ONDERZOEKEND LEREN MET SIMULATIES IN HET MIDDELBAAR TECHNISCH BEROEPSONDERWIJS

BAS KOLLÖFFEL & TON DE JONG

EINDRAPPORT ONDERZOEKS - PROJECT

Dit onderzoeksproject is mogelijk gemaakt door stichting Kennisnet.

Het onderzoek is uitgevoerd bij de Universiteit Twente, Faculteit Gedragswetenschappen, Vakgroep Instructietechnologie.

VOORWOORD

In dit rapport wordt verslag gedaan van het vierjarige project "Onderzoekend leren met computersimulaties in het beroepsonderwijs", waarin Kennisnet, de Universiteit Twente en het ROC van Twente participeerden.

Terugkijkend op het project kan gesteld worden dat de onderzoeken bruikbare inzichten en resultaten hebben opgeleverd. Alle onderzoeken die hier gerapporteerd worden zijn uitgevoerd in de weerbarstige en uitdagende praktijk van een mbo-school, dus alle beschreven effecten zijn aangetoond in de context van die dagelijkse schoolpraktijk. We hopen dat de resultaten van dit onderzoeksproject hun weg zullen vinden naar zowel de beroepspraktijk als de wetenschap.

Graag willen we onze dank uitspreken aan iedereen die aan het project heeft bijgedragen. In de eerste plaats de stichting Kennisnet die dit project mogelijk heeft gemaakt. Daarnaast de studenten en medewerkers van het ROC van Twente, met name Jan Nijmeijer, Wil Heijnen, Natascha Prins en Frans Konst. Daarnaast Jos Boeije en Paul Weustink voor hun ondersteuning bij de technische realisatie van simulaties.

Enschede, augustus 2013,

Dr. Bas Kollöffel

Prof. dr. Ton de Jong

SAMENVATTING

In dit rapport wordt verslag gedaan van een onderzoeksproject waarin de effectiviteit van onderzoekend leren met simulaties is onderzocht in de context van het middelbaar technisch beroepsonderwijs. De verwachting was dat deze effectiviteit toeneemt door de jaren heen. In het onderzoek was sprake van een individuele en een samenwerkingsvariant, waarbij de samenwerkingsvariant in een aantal ontwikkelingsstappen werd ontwikkeld.

Op basis van de verschillende studies binnen het onderzoeksproject zijn de volgende conclusies getrokken. Onderzoekend leren met simulaties blijkt aantoonbaar effectiever dan traditionele instructie bij het stimuleren van conceptueel inzicht. Een onverwacht effect was dat deze instructiemethode ook een effect had op het verwerven van procedurele kennis. Studenten die leerden met onderzoekend leren met simulaties waren na afloop van de instructie beter in staat om complexe (conceptuele en procedurele) vraagstukken op te lossen dan studenten die alleen de traditionele lesmethoden volgden.

Opvallend was dat de effecten van onderzoekend leren bijzonder duurzaam lijken te zijn. Studenten die in het eerste leerjaar met deze methode begonnen te leren, bouwden een voorsprong op in conceptuele en procedurele kennis, ten opzichte van studenten die met de traditionele methoden leerden. Deze voorsprong leek ruim een jaar later nog steeds intact en toen de studenten daarna opnieuw met deze methode leerden, vergrootten ze opnieuw hun voorsprong. De effecten van onderzoekend leren met simulaties bleken sterker dan verwacht. Wat hierbij ook opviel was dat de effecten meteen na de eerste lessenserie zichtbaar werden. Dit toont aan dat deze methode zeker geschikt is voor studenten in het middelbaar technisch beroepsonderwijs.

Een toevoeging waarvan op basis van talloze empirische onderzoeken veel te verwachten viel, namelijk samenwerkend (onderzoekend) leren, viel in de praktijk van het onderzoek tegen. Uit herhaalde onderzoeken kwam naar voren dat in het geval van Elektrotechniek, samenwerking tussen studenten geen aantoonbare toegevoegde waarde had. Bij de richting Werktuigbouwkunde werd wel gevonden dat prestatiefeedback de leerresultaten bij samenwerkend onderzoekend leren positief kon beïnvloedden; prestatie-feedback op basis van sociale vergelijking leidde tot een aanzienlijke verbetering in leerresultaten terwijl prestatie-feedback op basis van een absolute standaard geen effect leek te hebben op leerresultaten.

Inhoudsopgave

INLEIDING

Conceptueel inzicht is een essentieel element in de competenties en kennis van techniekstudenten en praktiserende professionals (Streveler, Litzinger, Miller, & Steif, 2008). Deze vorm van inzicht omvat zowel kennis over grootheden (bijv. spanning, stroomsterkte, warmteafgifte) als kennis over de relaties tussen die grootheden. Een voorbeeld is de wet van Ohm (U = I x R). Voor velen is dit een recept om sommen bij elektriciteitsleer op te lossen. Maar in feite is de wet veel meer dan dat. Het is een beschrijving van een fenomeen, een relatie tussen drie grootheden. Verandering van een grootheid beïnvloedt de andere grootheden en vice versa. Wie de onderlinge relaties begrijpt, kan het gedrag van de grootheden beredeneren, voorspellen en zelfs controleren. Een dergelijk diepgaand inzicht wordt echter niet vaak bereikt in het onderwijs.

McDermott (1991) stelde vast dat veel studenten dat niet beschikken over een conceptueel model of voorstelling op basis waarvan ze kwalitatieve voorspellingen kunnen doen over het gedrag van grootheden. Ze merkte dat wanneer studenten geconfronteerd werden met een eenvoudige, maar onverwachte situatie, ze vaak niet in staat waren om tot een juiste redenering te komen.

Toch is het wel mogelijk om conceptueel inzicht te bevorderen in het onderwijs. Papadouris en Constantinou (2009) stellen dat het actief exploreren, onderzoeken en interpreteren van principes en natuurverschijnselen een basis vormt voor de ontwikkeling van conceptueel inzicht. Ook Steinberg (2000) benadrukt het belang van actief experimenteren binnen exacte en technische vakken. In zijn onderzoek kwam hij tot de slotsom dat succesvol onderwijs in deze vakken onder andere de volgende kenmerken heeft. Ten eerste werd in succesvolle instructie rekening gehouden met de ideeën en concepties die studenten al bij het begin van de lessen over een onderwerp hadden. Elektriciteit is bijvoorbeeld een onderwerp waar veel mensen wel een voorstelling bij hebben, over wat het is en hoe het zich gedraagt, maar vaak stemmen deze ideeën niet of nauwelijks overeen met de concepties van elektriciteit die in de wetenschap leven. Volgens Steinberg is het belangrijk dat instructie erop gericht is om de bestaande kennis en ideeën van studenten over het lesonderwerp boven tafel te krijgen en vervolgens die concepties als uitgangspunt te nemen voor de instructie. Een ander element dat bepalend lijkt te zijn voor succesvolle instructie is dat studenten actief bezig waren met uit te vinden wat er gebeurt in plaats van alleen de uitkomsten gepresenteerd te krijgen. Ze moeten voorspellingen doen, experimenten opzetten, verzamelde data analyseren en

interpreteren en antwoorden formuleren op hun onderzoeksvragen, met andere woorden, ze moesten bezig zijn met een onderzoekend leerproces (Chi, Slotta, & de Leeuw, 1994; Chinn & Brewer, 1998; Hewson, 1985; Jaakkola, Nurmi, & Lehtinen, 2010; Muller, Bewes, Sharma, & Reimann, 2008; Strike & Posner, 1985; Tao & Gunstone, 1999; Trundle & Bell, 2010; Zacharia, 2007).

ONDERZOEKEND LEREN

Bij onderzoekend leren, leren studenten door middel van experimenteren en het toepassen van wetenschappelijke denk- en werkwijzen. Deze lesmethode behoort tot de meest effectieve methoden voor het verwerven van conceptueel inzicht (Alfieri, Brooks, Aldrich, & Tenenbaum, 2011; Deslauriers & Wieman, 2011; Eysink et al., 2009; Prince & Felder, 2006). Computertechnologie kan die onderzoekend leerprocessen op vele manier ondersteunen, bijvoorbeeld in de vorm van computersimulaties die gebruikt kunnen worden voor exploreren, experimenteren en het verzamelen van empirische data (de Jong, 2006; de Jong & van Joolingen, 1998; Park, Lee, & Kim, 2009; Rieber, Tzeng, & Tribble, 2004; Trundle & Bell, 2010).

COMPUTERSIMULATIES

Computersimulaties bevatten modellen van systemen, processen of fenomenen. Studenten kunnen de waarden van variabelen in de simulatie veranderen (bijv. de weerstand in een virtuele elektrische schakeling) om de effecten van deze verandering op andere variabelen (bijv. stroomsterkte) te bestuderen. De simulaties stellen de studenten in staat om snel en gemakkelijk experimenten te doen en data te verzamelen. Het bouwen of aanpassen van proefopstellingen met echte apparatuur kan ingewikkeld en tijdrovend zijn. In simulaties daarentegen, kan de opstelling gegeven zijn en kunnen veranderingen in de configuratie snel en moeiteloos gedaan worden, waardoor de studenten hun aandacht op hun onderzoeksproces gericht kunnen houden, zonder vertraging of afleiding. Door systematisch de waarden van variabelen te veranderen en de effecten van deze veranderingen te observeren en te interpreteren, kunnen studenten de eigenschappen van het onderliggende model (bijv. de wet van Ohm) exploreren (de Jong, 2005, 2006; de Jong & van Joolingen, 1998). Bovendien kan "zien wat in werkelijkheid gebeurt" de student helpen met het bepalen van de validiteit van hun eigen mentale model en het vaststellen welke aspecten van hun model veranderd, bijgesteld of verfijnd moeten worden. Uiteindelijk kan dit studenten helpen om hun mentale modellen van systemen, principes en fenomenen in overeenstemming te brengen met de werkelijkheid (Papadouris & Constantinou, 2009; White & Frederiksen, 1998).

ONDERSTEUNING

Om ervoor te zorgen dat studenten de noodzakelijke stappen nemen in hun onderzoek en om te voorkomen dat ze de draad kwijtraken, is het noodzakelijk dat het leerproces gestructureerd en ondersteund wordt (de Jong, 2005, 2006; de Jong & van Joolingen, 1998; Mayer, 2004; Quintana et al., 2004; Reiser, 2004; Sharma & Hannafin, 2007). Deze ondersteuning kan gegeven worden door de docent, een medeleerling (Gijlers & de Jong, 2009), of de leeromgeving zelf (de Jong, 2006; van Joolingen & de Jong, 2003; van Joolingen, de Jong, Lazonder, Savelsbergh, & Manlove, 2005). De meeste leeromgevingen voor onderzoekend leren hebben tegenwoordig ingebouwde scaffolds voor het leerproces waardoor de effectiviteit is toegenomen (de Jong, 2006; Quintana et al., 2004; Zhang, Chen, Sun, & Reid, 2004), bijvoorbeeld in de vorm van tools of gestructureerde opdrachten die studenten ondersteunen bij reguliere onderzoeksactiviteiten zoals het identificeren van variabelen en relaties, het formuleren van hypothesen, het experimenteren, het analyseren en interpreteren van de resultaten, het toetsen van hypotheses en het trekken van conclusies. Computers kunnen studenten hierbij ook feedback geven (Steinberg, 2000).

EFFECTIVITEIT VAN ONDERZOEKEND LEREN MET COMPUTERSIMULATIES

Recente, grootschalige, vergelijkende onderzoeken wijzen op de voordelen van ICT-ondersteund onderzoekend leren (met daarin voldoende ondersteuning voor leerlingen) ten opzichte van meer directe vormen van instructie (Hickey, Kindfield, Horwitz, & Christie, 2003; Linn, Lee, Tinker, Husic, & Chiu, 2006).

Een ander belangrijk aspect is dat bij onderzoekend leren effecten pas op langere termijn het meest duidelijk worden (Hulshof, Eysink, Loyens, & de Jong, 2005; Ketelhut, 2007; Kuhn, 2007). Leerlingen (en docenten) hebben tijd nodig om aan deze nieuwe vorm van leren te wennen en ontwikkelen pas door de tijd heen onderzoeksvaardigheden. De Jong (2009) betoogt dat de meerwaarde van computersimulaties niet alleen afhangt van de software zelf, maar ook van de mate waarin de software in de lessen geïmplementeerd en geïntegreerd kan worden. Bijvoorbeeld: sluit de software aan bij de al gebruikte methode of curriculum, biedt de software goede ondersteuning voor docenten en leerlingen, leent de software zich om modulair i.p.v. integraal gebruikt te worden, zodat de docent de simulaties naar eigen inzicht in de methode of curriculum in kan passen? Al deze factoren spelen een rol bij de effectiviteit van de software.

Er zijn verschillende (SimQuest) simulaties in gebruik (ROC A12 gebruikt alle NijghVersluys simulaties; ROC van Twente maakt gebruik van SimQuest

simulaties). Er is echter onvoldoende kennis over de inbedding van de simulaties in het middelbaar beroepsonderwijs en over de (langere termijn) effecten. Omdat docenten het lastig vinden de juiste combinatie van simulaties en ander materiaal te vinden is er onderbenutting van de potentie die simulaties volgens de docenten bieden. Daarnaast hebben de ROC's behoefte aan inzicht in resultaten op langere termijn. De docenten zien voldoende potentie voor simulaties, maar incidenteel gebruik kan de resultaten negatief beïnvloeden. Er is behoefte aan inzicht in de effecten van het inzetten van meerdere, gelijksoortige simulaties over een langere periode dan toch nu toe is gedaan.

VRAAGSTELLING

De centrale onderzoeksvraag in het onderzoek betrof de effectiviteit van onderzoekend leeromgevingen in vergelijking met klassikale instructie zoals gemeten met inhoudelijke en procesmatige kennismaten. Deze effectiviteit werd over een aantal jaren gemeten bij ROC leerlingen waarbij de verwachting was dat deze effectiviteit toe zal nemen door de jaren heen. Dit gebeurt in een individuele en een samenwerkingsvariant, waarbij de samenwerkingsvariant in een aantal ontwikkelingsstappen werd ontwikkeld.

ONDERZOEKSOPZET

Voor het onderzoek is een samenwerking aangegaan met het MBO College voor Metaal, Elektro & Installatietechniek van het ROC van Twente. Twee afdelingen van dit Mbo College waren bij het onderzoek betrokken: Elektrotechniek en Werktuigbouwkunde. In samenwerking met docenten van deze afdelingen is gewerkt aan materiaal voor het onderzoek en aan de concrete organisatie van het onderzoek.

OPZET VAN DIT RAPPORT

Dit rapport bestaat uit een aantal delen. In Deel 1 worden de effecten van onderzoekend leren met computersimulaties vergeleken met die van de traditionele instructie. Hierbij wordt geprobeerd om vast te stellen of onderzoekend leren met simulaties een toegevoegde waarde heeft in het curriculum, waaruit deze bijdrage kan bestaan en of die bijdrage duurzaam is. In Deel 2 worden studies besproken die gaan over de vraag of samenwerkend onderzoekend leren leidt tot betere leerresultaten dan individueel onderzoekend leren. Daarnaast wordt onderzocht of prestatiefeedback invloed heeft op de leerprestaties van samenwerkende studenten. Tot slot worden de onderzoeksresultaten uit Deel 1 en Deel 2 bij elkaar gebracht om daarmee een antwoord te geven op de centrale onderzoeksvraag.

DEEL 1

ONDERZOEKEND LEREN VERSUS TRADITIONELE INSTRUCTIE

In dit deel worden de effecten van onderzoekend leren met computersimulaties vergeleken met die van de traditionele instructie. Hierbij wordt geprobeerd om vast te stellen of onderzoekend leren met simulaties een toegevoegde waarde heeft in het curriculum, waaruit deze bijdrage kan bestaan en of die bijdrage duurzaam is.

EFFECTEN VAN ONDERZOEKEND LEREN IN EEN ELEKTRICITEITSLEER-CURRICULUM

Elektriciteit is een concept dat abstract en moeilijk te begrijpen is. Elektriciteit is onzichtbaar en toch is het op veel plaatsen aanwezig. Er zijn in de loop van de tijd veel modellen en analogieën van elektriciteit bedacht, maar geen enkele kan alle aspecten verklaren (Frederiksen, White, & Gutwill, 1999; Hart, 2008). De ongrijpbare aard maakt dat veel studenten, zelfs studenten die intensief natuurkundeonderwijs hebben gevolgd, vaak onjuiste ideeën hebben over elektriciteit en over het gedrag van elektrische schakelingen.

In een studie zagen McDermott en Shaffer (1992) dat studenten bij het analyseren van eenvoudige elektrische schakelingen, hardnekkige conceptuele problemen hadden, zoals een onvermogen om formele concepten toe te passen die samenhangen met stroom, spanning en weerstand. Zo kenden ze bijvoorbeeld niet het verschil tussen vervangingsweerstand en de weerstand van individuele componenten; ze waren in de veronderstelling dat de richting van de stroom en de volgorde van componenten van belang waren en ze hadden moeite met het identificeren van serie- en parallelschakelingen. Bovendien viel het de onderzoekers op dat de studenten er niet in slaagden om basale elektrische concepten met elkaar te verbinden in een coherent mentaal model. Door het gebrek aan een conceptueel model waren de studenten niet in staat om het gedrag van elektrische schakelingen te beredeneren. Als er een verandering optrad in een schakeling, dan hadden studenten bijvoorbeeld de neiging om hun aandacht alleen te richten op dat deel van de schakeling waar de verandering had plaatsgevonden en hadden ze niet door dat een verandering op een punt in een schakeling ook kan leiden tot veranderingen in andere delen van de schakeling. De bevinding dat studenten er vaak niet in slagen om een goed conceptueel inzicht te krijgen in elektriciteit en het gedrag van elektrische schakelingen is ook in talloze andere, ook meer recente onderzoeken gerapporteerd (Başer & Durmuş, 2010; Başer & Geban, 2007; Glauert, 2009; Gunstone, Mulhall, & McKittrick, 2009; Hart, 2008; Jaakkola et al., 2010; Jaakkola, Nurmi, & Veermans, 2011; Streveler et al., 2008).

Een goed conceptueel inzicht stelt studenten in staat om te redeneren over potentiaalverschillen, spanning op verschillende punten in een schakeling en de stroomsterkte (Cohen, Eylon, & Ganiel, 1983; Frederiksen et al., 1999; Streveler et al., 2008). Conceptueel inzicht is daarmee een essentieel element in de competenties en kennis van techniekstudenten en praktiserende professionals (Streveler et al., 2008). Toch lijkt een correct en diep conceptueel begrip van elektriciteit niet tot stand te komen in traditionele lessen.

TRADITIONELE INSTRUCTIE OVER ELEKTRISCHE SCHAKELINGEN

In het technisch beroepsonderwijs is het gebruikelijk dat curricula over elektrische schakelingen twee componenten hebben: les vanuit theorieboeken en practica. In de theorieboeken wordt de lesstof vaak benaderd vanuit feiten en formules. Studenten krijgen feiten, definities en wetten gepresenteerd en ze leren formules die gebruikt kunnen worden om variabelen in schakelingen te berekenen (Frederiksen et al., 1999; Gunstone et al., 2009; Jaakkola et al., 2011; McDermott & Shaffer, 1992). Hierdoor ligt de nadruk in theorieboeken en opgaven vaak op procedurele kennis, dat wil zeggen het vermogen om door middel van voorgekookte stappen en procedures vraagstukken op te lossen (denk hierbij bijvoorbeeld aan het maken van berekeningen) om probleemoplossingsprocedures volgens vaste stappen uit te voeren (Rittle-Johnson, Siegler, & Alibali, 2001) en daarnaast op het reproduceren van feiten en definities. De theorielessen worden vaak aangevuld met practica waarin studenten schakelingen bouwen en metingen verrichten. Deze praktijklessen zijn essentieel voor het ontwikkelen van vaardigheden en ervaring op het gebied van werken met echte apparatuur. Echter, ook deze practica blijken niet erg effectief voor het ontwikkelen van conceptueel inzicht. Bijvoorbeeld omdat studenten meer gericht zijn op het werkend krijgen van hun schakelingen dan op het proberen te begrijpen van causale verbanden tussen variabelen (Schauble, Klopfer, & Raghavan, 1991). Bovendien krijgen studenten te maken met allerlei onverwachte omstandigheden en punten waarop de praktijk blijkt af te wijken van de theorie uit het boek. Zo zijn apparatuur en componenten (bijv. weerstanden, draden, batterijen) in het echt niet ideaal, er treden bijvoorbeeld bepaalde verliezen op waardoor de meetresultaten in de praktijk anders zijn dan wat op basis van de formules in het boek verwacht zou worden.

Een ander probleem is dat studenten weinig of niet bezig zijn met systematisch experimenteren en dat wat ze doen en observeren in de praktijkles zelden of nooit verbinden aan wat ze in het boek geleerd hebben.

Dat conceptueel inzicht grotendeels lijkt te ontbreken in de traditionele curricula in het beroepsonderwijs, lijkt erop te wijzen dat de combinatie van lessen gebaseerd op theorieboeken en practica niet optimaal is voor het verwerven van dit type kennis. Als de gebruikelijke methoden minder geschikt zijn, dan lijkt het toevoegen van instructie-elementen gericht op het stimuleren van conceptueel inzicht, zoals onderzoekend leren met computersimulaties een logische volgende stap. Eerdere studies hebben aangetoond dat onderzoekend leren met computersimulaties een positief effect kan hebben op het verwerven van conceptuele kennis over elektriciteit en eenvoudige elektrische schakelingen (zie bijv. Başer & Durmuş, 2010; Farrokhnia & Esmailpour, 2010; Finkelstein et al., 2005; Jaakkola & Nurmi,

2008; Jaakkola et al., 2010; Jaakkola et al., 2011; Zacharia, 2007). Die studies richtten zich echter op leerlingen in het primair onderwijs (Jaakkola & Nurmi, 2008; Jaakkola et al., 2010; Jaakkola et al., 2011), studenten van docentenopleidingen (Başer & Durmuş, 2010; Zacharia, 2007) en studenten van universiteiten (Farrokhnia & Esmailpour, 2010; Finkelstein et al., 2005). Over de effecten van onderzoekend leren met computersimulaties in het middelbaar beroepsonderwijs is nog weinig bekend.

ONDERZOEKSVRAGEN

In de hierna besproken studies werd ten eerste ingegaan op de vraag of onderzoekend leren met simulaties een effectieve methode is om conceptueel inzicht in het gedrag van elektrische schakelingen te stimuleren in het middelbaar technisch beroepsonderwijs. Om dit te onderzoeken werden de effecten van deze methode gecontrasteerd met de effecten van de traditionele lesmethode. Ten tweede werd onderzocht welke plaats de verwerving van conceptueel inzicht heeft in het curriculum. Is meer tijd en oefening op basis van de traditionele lesmethode voldoende om deze vorm van kennis te bevorderen of is de traditionele methode ongeschikt? Tot slot, leerlingen (en docenten) hebben tijd nodig om aan onderzoekend leren te wennen en ontwikkelen pas door de tijd heen onderzoeksvaardigheden, daarom valt te verwacht dat effecten pas op langere termijn het meest duidelijk worden (Hulshof et al., 2005; Ketelhut, 2007; Kuhn, 2007). Daarom werd in de derde studie bekeken of onderzoekend leren met simulaties wellicht pas effectief is als het herhaaldelijk wordt toegepast.

Bevordert onderzoekend leren met simulaties het conceptueel inzicht?

De hoofdvraag die in deze studie aan de orde is, is: hoe kan het verwerven van conceptueel inzicht in elektriciteitsleer bevorderd worden in een context van middelbaar technisch beroepsonderwijs? Er werden twee condities met elkaar vergeleken: een conditie waarin studenten de reguliere lessen over elektriciteitsleer volgden, aangevuld met lessen gebaseerd op onderzoekend leren met computersimulaties en een conditie waarin studenten dezelfde reguliere lessen over elektriciteitsleer volgden, aangevuld met extra lessen via de computer, die hoorden bij de lesmethode gehanteerd in de reguliere lessen. De lessen, zowel de reguliere en de experimentele, waren integraal onderdeel van een compleet curriculum over elektrotechniek, bestaande uit zowel theorie- als praktijklessen.

Methode

Deelnemers

In totaal namen 56 studenten uit klas 1 van de richting Elektrotechniek aan de studie deel. Zoals in de volgend paragraaf verder zal worden toegelicht, waren er twee condities: een conditie op basis van traditionele instructie en een met computersimulaties. Dertien deelnemers zijn uitgevallen: vier zijn met school gestopt in de periode waarin het onderzoek plaatsvond (een in de traditionele en drie in de simulatieconditie), vier waren bij meer dan de helft van de experimentele sessies afwezig (twee in de traditionele conditie en twee in de simulatieconditie) en vijf konden niet bij de sessie aanwezig zijn waarin de natoets werd afgenomen. De leeftijden van de resterende 43 studenten (23 in de traditionele conditie, 20 in de simulatieconditie) varieerde van 16 tot 22 jaar (M = 19,17; SD = 1,39).

Onderzoeksopzet

In het onderzoek werden twee condities met elkaar vergeleken, met instructiemethode als onafhankelijke variabele: in de *traditionele conditie* kregen de deelnemers de traditionele instructie aangevuld met computer-ondersteunde instructie die op de traditionele instructie gebaseerd was. In de *simulatieconditie* kregen de deelnemers traditionele instructie aangevuld met onderzoekend leren met computersimulaties. Elke deelnemer werd random toegewezen aan een van de twee condities. Deelnemers in beide condities volgden hetzelfde curriculum. Dit curriculum bestond uit de volgende vakken: Elektriciteitsleer en twee praktijkvakken, namelijk Practicum Meten en Practicum Werkplaats. De vakken in het curriculum bestreken een periode van drie maanden of langer. De tijdspanne van het onderzoek was negen

weken, met telkens een sessie per week. Deze negen weken besloegen de periode waarin eenvoudige elektrische schakelingen werden behandeld in het reguliere curriculum.

Leeromgevingen

Het reguliere curriculum van elektriciteitsleer omvatte onderwerpen zoals energiebronnen, weerstand, schakelingen, de wet van Ohm, de wetten van Kirchhoff, wisselstroom en magnetische velden. In dit curriculum hadden de studenten theorielessen en practica. De nadruk in de lesboeken gebruikt in de theorielessen lag op feiten, definities, formules en procedurele vaardigheden (zoals het berekenen van spanning, stroom, weerstand en vermogen). In de practica bouwden de studenten schakelingen en verrichtten ze metingen in die schakelingen. Er werden twee lesboeken gebruikt: een theorieboek (Frericks & Frericks, 2003), waarin feiten, definities en formules werden gepresenteerd en waarin procedures werden uitgelegd. Daarnaast werd een werkboek (Frericks & Frericks, 1998) gebruikt met hoofdstukken die correspondeerden met de hoofdstukken in het voornoemde theorieboek. De hoofdstukken in het werkboek herhaalden kort de hoofdpunten uit het theorieboek, gaven diepgaandere uitleg van procedures en bevatten vragen (over feiten en definities) en opgaven waarbij berekeningen gemaakt moesten worden. Het experiment besloeg een deel van deze onderwerpen uit het reguliere curriculum, namelijk elektrische gelijkstroomschakelingen (serie, parallel en gemengd), de wet van Ohm en elementen uit de wetten van Kirchhoff. In het experiment werden twee verschillende (computer-gebaseerde) leeromgevingen gebruikt, een voor elke conditie.

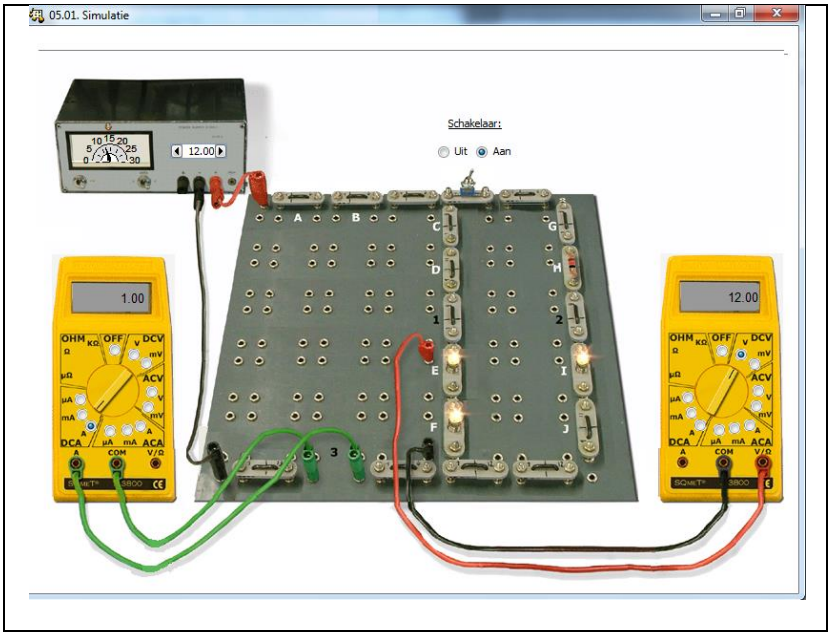
Leeromgeving in de traditionele conditie

De elektronische leeromgeving die in de traditionele conditie gebruikt werd, was ontwikkeld en geproduceerd door dezelfde uitgeverij als die van het theorieboek en werkboek. De software was bedoeld als extra oefenstof, alhoewel de deelnemende school de software niet gebruikte in de reguliere lessen). In het programma kregen de studenten samenvattingen en oefeningen bij elk hoofdstuk uit het theorieboek en het werkboek. Het ging hierbij voornamelijk om rekenopgaven, maar ook inzichtvragen. Na elke opgave kregen de studenten feedback over of hun oplossing wel of niet correct was en daarnaast een uitleg van de correcte oplossing. Aan het eind van elk hoofdstuk gaf het programma aan welk percentage van de opgaven juist waren opgelost door de student.

Leeromgeving in de simulatieconditie

Studenten in de simulatieconditie werkten met het softwarepakket SQ Elektro 3.2, een onderzoekend leeromgeving met computersimulaties. SQ Elektro 3.2 was gebouwd met SimQuest authoring software (de Jong et al., 1998; Swaak

& de Jong, 2001; van Joolingen & de Jong, 2003). De simulaties waren opgebouwd uit foto's van apparatuur die de school gebruikte in de practica over elektriciteitsleer (zie Figuur 1).



FIGUUR 1. SCREENDUMP VAN EEN SIMULATIE IN SQ ELEKTRO 3.2

In de simulatie-omgeving kregen de studenten elektrische schakelingen te zien. Ze konden elektrische componenten (bijv. gloeilampjes, weerstanden en led-lampjes) aan de schakelingen toevoegen of eruit verwijderen, ze konden de bronspanning instellen en ze konden met virtuele multimeters metingen verrichten, bijvoorbeeld van de spanning over een of meer componenten, de stroomsterkte in verschillende delen van de schakeling, enzovoort.

Zoals in de inleiding is besproken, hebben studenten *guidance* nodig om onderzoekend leren met simulaties effectief te laten zijn. In deze studie werd ondersteuning geboden in de vorm van in de leeromgeving ingebouwde opdrachten die ontworpen waren om ze stap voor stap door de onderzoekscyclus te leiden. Dat soort opdrachten is een effectieve manier gebleken om studenten guidance te bieden (Swaak, van Joolingen, & de Jong, 1998). In onze studie hadden deze opdrachten de volgende structuur: eerst werd de studenten gevraagd de gevolgen van een bepaalde verandering in een gegeven schakeling te voorspellen, bijvoorbeeld:

"In een eenvoudige gelijkstroomschakeling is één component opgenomen, namelijk een gloeilampje (6V/3W). Over dit gloeilampje staat een spanning van 6 Volt. Stel, er wordt een tweede lampje (ook 6V/3W) in serie met de eerste geschakeld. Wat gebeurt er dan met de spanning over het eerste lampje (als alles verder hetzelfde blijft)?"

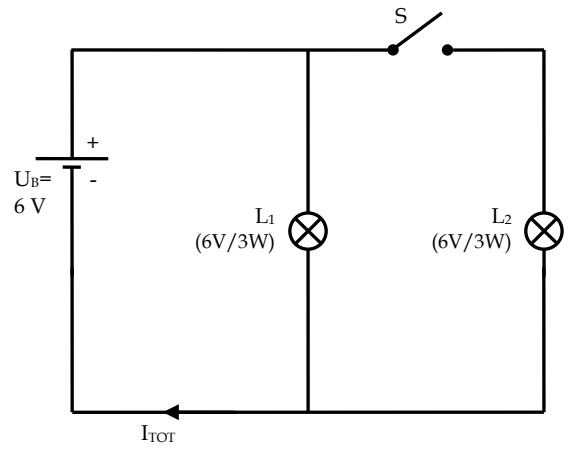
Dit deel van de opdracht was bedoeld om voorkennis te activeren en studenten hun eigen concepties (of misconcepties) over het domein te laten expliciteren. Vervolgens konden de studenten de simulaties gebruiken om te experimenteren, dat wil zeggen om empirische data te verzamelen en om waarnemingen te doen die hun zouden helpen om uit te vinden wat er in werkelijkheid gebeurt.. Na deze tweede stap werd de studenten gevraagd om te reflecteren op hun voorspelling aan het begin van de opdracht (was de verwachting juist of onjuist) en om conclusies te trekken op basis van hun bevindingen.

KENNISMATEN

Twee kennistoetsen werden gebruikt in het experiment: een voorkennistoets en een natoets. De voorkennistoets was een ingangstoets die bestond uit 27 items en deze was bedoeld om de voorkennis (en mogelijke verschillen in voorkennis tussen studenten) te meten. De natoets bevatte negentien items en was bedoeld om de effecten van instructiemethoden op leerresultaten te meten. De voorkennistoets bevatte veertien vraagstukken die een beroep deden op conceptuele kennis en dertien vraagstukken die een beroep deden op procedurele kennis. De natoets bevatte veertien conceptuele items en vijf procedurele items. De mate van inzicht die benodigd is om vraagstukken op te lossen, hangt af van de complexiteit van de vraagstukken. Daarom bevatte de natoets zowel eenvoudigere als complexere vraagstukken.

CONCEPTUELE EN PROCEDURELE VRAAGSTUKKEN

In de inleiding is gesteld dat een goed conceptueel inzicht studenten in staat stelt om te redeneren over bijvoorbeeld potentiaalverschillen, het vloeien van stromen en de sterkte van de stroom (Cohen et al., 1983; Frederiksen et al., 1999; Streveler et al., 2008). Daarom doen de conceptuele vraagstukken in de toets een beroep op het vermogen van studenten om het gedrag van stroom en potentiaalverschillen in verschillende serie-, parallelle en gemengde gelijkstroomschakelingen te beredeneren. (In dit stadium van de opleiding werd weerstand als een constante behandeld in het curriculum en de lesboeken). In Figuur 2 is een voorbeeld te zien van een conceptueel vraagstuk.

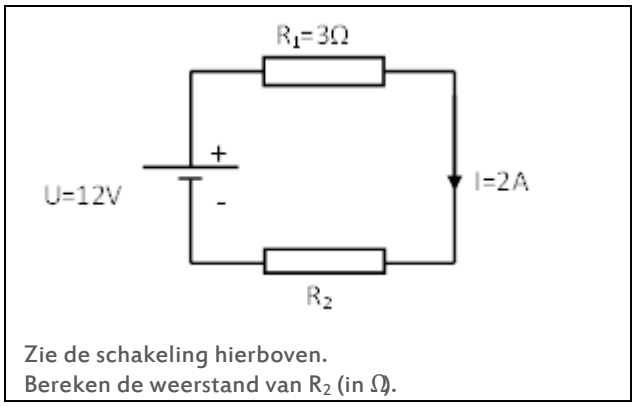


Ze de bovenstaande schakeling. Lampje L_1 brandt. Peter meet de stroomsterkte bij punt I_{TOT}. Als schakelaar S aangezet wordt, ziet Peter dat de stroomsterkte bij punt I_{TOT} gelijk blijft. Is dat normaal? Waarom wel/niet?

FIGUUR 2. VOORBEELD CONCEPTUEEL VRAAGSTUK

Bij de oplossing van het vraagstuk in Figuur 2 spelen een aantal principes een rol: (a) wanneer schakelaar S aangezet wordt, verandert de schakeling van een eenvoudige schakeling in een parallelschakeling; daarnaast zal, normaal gesproken, (b) de spanning over lampje L_1 gelijk blijven bij het omschakelen van eenvoudige naar parallelschakeling; (c) de spanning over beide paralleltakken gelijk zijn; (d) de vervangingsweerstand zal veranderen; en (e) daarmee zal ook de stroomsterkte bij I_{TOT} veranderen (wet van Ohm). De informatie dat de stroomsterkte bij I_{TOT} gelijk blijft als schakelaar S aangezet wordt, is een indicatie dat de schakeling zich niet normaal gedraagt. In feite, blijft de schakeling zich gedragen alsof schakelaar S nog uit staat. Dit kan betekenen dat de stroom in de paralleltak geblokkeerd is; mogelijk is schakelaar S of lampje L_2 kapot.

De procedurele vraagstukken gingen over het berekenen van bepaalde variabelen, bijvoorbeeld weerstand, spanning of stroomsterkte. De procedurele vraagstukken waren alle afkomstig uit proefwerken die door docenten in voorgaande jaren gebruikt waren bij het vak Elektriciteitsleer. Een voorbeeld van zo'n vraagstuk is te zien in Figuur 3



FIGUUR 3. PROCEDUREEL VRAAGSTUK

Net als het voorbeeld van het conceptuele vraagstuk, vergt de oplossing van het vraagstuk in Figuur 3 de toepassing van meer dan één principe. Het eerste principe is de wet van Ohm (I =U/R) om de totale hoeveelheid weerstand in de schakeling te bepalen. De totale weerstand is 12V/2A = 6Ω. Er zijn twee weerstanden in de schakeling. Het tweede principe dat toegepast moet worden is dat in serieschakelingen zoals de gegeven schakeling, de totale hoeveelheid weerstand gelijk is aan de som van de weerstanden van de individuele componenten. Een weerstand (R_1) is 3Ω, en daarom moet de weerstand van de andere (R_2) de totale weerstand minus de weerstand van R_1 zijn, 6Ω - 3Ω = 3Ω.

COMPLEXITEIT VAN DE VRAAGSTUKKEN

Vraagstukken waarvan de oplossing het toepassen van twee of meer principes vereist, worden hier beschouwd als complexe vraagstukken. Vraagstukken waarbij slechts één principe hoeft te worden toegepast bij de oplossing, worden hier als eenvoudige vraagstukken beschouwd. Ongeveer 40 procent van de natoetsvragen waren complex. De vraagstukken in Figuur 2 en Figuur 3 zijn voorbeelden van complexe vraagstukken. De verdeling van eenvoudige, complexe en conceptuele en procedurele vraagstukken in de natoets is weergegeven in Tabel 1.

TABEL 1. VERDELING VAN NATOETSVRAGEN PER KENNISTYPE (CONCEPTUEEL OF PROCEDUREEL) EN COMPLEXITEIT (EENVOUDIG OF COMPLEX)

		Complexiteit	
		Eenvoudig	Complex
Kennistype	Conceptueel	8	6
	Procedureel	3	2

Cijfers gerelateerde vakken

De cijfers die de deelnemers behaalden bij gerelateerde vakken in het elektriciteitsleercurriculum zijn ook meegenomen in de analyses. Het ging hierbij om de cijfers op de vakken Elektriciteitsleer, Practicum Meten en Practicum Werkplaats. In het vak *Elektriciteitsleer* leerden studenten feiten, definities en wetten en leerden ze formules die gebruikt kunnen worden bij het oplossen van vraagstukken over elektrische schakelingen. In het *Practicum Meten* bouwden studenten voorgeschreven elektrische schakelingen aan de hand van recept-achtige instructies en verrichtten ze metingen in de gebouwde schakelingen. In het Practicum Werkplaats ontwierpen en bouwden studenten elektrische schakelingen.

Procedure

Het experiment vond in de school plaats. In beide condities kwam de tijd voor de experimentele sessies bovenop de reguliere lestijd. In totaal waren er negen experimentele sessies, inclusief de sessies waarin de voorkennistoets en de natoets werden afgenomen.. Er zat telkens een week tussen elke sessie en de volgende. Tijdens de eerste sessie, die 90 minuten duurde, kregen de studenten achtergrondinformatie over het onderzoek, het domein, leerdoelen, enzovoort. Aansluitend werd de voorkennistoets afgenomen. In de tweede sessie werd elke student random toegewezen aan een conditie. Hierna werden beide groepen naar verschillende klaslokalen gebracht. (Tijdens deze en alle volgende experimentele sessies waren de beide groepen fysiek van elkaar gescheiden.) De rest van de tweede sessie werd besteed aan uitleg van en oefenen met de toegewezen elektronische leeromgeving. In de volgende zes sessies werkten de studenten individueel, zelfstandig en in hun eigen tempo in de leeromgeving. Elke sessie duurde 45 minuten en dit was voor alle studenten voldoende tijd. In beide condities was de instructietijd dus gelijk. In de negende sessie werd de natoets afgenomen.

Resultaten

Voorkennis

De scores op de voorkennistoets staan vermeld in Tabel 2. T-toetsen voor onafhankelijke steekproeven wezen uit dat er geen verschillen waren tussen de condities wat betreft hun scores op conceptueel inzicht, t (41) = - 0,74, *n.s.*; procedurele kennis, t (41) = 0,50, *n.s.*; of de totaalscores op de voorkennistoets, t (41) = - 0,31, *n.s.* Daarom mag aangenomen worden dat studenten in beide condities beschikten over vergelijkbare voorkennisniveaus.

TABEL 2. SCORES VOORKENNISTOETS OP CONCEPTUELE EN PROCEDURELE ITEMS

	Conditie			
	Traditioneel (n = 23)		Simulatie (n = 20)	
	M	*SD*	*M*	*SD*
Conceptuele items (max. 14)	5,26	2,70	5,90	2,95
Procedurele items (max. 13)	5,17	1,75	4,85	2,51
Totaal (max. 27)	10,43	3,03	10,75	3,73

NATOETS

De natoetsscores op conceptuele en procedurele items staan vermeld in Tabel 3.

TABEL 3. NATOETSSCORES OP CONCEPTUELE EN PROCEDURELE ITEMS

	Conditie			
	Traditioneel (n = 23)		Simulatie (n = 20)	
	M	*SD*	*M*	*SD*
Conceptuele items (max. 14)	4,09	1,83	5,35	2,03
Procedurele items (max. 5)	2,96	0,93	3,65	0,88
Totaal (max. 19)	7,04	1,82	9,00	2,20

In de analyse van de natoetsscores zijn de scores op de voorkennistoets als covariaat meegenomen. Uit de analyse kwam naar voren dat studenten in de simulatieconditie significant hogere *totaalscores* op de natoets behaalden (F (1, 40) = 9,82, p < ,01) dan studenten in de traditionele conditie. De maat voor effectgrootte (Cohen's d = 0,98) geeft aan dit een sterk effect is. Deelnemers in de simulatieconditie scoorden ook significant beter op *conceptuele vraagstukken* (F (1, 40) = 4,12, p < ,05). De maat voor effectgrootte (Cohen's d = 0,65) geeft aan dat dit een middelgroot effect is. De deelnemers in de simulatieconditie scoorden ook significant beter op *procedurele vraagtukken* (F (1, 40) = 5,93, p < ,05). De maat voor effectgrootte (Cohen's d = 0,76) geeft aan dat dit een sterk effect is.

De procedurele vraagstukken waren gebaseerd op toetsvragen die docenten in voorgaande jaren in het curriculum van Elektriciteitsleer bedacht en in toetsen gebruikt hadden. Daarom was een correlatie te verwachten tussen scores op procedurele vraagstukken in de toets en rapportcijfers op het vak Elektriciteitsleer. Deze correlatie werd inderdaad in de data geobserveerd (r = ,52, p < ,01) (zie ook Tabel 5).

Behalve het onderscheid tussen conceptuele en procedurele vraagstukken, konden de natoetsitems ook onderscheiden worden op basis

van de mate van complexiteit van de oplossingen. Vraagstukken waarbij toepassing van één principe volstond om ze op te lossen golden als eenvoudig; vraagstukken waarbij de oplossing toepassing van twee of meer principes vereiste, werden als complex beschouwd. De scores op eenvoudige en complexe vraagstukken staan vermeld in Tabel 4.

Er werden geen verschillen gevonden tussen condities ten aanzien van de scores op eenvoudige vraagstukken (t (41) = - 0,93, *n.s.*). Echter, in het geval van scores op complexe vraagstukken werd een significant verschil tussen condities gevonden. Studenten in de simulatieconditie waren beter in het oplossen van complexe vragen (t (41) = - 3,89, p < ,0001). De maat voor effectgrootte (Cohen's d = 1.19) liet zien dat dit effect groot was.

TABEL 4. NATOETSSCORES OP EENVOUDIGE EN COMPLEXE VRAAGSTUKKEN

	Conditie			
	Traditioneel (n = 23)		Simulatie (n = 20)	
	M	*SD*	*M*	*SD*
Eenvoudige vragen (max. 11)	5,30	1,43	5,75	1,71
Conceptueel (max. 8)	3,09	1,41	3,45	1,57
Procedureel (max. 3)	2,22	0,52	2,30	0,66
Complexe vragen (max. 8)	1,74	1,21	3,25	1,33
Conceptueel (max. 6)	1,00	1,24	1,90	1,29
Procedureel (max. 2)	0,74	0,75	1,35	0,67
Totaal (max. 19)	7,04	1,82	9,00	2,20

In Tabel 4 zijn de scores op zowel eenvoudige als complexe vraagstukken gespecificeerd in termen van conceptueel inzicht en procedurele kennis. Er waren geen verschillen tussen condities ten aanzien van scores op eenvoudige conceptuele vragen (t (41) = - 0,80, *n.s.*) of eenvoudige procedurele vragen(t (41) = - 0,46, *n.s.*). De studenten in de simulatieconditie waren significant beter in het oplossen van complexe conceptuele vraagstukken (t (41) = - 2,32, p < ,05). De maat voor effectgrootte (Cohen's d = 0,71) geeft aan dat het hier om een middelgroot effect gaat. De deelnemers in de simulatieconditie waren ook significant beter in het oplossen van complexe procedurele vraagstukken (t (41) = - 2,9, p < ,01). De effectgrootte Cohen's d = 0,86, geeft aan dat dit een sterk effect is.

CONCLUSIE EN DISCUSSIE

De hoofdvraag in deze studie was: hoe kan het verwerven van conceptueel inzicht in elektriciteitsleer bevorderd worden? De natoetsresultaten lieten zien dat deelnemers in de simulatieconditie beter presteerden dan deelnemers in de traditionele conditie ten aanzien van conceptueel inzicht.

De deelnemers in de simulatieconditie behaalden op de natoets ook betere scores ten aanzien van procedurele kennis. Deze uitkomst was onverwacht, omdat alle opdrachten in de simulatie-leeromgeving uitsluitend gericht waren op het doen en toetsen van kwalitatieve voorspellingen over het gedrag van elektrische schakelingen; geen enkele opdracht was gericht op het verwerven of oefenen van procedurele kennis. Deze bevinding zou erop kunnen wijzen dat in de simulatieconditie processen plaats hebben gevonden die samenhangen met wat in de literatuur *bootstrapping* (Schauble, 1996) of iteratieve kennisontwikkeling (Rittle-Johnson et al., 2001) genoemd wordt, namelijk het idee dat het verwerven van conceptuele kennis en andere vormen van kennis en vaardigheden (bijv. procedurele kennis) elkaar wederzijds kunnen steunen en stimuleren. Een toename van de ene vorm van kennis faciliteert een toename van de andere vorm van kennis, wat op zijn beurt weer een toename van de eerste faciliteert, enzovoort. Het bestaan van zulke wederzijdse relaties tussen conceptuele en procedurele kennis wordt al decennia lang verondersteld. Bijvoorbeeld: conceptuele kennis helpt studenten om belangrijke concepten te herkennen en te identificeren bij het oplossen van een probleem. Een beter conceptueel begrip van een probleem vergroot de kans dat een passende probleemoplossingsaanpak gekozen wordt (vergroot procedurele kennis). Op zijn beurt kan het reflecteren op of het zelf proberen uit te leggen van procedures, studenten helpen om zich bewust te worden van welke concepten een belangrijke rol spelen in een probleem (Rittle-Johnson et al., 2001). Enig bewijs voor het bestaan van bootstrapping is gevonden in het domein van wiskunde, maar nog niet eerder in het techniekdomein (Streveler et al., 2008).

Tot slot, men zou kunnen denken dat als de deelnemers in de traditionele conditie nog meer tijd en nog meer oefening hadden gehad, ze uiteindelijk misschien een vergelijkbaar niveau van conceptueel inzicht zouden bereiken als de deelnemers in de simulatieconditie. Of omgekeerd geformuleerd: is de traditionele lesmethode eigenlijk wel geschikt voor het verwerven van conceptueel inzicht? Dit is in feite de vraag naar de plaats van conceptuele kennis in het curriculum en deze vraag zal nu aan de orde komen.

WAT IS DE PLAATS VAN CONCEPTUELE KENNIS IN HET CURRICULUM?

In de inleiding is betoogd dat traditionele instructie minder geschikt lijkt om studenten te helpen om conceptueel inzicht te verwerven. In de volgende analyses worden de relaties tussen instructietype, conceptueel inzicht en procedurele kennis verder onderzocht. De eerste analyse betreft de correlaties tussen natoetsscores en cijfers op gerelateerde vakken in het curriculum (zie Tabel 5). De correlaties in deze tabel zijn de totale correlaties. Correlatieanalyses zijn ook uitgevoerd op de data van de afzonderlijke condities, maar die leverden telkens resultaten op die sterk overeenkomen met de resultaten in Tabel 5.

TABEL 5. CORRELATIES TUSSEN NATOETSSCORES EN RAPPORTCIJFERS OP GERELATEERDE VAKKEN IN HET CURRICULUM

	1	2	3	4	5
Cijfers traditionele instructie					
1. Elektriciteitsleer	-				
2. Practicum Meten	0,36*	-			
3. Practicum Werkplaats	0,19	0,37*	-		
Scores natoets					
4. Conceptueel inzicht	0,10	- 0,11	- 0,22	-	
5. Procedurele kennis	0,52**	0,18	0,45**	0,01	-

* $p < ,05$.
** $p < ,01$.

Wat opvalt in Tabel 5 is dat de cijfers behaald in vakken binnen het reguliere curriculum geen samenhang vertonen met conceptueel inzicht. De cijfers op Elektriciteitsleer en Practicum Werkplaats vertonen wel een correlatie met procedurele kennis.

Om deze relaties verder te onderzoeken, is een principale componentenanalyse uitgevoerd. De resultaten hiervan staan vermeld in Tabel 6. De analyses zijn ook uitgevoerd met de data van de afzonderlijke condities, maar aangezien die resultaten sterk overeenkwamen met die van elkaar en van de steekproef in zijn geheel, worden alleen de resultaten van deze laatste (steekproef in totaal) besproken.

Zoals in Tabel 6 te zien is, kwamen twee componenten in de analyse aan het licht. De leerprestaties bij traditionele lessen (Elektriciteitsleer, Practicum Meten en Practicum Werkplaats) en de natoetsscores op procedurele kennis laden alle hoog op de eerste component. De factorlading van conceptueel inzicht op deze eerste component was erg laag. Echter, bij de tweede component was de factorlading van conceptueel inzicht hoog, terwijl de ladingen van de andere factoren (cijfers reguliere vakken en scores op procedurele kennis) op de tweede component relatief laag waren.

TABEL 6. FACTORLADINGEN

	COMPONENTEN		
	1	2	h^2
ELEKTRICITEITSLEER	**0,71**	0,46	0,72
PRACTICUM METEN	**0,65**	- 0,14	0,44
PRACTICUM WERKPLAATS	**0,72**	- 0,37	0,65
CONCEPTUEEL INZICHT	- 0,16	**0,87**	0,77
PROCEDURELE KENNIS	**0,77**	0,21	0,63
EIGEN-WAARDEN	2,05	1,16	

N.B. FACTORLADINGEN UIT PRINCIPALE COMPONENTENANALYSE.

DISCUSSIE EN CONCLUSIES

De sleutel tot conceptueel inzicht lijkt niet in extra tijd en oefening binnen de traditionele lesmethode te liggen. De onderzoeksresultaten wijzen in een andere richting, namelijk dat conceptueel inzicht een afzonderlijke vorm van kennis is die fundamenteel anders is dan de kennis die in traditionele instructie verworven wordt. Dit beeld kwam naar voren in een principale componentenanalyse van conceptueel inzicht, procedurele kennis en rapportcijfers behaald op reguliere vakken binnen het curriculum over elektriciteit. Hierbij werden twee componenten in de data gedetecteerd.

De factorladingen bij de eerste component laten zien dat deze traditionele lessen (Elektriciteitsleer, Practicum Meten en Practicum Werkplaats) sterk met elkaar verbonden zijn en dat leerresultaten op elk van deze drie vakken grotendeels door één onderliggende factor verklaard kunnen worden. Deze onderliggende factor verklaart ook in sterke mate hoe studenten scoorden op procedurele vraagstukken in de natoets (deze vraagstukken gingen alle over het berekenen van basisparameters zoals spanning, stroomsterkte en weerstand). Daarom zou de onderliggende component geïnterpreteerd kunnen worden als een soort (procedurele) domeinkennis die studenten in staat stelt om procedures uit te voeren en om rekenvraagstukken op te lossen.

Conceptueel inzicht, dat werd gemeten met vraagstukken die alle een beroep deden op het kunnen redeneren over het gedrag van schakelingen, hing sterk samen met de tweede component. Deze tweede, afzonderlijke component bevestigt het vermoeden dat conceptueel inzicht een unieke, onderscheidende vorm van kennis is, die anders is dan de kennis die in de traditionele lessen verworven wordt.

Is het effect van onderzoekend leren met simulaties duurzaam?

Verwacht werd dat de effecten van onderzoekend leren met simulaties pas op langere termijn het meest duidelijk zouden worden (Hulshof et al., 2005; Ketelhut, 2007; Kuhn, 2007). Leerlingen (en docenten) hebben immers tijd nodig om aan deze lesmethode te wennen en ontwikkelen pas door de tijd heen onderzoeksvaardigheden. De vraag die in deze studie centraal staat is, is of onderzoekend leren met simulaties doorwerkt in het vervolg van de opleiding. Deze studie is een jaar later uitgevoerd binnen dezelfde school en met dezelfde proefpersonen als in de voorgaande studies.

Methode

Deelnemers

Aan de studie nemen 34 studenten van klas 2 van de richting Elektrotechniek deel. Al deze deelnemers hadden toen ze in klas 1 zaten aan het voorgaande onderzoek deelgenomen. Van de oorspronkelijke 43 deelnemers uit dit studies waren er nog 34 over. De leeftijden van deze studenten varieerde van 17 tot 22 jaar.

Onderzoeksopzet

In het onderzoek werden twee condities met elkaar vergeleken, met instructiemethode als onafhankelijke variabele: in de *traditionele conditie* (n = 19) kregen de deelnemers de traditionele instructie aangevuld met computer-ondersteunde instructie die op de traditionele instructie gebaseerd was. In de *simulatieconditie* (n = 15) kregen de deelnemers traditionele instructie aangevuld met onderzoekend leren met computersimulaties.

Elke student werd aan een conditie toegewezen op basis van de conditie waarin ze het voorgaande jaar ingedeeld waren. Deelnemers in beide condities volgden hetzelfde curriculum.

Materialen

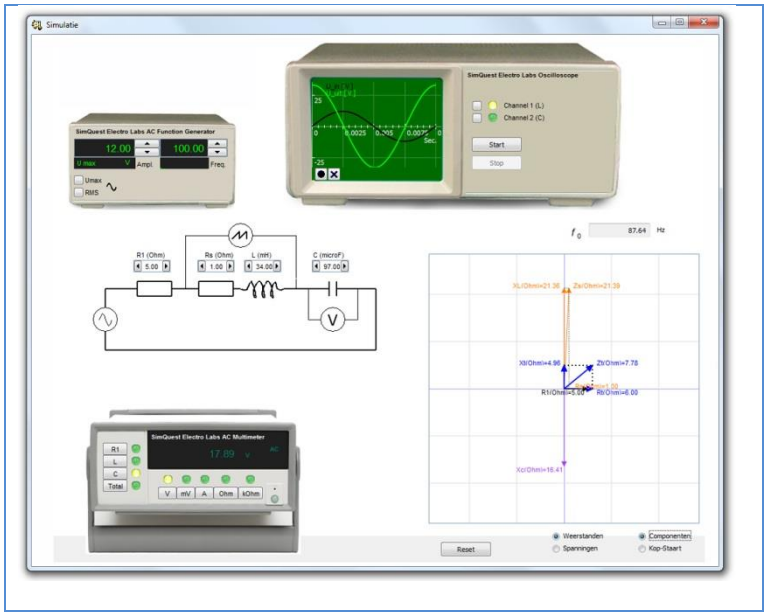
Leeromgevingen

De leeromgevingen bestemd voor het tweede leerjaar worden dus gebruikt door leerlingen die al eerder (in leerjaar 1) aan het onderzoek mee hebben gedaan. In de projectplanning is uitgegaan van gebruik van SimQuest HL-filters. Deze leeromgeving sloot echter onvoldoende aan bij het curriculum. Daarom zijn vervangende leeromgevingen gecreëerd die goed aansluiten bij het curriculum, de lesmaterialen en waarbij in het ontwerp rekening gehouden is met de onderwerpen waar leerlingen in het algemeen veel

moeite mee hebben. De volgende onderwerpen komen aan bod in de leeromgevingen:

- Netwerken op wisselspanning
- Serie-netwerken met gelijksoortige componenten
- Serie-netwerken met weerstanden, spoelen en condensatoren
- Serie-resonantie
- Parallelnetwerken met gelijksoortige componenten
- Parallelnetwerken van weerstanden, spoelen en condensatoren op wisselspanning
- Parallel-resonantie

De voor het experiment ontwikkelde simulaties zijn deels gebaseerd op een fotografische weergave van apparatuur, zoals voedingen en multimeters, en oscilloscopen en deels op een schematisch weergave, waaronder de configuratie van de schakelingen en vectordiagrammen (zie Figuur 4 voor een afbeelding van een van de simulaties).



FIGUUR 4. SIMULATIE VAN LCR SERIESCHAKELING MET AC-FUNCTIEGENERATOR, MULTIMETER, OSCILLOSCOOP EN VECTORDIAGRAM

Deelnemers in de simulatieconditie werkten weer met een onderzoekend leeromgeving met simulaties waarin opdrachten ingebed waren. Studenten in de traditionele conditie werkten ook weer in een elektronische leeromgeving, met informatie over de lesonderwerpen en opdrachten. Beide leeromgevingen (simulatie en traditioneel) behandelden dezelfde onderwerpen.

Kennismaten

In het experiment werden twee kennistoetsen afgenomen: een voorkennistoets en een natoets. De voorkennistoets bestond uit 27 open vragen. Van de 27 vragen waren veertien procedurele vraagstukken. Hiermee konden in totaal 28 punten verdiend worden. De overige dertien vragen waren conceptuele vraagstukken waarmee in totaal 40 punten verdiend konden worden. Hiermee komt de maximaal haalbare score op de toets op 68 punten.

De natoets bestond uit 32 opgaven: vijftien conceptuele vraagstukken waarmee in totaal 37 punten gescoord konden worden en zeventien procedurele vraagstukken waarmee in totaal 53 punten verdiend konden worden. Het aantal punten dat maximaal op deze natoets gehaald kon worden, kwam daarmee op 90 punten.

Procedure

Het experiment vond in de school plaats. In beide condities kwam de tijd voor de experimentele sessies bovenop de reguliere lestijd. In totaal waren er zes experimentele sessies. Er zat telkens een week tussen elke sessie en de volgende. Tijdens de eerste sessie, die 45 minuten duurde, kregen de studenten achtergrondinformatie over het onderzoek en werd de voortoets afgenomen. In de volgende vier sessies werkten de studenten individueel, zelfstandig en in hun eigen tempo in de leeromgeving. Elke sessie duurde 45 minuten en dit was voor alle studenten voldoende tijd. In de zesde sessie werd de natoets afgenomen. Hiervoor waren 90 minuten beschikbaar.

Resultaten

Voorkennis

In Tabel 7 staan de scores van beide condities op de voorkennistoets vermeld.

Tabel 7. Scores voorkennistoets

	Conditie			
	Traditioneel (n = 19)		Simulatie (n = 15)	
	M	*SD*	*M*	*SD*
Conceptuele score (max. 40)	4,05	2,74	6,87	4,90
Procedurele score (max. 28)	3,68	2,41	4,93	1,94
Totaal (max. 68)	7,74	4,40	11,80	6,05

De scores op de voortoets zijn geanalyseerd met t-toetsen voor onafhankelijke steekproeven. Er bleken significante verschillen tussen de condities te bestaan ten aanzien van conceptuele voorkennis (t (32) = - 2,12, p < ,05) en de

totaalscores op de voorkennistoets (t (32) = - 2,27, p < ,05). Er werden geen verschillen tussen condities gevonden wat betreft procedurele kennis (t (32) = - 1,63, *n.s.*). Aangenomen mag dus worden dat de deelnemers in de simulatiecondities over betere voorkennis beschikten

NATOETS

Omdat er bij de analyses van de scores op de voorkennistoets geconstateerd is dat er verschillen waren tussen condities, zijn de scores op de natoets gecorrigeerd voor de verschillen in voorkennis. De gecorrigeerde natoetsscores staan vermeld in Tabel 8.

TABEL 8. NATOETSSCORES (GECORRIGEERD VOOR VOORKENNIS)

	Conditie			
	Traditioneel (n = 19)		Simulatie (n = 15)	
	M	*SE*	*M*	*SE*
Conceptuele score (max. 37)	14,41	2,46	23,28	2,79
Procedurele score (max. 53)	23,90	1,81	31,79	2,05
Totaal (max. 90)	39,61	3,61	53,43	4,10

De natoetsscores in Tabel 8 zijn geanalyseerd met behulp van covariantieanalyses. In de analyse van de score op conceptuele vraagstukken is de score op conceptuele voorkennis als covariaat meegewogen. Uit de analyses komt naar voren dat er een verschil tussen de condities is: ook na correctie voor conceptuele voorkennis scoren studenten in de simulatieconditie significant beter op conceptuele vraagstukken (F (1, 31) = 5,32, p < ,05). Hetzelfde geldt voor procedurele kennis: na correctie voor procedurele voorkennis blijft er nog steeds een significant verschil tussen condities bestaan in het voordeel van studenten in de simulatieconditie (F (1, 31) = 7,98, p < ,01). Tot slot de totaalscores op de natoets: na correctie voor de totaalscores op de voorkennistoets scoren studenten in de simulatieconditie nog steeds significant beter (F (1, 31) = 5,97, p < ,05).

DISCUSSIE EN CONCLUSIES

Uit deze studie komt naar voren dat de effecten van onderzoekend leren met simulaties duurzaam blijken te zijn. Dit blijkt niet alleen uit de significant betere scores ten aanzien van conceptuele en procedurele kennis en de totaalscores, maar vooral ook uit de verschillen tussen condities ten aanzien van voorkennis. De verschillen bij die toets zijn opmerkelijk. Het enige verschil tussen de deelnemers in beide condities is de experimentele conditie waar zij deel van uitmaakten in leerjaar 1. Voor en na die tijd vormden ze een homogene groep met elkaar en verschillen ze in geen enkel opzicht van

elkaar. Het verschil in voorkennis in leerjaar 2 kan dus alleen aan de effecten van het experiment in leerjaar 1 toegeschreven worden. Bij aanvang van het experiment in leerjaar 1 waren de voorkennisniveaus gelijk tussen beide groepen. Hoewel het moeilijk te verklaren valt hoe een voorsprong aan het eind van het experiment in leerjaar 1 in stand blijft tot iets meer dan een jaar na dato, is dit het beeld dat de data laten zien en de statistische analyses wijzen uit dat het meer dan 95 procent zeker is dat dit geen toeval is. Kennelijk geeft het onderzoekend leren met simulaties de studenten in leerjaar 1 een voorsprong, die ze bij onderzoekend leren met simulaties in leerjaar 2 niet alleen behouden, maar ook verder uitbouwen.

DEEL 2

SAMENWERKEND LEREN

In dit deel worden studies besproken die gaan over de vraag of samenwerkend onderzoekend leren leidt tot betere leerresultaten dan individueel onderzoekend leren. Daarnaast wordt onderzocht of prestatiefeedback invloed heeft op de leerprestaties van samenwerkende studenten.

VERBETERT SAMENWERKEND LEREN LEERRESULTATEN?

Onderzoek heeft laten zien dat samenwerking tussen studenten hun leerresultaten kan verbeteren (Lou, Abrami, & d'Apollonia, 2001; Slavin, 1995; van der Linden, Erkens, Schmidt, & Renshaw, 2000). In onderzoekend leren kan samenwerkend leren als een vorm van *scaffolding* fungeren. Tijdens het onderzoekend leren moeten studenten voortdurend beslissingen nemen, zoals welke hypothese ze gaan toetsen, welke variabelen veranderd moeten worden, hoe resultaten geïnterpreteerd moeten worden, welke conclusies getrokken kunnen worden, enzovoort. Bij samenwerkend onderzoekend leren kan de aanwezigheid van een partner studenten stimuleren om hun ideeën, plannen, redeneringen en beslissingen te expliciteren (Gijlers & de Jong, 2009). Op deze manier kunnen studenten hun ideeën met elkaar delen, ze uitleggen, elkaar vragen om verduidelijking, argumenten aandragen of juist weerleggen en nieuwe ideeën of hypothesen bedenken. Dit proces van de eigen ideeën tot uitdrukking te brengen en ze uit te leggen aan een ander, kan studenten aanzetten tot het opnieuw nadenken over hun kennis en ideeën en het kan hen zelfs bewust maken van mogelijke onvolkomenheden in de kennis of redeneringen (Cox, 1999; Kaput, 1995; van Boxtel, van der Linden, & Kanselaar, 2000).

In de hiernavolgende studie is onderzocht of samenwerkend leren ook leidt tot betere leerresultaten in onderzoekend leren met simulaties in het middelbaar technisch beroepsonderwijs. Verwacht werd, dat de samenwerking helpt om de effecten van onderzoekend leren verder te versterken.

METHODE

DEELNEMERS

Er namen 46 studenten van klas 1 van de richting Elektrotechniek aan de studie deel: 45 jongens en 1 meisje. De leeftijden van deze studenten varieerden van 16 tot en met 21 jaar (M = 17,20; SD = 1,20).

ONDERZOEKSOPZET

In het onderzoek werden twee condities met elkaar vergeleken. In beide condities kregen de deelnemers traditionele instructie aangevuld met onderzoekend leren met computersimulaties. In de ene conditie leerden de studenten *individueel*. In de andere conditie was sprake van *samenwerkend leren* in twee- of als dat zo uitkwam, in drietallen. De instructie was gelijk aan die van de simulatieconditie in de studie "Bevordert onderzoekend leren met simulaties het conceptueel inzicht?" (zie pagina 15 e.v.). Deelnemers werden

random toegewezen aan een van de twee condities. Deelnemers in beide condities volgden hetzelfde curriculum. Het onderzoek strekte zich uit over negen weken, met telkens een sessie per week. Deze negen weken besloegen de periode waarin eenvoudige elektrische schakelingen werden behandeld in het reguliere curriculum.

Materialen

De materialen waren gelijk aan die gebruikt in de studie "Bevordert onderzoekend leren met simulaties het conceptueel inzicht?". De gebruikte leeromgeving was SQ Elektro 3.2 (zie pagina 16 voor een beschrijving). Ook de voorkennistoets en de natoets waren gelijk aan die van het hierboven genoemde onderzoek (zie ook pagina 18), met één verschil: het aantal items in de voorkennistoets was teruggebracht van 27 tot 12 (zeven i.p.v. veertien conceptuele vraagstukken en vijf i.p.v. dertien procedurele vraagstukken).

Procedure

In totaal waren er negen experimentele sessies, inclusief de sessies waarin de voorkennistoets en de natoets werden afgenomen.. Er zat telkens een week tussen elke sessie en de volgende. Tijdens de eerste sessie, die 45 minuten duurde, kregen de studenten achtergrondinformatie over het onderzoek en werd de voorkennistoets afgenomen. In de tweede sessie werd elke student random toegewezen aan een conditie. Hierna werden beide groepen naar verschillende klaslokalen gebracht. (Tijdens deze en alle volgende experimentele sessies waren de beide groepen fysiek van elkaar gescheiden.) De deelnemers in de samenwerkend leren-conditie mochten zelf kiezen met wie ze samenwerkten. Communicatie was face-to-face: de tweetallen zaten naast elkaar en werkten met dezelfde computer. Ze werkten samen aan de lesstof, opdrachten en simulaties in de leeromgeving. De rest van de tweede sessie werd besteed aan uitleg van en oefenen met de toegewezen elektronische leeromgeving. In de volgende zes sessies werkten de studenten in hun eigen tempo in de leeromgeving. Elke sessie duurde 45 minuten en dit was voor alle studenten voldoende tijd. In de negende sessie werd de natoets afgenomen.

Resultaten

Voorkennis

In Tabel 9 staan de voorkennisscores van beide condities vermeld.

TABEL 9. SCORES VOORKENNISTOETS

	Conditie			
	Individueel leren (n = 24)		Samenwerkend leren (n = 22)	
	M	*SD*	*M*	*SD*
Conceptuele items (max. 7)	2,54	1,62	2,23	1,58
Procedurele items (max. 5)	2,83	0,96	2,68	1,04
Totaal (max. 12)	5,38	2,14	4,91	2,14

De data vermeld in Tabel 9 werden geanalyseerd met t-toetsen voor onafhankelijke steekproeven. Ten aanzien van de totaalscores op de voortoets werden geen verschillen tussen condities gevonden: $t(44) = -0{,}74$, *n.s.* Ook werden geen verschillen gevonden ten aanzien van mate van conceptuele kennis (t (44) = -0,67, *n.s.*) en procedurele kennis (t (44) = -0,51, *n.s.*). Daarom kan aangenomen worden dat studenten in beide condities beschikten over vergelijkbare niveaus van voorkennis.

NATOETS

De gemiddelden en standaardeviaties met betrekking tot de natoetsscores van beide condities zijn weergegeven in Tabel 10.

TABEL 10. SCORES NATOETS

	Conditie			
	Individueel leren (n = 24)		Samenwerkend leren (n = 22)	
	M	*SD*	*M*	*SD*
Conceptuele items (max. 14)	6,75	3,64	7,09	2,18
Procedurele items (max. 5)	3,04	1,23	3,09	1,23
Totaal (max. 19)	9,79	4,25	10,18	2,75

De scores op de natoets in Tabel 10 werden geanalyseerd met behulp van t-toetsen voor onafhankelijke steekproeven. Er werden geen verschillen tussen condities geobserveerd ten aanzien van conceptuele kennis (t (44) = 0,38, *n.s.*), procedurele kennis (t (44) = 0,14, *n.s.*) of de totaalscores op de natoets (t (44) = 0,37, *n.s.*).

Discussie en conclusie

De verwachting dat samenwerkend onderzoekend leren met simulaties de leerresultaten verder zou versterken bovenop de effecten die al eerder, namelijk in de studie "Bevordert onderzoekend leren met simulaties het conceptueel inzicht?"(zie pagina 15) werden gevonden, is niet uitgekomen. De leerresultaten bereikt met individueel leren en die verkregen met samenwerkend leren, zijn vergelijkbaar.

Het is onduidelijk wat deze bevinding kan verklaren. Wellicht zijn deze studenten niet zulke "praters", of hebben ze moeite om hun ideeën te expliciteren. Een andere mogelijkheid is dat de standaard die gezet is door de studenten in het vorige onderzoek, het maximaal haalbare prestatieniveau is. Aan de andere kant is op de natoets een maximumscore van 19 punten mogelijk, terwijl de gemiddelden schommelen rond 9 à 10 punten, dus daar is nog ruimte voor verbetering. Inmiddels was binnen dit project ook een studie op basis van samenwerkend onderzoekend leren uitgevoerd bij de afdeling Werktuigbouwkunde. Uit die studie kwam naar voren dat het toevoegen van een competitief element aan het samenwerkend leren een uitgesproken effect op leerresultaten kon hebben. De vraag is of deze techniek ook effecten zou hebben op de hier besproken studie bij Elektrotechniek. Voordat deze vraag beantwoord wordt, wordt nu eerst de studie bij de richting Werktuigbouwkunde besproken.

EFFECT VAN PRESTATIE-FEEDBACK OP LEERPRESTATIES

Formatieve feedback is een belangrijke factor bij het succesvol leren van kennis en vaardigheden. Studenten krijgen deze vorm van feedback tijdens de leertaak. Het is bedoeld om het leerproces en het gedrag van de student bij te sturen en daarmee het leren te verbeteren (Shute, 2008). Computertechnologie in de klas maakt het mogelijk om feedback "op maat" te leveren, dat wil zeggen: aangepast aan kennis, vaardigheden en activiteiten van individuele studenten (Biesinger & Crippen, 2010; van der Kleij, Eggen, Timmers, & Veldkamp, 2012). De software kan bijvoorbeeld reageren op de antwoorden die studenten geven op vragen en opdrachten; helpen bij het plannen en reguleren van leerprocessen en de aandacht van studenten op bepaalde informatie in de leeromgeving vestigen. Volgens Hoska (1993) wordt een belangrijke functie van feedback vaak over het hoofd gezien in educatieve software, namelijk het vermogen om studenten te motiveren. Ze stelt dat deze functie essentieel kan zijn in leersituaties, omdat het de manier kan beïnvloeden waarop studenten aankijken tegen en reageren op een leertaak. Een wijze waarop feedback toegepast kan worden om studenten te motiveren is door gebruikt te maken van feedback op de prestaties van studenten (*performance feedback*). Dit type feedback geeft studenten informatie over hun voortgang in de richting van een of meer gewenste doelen (Shute, 2008).

Prestatiefeedback kan twee grote voordelen hebben. Ten eerste is prestatiefeedback een heel geschikt middel om het leren uitdagender te maken (Malone, 1981). Het daadwerkelijk zien van vooruitgang in de eigen prestaties en het halen van doelen of subdoelen kan studenten stimuleren om nog eens extra hun best te doen, om door te zetten en om hun aandacht op de taak gericht te houden (Garris, Ahlers, & Driskell, 2002). Ten tweede kan prestatiefeedback studenten laten zien hoe ze er werkelijk voor staan met hun kennis en vaardigheden. Uit empirisch onderzoek blijkt dat studenten vaak moeite hebben om het niveau van hun eigen kennis en vaardigheden goed in te schatten (Glenberg & Langston, 1992; Glenberg, Wilkinson, & Epstein, 1982; Labuhn, Zimmerman, & Hasselhorn, 2010). Veel studenten overschatten hun beheersing van de leerstof (Dunlosky & Lipko, 2007; Dunlosky & Rawson, 2012; Lipko et al., 2009).

Als gevolg van deze overschatting is de kans groter dat studenten (a) minder inspanning leveren dan een goede beheersing van de lesstof vereist, (b) dat ze niet goed controleren of ze de lesstof inderdaad goed beheersen en (c) dat ze suboptimale leerstrategieën kiezen of blijven gebruiken (Labuhn et al., 2010). Prestatiefeedback kan studenten helpen om zich bewust te worden van de mate waarin ze de leerstof werkelijk beheersen en daarmee van de eventuele

discrepantie tussen het huidige en het beoogde beheersingsniveau (Carver & Scheier, 1981, 1990; Kluger & DeNisi, 1996, 1998). In het algemeen is de boodschap van prestatiefeedback positief of negatief. *Negatieve feedback*, dat wil zeggen feedback die aangeeft dat het beoogde doel nog niet bereikt is, wordt verondersteld studenten te motiveren en te stimuleren om meer moeite te doen of om een andere strategie te kiezen (Cianci, Klein, & Seijts, 2010; Kluger & DeNisi, 1996, 1998; Locke & Latham, 2002). In de literatuur zijn verschillende ideeën te vinden over hoe studenten zouden reageren op *positieve feedback*, dat wil zeggen feedback die aangeeft dat de student de beoogde doelen overtreft. Vanuit het perspectief van de *control theory* wordt gedacht dat studenten dan hun prestatieniveau zullen vasthouden of dat ze gas terug zullen nemen (Carver & Scheier, 1990; Kluger & DeNisi, 1996, 1998). Vanuit het perspectief van *goal-setting theory* wordt gedacht dat positieve feedback een signaal aan het zelf kan geven dat de taak mogelijkheden biedt om het zelfbeeld en zelfwaardering te versterken en dit kan ertoe leiden dat men zich hogere doelen gaat stellen (Bandura, 1989; Kluger & DeNisi, 1996, 1998; Locke & Latham, 2002), bijvoorbeeld door de moeilijkheidsgraad te verhogen, maar men kan ook te proberen om vraagstukken sneller of in minder stappen op te lossen (Malone, 1981). Deze laatste benadering (sneller of in minder stappen) is volgens Malone vooral geschikt om reeds geleerde procedures te optimaliseren.

De prestaties van studenten kunnen afgemeten worden aan absolute standaarden of aan relatieve standaarden, dat wil zeggen de prestaties ten opzichte van anderen (Dweck, 1986; Nicholls, 1984). *Absolute doelen* zijn gericht op de ontwikkeling van de eigen competentie en taakbeheersing. De prestaties van de student worden hierbij vergeleken met vooraf vastgestelde criteria, zoals leerdoelen of het kennis- of vaardigheidsniveau dat de student in een eerder stadium heeft laten zien. Het prestatieniveau in het geval van absolute doelen staat dus los van de prestaties van andere studenten (Kim, Lee, Chung, & Bong, 2010). *Sociale vergelijkingsdoelen* zijn gericht op het demonstreren van eigen kennis of vaardigheden ten opzichte van anderen. De prestaties van studenten worden vergeleken met die van studenten uit dezelfde populatie. Mogelijke achterliggende motieven bij zulke vergelijkingen zijn het evalueren van de eigen capaciteiten, het beschermen of verhogen van zelfwaardering, het verbeteren van de eigen prestaties of combinaties van deze motieven (Dijkstra, Kuyper, van der Werf, Buunk, & van der Zee, 2008). Studenten weten doorgaans redelijk goed van elkaar hoe ze presteren, bijvoorbeeld welke studenten goed en welke minder goed presteren. In een reviewstudie over sociale vergelijking in de klas concluderen Dijkstra et al. (2008) dat studenten in het algemeen een sterke voorkeur hebben om hun eigen prestaties te vergelijken met studenten die beter presteren dan zijzelf en dat deze vergelijking vaak leidt tot betere prestaties.

Echter, vrijwel alle empirische onderzoeken naar sociale vergelijking in de klas richten zich op het vergelijken van cijfers. Cijfers worden doorgaans toegekend *nadat* de cursus en toets hebben plaatsgevonden en daarom is dit een vorm van summatieve feedback en niet van formatieve feedback. Een logisch gevolg hiervan is dat het vergelijken van cijfers alleen toekomstige prestaties kan beïnvloeden (Bälter, Enström, & Klingenberg, 2013). Niet veel is bekend over de effecten van sociale vergelijking *tijdens* leertaken.

Sociale vergelijkingsfeedback voegt een competitief element aan het leerproces toe. Het toepassen van zulke game-achtige elementen kunnen helpen om de motivatie en betrokkenheid van studenten te vergroten (Domínguez et al., 2013). Echter, in meer complexe taken, zoals goniometrie, is competitie alleen niet voldoende. In een reviewstudie waarin samenwerkend leren werd vergeleken met competitief (individueel) leren, werd gevonden dat samenwerkend leren tot betere leerresultaten leidde dan competitief leren (Qin, Johnson, & Johnson, 1995). .

De vraag die in deze studie centraal staat is of studenten gestimuleerd kunnen worden om beter te leren door ze sociale vergelijkingsfeedback te geven in plaats van absolute feedback tijdens een leertaak waarin ze met elkaar samenwerken.

METHODE

DEELNEMERS

In totaal namen 34 studenten uit klas 1 van de richting Werktuigbouwkunde deel. De deelnemers waren allen man (er waren geen vrouwen in dit cohort binnen deze opleiding). De leeftijden van de studenten varieerden van 16 tot en met 20 jaar (M = 16,88; SD = 0,95).

DESIGN

Een between-subjects design werd gebruikt in het experiment, met het type prestatiefeedback (Absolute feedback versus Sociale vergelijkingsfeedback) als onafhankelijke variabele. Deelnemers werden random toegewezen aan de Absolute feedback-conditie (n = 18; leeftijd: M = 17,00; SD = 1,03) of de Sociale vergelijkingsfeedback conditie (n = 16; leeftijd: M = 16,75; SD = 0,86).

MATERIALEN

LEEROMGEVING

Deelnemers maakten gebruik van een elektronische onderzoekend leeromgeving over goniometrie. Deze omgeving was gebouwd met SimQuest authoring software (de Jong et al., 1998; Swaak & de Jong, 2001; van Joolingen & de Jong, 2003) en gaf studenten een introductie in de goniometrie. Studenten konden de basisconcepten van driehoeken en de relaties tussen

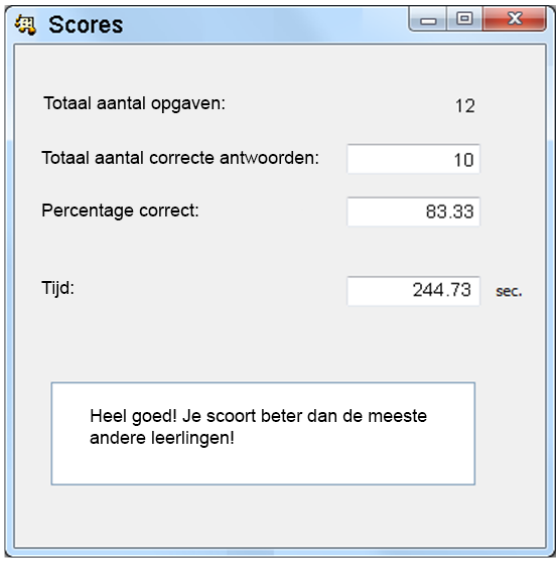
hoeken en de lengte van de zijden onderzoeken. De leertaak was verdeeld in twee fasen: tijdens de eerste fase leerden de studenten *zonder* prestatiefeedback en tijdens de tweede fase leerden ze *met* prestatiefeedback. De deelnemers konden aan de tweede fase beginnen zodra ze vonden dat ze genoeg geleerd hadden in de eerste fase.

In beide experimentele condities was de prestatiefeedback in feite gebaseerd op dezelfde criteria. Het enige verschil tussen de condities was hoe de feedback was geformuleerd. In de sociale vergelijkingsfeedback-conditie was de feedback geformuleerd in termen van hoe de studenten presteerden ten opzichte van anderen. In de Absolute feedback-conditie kregen de studenten feedback in termen van hoe ze presteerden ten opzichte van een absolute standaard. Drie feedback-boodschappen waren mogelijk (zie Tabel 11). Afhankelijk van het percentage correcte oplossingen, liet de software de bijbehorende feedback-boodschap zien. De criteria waren gebaseerd op en de prestaties van studenten in een pilotstudie.

TABEL 11. CRITERIA EN BIJBEHORENDE FEEDBACK-BOODSCHAP

Percentage correcte oplossingen	Conditie	
	Sociale vergelijkingsfeedback	Absolute feedback
<50% (laag)	Je score ligt lager dan die van veel andere leerlingen. Vraag eventueel de docent om extra uitleg.	Dit kan beter! Als je het moeilijk vindt, dan kun je eventueel de docent om extra uitleg vragen.
50-75% (medium)	Je score is vergelijkbaar met die van de meeste andere leerlingen.	Je score is voldoende.
>75% (hoog)	Heel goed! Je scoort beter dan de meeste andere leerlingen!	Heel goed! Je scoort hoog!

Een voorbeeld van hoe de feedback werd weergegeven is te zien in Figuur 5.



FIGUUR 5. VOORBEELD VAN FEEDBACK IN DE SOCIALE VERGELIJKINGSFEEDBACK CONDITIE

Studenten werd gevraagd om een indicatie te geven van hun stemming (blij, zeker, neutraal, onzeker, verdrieting), taakinteresse (7-punts Likert-schaal) en mentale inspanning (9-punts Likert-schaal). Ze deden dat drie keer: aan het begin van de tweede fase en tijdens deze fase.

VOOR- EN NATOETS

In het experiment werden twee kennistoetsen afgenomen: een voor- en een natoets. Beide toetsen bestonden uit 29 open vragen. In essentie waren beide toetsen identiek, afgezien van enkele veranderingen aan de oppervlakte om de overeenkomsten te maskeren.

PROCEDURE

Het experiment bestond uit drie sessies, met telkens een week er tussen en vond plaats in het ROC.

In de eerste sessie ontvingen de studenten achtergrondinformatie over het doel van de studie, het domein en de leerdoelen. Dit werd gevolgd door de afname van de voortoets. De voortoets werd individueel gemaakt. De sessie duurde 45 minuten. In het laatste kwartier kregen de studenten uitleg over de leeromgeving en konden ze ermee oefenen.

Een week later, in de tweede sessie, werden studenten random toegewezen aan een conditie en werkten ze in tweetallen in de leeromgeving. De duur van deze sessie was 45 minuten. Studenten mochten zelf hun partner kiezen. Communicatie was face-to-face: de tweetallen zaten naast elkaar en werkten met dezelfde computer. Ze werkten samen aan de lesstof, opdrachten en simulaties in de leeromgeving.

De derde sessie duurde ook 45 minuten. In deze laatste sessie werd de natoets afgenomen. De natoets werd individueel gemaakt. Na afloop volgde een debriefing waarin de achtergrond en bedoeling van de studie werd toegelicht. Alle deelnemers kregen een kleine attentie als dank voor hun medewerking.

RESULTATEN

De voor- en natoetsscores staan vermeld in Tabel 12. De hoogst mogelijke score op zowel de voor- als de natoets was 29.

TABEL 12. VOOR- EN NATOETSSCORES

	Conditie			
	Absolute feedback (*n* = 18)		Sociale vergelijkingsfeedback (*n* = 16)	
	M	SD	M	SD
Score voortoets (max. 29)	12,44	5,72	10,69	3,59
Score natoets (max. 29)	10,72	5,83	15,44	5,23

De data vermeld in Tabel 12werden geanalyseerd met t-toetsen voor onafhankelijke steekproeven. Ten aanzien van de scores op de voortoets werden geen verschillen tussen condities gevonden: t(32) = 1,06, n.s.. Daarom kan aangenomen worden dat studenten in beide condities beschikten over vergelijkbare niveaus van voorkennis.

Significante verschillen tussen condities werden gevonden bij scores op de natoets ($t(32) = -2{,}47$, $p < ,05$, Cohen's $d = 0{,}85$). Studenten in de Sociale vergelijkingsfeedback-conditie scoorden hier beter dan studenten in de Absolute feedback-conditie. De scores in de Sociale vergelijkingsfeedback-conditie vertoonden een aanzienlijke toename van voor- naar natoets ($t(32) = -3{,}19$, $p < ,0001$, Cohen's $d = 1{,}47$), terwijl in de Absolute feedback-conditie geen verbetering van voor- naar natoets werd waargenomen. De data in Tabel 12 zouden de suggestie kunnen wekken dat de natoetsscores van studenten in de Absolute feedback-conditie lager waren dan hun voortoetsscores, maar in werkelijkheid is er geen significant verschil tussen deze gemiddelden ($t(17) = 1{,}78$, *n.s.*).

Studenten werden op een aantal punten in de leeromgeving gevraagd om een indicatie te geven van hun stemming, taakinteresse en mentale inspanning. Door technische problemen waren deze data slechts gedeeltelijk beschikbaar. Daarom zullen deze gegevens hier verder buiten beschouwing gelaten worden.

Discussie en conclusie

Deze studie richtte zich op de vraag of studenten gestimuleerd kunnen worden om beter te leren door het aanbieden van sociale vergelijkingsfeedback in plaats van absolute feedback. Om deze vraag te kunnen beantwoorden werd prestatiefeedback geformuleerd in termen van hoe studenten presteerden ten opzichte van anderen of ten opzichte van een absoluut criterium. De resultaten laten zien dat sociale vergelijkingsfeedback een sterke invloed had op kennistoename. De toetsscores in deze conditie lieten een aanzienlijke verbetering van voor- naar natoets zien (Cohen's d = 1,47), terwijl in de absolutie feedback-condities geen kennistoename werd geconstateerd. Deze bevindingen weerspreken de idee dat sociale vergelijkingsfeedback weinig of geen effect heeft (Deci & Ryan, 2000; Rakoczy, Harks, Klieme, Blum, & Hochweber, 2013). Bovendien, in studies waarin de effecten van sociale vergelijkingsfeedback en absolute feedback werden vergeleken werden geen significante verschillen in leerresultaten gevonden (zie bijvoorbeeld: Labuhn et al., 2010; Rakoczy et al., 2013). De vraag is dan welke factor of factoren het effect in onze studie veroorzaakt kan hebben. In onze studie was het enige verschil de formulering van de prestatiefeedback, dus de gevonden verschillen kunnen alleen hieraan toegeschreven worden. Het zou interessant zijn om onze studie verder te vergelijken met de andere studies. Mogelijk kan dit helpen om te verklaren welke factor of factoren bijdragen aan het effect van sociale vergelijkingsfeedback op leerresultaten. Hieronder zal een aantal belangrijke kenmerken van onze studie op een rijtje gezet worden die een rol gespeeld kunnen hebben: de feedback zelf en de context waarin de studie plaatsvond.

De kenmerken van de feedback betreffen onder andere de volgende aspecten. Ten eerste, de timing van de feedback, dat wil zeggen het moment waarop de feedbackboodschappen aangeboden werden. Normaal gesproken moeten studenten wachten tot de docent of de proefleider hun werk nagekeken en van feedback heeft voorzien. In onze studie was de feedback in de leeromgeving geïntegreerd en onmiddellijk beschikbaar. Hierdoor kunnen studenten op de taak geconcentreerd blijven. Ten tweede, de uitvoerigheid en gedetailleerdheid van de feedback-boodschap. Volgens Hattie en Timperley (2007) is feedback effectief als het drie vragen beantwoordt, namelijk "waar ga ik naartoe?", "hoe vorder ik? " en "hoe nu verder?". Butler en Winne (1995) stellen dat effectieve feedback zowel informatie geeft over het domein (product) als informatie die helpt om het leerproces te reguleren, bijvoorbeeld welke strategieën juist wel of niet gebruikt moeten worden (proces). Rakoczy et al. (2013) zijn van mening dat het combineren van de antwoorden op Hattie en Timperley's (2007) drie vragen en Butler en Winne's (1995) product- en procesgerichte informatie kan helpen om de effectiviteit van feedback te verhogen, maar zoals we hierboven al zagen heeft hun studie geen voordeel

van sociale vergelijkingsfeedback aangetoond. In onze studie echter, waren de feedback-boodschappen noch uitvoerig, noch informatierijk of gedetailleerd. In plaats daarvan waren de feedback-boodschappen beknopt en uitsluitend gericht op prestaties. Mogelijk is dat een betere aanpak voor dit type feedback. Voor vragen over het domein of over strategieën konden de studenten zich wenden tot de docent of de proefleider, iets dat in de praktijk trouwens niet gebeurde. De reden dat dat niet gebeurde heeft mogelijk te maken met de context van de studie. Die wordt hieronder besproken.

Deze studie kan ook gekenmerkt worden aan de hand van de context. Ten eerst, de studie is uitgevoerd in een context van samenwerkend leren: de studenten werkten in tweetallen en konden zich bij vragen ook tot elkaar wenden. Ze bestudeerden de leerstof samen, maakten de opgaven samen en bediscussieerden vraagstukken en mogelijke oplossingen samen. Met name in complexe domeinen, zoals goniometrie leidt dat tot betere resultaten (Qin et al., 1995). Ten tweede, het domein kan ook een rol gespeeld hebben. Hoewel het een vrij complex domein is, heeft het een beperkte oplossingsruimte; er zijn maar een paar strategieën die gebruikt kunnen worden bij het oplossen van goniometrische vraagstukken en als een strategie niet werkt, dan is het vaak redelijk voor de hand liggend welke van de andere strategieën gebruikt moet worden om het probleem op te lossen. Mogelijk maakten studenten wel fouten, maar waren ze, gegeven de beperkte oplossingsruimte, zelf in staat oplossingen te vinden, zonder hulp van de docent of van uitgebreide feedback. Een derde contextuele factor is het geslacht van de deelnemers. Binnen dit cohort van deze opleiding waar de studie plaatsvond, waren geen vrouwen ingeschreven. Daardoor bevatte onze steekproef alleen mannen. Als gevolg hiervan weten we dus niet of geslachtsverschillen een rol gespeeld hebben in hoe deelnemers op de prestatiefeedback in het algemeen en sociale vergelijkingsfeedback in het bijzonder reageerden.

Andere factoren die in toekomstig onderzoek meegewogen kunnen worden zijn bijvoorbeeld individuele verschillen ten aanzien van inschatting van eigen competentie (*perceived competence*) en doeloriëntatie (*achievement goal orientation*). Van beide factoren is bekend dat ze een mediërende rol hebben bij hoe mensen reageren op absolute of sociale vergelijkingsfeedback. In een serie fMRI-studies bijvoorbeeld, manipuleerden Kim et al. (2010) de ideeën die deelnemers hadden over hun eigen competentie (*perceived competence*) ten aanzien van een onbekende taak. Deelnemers werd wijsgemaakt dat ze juist heel competent waren of juist niet competent. Het bleek dat deelnemers die dachten dat ze heel competent waren, met negatieve gevoelens reageerden op absolute feedback en positief op sociale vergelijkingsfeedback. Daarentegen vertoonden deelnemers die dachten dat ze niet competent waren, een sterk negatieve reactie op sociale vergelijkingsfeedback. In onze studie werden studenten alleen blootgesteld aan prestatiefeedback als ze zeker waren van

hun eigen mate van competentie. Misschien stonden ze hierdoor meer open en positief tegenover sociale vergelijkingsfeedback en waren ze er meer ontvankelijk voor.

Voor nu concluderen we echter dat deze studie aan ons inzicht heeft bijgedragen dat sociale vergelijkingsfeedback een heel effectief middel kan zijn bij het verbeteren van leerprestaties en dat de studie laat zien dat dit in een ecologisch valide omgeving, namelijk de klas zelf mogelijk is.

EFFECT VAN PRESTATIE-FEEDFORWARD OP LEERPRESTATIES

In de hiervoor beschreven studie "Effect van prestatie-feedback op leerprestaties" (zie pagina 38 e.v.) bij Werktuigbouwkunde werd gevonden dat het toevoegen van een competitief element aan het samenwerkend leren over goniometrie een uitgesproken effect op leerresultaten kon hebben.

In de studie die daarvoor beschreven werd, "Verbetert samenwerkend leren leerresultaten?" (zie pagina 34 e.v.), werden de leerresultaten van individueel onderzoekend leren en samenwerkend onderzoekend leren in het Elektrotechniek-curriculum met elkaar vergeleken. In die studie werden geen verschillen tussen beide leervormen gevonden: beide leidden tot vergelijkbare leerresultaten

Een voor de hand liggende vraag is of de leerresultaten van samenwerkend onderzoekend leren bij Elektrotechniek op soortgelijke wijze als bij Werktuigbouwkunde kunnen worden gestimuleerd. Dat is in deze studie getest, zij het met een kleine variatie op de voorgaande studie ten aanzien van het moment waarop de student geïnformeerd wordt over de prestatie-*standaard*. Bij prestatiefeedback wordt pas na afloop van een opgave of serie opgaven verteld hoe de student gepresteerd heeft en hoe de geleverde prestatie zich verhoudt tot een (absolute of sociale) standaard. Vervolgens kan de student op grond van deze informatie besluiten of het nodig is om actie te ondernemen om het eigen kennis-, vaardigheids- en/of prestatieniveau bij te stellen. Informatie over de absolute of sociale standaard kan echter ook al eerder gecommuniceerd worden, bijvoorbeeld bij aanvang van een opgave of serie opgaven. In dat geval zou de student eerst informatie krijgen over de absolute of sociale standaard, vervolgens lost de student de vraagstuk(ken) op en tenslotte volgt terugkoppeling op de juistheid van de oplossing (en). Het vooraf aanbieden van informatie over een standaard, met als oogmerk om de prestaties van de student te verbeteren, kan strikt genomen niet als *feedback* aangemerkt worden, maar zou aangeduid moeten worden als *feedforward*.

Een voorbeeld van feedforward op basis van een absolute standaard is dat de student geïnformeerd wordt over de moeilijkheidsgraad van de komende opgave. Een voorbeeld van feedforward met een sociale standaard is informatie over de mate waarin vergelijkbare studenten erin geslaagd zijn om de komende opgave op te lossen. Dergelijke feedforward-informatie kan studenten helpen om beter in te schatten welke inspanning geleverd moet worden bij het oplossen van opgaven. Opgaven kunnen bijvoorbeeld ogenschijnlijk makkelijk of juist moeilijk zijn en de feedforward geeft studenten een vooruitblik op wat ze kunnen verwachten. Mogelijk stimuleert

dat studenten om bij moeilijke opgaven cq. opgaven die door weinigen correct opgelost worden, meer inspanning te leveren, of om niet te snel ontmoedigd te raken en door te zetten.

De vraag die centraal staat in deze studie is of de aard van de feedforward-informatie (absoluut versus sociaal) effect heeft op de leerresultaten van studenten.

METHODE

DEELNEMERS

Aan deze studie namen 52 studenten van klas 1 van de richting Elektrotechniek deel: 50 jongens en 2 meisje. De leeftijden van deze studenten varieerde van 16 tot en met 21 jaar (M = 17,02; SD = 1,19).

ONDERZOEKSOPZET

In deze studie werd een between-subjects opzet gebruikt met het type prestatiefeedback (Absolute feedback versus Sociale vergelijkingsfeedback) als onafhankelijke variabele. Deelnemers werden random toegewezen aan de Absolute feedback-conditie (n = 25) of de Sociale vergelijkingsfeedback conditie (n = 27). In beide condities werkten de studenten samen in twee- of als dat zo uitkwam, in drietallen.

MATERIALEN

De materialen waren gelijk aan die gebruikt in de studies "Bevordert onderzoekend leren met simulaties het conceptueel inzicht?" (zie pagina 15 e.v.) en "Verbetert samenwerkend leren leerresultaten?" (zie bladzijde 34 e.v.). Ook de voorkennistoets en de natoets waren gelijk aan die van het hierboven genoemde onderzoek (zie ook pagina 35). De gebruikte leeromgeving was SQ Elektro 3.2 (zie pagina 16 voor een beschrijving), waarbij de feedforward in het systeem geïntegreerd was. Afhankelijk van de conditie waarbij de deelnemers waren ingedeeld, ontvingen ze bij aanvang van elke opgave informatie over de moeilijkheidsgraad van de opgave uitgedrukt in een percentage (absolute standaard) of de het percentage vergelijkbare studenten dat erin geslaagd was de opgave succesvol op te lossen (sociale standaard). Deze gegevens waren gebaseerd op data uit eerdere onderzoeken waarin dezelfde leeromgeving werd gebruikt. In feite waren deze absolute en sociale standaarden elkaars tegenhangers. Een opgave die in het verleden door slechts 10 procent van de studenten correct werd opgelost, werd opgevat als een opgave met een moeilijkheidsgraad van 90 procent (100 procent – 10 procent). Dus in de absolute feedforward-conditie werd de student bij aanvang van de opgave door het systeem geïnformeerd dat de komende opgave een moeilijkheidsgraad van 90 procent

had en daarmee als "zeer moeilijk" gold, terwijl studenten in de sociale feedforward-conditie bij aanvang van dezelfde opgave door het systeem geïnformeerd werden dat slechts 10 procent van vergelijkbare studenten erin geslaagd was de opgave correct op te lossen. Een opgave die in het verleden door 60 procent van de studenten correct werd opgelost gold als een opgave met een moeilijkheidsgraad van 40 procent, enzovoort. Na deze informatie gingen de deelnemers met de opgave aan de slag. Vlak voor het afsluiten van de opgave werden de studenten door het systeem geïnformeerd of hun onderzoek en conclusie correct waren en hierna hadden ze gelegenheid om, indien gewenst, het probleem nogmaals te onderzoeken en op te lossen met de simulatie.

Procedure

Inclusief de sessies waarin de voorkennistoets en de natoets werden afgenomen waren er negen experimentele sessies. Er zat telkens een week tussen elke sessie en de volgende. Tijdens de eerste sessie, die 45 minuten duurde, kregen de studenten achtergrondinformatie over het onderzoek en werd de voorkennistoets afgenomen. In de tweede sessie werd elke student random toegewezen aan een conditie. Hierna werden beide groepen naar verschillende klaslokalen gebracht. (Tijdens deze en alle volgende experimentele sessies waren de beide groepen fysiek van elkaar gescheiden.) De deelnemers mochten zelf een partner kiezen om mee samen te werken. Communicatie was face-to-face: de tweetallen zaten naast elkaar en werkten met dezelfde computer. Ze werkten samen aan de lesstof, opdrachten en simulaties in de leeromgeving. De rest van de tweede sessie werd besteed aan uitleg van en oefenen met de toegewezen elektronische leeromgeving. In de volgende zes sessies werkten de tweetallen in hun eigen tempo in de leeromgeving. In de negende sessie werd de natoets afgenomen.

Resultaten

Voorkennis

De scores op de voorkennistest van beide condities staan vermeld in Tabel 13.

Tabel 13. Scores voorkennistoets

	Conditie			
	Absolute feedback (n = 25)		Sociale vergelijkingsfeedback (n = 27)	
	M	*SD*	*M*	*SD*
Conceptuele items (max. 7)	1,84	1,43	2,44	1,40
Procedurele items (max. 5)	2,72	0,98	2,81	1,15
Totaal (max. 12)	4,56	2,10	5,26	1,91

De data met betrekking tot de voorkennistest in Tabel 13 werden geanalyseerd met t-toetsen voor onafhankelijke steekproeven. Ten aanzien van de scores op de voortoets werden geen verschillen tussen condities gevonden ten aanzien van conceptuele kennis (t (50) = -1,54, *n.s.*), procedurele kennis (t (50) = -0,21, *n.s.*) of de totaalscores (t (50) = -1,26, *n.s.*).

NATOETS

Gegevens met betrekking tot de natoetsscores in beide condities zijn weergegeven in Tabel 14. Ook de data in Tabel 14 werden geanalyseerd met behulp van t-toetsen voor onafhankelijke steekproeven. Er werden geen verschillen tussen condities geobserveerd. Dit gold voor zowel conceptuele kennis (t (50) = 0,19, *n.s.*), procedurele kennis (t (50) = -1,10, *n.s.*) als de totaalscores op de natoets (t (50) = -0,23, *n.s.*).

TABEL 14. SCORES NATOETS

	Conditie			
	Absolute feedback (n = 25)		Sociale vergelijkingsfeedback (n = 27)	
	M	*SD*	*M*	*SD*
Conceptuele items (max. 14)	6,52	3,07	6,37	2,48
Procedurele items (max. 5)	2,92	1,35	3,30	1,10
Totaal (max. 19)	9,44	4,00	9,67	3,00

CONCLUSIE EN DISCUSSIE

Ook in dit onderzoek in het eerste leerjaar van Elektrotechniek is geen versterking van leerresultaten gevonden door samenwerkend leren, ondanks de aanwezigheid van prestatie-feedforward. Mogelijk speelt hierbij een rol dat de vraagstukken complexer en diffuser waren dan bij de studie bij Werktuigbouwkunde. In die studie ging het om het domein van goniometrie en zoals in de discussie van die studie besproken is, was de oplossingsruimte waarin de studenten werkten heel beperkt. In het domein van de Elektrotechniek is de oplossingsruimte groter en daarmee minder eenduidig. Een andere verklaring zou kunnen zijn dat de studenten al op de top van hun kunnen presteerden en dat prestatiefeedback hen niet verder kon brengen. Ten tijde van het schrijven van dit rapport zijn de data van de oplossingen van de opdrachten in de leeromgevingen nog niet geanalyseerd. Misschien levert analyse daarvan nog aanvullende inzichten. In de natoets zijn echter geen effecten teruggevonden.

Slot

Conclusies en discussie

Bevindingen

In dit onderzoeksproject is gezocht naar antwoord op de vraag: naar de effectiviteit van onderzoekend leren met simulaties in vergelijking met traditionele instructie zoals gemeten met inhoudelijke en procesmatige kennismaten in het middelbaar technisch beroepsonderwijs. De verwachting was dat deze effectiviteit toeneemt door de jaren heen. In het onderzoek was sprake van een individuele en een samenwerkingsvariant, waarbij de samenwerkingsvariant in een aantal ontwikkelingsstappen werd ontwikkeld.

Op basis van de verschillende studies binnen dit onderzoeksproject kunnen de volgende conclusies getrokken worden. Conceptueel inzicht, dat wil zeggen kennis van grootheden en hun onderlinge relaties, is een aspect dat niet of nauwelijks aan bod komt in traditionele instructie. Traditionele instructie lijkt weinig effectief voor het verwerven van conceptueel inzicht. In dit onderzoek is bevestiging gevonden voor de idee dat goede, veelzijdige instructie, gebruik maakt van verschillende instructiebenaderingen, afhankelijk van de beoogde leerdoelen. Onderzoekend leren met simulaties blijkt aantoonbaar effectiever dan traditionele instructie bij het stimuleren van conceptueel inzicht. Een onverwacht effect van deze instructiemethode was dat niet alleen conceptuele kennis bevorderd werd, maar ook procedurele kennis. Dit zou kunnen duiden op het plaatsvinden van zogenaamde "bootstrapping"- of iteratieve kennisontwikkelingsprocessen, dat wil zeggen, het verwerven van de ene vorm van kennis bevordert het verwerven van een andere vorm van kennis, die op zijn beurt de eerst bevordert, enzovoort. Of en zoja in hoeverre dergelijke processen een rol hebben gespeeld is onduidelijk. Wat wel duidelijk werd is dat studenten die leerden met onderzoekend leren met simulaties, na afloop van de instructie beter in staat waren om complexe (conceptuele en procedurele) vraagstukken op te lossen dan studenten die alleen de traditionele lesmethoden volgden.

Opvallend was dat de effecten van onderzoekend leren bijzonder duurzaam lijken te zijn. Studenten die in het eerste leerjaar met deze methode begonnen te leren, bouwden een voorsprong op ten aanzien van conceptuele en procedurele kennis, ten opzichte van studenten die met de traditionele methoden leerden. Deze voorsprong leek ruim een jaar nog steeds intact en toen de studenten daarna opnieuw met deze methode leerden, vergrootten ze opnieuw hun voorsprong. Deze bevinding bleef statistisch overeind, zelfs nadat voor de voorsprong uit het eerste jaar was gecorrigeerd. De effecten van onderzoekend leren met simulaties bleken sterker dan verwacht. Wat hierbij ook opviel was dat de effecten meteen na de eerste lessenserie zichtbaar werden. Er was op geanticipeerd dat dergelijke effecten pas bij de

tweede of derde lessenserie in opvolgende jaren zichtbaar zouden worden. Dit toont aan dat deze methode zeker geschikt is voor studenten in het middelbaar technisch beroepsonderwijs.

Een toevoeging waarvan op basis van talloze empirische onderzoeken veel te verwachten viel, namelijk samenwerkend (onderzoekend) leren, viel in de praktijk van ons onderzoek tegen. Uit herhaalde onderzoeken kwam naar voren dat in het geval van Elektrotechniek, samenwerking tussen studenten geen enkele aantoonbare toegevoegde waarde had. Zowel zonder als met aanvullende interventies (feedforward informatie) bleven de leerresultaten volkomen vergelijkbaar met studenten die individueel leerden. Dus in het geval van Elektrotechniek geven onze onderzoeksresultaten aan dat er geen toegevoegde waarde in termen van verbetering van leerresultaten van te verwachten valt van samenwerkend leren.

Bij de richting Werktuigbouwkunde werd wel gevonden dat prestatiefeedback invloed had op leerresultaten bij samenwerkend onderzoekend leren. In die context is echter geen vergelijking gemaakt met individueel onderzoekend leren. Uit de resultaten kwam naar voren dat prestatie-feedback op basis van sociale vergelijking leidde tot een aanzienlijke verbetering in leerresultaten terwijl prestatie-feedback op basis van een absolute standaard geen effect leek te hebben op leerresultaten. Deze bevindingen zijn nogal opvallend omdat in de meerderheid van vergelijkbare andere empirische studies dit verschil niet gevonden wordt. Er is aanvullend onderzoek nodig om vast te stellen onder welke voorwaarden de sociale vergelijkingsfeedback werkzaam is.

In het licht van de centrale onderzoeksvraag concluderen we dat onderzoekend leren met simulaties heel geschikt en aanbevelenswaardig is voor de context van middelbaar technisch beroepsonderwijs. Van samenwerkend onderzoekend leren moeten we vaststellen dat de toegevoegde waarde hiervan niet eenduidig vast is komen te staan. Wanneer gecombineerd met prestatie-feedback op basis van sociale vergelijking lijkt samenwerkend onderzoekend leren wel te leiden tot betere leerresultaten dan bij prestatie-feedback op basis van een absolute standaard. Vooralsnog is dat effect echter alleen vastgesteld in een context met een duidelijk afgebakend en zeer gestructureerd domein met een zeer beperkte oplossingsruimte van vraagstukken.

Zijn practica nog nodig?

In deze studie vond het onderzoekend leren plaats in een virtuele leeromgeving, niet in een praktijklokaal met echte apparatuur. Het leren omgaan met echte apparatuur is noodzakelijk voor deze studenten omdat ze later in hun beroepspraktijk ook met soortgelijke apparatuur gaan werken.

Een voor de hand liggende vraag zou zijn: kan onderzoekend leren ook in practica geïntegreerd worden, met andere woorden: kunnen de simulaties ook door echte apparatuur vervangen worden? En omgekeerd, kunnen simulaties de practica vervangen? In sommige onderzoeken, waarin leren met simulaties of virtuele laboratoria werd vergeleken met leren in echte practica in echte laboratoria, werden gelijkwaardige leerresultaten gevonden (zie bijv. Triona & Klahr, 2003; Zacharia & Constantinou, 2008). In andere studies werd gevonden dat leren met simulaties of virtuele laboratoria effectiever was dan leren in practica (zie bijv. Bell & Trundle, 2008; Chang, Chen, Lin, & Sung, 2008; Finkelstein et al., 2005; Huppert, Lomask, & Lazarowitz, 2002). Echter, wij zouden niet aanbevelen om te kiezen tussen echte of virtuele laboratoria. Nu de voordelen van onderzoekend leren met simulaties is aangetoond in het middelbaar technisch beroepsonderwijs, zouden we als suggestie voor een volgende stap willen pleiten voor het verleggen van de aandacht naar het gebruiken van het gecombineerd of achtereenvolgens gebruiken van virtuele en echte materialen. Andere empirische onderzoeken hebben laten zien dat een combinatie of sequentie (bijv. eerst leren in een virtueel lab, dan in een echt lab) kan leiden tot betere conceptuele kennis dan met een virtueel of echt lab alleen (Jaakkola & Nurmi, 2008; Jaakkola et al., 2010; Jaakkola et al., 2011; Zacharia, 2007).

ECOLOGISCHE VALIDITEIT

De experimenten waren geïntegreerd in bestaande curricula en de experimentele sessies vonden plaats in de school tijdens de reguliere lesuren. Aan de ene kant helpt dit om de ecologische validiteit van de studies en de resultaten te bevorderen, maar aan de andere kant bemoeilijkt dit een strikte handhaving van experimentele controle tijdens de experimenten. Bijvoorbeeld, het was onmogelijk om deelnemers uit verschillende condities wekenlang, zo lang als de onderzoeken liepen, strikt van elkaar gescheiden te houden in de school. Uiteraard zaten deelnemers uit verschillende condities in gescheiden klaslokalen tijdens de experimentele sessies, een lokaal voor elke conditie, maar ze konden niet van elkaar geïsoleerd blijven tijdens de andere lesuren en –dagen. Daarom kan niet uitgesloten worden dat de studenten zich met elkaar mengden, wat een vertroebeling van de experimentele effecten kan hebben veroorzaakt. Toch denken wij dat de kans niet heel groot is dat een dergelijke vertroebeling daadwerkelijk plaatsgevonden heeft. Ten eerste, buiten de lessen om (in pauzes bijvoorbeeld) praten de studenten met elkaar over veel uiteenlopende onderwerpen, maar zelden over de stof die in de lessen aan bod is gekomen. Ten tweede, het valt te verwachten dat in geval van vertroebeling omdat deelnemers uit beide condities buiten de experimentele sessies contact met elkaar hebben, dit zou leiden tot een nivellering van de natoetsscores tussen condities, met andere woorden, dan zouden de natoetsscores van de

vergeleken condities dichter bij elkaar liggen. Als dat gebeurd is, dan zou dat betekenen dat de in deze studies geobserveerde effecten in feite een onderschatting zijn van de “echte” effecten. Of het nu een onderschatting is of niet, de ecologische validiteit helpt in ieder geval bij het vaststellen dat de effecten van onderzoekend leren met simulaties daadwerkelijk in de dagelijkse praktijk van een school geobserveerd kunnen worden.

Referenties

Alfieri, L., Brooks, P. J., Aldrich, N. J., & Tenenbaum, H. R. (2011). Does discovery-based instruction enhance learning? *Journal of Educational Psychology, 103*, 1-18.

Bälter, O., Enström, E., & Klingenberg, B. (2013). The effect of short formative diagnostic web quizzes with minimal feedback. *Computers & Education, 60*, 234-242.

Bandura, A. (1989). Self-regulation of motivation and action through internal standards and goal systems. In L. A. Pervin (Ed.), *Goal concepts in personality and social psychology* (pp. 19-85). Hillsdale, NJ: Erlbaum.

Başer, M., & Durmuş, S. (2010). The effectiveness of computer supported versus real laboratory inquiry learning environments on the understanding of direct current electricity among pre-service elementary school teachers. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education, 6*, 47-61.

Başer, M., & Geban, Ö. (2007). Effect of instruction based on conceptual change activities on students' understanding of static electricity concepts. *Research in Science & Technological Education, 25*, 243-267.

Bell, R. L., & Trundle, K. C. (2008). The use of a computer simulation to promote scientific conceptions of moon phases. *Journal of Research in Science Teaching, 45*, 346-372.

Biesinger, K., & Crippen, K. (2010). The effects of feedback protocol on self-regulated learning in a web-based worked example learning environment. *Computers & Education, 55*, 1470-1482.

Butler, D. L., & Winne, P. H. (1995). Feedback and self-regulated learning: A theoretical synthesis. *Review of Educational Research, 65*, 245-281.

Carver, C. S., & Scheier, M. F. (1981). *Attention and self-regulation: A control-theory approach to human behavior*. New York: Springer-Verlag.

Carver, C. S., & Scheier, M. F. (1990). Origins and functions of positive and negative affect: A control-process view. *Psychological Review, 97*, 19-35.

Chang, K.-E., Chen, Y.-L., Lin, H.-Y., & Sung, Y.-T. (2008). Effects of learning support in simulation-based physics learning. *Computers & Education, 51*, 1486-1498.

Chi, M. T. H., Slotta, J. D., & de Leeuw, N. (1994). From things to processes: A theory of conceptual change for learning science concepts. *Learning and Instruction, 4*, 27-43.

Chinn, C. A., & Brewer, W. F. (1998). An empirical test of a taxonomy of responses to anomalous data in science. *Journal of Research in Science Teaching, 35*, 623-654.

Cianci, A. M., Klein, H. J., & Seijts, G. H. (2010). The effect of negative feedback on tension and subsequent performance: The main and interactive effects of goal content and conscientiousness. *Journal of Applied Psychology, 95*, 618-630.

Cohen, R., Eylon, B., & Ganiel, U. (1983). Potential difference and current in simple electric circuits: A study of students' concepts. *American Journal of Physics, 51*, 407-412.

Cox, R. (1999). Representation construction, externalised cognition and individual differences. *Learning and Instruction, 9*, 343-363.

de Jong, T. (2005). The guided discovery principle in multimedia learning. In R. E. Mayer (Ed.), *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (pp. 215-229). Cambridge (UK): Cambridge University Press.

de Jong, T. (2006). Technological advances in inquiry learning. *Science, 312*, 532-533.

de Jong, T. (2009). Een vak apart: hoe krijgen we echt innovatieve software in de klas? In Kennisnet (Ed.), *Hier heb ik niets aan!: Essays over bruikbaar digitaal leermateriaal. (Kennisnet Onderzoeksreeks ICT in het Onderwijs)* (pp. 30-35). Zoetermeer: Stichting Kennisnet.

de Jong, T., & van Joolingen, W. R. (1998). Scientific discovery learning with computer simulations of conceptual domains. *Review of Educational Research, 68*, 179-202.

de Jong, T., van Joolingen, W. R., Swaak, J., Veermans, K., Limbach, R., King, S., & Gureghian, D. (1998). Self-directed learning in simulation-based discovery environments. *Journal of Computer Assisted Learning, 14*, 235-246.

Deci, E. L., & Ryan, R. M. (2000). The "what" and "why" of goal pursuits: Human needs and the self-determination of behavior. *Psychological Inquiry, 11*, 227-268.

Deslauriers, L., & Wieman, C. (2011). Learning and retention of quantum concepts with different teaching methods. *Physical Review Special Topics - Physics Education Research, 7*, 010101-010106.

Dijkstra, P., Kuyper, H., van der Werf, G. P. C., Buunk, A. P., & van der Zee, Y. G. (2008). Social comparison in the classroom: A review. *Review of Educational Research, 78*, 828-879.

Domínguez, A., Saenz-de-Navarrete, J., de-Marcos, L., Fernández-Sanz, L., Pagés, C., & Martínez-Herráiz, J.-J. (2013). Gamifying learning experiences: Practical implications and outcomes. *Computers & Education, 63*, 380-392.

Dunlosky, J., & Lipko, A. R. (2007). Metacomprehension: A brief history and how to improve its accuracy.. *Current Directions in Psychological Science, 16*, 228-232.

Dunlosky, J., & Rawson, K. A. (2012). Overconfidence produces underachievement: Inaccurate self evaluations undermine students' learning and retention. *Learning and Instruction, 22*, 271-280.

Dweck, C. S. (1986). Motivational processes affecting learning. *American Psychologist, 41*, 1040-1048.

Eysink, T. H. S., de Jong, T., Berthold, K., Kolloffel, B., Opfermann, M., & Wouters, P. (2009). Learner performance in multimedia learning arrangements: An analysis across instructional approaches. *American Educational Research Journal, 46*, 1107-1149.

Farrokhnia, M. R., & Esmailpour, A. (2010). A study on the impact of real, virtual and comprehensive experimenting on students' conceptual understanding of DC electric circuits and their skills in undergraduate electricity laboratory. *Procedia - Social and Behavioral Sciences, 2*, 5474-5482.

Finkelstein, N. D., Adams, W. K., Keller, C. J., Kohl, P. B., Perkins, K. K., Podolefsky, N. S., . . . LeMaster, R. (2005). When learning about the real world is better done virtually: A study of substituting computer simulations for laboratory equipment. *Physical Review Special Topics - Physics Education Research, 1*, 010103.

Frederiksen, J. R., White, B. Y., & Gutwill, J. (1999). Dynamic mental models in learning science: The importance of constructing derivational linkages among models. *Journal of Research in Science Teaching, 36*, 806-836.

Frericks, H., & Frericks, S. J. H. (1998). *Elektrotechniek 1MK: Werkboek*. [Electrical engineering 1MK: Exercise book] Baarn, The Netherlands: Nijgh Versluys.

Frericks, H., & Frericks, S. J. H. (2003). *Elektrotechniek 1MK: Kernboek*. [Electrical engineering 1MK: Theory] Baarn, The Netherlands: Nijgh Versluys.

Garris, R., Ahlers, R., & Driskell, J. E. (2002). Games, motivation, and learning: A research and practice model. *Simulation & Gaming, 33*, 441-467.

Gijlers, H., & de Jong, T. (2009). Sharing and confronting propositions in collaborative inquiry learning. *Cognition and Instruction, 27*, 239-268.

Glauert, E. B. (2009). How young children understand electric circuits: Prediction, explanation and exploration. *International Journal of Science Education, 31*, 1025-1047.

Glenberg, A. M., & Langston, W. E. (1992). Comprehension of illustrated text: Pictures help to build mental models. *Journal of Memory and Language, 31*, 129-151.

Glenberg, A. M., Wilkinson, A. C., & Epstein, W. (1982). The illusion of knowing: Failure in the self-assessment of comprehension. *Memory & Cognition, 10*, 597-602.

Gunstone, R., Mulhall, P., & McKittrick, B. (2009). Physics teachers' perceptions of the difficulty of teaching electricity. *Research in Science Education, 39*, 515-538.

Hart, C. (2008). Models in physics, models for physics learning, and why the distinction may matter in the case of electric circuits. *Research in Science Education, 38*, 529-544.

Hattie, J., & Timperley, H. (2007). The power of feedback. *Review of Educational Research, 77*, 81-112.

Hewson, P. W. (1985). Diagnosis and remediation of an alternative conception of velocity using a microcomputer program. *American Journal of Physics, 53*, 684-690.

Hickey, D. T., Kindfield, A. C. H., Horwitz, P., & Christie, M. A. T. (2003). Integrating curriculum, instruction, assessment, and evaluation in a technology-supported genetics learning environment. *American Educational Research Journal, 40*, 495-538.

Hoska, D. M. (1993). Motivating learners through CBI feedback: Developing a positive learner perspective. In V. Dempsey & G. C. Sales (Eds.), *Interactive instruction and feedback* (pp. 105–132). Englewood Cliffs, NJ: Educational Technology Publications.

Hulshof, C. D., Eysink, T. H. S., Loyens, S., & de Jong, T. (2005). ZAPs: Using interactive programs for learning psychology. *Interactive Learning Environments, 13*, 39-53.

Huppert, J., Lomask, S. M., & Lazarowitz, R. (2002). Computer simulations in the high school: Students' cognitive stages, science process skills and academic achievement in microbiology. *International Journal of Science Education, 24*, 803-821.

Jaakkola, T., & Nurmi, S. (2008). Fostering elementary school students' understanding of simple electricity by combining simulation and laboratory activities.. *Journal of Computer Assisted Learning, 24*, 271-283.

Jaakkola, T., Nurmi, S., & Lehtinen, E. (2010). Conceptual change in learning electricity: Using virtual and concrete external representations simultaneously. In L. Verschaffel, E. de Corte, T. de Jong & J. Elen (Eds.), *Use of representations in reasoning and problem solving: Analysis and improvement* (pp. 133-152). London: Routledge.

Jaakkola, T., Nurmi, S., & Veermans, K. (2011). A comparison of students' conceptual understanding of electric circuits in simulation only and simulation-laboratory contexts. *Journal of Research in Science Teaching, 48*, 71-93.

Kaput, J. J. (1995). Creating cybernetic and psychological ramps from the concrete to the abstract: Examples from multiplicative structures. In D. N. Perkins, J. L. Schwartz, M. M. West & M. Stone Wiske (Eds.), *Software goes to school: Teaching for understanding with new technologies.* (pp. 130-154). New York, NY US: Oxford University Press.

Ketelhut, D. J. (2007). The impact of student self-efficacy on scientific inquiry skills: An exploratory investigation in River City, a multi-user virtual environment. *Journal of Science Education and Technology, 16*, 99-111.

Kim, S., Lee, M.-J., Chung, Y., & Bong, M. (2010). Comparison of brain activation during norm-referenced versus criterion-referenced feedback: The role of perceived competence and performance-approach goals. *Contemporary Educational Psychology, 35*, 141-152.

Kluger, A. N., & DeNisi, A. (1996). The effects of feedback interventions on performance: A historical review, a meta-analysis, and a preliminary feedback intervention theory. *Psychological Bulletin, 119*, 254-284.

Kluger, A. N., & DeNisi, A. (1998). Feedback interventions: Toward the understanding of a double-edged sword.. *Current Directions in Psychological Science, 7*, 67-72.

Kuhn, D. (2007). Is direct instruction an answer to the right question? *Educational Psychologist, 42*, 109-113.

Labuhn, A. S., Zimmerman, B. J., & Hasselhorn, M. (2010). Enhancing students' self-regulation and mathematics performance: the influence of feedback and self-evaluative standards. *Metacognition and Learning, 5*, 173-194.

Linn, M. C., Lee, H.-S., Tinker, R., Husic, F., & Chiu, J. L. (2006). Teaching and assessing knowledge integration in ccience. *Science, 313*, 1049-1050.

Lipko, A. R., Dunlosky, J., Hartwig, M. K., Rawson, K. A., Swan, K., & Cook, D. (2009). Using standards to improve middle school students' accuracy at evaluating the quality of their recall. *Journal of Experimental Psychology: Applied, 15*, 307-318.

Locke, E. A., & Latham, G. P. (2002). Building a practically useful theory of goal setting and task motivation: A 35-year odyssey. *American Psychologist, 57*, 705-717.

Lou, Y. P., Abrami, P. C., & d'Apollonia, S. (2001). Small group and individual learning with technology: A meta-analysis. *Review of Educational Research, 71*, 449-521.

Malone, T. W. (1981). Toward a theory of intrinsically motivating instruction. [doi:]. *Cognitive Science, 5*, 333-369.

Mayer, R. E. (2004). Should there be a three-strikes rule against pure discovery learning? The case for guided methods of instruction. *American Psychologist, 59*, 14-19.

McDermott, L. C. (1991). What we teach and what is learned: Closing the gap [Millikan Lecture 1990]. *American Journal of Physics, 59*, 301-315.

McDermott, L. C., & Shaffer, P. S. (1992). Research as a guide for curriculum development: An example from introductory electricity. Part I: Investigation of student understanding. *American Journal of Physics, 60*, 994-1003.

Muller, D. A., Bewes, J., Sharma, M. D., & Reimann, P. (2008). Saying the wrong thing: improving learning with multimedia by including misconceptions. *Journal of Computer Assisted Learning, 24*, 144-155.

Nicholls, J. G. (1984). Achievement motivation: Conceptions of ability, subjective experience, task choice, and performance. *Psychological Review, 91*, 328-346.

Papadouris, N., & Constantinou, C. P. (2009). A methodology for integrating computer-based learning tools in science curricula. *Journal of Curriculum Studies, 41*, 521 - 538.

Park, S. I., Lee, G., & Kim, M. (2009). Do students benefit equally from interactive computer simulations regardless of prior knowledge levels? *Computers & Education, 52*, 649-655.

Prince, M. J., & Felder, R. M. (2006). Inductive teaching and learning methods: Definitions, comparisons, and research bases. *Journal of Engineering Education, 95*, 123-138.

Qin, Z., Johnson, D. W., & Johnson, R. T. (1995). Cooperative versus competitive efforts and problem solving. *Review of Educational Research, 65*, 129-143

Quintana, C., Reiser, B. J., Davis, E. A., Krajcik, J., Fretz, E., Duncan, R. G., . . . Soloway, E. (2004). A scaffolding design framework for software to support science inquiry. *The Journal of the Learning Sciences, 13*, 337-386.

Rakoczy, K., Harks, B., Klieme, E., Blum, W., & Hochweber, J. (2013). Written feedback in mathematics: Mediated by students' perception, moderated by goal orientation. *Learning and Instruction, 27*, 63-73.

Reiser, B. J. (2004). Scaffolding complex learning: The mechanisms of structuring and problematizing student work. *The Journal of the Learning Sciences, 13*, 273-304.

Rieber, L. P., Tzeng, S. C., & Tribble, K. (2004). Discovery learning, representation, and explanation within a computer-based simulation: finding the right mix. *Learning and Instruction, 14*, 307-323.

Rittle-Johnson, B., Siegler, R. S., & Alibali, M. W. (2001). Developing conceptual understanding and procedural skill in mathematics: An iterative process. *Journal of Educational Psychology, 93*, 346-362.

Schauble, L. (1996). The development of scientific reasoning in knowledge-rich contexts. *Developmental Psychology, 32*, 102-119.

Schauble, L., Klopfer, L. E., & Raghavan, K. (1991). Students' transition from an engineering model to a science model of experimentation. *Journal of Research in Science Teaching, 28*, 859-882.

Sharma, P., & Hannafin, M. J. (2007). Scaffolding in technology-enhanced learning environments. *Interactive Learning Environments, 15*, 27 - 46.

Shute, V. J. (2008). Focus on formative feedback. *Review of Educational Research, 78*, 153-189.

Slavin, R. E. (1995). *Cooperative learning: Theory, research, and practice* (2 ed.). Boston, MA: Allyn and Bacon.

Steinberg, R. N. (2000). Computers in teaching science: To simulate or not to simulate? *American Journal of Physics, 68*, S37-S41.

Streveler, R. A., Litzinger, T. A., Miller, R. L., & Steif, P. S. (2008). Learning conceptual knowledge in the engineering sciences: Overview and future research directions. *Journal of Engineering Education, 97*, 279-294.

Strike, K. A., & Posner, G. J. (1985). A conceptual change view of learning and understanding. In L. West & L. Pines (Eds.), *Cognitive structure and conceptual change*. Orlando, FL: Academic Press.

Swaak, J., & de Jong, T. (2001). Discovery simulations and the assessment of intuitive knowledge. *Journal of Computer Assisted Learning, 17*, 284-294.

Swaak, J., van Joolingen, W. R., & de Jong, T. (1998). Supporting simulation-based learning; The effects of model progression and assignments on definitional and intuitive knowledge. *Learning and Instruction, 8*, 235-252.

Tao, P.-K., & Gunstone, R. F. (1999). The process of conceptual change in force and motion during computer-supported physics instruction. *Journal of Research in Science Teaching, 36*, 859-882.

Triona, L. M., & Klahr, D. (2003). Point and click or grab and heft: Comparing the influence of physical and virtual instructional materials on elementary school students' ability to design experiments. *Cognition & Instruction, 21*, 149-173.

Trundle, K. C., & Bell, R. L. (2010). The use of a computer simulation to promote conceptual change: A quasi-experimental study. *Computers & Education, 54*, 1078-1088.

van Boxtel, C., van der Linden, J., & Kanselaar, G. (2000). Collaborative learning tasks and the elaboration of conceptual knowledge. *Learning and Instruction, 11*, 311-330.

van der Kleij, F. M., Eggen, T. J. H. M., Timmers, C. F., & Veldkamp, B. P. (2012). Effects of feedback in a computer-based assessment for learning. *Computers & Education, 58*, 263-272.

van der Linden, J., Erkens, G., Schmidt, H., & Renshaw, P. (2000). Collaborative learning. In R. J. Simons, J. Van der Linden & T. Duffy (Eds.), *New learning* (pp. 37-54). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

van Joolingen, W. R., & de Jong, T. (2003). SimQuest: Authoring educational simulations. In T. Murray, S. Blessing & S. Ainsworth (Eds.), *Authoring Tools for Advanced Technology Educational Software: Toward Cost-Effective Production of Adaptive, Interactive, and Intelligent Educational Software.* (pp. 1-31). Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.

van Joolingen, W. R., de Jong, T., Lazonder, A. W., Savelsbergh, E. R., & Manlove, S. (2005). Co-Lab: research and development of an online learning environment for collaborative scientific discovery learning. *Computers in Human Behavior, 21*, 671-688.

White, B. Y., & Frederiksen, J. R. (1998). Inquiry, modeling, and metacognition: Making science accessible to all students.. *Cognition & Instruction, 16*, 3-118.

Zacharia, Z. C. (2007). Comparing and combining real and virtual experimentation: An effort to enhance students' conceptual understanding of electric circuits. *Journal of Computer Assisted Learning, 23*, 120-132.

Zacharia, Z. C., & Constantinou, C. P. (2008). Comparing the influence of physical and virtual manipulatives in the context of the Physics by Inquiry curriculum: The case of undergraduate students' conceptual understanding of heat and temperature. *American Journal of Physics, 76*, 425-430.

Zhang, J. W., Chen, Q., Sun, Y. Q., & Reid, D. J. (2004). Triple scheme of learning support design for scientific discovery learning based on computer simulation: experimental research. *Journal of Computer Assisted Learning, 20*, 269-282.