

# Turbulentie in elektronika

Jan Simons, PAoSIM, Venlo

Chaos is de tegenwoordig gebruikelijke naam voor een moeilijk intuïtief te begrijpen verschijnsel. Wanneer je er op let, kom je het elke dag in diverse vormen tegen. Turbulentie, maar bijvoorbeeld ook het weer zijn hiervan sprekende voorbeelden. Chaos is een verschijnsel dat in niet-lineaire systemen (systemen met niet-lineaire overdrachtsfuncties en/of componenten) kan optreden. Het blijkt dat het gedrag van zo'n systeem onder bepaalde voorwaarden en bij bepaalde instellingen schijnbaar willekeurig kan worden, terwijl het nog steeds volgens de formules waarmee het systeem te beschrijven valt, werkt. Met schijnbaar willekeurig wordt hier bedoeld dat het gedrag niet meer voorspelbaar is, niet meer periodiek. Zelfs de kleinste verandering in het systeem geeft een op den duur totaal ander gedrag, een totaal ander traject dat doorlopen wordt. Op het eerste gezicht lijkt het ruis. Het is echter alles behalve volkomen willekeurig. Het gedrag is 'bounded' d.w.z. dat alle toestanden waarin zo'n systeem zich kan bevinden liggen in een of meerdere door het systeem bepaalde begrenste gebieden.

Wanneer er in de vakliteratuur over wordt geschreven, dan is het eerste deel van het verhaal vaak nog wel te volgen, maar al snel verdwaalt je in een enorme brok wiskunde. J. Gleick is er in zijn boek 'CHAOS; de derde wetenschappelijke revolutie' naar mijn mening in geslaagd om ook voor de niet-wiskundigen onder ons, enig inzicht hierin te geven. Ik zal niet proberen dit zelfde in een korter verhaal te evenaren. Voor geïnteresseerden verwijs ik graag hiernaar.

Wat heeft chaos nu echter met radio-amateurisme te maken? Kunnen we zonder dit verhaal? Als tegenvraag zou ik willen stellen: welke van de circuits die wij ontwerpen, bouwen en gebruiken zijn puur lineair? In welke circuits zitten geen transistoren of diodes?

Aan de hand van de volgende twee voorbeelden probeer ik te laten zien dat je ook in de elektronika sneller met chaos te maken kunt krijgen dan je in eerste instantie zou denken. Ze geven tevens aan hoe robuust het verschijnsel is en hoe goed reproduceerbaar. Het eerste voorbeeld is een opstap naar het tweede. Beide voorbeelden zijn schaalbaar d.w.z. het is mogelijk alle zelfinducties en condensatoren, overeenkomstig de werkfrequentie, groter of kleiner te kiezen. Beschikken we bijvoorbeeld niet over een zelfinductie van 2,2 mH, dan kunnen we de condensatoren en de werkfrequentie evenredig hieraan aanpassen.

De componentwaarden zijn niet kritisch. Bij hoge frequenties kunnen hf-eigenschappen van transistoren en de in-

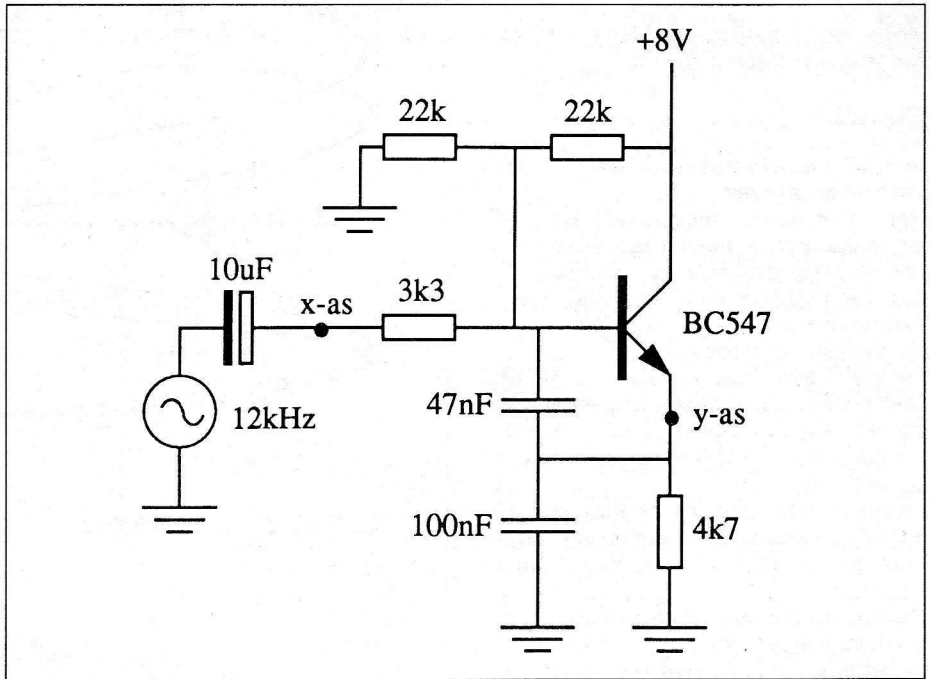
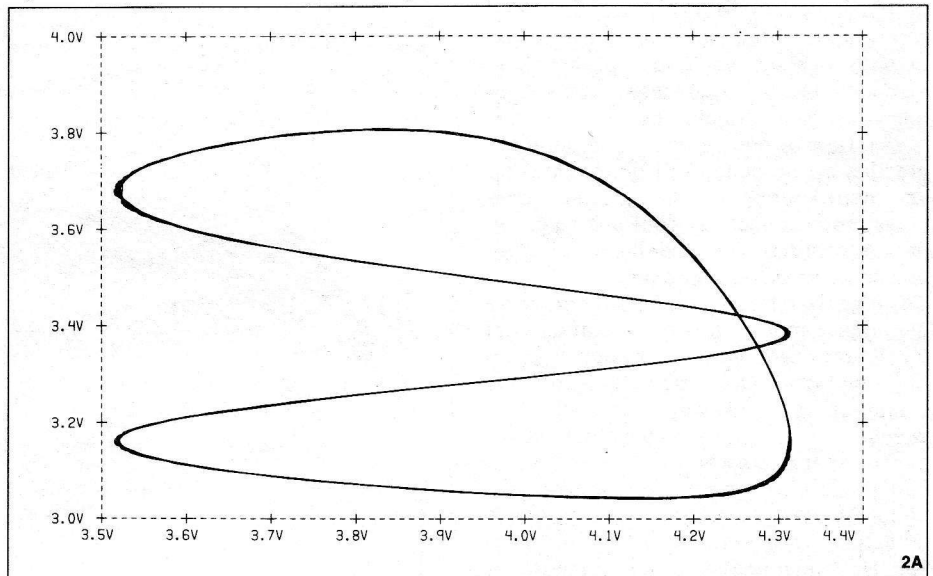
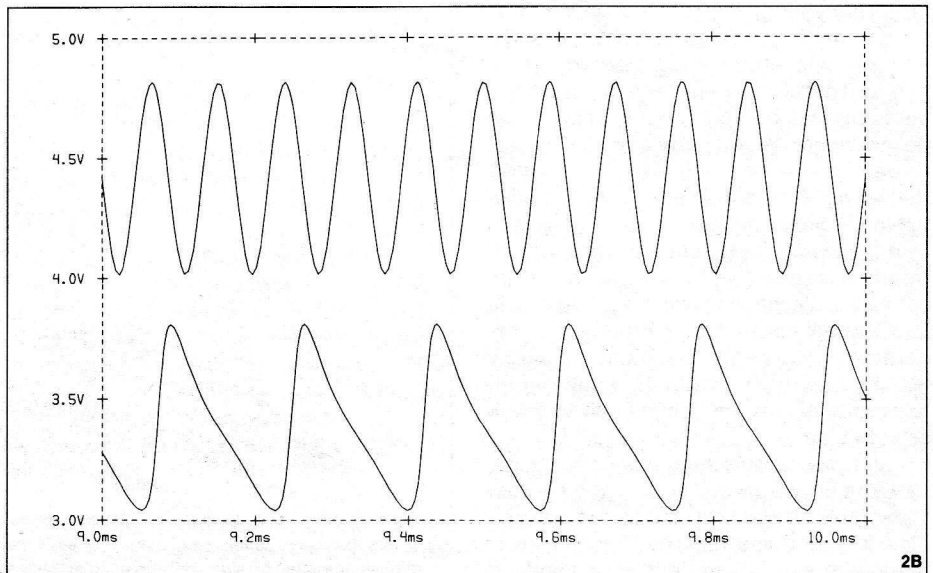


Fig. 1. Voorbeeld van een circuit waarin chaos optreedt bij aansturing vanuit een sinusgenerator.



2A



2B

Fig. 2. Circuit 1 resultaten van computersimulaties:  
A) periodeverdubbeling in x-y-mode, de halve frequentie verschijnt aan de uitgang van circuit 1  
B) zelfde als A), maar in het tijdomein

- C) 2e periodeverdubbeling in x-y-mode, ook een kwart van de frequentie verschijnt aan de uitgang
- D) het eerste chaotische gebied in x-y-mode

vloed van meetprobes echter al snel een (negatieve) rol gaan spelen.

### Circuit 1

In figuur 1 is het eerste voorbeeld schematisch weergegeven.

Het circuit wordt aangestuurd vanuit een signaalgenerator die een instelbare sinusvormige signaalspanning genereert tot zeg 5 volt top. Om de DC-instelling niet te verstoren wordt dit signaal via een koppelcondensator toegevoerd.

De frequentie staat ingesteld op 12 kHz. Niet getekend is de uitgangsweerstand van de generator. Voor de eenvoud is deze verdisconteerd in de 3k3-weerstand die naar de basis gaat.

De meetpunten voor de oscilloscoop zijn voor de x-as de uitgang van de signaalgenerator en voor de y-as de emitter van de transistor.

Door de oscilloscoop in de x-y-mode te gebruiken, krijgen we Lissajous-figuren te zien. Het voordeel hiervan is dat een aantal verschijnselen beter zichtbaar wordt.

In figuur 2A-D is de output van dit circuit weergegeven voor verschillende ingangsniveaus. In plaats van foto's van het oscilloscoopbeeld, is voor de weergave de output van computersimulaties (SPICE) gebruikt. De overeenkomst met de gemeten plaatjes op de scope (bij gebruikmaking van nauwkeurige condensatoren, zoals polystyreen condensatoren) was zo groot, dat het voordeel van duidelijkere plots uit de computer de doorslag gaf.

De verrassing treedt nu op wanneer we de uitgangsspanning van de generator vanaf 0 volt langzaam omhoog draaien. Bij een nog voldoende klein signaal wordt als Lissajous-figuur iets wat op een ellips lijkt zichtbaar. Tot op het moment dat de spanning een bepaalde waarde overschrijdt. De ellips lijkt zich in twee delen te splitsen (zie figuur 2A.). Wat dit in de tijd betekent wordt duidelijker wanneer we naar figuur 2B kijken. Het uitgangssignaal (onderste trace) is niet eenvoudig meer een vervormde versie van het ingangssignaal, maar er blijkt een periodeverdubbeling opgetreden te zijn. Wat het circuit genereert is in feite een subharmonische van 12 kHz. Draaien we de ingangsspanning langzaam nog verder op dan zien we dat er weer een periodeverdubbeling optreedt (zie figuur 2C.). Behalve de halve frequentie, blijkt ook een kwart van de frequentie te verschijnen. Noemen we de halve frequentie de tweede subharmonische, dan zien we nu de vierde subharmonische in beeld. Wanneer de generator stabiel genoeg is, moet het mogelijk zijn bij verdere verhoging van het ingangssignaal ook de achtste subharmonische te zien.

Draaien we de spanning weer verder op, dan komen we in een totaal andere toestand terecht. Wat kort ervoor nog een stabiele toestand was, blijkt nu plotseling over te gaan in een niet te definiëren toestand

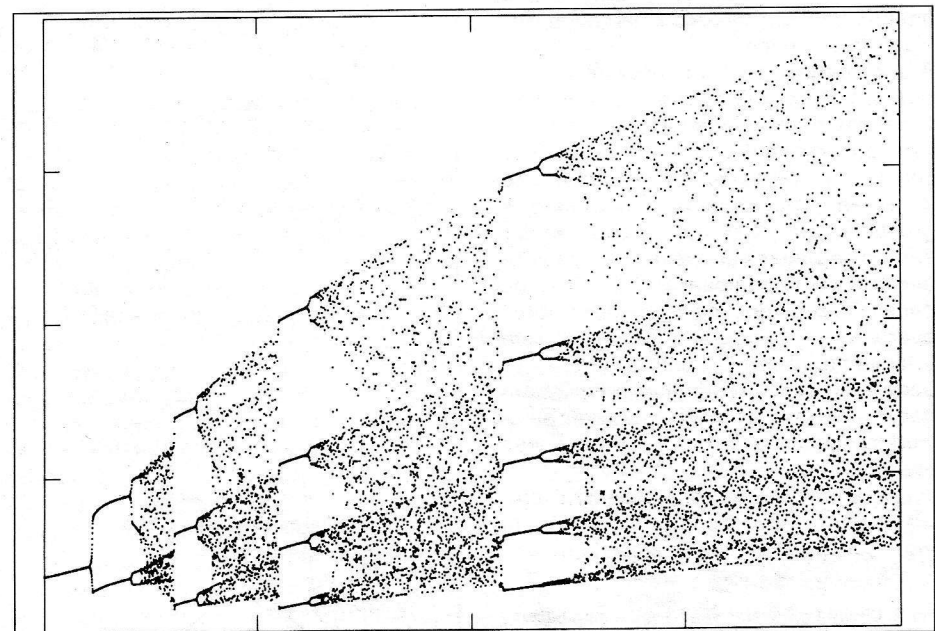
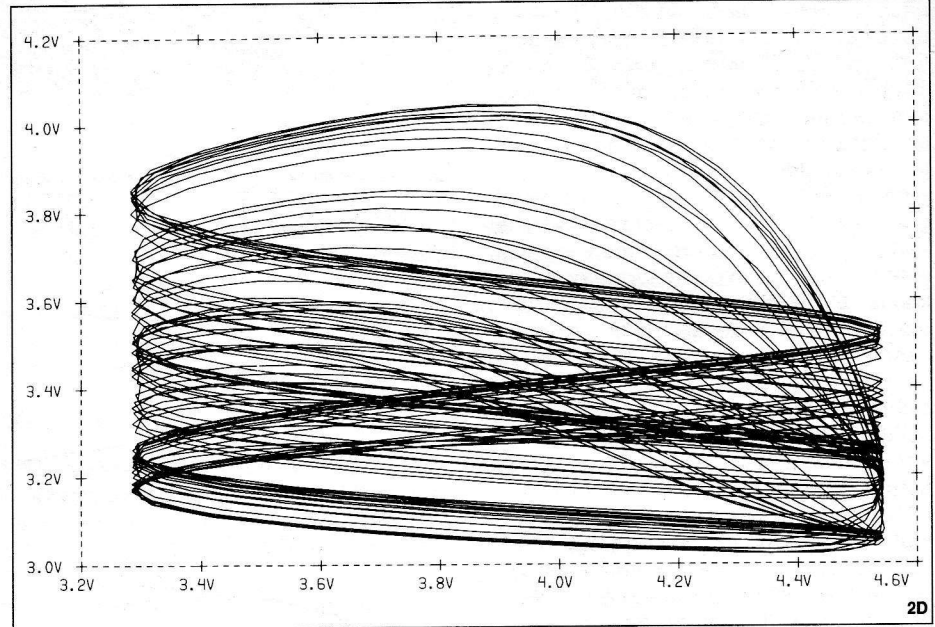
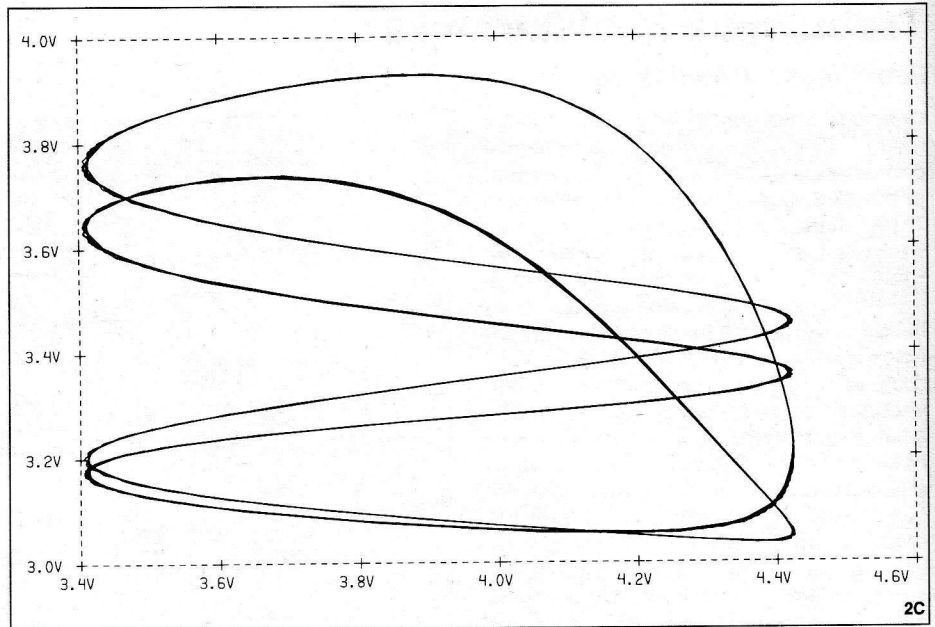


Fig. 3. Resultaten van computersimulaties: samenvattend de toestanden waarin circuit 1 zich kan bevinden, weergegeven door punten bij signaalniveaus die oplopen van 0 V tot 5 V top.

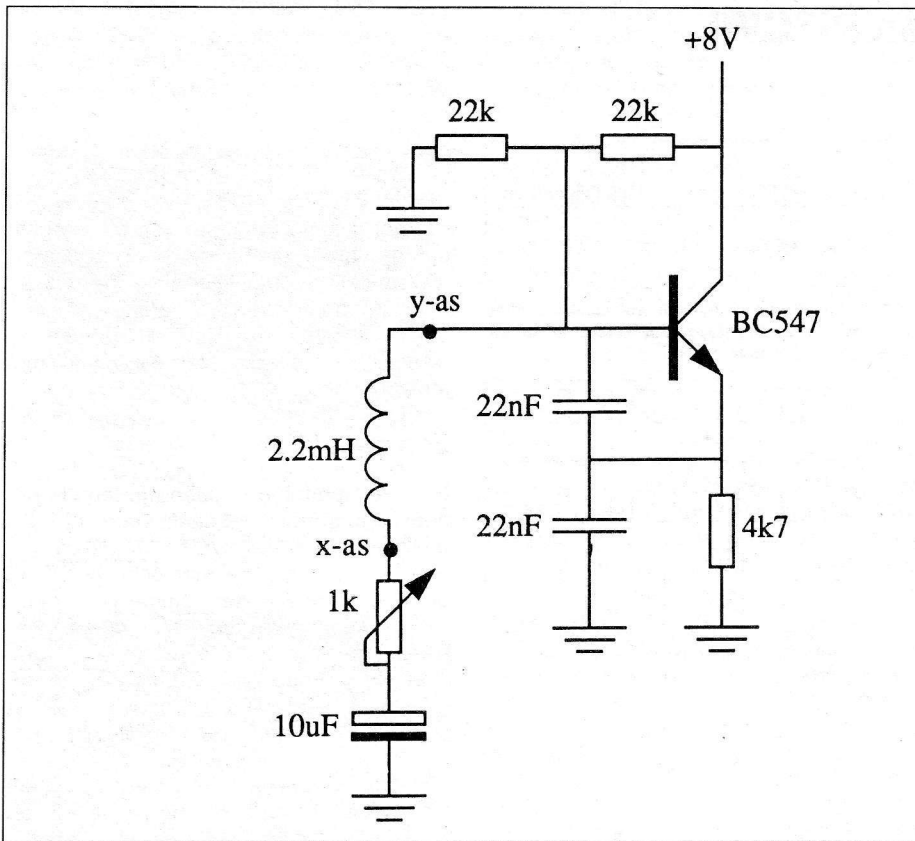


Fig. 4 Voorbeeld van een (Colpitts-) oscillator waarin afhankelijk van een instelbare weerstand chaos optreedt (circuit 2)

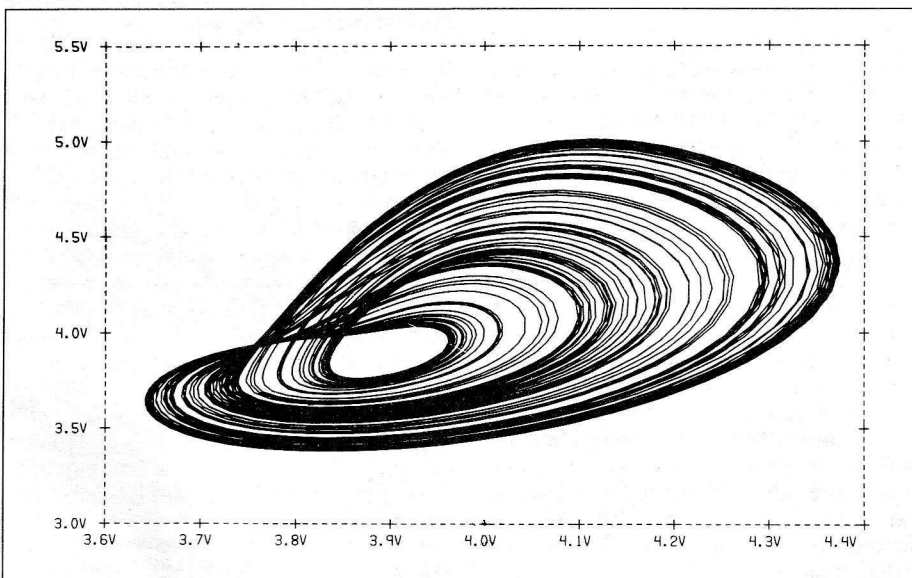


Fig. 5. Resultaten van computersimulaties: chaos in een colpitts-oscillator (circuit 2).

(zie figuur 2D.) Over het gedrag valt niets meer te zeggen, het is onvoorspelbaar geworden. Het is deze toestand die we aanduiden met chaotisch.

Wanneer we nu de signaalspanning verder opvoeren, komen we in toestanden terecht waarbij achtereenvolgens de 3e, 6e en 12e subharmonische verschijnen, waarop weer een gebied verschijnt dat chaotisch is.

Ook achter dit chaotische gebied komen weer stabiele gebieden, maar nu met de 4e, 8e en 16e subharmonische met een chaotisch gebied daar weer achter.

Samengevat wordt dit in figuur 3 weergegeven. Als functie van de ingangsspanning (oplopend van 0 V naar 5 V top), worden

door punten de toestanden waarin het circuit zich kan bevinden, weergegeven. Per periode van 12 kHz is alleen de top van het uitgangssignaal getekend. We zien vanaf het begin (links onder) een lijn, die zich na enige tijd opsplijst. De twee lijnen die door deze splitsing gevormd worden, geven de twee toestanden (periodeverdubbeling) aan waarin het circuit zich bevindt. De in figuur 2A en 2B getekende toestand bevindt zich in dit gebied. Twee lijnen geven dus aan dat de halve frequentie aanwezig is.

Zo geven vier lijnen aan dat ook een kwart van de frequentie er is (figuur 2C). Te zien is dat er ook een gebied is met 5 en met 10

lijnen, de 5e en de 10e subharmonische treden op.

De grijze gebieden, die schijnbaar willekeurig verdeelde punten, geven nu de chaotische gebieden weer. Te zien is dat de verdeling van deze punten begrensd is. Ze liggen in een of meerdere afgebakende gebieden.

De hiermee bekende lezer zal in figuur 3 een fractal-achtige structuur ontdekken.

## Circuit 2

In het voorgaande circuit is een generator gebruikt voor de aansturing. Je zou je kunnen afvragen wat er gebeurt wanneer je het circuit zelf het ingangssignaal laat genereren. Het enige wat je hiervoor nodig hebt is een zelfinductie. In figuur 4. is het gemodificeerde circuit weergegeven. Hierin valt duidelijk een (Colpitts-) oscillator te herkennen. Het belangrijkste verschil vormt de getekende serieweerstand (1 k trimmer) met de zelfinductie. Het signaal voor de x-as wordt van deze weerstand afgenomen en representeert de stroom door de spoel. Voor de y-as nemen we de basisspanning.

Voor een ingestelde weerstand van 0 ohm zal de oscillator netjes oscilleren. Beduidend anders wordt de situatie bij weerstandswaarden van enkele honderden ohm. In figuur 5 wordt weergegeven wat we bijvoorbeeld op de oscilloscoop kunnen zien. Het is aan te bevelen om het weerstandstraject vanaf maximum (1 k ohm) eens volledig te doorlopen. Niet alleen chaos is te zien, maar ook meerdere stabiele gebieden.

## Tot slot

Uit de voorbeelden mag je concluderen dat het niet voldoende is om alleen een niet-lineaire component in het circuit te hebben om chaos mogelijk te maken. Ook capacatieve en inductieve componenten en/of (zoals in circuit 1) een signaalgenerator, spelen hierbij een noodzakelijke rol. Om precies te zijn, het blijkt dat er minimaal twee reactieve componenten (capacitief/of inductief) en een tijdfhankelijke bron (signaalgenerator) of dat er minimaal drie reactieve componenten aanwezig moeten zijn.

Chaos is géén (thermische) ruis en het is géén parasitair verschijnsel. Daarmee wil ik echter niet zeggen dat parasitaire componenten chaos niet mogelijk zouden kunnen maken of dat ruis in het circuit geen invloed zou hebben.

Wanneer chaos optreedt, zal dit normaal gesproken niet gewenst zijn. Het kennen en vervolgens herkennen van dit verschijnsel wanneer het onverhoopt mocht optreden, is noodzakelijk om er zo goed mogelijk op te kunnen reageren.

Heb je een audioversterker bij de hand, dan loont het zich de moeite om het uitgangssignaal hier eens op aan te sluiten. Behalve om te zien vond ik het genereren van subharmonischen en de overgang naar chaos ook interessant om te horen.