

Probleemoplossen, leren en onderwijzen in exacte vakken: een voorbeeld uit de natuurkunde

Ton de Jong^{1*} en Monica G.M. Ferguson-Hessler²

¹ *Faculteit Toegepaste Onderwijskunde, Universiteit Twente**

² *Faculteit Wijsbegeerte & Maatschappijwetenschappen en Faculteit Natuurkunde, Technische Universiteit Eindhoven*

ABSTRACT

Through the years we have performed a number of studies in the field of problem solving, learning and instruction in physics. More specifically, we have examined these phenomena for first year University of Technology students in the domain of Electricity and Magnetism (E&M). In our studies the knowledge base, the problem solving process and learning processes of subjects were meticulously analyzed and a comparison between good and poor students was made (De Jong, 1986; Ferguson-Hessler, 1989; De Jong & Ferguson-Hessler 1983, 1984, 1985, 1986, 1987, 1988, 1991, 1993; Ferguson-Hessler & De Jong, 1986, 1987, 1989, 1990, 1993a, 1993b). A theoretical model containing three main elements was developed:

- Problem solving in semantically rich domains is considered as the *successive transformation of an internal representation* of the problem.
- In the knowledge base of the problem solver different *types of knowledge* can be distinguished, each of them playing a specific role in the problem solving process.
- The knowledge base can be described in terms of different *qualities*, such as for example the modality of knowledge, the structure and level of compiledness.

The present paper gives a summarised overview of the concepts developed and of the results of the empirical studies.

INLEIDING

Natuurkunde is een van de vakken die als moeilijk bekend staan. Er is hiervoor een drietal redenen te geven (zie Ferguson-Hessler & De Jong, 1993b):

- Natuurkunde heeft een sterke, intrinsieke structuur: begrippen hebben een ondubbelzinnige betekenis en tussen de begrippen bestaan logische verbanden; wetten hebben stringente afleidingen en geldigheidsvoorwaarden. De structuur is vaak hiërarchisch: algemene en abstracte begrippen en wetten overkoepelen een aantal specifieke definities en formules.
- Begrippen en relaties hebben zowel een formele en symbolische representatie, noodzakelijk voor wiskundige manipulatie, als een concrete fysisch-technische representatie. Men moet niet alleen beide representaties kennen, maar ook op een soepele manier van representatie kunnen wisselen, en voor iedere toepassing de meest geschikte representatie kunnen kiezen.
- Doelstellingen binnen de natuurkunde zijn vaak gericht op het uitvoeren van taken waar inzichtelijk handelen gevraagd wordt, bijvoorbeeld probleemoplossen.

Omdat natuurkundevakken aan de ene kant als complex en moeilijk worden ervaren, maar aan de andere kant een heldere en ondubbelzinnige structuur hebben, is er veel onderzoek geweest naar het oplossen van natuurkunde problemen (zie bijvoorbeeld Reif, Larkin, & Brackett, 1976;

* Adres: Vakgroep Instructietechnologie, Faculteit Toegepaste Onderwijskunde, Universiteit Twente, Postbus 217, 7500 AE Enschede.

Larkin, 1981; Chi, Feltovich, & Glaser, 1981; Anzai & Yokoyama, 1986), en recentelijk meer naar het verwerven van kennis in de natuurkunde (Chi, Bassok, Lewis, Reimann, & Glaser, 1989; Ferguson-Hessler & De Jong, 1990). Een logische volgende stap is het in kaart brengen van onderwijsprocessen (Ferguson-Hessler & De Jong, 1993a).

EEN ALGEMEEN MODEL VAN PROBLEEMOPLOSSEN, LEREN EN ONDERWIJZEN

In het complexe proces van leren en onderwijzen kan een aantal hoofdaspecten onderscheiden worden:

- a. Het uitvoeren van een criteriumtaak (bijvoorbeeld het oplossen van problemen);
- b. Een kennisbasis, die verworven moet worden om de criteriumtaak uit te kunnen voeren;
- c. Leerprocessen, die nodig zijn voor de verwerving van de kennisbasis;
- d. Instructie, bedoeld om leerprocessen te faciliteren.

Bij leren en instructie is er altijd een of ander *leerdoel*. Leerdoelen kunnen vele vormen hebben, van het behendig kunnen fietsen tot het kunnen oplossen van natuurkunde problemen, maar vrijwel altijd is het leerdoel het uit kunnen voeren van een specifieke taak. Het bereiken van dit doel wordt vaak beoordeeld met behulp van een test, tentamen of examen. Een algemeen model van het uitvoeren van een taak is dat de oplosser een interne representatie van de taak creëert en deze representatie manipuleert tot de oplossing wordt bereikt (Newell & Simon, 1972).

De interne representatie van een aangeboden probleem is in eerste instantie een representatie van het probleem op zich. Deze initiële representatie komt tot stand op basis van een proces van selectieve perceptie en door het toevoegen van informatie uit het kennisbestand van de uitvoerder van de taak. *De kennisbasis* heeft zo op twee manieren invloed op de initiële representatie, door sturing van het proces van selectieve perceptie en rechtstreeks, door aanvulling van de aangeboden informatie met elementen uit de kennisbasis. Voor de verdere uitvoering van de taak wordt ook gebruik gemaakt van (andere) onderdelen van de kennisbasis (zoals bijvoorbeeld formules en methodes). De uitkomst van de taak, en ook de manier waarop de uitkomst bereikt werd, kunnen dan als nieuwe onderdelen worden toegevoegd aan de kennisbasis.

Leren is het proces van het construeren van een kennisbestand. Algemeen gesteld zijn er twee manieren van leren. De eerste manier is simpelweg het (proberen) uitvoeren van de criteriumtaak, zelfs wanneer de kennisbasis nog niet adequaat is om enig succes te garanderen. De kennisbasis verandert dan als resultaat van feedback van succes en falen bij het uitvoeren van de taak. Deze vorm van leren wordt wel aangeduid als 'learning by doing'. Deze vorm van leren vormt de kern van een invloedrijke theorie als ACT* (Anderson, 1983) en recent krijgt deze vorm van leren ook veel aandacht onder invloed van de zogenaamde 'Cognitive apprenticeship' benadering (Collins, Brown, & Newman, 1989).

De tweede manier van leren bestaat uit het verzamelen van informatie die nuttig kan zijn bij het uitvoeren van de criteriumtaak. Deze manier van leren wordt wel 'learning by instruction' genoemd. Learning by instruction kan betekenen dat een docent de lerende direct vertelt wat gekend en gekund moet worden ('expository learning'), maar het kan ook betekenen dat de lerende actief kennis construeert uit aangeboden bronnen, zoals bijvoorbeeld plaats kan vinden bij het gebruik van simulaties in het onderwijs ('exploratory learning', zie bijvoorbeeld De Jong, 1991).

Ook het proces van leren (door instructie) kan verder worden gedecomposeerd. Evenals bij het uitvoeren van de criteriumtaak wordt hier materiaal gepresenteerd en wordt door een proces van selectieve perceptie een representatie van deze informatie gecreëerd. Door specifieke leerprocessen (bv. inductie) wordt deze representatie omgezet in kennis.

Instructie is in essentie het creëren van omstandigheden waarin leren plaats kan vinden. Dit kan

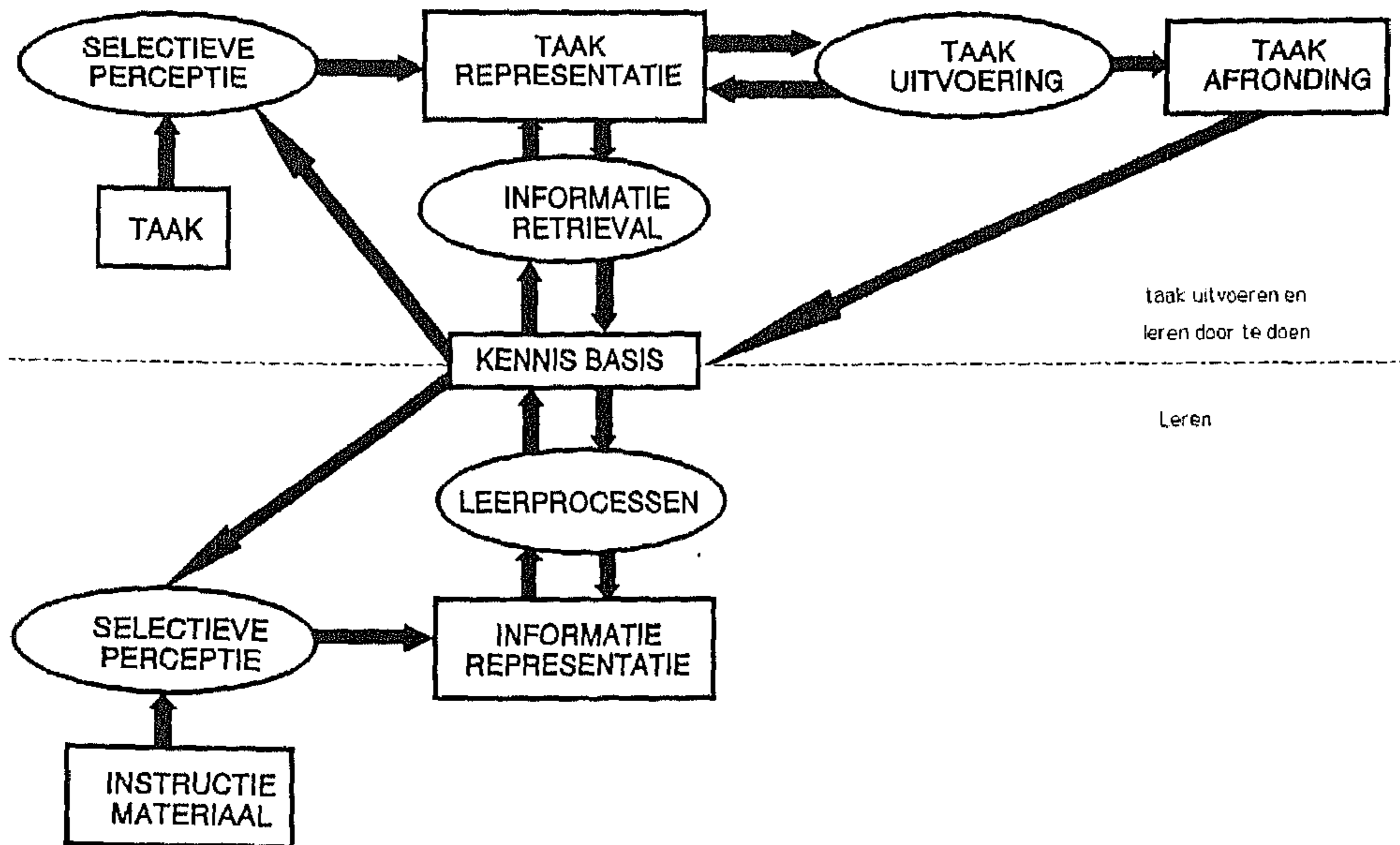


Fig. 1. Een algemeen model voor taakuitvoering, leren en instructie.

dus, gelet op het bovenstaande, bestaan uit het geven van direct onderwijs of het laten oefenen van criteriumtaken. Curricula geven vaak een combinatie van beide door bijvoorbeeld het opnemen van zowel colleges als practica.

Figuur 1 (uit De Jong & Ferguson-Hessler, 1993) geeft een samenvatting van ons model van onderwijzen, leren en taakuitvoering. In principe geldt de figuur voor een grote verscheidenheid van taken en kan deze worden toegepast op elk specifiek type taak. Figuur 1 illustreert de centrale plaats in instructie, leren en taakuitvoering van de kennisbasis. De kennisbasis resulteert uit en beïnvloedt leerprocessen en het vormt de basis van (criterium) taakuitvoering.

DE KENNISBASIS

De centrale plaats van de kennisbasis rechtvaardigt een nadere analyse. Een systematische beschrijving van de kennisbasis kan gegeven worden langs twee dimensies: de inhoud van de kennisbasis in termen van *typen kennis*, en de *kwaliteiten* van de kennisbasis.

De inhoud van de kennisbasis

In de literatuur wordt een groot aantal termen gebruikt om kennis te beschrijven. Veel van deze termen geven, impliciet, een epistemologische karakterisering van kennis en onderscheiden verschillende typen of soorten van kennis. Epistemologische typologieën hebben twee belangrijke kenmerken. Op de eerste plaats zijn de typologieën taak-afhankelijk. Dat betekent dat als we verschillende typen criteriumtaken nemen er verschillende kennistypologieën zullen ontstaan. Op de tweede plaats kan dezelfde feitelijke kennis binnen dezelfde taak verschillend worden geclassificeerd, afhankelijk van de rol die de kennis speelt in de criteriumtaak op een

bepaald moment. Een specifiek 'idee' over een patiënt in een medische diagnose taak zal in het begin de rol van 'hypothese' spelen, maar later de rol van 'gestelde diagnose' kunnen vervullen. Veelal worden typen kennis geïntroduceerd zonder dat rekening met deze twee kenmerken wordt gehouden.

In ons onderzoek hebben we als criteriumtaak probleemoplossen in de natuurkunde en in deze context onderscheiden we vier soorten kennis (zie De Jong & Ferguson-Hessler, 1986):

- *Situationele kennis* is kennis van (prototypische) situaties zoals die in een bepaald vakgebied voor kunnen komen. Kennis van probleemsituaties helpt de probleemoplosser de relevante elementen uit een aangeboden situatie te selecteren (selectieve perceptie) en, indien nodig, elementen aan de situatie toe te voegen (Braune & Foshay, 1983). Situationele kennis helpt bij het creëren van een probleemrepresentatie op basis waarvan additionele kennis (declaratief of procedureel) uit het geheugen geselecteerd kan worden. Situationele kennis wordt daarom wel aangeduid met de term 'conditionele kennis' (Alexander & Judy, 1988).
- *Declaratieve kennis*, ook wel conceptuele kennis genoemd (Greeno, 1978), is 'statische' kennis van definities, formules, wetten, verschijnselen, en verbanden die geldig zijn binnen een vakgebied. Onderdelen van de declaratieve kennis worden aan de probleemrepresentatie toegevoegd wanneer de probleemoplosser denkt deze voor de oplossing nodig te hebben.
- *Procedurele kennis* bevat acties of manipulaties die in een bepaald domein geldig zijn. Procedurele kennis helpt de probleemoplosser transities tussen probleemtoestanden te maken.
- *Strategische kennis* helpt de oplosser het probleemoplosproces te organiseren. Het kan gezien worden als een algemeen plan van actie waarin de sequentie van oplosactiviteiten is vastgelegd. In dit opzicht heeft strategische kennis een metacognitief karakter.

De eerste drie soorten kennis zijn gebonden aan een specifiek onderdeel van het domein, terwijl strategiekennis algemener is, geldig voor het gehele vakgebied, of zelfs voor een aantal aanverwante gebieden. Situationele en declaratieve kennis vormen de 'statische' aspecten van kennis (traditioneel aangeduid met kennis), terwijl procedurele en strategische kennis een 'dynamisch' karakter hebben (traditioneel eerder aangeduid met de term vaardigheden).

Een meer gedetailleerde indeling van kennistypen voor het oplossen van natuurkunde problemen zou gemaakt kunnen worden. In ons onderzoek hebben we ons echter beperkt tot de hier genoemde vier hoofdcategorieën.

Kwaliteiten van kennis

Mogelijk succes bij het oplossen van problemen wordt niet alleen bepaald door de *aanwezigheid* van verschillende kennistypen in de kennisbasis van de probleemoplosser, maar ook door de *kwaliteiten* van die kennis. Typen en kwaliteiten worden door ons als onafhankelijke dimensies van de kennisbasis gezien, typen kennis geven de functie van kenniselementen in een criteriumtaak aan, kwaliteiten duiden op bepaalde eigenschappen. In de (recente) literatuur over leren en probleemoplossen wordt aan de kennisbasis een groot aantal kwaliteiten toegeschreven. Een selectie van bestaande termen is bijvoorbeeld: algemene en domeinspecifieke kennis, concrete en abstracte kennis, impliciete en expliciete kennis, formele en informele kennis, meta-kennis, regulatieve en metacognitieve kennis, en diepte van kennis. Alexander, Schallert, en Hare (1991) geven een uitgebreid overzicht van dit soort kwaliteiten, maar ook hun overzicht is zeker niet compleet. In De Jong en Ferguson-Hessler (1993) behandelen we een aantal van de belangrijkste kwaliteiten van de kennisbasis in de context van probleemoplossen: het niveau (oppervlakkig of diep) van kennis, domein gerelateerde of algemene kennis, geautomatiseerde (gecompileerde) kennis en niet geautomatiseerde kennis, impliciete en expliciete kennis, modaliteit van kennis, en structuur (of organisatie) van kennis.

EMPIRISCH ONDERZOEK NAAR DE KENNISBASIS

Veel van het onderzoek naar de inrichting van de kennisbasis werd en wordt verricht volgens het zogenaamde *expert-novice paradigma*. Dit onderzoek heeft belangrijke gegevens opgeleverd over de aard van expertise, gegevens die samengevat worden weergegeven in bijvoorbeeld Larkin, McDermott, Simon, & Simon (1980), Glaser en Chi (1988) en Elio en Scharf (1990). Het expert-novice paradigma heeft echter twee belangrijke nadelen. Het eerste nadeel is dat experts vaak als 'model' voor beginners worden gezien, terwijl echt expert gedrag voor beginners nogal eens net een stap te ver is. Het tweede nadeel is een praktisch gegeven. In veel onderzoek worden beginners geïntroduceerd die vrijwel onwetend zijn op een bepaald vakgebied. Op deze manier worden deze 'beginners' als een soort 'baseline' voor menselijk functioneren gebruikt.

Om deze redenen hebben we in ons eigen onderzoek goede en zwakke beginnende studenten vergeleken. De zwakke studenten waren studenten die zich wel voor een tentamen hadden voorbereid maar slechte resultaten haalden. Onderzoek naar verschillen tussen goede en zwakke presteerders is schaars (Silver, 1979; 1981), maar begint in de hoek van het exploratief leren opgang te maken (bv. Shute & Glaser, 1990). Uit de data van de goede studenten kunnen we kenniskenmerken afleiden die geassocieerd zijn met succesvol probleemoplossen. We hebben goede en zwakke studenten vergeleken op strategische kennis, op kennisorganisatie en situationele kennis.

Kennis van strategie

In een van onze eerste studies (De Jong & Ferguson-Hessler, 1983; 1984) hebben we gekeken naar de strategische kennis van studenten door hen te observeren terwijl zij problemen oplosten tijdens een tentamen Electriciteit en Magnetisme. De studenten ($n = 16$) werd geïnstrueerd hardop te denken terwijl ze de problemen van een toets oplosten. Hun uitingen werden op de band opgenomen.

In dit onderzoek introduceerden we ook een trainingsprogramma dat bedoeld was om het strategisch gedrag van de studenten te beïnvloeden. In het trainingsprogramma werd de studenten geleerd problemen op te lossen door het achtereenvolgens uitvoeren van vijf probleemoplossingstappen die geïnspireerd waren op het werk van Mettes, Pilot, en Roossink (1981) en Reif, Larkin, en Brackett (1976): analyse, selecteren van kernbetrekkingen, het maken van een probleemoplossingsroute, uitwerking en controle.

Uit de protocollen van de studenten werd hun probleemoplossingsstrategie afgeleid. Dit werd gedaan voor een groep studenten die het trainingsprogramma volgde en voor een controle groep, zowel voor als na de training. Resultaten wezen uit dat voor het trainingsprogramma zowel de experimentele als de controle groep een strategie gebruikten die we als de 'kick and rush' strategie hebben gekenmerkt. Deze strategie houdt kort gezegd in dat studenten na een korte (onvolledige) analyse van het probleem vrij snel een formule (kernbetrekking) kiezen en gaan rekenen. Studenten uit de controle groep bleken deze strategie toe te passen op beide momenten van meten (voor en na het trainingsprogramma van de experimentele groep), maar ook studenten uit de experimentele groep pasten hun strategie niet aan onder invloed van de training. Bovendien, een vergelijking tussen succesvol en niet succesvol opgeloste problemen liet zien dat de kick and rush strategie in beide gevallen werd toegepast.

Wat duidelijk werd uit een analyse van de protocollen van succesvol opgeloste problemen was dat de probleemoplossingstap 'het maken van een oplossingroute' vaak vrij laat in het oplossingsproces voorkwam. Dit wijst er op dat studenten in eerste instantie vertrouwden op de 'kick and rush' strategie en alleen een meer planmatige aanpak toepasten als ze er met de kick and rush strategie niet uitkwamen. Dit betekent dat beginnende studenten kennis hebben van verschillende strategieën maar dat ze niet in staat zijn zoals experts (zie Chi, Glaser, & Rees, 1982) hun keuze van strategie aan te passen aan de complexiteit van het voorliggende probleem.

In dit onderzoek vonden we ook dat alle studenten een vrij groot aantal fouten in hun situationele kennis hadden. Studenten selecteerden vaak de verkeerde declaratieve en procedu-

rele kennis uit hun geheugen waar we de duidelijk indruk hadden dat ze wel de beschikking hadden over de juiste kennis.

Kennisorganisatie

De resultaten van ons onderzoek naar kennis en gebruik van strategie leidde er toe om meer aandacht te gaan geven aan de drie andere kennissoorten benodigd voor het oplossen van problemen en meer specifiek aan de organisatie en structuur van deze kennistypen. Een deeldomein van Electriciteit en Magnetisme werd herschreven in termen van de kennistypen 'situationele kennis', 'declaratieve kennis', en 'procedurele kennis'. Er werd ook een ideale organisatie gemaakt, gebaseerd op de schematheorie van Rumelhart (1980) en Chi, Feltovich, en Glaser (1981). Deze organisatie verdeelde het domein in zogenaamde probleemschemata. Elk schema bestond uit zowel situationele, declaratieve, als procedurele kennis en was relevant voor één type problemen. Een uitgebreide beschrijving van de verschillende kennistypen en probleemschemata is gegeven in De Jong en Ferguson-Hessler (1986), een integratie van deze schemata in een meer uitgebreid overzicht van het domein (E&M) kan gevonden worden in Ferguson-Hessler en De Jong (1987).

In een experiment ontvingen studenten ($n = 47$) elementen uit het domein op kleine kaartjes. Zij moesten deze kaartjes, die in een willekeurige volgorde lagen, sorteren in groepen. Er waren 65 kaartjes waarin in totaal 12 probleemschemata waren 'verborgen'. Figuur 2 geeft een voorbeeld van één schema samengesteld uit vijf kaartjes, zoals die aan de studenten werden gepresenteerd. Studenten ontvingen de opdracht "de kaartjes in stapeltjes te sorteren op zo'n manier dat een stapeltje kaartjes bevatte die bij elkaar horen". Theoretisch kon het aantal stapeltjes dat een student maakte dus variëren van 1 tot 65. Het kaart sorteren werd uitgevoerd kort nadat de studenten een tentamen over dit onderwerp hadden afgelegd.

-
1. Het veld van een halfoneindig lange, rechte draad, dragende een lijnlading
 2. De definitie van elektrische veldsterkte
 3. Superpositieprincipe
 4.
$$dF = \frac{Qe}{4\pi\epsilon_0 r^2} dq$$
 5. Het vectorieel samenstellen van de bijdragen tot de elektrische veldsterkte van verschillende elementen.
-

Fig. 2. Voorbeeld van een probleemschema (1 is situationele kennis, 2, 3 en 4 declaratieve kennis en 5 procedurele kennis).

Voor elke student berekenden we een score die een indicatie gaf van de overeenkomst van zijn of haar score met de ideale sortering in 12 probleemtypen. De correlatie tussen deze score en de score op het tentamen was .40 ($p < .01$). Een vergelijking tussen een groep studenten ($n = 13$) die hoog op het tentamen hadden gescoord en een groep die laag had gescoord ($n = 7$) werd gemaakt door een cluster analyse over de gesommeerde matrix van overeenkomsten. Deze clusteranalyses wezen op een sortering volgens de theoretische probleemschemata voor de goede studenten en een clustering volgens 'oppervlakkige' kenmerken voor de groep zwakke studenten.

Situationele kennis

Een belangrijk aspect van probleem oplossen is de selectie van de juiste probleemoploskennis op het juiste moment (zie bijvoorbeeld Perfetto, Bransford, & Franks, 1983). Ook uit de boven

beschreven studies bleek dat het selecteren van de juiste kennis voor studenten een probleem vormde en dat zwakke studenten situationele kennis niet gekoppeld hadden aan declaratieve en procedurele kennis. Elementen uit de aangeboden situatie (bv. een natuurkunde probleem) kunnen de aanleiding vormen tot de selectie van probleemoploskennis (i.e. declaratieve en procedurele kennis) uit het geheugen. Deze 'cue' elementen zijn vaak niet in de situatie als zodanig gegeven, maar moeten er uit worden afgeleid (dit is wat Chi, Feltovich, & Glaser (1981) 'second order features' noemen). Bovendien, kunnen oplosers modellen van situaties nodig hebben in plaats van geïsoleerde kenmerken om tot een zinvolle kwalitatieve analyse te komen.

We ontwikkelden een methode voor het afleiden van in het geheugen aanwezige modellen van probleemsituaties (zie ook De Jong & Ferguson-Hessler, 1991). Proefpersonen (goede en zwakke beginners) kregen heel kort beschrijvingen van natuurkunde problemen te zien en na elke keer dat ze een probleembeschrijving gezien hadden werd hen gevraagd een reconstructie van het gepresenteerde probleem te geven. De korte 'inspectietijd' dwingt de studenten ertoe om modellen uit het geheugen te gebruiken in plaats van hun directe herinnering te gebruiken voor het geven van de reconstructie. De presentatie van situaties en de reconstructie zoals gevraagd varieerden in modaliteit (woorden, figuren of combinaties hiervan). Bij een aantal situaties werd de proefpersonen, nadat ze een reconstructie hadden gegeven, gevraagd om informatie die zij nodig dachten te hebben voor de oplossing op te schrijven.

De resultaten lieten zien dat alle studenten belangrijke informatie (componenten en relaties) beter reconstrueerden dan minder belangrijke informatie (uitwerkingen, detailinformatie), wat een aanwijzing is voor het beschikbaar hebben van modellen van situaties bij zowel goede als zwakke studenten. Een tweede aanwijzing hiervoor werd gevonden in het feit dat beide groepen een aangeboden 'onzinprobleem' veel slechter reconstrueerden dan de andere, wel zinvolle, problemen. Er waren echter ook verschillen tussen de twee groepen. Op de eerste plaats gaven de goede studenten een betere reconstructie van de vraag uit de probleemstelling dan de zwakke studenten. Op de tweede plaats was er een tendens dat goede studenten belangrijke informatie beter reconstrueerden dan zwakke wanneer er tussen aanbieding en reconstructie van modaliteit moest worden gewisseld. Deze interactie (zie Figuur 3) kan er een aanwijzing voor zijn dat

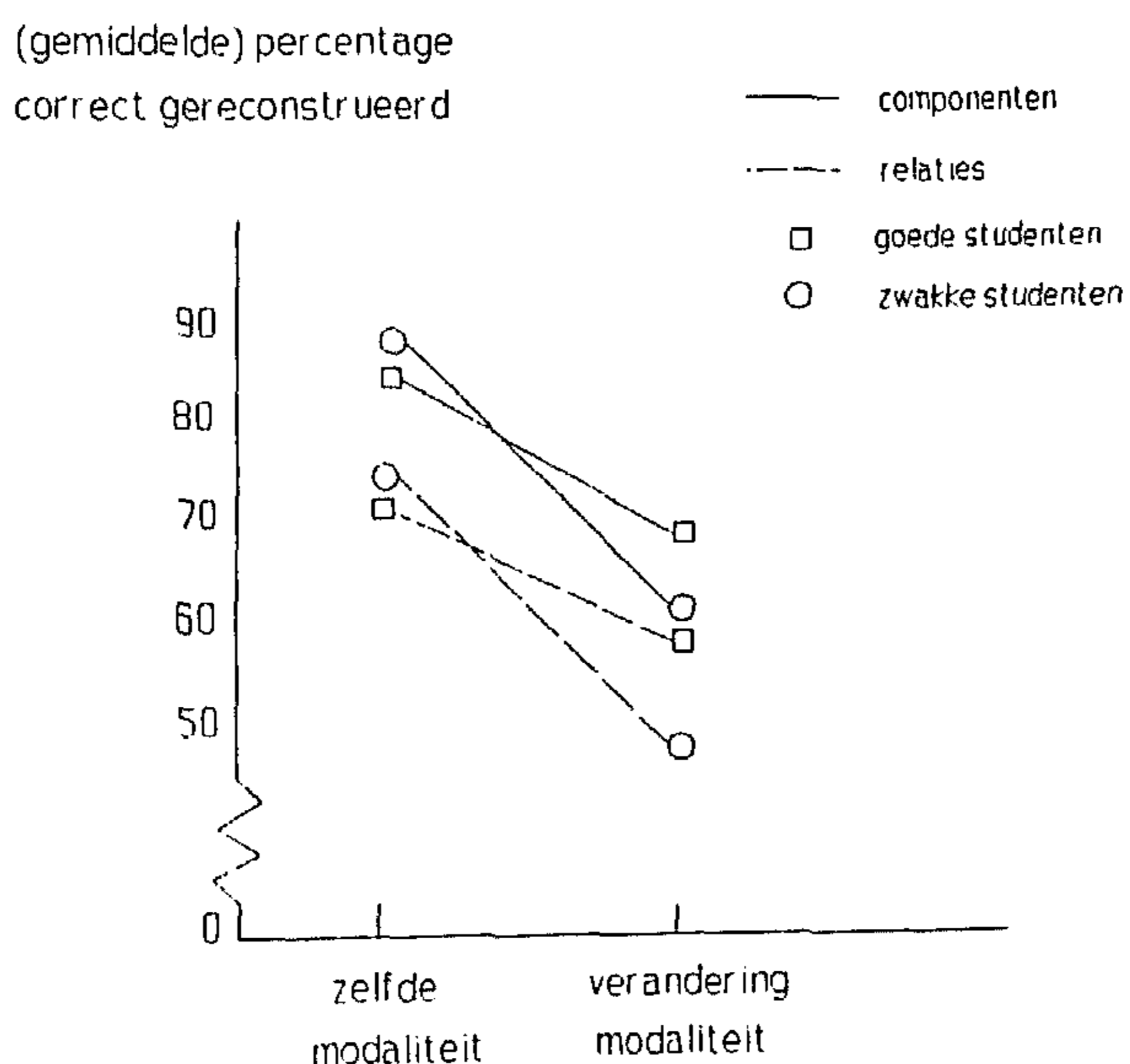


Fig. 3. Interactie-effect voor modaliteitsverandering en studentnivo voor componenten en relaties.

goede studenten 'diepere' kennis van probleemsituaties hebben dan zwakke studenten (waarmee bedoeld wordt dat ze in staat zijn aangeboden kenmerken van de situatie te vertalen naar natuurkundige concepten). Zwakke studenten lijken dit te missen. Tot slot waren goede studenten veel beter dan zwakke studenten in staat om informatie relevant voor de oplossing van het probleem te genereren. Echter, evenals de zwakke studenten genereerden de goede studenten ook veel informatie die irrelevant voor de oplossing was.

Samenvatting van onderzoek naar de kennisbasis

Het is duidelijk dat ons onderzoek verschillen in de kennisbasis tussen goede en zwakke beginnende studenten heeft kunnen aantonen. Deze verschillen zijn niet spectaculair, maar daarbij moet bedacht worden dat onze studenten een vrij coherente populatie vormen waarin niet echt grote verschillen verwacht mogen worden. Studenten lijken niet veel te verschillen in de overall probleemoplosstrategie, maar meer in de beschikbaarheid en kwaliteit van de overige drie onderscheiden kennistypen. Ondanks het feit dat met hun eigen ('kick and rush') strategie problemen succesvol opgelost blijken te kunnen worden, is deze strategie vanuit een normatief standpunt niet erg efficiënt. Verschillen tussen goede en zwakke studenten lijken te bestaan in de organisatie van kennis: Goede studenten hebben een probleem georiënteerde organisatie die zwakke studenten ontberen (zwakke studenten organiseren kennis op basis van uiterlijke kenmerken). Verder zijn er verschillen in het niveau van kennis van situaties, waarbij deze situationele kennis bij de goede studenten een dieper karakter heeft en meer is toegespitst op de oplossing van een probleem (waarbij ook bij goede studenten nog veel irrelevante kennis aan een situatie gekoppeld is). Deze laatste twee kenmerken van de kennisbasis zijn terug te vinden in het probleemoplosproces waar de zwakke studenten de juiste informatie voor het oplossen van een probleem niet kunnen vinden, terwijl de goede studenten daar, vaak na een aantal pogingen, wel in slagen.

LEREN VAN NATUURKUNDE

Als er meer inzicht bestaat in de samenstelling van de kennisbasis van goede en zwakke beginnende studenten is een logisch volgende stap te onderzoeken op welke wijze de kennisbasis wordt opgebouwd, met andere woorden onderzoek naar het *studieproces*. Als algemene trend is er momenteel ook een verschuiving in het onderzoek te zien naar het in kaart brengen van leerprocessen in plaats van probleemoplosprocessen (Chi & Bassok, 1989, De Jong & Njoo, 1992).

In een onderzoek (zie ook Ferguson-Hessler & De Jong, 1990) hebben we studenten geobserveerd die een tekst bestudeerden met als onderwerp de Aston massaspectrometer. De tekst was tien pagina's lang en bevatte vijf oefeningen. Proefpersonen waren 21 eerste jaars natuurkunde studenten die de tekst bestudeerden, terwijl ze na regelmatige intervallen verbaal rapporteerden over wat ze gedaan hadden bij de bestudering van het voorafgaande stuk tekst. De verbalisaties van de studenten werden op de band opgenomen en de protocollen van vijf goede en vijf zwakke studenten werden geanalyseerd. Dit betekende dat elke uiting geclassificeerd werd in één van 32 verschillende leerprocessen. Bovendien werd telkens bepaald op wat voor type informatie (declaratief, procedureel of situationeel) een leerproces betrekking had.

De 32 leerprocessen werden geclassificeerd in de hoofdcategorieën 'Oppervlakkige verwerking', 'Integreren', en 'Verbinden'. Een 'Rest' categorie werd toegevoegd om een complete scoring mogelijk te maken. Een leerproces dat valt onder de categorie Oppervlakkige verwerking is bijvoorbeeld 'Oppervlakkige controle', het vergelijken van symbolen in een figuur met symbolen in de tekst. 'Integreren' bevat leerprocessen die structuur geven aan de nieuw gepresenteerde informatie zoals het 'Onderscheiden van hoofd- en bijzaken'. 'Verbinden' is het associëren van nieuwe informatie met bestaande kennis zoals het 'Bedenken van voorbeelden'. De Rest categorie bevat een mengeling van processen zoals 'Het geven van een waardeoordeel' (bijvoorbeeld "dit is interessant").

De resultaten lieten zien dat goede en zwakke studenten niet verschilden in het aantal leerprocessen dat zij toepasten, wat een indicatie is voor het feit dat beide groepen de stof even actief benaderden. De twee groepen verschilden echter wel in het type leerprocessen dat zij toepasten. Leerprocessen die een 'diep' karakter hebben zoals 'Integreren op basis van eigen activiteiten', worden frequenter gebruikt door de goede studenten terwijl, aan de andere kant, de zwakke studenten meer gebruik maken van 'oppervlakkige' processen. Zwakke studenten hebben de neiging om meer aandacht te besteden aan declaratieve kennis, terwijl de goede studenten meer aandacht (dan de zwakke) besteedden aan procedurele en situationele kennis (voor situationele kennis was dit verschil niet significant). Een van de opvallende resultaten van het onderzoek was dat de opmerking "Alles is duidelijk" veel vaker werd gemaakt door de zwakke studenten dan door de goede. Dit laatste is een indicatie dat zwakke studenten een gebrek aan inzicht in hun eigen kennis hebben (meta-kennis).

Een analyse van de processen die optraden bij het oplossen van de in de tekst opgenomen oefenproblemen (zie De Jong & Ferguson-Hessler, 1989) gaf soortgelijke resultaten. Goede studenten scoorden hoger dan zwakke studenten op processen die als 'diep' kunnen worden gekenmerkt (zoals 'Geven van een verwachting over de uitkomst', of 'Relateren van de uitkomst aan de inhoud van de tekst'). Bij het oplossen van de oefenproblemen besteedden goede en zwakke studenten even veel aandacht aan declaratieve kennis (wat de meest frequente categorie was), maar goede studenten besteedden bovendien aandacht aan situationele en procedurele informatie en aan de relatie tussen de verschillende typen informatie.

Studenten in dit experiment mochten tijdens het studeren een aantekeningenblaadje prepareren dat ze later bij de toets mochten gebruiken. Deze situatie is gelijk aan die uit hun normale curriculum waar ze ook op het tentamen een zelf gemaakt aantekeningenblaadje mogen gebruiken. Een analyse van de aantekeningenblaadjes liet zien dat declaratieve informatie op deze blaadjes het meest frequent voorkomt, procedurele informatie komt nauwelijks voor (maar is dan ook moeilijker op te schrijven). Verder bleek dat goede studenten meer situationele kennis noteerden dan zwakke studenten (zie De Jong & Ferguson-Hessler, 1987).

ONDERWIJS IN DE NATUURKUNDE

Een laatste stap in het onderzoek naar probleemoplossen, leren en onderwijzen in de natuurkunde is het in kaart brengen van het onderwijsproces. In dit kader zijn we gestart met een beschrijvende studie naar het onderwijsgedrag van natuurkunde docenten (Ferguson-Hessler & De Jong, 1993a). Met gebruikmaking van het in ons onderzoek naar de kennisbasis en het studiegedrag ontwikkeld begrippenkader is een twee-dimensioneel classificatieschema voor docentgedrag opgesteld. Een van de dimensies was het informatietype dat onderwerp was van de activiteit van de docent en de andere dimensie het onderwijsproces dat in de activiteit (instructiemaatregel) tot uitdrukking kwam. We onderscheidden de volgende processen:

- Creëren van voorwaarden voor leren
- Presenteren van nieuwe informatie
- Stimuleren van de integratie van informatie
- Stimuleren van het verbinden van nieuwe informatie met bestaande kennis.

De hoofdcategorieën omvatten in totaal 17 instructieprocessen. Vier colleges en vijf instructies (instructies zijn oefeningen in het oplossen van problemen, gegeven in groepen van 25-30 studenten door een instructeur) over een onderdeel uit Electriciteit en Magnetisme werden geobserveerd en opgenomen. Met behulp van het classificatieschema werd elke docentactiviteit geplaatst op de proces- en informatie/kennisdimensie.

De resultaten brachten significante verschillen tussen individuele docenten en ook tussen colleges en instructies aan het licht. De algemene trend is echter dat docenten hun aandacht verdelen over alle geïdentificeerde instructieprocessen. Sommigen, echter, hebben meer aandacht voor wat we als 'diepe' processen kunnen beschouwen (bijvoorbeeld 'Aangeven van

hoofdzaken', 'Relateren, confronteren, en concluderen', en 'Relateren aan voorkennis') dan voor andere instructieprocessen.

In de colleges vinden we meer processen die betrekking hebben op het presenteren van nieuwe informatie dan in instructies; de processen die betrekking hebben op het stimuleren van integratie en het verbinden van nieuwe informatie aan bestaande kennis komen frequenter voor in instructies.

Declaratieve informatie wordt vaker in colleges gepresenteerd en procedures en situationele informatie krijgen meer aandacht in instructies. Dit was, uiteraard, conform onze verwachtingen. Als we naar combinaties van typen informatie kijken dan vinden we een relatief hoge aandacht voor de combinatie van declaratieve en situationele kennis in beide onderwijsvormen. Andere combinaties komen veel minder voor. Drie van de geobserveerde docenten besteedden expliciet aandacht aan de combinatie van situationele, declaratieve en procedurele informatie (een combinatie zoals die van belang is voor het oplossen van problemen), maar bij andere docenten was relatief weinig sprake van instructieprocessen waarin deze combinatie betrokken was. Opvallend was de afwezigheid van aandacht voor het aanbrengen van strategische kennis in alle protocollen, met de uitzondering van één protocol.

Na deze observatiestudie hebben we een verandering in het curriculum aangebracht met het doel studenten te stimuleren de juiste leerprocessen toe te passen op het gehele scala van informatie-typen zodat een voor probleemoplossen adequate kennisbasis zou ontstaan. Over dit onderzoek wordt uitgebreid verslag gedaan in Ferguson-Hessler (1989). Het onderzoek werd uitgevoerd over twee jaar met twee cohorten studenten. In het eerste jaar werd het normale, traditionele programma afgewerkt, in het tweede jaar ontvingen de studenten (eerstejaars natuurkundestudenten) experimenteel onderwijs voor het vak Electriciteit en Magnetisme.

In het experimentele onderwijs ontvingen de studenten een handleiding waarin een aantal onderdelen was opgenomen (Ferguson-Hessler, 1988). Ten eerste werd een introductie gegeven over 'Natuurkunde studeren', waarin met name verschillen tussen het 'studeren' in het middelbaar en hoger onderwijs aan de orde kwamen. Hier werd bijvoorbeeld uitgelegd dat het niet begrijpen van leerstof niet als falen moest worden gezien, maar opgevat moest worden als een eerste stap naar het verkrijgen van begrip. In een tweede deel van de handleiding werden de vier onderscheiden kennistypen geïntroduceerd en werd uitgelegd wat het belang van het juist organiseren van kennis is. Een derde hoofdstuk behandelde strategische aspecten bij het oplossen van natuurkundeproblemen. Tot slot bevatte de handleiding een gedetailleerde beschrijving van de leerstof waarin een belangrijk deel was gewijd aan het beschrijven van de stof in termen van 'wat', 'hoe' en 'wanneer'. Op deze manier werden declaratieve, procedurele en situationele elementen in de stof geïdentificeerd. Naast het verstrekken van de handleiding werden in het experimentele onderwijs de colleges en instructies aangepast. Docenten ontvingen richtlijnen voor hun instructies en colleges waarin naast de inhoud van deze colleges en instructies ook de manier van presenteren werd voorgeschreven. Deze presentatie betrof het belang van probleem-schemata en het gebruik van een strategie voor het oplossen van problemen. Alle instructie-maatregelen in het experimentele onderwijs hadden de bedoeling de activiteit van studenten te stimuleren en dan met name het gebruik van 'diepe' leerprocessen.

Data werden op een aantal manieren verzameld. Er werd gebruik gemaakt van (proef)tentamens en speciaal ontworpen metingen voor het vaststellen van structuur, coherentie en compleetheid van de kennisbasis van studenten. Colleges en instructies werden geobserveerd en opgenomen en studenten moesten tijdschrijfformulieren bijhouden.

Ongelukkigerwijs werd het curriculum van de Faculteit Natuurkunde tussentijds gewijzigd, en dit beïnvloedde de mogelijkheid onze data te interpreteren. Het experimentele cohort haalde significant hogere cijfers voor het reguliere tentamen Electriciteit en Magnetisme dan het controle cohort maar dit zou deels toegeschreven kunnen worden aan het feit dat de experimentele groep (door de curriculumwijziging) meer tijd voor de voorbereiding van dit tentamen heeft gehad. De verdeling van de cijfers geeft aanleiding te veronderstellen dat met name de middelmatige studenten (en dus niet de zwakke) geprofiteerd hebben van de onderwijswijziging.

CONCLUSIE

In dit artikel hebben we getracht een kort overzicht te geven van ons onderzoek naar drie aspecten van onderwijs: taakuitvoering (probleemoplossen), leren en instructie. Er is een begrippenkader ontwikkeld dat ons in staat heeft gesteld de onderzoeken op deze drie terreinen op elkaar aan te laten sluiten. Voor de taakuitvoering is het belang van de kennisbasis voorop gesteld. Hierin hebben we een onderscheid gemaakt tussen de inhoud, uitgedrukt in verschillende *kennistypen*, en *kwaliteiten* van de kennisbasis. De kennistypen kunnen een meer statisch karakter hebben (situationele en declaratieve kennis) of een meer dynamisch karakter (procedurele en strategische kennis). Bij leren en instructie gaat het om het verwerven van de kennisbasis. *Deze inhoud wordt verworven door het toepassen van specifieke (leer- of instructie)processen.*

Proefpersonen in ons onderzoek waren altijd beginnende TU studenten en het vakgebied was telkens een onderdeel van het natuurkundevak Electriciteit en Magnetisme. In het onderzoek hebben we goede en zwakke studenten vergeleken waarbij 'goed' of 'zwak' bepaald werd (mede) aan de hand van tentamencijfers. Hierbij werden studenten die de laagste cijfers haalden, en zich dus kennelijk niet hadden voorbereid op het tentamen, uitgesloten. De reden om naar zwakke en goede beginnende studenten te kijken en niet naar beginners en experts is dat goede beginners er kennelijk in slagen een criterium taak (probleemoplossen op het tentamen) adequaat uit te voeren en qua kennisniveau dichterbij zwakke beginners staan dan experts. We gaan er daarom vanuit dat we voor het inrichten van onderwijs meer kunnen leren van goede beginners dan van experts.

Onze resultaten wijzen, zeer globaal samengevat, erop dat goede beginners (in vergelijking met zwakke beginners) een 'diepere' benadering van het vak laten zien. Dit komt zowel tot uiting in leerprocessen (meer reconstructie van aangeboden informatie) als in de resulterende kennisbasis (modelmatige kennis die niet sterk aan oppervlakkige kenmerken is gebonden). Verder is gebleken dat goede beginners in hun leerprocessen en de resulterende kennisbasis een grotere spreiding en betere verbinding over en tussen de verschillende door ons onderscheiden kennistypen hebben.

Op basis van deze resultaten zijn enkele aanwijzingen te formuleren voor onderwijs en instructie, speciaal in exacte vakken. Als actieve verwerking en diepe benadering van leerstof van essentieel belang zijn, dan dient het onderwijs dit type processen te demonstreren en stimuleren. Bij het oplossen van problemen kan dit bijvoorbeeld gebeuren door:

- het expliciet analyseren van probleemsituaties en trekken van conclusies daarover,
- het expliciet en beargumenteerd maken van keuzes ten aanzien van toe te passen declaratieve en procedurele kennis,
- het expliciet uitzetten van de verschillende fasen van de probleemoplosstrategie.

Het opbouwen van een goed gestructureerde kennisbasis is alleen mogelijk als de lerende enig inzicht heeft in het functioneren van de domeinkennis in typische taken, dat wil zeggen onderscheid kan maken tussen verschillende kennissoorten en relevante relaties kan leggen tussen elementen van kennis die samen functioneren. Deze meta-kennis krijgt echter meestal weinig of geen aandacht in onderwijs en leerboeken.

Ook strategieën en leerprocessen voor de verwerking van schriftelijke informatie behoeven uitleg, bijvoorbeeld door:

- het expliciet leggen van verbanden door vergelijkingen van begrippen, situaties, procedures en formules,
- het expliciet trekken van conclusies om zo nieuwe kennis te construeren,
- het opmerken van (schijnbare) tegenstellingen,
- het demonstreren van de opbouw van een probleemschema.

Een voorwaarde voor diepe verwerking van leerstof is dat de voorkennis van leerlingen/studenten voldoende is, geactiveerd wordt, en geen fundamenteel incorrecte begrippen of misconcepties bevat (Ferguson-Hessler & De Jong, 1993b; Taconis & Ferguson-Hessler, 1993).

Ons onderzoek is zeer beperkt van aard. We hebben ons beperkt tot één soort problemen (E-problemen) en, wat de kennisbasis betreft, een beperkt aantal kwaliteiten. Het algemene raamwerk van typen en kwaliteiten kennis heeft, naar onze mening, een bredere strekking en kan worden toegepast op problemen van uiteenlopende soort uit een verscheidenheid van domeinen. In De Jong en Ferguson-Hessler (1993) geven we een overzicht waarin de twee dimensies van de kennisbasis (kennistypen en kwaliteiten) in een matrix worden gezet. Deze matrix kan gebruikt worden om voor elke combinatie van kennistype en kwaliteit aspecten van onderzoek te identificeren. Dit kunnen onderzoekstechnieken, leerprocessen of instructieprocessen zijn. Het raamwerk biedt ook de basis voor een gestructureerde beschrijving van de huidige trends in onderzoek. Deze trends zijn het onderzoeken van steeds complexere problemen (bv. ontwerprobremen, Goel & Pirolli, 1992), van sociale aspecten van leren en probleemoplossen (Brooks & Palinscar, 1989), van de rol van interesse en motivatie (Snow, 1989; Hidi, 1990) en van exploratieve (constructivistische) leerprocessen (Njoo & De Jong, 1993).

LITERATUUR

- Alexander, P.A., & Judy, J.E. (1988). The interaction of domain-specific and strategic knowledge in academic performance. *Review of Educational Research*, 58, 375-405.
- Alexander, P.A., Schallert, D.L., & Hare, V.C. (1991). Coming to terms: how researchers in learning and literacy talk about knowledge. *Review of Educational Research* 61, 315-343.
- Anderson, J.R. (1983). *The architecture of cognition*. Cambridge: Harvard University Press.
- Anzai, Y., & Yokoyama, T. (1984). Internal models in physics problem solving. *Cognition and Instruction* 1, 397-450.
- Brown, A.L., & Palinscar, A.S. (1989). Guided, cooperative learning and individual knowledge acquisition. In L.B. Resnick (Ed.) *Knowing, Learning, and Instruction. Essays in Honor of Robert Glaser* (pp. 393-451). Hillsdale, N.J.: Lawrence Erlbaum Ass.
- Braune, R., & Foshay, W.R. (1983). Towards a practical model of cognitive/information processing task analysis and schema acquisition for complex problem-solving situations. *Instructional Science* 12, 121-145.
- Chi, M.T.H., & Bassok, M. (1989). Learning from examples via self-explanations. In L.B. Resnick (Ed.) *Knowing, Learning, and Instruction. Essays in Honor of Robert Glaser* (pp. 251-282). Hillsdale, N.J.: Lawrence Erlbaum Ass.
- Chi, M.T.H., Bassok, M., Lewis, M.W., Reimann, P., & Glaser, R. (1989). Self-explanations: How students study and use examples in learning to solve problems. *Cognitive Science* 13, 145-182.
- Chi, M.T., Feltovich, P.J., & Glaser, R. (1981). Categorization and representation of physics problems by experts and novices. *Cognitive Science*, 5, 121-152.
- Chi, M.T., Glaser, R., & Rees, E. (1982). Expertise in problem-solving. In R.J. Sternberg (Ed.), *Advances in the psychology of human intelligence* (pp. 7-77). Hillsdale (NJ): Lawrence Erlbaum Ass.
- Collins, A., Brown, J.S., & Newman, S.E. (1989). Cognitive apprenticeship: Teaching the crafts of reading, writing, and mathematics. In L.B. Resnick (Ed.), *Knowing, learning, and instruction: Essays in honor of Robert Glaser*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Elio, R., & Scharf, P.B. (1990). Modelling novice-to-expert shifts in problem-solving strategy and knowledge organization. *Cognitive Science*, 14, 579-639.
- Ferguson-Hessler, M.G.M. (1988). *Studiehandleiding voor eerstejaars natuurkundestudenten*. Eindhoven: TUE, dictaat.
- Ferguson-Hessler, M.G.M. (1989). *Over kennis en kunde in de fysica*. dissertatie, TU Eindhoven.
- Ferguson-Hessler, M.G.M. (1993). Meta-knowledge and the development of expertise in complex domains. *Tijdschrift voor Onderwijsresearch* (this issue).
- Ferguson-Hessler, M.G.M. & De Jong, T. (1986). On the role of knowledge structures in the field of electricity and magnetism. In: A. Art. H. Eisendrath, & F. Grandjean (Eds.) *Proceedings of the International Symposium on Physics Teaching* (pp. 183-186). Brussels, november 11-13, 1985.
- Ferguson-Hessler, M.G.M., & De Jong, T. (1987). On the quality of knowledge in the field of electricity and magnetism. *American Journal of Physics*, 55, 492-497.
- Ferguson-Hessler, M.G.M., & De Jong, T. (1989). *Onderwijs in de natuurkunde op basis van een abstracte beschrijving van de vakinhoud*. Paper gepresenteerd op ORD89.

- Ferguson-Hessler, M.G.M., & De Jong, T. (1990). Studying physics text. Differences in study processes between good and poor performers. *Cognition and Instruction*, 7, 41-54.
- Ferguson-Hessler, M.G.M., & De Jong, T. (1993a). Does physics instruction foster students' cognitive processes? A descriptive study of teacher activities. *Journal of Research in Science Teaching* (in press).
- Ferguson-Hessler, M.G.M., & De Jong, T. (1993b). Het leren van exacte vakken. In: P. Span & Tomic (Eds.) *Onderwijspsychologie*. Deventer: Kluwer. (In opdracht van de Open Universiteit). (in press).
- Glaser, R., & Chi, M.T.H. (1988). Overview. In: M.T.H. Chi, R. Glaser, & M.J. Farr (Eds.) *The nature of expertise* (pp. xv-xxix). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Goel, V., & Pirolli, P. (1992). The structure of design problem spaces. *Cognitive Science*, 16, 395-429.
- Greeno, J.G. (1978). Understanding and procedural knowledge in mathematics education. *Educational Psychologist*, 12, 262-283.
- Hidi, S. (1990). Interest and its contribution as a mental resource. *Review of Educational Research* 60, 549-571.
- De Jong, T. (1986). *Kennis en het oplossen van vakinhoudelijke problemen. Een voorbeeld uit een natuurkundig domein*, dissertatie, TU Eindhoven.
- De Jong, T. (1991). Learning and instruction with computer simulations. *Education & Computing*, 6, 217-229.
- De Jong, T., & Ferguson-Hessler, M.G.M. (1983). Het effect van een instructie van een strategie voor het oplossen van natuurkundige problemen door eerstejaarsstudenten. In J.J. Beishuizen, C. Hamaker, B. van Hout-Wolters & K.B. Koster (Eds.), *Onderwijsleerprocessen: tekstverwerking, probleemoplossen en leermoeilijkheden* (pp. 93-103). Lisse: Swets en Zeitlinger.
- De Jong, T., & Ferguson-Hessler, M.G.M. (1984). Strategiegebruik bij het oplossen van problemen in een semantisch rijk domein: Electriciteit en Magnetisme. *Tijdschrift voor Onderwijsresearch*, 9, (1), 3-16.
- De Jong, T., & Ferguson-Hessler, M.G.M. (1985). De cognitieve structuur van wel en niet succesvolle beginnende probleemoplossers in de natuurkunde. In P.R.J. Simons & G.C.L. Lodewijks (Eds.), *Zelfstandig leren* (pp. 183-193). Lisse: Swets en Zeitlinger.
- De Jong, T., & Ferguson-Hessler, M.G.M. (1986). Cognitive structures of good and poor novice problem solvers in physics. *Journal of Educational Psychology*, 78, 279-288.
- De Jong, T., & Ferguson-Hessler, M.G.M. (1987). Student note-taking behavior when preparing for an examination in science. In P.R.J. Simons & G. Beukhof (Eds.), *Regulation of learning* (pp. 107-119). The Hague: SVO-Selecta.
- De Jong, T., & Ferguson-Hessler, M.G.M. (1988). The role of exercises in knowledge acquisition in a physics domain. In: Span, P., De Corte E., & van Hout-Wolters, B. (Eds.). *Onderwijsleerprocessen: Strategieën bij het verwerken van informatie*. Lisse: Swets & Zeitlinger.
- De Jong, T., & Ferguson-Hessler, M.G.M. (1991). Knowledge of problem situations in physics by good and poor novice problem solvers. *Learning and Instruction*, 1, 289-302.
- De Jong, T., & Ferguson-Hessler, M.G.M. (1993). Types and qualities of knowledge. *Paper presented at the AERA meeting, Atlanta*.
- De Jong, T., & Njoo, M. (1992). Learning and Instruction with computer simulations: learning processes involved. In E. de Corte, M. Linn, H. Mandl, & L. Verschaffel (Eds.) *Computer-based learning environments and problem solving* (NATO ASI series F: Computer and Systems Series) (pp. 411-429). Berlin: Springer.
- Larkin, J.H., MacDermott, J., Simon, D.P., & Simon H.A. (1980). Expert and novice performance in solving physics problems. *Science*, 208, 1335-1342.
- Mettes, C.T.C.W., Pilot, A., & Roossink, H.J. (1981). Linking factual and procedural knowledge in solving science problems: a case study in a thermodynamics course. *Instructional Science*, 10, 333-36
- Newell, A., & Simon, H.A. (1972). *Human problem solving*. Englewood Cliffs: Prentice Hall.
- Njoo, M., & De Jong, T. (1993). Exploratory learning with a computer simulation for control theory: Learning processes and instructional support. *Journal of Research in Science Teaching*, (in press).
- Perfetto, G.A., Bransford, J.D., & Franks, J.J. (1983). Constraints on access in a problem solving context. *Memory and Cognition*, 11, 24-31
- Reif, F., Larkin, J.H., & Brackett, G.C. (1976). Teaching general learning and problem-solving skills. *American Journal of Physics*, 44, 212-217.
- Rumelhart, D.E. (1980). Schemata: The building blocks of cognition. In R.J. Spiro, B.C. Bruce & W.F. Brewer (Eds.), *Theoretical issues in reading comprehension* (pp. 33-59). Hillsdale: Lawrence Erlbaum Ass.

- Shute, V.J., & Glaser, R. (1990). A large-scale evaluation of an intelligent discovery world: Smithtown. *Interactive Learning Environments, 1*, 51-77.
- Silver, E.A. (1979). Student perceptions of relatedness among mathematical verbal problems. *Journal for Research in Mathematics Education, 10*, 195-210.
- Silver, E.A. (1981). Recall of mathematical problem information: Solving related problems. *Journal for Research in Mathematics Education, 12*, 54-64.
- Snow, R.E. (1989). Toward assessment of cognitive and conative structures in learning. *Educational Researcher, dec '89*, 8-14.
- Taconis, R., & Ferguson-Hessler, M.G.M. (1993). *A problem solving perspective on misconceptions in mechanics*. Poster presentation 1993 AERA Annual Meeting, Atlanta.

Manuscript ontvangen 17-3-1993

Definitieve versie ontvangen 8-6-1993