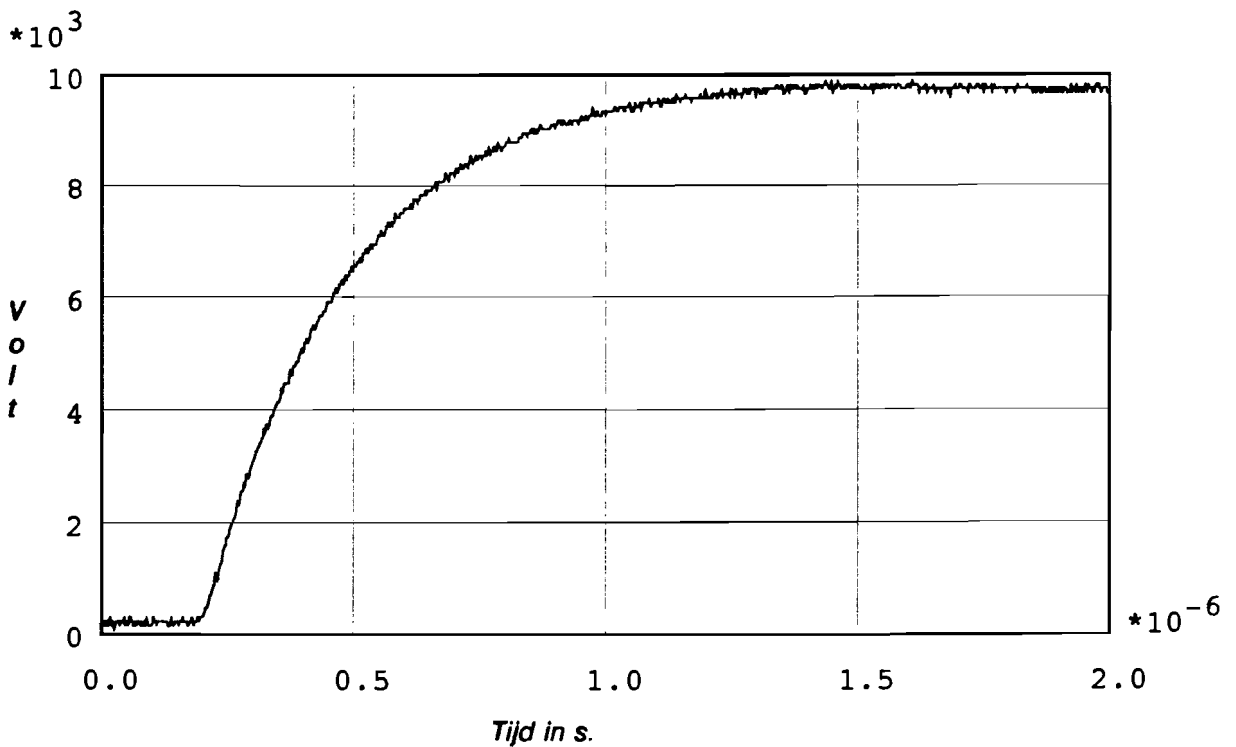
- 7 Impulse corona simulation for flue gas treatment.  
Ivo Gallimberti.  
Pure & Appl. Chem., Vol. 60, No. 5, pp. 663-674, 1988.
  
- 8 Das große werkbuch elektronik.  
Dieter Nährmann.  
● 1989 Franzis - Verlag, GmbH, München.  
5. Auflage.  
ISBN 3-7723-6545-0.
  
- 9 Discharge development in SF<sub>6</sub> and SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> mixtures under impuls-voltage stress.  
M. Giesselman, I. Kasuma, W. Pfeiffer and J. Wolf.  
Technische Hochschule, Schloßgraben 1,  
6100 Darmstadt, F.R.G.
  
- 10 Breakdown of pulsed power switches triggered by fast-rising impulses.  
Ma Naixiang, Deng Huimin and Tang Hong.  
Dept. of Electrical Engineering,  
Xi'an Jiaoting University, P.R China.

## Grafieken

- Serie 1 : Grafiek 1 tot en met 4 bij een spanningsmaximum van respectievelijk 10, 20, 30 en 40 kV. De weerstand bedraagt 4 k $\Omega$  en de metingen zijn in lucht en rookgas gedaan.  
Blz. iv - vii.
- Serie 2 : Grafiek 5 tot en met 8 bij een stijgweerstand van respectievelijk 0, 0.5, 2 en 4 k $\Omega$ . De spanningspuls bedraagt 20 kV en de metingen zijn in lucht en rookgas gedaan.  
Blz. viii - xi.
- Serie 3 : Grafiek 9 tot en met 15 bij een extra gelijkspanning van respectievelijk 0, 2.5, 5, 7.5, 10, 12.5 en 15 kV. De spanningspuls bedraagt 20 kV, de stijgweerstand is 2 k $\Omega$  en de metingen zijn in lucht gedaan.  
Blz. xii - xviii.
- Serie 4 : Grafiek 16 tot en met 22 bij een extra inductiviteit van 500 nH op verscheidene plaatsen. De spanningspuls bedraagt 20 kV, de stijgweerstand is 2 k $\Omega$  en de metingen zijn in lucht gedaan.  
Blz. xix - xxv.
- Serie 5 : Grafiek 23 tot en met 27. Gemeten en berekende stromen en spanningen.  
Blz. xxvi - xxx.

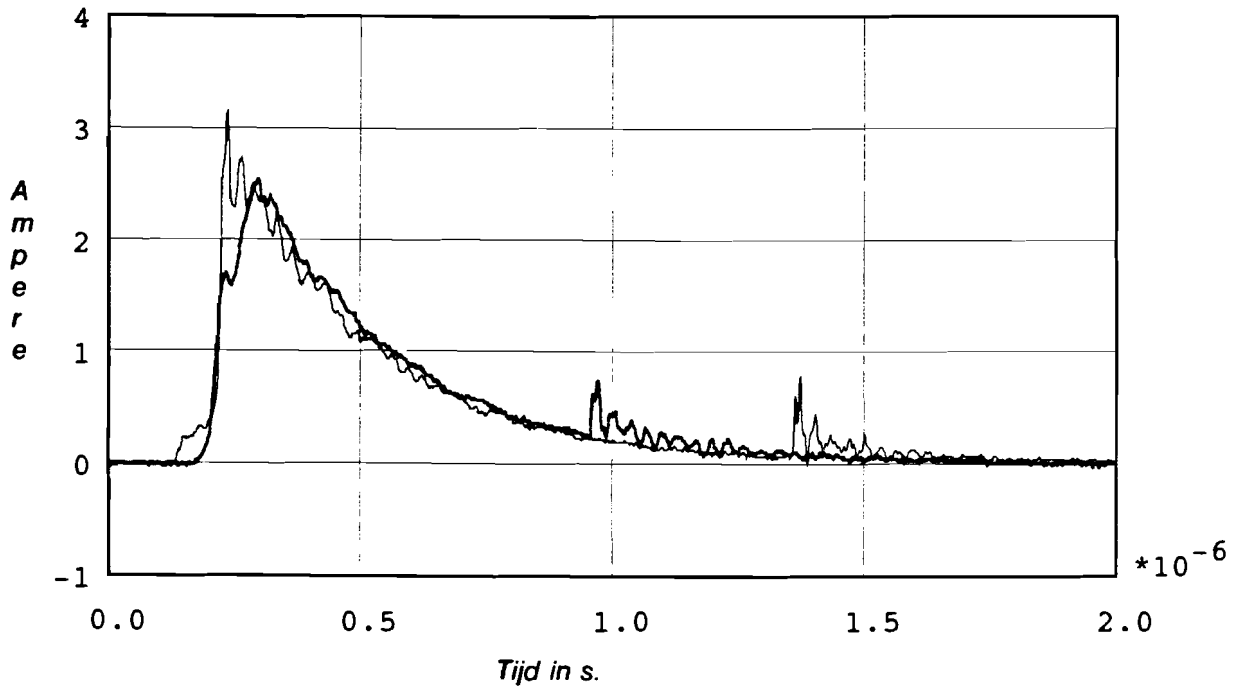


Grafiek 1a: De stroom ( in rookgas) tegen de tijd bij een spanningspuls van 10 kV en een stijgweerstand van 4 k $\Omega$ .

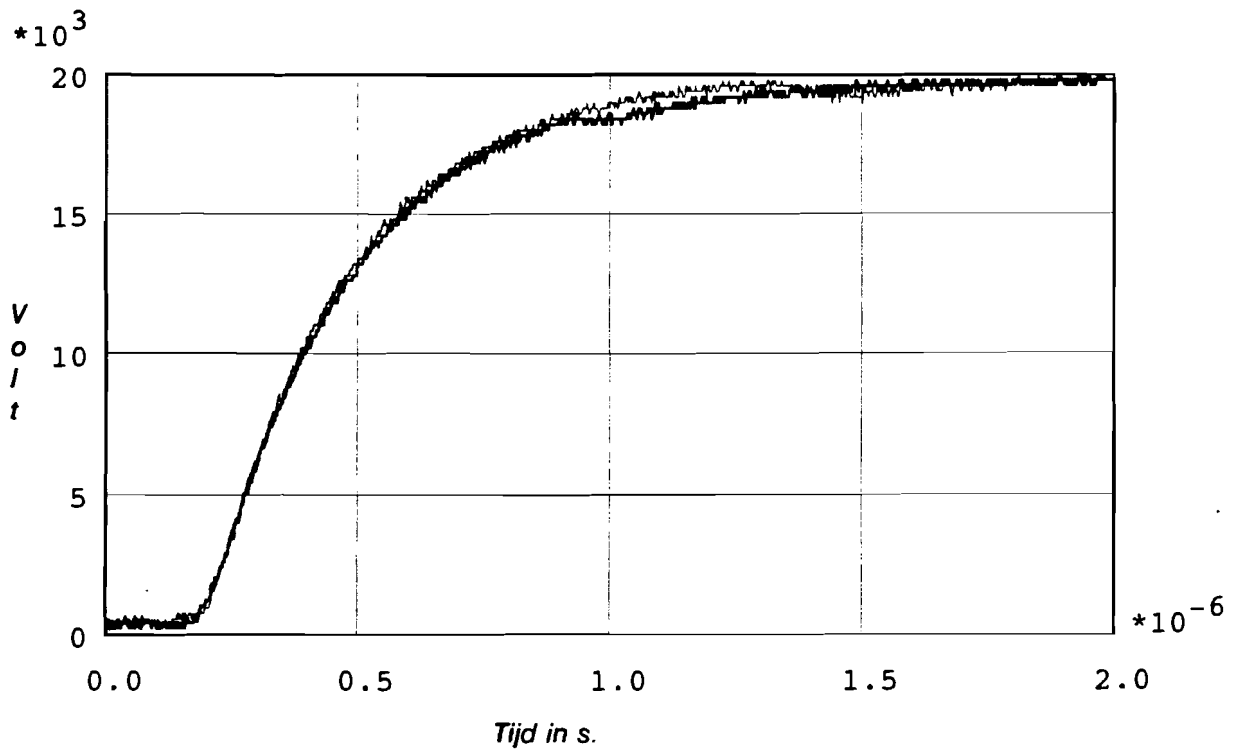


Grafiek 1b: De spanning ( in rookgas) tegen de tijd bij een spanningspuls van 10 kV en een stijgweerstand van 4 k $\Omega$ .

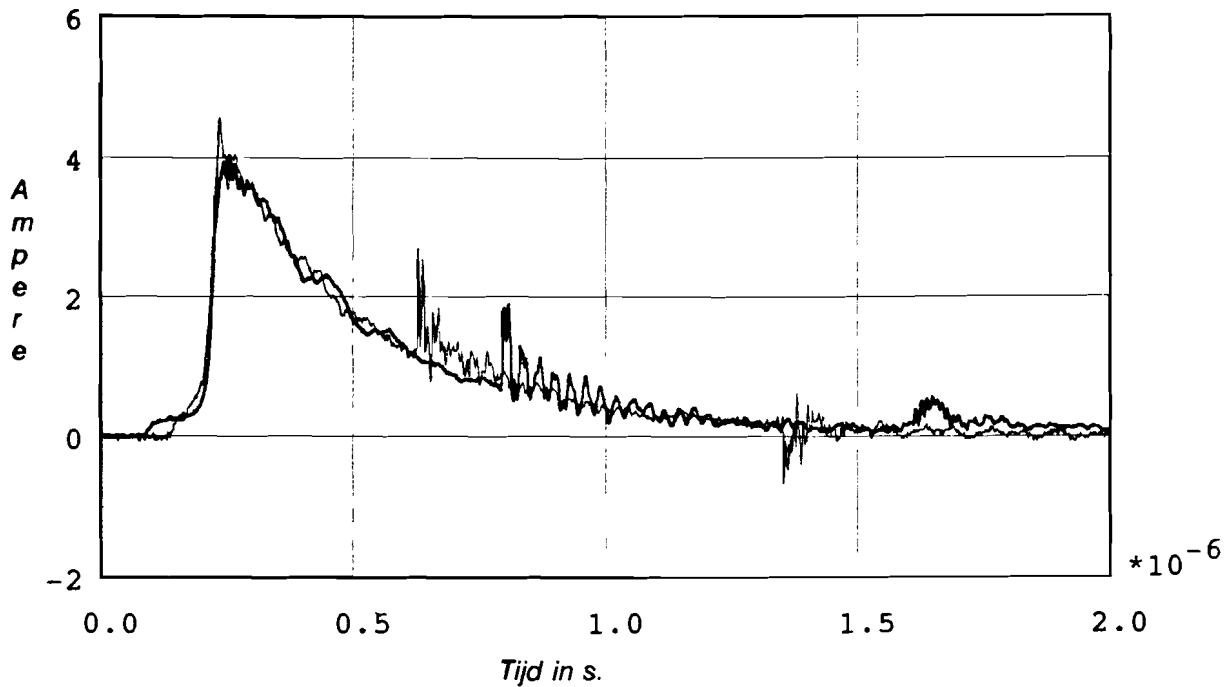




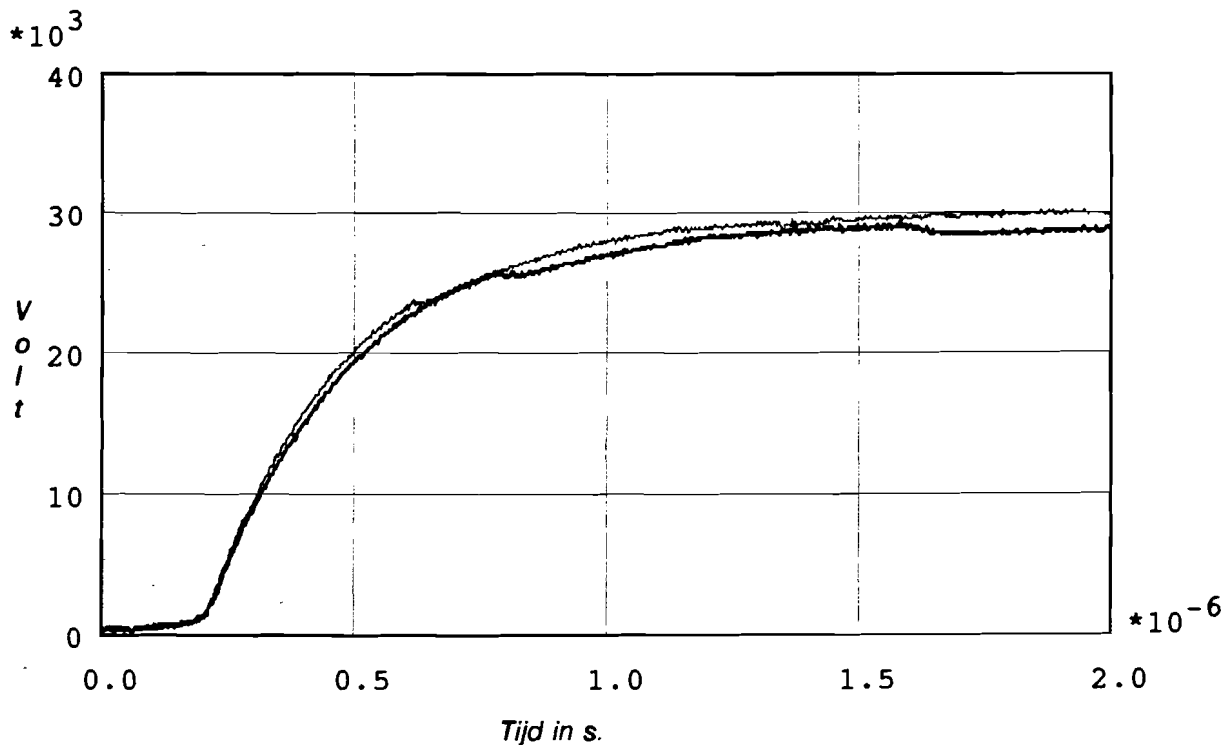
Grafiek 2a: De stromen in lucht (dun) en rookgas (dik) tegen de tijd bij 20 kV en 4 k $\Omega$ .



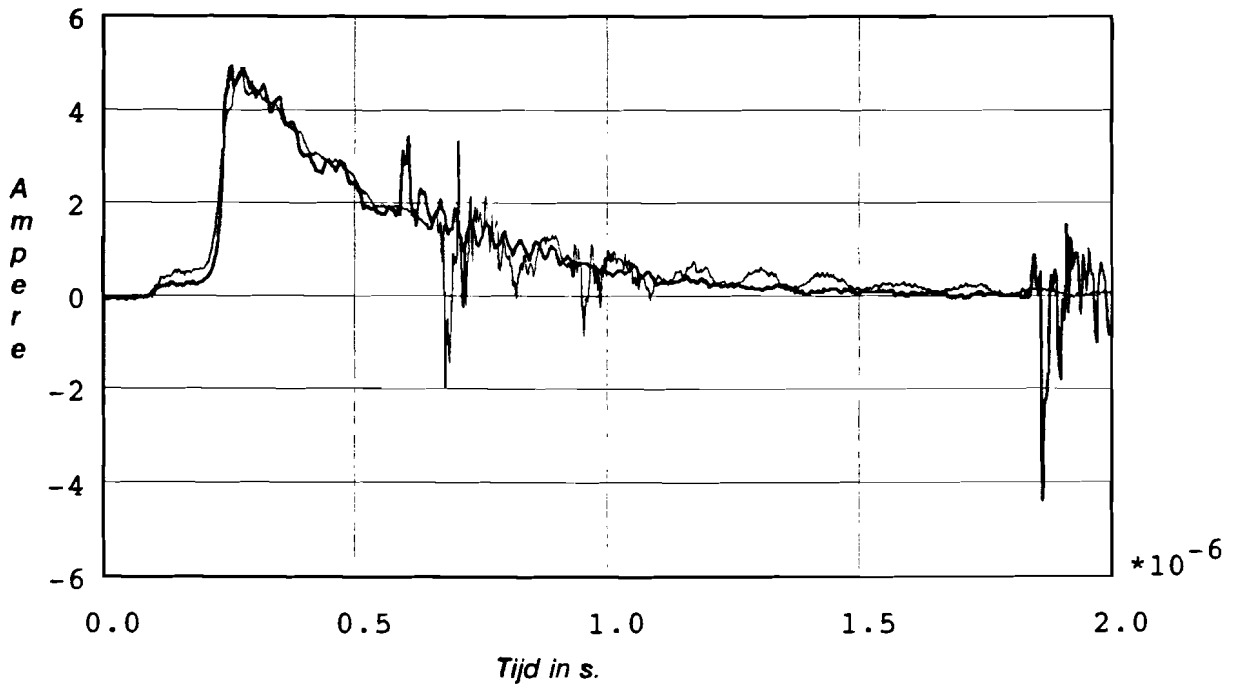
Grafiek 2b: De spanningen in lucht (dun) en rookgas (dik) tegen de tijd bij 20 kV en 4 k $\Omega$ .



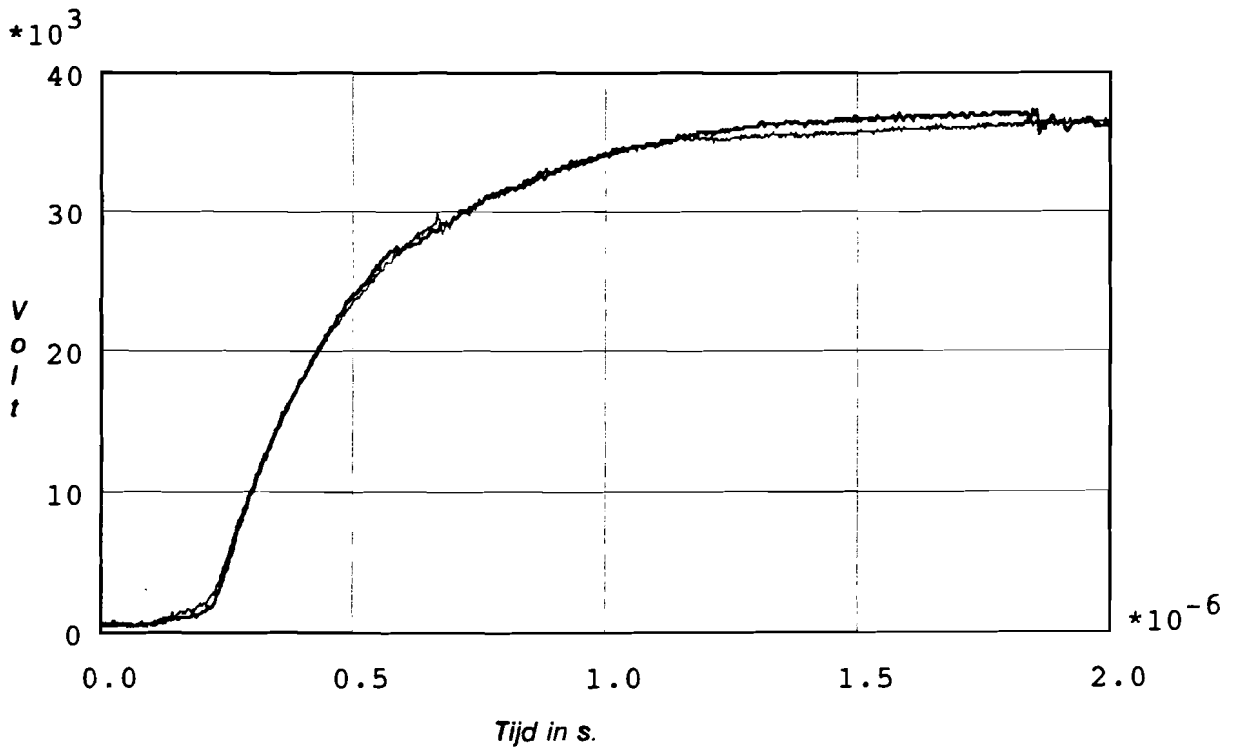
Grafiek 3a: De stromen in lucht (dun) en rookgas (dik) tegen de tijd bij 30 kV en 4 k $\Omega$ .



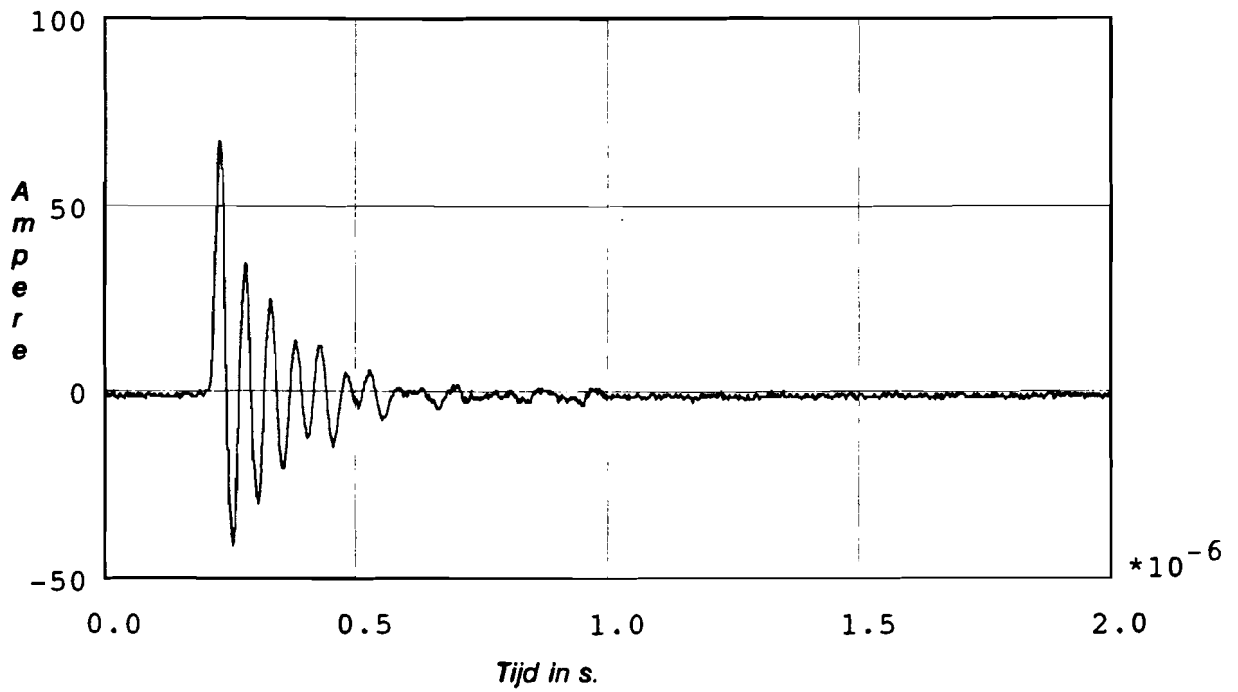
Grafiek 3b: De spanningen in lucht (dun) en rookgas (dik) tegen de tijd bij 30 kV en 4 k $\Omega$ .



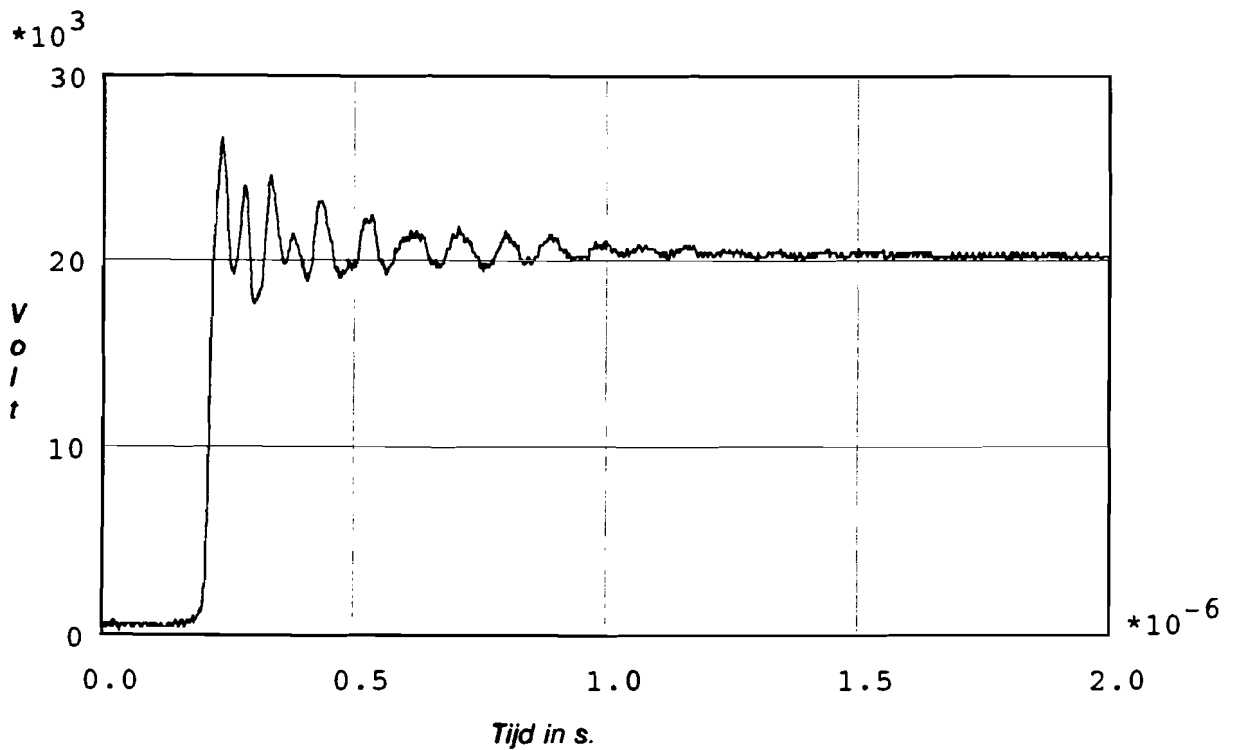
Grafiek 4a: De stromen in lucht (dun) en rookgas (dik) tegen de tijd bij 40 kV en 4 k $\Omega$ .



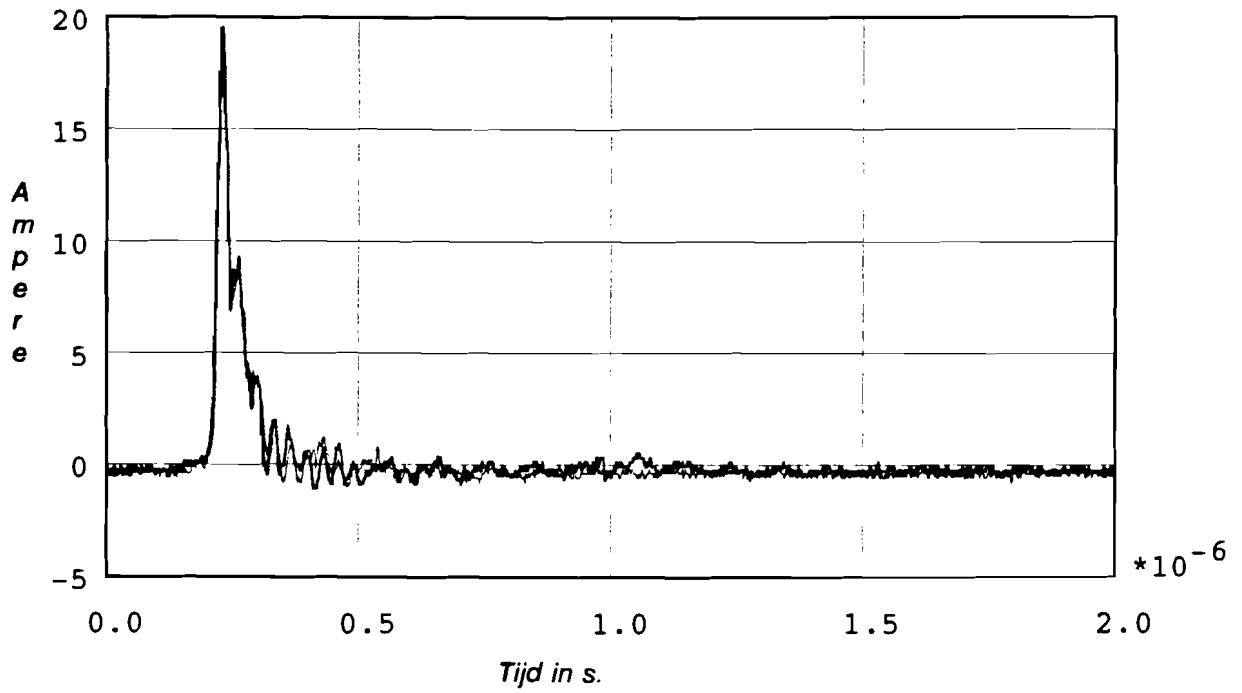
Grafiek 4b: De spanningen in lucht (dun) en rookgas (dik) tegen de tijd bij 40 kV en 4 k $\Omega$ .



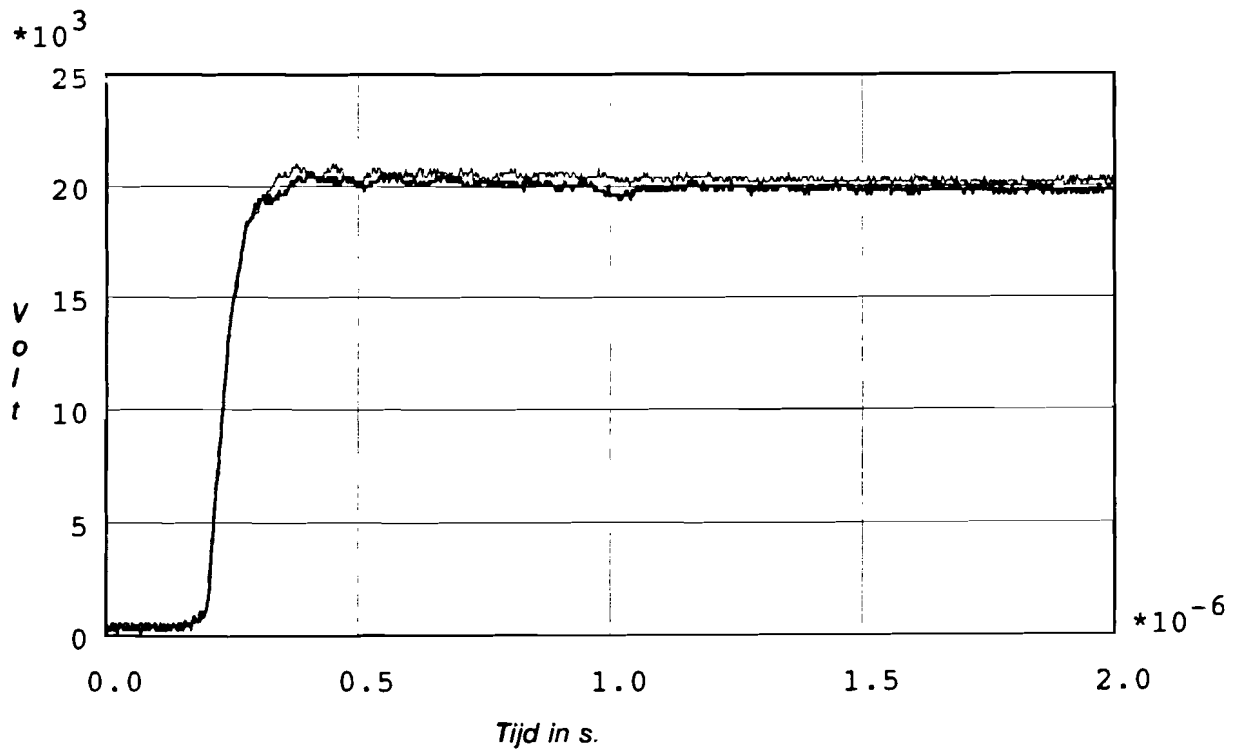
Grafiek 5a: De stroom ( in lucht) tegen de tijd bij een spanningspuls van 20 kV en een stijgweerstand van 0  $\Omega$ .



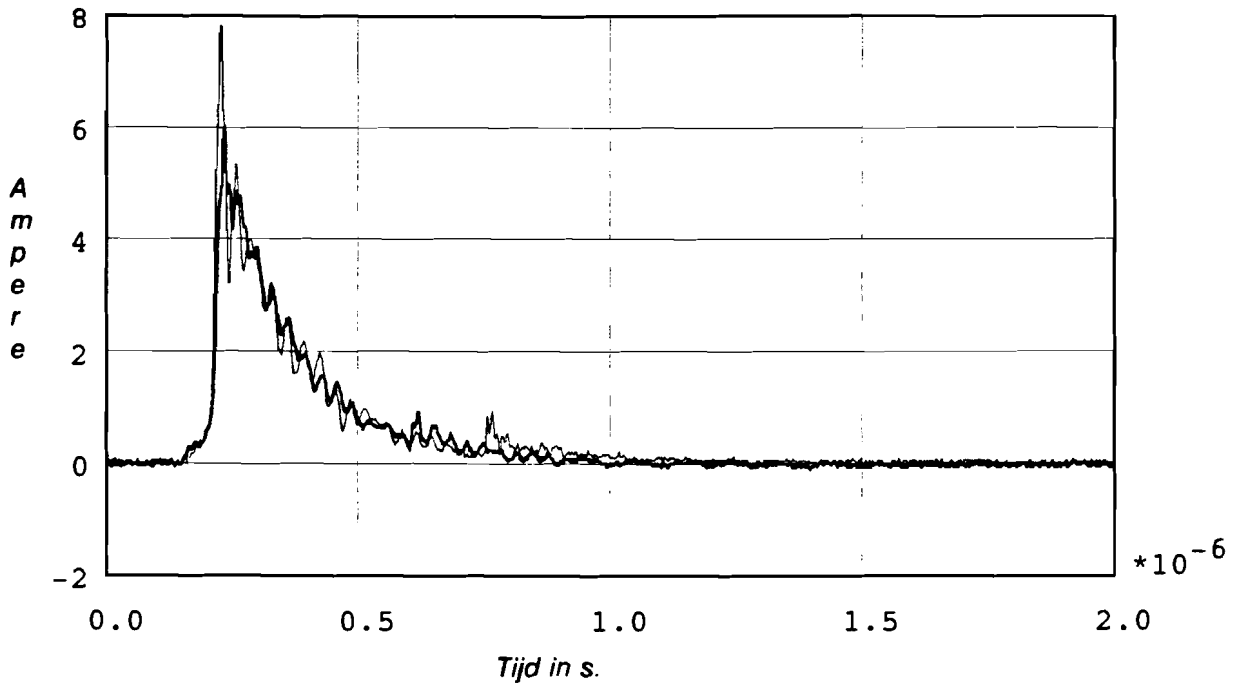
Grafiek 5b: De spanning ( in lucht) tegen de tijd bij een spanningspuls van 20 kV en een stijgweerstand van 0  $\Omega$ .



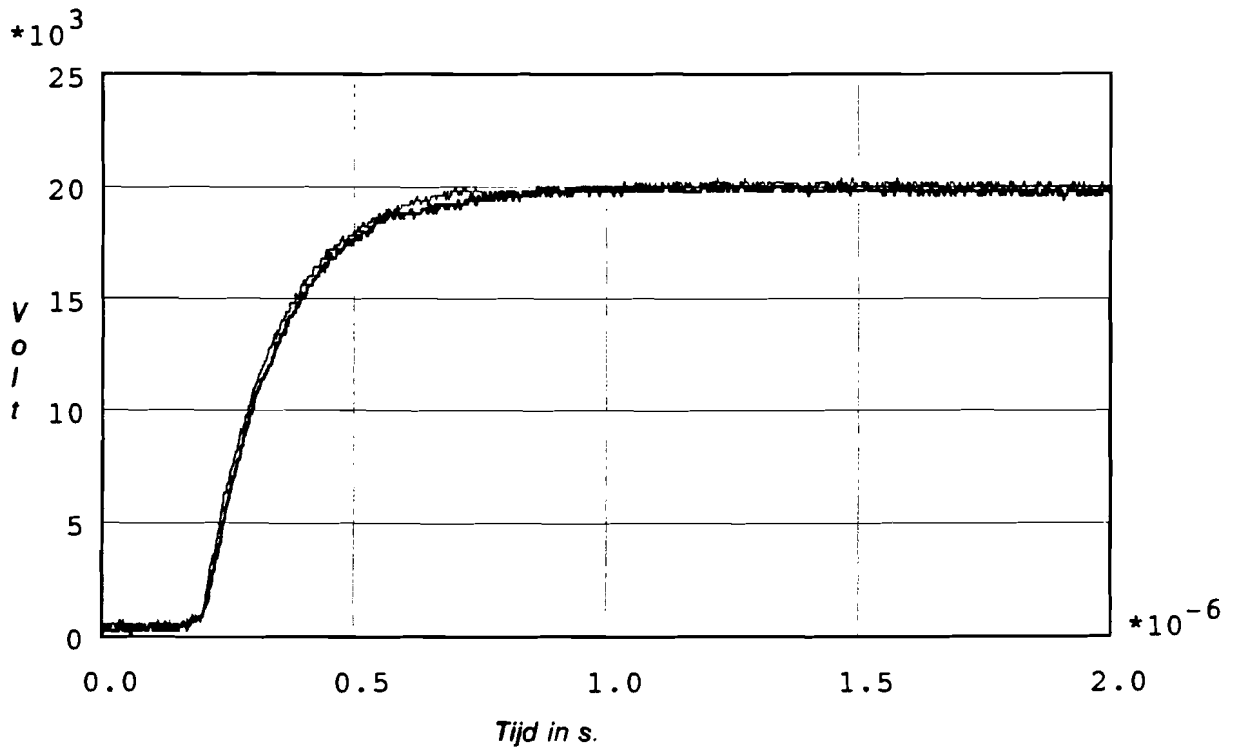
Grafiek 6a: De stromen in lucht (dun) en rookgas (dik) tegen de tijd bij 20 kV en 0.5 kΩ.



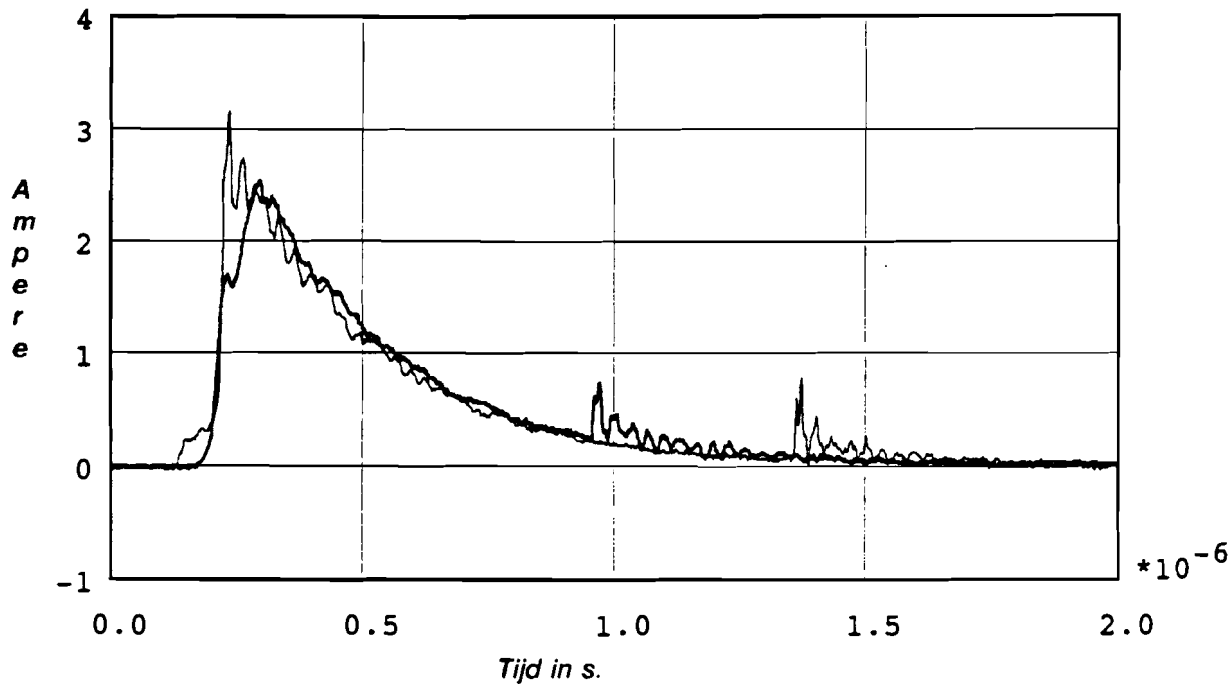
Grafiek 6b: De spanningen in lucht (dun) en rookgas (dik) tegen de tijd bij 20 kV en 0.5 kΩ.



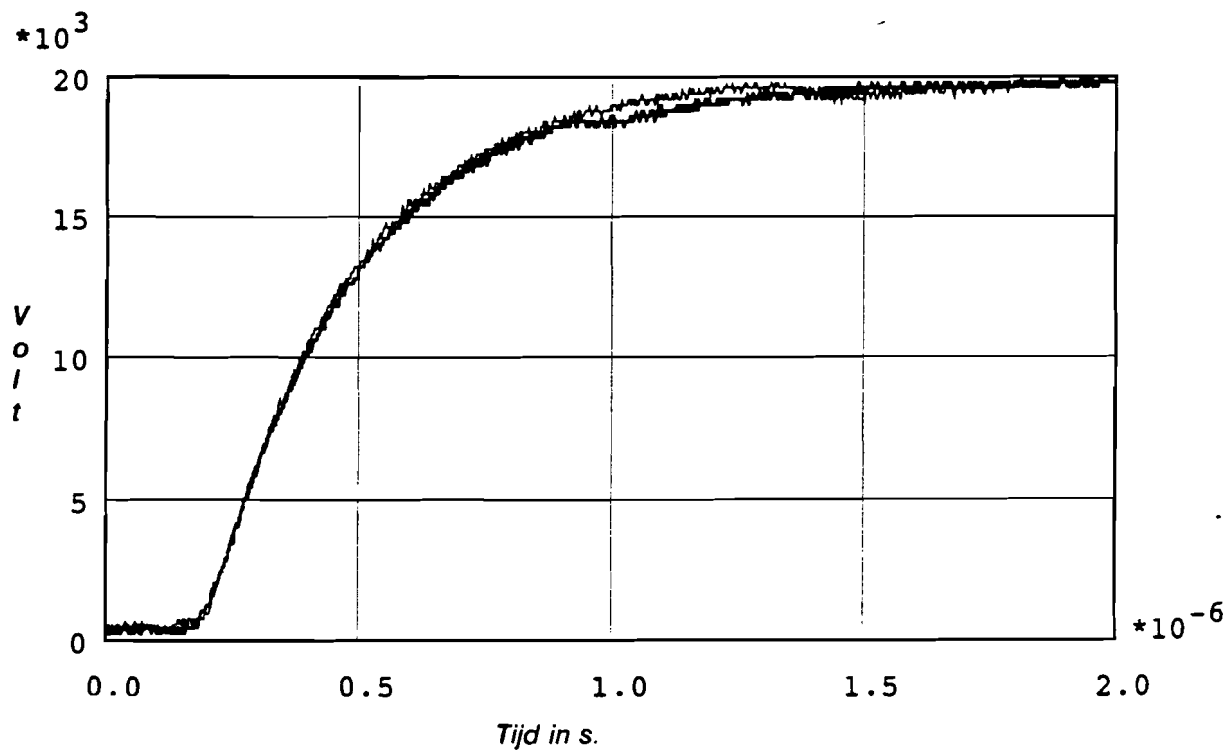
Grafiek 7a: De stromen in lucht (dun) en rookgas (dik) tegen de tijd bij 20 kV en 2 k $\Omega$ .



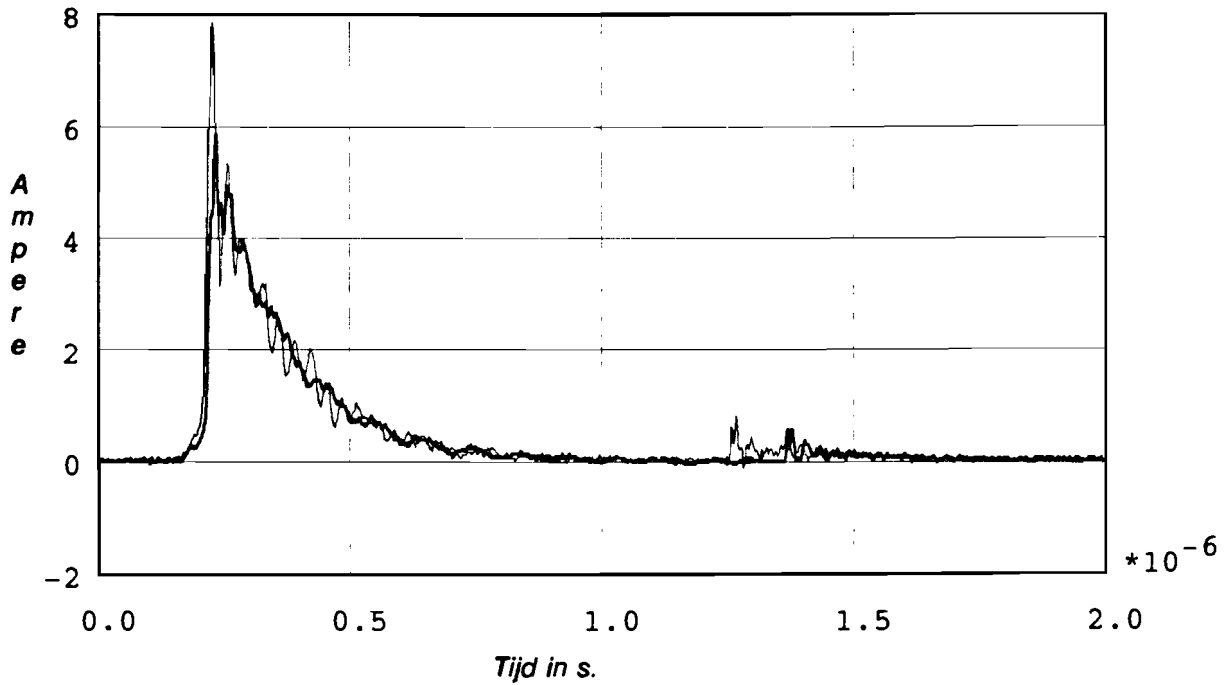
Grafiek 7b: De spanningen in lucht (dun) en rookgas (dik) tegen de tijd bij 20 kV en 2 k $\Omega$ .



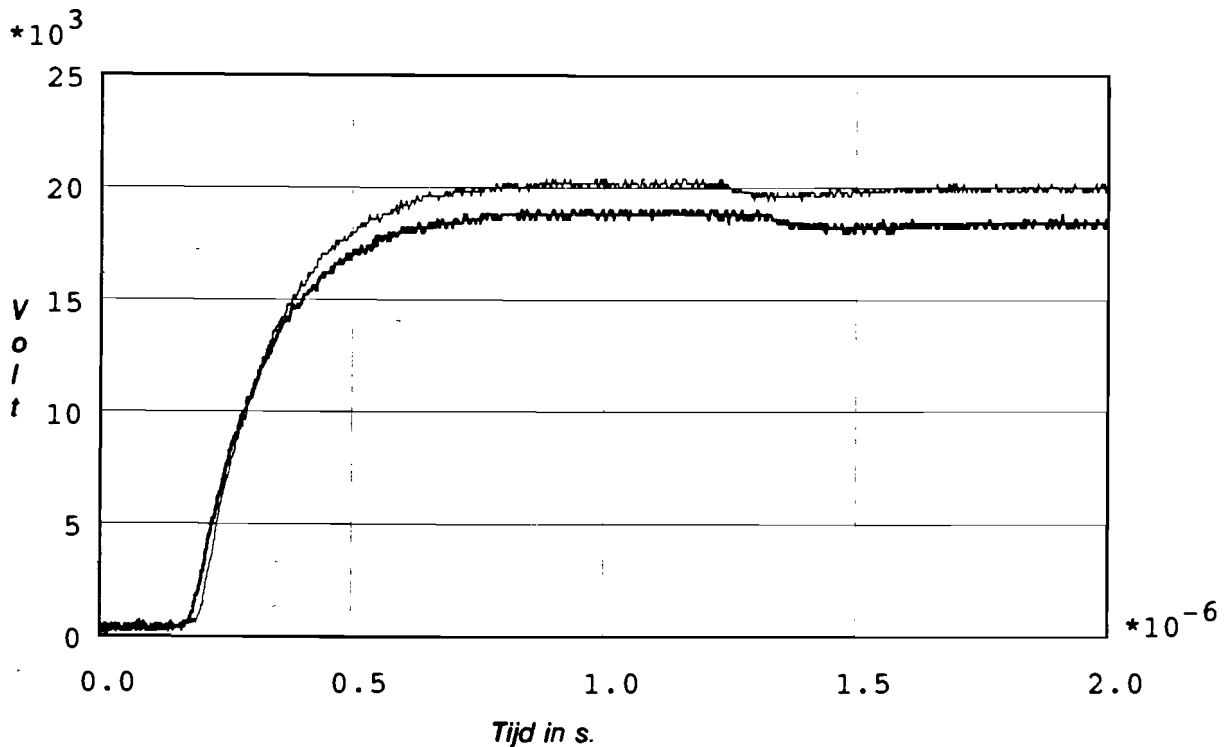
Grafiek 8a: De stromen in lucht (dun) en rookgas (dik) tegen de tijd bij 20 kV en 4 k $\Omega$ .



Grafiek 8b: De spanningen in lucht (dun) en rookgas (dik) tegen de tijd bij 20 kV en 4 k $\Omega$ .

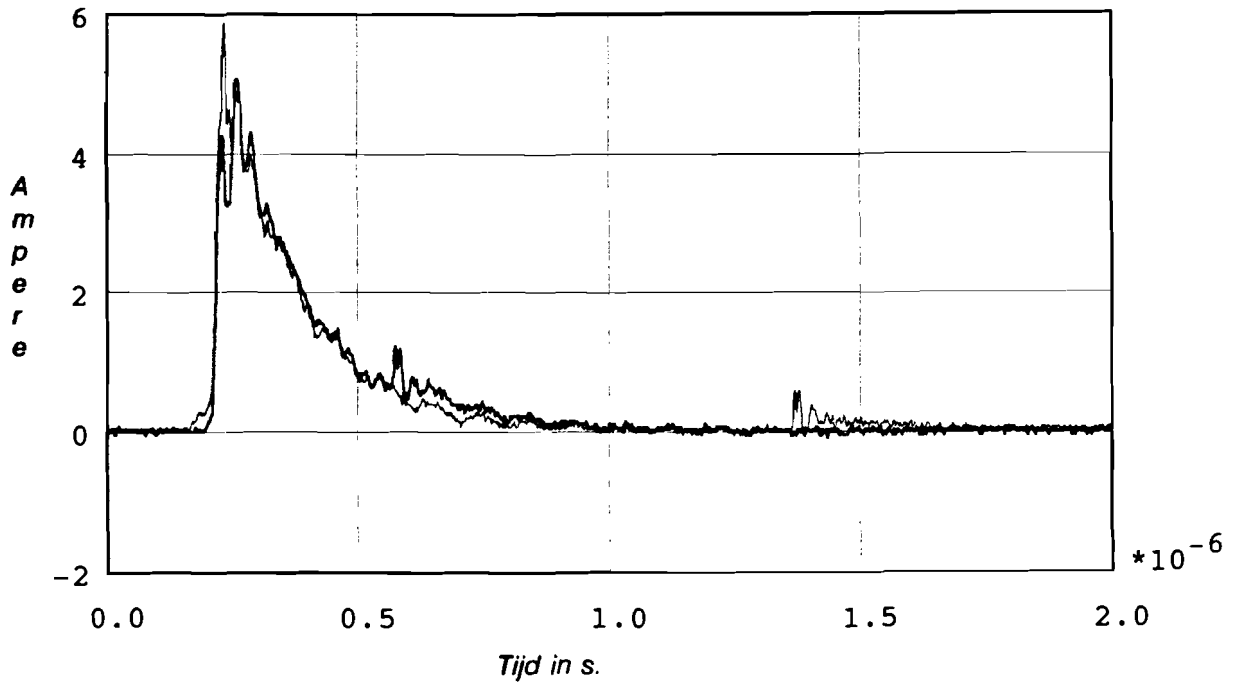


Grafiek 9a: De stromen ( in lucht) bij spanningspuls van 20 kV en een stijgweerstand van 2 k $\Omega$ . De meting in lucht van grafiek 7 ( dun) samen met een nieuwe die een extra dc-offset heeft van 0 V ( dik).

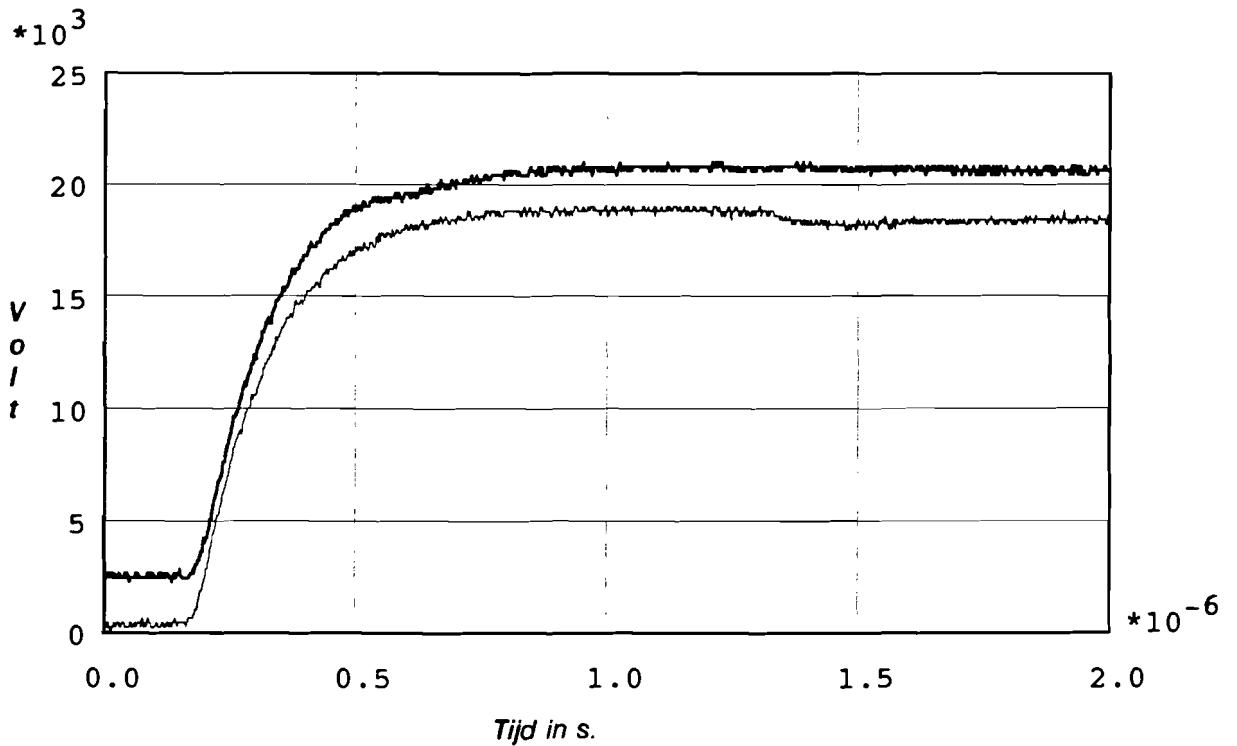


Grafiek 9b: De spanningen in lucht bij een spanningspuls van 20 kV en een stijgweerstand van 2 k $\Omega$ . De meting in lucht van grafiek 7 ( dun) samen met een nieuwe die een extra dc-offset heeft van 0 V (dik).

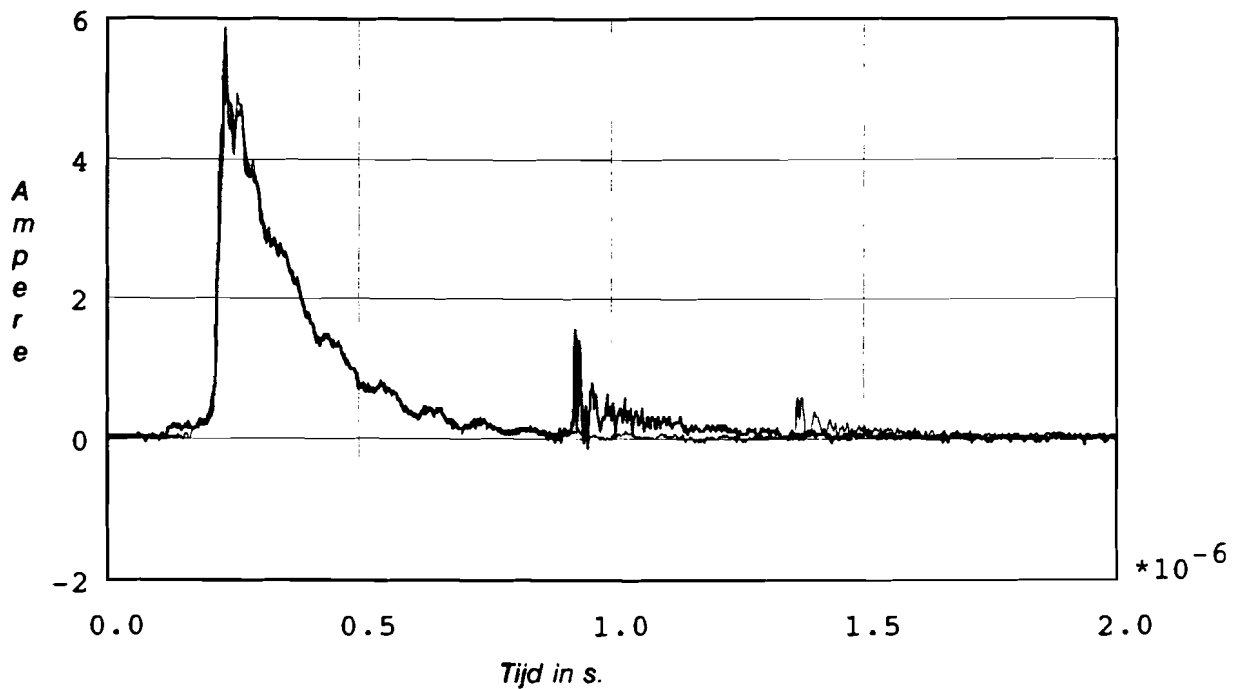




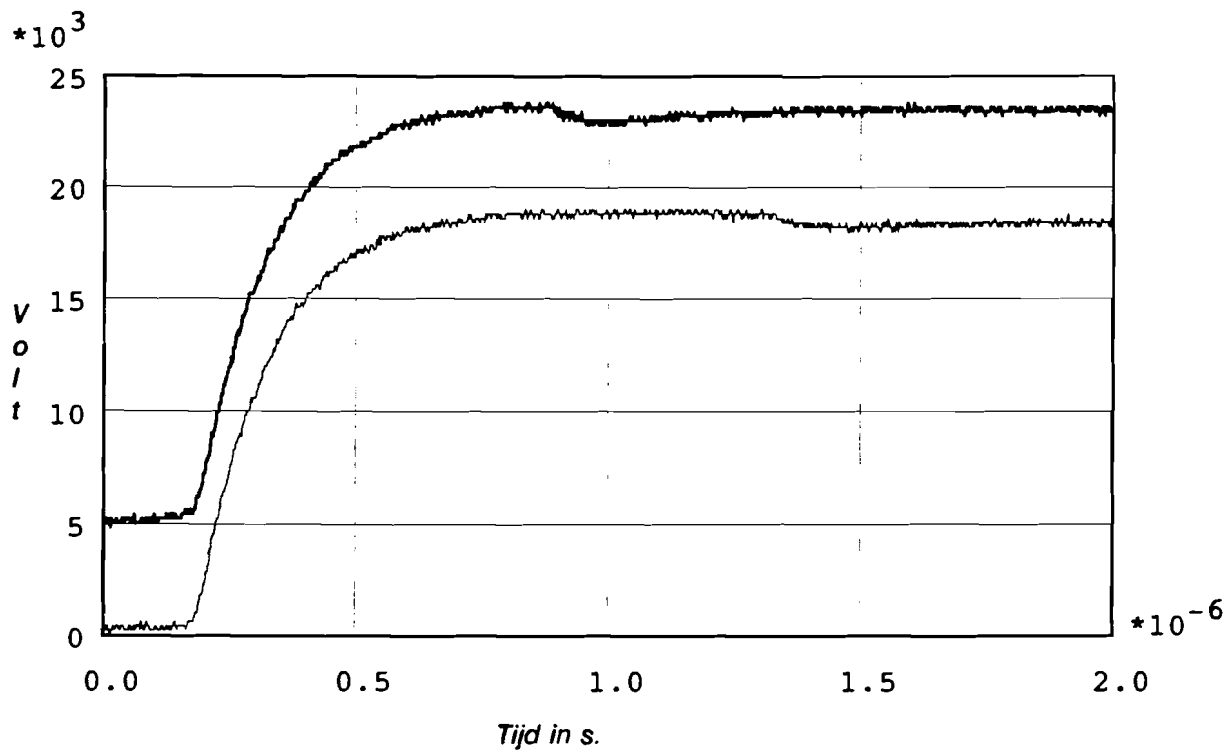
Grafiek 10a: De stromen in lucht tegen de tijd bij 20 kV en 2 kΩ voor een meting met een dc-offset van 0 (dun) en 2.5 kV (dik).



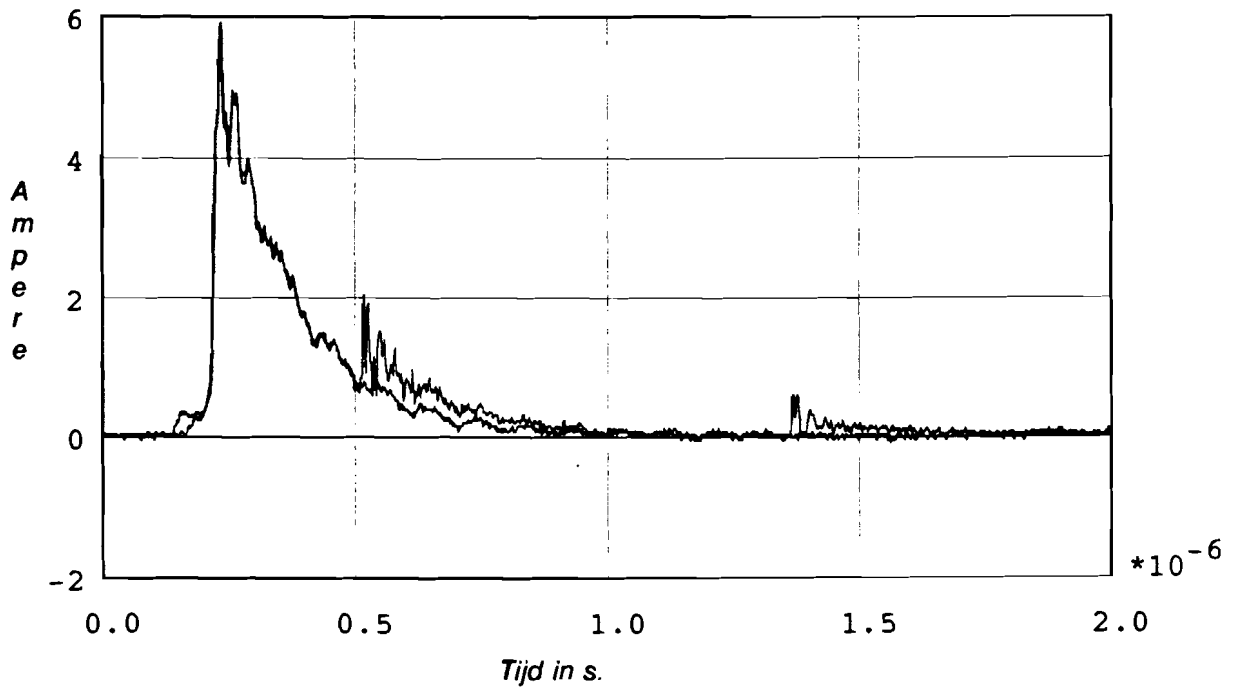
Grafiek 10b: De spanningen in lucht tegen de tijd bij 20 kV en 2 kΩ voor een meting met een dc-offset van 0 (dun) en 2.5 kV (dik).



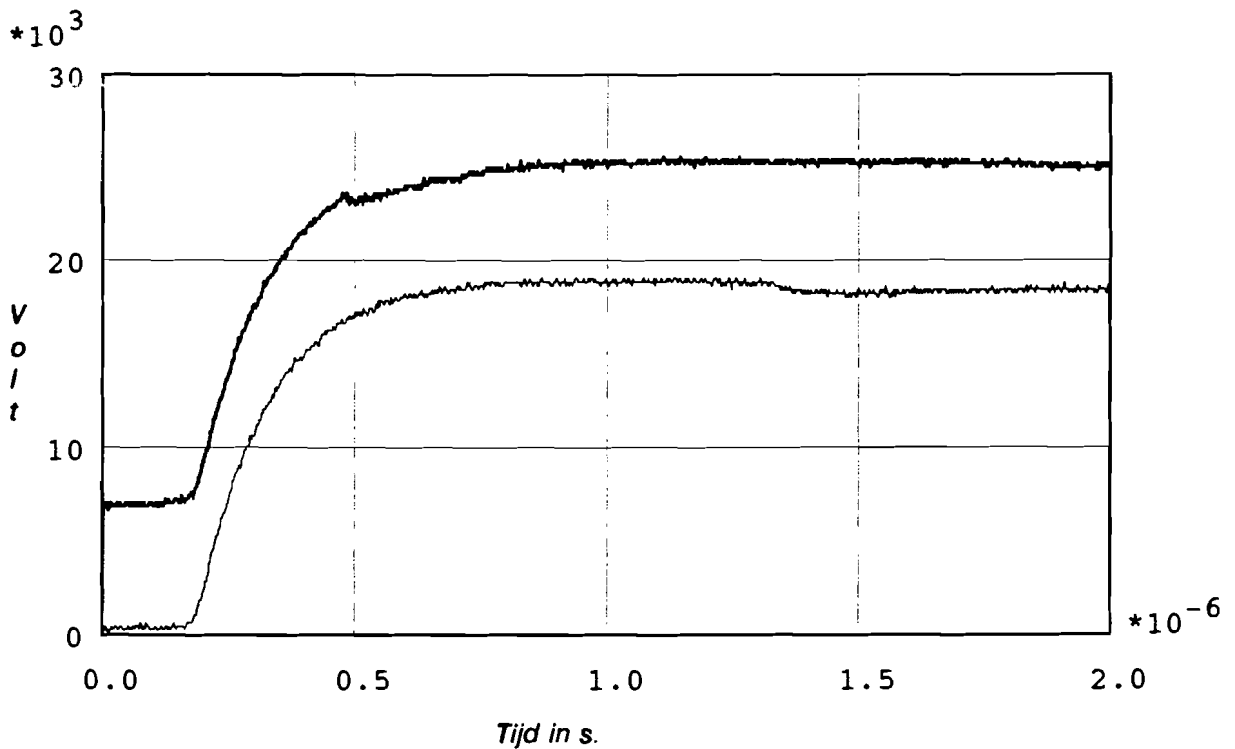
Grafiek 11a: De stromen in lucht tegen de tijd bij 20 kV en 2 kΩ voor een meting met een dc-offset van 0 (dun) en 5 kV (dik).



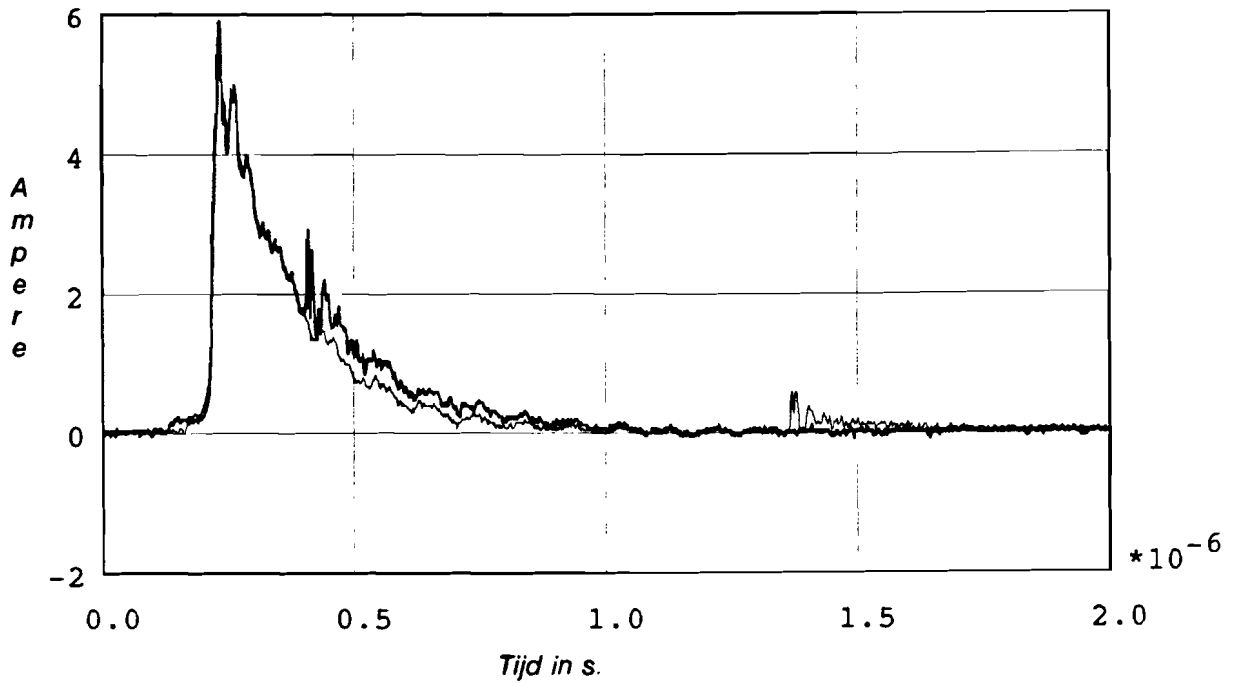
Grafiek 11b: De spanningen in lucht tegen de tijd bij 20 kV en 2 kΩ voor een meting met een dc-offset van 0 (dun) en 5 kV (dik).



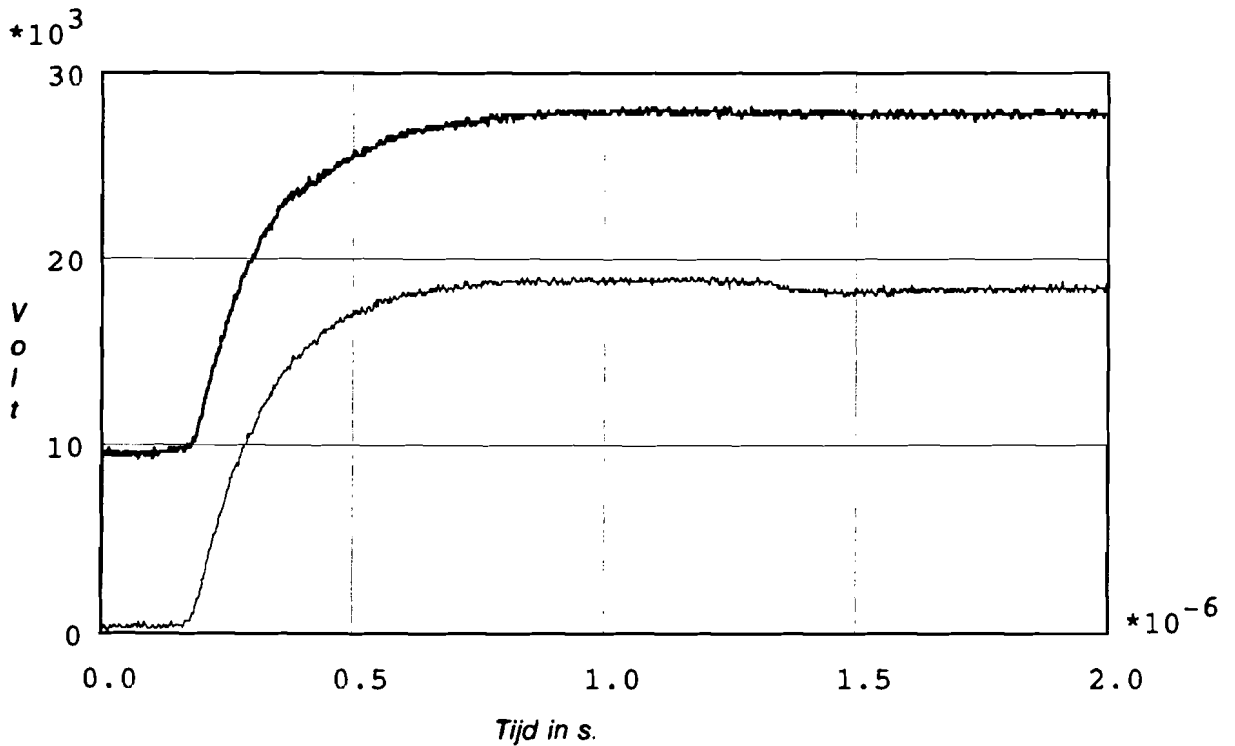
Grafiek 12a: De stromen in lucht tegen de tijd bij 20 kV en 2 k $\Omega$  voor een meting met een dc-offset van 0 (dun) en 7.5 kV (dik).



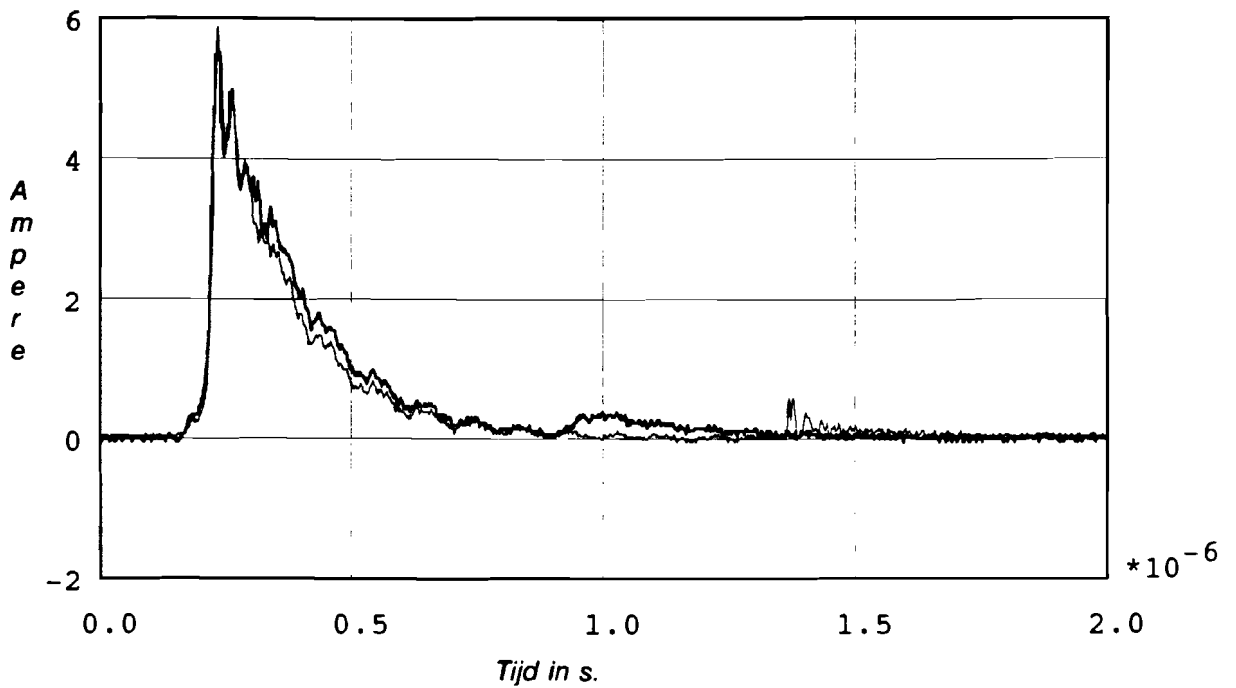
Grafiek 12b: De spanningen in lucht tegen de tijd bij 20 kV en 2 k $\Omega$  voor een meting met een dc-offset van 0 (dun) en 7.5 kV (dik).



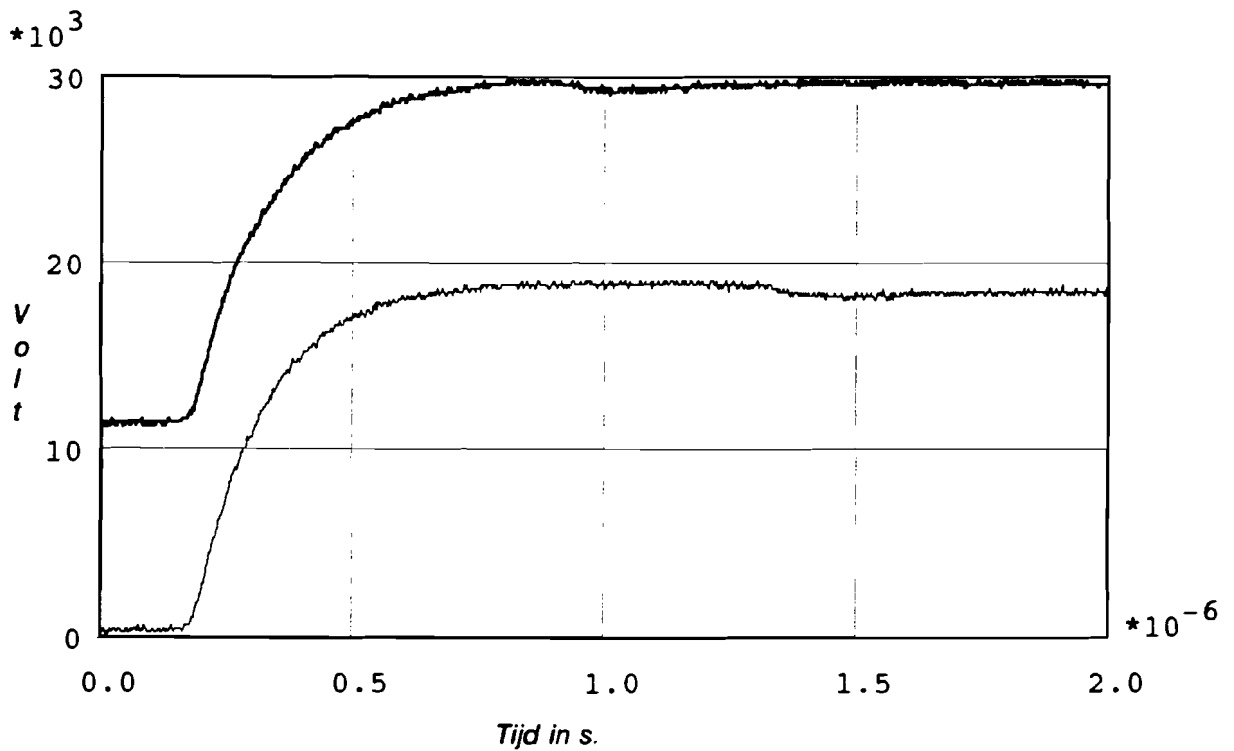
Grafiek 13a: De stromen in lucht tegen de tijd bij 20 kV en 2 k $\Omega$  voor een meting met een dc-offset van 0 (dun) en 10 kV (dik).



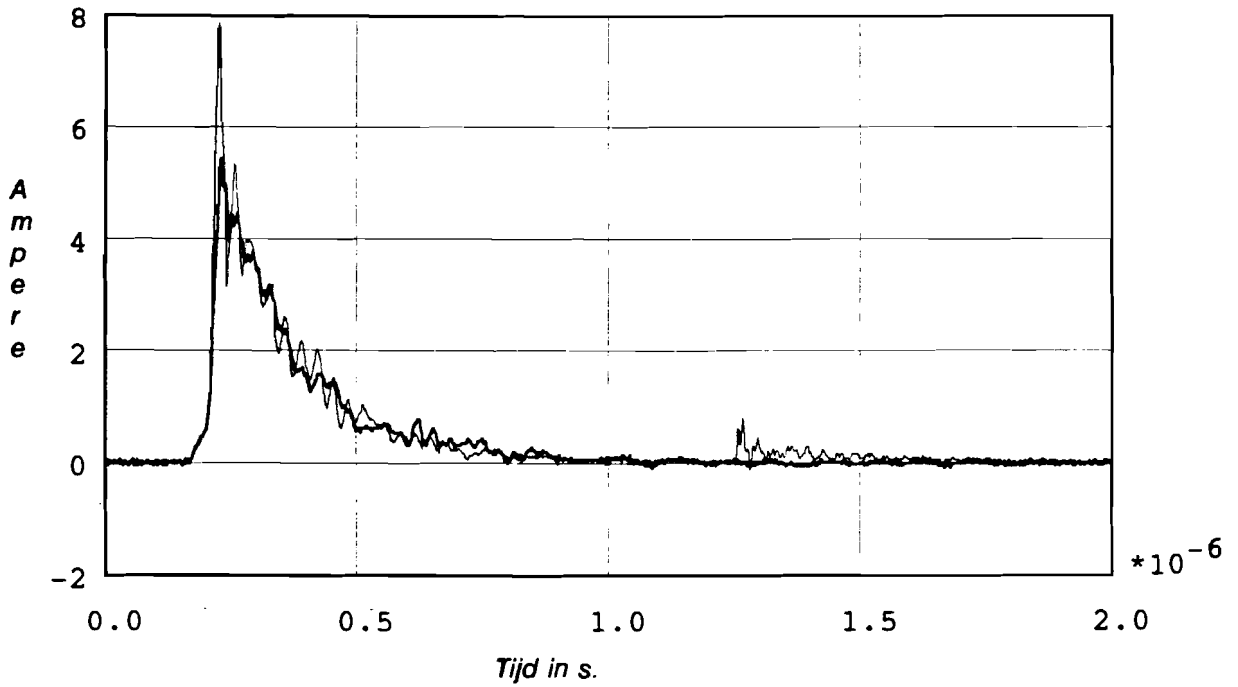
Grafiek 13b: De spanningen in lucht tegen de tijd bij 20 kV en 2 k $\Omega$  voor een meting met een dc-offset van 0 (dun) en 10 kV (dik).



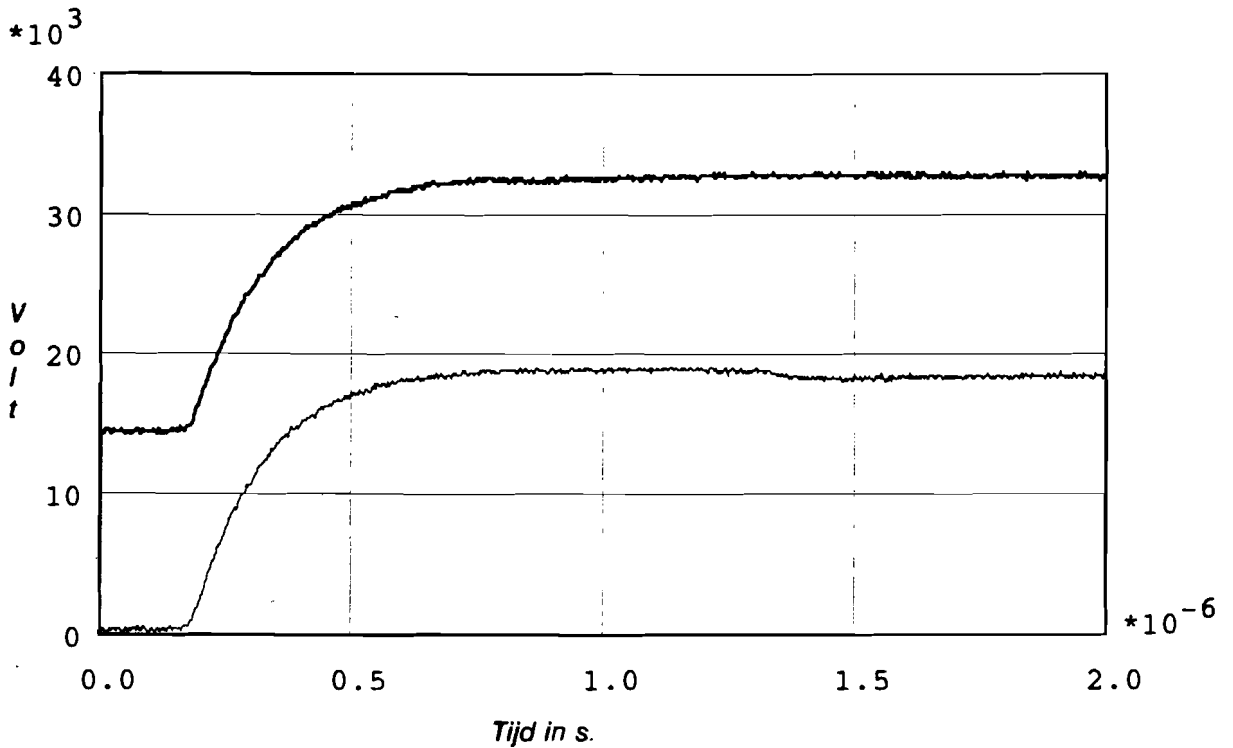
Grafiek 14a: De stromen in lucht tegen de tijd bij 20 kV en 2 k $\Omega$  voor een meting met een dc-offset van 0 (dun) en 12.5 kV (dik).



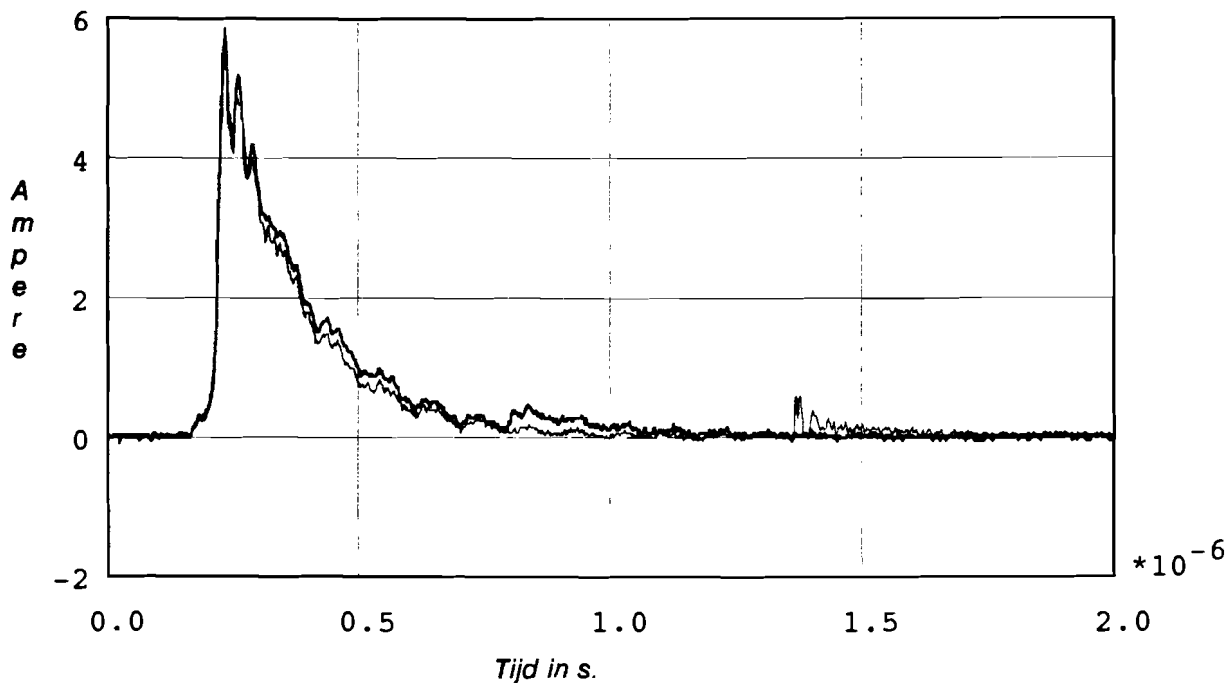
Grafiek 14b: De spanningen in lucht tegen de tijd bij 20 kV en 2 k $\Omega$  voor een meting met een dc-offset van 0 (dun) en 12.5 kV (dik).



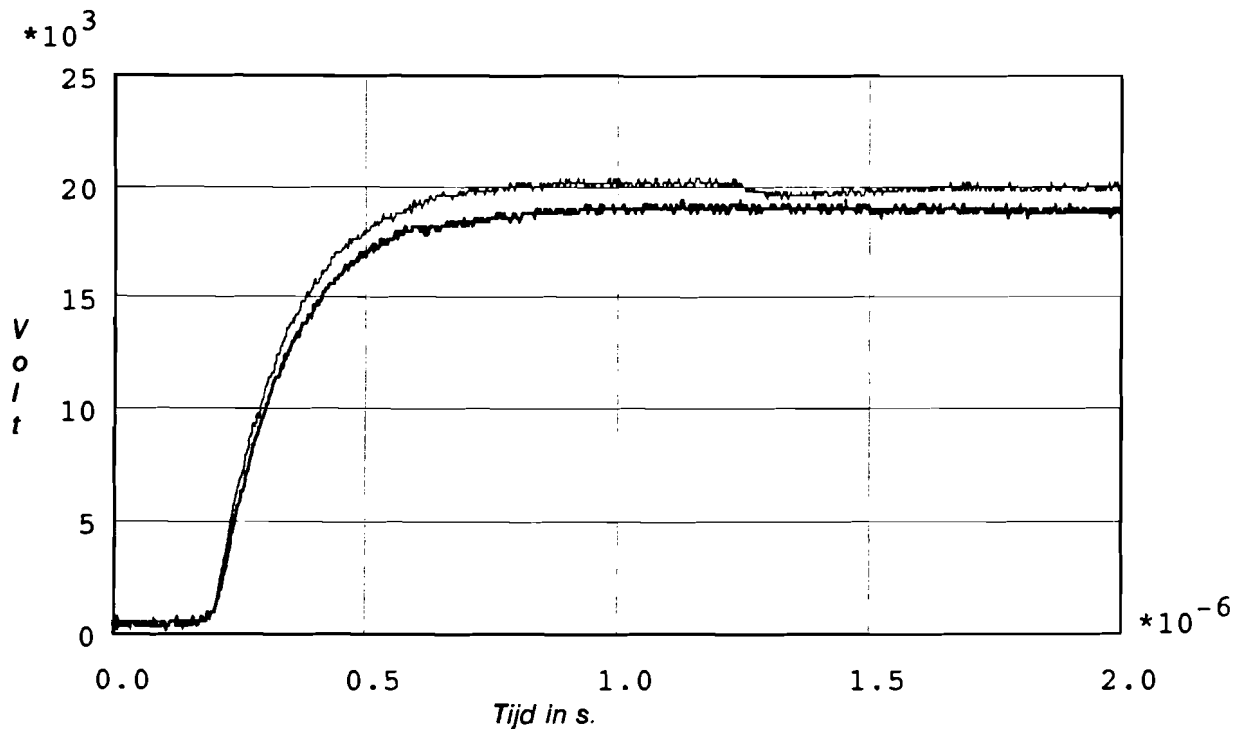
Grafiek 15a: De stromen in lucht tegen de tijd bij 20 kV en 2 kΩ voor een meting met een dc-offset van 0 (dun) en 15 kV (dik).



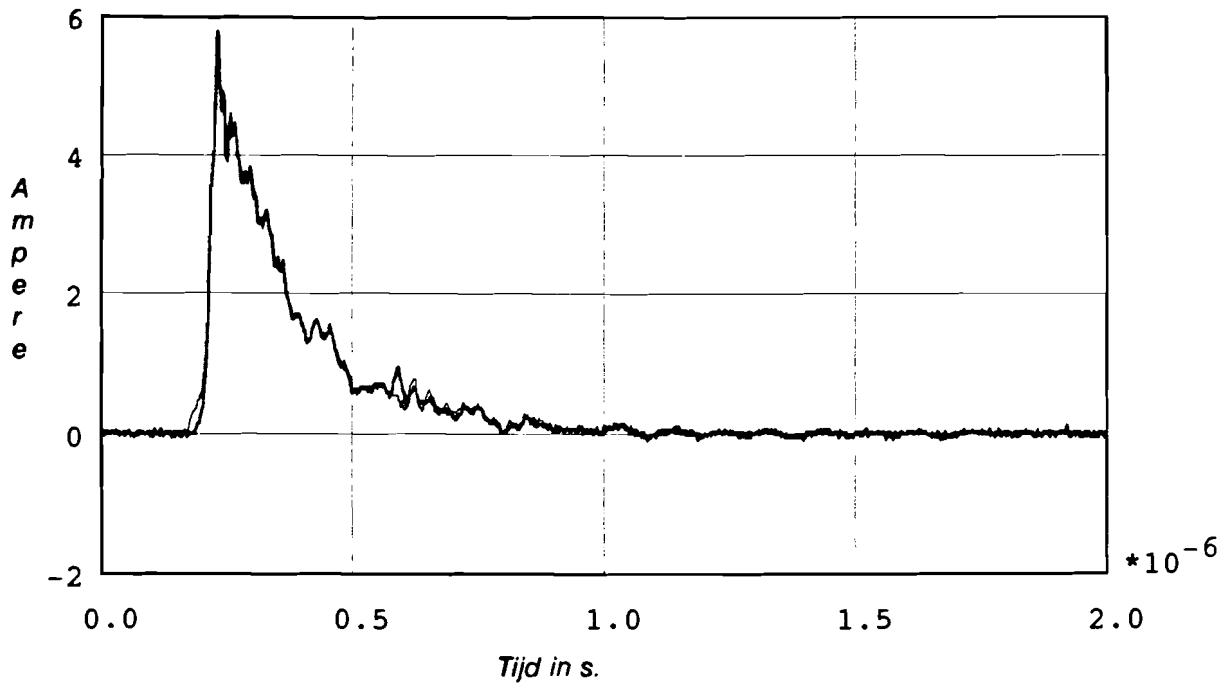
Grafiek 15b: De spanningen in lucht tegen de tijd bij 20 kV en 2 kΩ voor een meting met een dc-offset van 0 (dun) en 15 kV (dik).



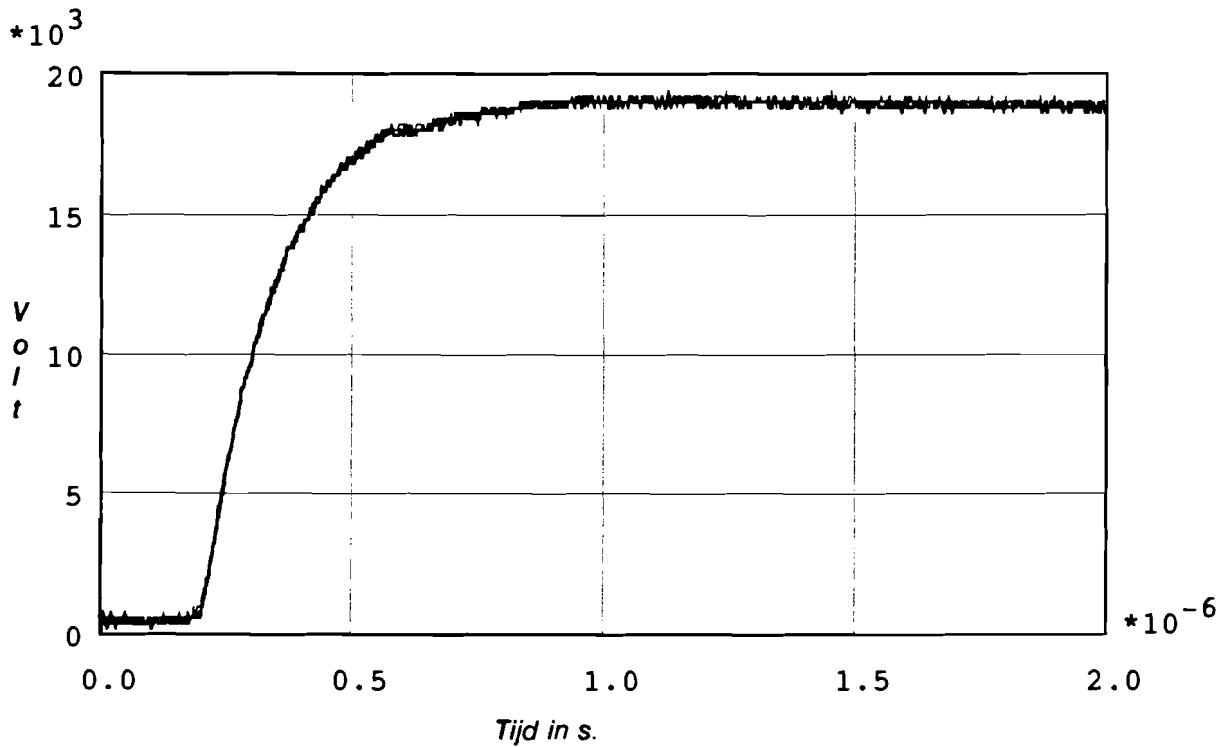
Grafiek 16a: De stromen ( in lucht) bij een spanningspuls van 20 kV en een stijgweerstand van 2 k $\Omega$ . De meting in lucht van grafiek 7 ( dun) samen met een referentie meting zonder extra zelfinductie.



Grafiek 16b: De spanningen ( in lucht) bij een spanningspuls van 20 kV en een stijgweerstand van 2 k $\Omega$ . De meting in lucht van grafiek 7 ( dun) samen met een referentie meting zonder extra zelfinductie.

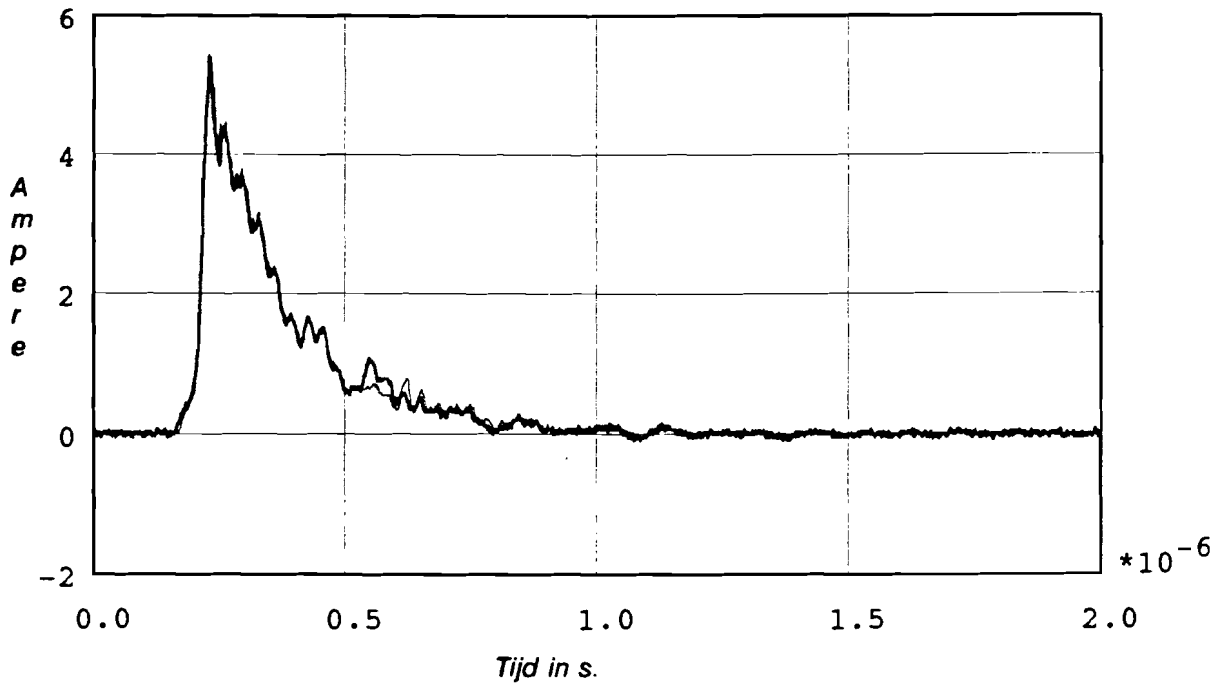


Grafiek 17a: De stromen in lucht tegen de tijd bij 20 kV en 2 kΩ. Zonder extra L (dun) en met een spoel tussen de stijgweerstand en de vonkbrug (dik).

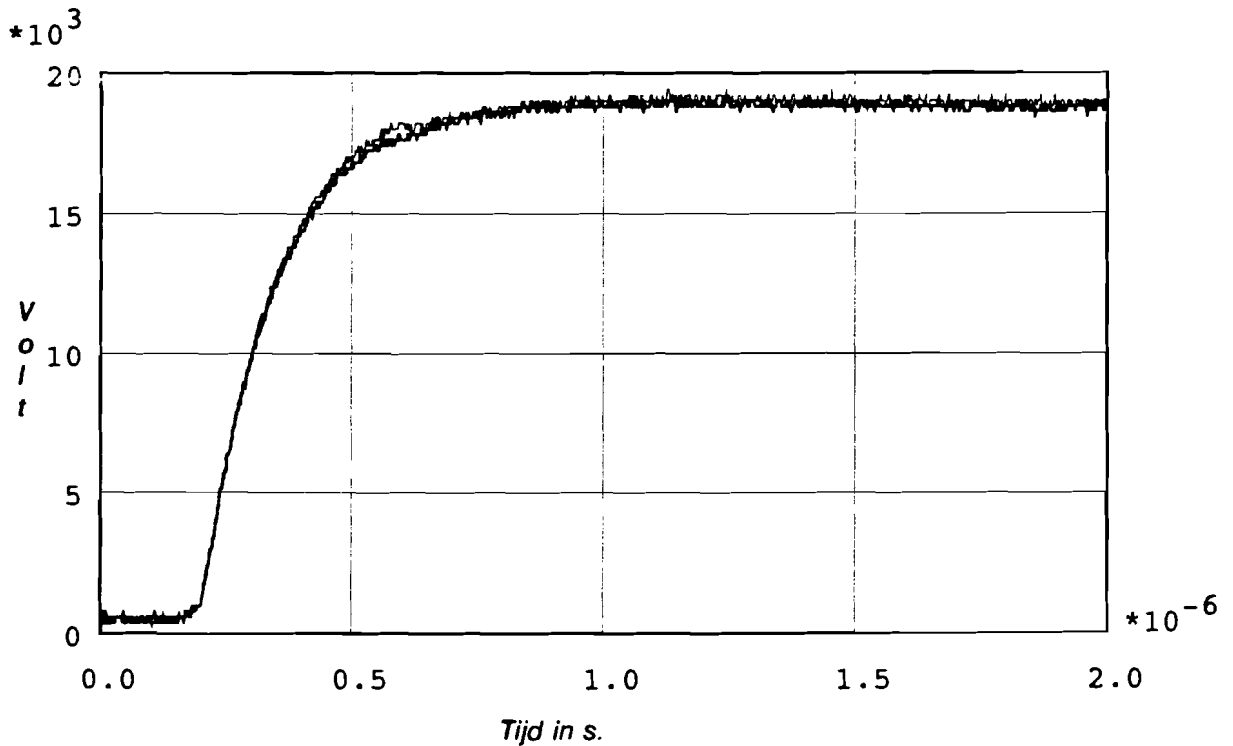


Grafiek 17b: De spanningen in lucht tegen de tijd bij 20 kV en 2 kΩ. Zonder extra L (dun) en met een spoel tussen de stijgweerstand en de vonkbrug (dik).

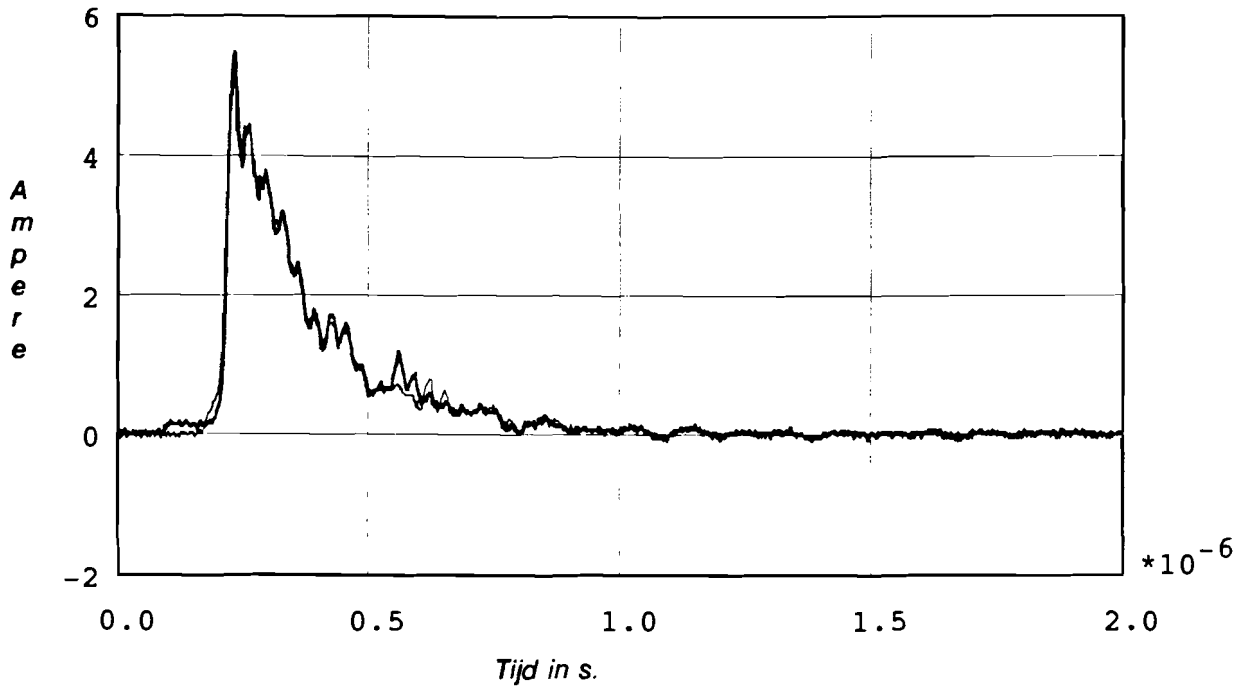




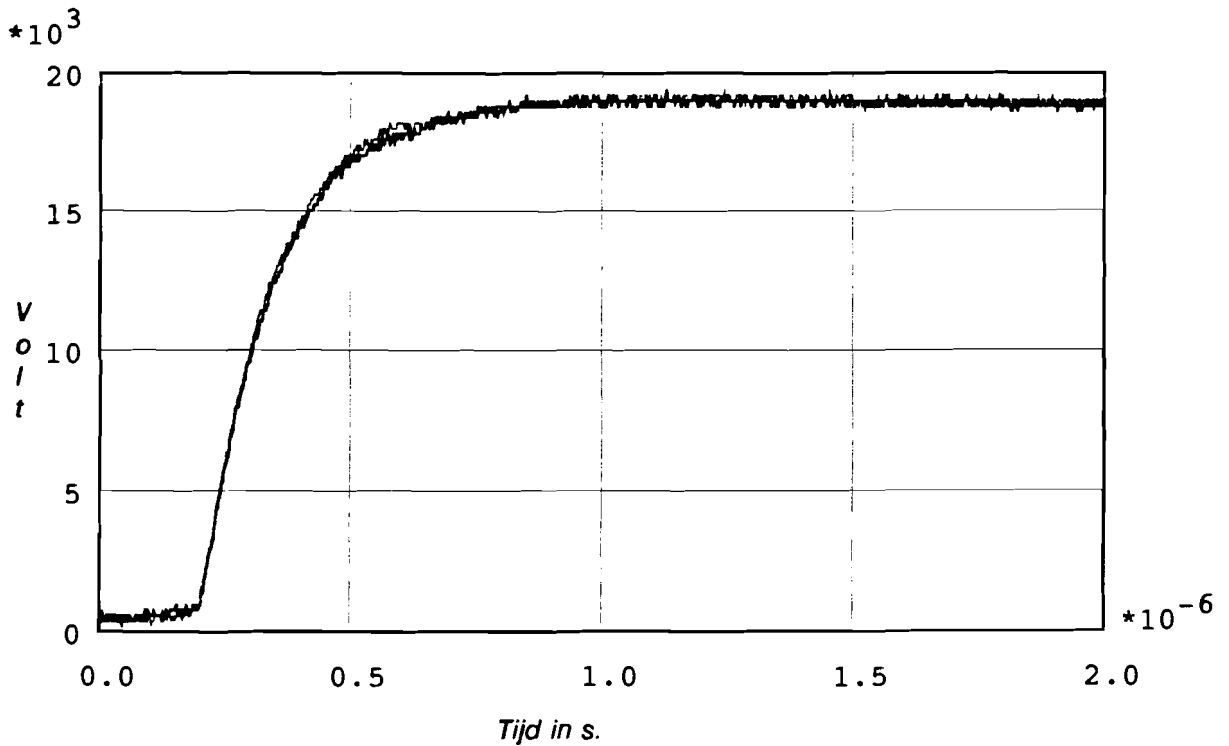
Grafiek 18a: De stromen in lucht tegen de tijd bij 20 kV en 2 kΩ. Zonder extra L (dun) en met een spoel tussen de stijgweerstand en de onderkant van de condensator (dik).



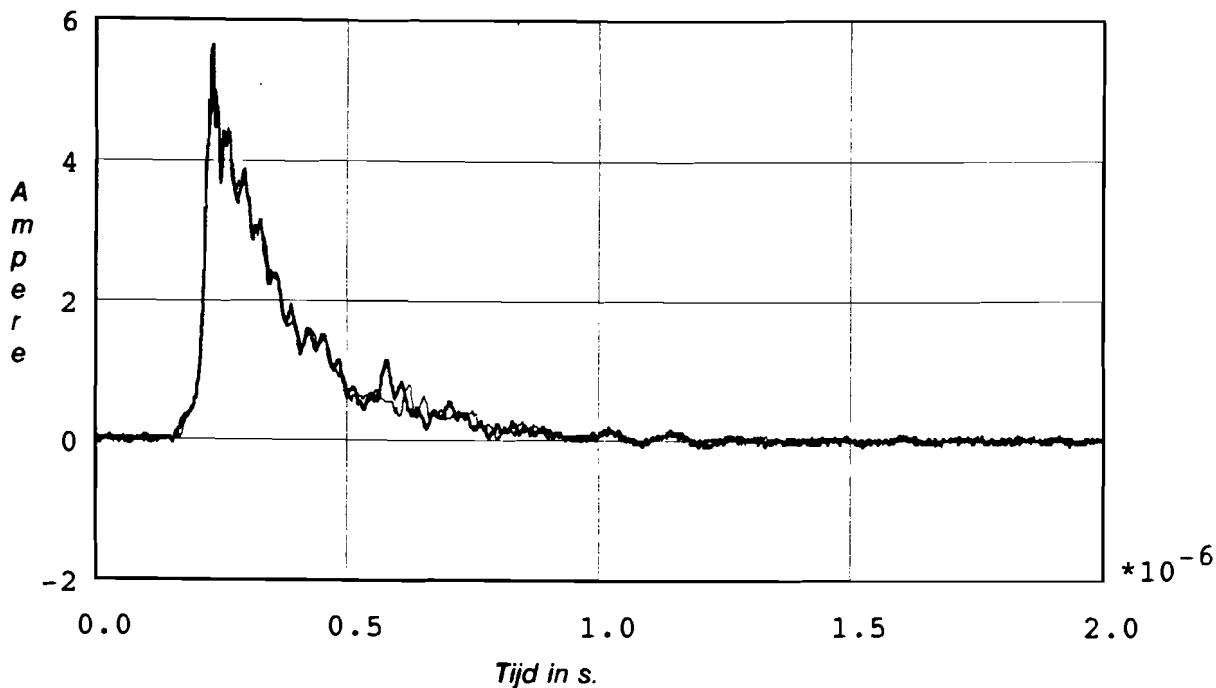
Grafiek 18b: De spanningen in lucht tegen de tijd bij 20 kV en 2 kΩ. Zonder extra L (dun) en met een spoel tussen de stijgweerstand en de onderkant van de condensator (dik).



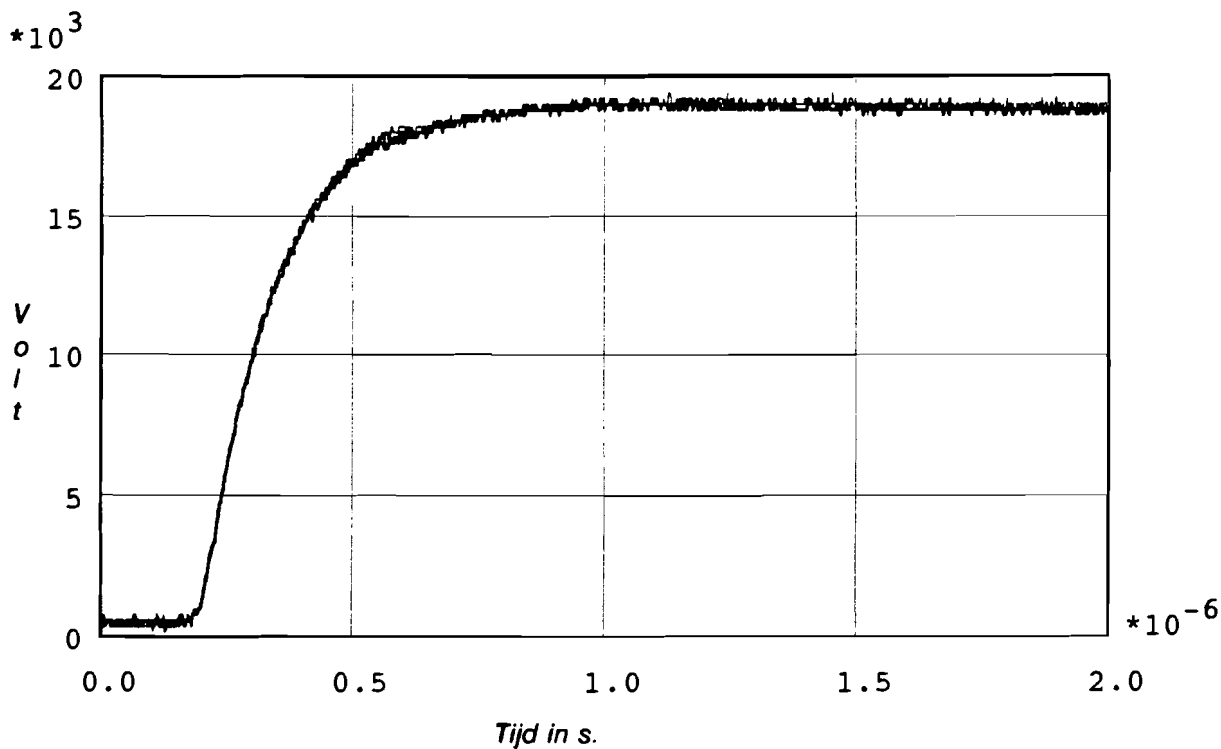
Grafiek 19a: De stromen in lucht tegen de tijd bij 20 kV en 2 kΩ. Zonder extra L (dun) en met een spoel tussen de dempweerstand en de onderkant van de condensator (dik).



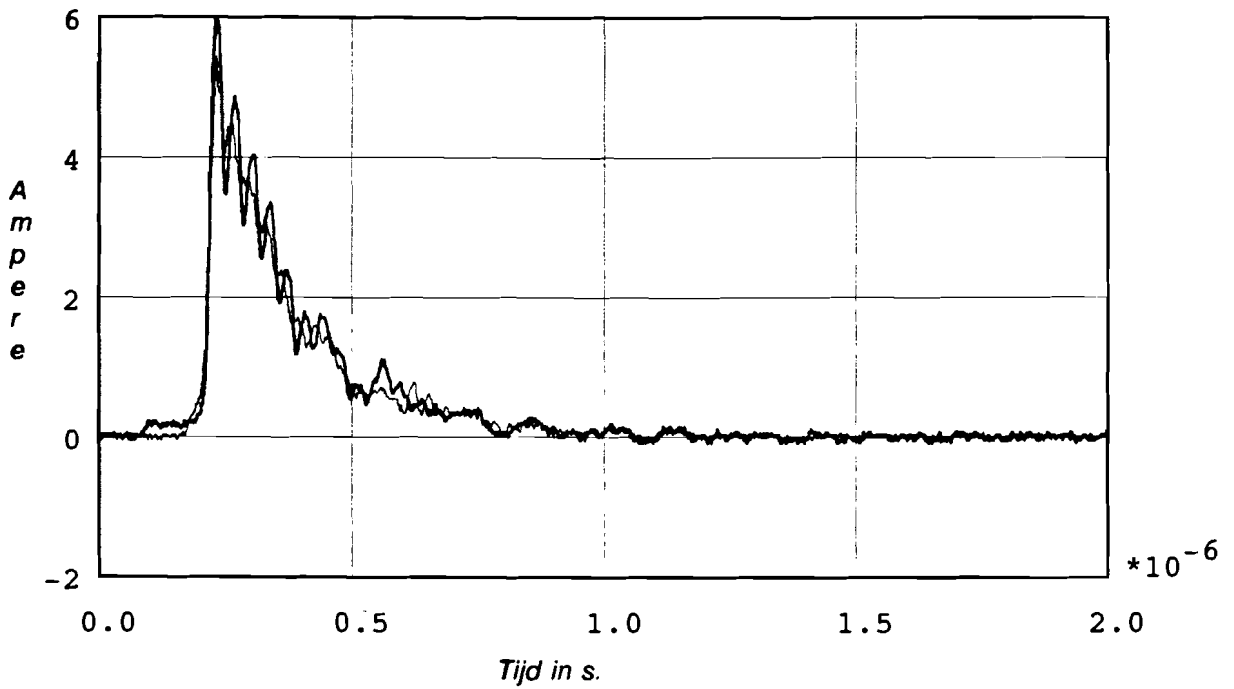
Grafiek 19b: De spanningen in lucht tegen de tijd bij 20 kV en 2 kΩ. Zonder extra L (dun) en met een spoel tussen de dempweerstand en de onderkant van de condensator (dik).



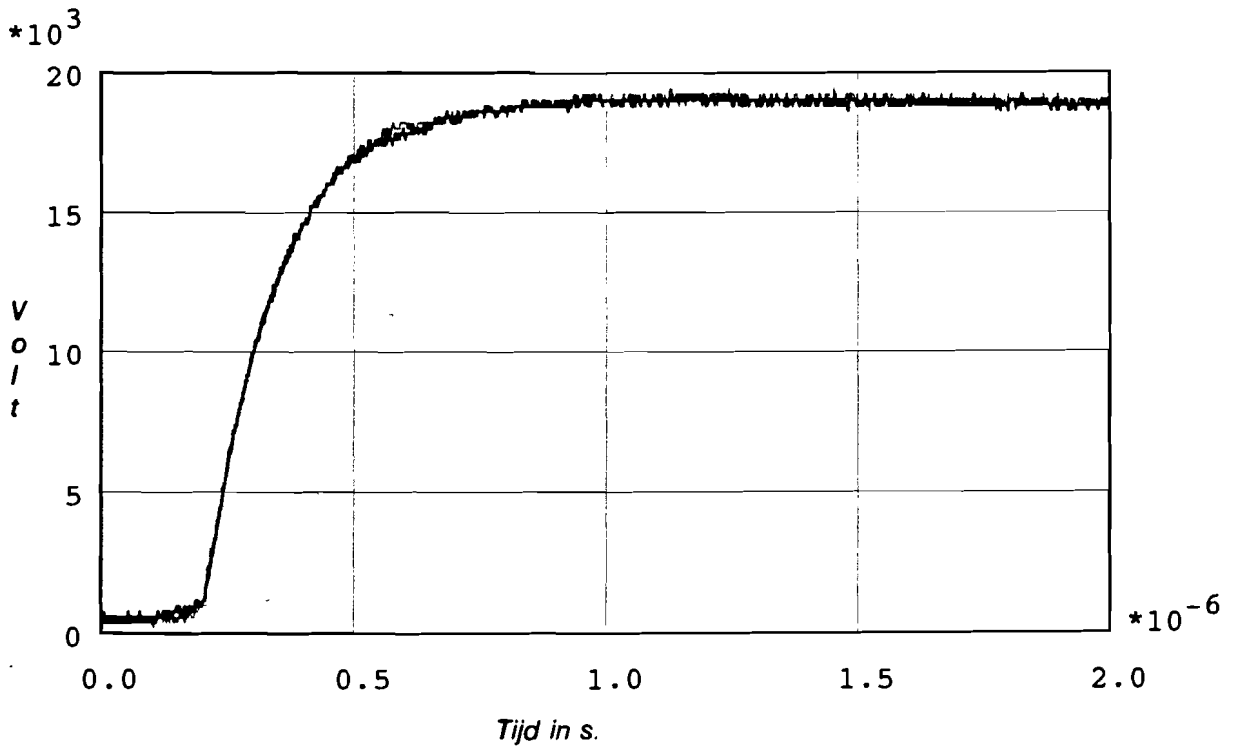
Grafiek 20a: De stromen in lucht tegen de tijd bij 20 kV en 2 kΩ. Zonder extra L ( dun) en met een spoel tussen de ontladweerstand en de bovenkant van de condensator (dik).



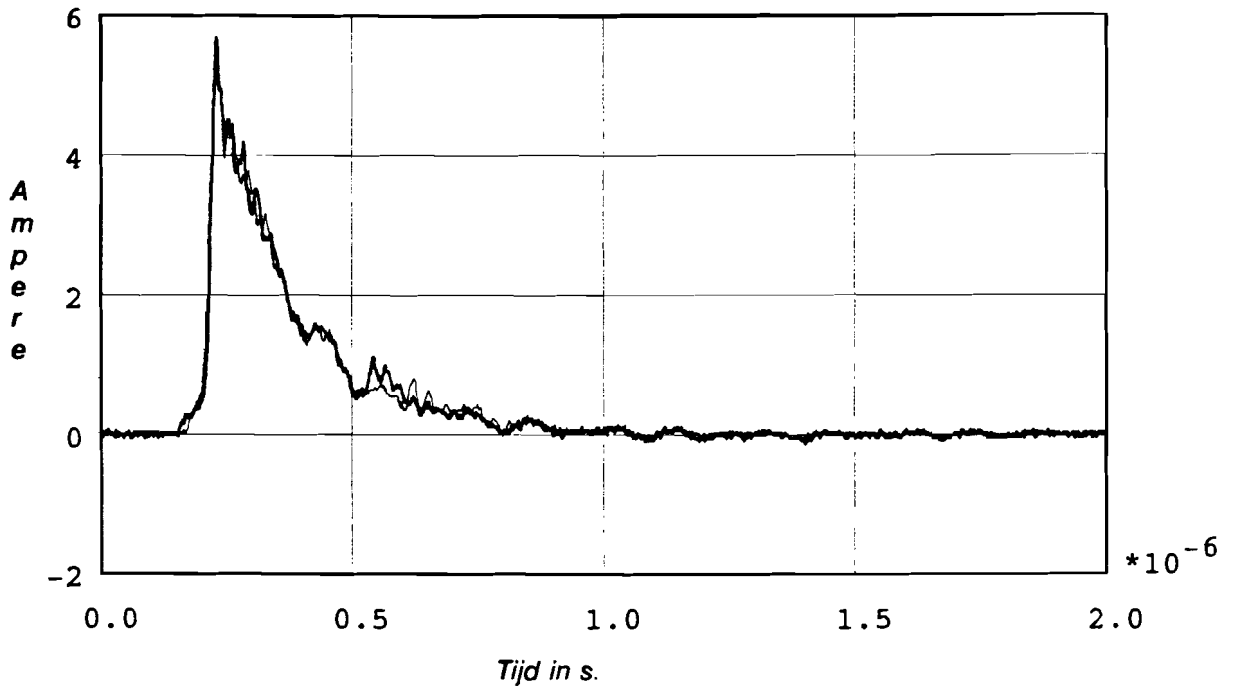
Grafiek 20b: De spanningen in lucht tegen de tijd bij 20 kV en 2 kΩ. Zonder extra L ( dun) en met een spoel tussen de ontladweerstand en de bovenkant van de condensator ( dik).



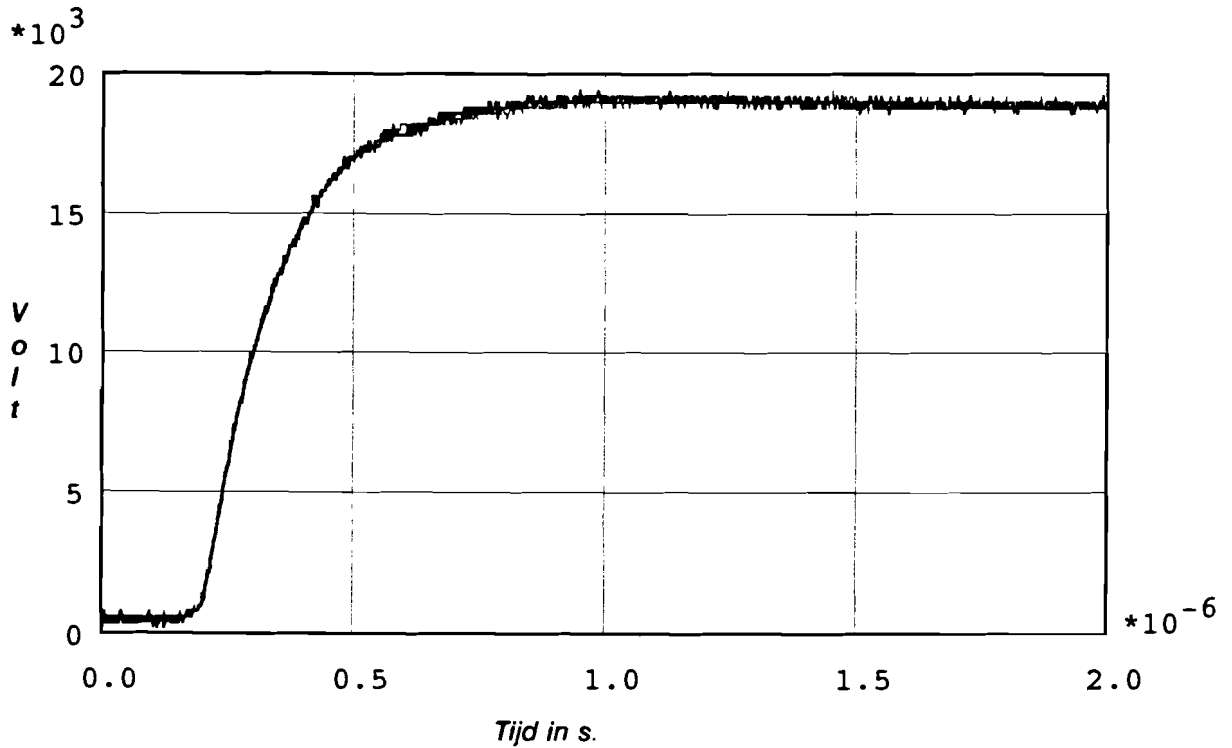
Grafiek 21a: De stromen in lucht tegen de tijd bij 20 kV en 2 kΩ. Zonder extra L (dun) en met een spoel tussen de doorvoer en de bovenkant van de condensator (dik).



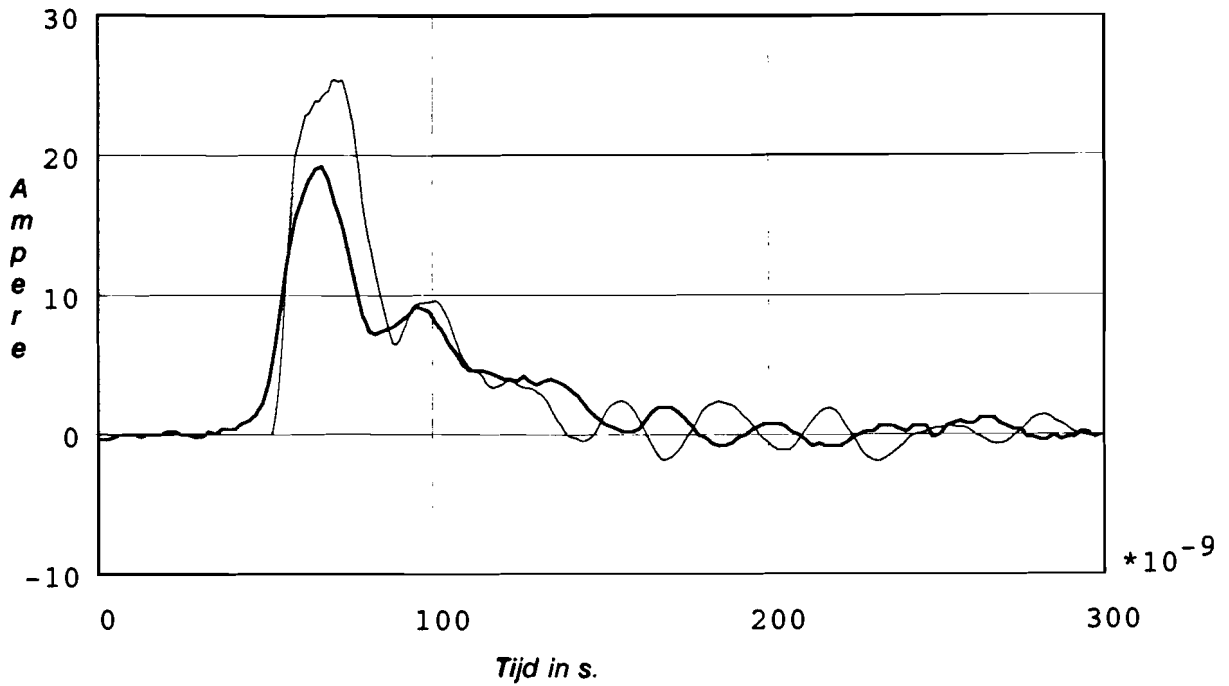
Grafiek 21b: De spanningen in lucht tegen de tijd bij 20 kV en 2 kΩ. Zonder extra L (dun) en met een spoel tussen de doorvoer en de bovenkant van de condensator (dik).



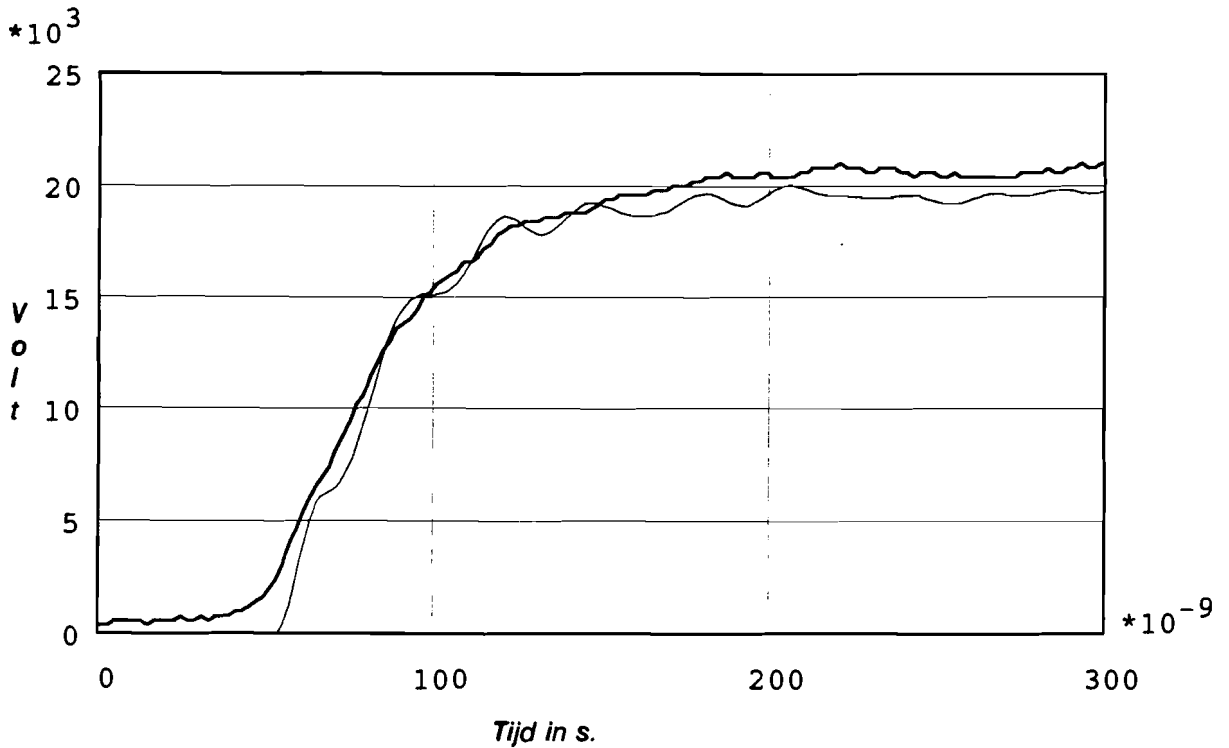
Grafiek 22a: De stromen in lucht tegen de tijd bij 20 kV en 2 kΩ. Zonder extra L (dun) en met een spoel tussen de binnenbuis en het sterpunt (dik).



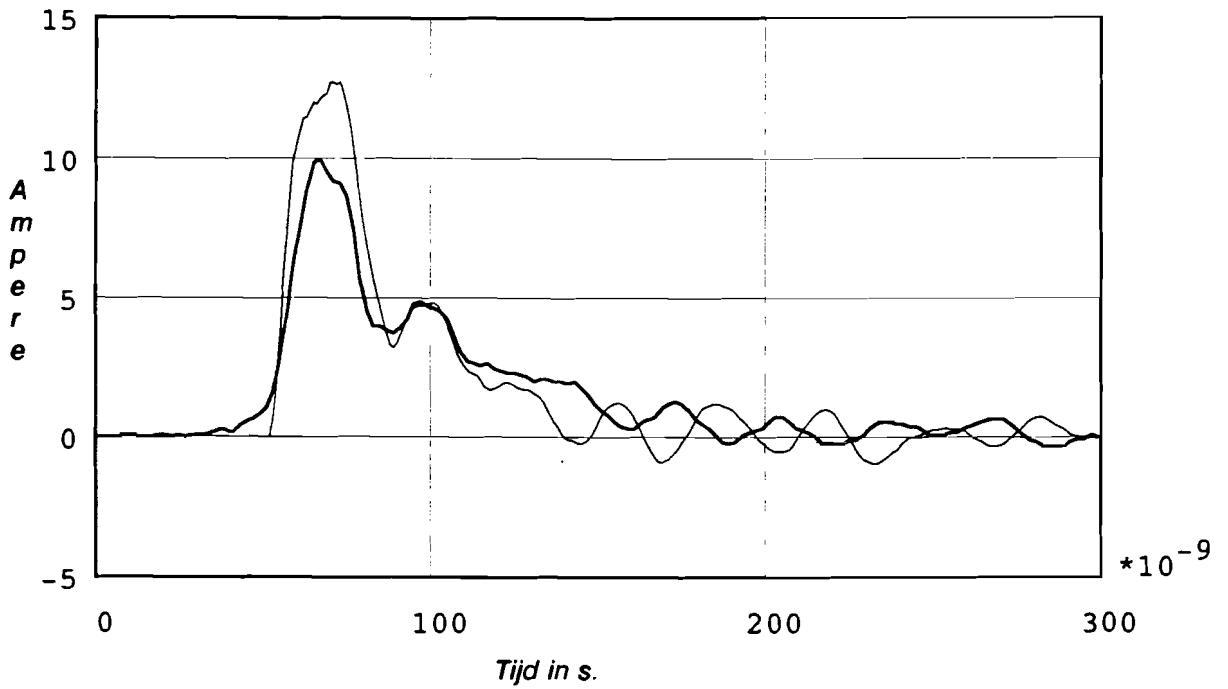
Grafiek 22b: De spanningen in lucht tegen de tijd bij 20 kV en 2 kΩ. Zonder extra L (dun) en met een spoel tussen de binnenbuis en het sterpunt (dik).



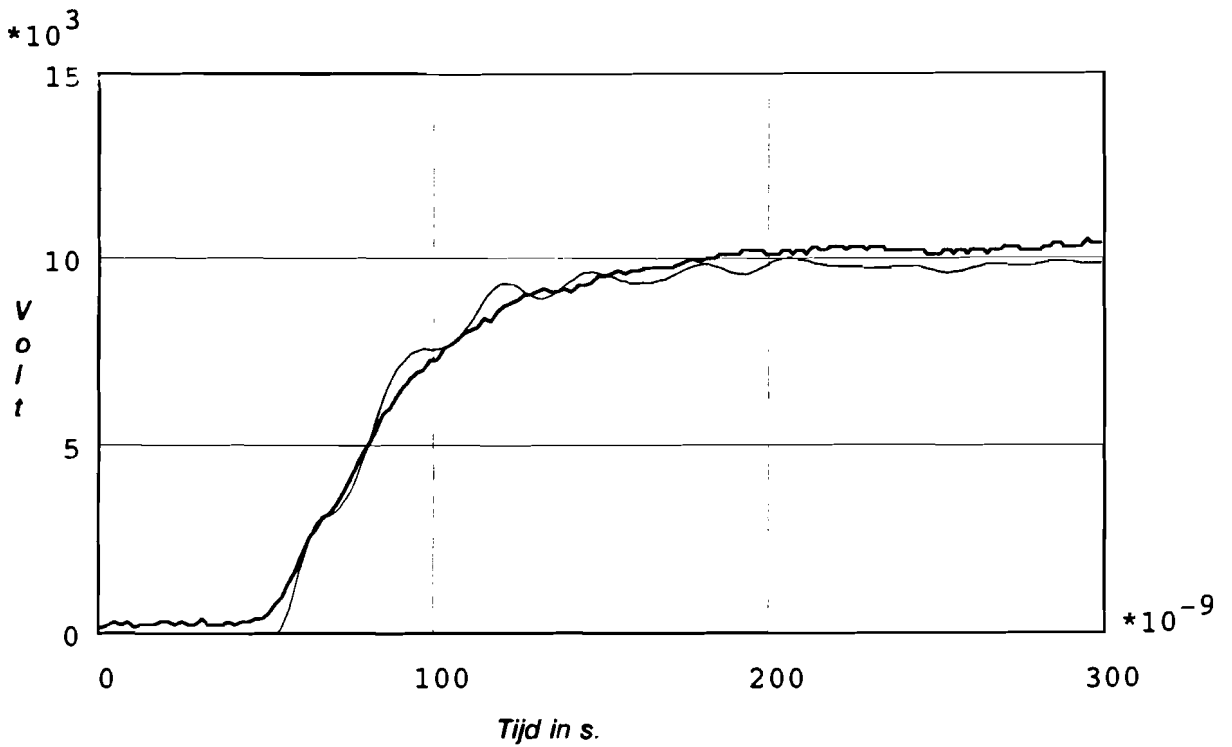
Grafiek 23a: De berekende (dun) en de gemeten (dik) stroom tegen de tijd bij een spanningspuls van 20 kV en een stijgweerstand van 0.5 k $\Omega$ .



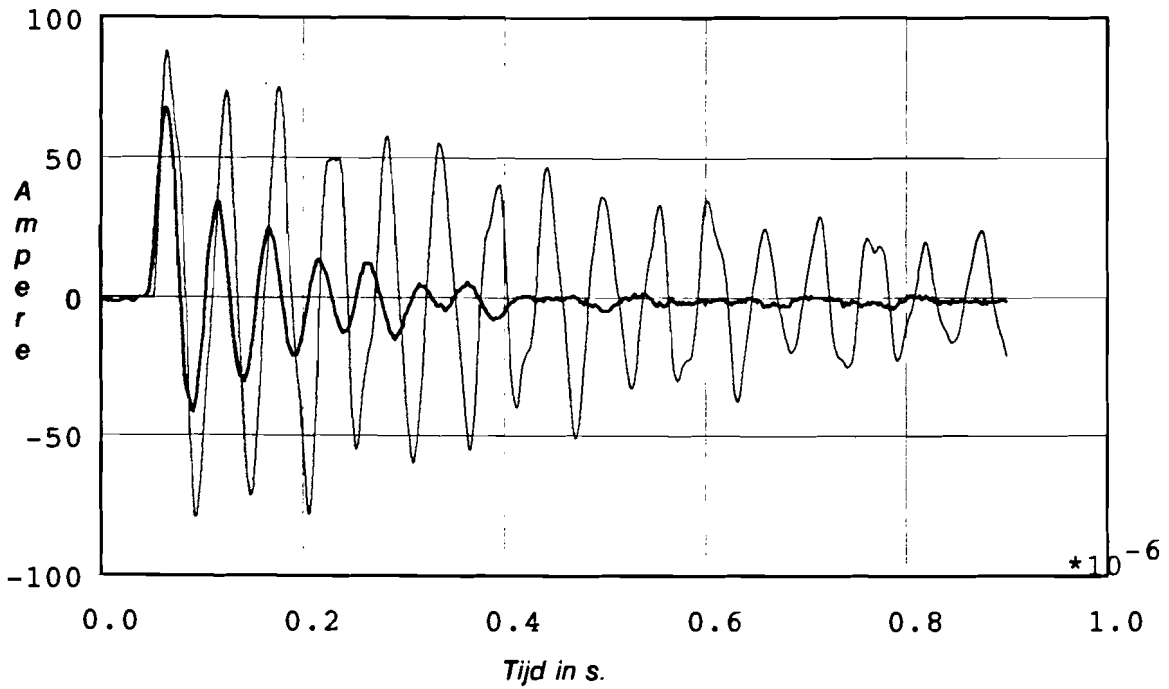
Grafiek 23b: De berekende (dun) en de gemeten (dik) spanning tegen de tijd bij een spanningspuls van 20 kV en een stijgweerstand van 0.5 k $\Omega$ .



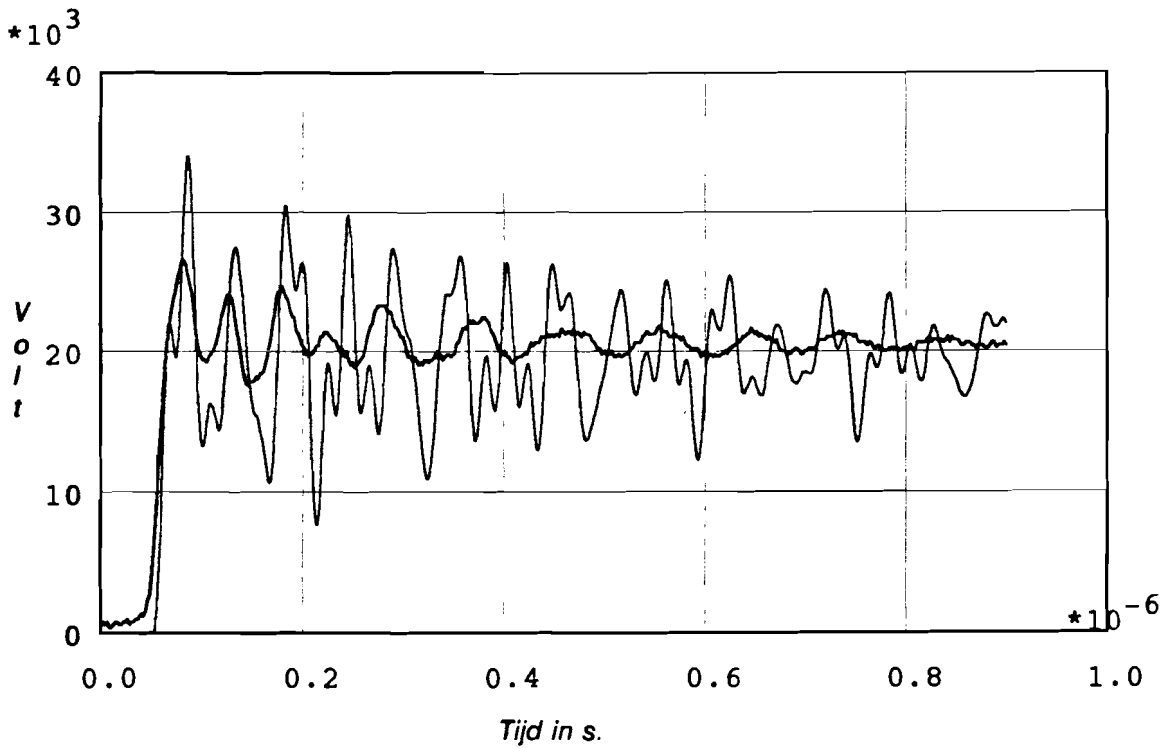
Grafiek 24a: De berekende (dun) en de gemeten (dik) stroom tegen de tijd bij 10 kV en 0.5 k $\Omega$ .



Grafiek 24b: De berekende (dun) en de gemeten (dik) spanning tegen de tijd bij 20 kV en 0.5 k $\Omega$ .

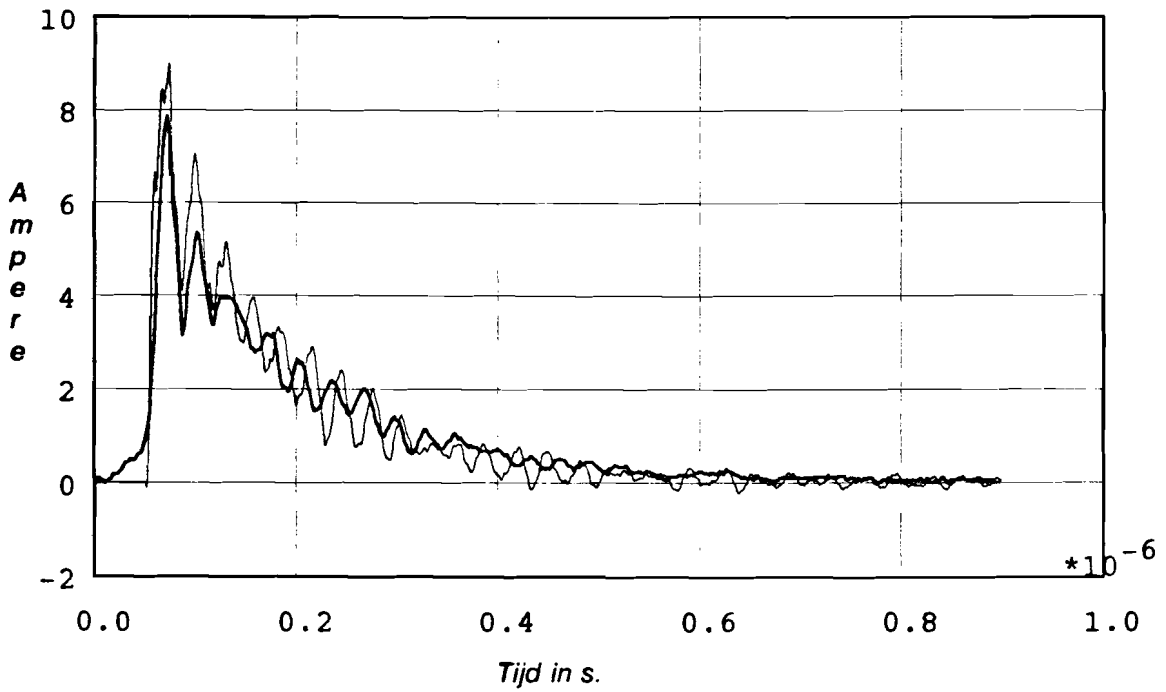


Grafiek 25a: De berekende (dun) en de gemeten (dik) stroom tegen de tijd bij 20 kV en  $0 \Omega$ .

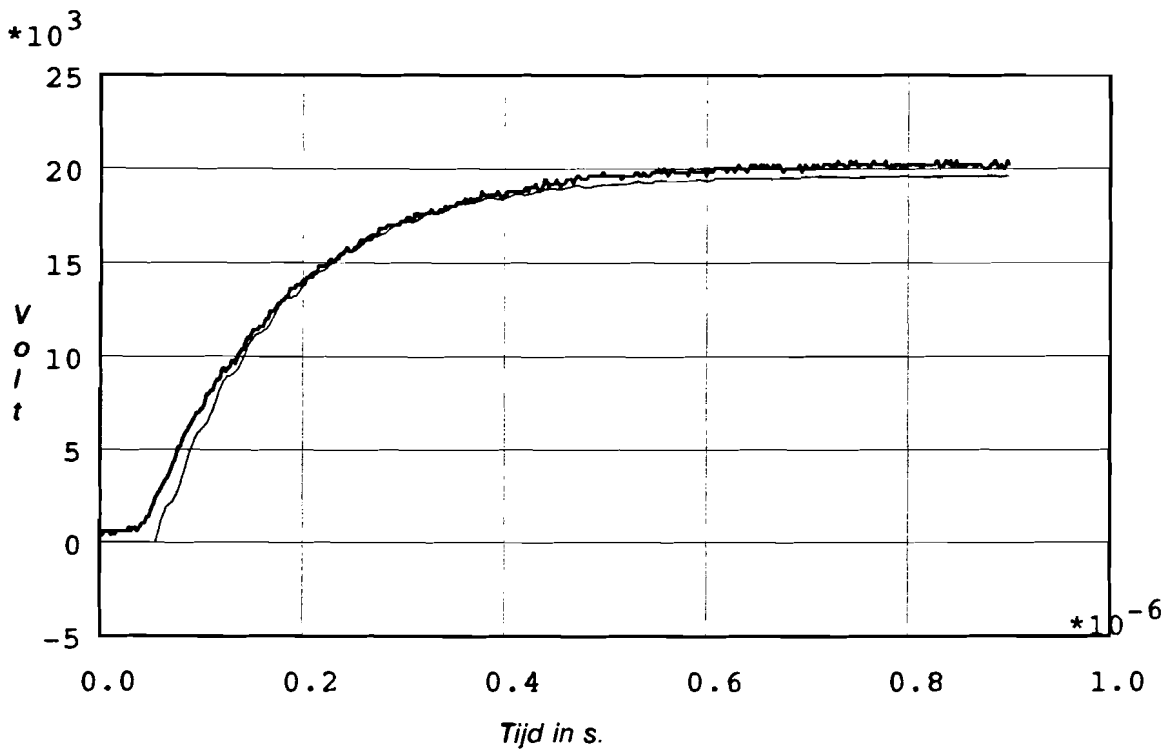


Grafiek 25b: De berekende (dun) en de gemeten (dik) spanning tegen de tijd bij 20 kV en  $0 \Omega$ .

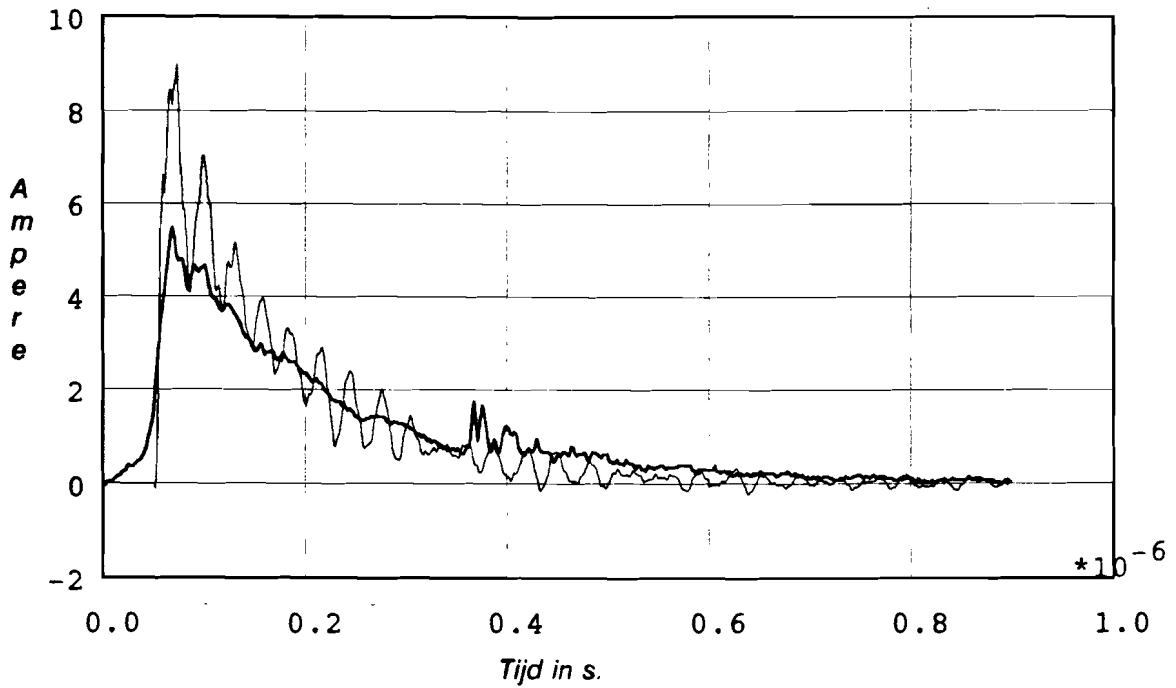




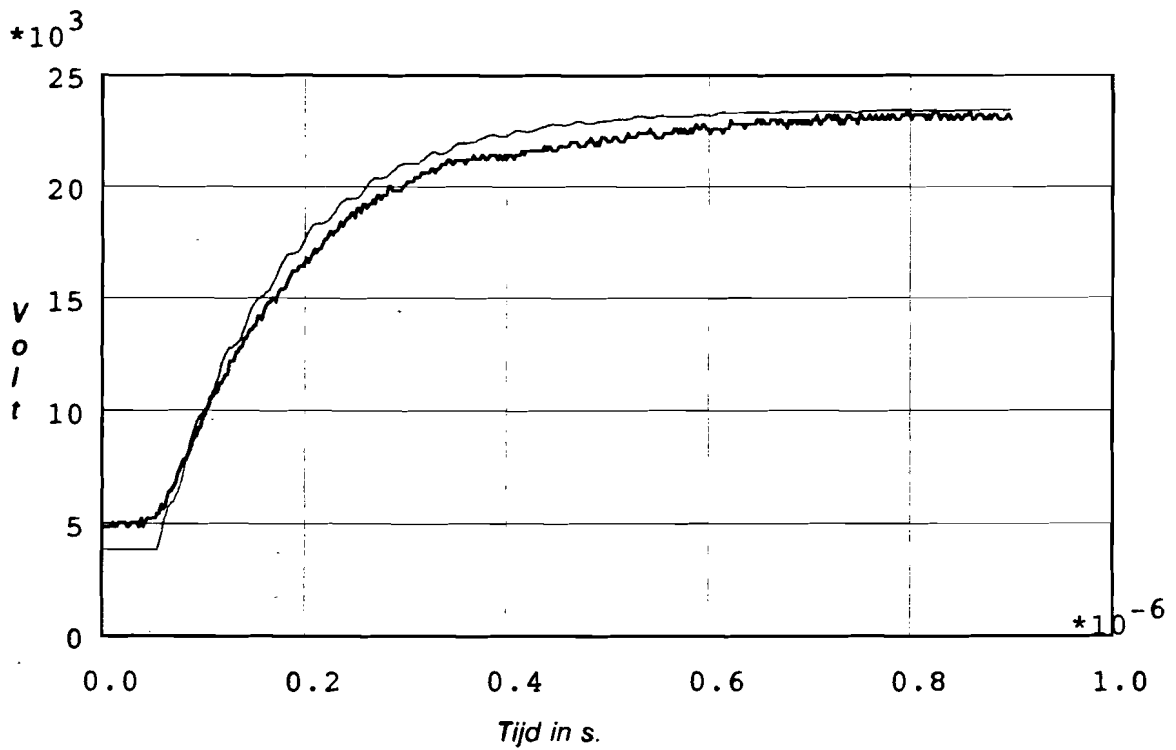
Grafiek 26a: De berekende (dun) en de gemeten (dik) stroom tegen de tijd bij 20 kV en 2 kΩ.



Grafiek 26b: De berekende (dun) en de gemeten (dik) spanning tegen de tijd bij 20 kV en 2 kΩ.



Grafiek 27a: De berekende (dun) en de gemeten (dik) stroom tegen de tijd bij 20 kV en 2 k $\Omega$  en een dc-offset van 5 kV.



Grafiek 27b: De berekende (dun) en de gemeten (dik) spanning tegen de tijd bij 20 kV en 20k $\Omega$  en een dc-offset van 5 kV.

## *De Spice Invoer.*

### *.ROOKGAS*

*\* Geschreven door A.J.S.T. Chin Kwie Joe in Spice 2G.6*

#### *\* De litze*

*R30 0 6 1*

*C10 4 0 2.5P*

*L40 6 4 0.5U*

*C20 6 0 2.5P*

#### *\* De vonkbrug*

*L50 4 10 84N*

*R60 10 12 1*

*C320 10 0 0.5P*

*Wvonkb 14 12 PULSE( -20K 0 50NS 10NS 0.5S 1S 2S)*

*L80 14 16 102N*

*C260 10 16 2P*

*C270 16 0 0.5P*

#### *\* Verbinding*

*R90 16 18 1*

*L100 18 20 114N*

#### *\* Stijgweerstand*

*C220 20 0 2P*

*L110 20 22 50N*

*R120 22 24 500*

*C230 24 0 2P*

#### *\* Verbinding maal 2*

*L130 24 26 114N*

*R240 26 42 1*

*L140 26 28 114N*

#### *\* Ontkoppelweerstand*

*C280 28 0 2.5P*

*C290 28 32 2P*

*R150 28 30 1E7*

*L160 30 32 1U*

*C300 32 0 2.5P*

#### *\* Voeding*

*L170 32 34 1.2U*

*R180 34 36 1*

*Wvoed 36 38 DC -20K*

*Cvoed 36 38 170P*

*R200 38 40 1*

*L210 40 4 1.2U*

#### *\* Koppelcondensator*

*C350 42 0 2P*

*C380 42 52 2.5N*

*L390 52 54 20N*

*C360 54 0 2P*

#### *\* Ontlaadweerstand*

*L410 54 56 114N*

*R420 56 58 1*

*L370 58 48 1U*

*R340 48 44 5E7*

*C330 58 44 2P*

L250 44 4 120N

\* Extra dc

L 54 53 1U

R 53 51 1E7

V 51 0 DC 5K

\* Stroommeting

Vmeet 54 60 DC 0

C490 60 0 2.5P

R460 60 62 1

L470 62 64 250N

C500 64 0 2.5P

\* Probe

R520 64 0 1E8

C560 64 0 3P

\* Doorvoer

C640 64 0 6P

L660 64 84 132N

C710 84 0 6P

\* Draad buitenbuis

C980 84 0 0.7P

R880 84 108 1

L870 108 106 225N

C970 106 0 0.7P

\* Eerste ring

C960 106 66 1P

R860 106 104 1

L850 104 102 300N

C950 102 66 1P

\* Tweede ring

C740 102 76 0.5P

R840 102 100 1

L830 100 98 150N

C730 98 76 0.5P

C700 76 0 27.5P

C630 76 0 2.5P

R590 76 70 1

L550 70 4 360N

C600 4 0 2.5P

\* Derde ring

C940 98 66 0.25P

R820 98 96 1

L810 96 94 75N

C930 94 0 0.25P

\* Vierde

C720 94 74 0.5P

R800 94 92 1

L790 92 80 150N

C680 80 74 0.5P

C690 74 0 27.5P

C620 74 0 2.5P

R570 74 68 1

L540 68 4 360N

C580 4 0 2.5P

\* Laatste ring

C920 80 66 1.25P

R780 90 80 1  
L770 90 88 375N  
C910 88 66 1.25P  
\* Draad buitenbuis  
C900 88 0 0.7P  
R760 88 86 1  
L750 86 78 225N  
C890 78 0 0.7P  
\* Doorvoer  
C670 78 0 9P  
L650 78 72 132N  
C610 72 0 9P  
\* Binnenbuis naar sterpunt  
C530 66 0 125P  
C510 66 0 2.5P  
L480 66 4 720N  
C450 4 0 2.5P  
\* Einde van de parameters  
.OPTIONS ABSTOL = 1E-6 VNTOL = 1 ITL5 = 0 NOMOD LIMPTS = 5000  
.TRAN 1NS 300NS  
.PRINT TRAN V(64)  
.PRINT TRAN I(Vmeet)  
.END