

Experimenten in de elementaire deeltjesfysica

F. Udo NIKHEF Sectie H, Amsterdam.

De fysica van de elementaire deeltjes wordt beoefend in het NIKHEF – Nationaal Instituut voor Kern- en Hoge-Energiefysica – gevestigd in het wetenschappelijk centrum in de Watergraafsmeer te Amsterdam.

Dit artikel probeert via een korte inleiding in de problematiek van deze tak van de natuurkunde te schetsen hoe men experimenteert en welke eisen er aan de opstellingen gesteld worden.

1. Inleiding

De elementaire deeltjesfysica bestudeert de structuur van de materie op de kleinst mogelijke schaal en om dit in een breder verband te zien gaan we de afstanden die voorkomen in de natuur op een rijtje zetten.

Figuur 1 toont ons een afstandsschaal, waarop de hele ons bekende natuur past. Let wel, de schaal is wat ongebruikelijk: elk vakje van de horizontale schaal vergroot of verkleint de maat met een factor *duizend*.

We zien een middenstuk met meters en millimeters: de afstanden van ons dagelijks leven.

Naar rechts groeit de afstandsschaal: afstanden op aarde (10^6 m), naar de zon (10^{11} m), naar sterrestelsels, en dan zo ver als we het heelal kunnen zien (10^{24} m).

De andere kant uit zien we het domein van de microscoop (10^{-6} m), daarna het molekuul (10^{-9} m) en de atoomkern (10^{-13} m). Hierbeneden de afmetingen van delen daarvan, het proton bijvoorbeeld (10^{-15} m).

De elementaire deeltjes- of Hoge-Energiefysica houdt zich nu bezig met de structuur van deeltjes beneden deze kleinste maat die nog normaal in de natuur voorkomt.

Figuur 2 illustreert dit door vanuit het atoom de materie uit te vergroten: we zien één van de recente resultaten van de fysica: in het proton zwemmen weer kleine korrels: de quarks, met afmetingen minstens $100 \times$ kleiner dan het proton zelf.

Het is wat onverwacht, maar toch een feit:

de astronomie, die de grootste objecten in ons heelal bestudeert, profiteert van de resultaten van de kern- en elementaire deeltjesfysica.

Een heel eenvoudig voorbeeld zullen we bespreken, dat aangeeft hoe kennis verkregen van structuren van 10^{-15} meter van belang is voor de bestudering van stelsels met een maat die 35 tot 40 *grootte-orden* verschilt

Hoe kan men nu de structuur van zo'n 'elementair deeltje' bepalen?

De enige methode om dit te doen is botsingen tussen twee deeltjes, protonen of elektronen, te bestuderen bij grote snelheid, dus zeer grote kinetische energie per deeltje.

Om een idee te krijgen van wat we met 'hoge energie' bedoelen, moeten we eerst een energieschaal gaan vastleggen

De eenheid die hierbij gebruikt wordt is de energie die we aan een elektron geven door dit elektrisch geladen deeltje een spanningsverschil van één Volt te laten doorlopen: deze energie is onze maat, de *elektronvolt eV*.

Hoe verhoudt deze maat zich tot de energieën in het dagelijks leven?

Het dagelijks leven speelt zich af met ma-

terie die op kamertemperatuur is. De molekulen van de lucht om ons heen bewegen zich met snelheden die overeenkomen met minder dan 0,1 elektronvolt.

Bij chemische reacties - verbranding bijvoorbeeld - komt per molekuul een energie vrij in de orde van enkele elektronvolt, terwijl in kernreactoren energieën vrijkomen in de orde van 1 MeV (Mega-elektronvolt) per splijtingsreactie.

Om nu iets te weten te komen van de structuur van het proton moeten we nog hoger gaan: we moeten de deeltjes snelheden, dus energieën, geven zó groot dat de kinetische energie van het projectiel groter is dan de energie die overeenkomt met zijn massa volgens de beroemde vergelijking van Einstein:

$$E = mc^2.$$

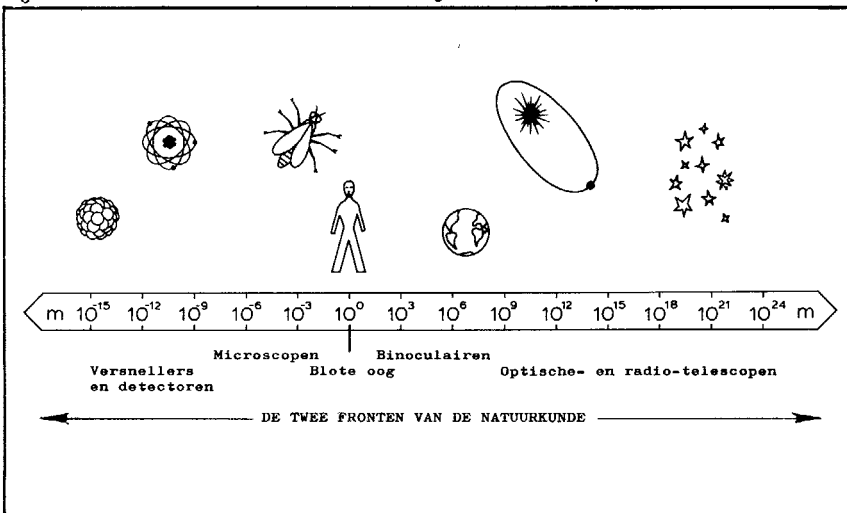
Vullen we dit in voor de massa van het proton, dan komen we uit op 938 MeV, of ruwweg 1 GeV (Giga-elektronvolt).

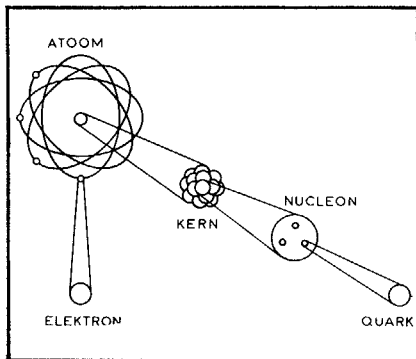
Dit is de eenheid waarin de botsings- en deeltjesenergieën worden uitgedrukt in de elementaire deeltjesfysica, vandaar dat deze tak van de natuurkunde ook wel aangeduid wordt met *Hoge-Energie* fysica.

Dus de methode van experimenteren is nu:

versnel een aantal waterstofkernen - protonen - tot een energie van bijvoorbeeld 400 GeV, en kijk wat er gebeurt in de botsingen met een trefplaat van zeg vloeibaar waterstof.

Figuur 1 de afstandsschaal waarin het natuurgebeuren zich afspeelt





Figuur 2 Uitvergroting van molekuul via kern en proton tot quark.

Figuur 3 laat zien dat er inderdaad nogal wat gebeurt:

we zien hier het deeltje vóór de reactie aankomend van links. Het treft een ander proton in het vat, en we zien zo'n 20 (!) deeltjes geproduceerd worden.

Eén van de eerste resultaten van deze studies werd simpelweg verkregen door het tellen van de deeltjes:

als we deeltjes tellen met een plusteken en antideeltjes met een minteken, dan is het netto resultaat vóór en na de reactie: twee protonen.

We zijn dus in staat om vele deeltjes te creëren, maar de natuur staat ons niet toe om *netto* het aantal protonen in de natuur te veranderen. Hieruit volgt dus een heel belangrijke natuurwet:

het aantal protonen in het heelal is een constante.

Het is nogal onverwacht, om uit de studie van enkele deeltjes onder extreme omstandigheden, een natuurwet afgeleid te zien die grote gevolgen heeft voor de theoretische astronomie, en daarmee voor ons hele wereldbeeld.

Dit is maar één van de vele voorbeelden van hoe de astronomie profiteert van de resultaten van deze experimenten.

2. De versneller

Willen we dit soort botsings-experimenten doen, dan moeten we gebruik maken van een deeltjesversneller om een bundel hoogenergetische deeltjes te produceren.

Hierbij kunnen we niet te werk gaan volgens de definitie van onze eenheid. Twee platen opstellen met daartussen een spanning van vele miljarden volts is echter onmogelijk.

Hiervoor wordt dus in het algemeen het cyclotronprincipe gebruikt:

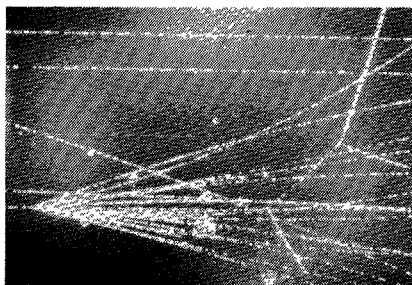
een magneetveld brengt de deeltjes in een cirkelvormige baan en op deze manier worden zij keer op keer door hetzelfde versnellingsstation gestuurd. Dergelijke machines staan in Eindhoven, Amsterdam en Groningen, maar de eind-

energie ligt dicht bij de MeV dan de GeV, en zij worden dus voor kernfysische experimenten gebruikt.

Een machine die deeltjes kan versnellen tot energieën bruikbaar voor de studie van de elementaire deeltjesstructuur bestaat niet in Nederland en de oorzaak daarvan volgt uit een eenvoudige formule namelijk, de relatie tussen de kromtestraal (R) van de baan, de energie of impuls (P) die we willen bereiken en het magneetveld (B):

$$R = 33 \cdot p/B \text{ (in meters)}$$

met p in GeV, en B in kilogauss.



Figuur 3 Hoge-energie botsing in beeld. Twee protonen botsen en er worden twintig deeltjes geproduceerd.

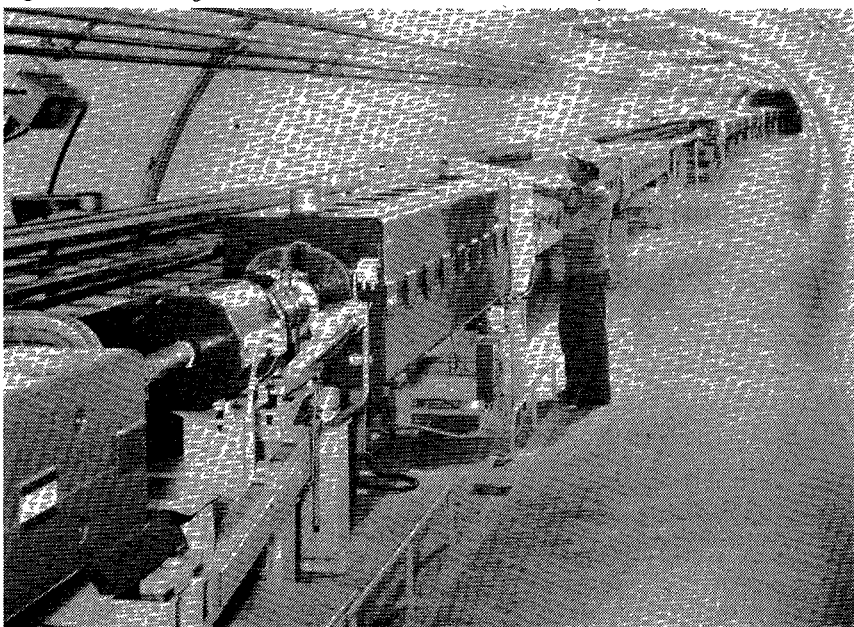
De grootste versneller in Europa kan protonen versnellen tot 400 GeV (dus kinetische energie = 400 maal rustmassa!) en staat in Genève in 'CERN', een instituut opgericht door elf Europese landen, waaronder Nederland.

De formule als boven, geeft nu voor 400 GeV en 10 KGauss:

$$R = 1320 \text{ meter.}$$

Met andere woorden, we hebben een

Figuur 4 Een klein gedeelte van de 400 GeV versneller in CERN, Genève.



magneet nodig met een diameter van 2,6 kilometer.

Het is duidelijk dat iets dergelijks niet uitgevoerd wordt door één gigantische magneet te bouwen, maar dat de zaak wordt uitgevoerd door honderden magneten op de berekende deeltjesbaan te zetten en op deze manier de protonen in een benaderde cirkelbaan te brengen.

Figuur 4 toont een klein gedeelte van de versneller in Genève.

De machine is opgesteld in een tunnel ver onder de grond, dus een luchtfoto als getoond in figuur 5 laat alleen door tekenen zien waar de machine ligt. Op de achtergrond is de stad Genève te zien en het Alpengebied.

3. Het experiment

Er zijn in de afgelopen twintig jaar tientallen experimenten gebouwd, waarmee men verschillende aspecten kon bestuderen van het soort botsingsprocessen als getoond in figuur 3.

Hier wil ik een techniek bespreken die nu in vrijwel alle experimenten wordt gebruikt:

het meten van de *richting* van een spoor en de *kromming* in een magneetveld via plaatsbepalingen in driftkamers.

Deze techniek is een goed voorbeeld van experimenteertechniek in de H.E.-fysica, maar lang niet de enige. Het is binnen het bestek van dit artikel niet doenlijk om een overzicht te geven van alle mogelijkheden van deeltjesdetectie en identificatie.

Een goede inleiding in deze materie is gegeven in een artikelenserie in *Natuur en Techniek* [1].



Figuur 5 Het landschap bij Genève, met daarin de ondergrondse grote versneller aangegeven met een streeplijn.

Figuur 6 toont het principe van impulsbepaling door middel van magnetische afbuiging:

de richting en plaats van het spoor wordt gemeten vóór en na het doorlopen van een magneetveld.

Een voorbeeld:

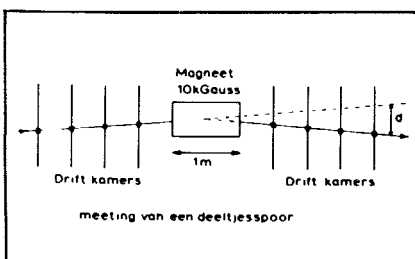
De formule van de kromtestraal leert ons, dat een magneet van 10 KGauss en 1 meter lang, een deeltje van 100 GeV $0,17^\circ$ afbuigt.

Dit geeft $d = 1,5$ cm in figuur 6. Willen we dus d bepalen voor deeltjes van dit soort energieën dan moet derhalve de deeltjesbaan door een hele opstelling van 11 meter lang, gemeten worden tot op fracties van millimeters.

Deze plaatsbepalingen gaan via driftkamers, schematisch voorgesteld door verticale lijnen op het deeltjesspoor in figuur 6.

Snelle deeltjes laten een ionisatiespoor na in een gas of vloeistof en worden vrijwel niet geremd of afgebogen in lucht.

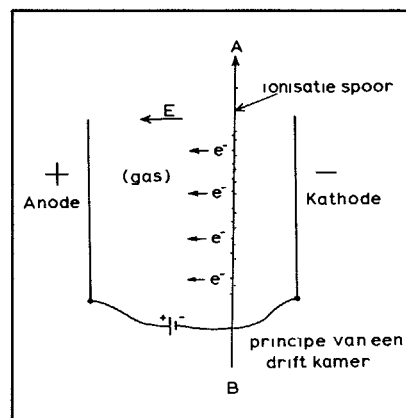
Figuur 6 Bepaling van baan en impuls van een deeltje; de verticale lijnen stellen complete driftkamers voor, elk met honderden meet- en velddraden.



Het is dus mogelijk om de reactieproducten door vele kamers te laten lopen zonder de baan noemenswaard te verstoren. Het is duidelijk uit figuur 3 dat de afmetingen van deze detectoren groeien als we verder van de bron gaan zitten, en bijvoorbeeld de afmetingen van de magneten die gebruikt worden leiden onmiddellijk tot spoorlengten zoals die zijn af te leiden uit figuur 6.

Figuur 7 toont het principe van een gasdriftkamer.

In een vat gevuld met gas - een argonethaan mengsel - heerst een constant



Figuur 7 De door het snelle deeltje vrij gemaakte elektronen bewegen zich naar de anode; uit de verschillen van hun aankomsttijd is de richting af te leiden van het deeltjesspoor. De anode bestaat in de regel uit een dradenrooster, loodrecht op het vlak van tekening.

elektrisch veld van bijvoorbeeld 500 Volt per centimeter. Is het vat 10 centimeter breed, dan staat er dus een spanning van 5000 Volt tussen de wanden.

Een snel deeltje vliegt er doorheen - baan BA - en laat een hoeveelheid vrije elektronen en de bijbehorende ionen achter. Deze elektronen vrij gemaakt uit het gas, drijven - driften - met een snelheid van 5 centimeter per microseconde naar de positieve pool, de ionen vertrekken met een 1000-maal lagere snelheid naar de negatieve pool en worden verder niet gebruikt.

De snelheid van de elektronen is bekend; meten we dus het tijdsverschil tussen de doorgang van het deeltje en de aankomst van de elektronen op de wand, dan kan uit dit tijdsverschil de afgelegde weg berekend worden en dus de plaats van doorgang van het deeltje door het gas.

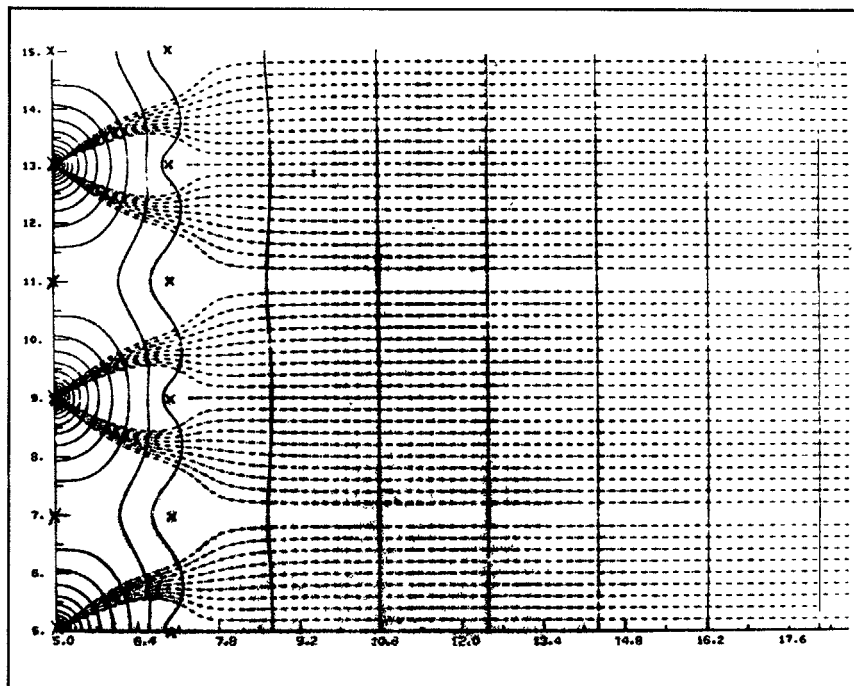
Dit klinkt allemaal zeer eenvoudig, maar er is een technische moeilijkheid:

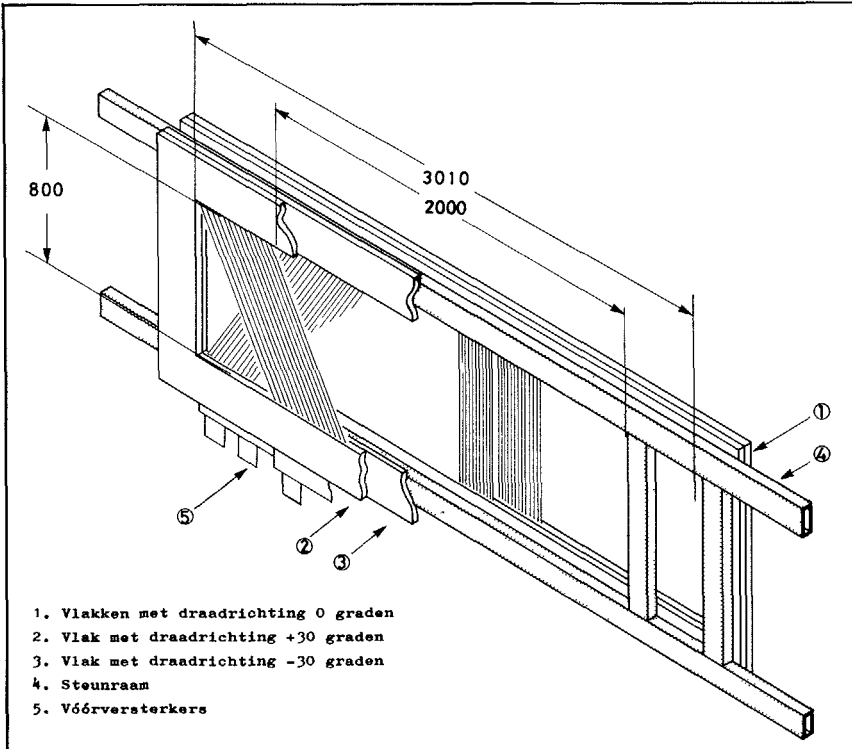
het aankomen van enkele elektronen op een elektrode is praktisch niet waar te nemen, omdat de ruis van versterkers die voor dit doel geschikt zijn dit signaal vele malen overtreft.

Hiertegen wordt het principe van secundaire elektronvermenigvuldiging toegepast.

De positieve elektrode wordt vervangen door een vlak gevormd door draden op dezelfde spanning en daarachter, in hetzelfde gas, bevinden zich extra dunne

Figuur 8 Weergave van de banen van de ionisatie-elektronen in een driftkamer, berekend en getekend door een computer. De getrokken lijnen zijn gelijke-veldsterkte lijnen; de kruisjes geven de plaats aan van de draden, die loodrecht staan op het vlak van tekening.





Figuur 9 Schematische weergave van de opbouw van een dradenkamer met meetvlakken in verschillende richtingen.

draden, ongeveer 20 micron dik, op een veel grotere positieve spanning. Figuur 8 brengt dit in beeld.

Vlakbij deze draden heerst zo'n grote veldsterkte in het gas, dat de aankomende elektronen daar zoveel energie krijgen, dat zij bij botsingen met de gasmolekulen nieuwe elektronen kunnen vrijmaken. Dit proces start een lawine zodat, in plaats van één, vijfduizend elektronen op de draad aankomen.

Deze pulsen zijn elektronisch zeer goed te meten en fungeren als stop voor een klok die gestart is op het moment van passeren van het deeltje.

De fout in deze tijdsbepaling is ongeveer 3×10^{-9} seconde, of uitgedrukt in positie; 0,15 millimeter.

Een opstelling van vele driftkamers kan beter:

deeltjes met hoge energie volgen een baan, die ook in de lucht bij zeer goede benadering recht is, zodat het mogelijk is een driftkamermeting vele malen te herhalen.

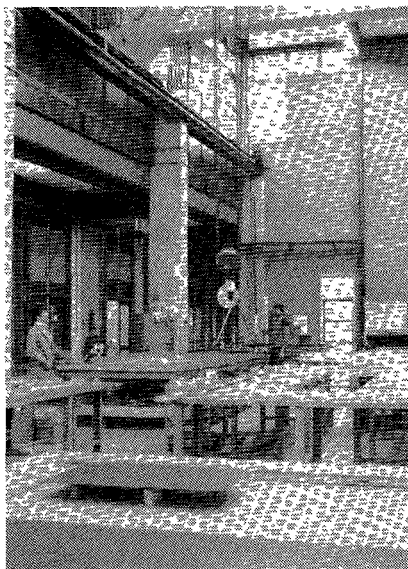
Letten we nu alleen op de plaatsbepaling, dan zal na N metingen de fout dalen met een factor $1/\sqrt{N}$, mits systematische (mechanische) fouten dit niet beperken.

Op het NIKHEF zijn op deze wijze in proefopstellingen plaatsbepalingen met een nauwkeurigheid van 20 micron gedaan over een afstand van 1 meter. De

mechanica was dus nog een factor beter.

De laatste jaren zijn grootschalige toepassingen van dit principe gerealiseerd. Vlakken van $4 \times 4 \text{ m}^2$ met duizenden draden, die elk zowel wat positie en dikte betreft aan hoge eisen moeten voldoen om de elektrische potentialen en daarmee de elektronbanen naar de anodedraden binnen nauwe toleranties de berekende waarden te laten volgen.

Figuur 9 toont schematisch de opbouw van een kamer waarin de draden onder



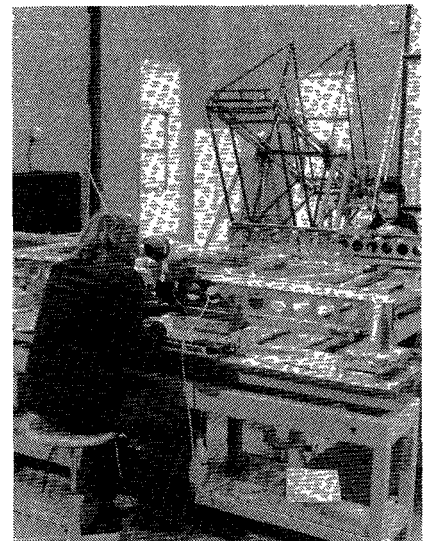
Figuur 10 De montagehal in het NIKHEF.

verschillende hoeken opgesteld staan. Dit is gedaan om de plaats van doorgang van het deeltje in de ruimte te kunnen vaststellen. één dradenvlak meet de positie maar in één richting, dus minimaal zijn twee vlakken nodig met de draden opgesteld onder een hoek.

Op het NIKHEF is de werkplaats uitgerust om dergelijke grote kamers te kunnen fabriceren.

Een eerste vereiste voor objecten van dergelijke afmetingen is ruimte, de tweede is machines die nauwkeurig grote afmetingen kunnen behandelen, de derde is meetapparatuur om de precisie te kunnen controleren.

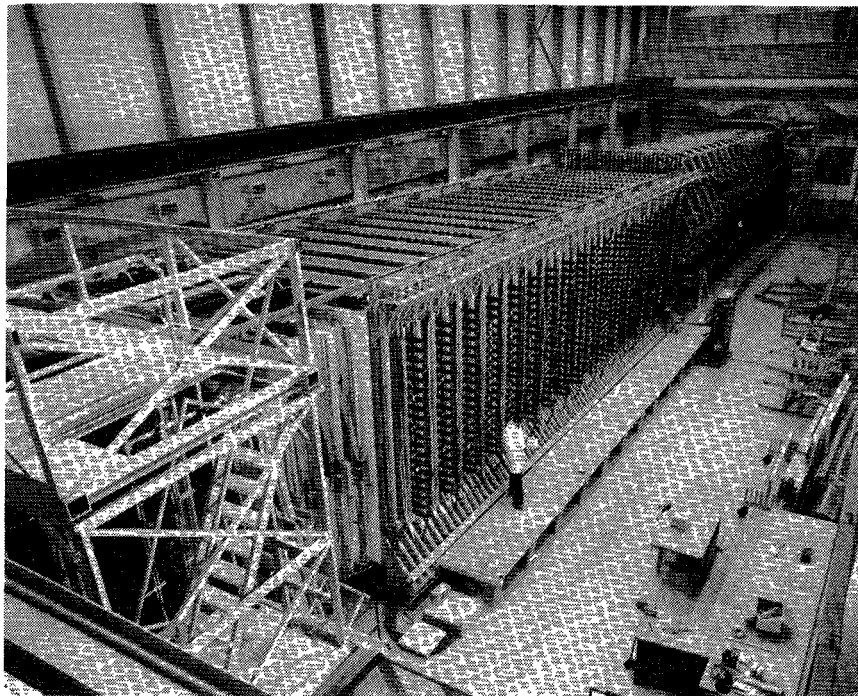
Figuur 10 toont dat aan de eerste voorwaarde voldaan wordt, de tweede wordt gerealiseerd door onder meer numeriek-bestuurde machines en de derde wordt



Figuur 11 Monteren van een dradenvlak met behulp van meetmicroscopen.



Figuur 12 Controleren van een dradenvlak; de trekspanning in een draad wordt bepaald door het meten van zijn mechanische resonantiefrequentie.



tot uitdrukking gebracht in de foto's 11 en 12, waar het monteren en nameten van dradenvlakken met behulp van meetmicroscopen in beeld is gebracht. In een aansluitende bijdrage wordt op de technische uitrusting van het NIKHEF nader ingegaan.

In een experimentele opstelling zijn meestal tientallen kamers, zoals besproken, verscholen en ook scintillatie-vlakken, zoals op de foto 5 van het aansluitende artikel.

Foto 13 toont een dergelijke opstelling van in totaal 50 meter lengte in één van de experimenteerhallen van CERN.

[1] 'Hoge Energiefysica', Natuur en Techniek, Maastricht, cat. nr. 958.

Figuur 13 Een groot experiment in CERN met bij het NIKHEF te Amsterdam vervaardigde drijfchamers en scintillatievlakken

'T' boekbespreking

Kleinrechnereinsatz für Berechnungsaufgaben im Konstruktionsbereich; auteur N. Dickhaus; uitgave VDI Dusseldorf; 150 pag.

Dit boek is ontstaan toen de auteur werkzaam was aan het laboratorium voor Gereedschapswerktuigen en Bedrijfsleer van de TH Aken

Door recente ontwikkelingen in de tafelcomputer, is het mogelijk tal van rekenkundige problemen op te lossen, die voorheen slechts door grote rekeneenheden konden worden verwerkt. Er is een duidelijke evolutie naar decentralisatie van de informatieverwerking

De auteur geeft een overzicht van de stand van zaken op gebied van de berekening van gereedschapswerktuigen aan de TH Aken Bondig maar wetenschappelijk worden tal van berekeningsmethoden voor diverse elementen van gereedschapswerktuigen beschreven, zoals balkelementen, lager-, as-, spil-machiefreem; statisch en dynamisch gedrag. Het boek geeft aan welke rekenprogramma's voor de berekening van machineonderdelen geschikt zijn voor tafelcomputers. Het boek is nogal wetenschappelijk georiënteerd. Wie het wil lezen moet kennis hebben van matrixrekenen.

NC-gerechte Beschreibung von Werkstücken in fertigungstechnischen orientierten Programmiersystemen; auteur W Dreker; uitgave Springer Verlag Berlin, 1980, 105 pag., prijs DM 32,-

Dit boek is nummer 31 uit de reeks *Berichte aus dem Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen* van de Universiteit Stuttgart. Zoals de titel al aangeeft, gaat de auteur uit van NC-bewerkingen. Hij beschrijft onder meer werkstukbeschrijvingssystemen in de fabricage-technieken zoals met de APT-taal, de basisprincipes van een algemene werkstukbeschrijving ten behoeve van NC-machines (bijvoorbeeld volumegeoriënteerd), realisatie van dergelijke naar volume georiënteerde werkstukken in het kader van NC-programmeersystemen (automatisering van de kwaliteitscontrole) en geeft een grafische voorstelling van werkstukken volgens deze volume-oriëntatie. Het is een wetenschappelijk hoogstaand maar theoretisch boek.

Speicherprogrammierbare Steuerungsgerate; uitgave VDI-Verlag Dusseldorf 1981; 70 pag., prijs DM 49,-

Dit boek geeft de voordrachten van de gelijk-

namige studiedag, georganiseerd door de VDI-afdeling *Produktietechnik*. Zoals uit de titel blijkt, gaat het boek over programmeerbare besturingsapparaten met geheugen capaciteit. Er wordt een overzicht gegeven van de huidige stand van zaken en de toepassingsgebieden transport, autobouwwerk, elektrische centrales en gereedschapswerktuigen. Ook wordt ingegaan op de betrouwbaarheid van de systemen, de diagnosemogelijkheden en de besturing. Het is een interessant, omvangrijk en nogal wetenschappelijk boek.

Wer baut Maschinen 1982; uitgave Hoppenstedt Verlag, Darmstadt 1982.

Dit Duitse jaarboek wordt samengesteld in samenwerking met het 'Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau' en wordt uitgegeven in de talen Duits, Engels, Frans en Spaans. Dit is de 44e uitgave. Het is alfabetisch ingedeeld naar merknamen en bevat verder een lijst van circa 5000 machine- en aparatengroepen uit diverse takken van de machinebouw. In totaal worden circa 18.000 bedrijven beknopt beschreven, met hun fabrieken. Het derde deel tenslotte geeft in alfabetische volgorde de diverse bedrijven en hun specifieke producten.

C. Dekoninck