

### Eenvoudige zelf te bouwen analoge computer als hulpmiddel bij het onderwijs

Sinds enkele jaren wordt in het kader van het tweedejaars natuurkundig practicum van de Universiteit van Amsterdam enige tijd - circa zes dagen - besteed aan het simuleren van fysische modellen met behulp van een eenvoudige analoge computer (1, 2, 3). Veel interessante onderwerpen uit de klassieke mechanica - in beginsel het grondthema van dit practicumonderdeel - lenen zich niet voor experimenten op laboratoriumschaal. Oorzaken daarvan zijn onder meer de inherente beperkingen van het laboratorium (ruimte, tijd en middelen); de problemen om de gewenste mate van 'abstractie' van het experiment te bereiken (wrijving, niet-lineariteiten, aanwezigheid van het zwaarteveld); en het moeilijk toegankelijk zijn van grootheden voor meting of variatie. Een gedeeltelijke oplossing voor deze moeilijkheden is gevonden in het simuleren van experimenten met een computer. Uit deze benaderingswijze heeft zich gaandeweg een practicum ontwikkeld, waarvan het hoofddoel is: het oefenen in de beschrijving van fysische problemen in wiskundige termen, en het bestuderen van de eigenschappen van de zo verkregen

modellen (differentiaalvergelijkingen). Een analoge computer leent zich bij uitstek voor het oplossen van (gewone) differentiaalvergelijkingen, mits aan de nauwkeurigheid geen hoge eisen gesteld worden. Het gedrag van de probleemvariabelen, die in de computer door continue variabele spanningen gerepresenteerd worden, kan op een oscilloscoop of penschrijver in grafische vorm aanschouwelijk worden gemaakt. Doordat alle variabelen simultaan beschikbaar zijn, kan ook hun onderlinge relatie bijvoorbeeld met een XY-schrijver worden geregistreerd. De diverse parameters (coëfficiënten, randcondities) worden met behulp van potentiometers ingesteld. Ze zijn daardoor gemakkelijk te wijzigen, en het effect daarvan kan onmiddellijk visueel worden beoordeeld. Het 'programmeren' van een analoge computer is, althans voor de weinig gecompliceerde problemen die in dit kader in aanmerking komen, terug te brengen tot enkele simpele kunstgrepen. Ook het vinden van een geschikte schaling van de oorspronkelijke fysische grootheden naar hun representanten in de computer geeft in de meeste gevallen geen moeilijkheden.

Door deze eigenschappen maakt de analoge computer het mogelijk snel een inzicht te krijgen in het gedrag van een fysisch model. Hierbij is het niet nodig te letten op de analytische oplosbaarheid van de differentiaalvergelijkingen; wel wordt van de student verwacht dat hij op grond van fysische overwegingen de karakteristieke trekken van een oplossing kan voorspellen c.q. verklaren.

Dit practicumexperiment vormt tevens een geschikte gelegenheid voor het introduceren van een aantal belangrijke methoden en middelen van de electronica, met name de terugkoppeling en de operationele versterker ('rekenversterker'). De belangstelling voor de analoge rekenmethode is de laatste jaren sterk toegenomen. Ook daarom lijkt het nuttig dat de a.s. fysicus er eens kennis mee maakt.

**Apparatuur.** De voor het oplossen van een probleem benodigde schakeling wordt samengesteld uit een aantal losse, afzonderlijk te gebruiken, eenheden, die naast elkaar op tafel worden geplaatst. De basiseenheden bieden ruimte aan drie rekenversterkers, die naar behoefte kunnen worden ingeplugd. Deze versterkers zijn door reeksen stekerbussen toegankelijk voor de nodige doorverbindingen en voor de extern aan te brengen componenten (meest weerstanden en condensatoren), die de functie van de rekenversterkers bepalen. Twee van de versterkers zijn door middel van in de bedrading opgenomen relais - nodig voor het invoeren van begincondities - desgewenst als integrator te gebruiken. Van alle versterkers is de niet-inverterende ingang geaard. Voorts zijn er eenheden voor niet-lineaire en logische operaties (vermenigvuldigen van variabelen, vergelijken, EN, OF, enzovoort).

Ook de coëfficiëntenpotentiometers en voedingen zijn als losse eenheden uitge-

voerd. Door deze opzet is een efficiënt gebruik van de apparatuur mogelijk. De rekenversterkers zijn van het goedkope, geïntegreerde type 741; ze zijn te zamen met twee instelbare compensatiestandstanden op van zijcontacten voorziene printplaatjes gemonteerd. Deze versterkers voldoen in de meeste gevallen uitstekend. Zo nodig kunnen ze zonder meer door betere, op soortgelijke printjes gemonteerde, typen vervangen worden.

Er worden gewone, uit de voorraad uitgezochte, koolweerstand en polyestercondensatoren gebruikt.

Als voornaamste randapparatuur fungeren XY-schrijvers met losse tijdbasis. Tot de attributen behoren voorts een oscilloscoop, een digitale voltmeter, een functiegenerator en enkele hulpmiddelen, waaronder een instrumentje voor het afregelen van de rekenversterkers.

**Toepassingen.** Ter illustratie volgt een lijstje van problemen, die met behulp van de beschreven apparatuur zijn gesimuleerd. Zoals men ziet is het merendeel ontleend aan de klassieke mechanica; dit houdt verband met de plaats van het practicum in het curriculum (eerste semester tweede jaar). Het lijstje wordt nog steeds uitgebreid, ook op initiatief van de praktikanten.

Harmonische oscillator  
Oscillator met Coulomb-damping  
Zelfexciterende oscillatoren: schommel;  
van der Pol-model  
Gekoppelde oscillatoren  
Model van het oor (een anharmonische oscillator)

Kogelbanen onder diverse omstandigheden (luchtweerstand, tegenwind, enz.)

Baan van een bal met 'effect' (Magnus-effect)

Stuiterende bal

Raket: een- en tweetraps; in  $r^2$ -veld; relativistische raket; 'zachte landing'

Deeltje in een centraal krachtveld (Kepler-probleem)

Schrödingervergelijking (harmonische oscillator); deeltje in potentiaalput

Radioactieve vervalprocessen

Verloop van chemische reacties

Eenvoudige randwaardeproblemen (iteratiemethode)

Regelsystemen

Ecologische systemen (roofdier-proof probleem, enz.)

**Conclusie.** Ook elders (4) wordt de analoge computer ten behoeve van het onderwijs gebruikt. De professionele apparatuur, die daarbij veelal wordt toegepast, is echter voor uitsluitend gebruik op het practicum te kostbaar. Onze ervaringen hebben geleerd, dat ook met bescheiden middelen redelijke resultaten te bereiken zijn, die - ook naar de opinie van de studenten - zeer wel aan het beoogde doel beantwoorden.

*E. H. Dooijes, Natuurkundig Practicum, Universiteit van Amsterdam.*

1. R. C. Weyrick - Fundamentals of Analog Computers, 1969.
2. C. A. Stewart en R. Atkinson - Basic Analogue Computer Techniques, 1967.
3. J. Heinhold en U. Kulisch - Analogrechnen, 1969.
4. H. E. Wylen en W. M. Schwarz - The Analog Computer as a Teaching Tool in Physics, Am. J. Phys. 41 (1973) 622-631.