

Het Project Moderne

Bij de voorbereiding van het studiehuis is de vakinhoud destijds onder grote tijdsdruk ingevuld en is de moderne natuurkunde er maar bekaaid afgekomen. De BINASK-vakontwikkelgroep (voor Biologie NATuurkunde ScheiKunde) was zich hiervan bewust en suggereerde een speciaal *Project Moderne Natuurkunde* (PMN) om voor dit onderwerp nieuw materiaal te ontwikkelen voor het Natuur&Techniek-profiel op het vwo. Deze suggestie heeft inmiddels gestalte gekregen en wordt in dit artikel besproken.

Dick Hoekzema, Gert Schooten, Ed van den Berg en Piet Lijnse

D.J.Hoekzema@phys.uu.nl



Dick Hoekzema (doctoraal en promotie in 1981 en 1993, Utrecht) is sinds 1996 hoofdauteur van PMN. Tevens is hij docent natuurkunde aan het Hervormd Lyceum Zuid in Amsterdam.

gertschooten@wish.nl



Gert Schooten (doctoraal in 1991, Utrecht) is medeauteur van PMN (2000-2003) en docent natuurkunde aan het Agnieten College in Zwolle, locatie Carolus Clusius.

edberg51@planet.nl



Ed van den Berg (doctoraal VU 1975, promotie University of Iowa 1978) is onder andere parttime medewerker van PMN (sinds 2003) na een loopbaan als docent natuurkunde en vakdidactiek aan leeropleidingen in ontwikkelingslanden.

P.L.Lijnse@phys.uu.nl



Piet Lijnse (doctoraal en promotie in 1970 en 1973, Utrecht) is hoogleraar Natuurkunde Didactiek in Utrecht.

Om maar direct met de deur in huis te vallen, in het kader ziet u een opgave uit een eindtoets in 6-vwo van het *Project Moderne Natuurkunde* (PMN). In tegenstelling tot veel andere middelbare schoolopgaven betreft het hier duidelijk natuurkunde van na 1900 of zelfs van na 2000. Om met succes dit soort opgaven te maken, moeten leerlingen een compleet nieuwe context kunnen begrijpen. Ze waren nanodraden nog niet eerder tegengekomen. Ze moeten dus ter plekke begrippen uit diverse onderdelen van de schoolnatuurkunde aanwenden om de context te begrijpen en problemen op te lossen. Dat vereist lenigheid met begrippen en contexten, een lenigheid die we in PMN proberen te ontwikkelen. De PMN-leerlingen hebben deze opgave goed gemaakt. De middelbareschoolleerling hoeft dus niet te wachten tot het tweede of derde jaar van de universiteit om aan moderne natuurkunde te kunnen ruiken. Trouwens, zowel in 2002 als in 2003 zijn bijna alle PMN-deelnemers naar versnellers van CERN (Genève), DESY (Hamburg), of GSI Darmstadt (zware ionen) geweest. Dit jaar waren er zelfs leerlingen die voor het Natuur&Techniek-profiel kozen vanwege de

excursies. Dit succes is mede te danken aan inspanningen binnen Stichting FOM die de excursies in 2002 subsidieerde. De leerlingen konden toen mee voor de zeer aantrekkelijke prijs van zeventig euro, wat er toe leidde dat ook vrijwel iedereen meeging. Drie weken achter elkaar zijn er toen Nederlandse scholieren van woensdag tot en met vrijdag naar het CERN geweest. In 2003 en 2004 was er geen subsidie, maar toch lukte het de totale kosten voor leerlingen te beperken tot beneden de tweehonderd euro en gingen de meeste leerlingen mee.

HET PROJECT

Sinds 1997/98 wordt het materiaal van PMN in een toenemend aantal scholen uitgetest en gebruikt (zie de tabel). Het lesmateriaal is nu redelijk geperfectioneerd en jaarlijkse aanpassingen zijn steeds minder ingrijpend.

De uitgangspunten voor PMN waren de volgende.

PMN moet:

- leerlingen in staat stellen zich een beeld te vormen van hedendaagse natuurkunde;
 - conceptueel interessant zijn en uitdagend, zonder leerlingen meteen te confronteren met ingewikkelde natuurkunde;
 - gelegenheid geven tot verbreding en verdieping;
 - voldoende toetsbaar zijn;
 - voor docenten boeiend en onderwijsbaar zijn;
 - aansluiten bij met name scheikunde en algemene natuurwetenschappen.
- De onderwerpen in het PMN-pakket zijn:
- Fotonen en elektronen: golf-deeltje-dualisme en waarschijnlijkheid.

Tabel 1 Deelnemende scholen, docenten, en leerlingen

	2001/2002	2002/2003	2003/2004
Scholen	11	13	24
Docenten	11	13	27
Leerlingen	143	184	322

Natuurkunde

- Atomen en moleculen met onder andere een eenvoudige behandeling van een deeltje in een doos met toepassingen op sterkte van materialen en kleuren van pigmenten, spectra van atomen en moleculen, en sterkte van materialen.
- Reacties van atomen, kernen, en elementaire deeltjes, behoudswetten en symmetrieën [1].
- Astrofysica met speciale aandacht voor de interactie tussen theorie, modellen, en waarneming, leerlingen gebruiken eenvoudige modellen om te rekenen aan sterren.

Voor een volledig overzicht van al het materiaal verwijzen we naar onze website [2].

Velen van u zullen belangrijke onderwerpen uit de moderne natuurkunde missen. Geen relativiteitstheorie, geen supergeleiding, geen halfgeleiderfysica, geen laserfysica, geen medische fysica of biofysica, enzovoort. Jammer, maar niet alles kan in een middelbareschoolprogramma en de keuzes zijn dus uitgevallen in het voordeel van elementaire deeltjes en astrofysica én in het voordeel van diepte in plaats van een encyclopedisch overzicht van moderne natuurkunde. De quantumfysica die we behandelen is natuurlijk wel de basis voor die niet-behan-



vwo-leerlingen tijdens een excursie naar CERN.

delde vakgebieden. De opgave over nanoraden laat ook zien dat het mogelijk is toepassingen uit gecondenseerde materie of andere gebieden met succes te introduceren in opgaven.

TIJD EN HAALBAARHEID

Alles bij elkaar neemt PMN 35–40 lessen in beslag. Dit is 1,5–2 keer zoveel als de tijd die onder het gewone programma aan moderne natuurkunde wordt besteed. In het gewone N&T-programma zijn wat lessen over. Verder creëren do-

centen tijd door in 5-vwo en/of 6-vwo iets sneller door de andere onderwerpen te gaan. De 24 scholen die dit jaar meedoen, vinden het PMN-programma haalbaar. Docenten die besluiten niet mee te doen, geven meestal aan dat ze niet 35 lessen kunnen vrijmaken binnen het huidige programma.

Inhoudelijk is het programma van PMN goed te doen in 6-vwo N&T. De stof geeft gelegenheid tot discussies over fundamentele interpretatieproblemen in de natuurkunde en die gelegenheid wordt enthousiast aangegrepen. De meeste N&T-leerlingen vinden de stof uitdagend, moeilijker dan klassieke natuurkunde, abstract, maar ook interessant, en binnen hun bereik.

REACTIES VAN LEERLINGEN

Uit interviews blijkt dat leerlingen zeer goed het contrast doorhebben tussen klassieke en moderne natuurkunde: determinisme versus kansprocessen, duidelijke deeltjes met eigenschappen versus onduidelijke golfdeeltjes. Het zit ze niet lekker, *hoe zit het nu?, wat zijn elektronen?, hoe moet je je nu een echt atoom voorstellen, of een foton?* Moeilijk, maar ook een heel nieuwe kant van een vak waarvan iedereen dacht dat alles dui-

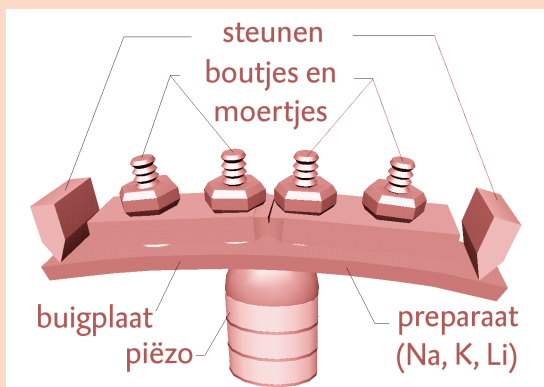


Voorbeeld (school)examenopgaven Project Moderne Natuurkunde

1. Geleiding in nanodraden

De nanofysica is een vakgebied dat tegenwoordig sterk in ontwikkeling is. Het onderzoekt de eigenschappen van materie met afmetingen in de buurt van een nanometer. Bij het verklaren van de verschijnselen op deze schaal schiet de klassieke fysica vaak tekort en is het nodig de wetten van de quantumfysica te gebruiken.

2p 1_ Licht aan de hand van een voorbeeld een eigenschap van materie toe die alleen met behulp van quantumfysica te verklaren is.



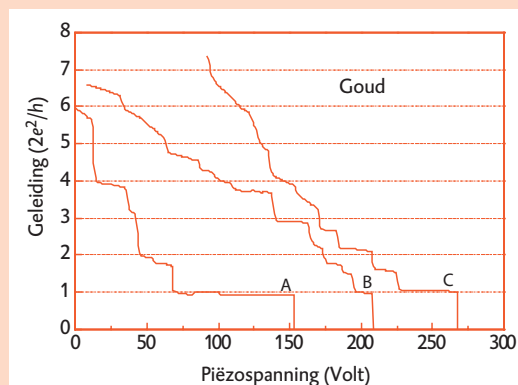
Figuur 1
Nanodraden zijn extreem dunne metalen draadjes. Ze kunnen gemaakt worden met behulp van de breekjunctietechniek. Een draad, met in het midden een inkeping, wordt op een buigplaat gemonteerd. Bij doorbuigen breekt de draad op het zwakke punt. Door de punten bij elkaar te brengen en dan heel voorzichtig weer verder te rekken ontstaat een overbrugging van enkele nanometers dik: de nanodraad. De doorbuiging kan extreem nauwkeurig worden fijn geregeld via de spanning op een piëzo-element, zoals weergegeven in figuur 1.

Via deze techniek kunnen zeer dunne draden worden gerealiseerd, tot zelfs verbindingen van slechts een enkel atoom dik. Tijdens het oprekken wordt onder andere de elektrische geleiding in dergelijke dunne draden onderzocht. De elektrische geleiding G is de omgekeerde fysische grootheid van de elektrische weerstand R .

3p 2_ Leg uit hoe volgens de klassieke natuurkunde (onder andere de wet van Ohm) de elektrische geleiding afhangt van de doorsnede van de draad.

In figuur 2 zijn de meetresultaten te zien van drie verschillende draden. De geleiding is uitgezet tegen de spanning over het piëzo-element. Een grotere spanning betekent een grotere uitrekking, dus een dunnere draad. Zodra de draad breekt stopt de geleiding.

Bij de drie draden in figuur 2 vindt de breuk steeds plaats als de draad nog maar één atoom dik is. Opvallend is dat de geleiding dan telkens een zelfde waarde heeft. Deze waarde wordt G_0 genoemd, de quantumeenheid van geleiding, en bedraagt $2e^2/h$.



Figuur 2

3p 3_ Laat met behulp van een eenhedenbeschouwing zien dat de eenheid van $2e^2/h$ inderdaad het omgekeerde is van de eenheid van weerstand.

3p 4_ Bereken de geleiding van een contact dat nog slechts bestaat uit een enkel atoom.

8

Bij de metalen goud, platina en iridium is waargenomen dat er draden gevormd werden van een enkel atoom dik en een aantal atomen lang. Volgens de quantumtheorie van geleiding wordt weerstand vooral veroorzaakt door botsingen van elektronen met fouten in het metaalrooster. In een draad van één atoom dik kunnen dergelijke fouten niet voorkomen. De weerstand zou dus ook niet moeten toenemen als de draad langer wordt.

Figuur 2 heeft betrekking op een gouddraad en de metingen lijken te bevestigen dat de weerstand inderdaad niet toeneemt met de lengte van de draad.

3p 5_ Leg dit uit door de onderste niveaus A, B en C in figuur 2 met elkaar te vergelijken.

Met behulp van de geleiding werd ook de diameter van de draden onderzocht. Volgens de theorie geeft onderstaande relatie in goede benadering de diameter van een dunne draad:

FORMULE??

Hierin is d de diameter van de draad en λ_F de golflengte van de elektronen bij de 'fermi-energie'. Voor goud is deze gelijk aan $\lambda_F = 0,523$ nm.

Voor draden van één atoom dik volgt uit deze formule een benadering voor de diameter van een goudatoom.

3p 6_ Bereken deze diameter.

delijk was. De natuur heeft ook een exotische kant en voorstellingsproblemen zijn inherent aan dat vak dat eerder zo concreet leek. Een leerling merkte op dat hij vóór de bestudering van moderne natuurkunde dacht dat natuurkunde een erg concreet vak was. Dat zou je inderdaad gaan denken nu in het studiehuis natuurkunde vaak gereduceerd wordt tot sommen maken en de tijd voor begripsdiscussies en practicum sterk verminderd is. Na de ervaring met de moderne natuurkunde denkt deze leerling daar heel anders over. "Natuurkunde heeft zelfs raakvlakken met de filosofie", zegt hij. Een 6-vwo-leerling die vrijwel nooit huiswerk doet voor natuurkunde zei: "Wij leren dingen die niemand anders in onze school weet!". Klasgenoten knikken enthousiast. "De anderen hier op school weten nog wel van atomen, moleculen, en ook nog van protonen en neutronen, maar van quarks, pionen, en gluonen, dat weten wij alleen." "Er zijn regelmatig opmerkingen in het lesmateriaal van 'dat weten wij fysici nog niet'. Dat laat zien dat we nu toch inderdaad dicht bij de grenzen van de huidige natuurkunde zitten, dat geeft een leuk gevoel." Deze opmerkingen werden gemaakt nog voordat de leerlingen toekwamen aan de sterrenkunde met zijn exotische objecten en een excursie naar CERN.

Zijn alle leerlingen zo enthousiast? Er zijn leerlingen voor wie quantumfysica net een stapje te hoog is. Dan is het zwoegen. Er zijn natuurlijk ook leerlingen die de klassieke natuurkunde prefereren. Een meerderheid vindt de moderne natuurkunde interessanter.

REACTIES VAN DOCENTEN

De deelnemende docenten vinden de lesstof zeer interessant en gebruiken die graag in hun lessen, ook docenten die destijds zelf weinig of geen quantumfysica hebben gedaan.

Voor de eerste keer eist de stof veel extra voorbereiding. De stof met zijn

moeilijke en abstracte begrippen vereist een wat meer traditionele lesvorm: klassikale discussie en interactie over de betekenis van die begrippen. Zowel docenten als leerlingen vinden dat prettig na een lange periode van individueel sommen maken in 'studiehuisfysica'.

Docenten die voor het project gekozen hebben, blijven in vrijwel alle gevallen meedoen. In de gevallen waarbij men afhaakt wordt als oorzaak vaak gegeven dat de school minder contacttijd voor het vak natuurkunde tot zijn beschikking stelt, of dat een collega aan de beurt is om 6-vwo N2 te geven en ook met PMN mee zal doen. Er is geen sprake van teurstelling over het meedoen aan het project. Wel ervaart men problemen met de tijdsdruk. Men moet zich zeer goed aan een planning houden om alles af te krijgen.

TOETSING

Er is een aangepast eindexamen waarin alle moderne natuurkundevragen zijn vervangen door vragen die op het PMN-pakket betrekking hebben. Dit examen wordt samen met CEVO en CITO georganiseerd. Daarnaast is er elk jaar in maart een schoolexamen dat gezamenlijk met een aantal deelnemende docenten ontwikkeld wordt. In het verleden was toetsing een van de problemen bij het invoeren van moderne natuurkunde, *hoe toets je dat?* Inmiddels ligt er een uitgebreid pakket aan voorbeeldopgaven. Hiermee is in onze ogen aangetoond dat moderne natuurkunde goed toetsbaar is, hoewel het ontwerpen van opgaven niet gemakkelijk is.

PMN IN ANDERE PROFIELEN?

De algemene ontwikkeling van onze middelbare scholieren kan niet compleet zijn als ze niet even aan quantumfysica geroken hebben. Zowel in de technische kant van de samenleving als in de literatuur vindt men veel verwijzingen naar de mysterieuze quantumfysica. Ein-

stein was de man van de twintigste eeuw. Namen als Rutherford, Bohr, Heisenberg, Planck en vele anderen zijn algemeen bekend. De moderne fysica is een onderdeel van onze cultuur. Dan kun je het toch niet maken om dat allemaal weg te laten uit het middelbareschoolprogramma! Het PMN-materiaal is veeleisend en afgestemd op de goede leerlingen van het N&T-programma. Het wordt echter ook tijd te werken aan moderne natuurkunde materiaal dat geschikt is voor een breder publiek. Het is mogelijk, Hewitt [3] heeft het gedaan in zijn *Conceptual Physics*, misschien het meest gebruikte natuurkundeboek voor niet-technische richtingen op Amerikaanse universiteiten. Hij heeft zelfs hoofdstukjes over relativiteitstheorie en kosmologie voor een niet-wiskundig en breed publiek. Er zijn schoonheidsfoutjes in zijn behandeling, maar hij slaagt er zeker in iets van de 'excitement' en mogelijk een beetje begrip over te brengen op een typisch alfa-publiek. Wij zouden graag een Hewitt-cursus geven aan leden van de Tweede Kamer.

TOEKOMST EN DEELNAME

Aangezien curriculumwijzigingen in het huidige vwo-programma pas in 2007 worden ingevoerd in de vierde klas, kan het PMN-materiaal nog tot 2009 in de zesde klas gebruikt worden. Verder verwachten we dat het ontwikkelde materiaal daarna in de een of andere vorm terug zal komen in een nieuw vak voortgezette natuurwetenschap. Meer deelnemende docenten en scholen zijn welkom. De eerste vijftig scholen krijgen al het lesmateriaal gratis, en uiteraard is er ook begeleiding en assistentie vanuit het project.

REFERENTIES

- 1 D.J. Hoekzema, G.J. Schooten en E. van den Berg, *NVOX* 28 (2003), 230–233.
- 2 <http://www.phys.uu.nl/~wwwpmm>.
- 3 P.G. Hewitt, 'Conceptual Physics', negende editie (Addison-Wesley, 2002).