

Het grootste elektrische circuit op aarde

De elektrificatie van wolken leidt niet alleen tot [bliksem](#) en [Transient Luminous Events](#), het vormt ook de belangrijkste 'batterij' voor het luchtelektrische circuit: een elektrisch netwerk zo groot als de hele aardbol!

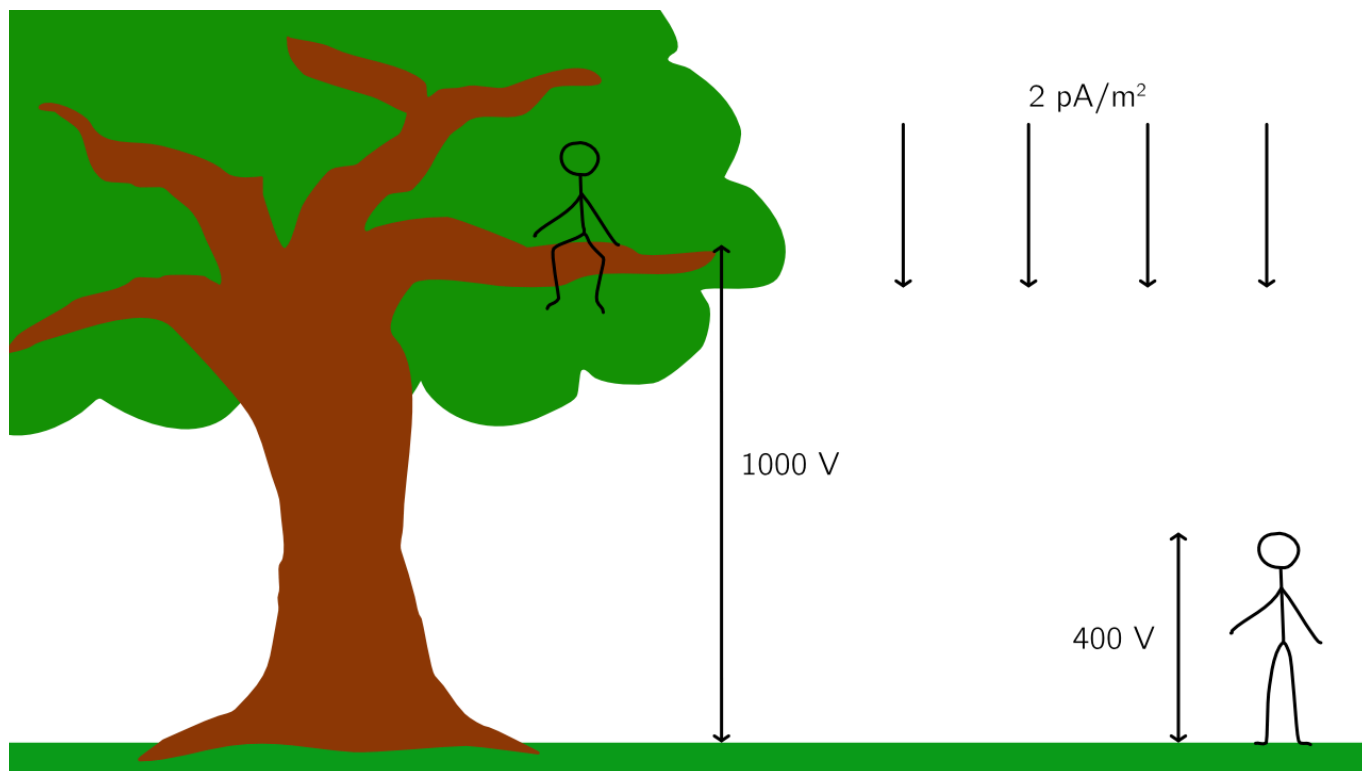


Afbeelding 1. Het aardelektrische circuit omringt de hele aarde. Dit is een frame uit een timelapse-video genomen vanuit het ruimtestation ISS door astronaut Tim Peake. Je ziet wit licht afkomstig van bliksem, en de 'air-glow' van de atmosfeer. Afbeelding: [ESA/NASA](#).

Wanneer we denken aan elektriciteit in de atmosfeer, denken we al snel aan onweer. Rond dezelfde tijd dat Benjamin Franklin [de link legde](#) tussen onweer en elektriciteit, ontdekten (onafhankelijk van elkaar) Louis-Guillaume Le Monnier, John Canton en Giambattista Beccaria dat juist bij droog weer, ver van onweer vandaan, de lucht een elektrisch veld draagt.

De veldsterkte hiervan is te meten met bijvoorbeeld een zogeheten [Kelvindruppelaar](#), vernoemd naar [William Thomson, eerste Baron Kelvin](#) (oftewel Lord Kelvin). Hij mat op een

zonnige dag in september 1859 een neerwaarts elektrisch veld van maar liefst 137 volt per meter. 'Neerwaarts' betekent hier dat positief geladen deeltjes naar de aarde toe worden getrokken, en negatief geladen deeltjes de andere kant op. De veldsterkte bij het aardoppervlak kan variëren, afhankelijk van factoren als luchtvochtigheid en plaatselijke luchtvervuiling, maar ligt bij droog weer normaal tussen 100 en 300 V/m [1].

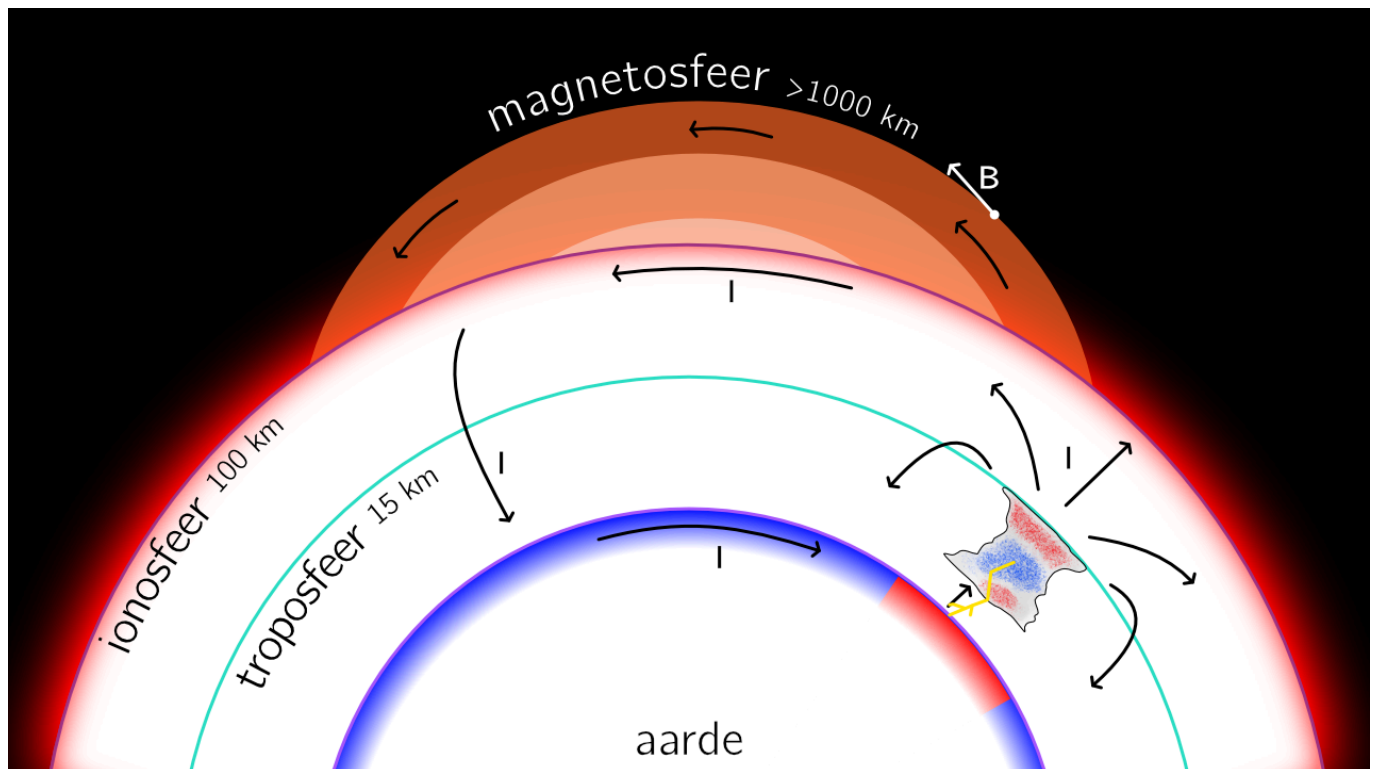


Afbeelding 1. Elektriciteit in de lucht bij mooi weer. Er stroomt wereldwijd een continue stroom van ongeveer 1000 ampère van de ionosfeer naar het aardoppervlak. Dit komt overeen met een stroomdichtheid van ongeveer 2 picoampère per vierkante meter, zoals rechtsboven is aangegeven. Afbeelding van Jans Henke.

Maar wacht eens even! Een snelle berekening toont aan dat het dus vrij normaal is om een spanningsverschil van 400 V te hebben tussen ons hoofd en de grond. Klimmen we in een boom, dan kan het spanningsverschil tussen onze hoogte en de grond al snel oplopen tot 1000 V. Hoe kan het dat we daar niets van merken? Dat komt omdat bijna alles om ons heen redelijk goed is in het geleiden van elektriciteit. Zo kunnen ladingen zich relatief makkelijk via ons lichaam of een boomstam verplaatsen om het veld tegen te werken. Een uitzondering is de lucht zelf, die juist een goede isolator is.

Gigantische condensator

Lord Kelvin stelde voor dat de hele aardbol werkt als een bolvormige [condensator](#) met de grond en de ionosfeer (ongeveer 100 km hoog) als geladen 'platen'. Om het mooi-weer-elektrische veld te verklaren, zou de ionosfeer netto positief geladen moeten zijn, en de aarde netto negatief. Er zou dan een spanning van ongeveer 260.000 V tussen de twee in moeten staan.



Afbeelding 3. De ionosfeer en aarde vormen samen een bolvormige condensator. Blauw geeft hier negatieve lading aan, en rood positieve. De pijlen geven aan hoe positieve lading zich verplaatst binnen het zogeheten lucht-elektrisch circuit. Het magneetveld van de magnetosfeer draagt ook bij aan de verplaatsing van lading. De tekening is niet op schaal. Afbeelding van Jans Henke.

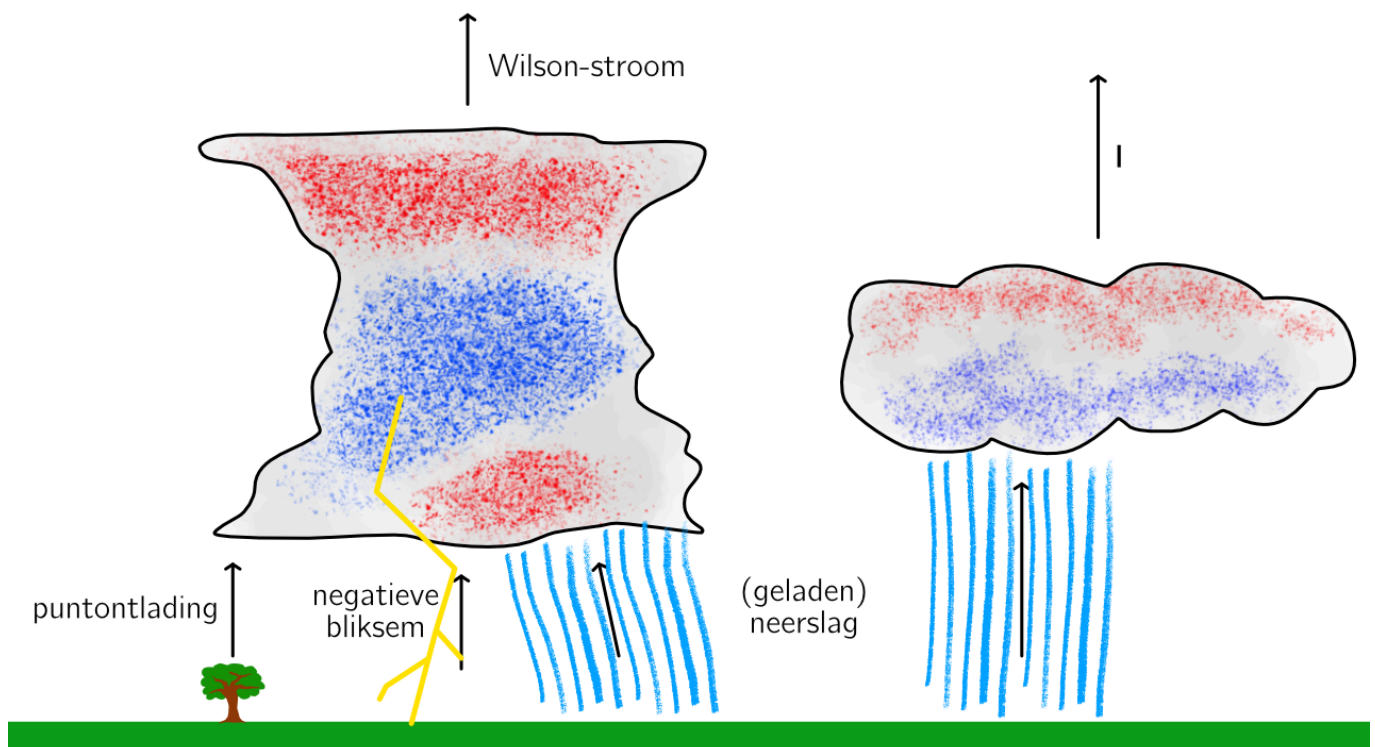
Toch is de lucht geen perfecte isolator, waardoor deze gigantische condensator continu ontlad. Er loopt wereldwijd op elk moment zo'n duizend ampère aan stroom tussen de ionosfeer en de aarde. Dit klinkt als heel veel, maar komt neer op een gemiddelde van 0,000000000002 ampère per vierkante meter aardoppervlak. De ladingdragers zijn kleine ionen die twee kanten op bewegen: positieve ionen worden omlaag getrokken, naar de aarde toe, terwijl negatieve ionen omhoog vliegen. Boven ongeveer 65 km hoogte is de lucht ijl genoeg om ook vrije elektronen toe te staan, die in ditzelfde veld omhoog vliegen door het

veld tussen de aarde en de ionosfeer.

Hierbij komt meteen een tweede vraag: als deze aard-ionosfeer-condensator continu ontlad, waar komt al die spanning dan vandaan? Met een constante neerwaartse stroom van 1000 ampère zou het hele lichtelektrische veld binnen 10 à 20 minuten moeten verdwijnen. Het feit dat dat niet gebeurt, wijst erop dat er ook veel lading de andere kant op moet bewegen. Dit geheel heet het *luchtelektrisch circuit* (of 'global electric circuit' in het Engels).

Onstuimige batterij

De belangrijkste spanningsbron voor het lichtelektrische circuit is onweer [2]. Zo komt ook dit verhaal weer terug bij de lading die opbouwt in onweerswolken, een proces dat we in het [eerste artikel](#) van deze serie bespraken. De meeste onweerswolken zijn bovenin positief geladen, en onderin netto negatief. Tussen het aardoppervlak en de onderkant van de wolk, en tussen de top van de wolk en de ionosfeer, ontstaat er hierdoor een *opwaarts* elektrisch veld. Het effect hiervan is meervoudig, zoals samengevat in afbeelding 4:



Afbeelding 4. De grootste spanningsbron is onweer. In deze afbeelding wordt samengevat hoe een netto positieve stroom door onweer wordt verplaatst. Links is een echte onweerswolk, rechts is een kleinere wolk die geen bliksem produceert. De pijlen geven de

positieve stroomrichting aan. Afbeelding van Jans Henke.

Laten we eerst kijken naar ladingsverplaatsingen van de aarde naar de wolken. Er werd lang gedacht dat blikseminslagen de belangrijkste bron zijn voor de opwaartse positieve ladingsverplaatsing. De meeste blikseminslagen zijn immers negatief, waarbij er negatieve lading van de wolk naar de grond stroomt (en netto positieve lading de andere kant op). Tegenwoordig weten we aan de hand van metingen echter dat bliksem alleen niet genoeg lading verplaatst om het opladen van de aardse condensator te verklaren, dus zijn er ook andere bronnen nodig.

Geladen deeltjes in de lucht worden natuurlijk vanzelf meegetrokken door het elektrische veld onder de wolk, hoewel de weerstand van de vochtige lucht onder een wolk wel een stuk hoger is dan de weerstand bij droge lucht. Een ander fenomeen dat we in eerdere artikelen van deze serie al benoemd hadden is Sint-Elmsvuur. Rond puntvormige objecten, zoals bomen, masten en bergtoppen wordt het veld verder geconcentreerd, waardoor er een [puntontlading](#) kan ontstaan. Hierbij beweegt er netto positieve lading omhoog. Wind, convection en neerslag verplaatsen ook lading tussen de wolk en de grond; meestal leidt dit tot een netto opwaartse positieve stroom, maar het kan ook de andere kant op werken.

Ten slotte stroomt er tussen de wolken en de ionosfeer ook de zogeheten Wilson-stroom, simpelweg de ladingsverplaatsing gedreven door het opwaartse veld tussen de wolkentop en de ionosfeer. Deze stroom is vernoemd naar dezelfde C.T.R. Wilson die de eerste voorspelling van zogeheten [Transient Luminous Events](#) (TLE's) maakte, de rare vorm van 'bliksem boven de wolken' die we in het vorige artikel beschreven. Bij blue jets en sprites beweegt er (meestal) positieve lading omhoog, wat dus bijdraagt aan de Wilson-stroom. Ook belangrijk om hierbij te vermelden: wolken die géén bliksem (of TLE's) produceren, kunnen alsnog elektrische velden creëren, en vormen ook een belangrijke bijdrage aan de opwaartse stroom.

De grootste

Kortom: in de atmosfeer zijn continu allerlei verschillende elektrische stromen gaande. Zoals altijd in de wetenschap, zijn er nog veel details van het luchtelektrisch circuit die we nog niet in alle volledigheid begrijpen. Lord Kelvins simpele plaatje van de aarde als sferische condensator is niet genoeg om alle dagelijkse en seizoensgebonden variaties in het mooi-

weerveld te verklaren, en over de details van wat er precies gebeurt in en rondom onweer is er nog veel te leren. Een andere grote open vraag is de invloed van klimaatverandering op het luchtelektrisch circuit.

Wat we wel weten? Het wereldrecord voor grootste elektrische circuit op aarde, dat gaat ongetwijfeld naar de aarde zelf.

[1] Hierbij komt ook een 'honourable mention' kijken, voor het onderzoeksschip [Carnegie](#). Dit schip heeft twintig jaar lang (1909-1929) rondgevaren over de hele wereld, om zo veel mogelijk metingen te verrichten aan (onder andere) de sterkte van het luchtelektrisch veld. Metingen vanaf de zee zijn een goede maatstaf voor het wereldwijde gemiddelde, omdat die niet of minder beïnvloed worden door lokale effecten als hoogteverschillen en luchtvervuiling. De data van dit onderzoeksschip worden nog steeds gebruikt in hedendaags onderzoek.

[2] Er zijn nog enkele andere spanningsbronnen voor de het luchtelektrisch circuit, zoals een dynamo-interactie tussen zonnwind en de magnetosfeer, en het dynamo-effect van atmosferische getijden in de thermosfeer. Onweer (met en zonder bliksem) draagt naar schatting wel drie keer zoveel bij als deze effecten.

Bronnen

Voor het schrijven van dit artikel heb ik meerdere bronnen gebruikt, waarbij ik vooral het artikel *Physics Today* **51**, 10, 24 (1998); <https://doi.org/10.1063/1.882422>, en [deze duidelijke \(en leuke\) lecture notes van Dr. E. Philip Krider \(University of Arizona\)](#) erg nuttig vond.

In de zomerperiode publiceert de QU-site elke vrijdag een artikel. In september gaan we weer terug naar het schema van twee artikelen per week: elke dinsdag en elke vrijdag.