Entwicklung und Evaluation eines realen-internetgesteuerten Experimentes für verschiedene Anfängerpraktika

Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades
eines Doktors der Pädagogik
im Fachbereich Physik der Universität Dortmund

vorgelegt von
Dipl.-Physiker Andreas Borowski

Dezember 2003

Wo will man die Weisheit finden?
Und wo ist die Stätte der Einsicht?
Niemand weiß, was sie wert ist,
und sie wird nicht gefunden im Lande der Lebendigen.
Die Tiefe spricht: «In mir ist sie nicht»;
und das Meer spricht: «Bei mir ist sie auch nicht.»
Man kann nicht Gold für sie geben
noch Silber darwägen, sie zu bezahlen.

Hiob 28, 12-14

Inhaltsverzeichnis

Kapitel 1

Einleitung

Die Einleitung untergliedert sich in drei Abschnitte. Zu Beginn werden naturwissenschaftliche Praktika allgemein diskutiert. Dabei werden die geschichtliche Entwicklung sowie die Aufgaben und Effektivität von Praktika betrachtet. Der zweite Abschnitt beschäftigt sich mit den Möglichkeiten, die der Einsatz von Multimedia im Lehr-Lern-Prozess bietet. Der letzte Abschnitt folgert aus den ersten beiden Abschnitten die Motivation und Ziele dieser Arbeit.

Naturwissenschaftliche Praktika

Vor knapp 200 Jahren, um das Jahr 1830, fanden erste naturwissenschaftliche Praktika statt (vgl. [Gee92]). Diese waren zu Beginn ausschließlich Chemie-Praktika in Laboren. Heutzutage sind in allen Fächern der naturwissenschaftlichen Ausbildung experimentelle Praktika alltäglich und nicht mehr wegzudenken.

Die Etablierung von Praktika in der Ausbildung geht einher mit der Industrialisierung und Technisierung sowie mit der Ausprägung des Wissenschaftlers zum anerkannten Berufsbild. Dadurch war es nötig geworden, dass wissenschaftliche Studenten möglichst gut auf den späteren Beruf, der viele Praxiselemente enthielt, vorbereitet waren (vgl. [Not97]).

Nach anfänglichen Zweifeln an dem Sinn von Praktika konnte deren Nutzen heutzutage durch Untersuchungen belegt werden. In einer Arbeit von M.P. Freedman [Fre97] wird z.B. beschrieben, dass Schüler, die einmal in der Woche selber experimentieren, bessere Leistungen in Physik zeigen und auch eine positivere Grundeinstellung zu Naturwissenschaften haben, als Schüler, die nicht experimentieren konnten.

Die Hauptziele von Praktika sind häufig diskutiert worden (z.B: [Bou80]; [Hel82]; [Wel98]; [Die98]) und können in zwei Thesen zusammengefasst werden (vgl. [Kir00a]):

- Der Erwerb fachspezifischer Handlungsschemata / experimenteller Fertigkeiten
- Das Verstehen physikalischer Gesetzmäßigkeiten und Begriffe.

Laut einer Untersuchung, die an Universitäten und Schulen in sechs europäischen Ländern von M. Welzel et al. durchgeführt wurde [Wel98], können diese beiden Ziele erweitert und wie folgt formuliert werden:

- Die Verbindung von Theorie und Praxis
- Der Erwerb experimenteller Fähigkeiten
- Das Kennenlernen der Methoden wissenschaftlichen Denkens
- Motivation und persönliche Weiterentwicklung
- Die Überprüfung des Wissens der Lernenden.

Nun stellt sich die Frage, ob die genannten Ziele auch in den einzelnen Praktika umgesetzt und erreicht werden. Untersuchungen von z.B. K.G. Tobin [Tob90] oder R.T. White [Whi96] zeigen eine Diskrepanz zwischen Zielen und Wirklichkeit. Ein Grund für diese Diskrepanz ist, dass die durchzuführenden Arbeiten Schritt für Schritt vorgegeben sind und die Praktikanten keine Möglichkeit haben, selbst etwas auszuprobieren. Demzufolge wird die Aufgabenstellung wie eine Anleitung in einem Kochbuch abgearbeitet. Das Arbeiten ist folglich rein ergebnisorientiert.
Durch das Abarbeiten der Aufgabenstellung kommt es nur selten zu einer Beschäftigung mit dem physikalischen Inhalt ([Lun98]), was Erzeugung eines kognitiven Konflikts verhindert. Auch die Verbindung von Theorie und Praxis, die so häufig gefordert wird, kann so nicht stattfinden.
Außerdem wurde herausgefunden [Ogu83], dass die Studenten im Praktikum sehr lange die Anleitung zum Aufbauen von Experimenten lesen müssen oder Daten aufschreiben, also keine Tätigkeit ausführen, die eine Auseinandersetzung mit der physikalischen Problemstellung des Experimentes verlangt. Somit wäre es sinnvoll, wenn ein Teil dieser Tätigkeit automatisiert werden könnte, um den Studenten mehr Zeit zur Beschäftigung mit dem physikalischen Inhalt zu geben. Eine totale Automatisierung der Datenaufnahme führt jedoch nicht zwangsläufig zu einer stärkeren Beschäftigung mit dem physikalischen Inhalt, wie in [Huc99] dargestellt wird.
Somit kann man folgern, dass neue Experimente entwickelt werden sollten, die den Studenten die fachlichen Konzepte verdeutlichen und ihnen die Zeit geben, sich mit diesen auseinanderzusetzen.

Multimedia als Möglichkeit zum Wissenserwerb

Eine Zeit lang galt das Lernen und Lehren mit Multimedia-Angeboten als neu und sehr vielversprechend, worauf eine Phase der Enttäuschung (siehe z.B. [Ker01]) folgte. Zur Zeit steht man dem Lernen mit Multimedia-Angeboten eher emotionsfrei

gegenüber und sieht es allgemein als Bereicherung des Medienangebotes.
Was bedeutet eigentlich Multimedia? Der Begriff Multimedia hatte seinen Ursprung darin, dass das erste Klavier ins Stummfilmkino geschoben wurde [Sch02]. Seither ist dieser Begriff häufig verändert worden. In dieser Arbeit wird der Begriff Multimedia so verstanden, wie Hasebrook [Has94] diesen definiert:
„Unter Multimedia wird die Integration von Text und Bild mit zumindest einem dynamischen Informationsmedium, also Ton, Animation oder Video am Computer, verstanden.“

Über die Lernwirksamkeit von Multimedia-Lernangeboten sind viele Studien angefertigt worden ([Tul99]; [Auf99]; [Glo95]), die jedoch kein einheitliches Bild ergaben. In allen Studien wird es aber als wichtig erachtet, von den bekannten lehrlerntheoretischen Grundlagen auszugehen, um neue Multimedia-Lernangebote zu erstellen.

Wie könnte man nun die Vorteile der Multimedia-Technik für die Experimente im Physik-Praktikum nutzen? Wenn der Rechner nur benutzt wird, um die Messdatenaufnahme zu vereinfachen oder zu beschleunigen, so fördert dies nicht unbedingt das Verständnis der Praktikanten des jeweiligen Experimentes, sondern verschlechtert es teilweise sogar [Huc99]. Multimediale Praktikumsexperimente sollten neu entwickelte Experimente sein, damit die Zeit, die durch den Wegfall des Aufbauens und der Messdatennahme entsteht, effektiv genutzt wird. So könnte eine sofortige graphische Visualisierung der Messdaten zu einem besseren Verständnis des Lerninhaltes führen [Tho92]. Auch können Simulationen dazu beitragen, dass die Praktikanten den physikalischen Inhalt besser verstehen. Durch Simulationen könnten teilweise Parameter, die nur sehr schwer gemessen werden können, „sichtbar“ gemacht werden. Der Praktikant kann kausale Zusammenhänge zwischen den einzelnen Variablen verstehen oder den Einfluss einzelner Parameter auf das Gesamtsystem untersuchen (siehe z.B. [Vos92] und [Nie91]).

Motivation dieser Arbeit

Das vom BMBF[1] geförderte Forschungs-Projekt „Physik 2000 – Neue Medien im Universitätsverbund für ein forschungsorientiertes Studium“ hat sich zum Ziel gesetzt Lehrveranstaltungen über das Internet anzubieten und den Lernerfolg dieser Veranstaltungen im Vergleich mit herkömmlichen Lehrveranstaltungen zu untersuchen [PH-00]. Dabei sollen drei verschiedene Arten von Lehrveranstaltungen untersucht werden: die Vorlesung, das Seminar und das Praktikumsexperiment.
Die meisten dieser Veranstaltungen finden lokal an einer der sechs Partneruniversitäten (HU Berlin, Bonn, Dortmund, Jena, Rostock, Siegen) statt und werden per Internet an die anderen Universitäten übermittelt. Auch die Experimente sollen auf diese Art durchgeführt werden. Diverse Praktikumsexperimente sollen lokal an einer

[1]Bundesministerium für Bildung und Forschung

Universität aufgebaut sein, und die Praktikanten können dann diese Experimente über das Internet steuern und zum Teil auswerten. Der Betreuer des jeweiligen Experimentes sitzt an der Universität, an der das Experiment aufgebaut ist, und betreut die Praktikanten über das Internet. Bei dieser Betreuung steht der auditive und visuelle Kanal zur Verfügung

Dieses Projekt verbindet also das naturwissenschaftliche Praktikum und das Multimedia-gestützte Lernen miteinander. Hier stellt sich die Frage, ob diese Art von Experiment sinnvoll ist. Die Beantwortung dieser Frage hängt stark von der Interpretation des Begriffes „sinnvoll" in Bezug auf das physikalische Praktikum ab. Durch rechnergestützte Experimente kann man nicht die Fertigkeit lernen, ein Experiment von Hand aufzubauen, aus dieser Blickrichtung wäre diese Art von Experimenten sinnlos. Unter dem Aspekt der Förderung der Medienkompetenz ist dieser Ansatz aber durchaus sinnvoll, da Studenten auf diese Art und Weise an neue Medien und die Kommunikation über das Internet herangeführt werden. Ein dritter Punkt, der auch in dieser Arbeit behandelt werden soll, ist die Untersuchung des Lernerfolges der Studenten bei dieser Art von Experiment.

Bei der Ermittlung des Lernerfolges besteht die Schwierigkeit, das Wissen im Vergleich mit einem anderen Experiment zu messen, um diesen einordnen zu können. Bei dem Vergleich eines rechnergestützten Experimentes, welches über das Internet betreut wird, mit einem traditionellen Experiment, welches vor Ort betreut wird, beeinflussen zwei Faktoren den Lernerfolg: die Art des Experimentes und die Art der Betreuung.
Um die Effekte einzeln untersuchen zu können, werden im Folgenden zwei Untersuchungen durchgeführt. Zuerst wird, bei einer Betreuung vor Ort, der Lernerfolg der Praktikanten, die das rechnergestützte Experiment durchführen, mit dem Lernerfolg der Praktikanten, die das traditionelle Experiment bearbeiten, verglichen. Nach dieser Untersuchung wird bei dem rechnergestützten Experiment der Lernerfolg der Praktikanten in Abhängigkeit von der Art der Betreuung, vor Ort oder per Internet, untersucht. Aus diesen beiden Untersuchungen kann dann die Frage beantwortet werden, ob der Lernerfolg und die Entwicklung des Lernerfolges eines rechnergestützten Experimentes, welches über das Internet betreut wird, vergleichbar besser oder schlechter ist, als bei einem traditionell durchgeführten Experiment.

Im vorherigen Abschnitt wurde berichtet, dass die Automatisierung der Messwertaufnahme eines traditionellen Experimentes nicht grundsätzlich ausreicht, um den Praktikanten den physikalischen Inhalt verständlicher zu machen. Daher muss ein rechnergestütztes Experiment mit ähnlichem Inhalt wie ein traditionelles Experiment neu konzipiert werden. Aus diesem Grund wurde für diese Arbeit ein rechnergestütztes Experiment neu entwickelt (näheres dazu siehe Kapitel (4)) und bei der Durchführung von verschiedenen Praktika in verschiedenen Universitäten evaluiert. Desweiteren wurde ein traditionelles Experiment entwickelt, welches den gleichen physikalischen Inhalt behandelt wie das rechnergestützte Experiment. Bei der Entwicklung dieser verschiedenen Experimente wurde darauf geachtet, dass sie all die im Mittel die gleiche Zeit der Bearbeitung benötigen.

Bevor in dieser Arbeit auf die Entwicklung der Experimente und die Durchführung der Evaluation eingegangen wird, soll zuvor ein Überblick über verschiedene Lerntheorien in Bezug auf multimediale Lernangebote gegeben werden, sowie über den bisherigen Einsatz von Rechnern in naturwissenschaftlichen Praktika.
Die Ermittlung des Lernerfolges erfolgt mit Hilfe von Fragebögen. Um die Auswertung der aus diesem Fragebogen gewonnen Daten verstehen zu können, werden die wichtigsten in dieser Arbeit benutzten mathematischen Test-Verfahren im Anhang vorgestellt.
Der Aufbau der Evaluation und die Grundlagen für die Entwicklung der beiden Experimente werden im dritten Kapitel ausführlich erörtert. An dieses Kapitel schließt sich die Entwicklung der Experimente und des Fragebogens, sowie die Vorstellung und Auswertung der erhobenen Daten an. In dem abschließenden Kapitel werden die gewonnenen Erkenntnisse zusammengefasst und ein Ausblick für weitere Vorgehensweisen bei der Untersuchung von Multimedia im Praktikum gegeben.

Kapitel 2

Gedächtnis und Lernen

Das folgende Kapitel ist in drei Abschnitte eingeteilt. Im ersten werden die drei Speicher unseres Gedächtnisses diskutiert. Der zweite Abschnitt beschäftigt sich mit lerntheoretischen Ansätzen zum Lernen mit Hilfe von Rechnern. Der letzte Abschnitt dieses Kapitel geht auf die Erfahrungen mit Experimenten in der Lehre ein, die nicht im traditionellen Sinne durchgeführt werden: Experimente werden z.B. abgefilmt oder per Rechner als interaktive Bildschirmexperimente aufbereitet.

2.1 Das „Drei-Speicher-Modell“ des Gedächtnisses

In der Psychologie und der Neurowissenschaft wird unser Gedächtnis üblicherweise nicht als ein nicht weiter strukturiertes Ganzes gesehen, sondern es kann in drei Speicher, die verschiedene Aufgaben haben, unterteilt werden (vgl. [Zim95]):

Das Sensorische- oder Ultrakurzzeit-Gedächtnis bewahrt flüchtige Impressionen sensorischer Reize – Bilder, Töne, Gerüche, Strukturen – über einen sehr kurze Zeitraum auf.

Das Kurzzeitgedächtnis beinhaltet Erinnerungen an das, was wir vor kurzem erfahren haben. Solche begrenzte Information hält sich nur relativ kurze Zeit, wenn sie nicht mit besonderer Aufmerksamkeit bedacht oder durch Wiederholung wiederhergestellt wird.

Das Langzeitgedächtnis bewahrt Informationen für den Abruf zu einem späteren Zeitpunkt auf. Die Informationen im Langzeitgedächtnis bildet unser jeweiliges Wissen über die Welt.

Information, die behalten werden soll, also im Langzeitgedächtnis abgespeichert werden soll, muss vorher durch die beiden anderen Speicher gelangen. Wenn aus irgend einen Grund die Information vorher schon blockiert oder als unwichtig angesehen wird, hat unser Gedächtnis keine Möglichkeit, diese Information für spätere Zeiten zu speichern, sie geht verloren. Wie Informationen in den jeweiligen Gedächtnissen verarbeitet werden, soll in den folgenden Unterabschnitten betrachtet werden.

2.1.1 Sensorisches- oder Ultrakurzzeit-Gedächtnis

Das Ultrakurzzeit-Gedächtnis ist der erste Filter unserer Wahrnehmung. Der Originalreiz aus den Sensoren gelangt hier an. Die Information liegt hier in Form eines „kreisenden“ elektrischen Impulses vor (siehe [Ves00]). Durch mangelndes Interesse oder fehlende Assoziation klingt dieser Impuls wieder ab und die Information geht verloren, sie wird sozusagen als uninteressant für die weitere Speicherung abgewiesen.
Die Verweildauer der Information im Ultrakurzzeit-Gedächtnis ist, je nach Autor, zwischen zwei und zwanzig Sekunden (siehe zum Beispiel [Zim95] und [Ves00]).

Teilweise sind aber Informationen, die für die Speicherung als unwichtig gelten, für das Leben sehr wichtig. Als Beispiel dient hier das Autofahren. Der Verkehr wird wahrgenommen und der Körper reagiert darauf, indem er das Auto durch Beschleunigen oder Bremsen durch den Verkehr steuert. Diese Tätigkeiten werden bewusst ausgeführt, sind also Reaktionen auf die Information unserer Umwelt, aber sie sind nicht wichtig genug um gespeichert zu werden. So kann man sich schon kurz nach einer Autofahrt nicht mehr an die meisten Tätigkeiten und Begebenheiten erinnern, da diese für die nachfolgenden Situationen nicht wichtig sind.

Der elektrische Impuls im Ultrakurzzeit-Gedächtnis kann aber auch durch andere Einflüsse wie Schmerz oder Schock oder durch einen leichten Elektroschock verloren gehen. So können Ereignisse, die eigentlich als wichtig erkannt werden, doch wieder verloren gehen.

2.1.2 Kurzzeitgedächtnis

Das Kurzzeitgedächtnis ist mit Abstand der kleinste der drei Speicher. Der Grund dafür ist, dass es nicht soviel Informationen aufnehmen muss wie das Ultrakurzzeit-Gedächtnis. Diese Information erhält es gefiltert, es muss die Information auch nicht für spätere Zeit abspeichern wie das Langzeitgedächtnis.
Die Zeit, die die Information ohne Wiederholung im Kurzzeitgedächtnis verweilt, liegt zwischen zwanzig Sekunden und einer halben Stunde.

Obwohl das Kurzzeitgedächtnis der kleinste der Speicher ist, ist dieses Gedächtnis das einzige, in dem wir bewusst etwas verarbeiten können. Es wird somit auch als Arbeitsgedächtnis bezeichnet. Aus dem Ultrakurzzeit-Gedächtnis gelangen Informationen herein und werden mit abgerufenen Informationen aus dem Langzeitgedächtnis verknüpft und verarbeitet.
Das Kurzzeitgedächtnis ist unser eigentliches Selbst. Es verbindet Informationen der Gegenwart mit solchen aus der Vergangenheit und bereitet sie für die Zukunft vor.

Es verbindet die einzelnen Episoden unserer Geschichte miteinander und sorgt dabei für eine zeitliche Verbindung. Es ist auch dafür zuständig, dass wir den Verlauf eines Gespräches verfolgen können (siehe zum Beispiel [Zim95] und [Ves00]).

Ist eine Information einmal im Kurzzeitgedächtnis angelangt, so kann sie nicht mehr durch einen leichten Elektroschock gelöscht werden. Zur Löschung der Information, also zur Unterdrückung der Weiterleitung der Information an das Langzeitgedächtnis, muss die Eiweiß-Synthese unterdrückt werden. Dieses geschieht zum Beispiel in schweren Schock-Situationen, wie zum Beispiel bei Unfällen. Aber auch durch Stresssituationen kann die Speicherung im Langzeitgedächtnis blockiert werden.

2.1.3 Langzeitgedächtnis

Vergleicht man das Ultrakurzzeit-Gedächtnis mit einem nachleuchtenden Bild auf einer phosphoreszierenden Platte und das Kurzzeitgedächtnis mit einem noch nicht fixierten Negativ einer Fotographie, so ist das Langzeitgedächtnis dann die Fixierung dieses Fotos. Dies ist in der Natur kein fotographisches Bild, sondern eine Kopie der RNA-Matrizen, die im Kurzzeitgedächtnis gebildet wird. Durch Unterbrechung der Eiweiß-Synthesen kann diese Matrize nicht kopiert werden und zerfällt wieder. Sind aber feste Proteine gebildet worden, so ist die Information gespeichert (siehe [Ves00]). Diese Art der Speicherung erklärt auch, warum alte Menschen Informationen nicht mehr so gut behalten können. Wissen aus der Vergangenheit ist meistens noch sehr klar und ausführlich vorhanden, aber das Geschehen von Gestern, oder letzter Woche, kann nicht mehr in Erinnerung gerufen werden.

Eine Information wird im Langzeitgedächtnis nicht an einem festen Ort gespeichert, sondern ist, durch eine Erhöhung der Anzahl der Synapsen, über das gesamte Gehirn verteilt. In dem oben erwähnten Vergleich mit dem Bild wäre es dann nicht ein normales Negativ, sondern eine holographische Bildaufnahme. Bei dieser liegt auch in jedem Bildpunkt die gesamte Information des Bildes vor. Wird ein holographisches Bild beschädigt, so kann noch immer die gesamte Information rekonstruiert werden. Das so erstellte Bild besitzt aber einen schlechteren Kontrast und eine geringere Intensität. Das gleiche geschieht, wenn Verletzungen an dem biologischen Speichermedium entstehen; die gespeicherten Informationen sind noch vorhanden, aber insgesamt ist die Klarheit der Information verblasst (siehe zum Beispiel [Zim95] und [Ves00]).

2.2 Lerntheoretische Ansätze

Das Lernen kann aus verschiedenen Sichtweisen betrachtet werden. Die eine Sichtweise stellt z.B. das Lernen in den Mittelpunkt der Lehr-Lernsituation, die andere den Lehrer oder die Beziehung zwischen Lernden und Lehrer. In gewissen Abständen wird jeweils eine andere Art der Sichtweise favorisiert. Zu jeder dieser Sichtweisen gibt es Theorien, die Lernen aus dieser Perspektive beschreiben. Diese Theorien konzentrieren sich auf bestimmte Ausschnitte des Lehr-Lernprozesses und blenden andere, die nicht in die Sichtweise passen, aus. Aus diesem Grund kann nicht eine Theorie als richtig und eine andere als falsch bezeichnet werden, da sie den Prozess auf unterschiedliche Art und Weise betrachten.

Ausgehend von dieser Annahme sollen im folgenden Abschnitt verschiedene lerntheoretische Ansätze dargestellt werden, die das Lernen mit dem Rechner prägen. Diese Ansätze wurden bei der Entwicklung des rechnergestützten Experimentes berücksichtigt.

2.2.1 Programmiertes Lernen

Die Lerntheorien des Behaviorismus und der Kybernetik gehen davon aus, dass das Lernen von außen gesteuert werden kann. Dabei geht der Behaviorismus von einer Steuerung durch Verstärkung aus. Bei dem Kybernetischen Ansatz soll die Steuerung durch den Austausch von Informationen erfolgen. Beide Ansätze werden im Folgenden diskutiert.

Instrumentelle Konditionierung

Die instrumentelle Konditionierung ist ein Zweig des Behaviorismus. Behavioristen begründen ihre Ergebnisse ausschließlich aufgrund von beobachtbaren Verhaltensereignissen und ignorieren mögliche Vorgänge innerhalb der Lebewesen.

Die instrumentelle Konditionierung nach B. F. Skinner ist, im Unterschied zur klassischen Konditionierung nach Pawlow, keine Theorie des Reiz-Reaktions-Lernens, sondern behandelt das „Lernen über Verstärkung“. Die grundlegende Annahme ist, dass eine Person ein Verhalten häufiger zeigt, und somit lernt, wenn dieses Verhalten belohnt wird, was als positive Verstärkung angesehen wird. Erfolgt auf eine Verhaltensweise eine Bestrafung (negative Verstärkung), so soll dieses Verhalten verlernt werden. Experimente belegen jedoch, dass eine negative Verstärkung ein Verhalten nur unterdrückt, langfristig dieses Verhalten aber nicht verlernt worden ist. Eine Verhaltensweise kann langfristig wirksamer unterbunden werden, wenn auf das gezeigte Verhalten keine Reaktion erfolgt. Die Wahrscheinlichkeit sinkt, dass dieses nicht beachtete Verhalten aufrecht erhalten wird, bis es nicht mehr gezeigt wird. Diese Art der Verhaltensänderung wird als Löschung bezeichnet.

Daraus ist zu erkennen, dass der beste Weg eine Verhaltensweise langfristig aufzubauen oder zu verändern, die positive Verstärkung ist. Im täglichen Leben funktioniert dies teilweise nicht, da eine unerwünschte Verhaltensweise häufig Gefahren (z.B zu schnelles Autofahren) beinhaltet. Diese Verhaltensweisen müssen dann durch Bestrafung oder Androhung einer Strafe unterdrückt werden. Aber auch hier sollen positive

Verhaltensweisen gefördert werden, damit die negativen nicht nur unterdrückt, sondern verlernt werden.

Die Verstärkung, die auf eine Verhaltensweise erfolgen soll, muss unmittelbar nach dem gezeigten Verhalten geschehen. Bei einer zu späten Verstärkung kann die Person den Zusammenhang nicht herstellen und somit ist diese unwirksam. Bei neu erlernter Verhaltensweisen ist die zeitliche Nähe in der Verstärkung besonders wichtig. Bei Verhaltensweisen, die relativ sicher beherrscht werden, ist die unmittelbare Verstärkung nicht notwendig. So kann die bestandene Abschlussprüfung eines Studiums als Belohnung für konzentriertes und strukturiertes Lernen während der ganzen Studienzeit empfunden werden. Dadurch wird diese Art des Lernens verstärkt und wird bei folgenden Lernvorgängen wieder angewendet.

In der Möglichkeit der unmittelbaren Verstärkung beim Lernen mit dem Rechner sah Skinner in den sechziger Jahre während der ersten Welle des Rechnereinsatzes den großen Vorteil dieses Mediums. Dabei werden am Ende eines kleinen Lernabschnittes Fragen gestellt werden, die in Freitext beantwortet werden sollten. Die vom Programm ausgewerteten Antworten erhält der Lernenden zurück, um so eine Rückkoppelung über sein gelerntes Wissen zu erhalten. Dadurch sollen richtige Antworten belohnt und somit der Lerneffekt verstärkt werden.

Kybernetik

In der Kybernetik wird das Lernen als ein Vorgang angesehen, der durch Austauschen von Informationen zwischen Lern- und Lehrsystem erfolgt. Aus diesem Grund steht bei dieser Theorie die Aufbereitung, Präsentation, Wahrnehmung und Speicherung der Information, die vermittelt werden soll, im Mittelpunkt der Lehre. Dadurch verlagert sich das Interesse weiter nach vorn im Lehr-Lernprozeß, gewissermassen schon vor die Beantwortung der Fragen, auf die das instrumentelle Lernen durch Verstärkung reagiert.

Die Kybernetischen Ansätze gehen auf die mathematische Informationstheorie nach Shannon zurück. Die Annahme ist dabei, dass jede Information in bits umgeschrieben werden kann und so im Kurz- und Langzeitgedächtnis abgespeichert wird. Aus diesem Grund würde diesen Speichern eine gewisse Kapazität zugewiesen. Dieser Ansatz kann aber durch Forschungen in der Bio- und Neurowissenschaft nicht unterstützt werden.

Ein weiterer Unterschied zum Behaviorismus ist, dass bei dieser Theorie dem Lernenden interne Reaktionen zugeschrieben werden. So erfolgt auf ein vorgezeigtes Verhalten eine Antwort im Sinne von richtig oder falsch. Durch diese Rückkoppelung ist der Lernende in der Lage, die Verhaltensweise zu überdenken und wenn nötig zu revidieren. Dadurch entsteht ein rückgekoppeltes System.

Dem Informationsaustausch kommt bei dieser Theorie eine zentrale Rolle zu. Somit ist die Optimierung dieses Austausches Ziel der Theorie. Es sollen Verfahren entwickelt werden, wie die Information abhängig vom Inhalt am besten vermittelt werden kann.

Das rechnergestützte Lehren, unter dem Gesichtspunkt des kybernetischen Ansatzes, hat sich an dem programmierten Lernen der instrumentellen Konditionierung orientiert. Im Unterschied zum behavioristischen Ansatz steht hier die Verstärkung im Vordergrund, sondern die Darbietung der Information. Der Grundgedanke dabei ist, dass eine passend aufbereitete Information, die häufig angeboten wird, schneller im Gedächtnis verankert wird und somit leichter erinnert werden kann. Die dabei zu untersuchende Frage ist, welche Information wie und wie lange dargeboten werden muss, damit in gegebener Lernzeit ein optimaler Lernerfolg stattfindet.

Aus dieser Überlegung leitete sich dann die w-t-Didaktik (siehe zum Beispiel [Fra71]) ab. Bei dieser Didaktik geht es darum, die Information in sog. Basalwörter (w) zu zergliedern und diese optimal anzuordnen und in der verfügbaren Zeit (t) zu wiederholen. Auf diese Weise ist es möglich die Lehrfunktion auf ein technisches Medium zu übertragen. Bei der Übertragung von Lehr-Lernprozessen auf einen Rechner ist aber immer zu berücksichtigen, dass es zu grundsätzlichen Veränderungen kommen kann. So fällt z.B. die Körpersprache des Lehrers weg, wenn die Information nicht mehr durch den Lehrer sondern über den Rechner vermittelt wird.

Zu Beginn der Entwicklung (sechziger bis siebziger Jahre) war man davon überzeugt, dass diese Art des Lehrens effektiver sei und zu geringerem Personalaufwand führen würde. Dieses konnte bis heute nicht bestätigt werden. Allenfalls kann das Programmierte-Lernen als ein weiteres Medium im gesamten Lehr-Lernkontext angesehen werden.

2.2.2 Kognitiver Ansatz

Der kognitive Ansatz geht davon aus, dass jede Wahrnehmung eine aktive Konstruktionsleistung der Person ist. Informationsaufnahme ist demnach kein passiver Prozess, sondern wird aktiv vom Organismus gesteuert.

Die Steuerung der Wahrnehmung erfolgt auf zwei unterschiedliche Arten: Erstens aus der Richtung der eingehenden Information, den sog. „bottom up“ Prozessen, und zweitens aus den schon vorhandenen Informationen, den „top down“ Prozessen.

Bei den „bottom up“ Prozessen bildet ein Sensor die Umwelt auf einen anderen Sensor ab, zum Beispiel das Auge ein Bild auf die Netzhaut. Bei diesem Prozess findet schon eine Datenreduzierung zur Verstärkung der Konturschärfe statt. Im nächsten Schritt werden die verschiedene wahrgenommen Linien und Winkel zu einem oder verschiedenen geometrischen Objekten zusammengesetzt, so wird z.B. ein an der Wand hängendes Bild als einfaches Rechteck angesehen, auch wenn dieses mit der Perspektive nicht übereinstimmt. Im letzten Schritt des „bottom up“ Prozesses erfolgt eine Mustererkennung. Nun wird das zuvor erwähnte Rechteck als Bild wahrgenommen und einer Position im Raum zugeordnet.

Die „top down“ Prozesse liefern die Motivation und das Wissen, um die Mustererkennung vollziehen zu können. Dabei ist die jeweilige Erwartungshaltung an die eingehende Information von großer Bedeutung bei der Bewertung.

Anders als im Behaviorismus interessiert bei diesem Ansatz nicht die Veränderung des Verhaltens, es ist vielmehr so, dass diese Änderung durch eine Veränderung der internen kognitiven Strukturen und Prozesse hervorgerufen wird. Entscheidend ist also,wie die Lernenden den zu lernenden Inhalt wahrnehmen und kognitiv verarbeiten. Somit muss der Inhalt optimal für diese Wahrnehmung aufbereitet werden.

Die Grundannahme der kognitiven Ansätze ist, dass sich das Lehren zuerst an der Art der zu vermittelnden Inhalte orientieren muss. Aus diesem Grund ist die Klassifikation und Analyse von Lehrinhalten Ausgangspunkt der kognitiven Ansätze. Festgestellt wurde, dass verschiedene Arten von Lehr-Lerninhalten in unterschiedlichen Subsystemen des Gedächtnisses gespeichert werden. Aus diesem Grund müssen andere Verarbeitungsprozesse angeregt werden, um die jeweilige Information dauerhaft zu speichern. Das Wissen kann dabei in deklaratives, prozedurales und kontextuelles Wissen unterteilt werden. Diese Wisseneinteilung kann wie folgt erklären werden (vgl. [Ker01]).

Deklaratives Wissen beinhaltet Fakten und Begriffe, die hinsichtlich ihres Abstraktionsgrades geordnet werden können. Als Faktenwissen bezieht es sich auf konkrete Einzelheiten, Ereignisse, Fälle oder es handelt sich um abstrakte Begriffe oder Konzepte.
Prozedurales Wissen bezieht sich entweder auf eine eher spezifische Fertigkeit in einem Fachgebiet („Domäne“) oder auf mehr oder weniger allgemeine metakognitive Strategien.
Kontextuelles Wissen erstreckt sich von der analogen Repräsentation einzelner Episoden hin zu einer geankerten Form der Repräsentation, bei der die konkrete Episode mit abstrakten Konzepten verknüpft ist.
Zur Einteilung in diese Wissensbereiche siehe zum Beispiel bei J.R. Anderson [And88].

Damit Wissen optimal gespeichert werden kann, müssen bei der Aufbereitung der Information folgende Fragen berücksichtigt werden: Welches Wissen ist notwendig, um die Information zu aufzunehmen? Können bestimmte Faktoren das Lernen begünstigen? Wie soll die Information dargestellt sein, damit sie besser behalten und besser erinnert werden kann?

Das Modell der Supplantation von Salomon [Sal79] berücksichtigt das rechnergestützte Lernen im Sinne des kognitiven Ansatzes. Dieser Ansatz untergliedert sich in drei Schritte, die im Folgenden erläutert werden.

- Ausgangspunkt dieser Theorie ist der Versuch, kognitive Prozesse des Lernens zu entdecken und diese auf dem Rechner abzubilden. Indem der Prozess vorgeführt wird und der Lernende diesen verfolgen kann, modelliert der Rechner diese kognitive Operation. Dem Lernenden wird also vorgeführt, wie er denken soll, indem sein Vorstellungs- und Interpretationsprozess unterstützt wird.

- Im zweiten Schritt wird nicht mehr der gesamte Prozess vorgeführt, sondern nur die Aufgabe und die Lösung; es wird sozusagen eine Abkürzung genommen. Der Lernende muss nun selber den kognitiven Prozess durchführen, weiss aber wie dieser enden soll.
- In der letzten Phase, der Aktivierung, erhält der Lernende nur noch die Aufgabenstellung; Lösung und Lösungsweg müssen selbst gefunden werden.
- Durch das stufenweise Ausblenden übernimmt der Lernende zunehmend mehr Kodierungs- und Verarbeitungsaktivitäten, bis er nachher selbstständig ist.

Das Problem dieses Ansatzes ist der Mangel an kognitionspsychologischen Erkenntnissen, die abgebildet werden können. Außerdem interpretiert jeder Lernende die aufbereitete Information andersartig, weil unterschiedliche Voraussetzungen und Erwartungen den „top down“ Prozess verändern. Dies kann behoben werden, indem die Information nicht starr dargeboten, sondern betreut vermittelt wird. Somit können Fragen geklärt und unterschiedliche Interpretationen erklärt werden. Zum Beispiel kann dies kann die Rolle eines Betreuers beim Praktikum sein.

2.2.3 Situiertes Lernen

Situiertes Lernen wird grundsätzlich aus der Sicht des sozialen Kontextes gesehen, also nicht als Resultat von Entscheidungs- und Verarbeitungsprozessen eines isolierten Individuums. Mit dieser Einbettung in die jeweilige Situation, die die Rückkoppelung der Handlung miteinbezieht, scheint eine Nähe zum Behaviorismus zu bestehen. Anders als bei diesem wird hier jedoch die Relevanz symbolischer Interaktion betont. Es bedeutet, dass Finden, Kommunizieren und Aushandeln von Bedeutungen sowie die Suche nach Ordnungsstrukturen und Sinnhaftigkeit grundsätzlich Merkmale menschlichen Handels sind und dadurch im Mittelpunkt des Lehr-Lernprozesses stehen. Die Interaktion zwischen den Kommunikationspartnern wird somit zu einer zentralen Kategorie.

Eine Untersuchung über die Organisation von Wissensbeständen bei Experten und Anfängern [Lav91a] ergab einen Unterschied darin, wie Wissen auf Situationen angewendet wird. Während Novizen nur über partielle Modelle zur Wissensanwendung auf Situationen verfügen, besitzen Experten Modelle zur Problemlösung und können damit Probleme effektiver lösen.

Eine Untersuchung von Collins et al. (siehe [Col89]) zeigte sogar, dass das Wissen von Experten stark an Situationen gebunden ist. Das bedeutet, dass das Wissen nicht als „generische Strategie“ abgespeichert ist. Die Autoren folgerten daraus, dass wenn möglich Wissen nicht abstrakt sondern in möglichst authentischen Situationen vermittelt werden soll.

Betrachtet man diese Erkenntnis unter dem Gesichtspunkt der Prozessschritte des vorherigen Abschnittes (Modellierung, Abkürzung, Aktivierung) so bedeutet dies folgendes:

- Zuerst soll ein Experte die jeweilige Situation vorstellen und dabei seine Gedanken formulieren (Modellierung).
- Dann folgt die Phase der Begleitung. Dabei unterstützt der Experte den Lernenden bei der Durchführung und Einübung einer Aufgabe.
- In der dritten Phase bearbeiten Experte und Lernender die Situation sofort gemeinsam. Die Kommentare und Ratschläge des Experten sollen auf diese Weise zunehmend weniger werden (Einrüstung).
- Im vorletzten Schritt, der Artikulation, formuliert der Lernende nun seine Gedanken während der Durchführung.
- In der abschließenden Reflexion soll der Lernende den Problemlösungsprozess des Experten mit seinem eigenen vergleichen.

Die dabei bearbeiteten Aufgaben sollen zunehmend komplexer, unterschiedlicher und spezieller werden. So soll erreicht werden, dass das erlernte Wissen auf unterschiedliche Situationen angewendet werden kann.

2.3 Erfahrungen mit rechnergestütztem Lernen

2.3.1 Aufzeichnung von realen Experimenten

Abfilmen von Experimenten

Die erste Möglichkeit reale Experimente „abzuspeichern" war, diese Experimente mit der Filmkamera aufzuzeichnen. Diese Filme konnten dann zu beliebigen Zeitpunkten und Orten wieder abgespielt werden.
Ende der siebziger Jahre zeichnete Michael J. Higatsberger 713 verschiedene Experimente durch Abfilmen auf [Hig77]. Viele dieser Experimente waren zu damaliger Zeit technisch zu schwierig oder zu aufwendig, als dass Schüler diese Experimente selber hätten durchführen können. Auch waren diese Experimente für Demonstrations-Experimente in der Schule zu aufwendig. Higatsberger wollte durch das Zeigen der Experimente verdeutlichen, dass keine Theorie ohne Überprüfung durch eine Messung bestehen kann. Außerdem wollte er den Zusammenhang zwischen dem Experiment und der daraus folgenden Mathematisierung verdeutlichen. Aus diesem Grund wurden diese 713 Experimente in einem Buch erläutert (siehe [Hig77]).

Ein großer Nachteil dieser Art der Abspeicherung war, dass die Experimente auf Filmspulen abgespeichert waren. Es gab also keinen direkten Zugriff auf ein Experiment, auch wenn die 713 Versuche sich auf sechs Filmspulen verteilten. Desweiteren konnten Parameter nicht verändert werden. Dadurch war es nicht möglich, eigene Ideen in das Experiment einzubringen. Weiterhin wurden in den Versuchen nicht alle Abhängigkeiten untersucht, somit konnte nur das beobachtet werden, was vorher für wichtig erachtet worden war und aus diesem Grund aufgezeichnet wurde.

Diese abgefilmten Experimente waren auch schon multimedial aufbereitet, da die Experimente nicht nur abgefilmt, sondern auch auditiv erklärt wurden.

Interaktive Bildschirmexperimente

Ein Interaktives Bildschirmexperiment (IBE) ist ein Programm, welches ein reales Experiment auf den Bildschirm abbildet. Es wurde 1996 von Jürgen Kirstein [Kir99] an der TU Berlin entwickelt. Bei dieser Art von Experimenten kann man mit Hilfe des Mausanzeigers die gleichen Einstellungen an den Messgeräten einstellen, wie es in der Realität möglich ist und erhält die gleichen Ergebnisse. Dies wird erreicht, indem die einzelnen Phasen des realen Experimentes vorher fotografiert und digitalisiert werden. Mit Hilfe einer Software werden die einzelnen Bilder zueinander in Beziehung gesetzt. Somit erscheinen die einzelnen Bilder als reale Manipulation des Experimentes.

Ein IBE basiert somit auf realen Experiment. Gegenüber Simulationen besitzt es den Vorteil, dass es nicht auf mathematische Modelle angewiesen ist, sondern reale Daten gebraucht. Gegenüber dem Realfilm, wie er im vorherigen Abschnitt beschrieben wurde, hat das IBE den Vorteil, dass man das Experiment selbst manipulieren kann und nicht nur ein passiver Zuschauer bleibt.

Der Nachteil bei dieser Art von Experimenten ist aber, dass alle Einstellungen, die ein Benutzer später einstellen möchte, vorher schon aufgenommen werden müssen. Es fungiert also als eine Art Konserve der Wirklichkeit. Es muss bereits im Vorhinein überlegt werden, was einen Anwender interessieren könnte, und diese Einstellungen müssen dann aufgenommen werden. Der Nachteil ist demzufolge, dass allzu kreative Benutzer, die experimentieren und auch mal sinnlose Einstellungen ausprobieren wollen sich eingeschränkt fühlen. Da aber IBEs üblicherweise nicht als eigenständige Experimente in einem Praktikum angeboten werden, sondern als Vorbereitung auf ein reales Experiment dienen, ist diese Einschränkung nicht von großem Nachteil, da das reale Experiment später noch bearbeitet wird.

2.3.2 Rechnereinsatz im naturwissenschaftlichen Praktikum

Messwerterfassung mit Hilfe des Computers

Als grundlegende Form des rechnergestützten Lernens im Praktikum kann das Aufnehmen von Messdaten mit Hilfe des Rechners gelten. Die automatische Messwerterfassung (MBL[1]) hat den Vorteil, dass physikalische Vorgänge zeitnah in sich entwickelnden Graphen dargestellt werden können. Außerdem können die aufgenommenen Daten sofort weiterverarbeitet werden. Das bietet die Möglichkeit, die Daten nicht nur auf traditionelle Art auszuwerten, sondern auch mit Hilfe des Rechners. Desweiteren können neue Versuchsteile entwickelt werden, die auf den ausgewerteten Daten aufbauen. Dazu ist Zeit, da die MBLs zu einem Zeitgewinn gegenüber der traditionellen Messwertaufnahme führen.

Die Messwertaufnahme mit Hilfe des Rechners entlastet die Praktikanten, somit können sie sich besser auf den physikalischen Inhalt des Experimentes konzentrieren. Dies sollte dazu führen, dass die Studenten bessere Leistungen zeigen.
Die Forschungsergebnisse in diesem Bereich zeigen aber widersprüchliche Ergebnisse. Es konnte von E.F. Redish gezeigt werden [Red97], dass in der Kinematik durch den Einsatz von MBL das physikalische Verständnis der Praktikanten gesteigert werden konnte. Begründet wird dieser Effekt durch die unmittelbare Verknüpfung von realen physikalischen Abläufen mit abstrakten Symbolsystemen. Weiterhin wurde gezeigt, dass Praktikanten, die mit MBL arbeiteten, Graphen besser interpretieren konnten. So verstehen Schüler entstehende Graphen nicht mehr als statisches Bild, sondern als dynamische Relation [Lin87].
Auf der anderen Seite konnte in der Arbeit von L. Hucke [Huc99] gezeigt werden, dass eine Messwerterfassung mit Hilfe des Rechners das physikalische Verständnis der Studenten nicht förderte. Somit ist die Präsentation der aufgenommenen Messdaten von großer Wichtigkeit für die Förderung des Lernerfolges.

Einsatz von Simulationen

Der Rechnereinsatz im Praktikum kann dazu genutzt werden, dass die Studenten nicht nur Messungen durchführen, sondern auch Simulationen bearbeiten. Dieses ist das zweite große Gebiet, in dem Rechner im Praktikum eingesetzt werden. Dieser Einsatz erfolgt nicht immer als eigenständiges Experiment, sondern dient teilweise als Vor- oder Nachbereitung von realen Praktikumsexperimenten.

Über den Lernerfolg solcher Simulationen gibt es unterschiedliche Ergebnisse. Einige Evaluationen, die Simulationen mit realen Experimenten vergleichen, sehen einen größeren Lernenerfolg bei den Praktikanten, welche die Simulation durchführten. Andere Untersuchungen können diese Ergebnisse nicht bestätigen. Ein kurzer unkommentierter Überblick über den derzeitigen Stand der Forschung ist zum Beispiel

[1] Microcomputer Based Laboratory

bei R. Schulmeister [Sch02] gegeben.
Fasst man diese Ergebnisse zusammen, so kann man sagen, dass nicht jedes Experiment durch eine Simulation sinnvoll ersetzt werden kann. Werden aber Simulationen dazu eingesetzt, abstrakte Größen zu veranschaulichen, so ist ein positiver Effekt zu sehen, sofern die Simulationen verständlich und übersichtlich aufgebaut sind.

Kapitel 3

Aufbau der Evaluation

In diesem Kapitel wird der Aufbau der durchgeführten Untersuchung umrissen. Dabei werden zuerst die Rahmenbedingungen vorgestellt, in die diese Arbeit eingebettet ist. Die sich daraus ergebenden Vorgehensweisen werden im Anschluss daran erörtert. Im dritten Teil dieses Kapitels werden die Voraussetzungen für die Entwicklung der Experimente dargestellt. Der letzte Teil dieses Kapitels beschäftigt sich mit der Ermittelung des Lernerfolges anhand eines Fragebogens. Hier wird diskutiert was und zu welchen Zeitpunkten mit dem Fragebogen untersucht worden ist.

Rahmenbedingungen der Evaluation

Diese Untersuchung ist Teil des vom BMBF[1] geförderten Forschungsprojektes „Physik 2000 – Neue Medien im Universitätsverbund für ein forschungsorientiertes Studium". Ziel dieses Projektes ist es, verschiedene Arten von Lehrveranstaltungen (Vorlesungen, Seminare, Praktikumsexperimente) über das Internet für Studenten der Physik im Hauptstudium anzubieten (vgl. Kapitel (1)).
Hier stellt sich die Frage, wie sich der Lernerfolg der Studenten, die die Veranstaltung über das Internet besuchen, im Vergleich zu den Studenten, die die Veranstaltung vor Ort besuchen, verhält. Die Untersuchung dieser Fragestellung soll Auskunft darüber geben, ob es aus der Sicht des Lernerfolges überhaupt sinnvoll ist, Lehre über das Internet anzubieten.

Hintergrund dieses Forschungsprojektes ist es, die Auswahl an Spezial-Vorlesungen, Seminaren und Praktikumsexperimenten für die Studenten zu vergrößern. Unter diesem Aspekt soll jede der beteiligen Universitäten (Berlin, Bonn, Dortmund, Jena, Rostock, Siegen) ein oder mehrere Experimente vor Ort entwickeln, die dann über das Internet durchgeführt und betreut werden können.

[1] Bundesministerium für Bildung und Forschung

Zu Beginn dieses Projektes (April 2001) war die Anzahl der Physik-Studenten im Fortgeschrittenen-Praktikum (F-Praktikum) an den einzelnen Universitäten so gering, dass die Anzahl der Studenten, die das Experiment hätte durchführen können für einen Lernerfolgsvergleich zu gering war. Aus diesem Grund war es notwendig den Lernerfolgsvergleich stattdessen in einem Anfänger-Praktikum durchzuführen.
Das Ziel des Projektes ist, dass die Experimente von Studenten verschiedener Universitäten mit unterschiedlichen Voraussetzungen durchgeführt werden. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, die Untersuchung des Lernerfolges an verschiedenen Universitäten durchzuführen. Um die Aussagen der Untersuchung allgemein zu halten, werden bei der Untersuchung auch verschiedene Nebenfachpraktika mitberücksichtigt.

Fasst man die obigen Bedingungen zusammen, so soll der Lernerfolg eines realen rechnergestützten Experimentes, welches über das Internet durchgeführt und betreut wird, mit dem Lernerfolg eines traditionellen Experimentes, welches vor Ort betreut wird, verglichen werden. Da zur Zeit die Anzahl der Physik-Studenten im Hauptstudium für diese Art von Vergleich zu gering ist, wurde die Untersuchung in verschiedenen Anfängerpraktika durchgeführt.

Aufbau der Untersuchung

Bei dem Vergleich zwischen einem rechnergestützten Experiment, welches über das Internet betreut wird, und einem traditionellen Experiment, welches vor Ort betreut wird, werden zwei Parameter verändert. Somit kann keine Aussage darüber getroffen werden, wie die einzelnen Parameter auf den Lernerfolg der Praktikanten wirken. Aus diesem Grund wird nicht sofort der Lernerfolg zwischen diesen beiden Extremen verglichen, sondern es wird ein zusätzlicher Vergleich eingebaut (siehe Abbildung (3.1)).

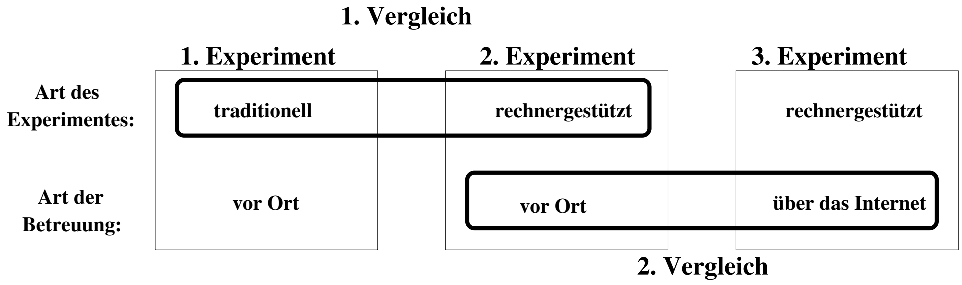


Abbildung 3.1: Aufbau der Untersuchung. Im ersten Vergleich wird der Lernerfolg in Abhängigkeit von der Art des Experimentes betrachtet. Der zweite Vergleich untersucht den Lernerfolg in Abhängigkeit von der Betreuung.

Beim ersten Vergleich soll der Lernerfolg in Abhängigkeit von der Art des Experimentes untersucht werden. Dabei werden das rechnergestützte und das traditionelle Experiment wie üblich vor Ort betreut.
Der zweite Vergleich untersucht die Abhängigkeit des Lernerfolges von der Art der

Betreuung. In diesem Fall wird das rechnergestützte Experiment zum einen vor Ort und zum anderen über das Internet betreut.

Somit sollen bei dieser Untersuchung zwei Fragen beantwortet werden:
1. Ist die Entwicklung des Lernerfolges abhängig von der Art des Experimentes?
2. Ist die Entwicklung des Lernerfolges abhängig von der Art der Betreuung?

Um diese beiden Fragen zu beantworten, muss zuvor ein rechnergestütztes Experiment entwickelt werden. Welchen Kriterien bei der Entwicklung berücksichtigt wurden, soll im Folgenden diskutiert werden.

Aspekte der Experimententwicklung

Das in dieser Arbeit evaluierte rechnergestützte Experiment ist unter verschiedenen Aspekten entwickelt worden. Die einzelnen Aspekte werden im folgenden Abschnitt erörtert.

Bei der Entwicklung eines rechnergestützten Experimentes bietet es sich an, das Experiment in verschiedene Module zu zerlegen. Eine mögliche Modularisierung könnte so aussehen, dass ein Programm die Messdaten aufnimmt und ein anderes diese Messdaten auswertet. Bei dieser Modularisierung des Experimentes bietet es sich an, das Experiment nach den Gesichtpunkten der kybernetischen Lerntheorie zu entwickeln (vgl. Abschnitt (2.2.1)). Das bedeutet, dass jedes einzelne Modul des Experimentes so lange durchlaufen werden muss, bis der gewünschte Lernerfolg erreicht ist, zum Beispiel bis die Auswertung korrekt ist. Nach jedem Durchlauf erhält der Praktikant eine Rückkoppelung über seinen Erfolg und eine Hilfestellung, um das Lernziel zu erreichen. Ist ein Modul abgearbeitet und verstanden, wird das nächste Modul bearbeitet.

Wie in Kapitel (2.3.2) beschrieben, besitzt ein rechnergestütztes Experiment den Vorteil, dass weniger Zeit für den Aufbau des Experimentes und die Aufnahme der Messdaten benötigt wird, und somit mehr Zeit zur Verfügung steht sich mit dem physikalischen Inhalt auseinander zu setzten. Aus diesem Grund bietet es sich an, ein Experiment zu entwickeln, bei dem die zugehörige Theorie vergleichsweise anspruchsvoll ist. Somit haben die Praktikanten mehr Zeit mit Hilfe der einzelnen Aufgaben die Theorie des Experimentes und das Phänomen zu verstehen.
Auf dem Rechnerbildschirm können nur zweidimensionale Bilder wiedergegeben werden. Das Experiment selber kann aber nicht angefasst werden. Daher bietet sich bei der Entwicklung eines rechnergestützten Experimentes ein vergleichsweise statischer Aufbau des Experimentes an. Somit gehen wenig Information durch die Zweidimensionalität des Bildes verloren. Der messtechnische Aufbau des Experimentes tritt bei dieser Art von Experiment somit in den Hintergrund und es reicht aus, diesen Aufbau als statisches Bild in der Anleitung zu dem Experiment zu erklären.

Ein Vorteil von rechnergestützten Experimenten ist, dass die Studenten die Entwicklung der Messkurven direkt sehen können (vgl. [Tho92]). Aus diesem Grund wurde dieses auch bei dem neu entwickelten Experiment bei der Messdatennahme berücksichtigt.
Desweiteren wurde zusätzlich die Simulation genutzt. Dadurch diese können die Studenten sehen, wie der Kurvenverlauf von den einzelnen Parametern abhängt, und die Abhängigkeiten der einzelnen Parameter können sichtbar gemacht werden.

Entwickelt man ein rechnergestütztes Experiment unter der Berücksichtigung der diskutierten Aspekte, so fällt es schwer, ein bestehendes traditionelles Experiment zu finden, welches mit dem neu entwickelten Experiment inhaltlich vergleichbar ist. Aus diesem Grund wurde zusätzlich ein „neues“ traditionelles Experiment entwickelt, welches denselben physikalischen Inhalt bearbeitet.

In einem Praktikum ist es wichtig, dass Studenten und Betreuer gut miteinander kommunizieren können, weil nur so ein guter Wissens- und Informationstransfer erreicht wird. Aus diesem Grund ist es erforderlich, dass bei der Betreuung des rechnergestützten Experimentes über das Internet Studenten und Betreuer sich sehen und miteinander sprechen können.
Ferner muss bei dieser Art der Betreuung gewährleistet sein, dass der Betreuer sieht, was die Studenten aktuell bearbeiten. Nur so kann er verfolgen, welchen Teilaspekt die Praktikanten gerade bearbeiten und ob sie vielleicht Hilfe benötigen.

Ein weiterer Punkt bei der Entwicklung der Experimente ist die Bearbeitungszeit der Experimente, die den zeitlichen Rahmen, den das Praktikum liefert, nicht überschreiten darf.

Wie die hier vorgestellten Aspekte bei der Entwicklung der Experimente berücksichtigt wurden, wird in Kapitel (4) diskutiert.

Ziel der Fragebogenuntersuchung

Im vorherigen Abschnitt wurde beschrieben, dass der Bearbeitungszeitraum der Experimente von der Praktikumsdauer begrenzt wird. Dadurch ergibt sich, dass beide Experimente die gleiche Bearbeitungszeit haben müssen, und der Lernerfolg somit bei annähernd gleicher Bearbeitungszeit ermittelt wird.

Der Lernerfolg der Praktikanten soll mit Hilfe eines Fragebogens ermittelt werden. Das Thema der einzelnen Fragen beziehen sich dabei auf den im Experiment behandelten physikalischen Inhalt. Untersucht wird also, ob die Praktikanten durch das Experiment mehr über den physikalischen Hintergrund des behandelten Themas wissen. Dazu sollen in dem Fragebogen Fragen zur Theorie des Experimentes, zum Aufbau einzelner Experimentteile und zum Verständnis der behandelten Messgraphiken enthalten sein. Der Fragebogen zielt weder darauf ab, die Medienkompetenz zu ermitteln, noch soll die Fähigkeit der Praktikanten, ein Experiment „von Hand“ aufzubauen, analysiert werden.

Bei dieser Arbeit soll nicht nur der Wissenszuwachs während des Experimentes untersucht werden, sondern es soll auch überprüft werden, wie gut und langfristig das gewonnene Wissen „memoriert“ werden konnte. Aus diesem Grund erhalten die Praktikanten zu drei Zeitpunkten jeweils einen Fragebogen: direkt vor dem Experiment, direkt nach dem Experiment und am Ende des Praktikums.
Der Fragebogen vor dem Experiment wird nach der eigenständigen Bearbeitung der Anleitung zum Experiment ausgefüllt, aber noch vor dem Eingangstest zum Experiment.

Die Entwicklung des Fragebogens nach den hier vorgestellten Kriterien wird in Kapitel (5) behandelt. Der Fragebogen selber ist im Abhang (C) nachzulesen.

Kapitel 4

Entwicklung und Realisierung der Experimente

Im folgenden Kapitel wird die Entwicklung der beiden Anfänger-Praktikumsexperimente diskutiert. Zu Beginn werden die Bedingungen für die Experimentprogramme diskutiert. Im Anschluss daran werden die Grundvoraussetzungen, die den Experimenten zugrunde liegen, erörtert. In den folgenden Abschnitten werden die Experimente mit ihren Versuchsaufbauten, Inhalten und Lernzielen vorgestellt. Die unterschiedlichen Betreuungsarten werden erst in Abschnitt (6.2) betrachtet.

4.1 Entwicklung der Experiment-Programme

In diesem Abschnitt sind die Bedingungen dargestellt, die bei der Entwicklung der Experimentprogramme berücksichtigt worden sind. Hierbei stehen didaktische Aspekte und die Benutzerfreundlichkeit im Vordergrund, technische Aspekte werden nur am Rande betrachtet.

Während des Experimentes sollen verschiedene Messungen durchgeführt werden, welche in der Praktikumszeit außerdem ausgewertet werden sollen (zum Inhalt des Experimentes siehe Abschnitt (4.3.2) und Anhang (A)). Außerdem sollen neben den Messungen auch simulierte Daten genommen werden.

Die Praktikanten müssen während des Experimentes den Überblick über ihre Tätigkeit behalten. Aus diesem Grund soll für jede Art der Messung, Auswertung und Simulation ein eigenes Programm entwickelt werden. So wissen die Praktikanten, was sie gerade bearbeiten und verlieren nicht durch Unterprogramme den Überblick.

Die unterschiedlichen Programme müssen untereinander Wiedererkennungseffekte besitzen. Ist dies nicht der Fall, so müssten sich die Praktikanten immer wieder neu an eine neue Lernumgebung gewöhnen. Dieses würde die Effektivität des Lernens behindern und nicht fördern.

Bei der Programmentwicklung ist außerdem darauf geachtet worden, dass die Praktikanten bei der Bearbeitung der Experimente alle Daten auf dem Bildschirm sehen können und somit nicht „scrollen“ müssen. Dadurch können Verknüpfungen zwischen einzelnen Parametern getroffen werden.

4.2 Rahmenbedingungen für das Experiment

4.2.1 Grundvoraussetzungen

Zeitliche Voraussetzungen

Diese Evaluation findet im Rahmen des Projektes „Physik 2000 —- Neue Medien im Universitätsverbund für ein forschungsorientiertes Studium “statt. Dieses Projekt hat sich als Ziel gesetzt, die Lehre an den beteiligten Universitäten (HU Berlin, Bonn, Dortmund, Jena, Rostock, Siegen) in Physik verstärkt über das Internet anzubieten. Dazu sollen Spezialvorlesungen, Seminare und Praktikumsversuche für das Fortgeschrittenen-Praktikum über das Internet angeboten und betreut werden. Dieser Weg wurde eingeschlagen, um die Auswahl an interessanten Vorlesungen, Seminaren und Experimenten für die Studenten zu vergrößern und die angebotenen Veranstaltungen besser auszulasten. Dabei sollen diese Veranstaltungen die traditionellen nicht ersetzen, sondern ergänzen.

Die Studentenzahlen in Physik, besonders im Hauptstudium, sind zur Zeit sehr gering; im Dortmunder F-Praktikum werden im WS 03/04 zur Zeit ca. 12 Studenten betreut. Eine Evaluation eines F-Praktikum Experimentes wäre in solch einem Fall sehr langwierig oder hätte eine geringe Statistik, zumal nicht alle Studenten ein angebotenes Experiment durchführen müssen und so die Zahl der Versuchspersonen weiter sinkt. In Dortmund müssen die Studenten aus 24 Experimenten je nach Schwierigkeit 8 bis 10 auswählen. Eine lange Evaluationszeit geht aber aus Projektsicht nicht, da das Projekt bis September 2004 (zu Beginn der Arbeit (September 2001) bis April 2004) befristet ist. Bis dahin sollten erste Erkenntnisse bereits erworben worden sein.

Für diese Arbeit wurden zwei A-Praktikum-Experimente entwickelt und evaluiert; ein rechnergestütztes Experiment, welches vor Ort oder über das Internet betreut werden kann und ein traditionelles mit ähnlichen Inhalt das vor Ort betreut und durchgeführt wird. Diese Evaluation soll als Voruntersuchung dienen. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse sollen genutzt werden, um für das Projekt ein Fortgeschrittenen-Praktikums Experiment zu entwickeln. Näheres dazu siehe Kapitel (9).

Verschiedene Fachrichtungen und Universitäten

Die Aussagen dieser Arbeit sollen sich nicht nur auf Physikstudierende beziehen, sondern sollen allgemeiner gehalten sein. Daher ist das Experiment nicht nur im

Praktikum von Physikstudierenden eingesetzt worden, sondern auch in Praktika für Studierende, die Physik als Nebenfach belegen. Somit wurde das hier untersuchte Experiment im Anfänger Physikpraktikum für Physiker, Chemiker, Chemie- und Biotechniker, Biologen und Mediziner durchgeführt. Die Untersuchung von Studierenden verschiedener Fachrichtungen hat zur Folge, dass die Studenten mit teilweise unterschiedlicher Motivation an ein Praktikumsexperiment herangehen. Aus diesem Grund sollte das Experiment so gestaltet sein, dass es die wichtigen Grundkenntnisse gut vermitteln kann, aber auch Möglichkeiten zur Vertiefung und zum weiteren Ausprobieren liefert.

Die Untersuchung beschränkt sich nicht auf eine einzige Universität, da sonst einzelne Vorlesungen von Professoren, die zum Beispiel die Praktikanten überdurchschnittlich motivieren, einen relativ großen Einfluss auf die Aussagen der Arbeit haben könnten. Desweiteren kann so eine Beeinflussung durch den jeweiligen Praktikumsleiter verringert werden. Ein für das Experimente am Rechner sehr positiv eingestellter Praktikumsleiter könnte die Praktikanten beeinflussen und somit die Aussagen verfälschen. Deshalb wurde bei der Wahl der Durchführungsorte darauf geachtet, dass der Praktikumsleiter eine relativ neutrale Einstellung zu den Experimenten hatte. Die Experimente wurden an den Universitäten Dortmund, Bochum, Wuppertal und Jena durchgeführt.

Eine Erhöhung der Statistik ist ein weiterer Vorteil der Evaluation des Experimentes an verschiedenen Universitäten in unterschiedlichen A-Praktika. Diese kann zu einer stärkeren Aussagekraft der Ergebnisse führen. Der Nachteil ist, dass nicht nur eine Klientel in einem Praktikum untersucht wird, so dass Studienrichtungs- und Voraussetzungseffekte die eigentlichen Aussagen überlagern können. Aus diesem Grund wird nicht nur eine Gesamtaussage für alle Versuchspersonen getroffen, sondern die einzelnen Studienrichtungen werden gesondert betrachtet (siehe Abschnitt (7.3.2)).

Transportabilität

In Kapitel (3) wurde schon erwähnt, dass bei dieser Evaluation das rechnergestützte Experiment evaluiert werden soll, indem es in der Betreuung vor Ort mit einem ähnlichen traditionellen Experiment verglichen werden soll. Im zweiten Schritt soll dann erst die Betreuung des rechnergestützten Experimentes über das Internet mit dem Ergebnis dieser Untersuchung verglichen werden.

Das Experiment soll vor Ort an verschiedenen Universitäten betreut werden, daher muss es transportabel sein. An den verschiedenen Universitäten ist der Platz in den Praktikumsräumen begrenzt, somit muss das Experiment im Aufbau auch relativ kompakt sein. Weiterhin dürfen keine radioaktiven Quellen verwendet werden, da diese Sicherheits- und Transportbedingungen unterliegen.

4.2.2 Anfängerpraktikum

Technische Voraussetzungen

Das Anfängerpraktikum (A-Praktikum) wird je nach Universität und Fachrichtung innerhalb der ersten vier Semester angeboten. Das niedrigste Semester bei dieser Arbeit waren das Physikpraktium für Biologen in Bochum im 1. Semester. Das Praktikum mit dem höchsten Semester war für Physiker in Dortmund, die das Experiment im 4. Semester absolvierten. Aus diesen unterschiedlichen Semesterzahlen ist zu erkennen, dass Studenten mit sehr unterschiedlichen Voraussetzungen die Praktika bestritten haben.

Die unterschiedlichen Voraussetzungen der jeweiligen Praktikumsgruppen wurden bei den Versuchsanleitungen, sowie bei der Aufgabenstellung mit berücksichtigt. Die Versuchsanleitung ist für alle Praktika identisch und so ausführlich, dass auch Erstsemester sie verstehen können. Die Aufgabenstellung ist so gewählt worden, dass sie die Physiker mit sehr wenig Hilfestellung allein bewältigen konnten; bei den anderen Praktika wurde je nach Leistungsstärke der Nebenfachstudenten die Betreuung für die Studenten angepasst.

Bei den verschiedenen A-Praktika existieren unterschiedliche Arten der Auswertung der Experimente. In den Nebenfachpraktika der Biologie, der Medizin und der Chemitechnik müssen alle Daten vor Ort ausgewertet werden und es braucht kein ausführliches schriftliches Protokoll angefertigt werden. Bei dem Praktikum der Physiker und der Chemiker sollen die Messdaten außerhalb des Praktikums ausgewertet werden und es muss ein ausführliches schriftliches Protokoll zu dem Experiment angefertigt werden. Diese Unterschiede wurden insofern angeglichen, dass alle Studenten die komplette Auswertung vor Ort zu absolvieren hatten.

Die Zeit, die den Studenten für die Bearbeitung der Experimente eingeräumt wurde, war in allen A-Praktika identisch und betrug zwischen drei und vier Stunden.

Motivation des physikalischen Inhaltes

Bei diesem Experiment werden Kennlinien von pn-Übergängen (Dioden) behandelt. Dieses Thema wurde gewählt, da es in allen A-Praktika vertreten ist. Auch wird der zugehörige theoretische Hintergrund gleich nach der Mechanik in den Vorlesungen behandelt. Da die Mechanik eher behandelt wird, könnte man meinen, dass dieses Thema sich besser eignen würde. Für ein traditionelles Experiment könnte dieses stimmen, aber hier wurde ein rechnergestütztes Experiment, welches letztendlich über das Internet durchgeführt und betreut werden sollte, aufgebaut. Bei rechnergestützten Experimenten die über das Internet betrieben und betreut werden, kann die Praktikumsgruppe das Experiment während der Durchführung nicht selber aufbauen. Außerdem ist die Übertragung von bewegten Objekten mittels Web-Kamera, wie sie bei Mechanikexperimenten nötig wäre, unzureichend bis teilweise unmöglich. Somit bieten Elektrodynamikexperimente einen besseren Anwendungsbereich für Internetexperimente, da bei diesen die anfallende visuelle Information leicht und ausreichend auf den Bildschirm abgebildet werden kann.

Ein weiterer Grund, ein Dioden-Kennlinien-Experiment für diese Untersuchung auszuwählen, ist die Tatsache, dass Studenten die physikalische Funktionsweise einer Diode nur schwer verstehen. Aus diesem Grund könnte ein Experiment, bei dem die Studenten sich länger mit dem physikalischen Inhalt beschäftigen für den Lernerfolg der Studenten von Vorteil sein, da am Aufbau und der Datenaufnahme bei diesem Experiment wenig gelernt werden kann.

Inhaltliche Voraussetzungen

Neben den eher allgemeinen Voraussetzungen eines A-Praktikums, die im vorherigen Abschnitt diskutiert wurden, wird nun auf die Frage eingegangen, was die Studenten bei diesen Experiment lernen sollen.

Ein Lerninhalt ist zum einen der physikalische Hintergrund des Experimentes: Was ist ein Halbleiter? Was ist ein pn-Übergang? Wie sehen Kennlinien von Dioden aus? Was kann man daraus ablesen? Wie verbinden sich Theorie und Experiment?

Weiterhin soll bei einem Anfänger-Praktikums-Experiment bei den Studenten ein gewisses Interesse am Beobachten von physikalischen Phänomenen und die Motivation zur Erklärung dieser geweckt werden. Es soll also bei dem Experiment kein Arbeitsschema abgearbeitet werden, sondern die Studenten erhalten nur eine relativ freie Aufgabenstellung mit Eckpunkten, in der sie aber noch selbst Wahlmöglichkeiten haben, diese zu erfüllen. Sie sollen experimentieren lernen und auch selbst Entscheidungen treffen, die in bedingtem Maße in die falsche Richtung, das heißt nicht der direkte Weg zur Bearbeitung der Aufgabenstellung, gehen dürfen.

Bei diesen ersten Experimenten ist es wichtig für die Studenten, ihre Daten eigenständig in Graphen darzustellen. Auf diese Weise sollen sie den Zusammenhang zwischen Formel, Messwerten und Graphen lernen. Auch können sie so besser nachvollziehen, wie ein Graph entsteht und wie er interpretiert wird. Darauf wurde bei diesem Experiment sehr viel Wert gelegt, da auf der einen Seite Graphen sehr gut auf dem Bildschirm darstellbar sind, auf der anderen Seite aber auch im wissenschaftlichen Alltag sehr häufig Graphen abgelesen und interpretiert werden müssen.

Die Aufgabenstellung wird in Abschnitt (4.3.2) und (4.4.2) ausführlich diskutiert.

4.3 Rechnergestütztes Experiment

4.3.1 Vorüberlegungen

Unterschiede zu traditionellen Experimenten

Bei der Entwicklung eines Experiments, das über das Internet betrieben werden soll, sind einige Besonderheiten im Vergleich zu der Entwicklung eines traditionellen Experimentes zu beachten. Diese sollen im Folgenden diskutiert werden.

Der Experimentaufbau kann während der Durchführung des Praktikums nur sehr schwer auf- und umgebaut werden. Somit muss ein Betreuer vor der Durchführung das Experiment aufbauen. Ein Umbau während der Durchführung ist nahezu ausgeschlossen und erfolgt in diesem Fall elektronisch über ein Relais. So kann bei dieser Art von Experimente nicht der Aufbau oder das Erlernen ein Experiment aufzubauen im Vordergrund stehen.

Das Automatisieren eines Experimentes reicht nicht aus, um aus einem traditionellen Experiment ein sinnvolles rechnergestütztes Experiment zu erstellen. Dieses führt zwar meistens zu einer Verringerung des systematischen Fehlers der Messdaten, aber die Studenten lernen bei dieser Art von Experiment sehr wenig (vgl. [Huc99]).

Bei vielen traditionellen Experimenten werden die aufgenommenen Daten graphisch dargestellt. Dieses muss auch bei einem rechnergestützten Experiment möglich sein, nur dass diese Graphen dann nicht mit der Hand auf Millimeterpapier gezeichnet werden, sondern per Rechner auf dem Bildschirm dargestellt und ausgedruckt werden können. Also kann das graphische Darstellen von Messdaten per Hand nicht ein Ziel von rechnergestützten Experimenten sein.

Besonderheiten bei internetgestützten Experimenten

Der Rechnerbildschirm muss bei dieser Art von Experiment übersichtlich sein, da der Praktikant nur diese Oberfläche als Experimentierfläche zur Verfügung hat. Werden mehrere Programme oder Programmpakete verwendet, so sollten diese im Aufbau ähnlich sein, damit der Wiedererkennungseffekt groß ist und nicht bei jedem Programmwechsel das Programm neu erlernt werden muss, sondern der Praktikant sich auf den Inhalt konzentrieren kann. Die Bildschirmoberfläche muss so gestaltet sein, dass alle wichtigen Daten sofort sichtbar sind und zur Verfügung stehen. Nur so können Verbindungen zwischen einzelnen Ergebnissen gezogen werden. Dieses führt zu einem besseren Verständnis des Inhalts und zu einer besseren Speicherung des Wissens und besserer Abrufbarkeit aufgrund der größeren Anzahl an Verknüpfungen (siehe [Zim95]).

Wenn alle für einen Aufgabenteil wichtigen Daten auf der Bildschirmoberfläche zu sehen sind, hat es auch sehr große Vorteile für die Onlinebetreuung. Bei dieser Arbeit wurde der Bildschirm des Studenten auf den Bildschirm des Betreuers exportiert. Das heißt, dass der Betreuer auf seinem Bildschirm das gleiche gesehen hat, wie die Praktikanten. Außerdem konnte der Betreuer die Maus und Tastatur der Studenten steuern und somit zur Not den Rechner steuern. Weiterhin konnte dieser genau nachvollziehen, welches Teilthema die Praktikanten gegenwärtig bearbeiteten und wo die Schwierigkeiten lagen. Desweiteren konnte ohne einen Wechsel der Oberfläche mit Hilfe des Mauszeigers auf Fehler und Zusammenhänge hingewiesen werden.

Die einzelnen Aufgaben der verschiedenen Programme oder Programmabschnitte müssen klar definiert sein. Nur so kann sich der Student auf den Inhalt des Experimentes konzentrieren und wird nicht durch das Verwenden von falschen Programmen deprimiert und demotiviert werden.

Bei internetgestützten oder allgemein bei rechnergestützten Experimenten muss man sich im klaren darüber sein, dass es zu einer Verlagerung des Lernziels bei dem Experiment kommt. Das Aufbauen des Messaufbaus und das Aufnehmen von Messdaten kann nicht mehr ein Lernziel sein. Auswertung und Interpretation der Messdaten sind bei solchen Experimenten der Kern des Lernziels. Man könnte sagen, dass dieses dann ein reines Auswerteexperiment sei; zu diesem kann es im allgemeinen Fall kommen, aber bei diesem Experiment wurde darauf geachtet, dass die Studenten mehr lernen sollten als nur Datenauswerten, dieses soll in dem nun folgenden Abschnitt (4.3.2) diskutiert werden.

4.3.2 Aufbau des Experimentes

Lernziel des Experiments

Die Ziele dieses Experimentes könne in zwei Bereiche unterteilt werden, zum einen in den primären Bereich, in dem fachliche Information vermittelt werden soll, und zum anderen in den sekundären Bereich, bei dem es um Qualifikationen geht, die nicht nur fachlich wichtig, sondern auch fachübergreifend sind oder sogar Alltagsbedeutung haben. Diese Bereiche sollen im Folgenden behandelt werden.

Bei diesem Experiment soll eine Diode untersucht werden. Da Dioden aus Halbleitern bestehen, ist das erste fachliche Ziel, dass die Studenten verstehen sollen, was ein Halbleiter ist und was Leiter und Isolatoren von Halbleitern unterscheidet. Zu den fachlichen Zielen dieses Experimentes gehört weiter, dass der Aufbau und die Funktionsweise einer Diode verstanden werden sollen. Dieses Verstehen beinhaltet, dass die Theorie der Diode mit den Experimenten in Zusammenhang gesetzt werden soll und auch, wie und warum das Experiment gerade so durchgeführt wird. Bei diesem Experiment wird bewusst ein asymmetrischer pn-Übergang verwendet, da dieser als Teilchen-Detektor benutzt werden kann. Somit sehen die Studenten ihr Experimentieren als sinnvolle Aufgabe, die einen Zweck hat und nicht ohne Zusammenhang gestellt wird.

Fachlich übergreifend ist das Erkennen, dass der Computer als Hilfsmittel benutzt werden kann, um eine langwierige Datennahme zu vereinfachen und zu beschleunigen. Dabei sollen die Studenten jedoch lernen, dass nicht alles, was der Computer als Daten ausgibt, immer sinnvoll ist. Sie müssen diese Daten analysieren und untersuchen, ob sie mit ihren Prognosen übereinstimmen. Wenn das nicht der Fall ist, müssen sie Fehlersuche betreiben; herausfinden, ob ihre Prognosen falsch waren oder ob Fehler bei der Messdatenaufnahme passiert sind. Ziel ist es also die Messgraphiken zu hinterfragen. Dieses geht nur, wenn man verstanden hat, was eigentlich in ein Diagramm eingetragen wird, und was für eine Aussage aus dem Diagramm gezogen werden kann. Daher ist ein weiteres Ziel dieses Experimentes, dass die Praktikanten die Interpretation verschiedener Diagramme erlernen. Dazu können die Messergebnisse in verschiedenen Auftragungsweisen dargestellt werden. Somit soll erkannt werden, dass es verschiedene Möglichkeiten der Auftragungsweise gibt, die meistens Vor- und

Nachteile haben. Dieses Ziel wurde gewählt, weil in der heutigen Medienlandschaft viele Diagramme zu sehen sind, diese aber häufig von ungeübten Lesern nicht richtig interpretiert werden können.

Zu einem strukturierten Vorgehen und einer planenden Denkweise sollen der Rechner und die Programme den Praktikanten anleiten. Dieses wird dadurch erreicht, dass bei den Messungen Überlegungen angestellt werden müssen, welche Parameter für eine sinnvolle Messung auf welche Art und Weise einzustellen sind. Desweiteren ist die Auswertung auf planerisches Denken angelegt, da bei unüberlegtem Ausprobieren das Erreichen des Ziels sehr langwierig ist.

Ein allgemeines Lernziel eines Praktikums in Partnerarbeit ist die Förderung der Teamfähigkeit. Diese Teamfähigkeit soll auch bei diesem Experiment gefördert werden. Dazu achtet der Betreuer darauf, dass nicht nur ein Praktikant allein die Bildschirmoberfläche bedient, sondern dass auch die Kommunikation zwischen den Praktikanten durch gezieltes Fragen gefördert wird.

Als letztes Ziel sollte bei dem internetbetreuten Experiment den Studenten das Kommunizieren über das Internet gezeigt werden. Diese Form der Verständigung wird in der heutigen Zeit immer wichtiger, so dass Studenten schon recht früh an diese neue Art der Kommunikation herangeführt werden sollen. Die Betreuung der Studenten per Internet wird in Abschnitt (6.2) ausführlich beschrieben.

Aufgabenstellung

Im Folgenden wird die Aufgabenstellung für das rechnergestützte Experiment diskutiert. Die genaue Aufgabenstellung kann im Anhang (A) nachgelesen werden.

Die Aufnahme der Strom-Spannungs-Charakteristik einer Diode in Durchlass- und Sperrrichtung und der Kapazitäts-Spannungs-Charakteristik in Sperrrichtung sind die Aufgaben zur Messung bei diesem Experiment. Dabei sind diese Messungen nicht in beliebiger Reihenfolge durchzuführen. Die Studenten müssen sich überlegen, welche Messreihenfolge sinnvoll und materialschonend ist. Die Programm-Oberfläche für die Kapazitäts-Spannungs-Messung ist in Abbildung (4.1) dargestellt. Das Programm für die Strom-Spannungs-Messungen ist ähnlich aufgebaut. Die genaue Funktionsweise der Programme ist im Anhang (A) erklärt, im Folgenden soll nur eine kurze Beschreibung gegeben werden.

Das Programm untergliedert sich in zwei Teile. In dem linken Bereich werden die für die Messung wichtigen Parameter eingeben, der mittlere und rechte Bereich zeigt die Messwerte und die Messgraphiken an. Die Praktikanten müssen sich vor dem Start der Messungen überlegen, welche Parameter sie einstellen wollen, da diese während der Messung nicht verändert werden können. Eine laufende Messung kann nur abgebrochen, aber nicht verändert werden. Daher müssen die Praktikanten vor Beginn der Messung ihr Vorgehen reflektieren und können schlecht wahllos ausprobieren. In dem großen Diagramm werden die einzelnen Messwerte eingetragen. Diese Graphik wird bei jedem Messpunkt aktualisiert, wobei auch die Achsen mitskaliert werden; die

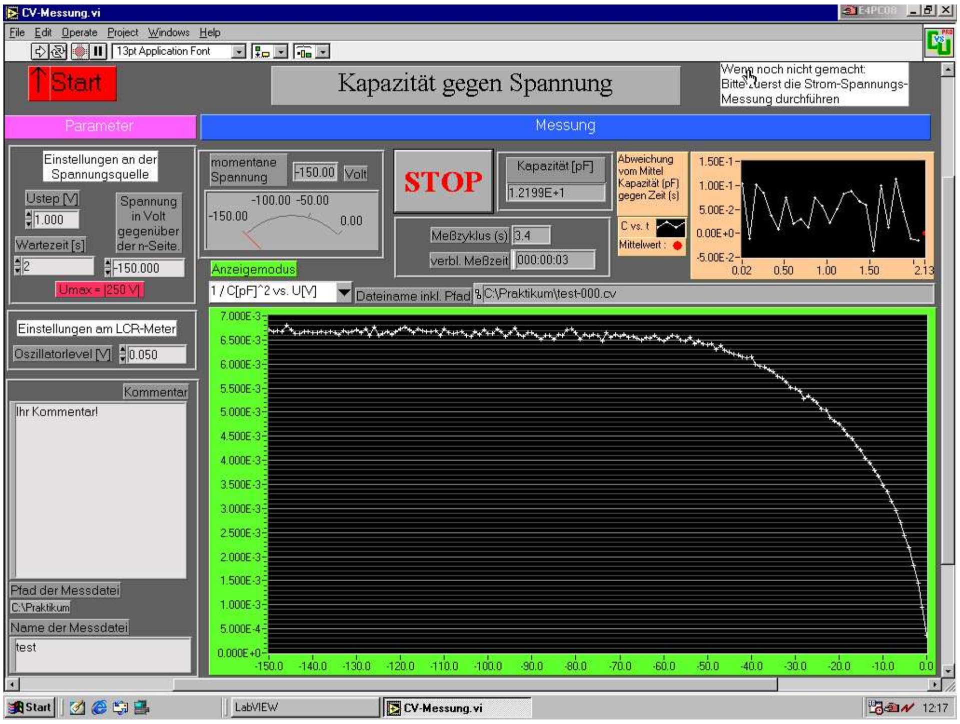


Abbildung 4.1: Messprogramm für die Kapazitäts-Spannungs-Charakteristik in Sperrrichtung.

Praktikanten sehen also wie sich die Messkurve entwickelt. Dadurch sehen die Praktikanten, dass eine reale Messung durchgeführt wird, die entsprechend Zeit braucht. Weiter sehen sie, wenn sie Fehler gemacht haben und können diesen durch Abbrechen der Messung beheben und danach eine Messung neu starten. Bei sinnvollen Messungen können sich die Praktikanten während der Messung schon Gedanken zur Messkurve machen. Dabei können sie die Auftragungsweisen verändern, sodass eine Kurve entsteht, die gut interpretiert werden kann.

Die kleine Messgraphik in der rechten oberen Ecke der Bildschirmoberfläche in Abbildung (4.1) zeigt die Schwankung der Kapazität (bei der Strom-Spannungs-Messung des Stromes) bei konstanter Spannung während der Wartezeit, also der Zeit, die gewartet wird, bis nach Erhöhen der Spannung der jeweilige Messwert genommen wird. Dieses Diagramm ist nötig, weil durch das Erhöhen der Spannung das System ins Ungleichgewicht gebracht wird und es eine gewisse Zeit braucht, um wieder in den Gleichgewichtszustand überzugehen. So sehen die Praktikanten, dass sie eine reale Messung durchführen, auch wenn diese unter Umständen sehr weit entfernt stattfindet.

Jede von den Praktikanten gestartete Messung wird abgespeichert, sodass diese nachher ausgewertet werden kann. Dabei entscheiden die Praktikanten, welche Messungen sie auswerten wollen und welche mit passender Begründung nicht ausgewertet werden müssen.

Die Messdaten der Strom-Spannungs-Kennlinie in Durchlassrichtung werden analysiert, indem sie in ein Diagramm eingetragen werden. Dieses machen die Studenten mit einem handelsüblichen Analyse-Programm. Dabei soll der Zusammenhang zwischen Strom und Spannung gesehen werden. Da die Daten mit dem Rechner „gezeichnet“ werden, können die Studenten hier sehr leicht die Vor- und Nachteile der halblogarithmischen Darstellungweise erkennen, indem sie zwischen der linearen und halblogarithmischen Auftragungsweise wechseln.

Die Messdaten der Kennlinien in Sperrrichtung werden mit eigens dafür geschriebenen Programmen ausgewertet (siehe z.B. das Programm zur Auswertung der Kapazitäts-Spannungs-Charakteristik in Sperrrichtung, Abbildung (4.2)).

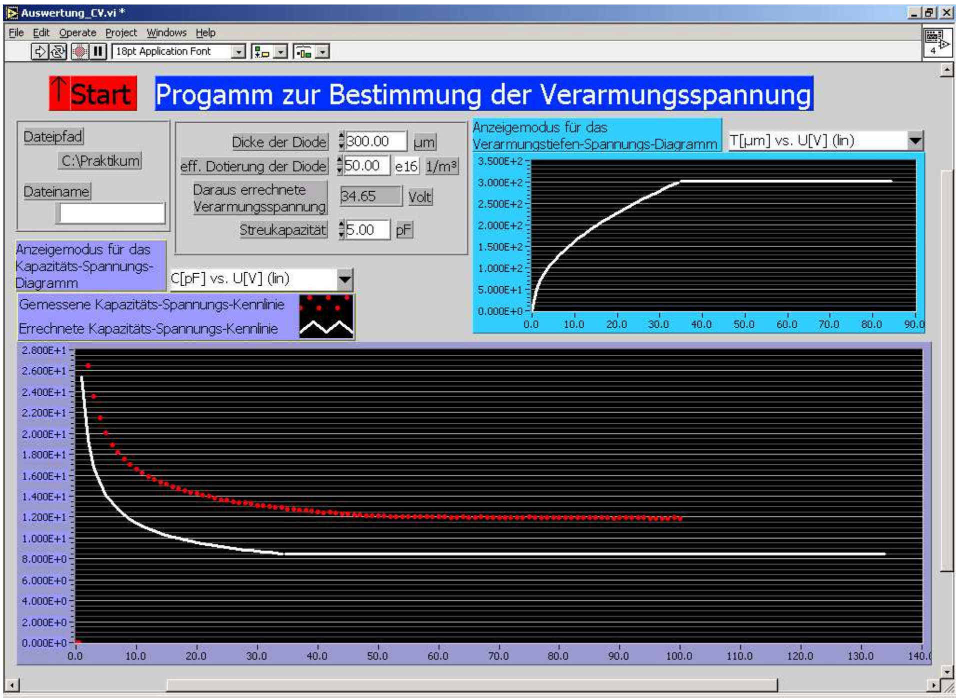


Abbildung 4.2: Auswerteprogramm für die Kapazitäts-Spannungs-Charakteristik in Sperrrichtung.

In dem großen Diagramm in Abbildung (4.2) sind zwei Kurven zu erkennen, eine rote, die die Messdaten darstellt und eine weiße, die aus den Parametern errechnet wird, welche in Abbildung (4.2) in der Mitte oben zu sehen sind. Ziel dieser Auswertung (und der Auswertung der Strom-Spannungs-Charakteristik in Sperrrichtung) ist es, durch Verändern der diodenspezifischen Parameter die errechnete Kurve an die gemessene Kurve anzugleichen. Dabei kann auch die Auftragungsweise der Kurven verändert werden. Durch diese Arbeit beschäftigen sich die Studenten sehr viel intensiver mit dem Kurvenverlauf und sehen, wie manchmal kleine Veränderungen der Parameter schon große Auswirkungen auf den Kurvenverlauf haben. Die Verarmungsspannung wird auf zwei unterschiedliche Arten bestimmt und die Studenten sollen dabei Vor- und Nachteile der verschiedenen Arten herausarbeiten.

In Abbildung (4.2) ist rechts oben noch ein Diagramm zu erkennen. Dieses stellt den Zusammenhang Verarmungstiefe und Spannung dar. Durch diese Zusatzinformation soll der Student die Möglichkeit haben diese Kurve mit dem Hauptdiagramm in Beziehung zu setzen.

Die Simulation ist neben Messung und Auswertung der dritte Bereich dieses Experimentes. Dabei soll die Verarmungstiefe in Abhängigkeit von der Sperrspannung

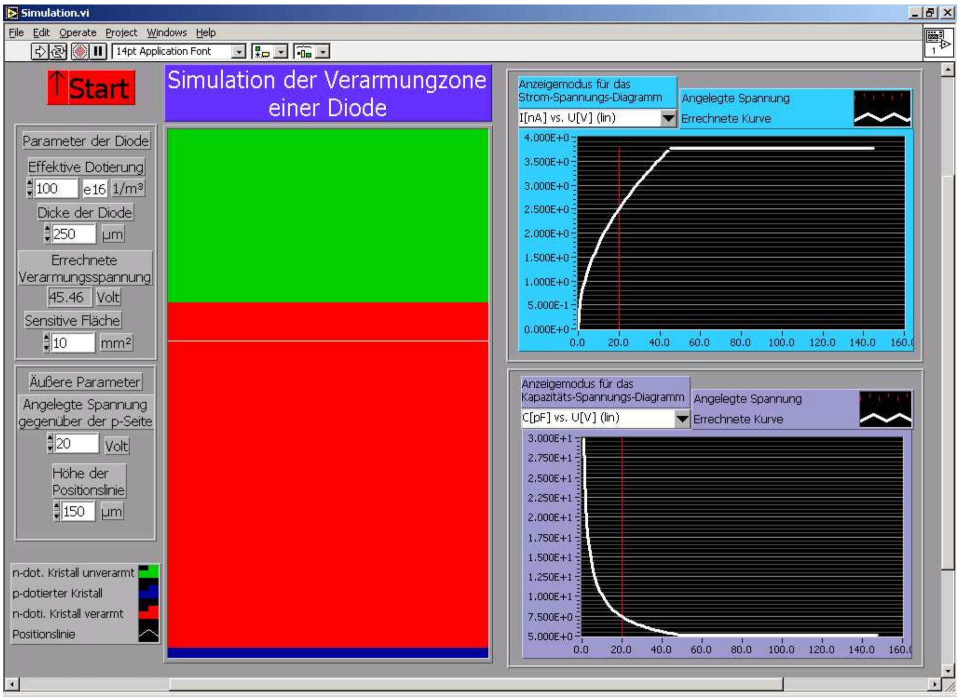


Abbildung 4.3: Simulationsprogramm zur Darstellung der Abhängigkeit der Verarmungstiefe von der Sperrspannung für verschiedene Parameter Konstellationen.

für verschiedene Parameter-Konstellationen betrachtet werden. Die Verarmungstiefe direkt zu messen ist unmöglich, somit bietet die Simulation den Studenten an, einen Parameter zu beobachten, der mit normalen Messungen nicht zugänglich ist. Verstehen die Studenten wie die Verarmungszone wächst, können sie sich die anderen Messkurven leichter erklären und bewerten. Das dafür verwendete Programm ist in Abbildung (4.3) dargestellt. Eine genaue Erläuterung des Programms ist im Anhang (A) nachzulesen. Im Folgenden soll nur die Oberfläche und ihre Funktionsweise allgemein beschrieben werden.

Die in Abbildung (4.3) abgebildete Programmoberfläche gliedert sich in drei Teile. Im linken Bildschirmbereich können die Parameter der Diode und die Spannung variiert werden. Der mittlere Bereich zeigt die schematisch dargestellte Diode. Im rechten Bereich ist die Strom-Spannungs-Charakteristik und die Kapazitäts-Spannungs-Charakteristik der Diode für die im linken Bereich eingestellen Parameter zu erkennen. Die rote Linie zeigt die gerade eingestellte Spannung an.

Mit diesem Programm sollen die Studenten für die aus den vorherigen Auswertungen erhaltenen Parameter untersuchen wie die Verarmungstiefe in Abhängigkeit von der Verarmungsspannung wächst. Dazu sollen vier Simulationen durchgeführt werden; es soll immer ein Parameter gegenüber den aus der Auswertung erhaltenen variiert werden. Die Ergebnisse sollen dann wieder in ein Programm eingetragen werden, welches die erhaltenen Daten als Graph darstellen kann, womit dann die Daten ausgewertet werden können.

Bei diesem Simulationsprogramm ist wichtig, dass hier die Strom-Spannungs- und Kapazitäts-Spannungs-Charakteristiken untereinander und identisch skaliert auf einer Oberfläche zu sehen sind. So können Zusammenhänge und Unterschiede der beiden Kurven leicht erkannt und in Zusammenhang mit dem Wachsen der Verarmungszone gebracht werden.

Alle hier abgebildeten und vorgestellten Programme sind für das Experiment entwickelt worden.

Aufbau des Experimentes

Für die Evaluation des Experimentes war es wichtig, dass das Experiment kompakt und transportabel aufgebaut ist. Auch für die Nachhaltigkeit des Experimentes ist wichtig, dass es leicht von einem Ort zum anderen transportiert werden kann und nicht viel Platz benötigt. Diese Voraussetzungen wurden mit drei Koffern realisiert, siehe dazu Abbildung (4.4). Der in diesen Koffern enthaltene Experimentaufbau wird über einen in dem Bild nicht sichtbaren Rechner gesteuert. Dieser Rechner ist auch die Schnittstelle zum Internet.

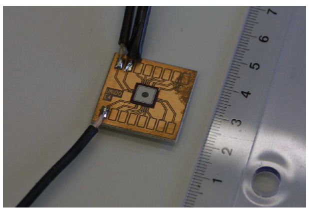


Abbildung 4.6: Im Experiment verwendete Diode.

In Abbildung (4.5) sind die Koffer, in denen der Messaufbau realisiert wurde, offen zu sehen. In dieser Abbildung sind rechts und links die Koffer zu sehen, in denen sich die Messgeräte befinden: in dem linken ein Amperemeter mit eingebauter Spannungsquelle und in dem rechten ein LCR-Meter. Diese beiden Koffer müssen aufgrund der Abwärme der Geräte belüftet werden und sind im eigentlichen

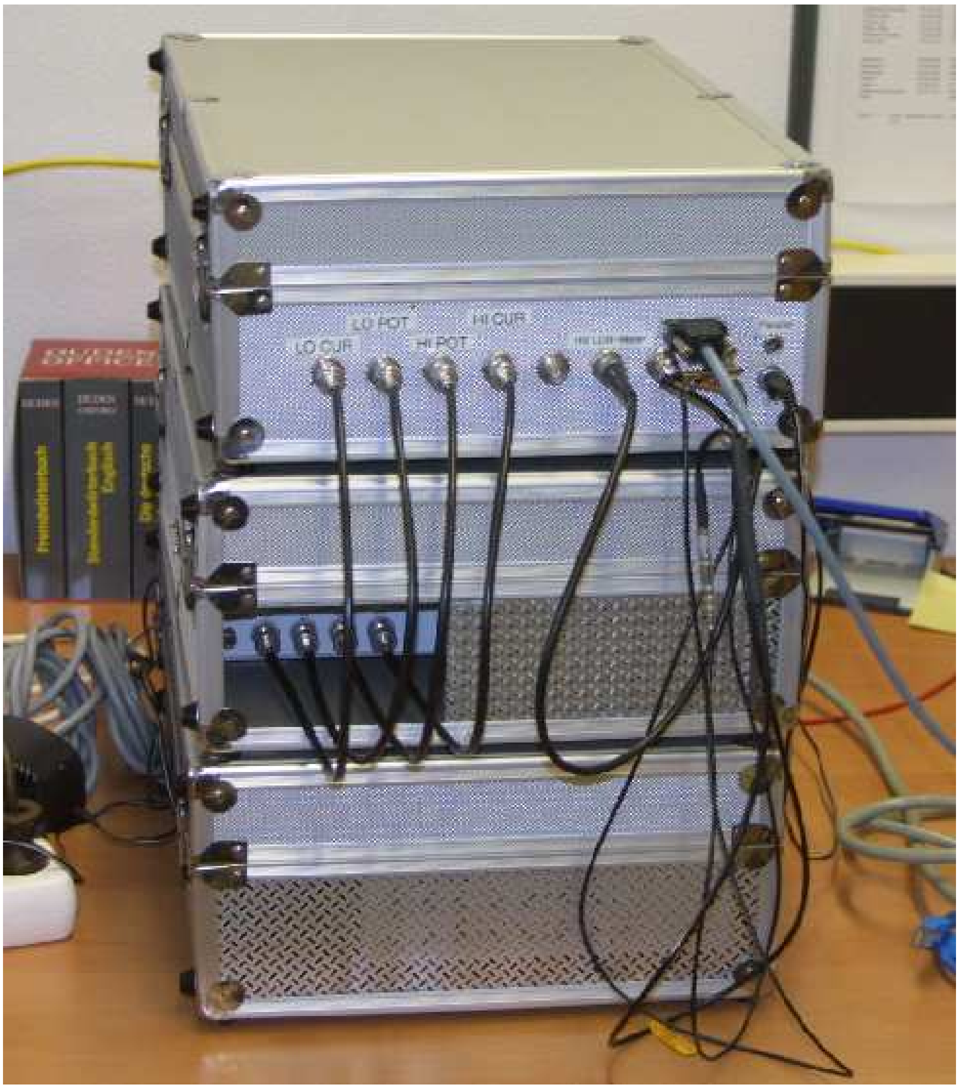


Abbildung 4.4: Messaufbau in den Koffern bei dem rechnergestützten und internetbetreuten Experimentes.

Messaufbau die unteren beiden Koffer.

In dem obersten Koffer (Abbildung (4.5) Mitte) befindet sich die Diode (Abbildung (4.6)), die verschiedenen Relais, die steuern, welche Messung gerade durchgeführt wird. Dort werden die Kabel zusammengeführt. Der Inhalt des Koffers ist in Abbildung (4.7) zu sehen. Es wurde absichtlich auch bei diesem Experiment eine offene Diode verwendet, weil diese bei dem traditionellen Experiment zur Demonstration der Lichtempfindlichkeit verwendet wird.

Abbildung 4.5: Geöffnete Koffer des rechnergestützten und internetbetreuten Experimentes.

Die Schaltskizzen für das Experiment sind in der Versuchsanleitung (Anhang (A)) abgebildet und werden hier nicht näher erläutert.

Der Praktikumsarbeitsplatz für das rechnergestützte und das internetbetreute Experiment ist in Abbildung (4.8) dargestellt. Zu erkennen ist, dass die Studenten nur den Computer als Eingabemedium nutzen können.

4.4 Traditionelles Experiment

4.4.1 Vorüberlegungen

Nach der Planung für das rechnergestützte und internetbetreute Experiment war bei der Planung für das traditionelle Experiment wichtig, dass der physikalische Inhalt dieses Experimentes dem des anderen möglichst ähnelt. Dieses ist nicht vollständig durchführbar, da die Simulationen und Auswerteprogramme einen Rechner benötigen. Auf diesen soll bei dem traditionellen Experiment verzichtet werden. Außerdem muss berücksichtigt werden, dass das Aufnehmen der Messdaten „von Hand“ sehr viel länger dauert als mit dem Rechner.

Da dieses Experiment mit den anderen im Praktikum vergleichbar sein soll, wurde die für dieses Themengebiet übliche Vorgehensweise beibehalten: also das Aufbauen

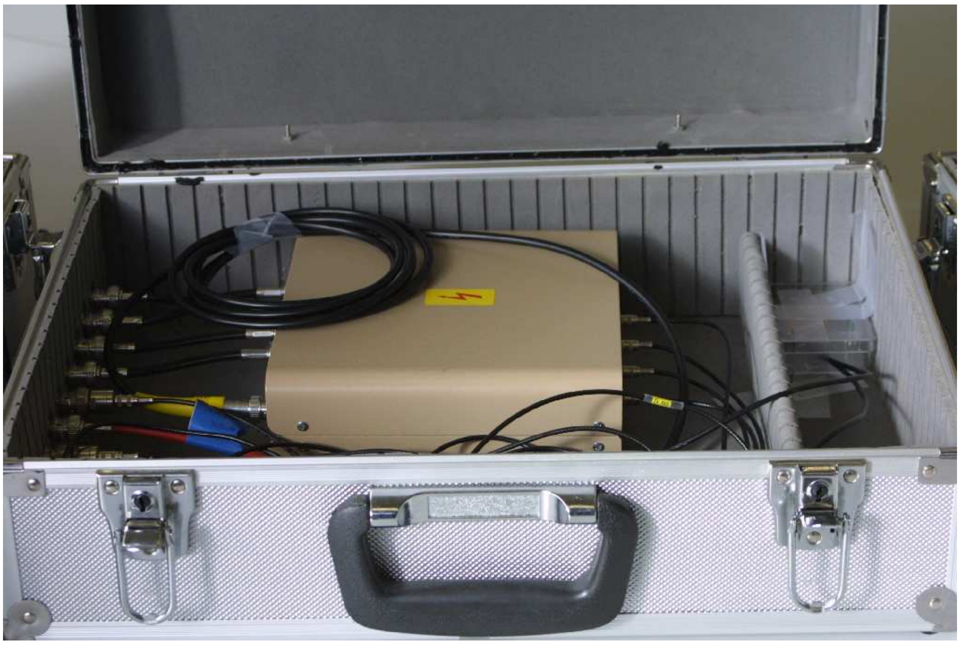


Abbildung 4.7: Blick in den Koffer mit der Schaltung und der Diode des Experimentes.

Abbildung 4.8: Arbeitsplatz für das rechnergestützte oder internetbetreute Experiment.

des Versuchsaufbaus, das Aufnehmen von Messdaten und die graphische Auswertung derselben auf geeignetem Papier.

Da beide Experimente in den gleichen Praktika parallel durchgeführt werden sollten, ist es wichtig, die Bearbeitungszeit dieser beiden Experimente gleich lang und im Rahmen des Praktikums zu halten. Da bei den traditionellen Experimenten der Aufbau des Experimentes und das Eintragen der Messdaten in ein Diagramm relativ viel Zeit in Anspruch nimmt, ist mit diesen Tätigkeiten der zeitliche Rahmen eines A-Praktikums für dieses Experiment schon ausgefüllt.

4.4.2 Aufbau des traditionellen Experimentes

Lernziel des traditionellen Experimentes

Das Lernziel des traditionellen Experimentes kann in zwei Bereiche untergliedert werden: den physikalisch inhaltlichen Bereich und den Bereich zu allgemeinen fächerübergreifenden Qualifikationen.

Beide Experimente mussten das gleiche physikalische Thema behandeln, somit wird auch bei diesem Experiment eine Diode untersucht. Wie bei dem vorherigen Experiment steht bei diesem das Verständnis von Halbleitern, pn-Übergängen und Dioden als inhaltliches Lernziel fest. Der Praktikant soll nach dem Experiment in der Lage sein, die Funktionsweise einer Diode zu erläutern und die zugehörigen Experimente darzulegen. Da auch bei diesem Experiment ein asymmetrische pn-Übergang verwendet wurde, sollte dem Studenten außerdem bewusst sein, wofür man solche Übergänge in der Teilchenphysik verwenden kann.

Die Praktikanten sollen lernen einen Messaufbau nach vorgefertigten Schaltskizzen aufzubauen. Dabei sollen sie lernen Schaltskizzen zu lesen, damit sie diese später für speziellere Anwendungen abwandeln können. Desweiteren soll der Umgang mit Messgeräten gelernt werden, wozu nicht nur die Bedienung gehört, sondern auch die Sorgfalt, mit der ein Messaufbau aufgebaut werden muss, damit die Messgeräte nicht zerstört oder beschädigt werden.

Die Förderung des strukturierten und planenden Denkens ist auch ein Lernziel dieses Experimentes. Um einen Messaufbau richtig aufzubauen, muss an diese Aufgabe strukturiert herangegangen werden. Dieses Lernziel zieht sich durch das gesamte Experiment. So sollen die Praktikanten sinnvolle Messschritte bei Messungen wählen und auch die Achseneinteilung bei der Auswertung erfordert ein vorheriges Überlegen.

Das Begreifen des Entstehens von Diagrammen und das Konstruieren eigener Diagramme kann als allgemeines Ziel bei dieser Art von Experimenten angesehen werden. Neben dem Erstellen ist das Interpretieren von Diagrammen eine wichtige Fähigkeit, da in der heutigen Medienlandschaft sehr häufig Fakten in Diagrammen dargestellt werden. Wenn diese nicht selbständig analysiert werden können, kann die Aussagen anderer Personen nicht bewerten werden.

Desweiteren sollen die Studenten lernen miteinander zu arbeiten, die Teamfähigkeit soll somit gefördert werden. Dies soll beim gemeinsamen Aufbauen des Experimentes und der Messwertaufnahme geschehen.

Aufgabenstellung

Im Folgenden soll die Aufgabenstellung für das traditionelle Experiment diskutiert werden, die genaue Aufgabenstellung ist im Anhang (B) nachzulesen.

Bevor die Praktikanten, die dieses Experiment bearbeiten, die Messungen durchführen können, müssen sie zuerst das Experiment anhand von schematischen Zeichnungen des Experimentaufbaus (siehe z.B. Abbildung (4.9)) aufbauen.

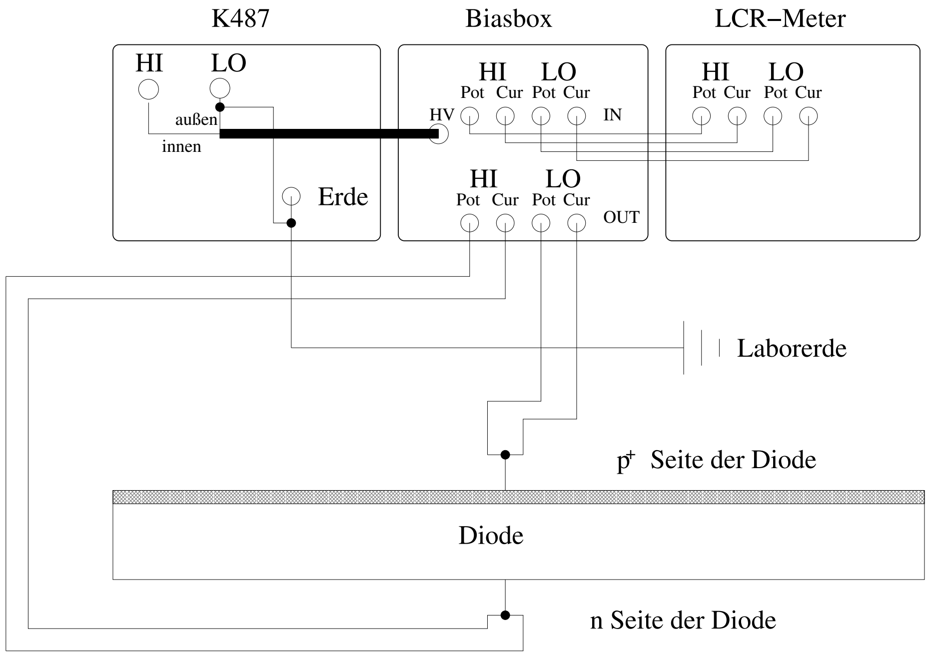


Abbildung 4.9: Schematische Skizze des Messaufbaus der Kapazitäts-Spannungs-Messung. (Siehe dazu auch die Versuchsanleitungen Anhang (A) und (B))

Der Arbeitsplatz mit Messaufbau für die in Abbildung (4.9) abgebildete Skizze ist in Abbildung (4.10) dargestellt. Es ist zu erkennen, dass dies ein Experimentaufbau im traditionellen Sinne ist.

Wie bei dem rechnergestützten Experiment müssen die Praktikanten dieses Experimentes drei verschiedene Charakteristiken messen: die Strom-Spannungs-Charakteristik in Sperr- und Durchlassrichtung und die Kapazitäts-Charakteristik in Sperr-

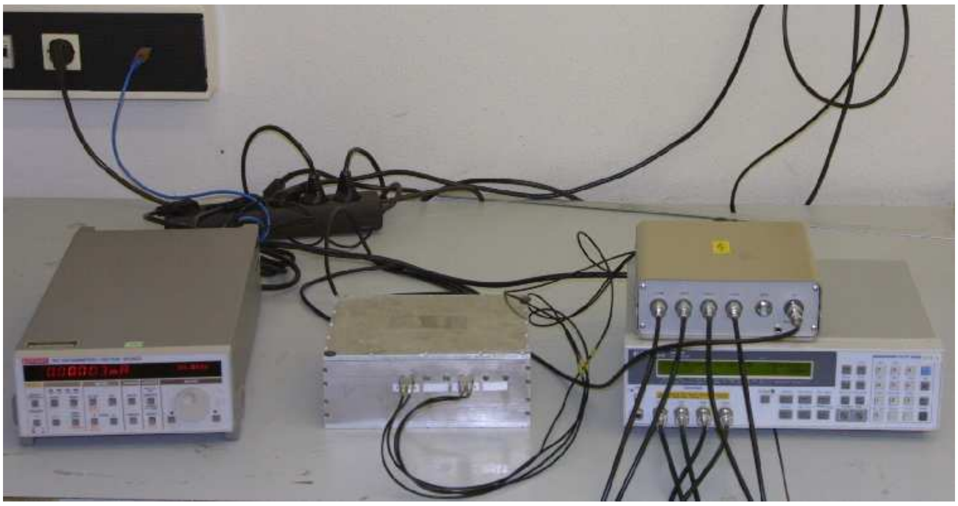


Abbildung 4.10: Arbeitsplatz des traditionellen Experimentes. Abgebildet ist der aufgebaute Kapazitäts-Spannungs-Messaufbau.

richtung. Beim Aufbauen des Experimentes müssen Überlegungen angestellt werden, welche Messung zuerst durchzuführen am sinnvollsten und materialschonendsten ist.

Desweiteren müssen sich die Praktikanten überlegen, welche Schrittweite für die verschiedenen Messungen sinnvoll ist. Diese Überlegung ist wichtig, da die Messkurve im Diagramm gut zu erkennen sein sollte, es aber nicht unnötig viele Messpunkte sein sollten, die in das Diagramm eingetragen werden müssen.

Aus zeitlichen Gründen tragen die Praktikanten die Messwerte immer nur in einer Auftragungsweise, zum Beispiel die Kapazitäts-Spannungs-Messung in C vs. $1/\sqrt{U}$, in das Diagramm ein. Dabei sollen sie sich vorher überlegen und dann begründen, warum diese Auftragungsweise sinnvoll ist. Das Diagramm der Messung in Durchlassrichtung soll nur den mathematischen Zusammenhang zwischen Strom und Spannung zeigen. Aus den Diagrammen in Sperrrichtung soll neben dem mathematischen Zusammenhang auch noch die Verarmungsspannung abgelesen werden.

Kapitel 5

Ermittelung des Lernerfolges

Dieses Kapitel untergliedert sich in zwei Abschnitte. Im ersten Abschnitt wird diskutiert, welche Art von Lernerfolg bei dieser Untersuchung ermittelt werden soll. Im zweiten Abschnitt wird anschließend die Entwicklung und Überprüfung des hier verwendeten Fragebogens erörtert.

5.1 Gegenstand der Untersuchung

Wie in Kapitel (3) beschrieben, war das Ziel dieser Evaluation die Untersuchung, ob das Erlernen von physikalischen Sachverhalten von der Art des Experimentes und der Betreuung abhängt. Aus diesem Grund ist ein Fragebogen entwickelt worden, mit dem diese Frage untersucht werden sollte.
Die Fragen dieses Fragebogens beziehen sich dabei zumeist auf den physikalischen Inhalt des Experimentes. Dazu zählt neben Fachwissen, wie beispielsweise eine Diode angeschlossen werden muss um sie in Durchlassrichtung zu betreiben, auch das Wissen welche Arten von Messgeräten bei den jeweiligen Messungen verwendet werden und die richtige Zuordnung von Graphen zu den einzelnen Messungen. Der gesamte Fragebogen ist in Anhang (C) nachzulesen.
Mit Hilfe dieses Fragebogens sollte also weder die Medienkompetenz der Praktikanten, noch ihre Fähigkeit Experimente aufzubauen, untersucht werden. Diese beiden Fertigkeiten sind wichtig und sollten in einen Praktikum gefördert werden, aber nicht jedes Experiment eignet sich dazu diese beiden Schlüsselqualifikationen zu fördern. So sollte hier untersucht werden, ob die Praktikanten bei einem rechnergestützten Experiment überhaupt den physikalischen Inhalt erlernen und behalten können.

Bei dieser Untersuchung wird die Entwicklung des Lernerfolges betrachtet. Dazu wird das Wissen der Praktikanten zu drei Zeitpunkten ermittelt: der erste Zeitpunkt ist direkt vor dem Experiment, aber nach der eigenständigen Bearbeitung der Anleitung zum Experiment, der zweite Zeitpunkt liegt direkt nach der Durchführung des

Experimentes und der dritte Zeitpunkt ist am Ende des Praktikums.
Der zeitliche Abstand zwischen dem zweiten und dritten Fragebogen ist bei den verschiedenen Praktikumsgruppen unterschiedlich. Da aber bei dem Vergleich zwischen den beiden Experimenten die Vergleichsgruppen parallel betreut wurden, gibt es keine Unterscheidung in diesem Faktor für die beide Gruppen. Bei dem Vergleich zwischen den Betreuungsarten besuchten die Studenten die gleichen Praktika. Somit ist die durchschnittliche Zeitdifferenz zwischen den beiden letzten Fragebögen bei den beiden untersuchten Gruppen gleich, und diese beiden Gruppen unterscheiden sich nicht in diesem Faktor.

5.2 Entwicklung des Fragebogens

Im folgenden Abschnitt wird die Entwicklung der Fragebögen diskutiert. Dabei werden zuerst die Gütekriterien für Fragebögen im Bezug auf die Versuchsreihe betrachtet. Anschließend werden die Gesichtspunkte, nach denen die Fragen entwickelt wurden, erörtert. Im letzten Abschnitt wird die Voruntersuchung zum Test des Fragebogens vorgestellt.

5.2.1 Gütekriterien für Fragebögen

Objektivität

Die Art der Betreuung, die Auswertung, die situativen Bedingungen der Durchführung und die Auswahl der Versuchspersonen müssen soweit wie möglich identisch sein, damit das Testergebnis objektiv sein kann. Daraus folgt, dass es verschiedene Arten der Objektivität gibt: die Durchführungsobjektivität (wer den Test vorgibt), die Auswerteobjektivität (wer den Test auswertet) und die Interpretationsobjektivität (wer den Test interpretiert). Sind diese Objektivitäten gegeben, so kann der Test als objektiv gewertet werden.

Es ist einzusehen, dass Objektivität eine Voraussetzung für Zuverlässigkeit (Reliabilität) und Gültigkeit (Validität) eines Tests ist.

Reliabilität

Mit Reliabilität oder auch Zuverlässigkeit wird die Messgenauigkeit beim Messen eines Tests angegeben. Es wird also untersucht, ob der Test bei gleichen Bedingungen das selbe Ergebnis liefern würde.

Per Definition ist die Reliabilität der Quotient aus wahrer zu beobachteter Varianz und somit selber ein Varianzanteil.

$$\text{Reliabilität} = \frac{\text{wahre Varianz}}{\text{beobachtete Varianz}}. \tag{5.1}$$

Betrachtet man Gleichung 5.1 näher, so ist zu erkennen, dass der Wert von α zwischen 0 und 1 liegen muss, da die beobachtete Varianz immer größer als die wahre ist. Je näher der Wert an 1 liegt, desto weniger unterscheiden sich die beiden Varianzen. Also zeigen Werte für α nahe 1 eine große Zuverlässigkeit der Messgenauigkeit eines Tests an und dass die Fehlervarianz sehr klein ist.

Mit dem so bestimmten Maß kann untersucht werden, welcher Anteil an den Varianzen bei den Messwerten durch die Personenunterschiede entstehen und welcher nur zufällig zustande kommt. Das Maß ist somit als Varianzanteil ähnlich interpretierbar wie das Quadrat eines Korrelationskoeffizienten.

Auf die explizite Berechnung der Reliabilität für den hier verwendeten Fragebogen wird in Anhang (D.1) näher eingegangen. Reliabilitätskoeffizienten in der Größenordnung um 0.8 gelten bereits als gut (vergleiche [Por85] und [Mum95]).

Validität

Mit der Validität eines Fragebogens oder Tests wird die Gültigkeit beschrieben, mit der ein Test das misst, was er messen soll. Dabei werden verschiedene Arten der Validität unterschieden, die im Folgenden erläutert werden sollen ([Mum95], [Noe00], [Por85], [Ros96]).

- *Logische oder inhaltliche Validität*
  Die Inhaltsvalidität ist gegeben, wenn der Inhalt der Fragen das zu messende Konstrukt in seinen wichtigsten Aspekten erschöpfend erfasst. Dies wurde bei der Erstellung der Fragen (siehe folgenden Abschnitt (5.2.2)) berücksichtigt. Desweiteren wurden die Fragen Experten zur Überprüfung gegeben (siehe Abschnitt (5.2.3)). Diese überprüften, ob der Inhalt und die Lernziele der Experimente durch die Fragen abgedeckt werden. Dadurch wurde die logische Gültigkeit des Fragebogens getestet.

- *Extremgruppenvergleich*
  Beim Extremgruppenvergleich sollen Gruppen den Fragebogen ausfüllen, die bezüglich des zu untersuchenden Kriteriums unterschiedliche Voraussetzungen besitzen. Beim Prä-Test (siehe Abschnitt (5.2.3)) wurde der Fragebogen auf der einen Seite Physikern und Studenten gegeben, die nicht mit Halbleitern arbeiteten und auf der anderen Seite Experten in diesem Gebiet. Das Ergebnis war, dass die Experten mehr Fragen richtig beantworten konnten (siehe Tabelle (7.1)). Dadurch konnte gezeigt werden, dass der Fragebogen sensitiv auf das Spezialwissen des Experimentes ist.

- *Externe Validität*
  Die externe Validität wird durch Vergleich mit bekannten externen Merkmalen überprüft. Das Ergebnis des Fragebogens wurde in Beziehung zu bekannten

Ergebnissen gesetzt. Bei der Überprüfung der externen Validität dieses Fragebogens sind die Ergebnisse der Praktikanten mit den Ergebnissen der Voruntersuchung verglichen worden. Dieses ergab, dass die Praktikanten nach dem Experiment mehr Fragen richtig beantworten konnten als die Physiker ohne Spezialwissen (ausführliche Diskussion der Ergebnisse in Kapitel (7)). Durch diesen externen Vergleich konnte die Gültigkeit des Fragebogens bestätigt werden.

Die Validitätsprüfung ergab somit insgesamt, dass der Fragebogen das Wissen zum Experiment abfragt. Er kann somit verwendet werden, um das Wissen zu verschiedenen Zeitpunkten des Experimentes zu überprüfen und somit den Lernerfolg festzustellen.

5.2.2 Entwicklung der Fragen

Bei der Entwicklung der Fragen muss berücksichtigt werden, dass die Summe der Fragen die Inhalte und Lernziele der Experimente abdecken und dass die Fragen verständlich und objektiv auswertbar sind. Diese Punkte sollen im Folgenden diskutiert werden.

Berücksichtigung der Lernziele bei der Erstellung der Fragen

Nicht alle Lernziele konnten mit Hilfe des Fragebogens abgedeckt werden. So wurde z.B. die Partnerarbeit oder das Zusammenbauen eines Experimentes in dem Fragebogen nicht abgefragt. Auch die Fähigkeit den Rechner als Hilfsmittel zu benutzen oder die Fähigkeit zur Kommunikation über das Internet wurden nicht untersucht. Wären alle Ziele untersucht worden, wäre der Zeitaufwand zum Ausfüllen des Tests im Praktikum zu groß geworden. Aus diesem Grund wurden nur bestimmte Ziele untersucht. Diese wurden mit den Professoren, die das Praktikum betreuten, ausgewählt; sie werden im folgenden dargestellt.

- *pn-Übergang:*
  In dem Fragebogen soll untersucht werden, ob der Aufbau und die Funktionsweise eines pn-Übergangs verstanden wurde. Dazu soll der pn-Übergang in Durchlass- und Sperrrichtung betrachtet werden.

- *Formeln:*
  Die Praktikanten sollen die mathematischen Zusammenhänge zwischen den einzelnen Messgrößen kennen.

- *Charakteristische Kurvenverläufe:*
  Die Diagramme der Messung sollen skizziert werden können. In diesen Diagrammen sind dann die charakteristischen Punkte der Messung einzutragen.

- *Messung:* Es sollen die Messgeräte zu den Messungen benannt werden können. Außerdem soll ein Schaltplan skizziert werden.

Diese Themengebiete erfassen den physikalischen Inhalt, sowie die Fähigkeit Diagramme zu analysieren.

Objektivität der Auswertung der Fragen

Die Objektivität wurde dadurch gewährleistet, dass die Antwort zu den meisten Fragen durch ankreuzen ausgewählt werden konnte. Eine Antwort kann somit leicht als richtig oder falsch bewertet werden. Auch die Fragen zu den Diagrammen können leicht ausgewertet werden, da hier das richtige Diagramm beschriftet und an der richtigen Stelle die Verarmungsspannung angezeichnet werden muss. Bei der Frage zu den Messgeräten können zu viele Geräte aufgeführt werden oder es ist möglich, dass Kabel oder anderes Zubehör erwähnt wird. Die Objektivität der Auswertung wurde hier gewahrt, indem bei der Erstellung des Fragebogens berücksichtigt wurde, wie die Antwort in solchen Fällen bewertet werden soll.

Durch die Berücksichtigung der oben genannten Punkte bei der Erstellung des Fragebogens gelangen unterschiedliche Personen bei der Auswertung zu dem gleichen Ergebnis. Somit ist der Fragebogen objektiv.

Verständlichkeit der Fragen

Eine Frage kann nur ohne Zufall richtig beantwortet werden, wenn sie verständlich ist. Die Verständlichkeit der Fragen wurde überprüft, indem Experten diese beantworten mussten. War die Frage falsch beantwortet, wurde nachgefragt, wie die Frage verstanden wurde und somit überprüft, ob die Frage aus Unwissenheit falsch beantwortet wurde oder ob die Fragestellung missverständlich war.
Danach wurden die Fragen Physikern gestellt, die nicht Experten in dem Gebiet waren. Falsche Antworten wurden hier auf die gleiche Weise überprüft. Zum Schluss erhielten einige Physik-Studenten den Fragebogen. In einem Gespräch wurde nachgefragt, ob sie verstanden hätten, was bei den einzelnen Fragen gefragt sei.

5.2.3 Prä-Test

Der Prä-Test soll die in Kapitel (5.2.1) vorgestellten Gütekriterien für diesen Fragebogen überprüfen. Dazu wurde der Fragebogen zuerst an Experten verteilt. Dies waren Physiker, die mit Halbleitern arbeiten und teilweise während ihrer Arbeit die gleichen Messungen wie im Experiment durchführen.
Weiter wurde der Fragebogen an eine Nicht-Experten-Gruppe verteilt. Diese zweite

Gruppe bestand aus Physikern, die nicht auf dem Gebiet der Halbleiterphysik arbeiten.
Beide Gruppen mussten unter den gleichen Bedingungen den Fragebogen ausfüllen wie später die Praktikanten, das heißt sie hatten 15 Minuten Zeit zum Ausfüllen des Bogens und Fragen, die sie nicht beantworten konnten, sollten nicht beantwortet werden. Im Unterschied zu den Praktikanten bekamen diese beiden Gruppen nicht die Anleitung zum Experiment zur Vorbereitung. So konnte ein Unterschied in den Antworten zwischen Experten und Nicht-Experten gesehen werden (siehe Tabelle (7.1)).

Die Auswertung dieser Voruntersuchung wird in Kapitel (7) diskutiert.

Kapitel 6

Durchführung der Versuchsreihe

Die Evaluation wurde über einen Zeitraum von 18 Monaten an verschiedenen Universitäten durchgeführt. Dabei kamen die Experimente in den Anfängerpraktika unterschiedlicher Fachrichtungen zum Einsatz. Eine detaillierte Auflistung, wieviele Praktikanten an welcher Universität welches Praktikum absolviert haben, ist in Tabelle (7.3) dargestellt.

Im Folgenden soll diskutiert werden, wie die Praktikanten ausgewählt wurden. Im zweiten Abschnitt dieses Kapitels wird die Betreuung der Experimente betrachtet, wobei besonders auf die Betreuung über das Internet eingegangen wird. Zum Schluss dieses Abschnittes werden Erfahrungen berichtet, die neben der eigentlichen Evaluation des Lernerfolges gemacht worden sind.

6.1 Auswahl der Praktikanten

Die Experimente wurden an verschiedenen Universitäten in Anfängerpraktika Physik für unterschiedliche Fachrichtungen durchgeführt (siehe Abschnitt (4.2.1) und Tabelle (7.3)). Der Ablauf der Praktika ist an diesen Universitäten unterschiedlich. Weil die hier untersuchten Experimente als externe Experimente in die Praktika eingegliedert wurden, konnte keine einheitliche Auswahl der Praktikanten getroffen werden. Im Nachfolgenden soll das Auswahlverfahren für die Praktikanten der verschiedenen Universitäten diskutiert werden. Eine Untergliederung für die einzelnen Praktika erübrigt sich, weil die Auswahl innerhalb einer Universität identisch war.

An der Universität Dortmund wurden die Experimente wie herkömmliche Praktikumsexperimente behandelt. Bei der Erstellung der Belegungsmatrix der Experimente für das Praktikum wurden die neuen Experimente dementsprechend berücksichtigt. Somit wurden die Praktikanten unabhängig vom Geschlecht, dem Alter oder deren Interessen auf die Experimente verteilt. Bei der Betreuung „vor Ort“ wurde das rechnergestützte und traditionelle Experimente gleichstark berücksichtigt. Im allgemeinen bekamen die Studenten eine Woche vor der Durchführung die Anleitung zum Experiment ausgehändigt. Die Anzahl der im Angebot stehenden Experimente im Praktikum ist größer als die Anzahl der Termine pro Semester, deshalb konnten nicht alle Studenten, die das Praktikum belegt hatten, die in Abschnitt (4.3) und (4.4) vorgestellten Experimente durchführen.

Im Gegensatz zur Universität Dortmund ist das Praktikum an der Universität Jena nicht so unterteilt, dass pro Praktikumstag nur ein Experiment durchgeführt werden muss. Dort ist es üblich, dass Praktikanten mehrere Experimente pro Tag durchführen können. Als Belohnung für schnelles und ordentliches Arbeiten führen Praktikanten, die eine gewisse Anzahl von Pflichtexperimenten durchgeführt haben, am Ende des Semesters verschiedene aufwendigere Experimente durch oder können selber etwas ausprobieren. Die Praktikanten aus Jena gehörten zu der Gruppe, die schon relativ viele der Pflichtexperimente absolviert hatte. Sie wurden dann vom Praktikumsleiter ausgewählt, an einem üblich Termin die hier vorgestellten Experimente durchzuführen. Dabei gab es bei den Experimenten keine Wahlmöglichkeiten, sondern das Los bestimmte die Art des Experimentes. In diesem Praktikum konnten nicht alle Studenten erreicht werden. Genauso wie in Dortmund wurde hier ebenfalls die Anleitung zu den Experimenten ca. eine Woche vor der Durchführung an die Praktikanten ausgehändigt.

An der Bergischen Universität Wuppertal ist die Anzahl der Praktiumsexperimente identisch mit der Anzahl der Praktikumstermine. In Wuppertal wurde an Stelle das herkömmliche Diodenexperiment eines der neu entwickelten Experimente eingesetzt. Es war hier möglich, dass alle Studenten des Praktikums eines der Experimente durchführten. Die Studenten wurden dabei ohne Wahlmöglichkeit zufällig und zu gleichen Teilen auf die verschiedenen Experimente aufgeteilt. Diese Aufteilung wurde ca. vier Wochen vor Beginn des Praktikums durchgeführt, gleichzeitig mit der Anmeldung zum Praktikum. Weil das Diodenexperiment am ersten Praktikumstag durchgeführt werden sollte, bekamen alle Praktikanten schon zu diesem Zeitpunkt die Anleitung ausgehändigt.

An der Ruhr-Universität Bochum konnten die Praktikanten, die in fünf Zweiergruppen jedes Experiment durchführten, nicht vollständig zufällig ausgewählt werden. Die Auswahl der Praktikanten erfolgte, indem am ersten Praktikumstag in den einzelnen Experimenten freiwillige Zweiergruppen gesucht wurden. Dabei wurde beginnend mit der Zweiergruppe, die links der Tür am nächsten saß, und danach dem Uhrzeigersinn folgend, gefragt, ob sie anstelle des im Praktikum üblichen Experimentes „Kennlinien“ eines der neu entwickelten Experimente durchführen wollten; diese waren in der Einführungsveranstallung vorgestellt worden. Es waren immer zwei Zweiergruppen bereit und das Los entschied, welche Gruppe welches Experiment durchführen sollte. Bei den Praktika in Bochum konnten, wie auch in Dortmund, nicht alle Studenten eines Praktikums mit den Experimenten erreicht werden.

Die Fachrichtungen selber sind so ausgewählt worden, dass ein relativ breites Spektrum in der Studentenschaft zustande kommt. Die Auswahl der verschiedenen Universitäten geschah eher zufällig und war von der Bereitschaft der Praktikumsleiter, neue Experimente auszuprobieren, abhängig.

6.2 Betreuung der Experimente

6.2.1 Allgemeine Betrachtung

Die Betreuung im Anfänger-Praktikum erfolgt meistens durch Diplomanden und Doktoranden der Physik. Bei den Experimenten, die in dieser Arbeit evaluiert wurden, erfolgte die Betreuung ausschließlich durch Diplom-Physiker. Dabei war nicht ein Betreuer pro Praktikum oder Experiment zuständig, sondern in fast jedem Praktikum teilten sich zwei Betreuer die Aufsicht der Experimente an den verschiedenen Praktikumstagen. Diese Art der Betreuung verringert den Einfluss des Betreuers auf den Lernerfolg.

Das Interesse am Experiment selber, die Motivation und die Vorkenntnisse in Physik waren bei den Praktikanten sehr unterschiedlich. Aus diesem Grunde konnte die Betreuung der verschiedenen Praktikumsgruppen nicht standardisiert werden. Außerdem sollte, um den größtmöglichen Lernerfolg bei den verschiedenen Praktikumsgruppen zu erreichen, die Betreuung individuell erfolgen.

Vor der Durchführung des Experimentes gibt es bei den Praktika, in denen die Experimente angeboten wurden, ein Kolloquium. In diesem sollen die Studenten entweder frei oder durch detaillierte Fragen der Betreuer ihr Wissen über das Experiment mit der zugehörigen Theorie äußern. Diese Befragung dient dazu, dass Wissen der Praktikanten zu testen, damit diese das jeweilige Experiment nicht nur „stur“ abarbeiten, sondern auch verstehen, welche Zusammenhänge dabei erarbeitet werden. Diese Befragung konnte für die untersuchten Experimente standardisiert werden. Dazu wurden vorgefertigte Fragen entwickelt, die von den Praktikanten teilweise mit Hilfe des Betreuers beantwortet wurden. Diese Fragen umfassen die Bereiche Theorie, Durchführung und Auswertung des Experimentes.

Der Zeitpunkt des Verteilens der Fragebögen und die zugehörigen Erklärungen des Betreuers konnten standardisiert werden. Somit kam es dadurch zu keiner Beeinflussung der Ergebnisse.

6.2.2 Betreuung „vor Ort“

Die Betreuung „vor Ort“ läuft nach folgendem Schema ab: Meistens werden mehrere Zweiergruppen, die das gleiche oder ein inhaltlich ähnliches Experiment durchführen, von einem einzigen Betreuer betreut. In diesem Fall war es so, dass meistens zwei Zweiergruppen, die eine, die das traditionelle Experiment durchführte und die andere, die das rechnergestützte Experiment bearbeitete, von einem Betreuer betreut werden. Teilweise war nur eines der Experimente belegt, aber diese Fälle waren verschwindend gering und glichen sich aus, wie Tabelle (7.2) zeigt.

Vor Beginn der Durchführung erhielten die Praktikanten eine kurze Erklärung über das Projekt „Physik 2000“ und die Evaluation der Experimente.

Vor der Durchführung des Experimentes wurde das physikalische Verständnis des Experimentes und der Durchführung des Experimentes bei beiden Praktikumsgruppen gleichzeitig in einem Gespräch überprüft. Bei dieser Überprüfung wurde „vor Ort“ eine Tafel zu Hilfe genommen, an die Skizzen und Diagramme gezeichnet werden konnten. Von Vorteil ist hier, dass alle Praktikanten und der Betreuer an einer Tafel arbeiten. Somit können Diagramme von allen verbessert und vervollständigt werden.
Bei dieser Art der Betreuung kann im Kolloquium die Mimik und Gestik der einzelnen Personen gut gesehen werden. Somit kann der Betreuer besser einschätzen, ob seine Frage verstanden wurden und wie die Praktikanten darauf reagieren. Desweiteren kann er feststellen, ob Antworten verstanden wurden oder ob noch Fragen offen geblieben sind. Mit der eigenen Körpersprache kann der Betreuer für das Experiment begeistern und so die Praktikanten motivieren. Leise oder zögerliche Antworten können vom Betreuer wahrgenommen werden. Diese können dann aufgenommen und auf Richtigkeit überprüft werden. Somit kann aus einer falschen Antwort die richtige entwickelt werden.

Bei dieser Art der Betreuung können die Praktikanten auf Fragen antworten oder selbst Fragen stellen, indem sie zeigen, skizzieren oder erklären. Dabei ist auffällig, dass die Praktikanten Schwierigkeiten haben sich sprachlich korrekt auszudrücken. Deshalb skizzieren oder zeigen sie Sachverhalte, um ihre Erklärungen und Fragen verständlich zu machen. Desweiteren verstehen sie Sachverhalte besser, wenn sie nicht nur erklärt, sondern auch vorgeführt werden.

Bei der Betreuung mehrerer Gruppen kann der Fall eintreten, dass der Betreuer nicht immer für Fragen zur Verfügung steht, da er Fragen der anderen Gruppe beantwortet. Im Praktikum waren die Experimente außerdem derart aufgebaut, dass eine Praktikumsgruppe den Arbeitsplatz der anderen während der Durchführung nicht einsehen konnte; in Bochum und Wuppertal waren die Experimente sogar räumlich getrennt. Dieses sollte verhindern, dass die Gruppe, die das rechnergestützte Experiment durchführte, zusätzliche Informationen über den Aufbau erhielt. Außerdem erhält die Praktikumsgruppe des traditionellen Experimentes keine zusätzlichen Informationen vom Bildschirm. Das Betreuen mehrerer Praktikumsgruppen und das Trennen der Experimente hat zur Folge, dass einige Fragen nicht oder nur verspätet beantwortet werden können oder dass bei größeren Problemen die Praktikanten warten müssen, bis sie weiterarbeiten können. Ein positiver Effekt dieser Betreuung ist aber, dass die Praktikanten in der Wartezeit teilweise selbst die Lösung der Probleme erarbeiten konnten.
Ein weiterer Vorteil dieser Betreuungsart ist, dass die Praktikanten sich nicht immer

beobachtet fühlen, da sie genau wissen, wo der Betreuer ist und was er gerade macht. Diese Art der Betreuung ist aus der Schule bekannt und somit Gewohnheit, was für die Konzentration der Praktikanten auf das Experiment von Vorteil ist .

6.2.3 Betreuung über das Internet

Dieser Abschnitt beschreibt die Betreuung des rechnergestützten Experimentes über das Internet in zwei Teilen: Im ersten Teil werden die technischen Geräte und der hier verwendete Aufbau vorgestellt. Im zweiten Teil wird die Durchführung des Experimentes diskutiert.

Arbeitsplätze für die Betreuung über das Internet

Eine Skizze der Anordnung der Geräte, die für die Betreuung des Experimentes über das Internet verwendet wurden, ist in Abbildung (6.1) dargestellt.

In Abbildung (6.1) ist zu erkennen, dass eine Videokonferenzanlage im Raum der Praktikanten die Bild- und Toninformation aufnimmt, ein Bild des Aufbaus der Anlage ist in Abbildung (6.2) dargestellt. Der Vorteil der Videokonferenzanlage gegenüber einer Web-Cam ist neben der besseren Bildaufnahme auch die externe Steuerung der Anlage. Dadurch kann der Betreuer, der nicht im Raum des Experimentes anwesend ist, die Kamera der Anlage schwenken und so das benötigte Bild einstellen. Dies war notwendig, da bei diesem Experiment Tafel und Arbeitsplatz auf verschiedenen Seiten des Raumes lagen. Vor allem während des Kolloquiums aber auch später während der Durchführung musste das Bild zwischen Arbeitsplatz und Tafel gewechselt werden.
Für eine bessere Tonqualität wurde bei der Aufnahme des Tones ein Tischmikrophon verwendet. Die Toninformation wurde über die Videokonferenzanlage übertragen, die die Schnittstelle zum Internet darstellt.

Ein Problem bei einer Videokonferenz ist der Augenkontakt zwischen den verschiedenen Personen der Konferenz. Dieser kann nicht hergestellt werden, da das Objektiv der Kamera und der Fernsehers, mit Hilfe dessen die Praktikanten den Betreuer sehen konnten (siehe Abbildung (6.2)), nicht an einem Ort sind. Dadurch kann ein Teilnehmer entweder in die Kamera oder zum Fernseher blicken. Ist der Blick Richtung Fernseher gerichtet sieht es so aus, als ob die Teilnehmer sich nicht anblicken würden. Bei Blickrichtung in die Kamera kann der teilnehmende Konferenzpartner nicht wahrgenommen werden. Die Regel bei einer Videokonfernz ist, dass der Redner in die Kamera blickt, obwohl er dadurch nur schlecht oder gar keine Rückkopplung seiner Zuhörer sieht, und die Zuhörer den Redner ansehen (siehe hierzu [Kom03]). Bei diesem Aufbau war direkt unter der Kamera der Videokonferenzanlage das Fernsehgerät aufgebaut, wie in Abbbildung (6.1) der kleine Ausschnitt rechts oben zeigt. Dieses hält die Diskrepanz zwischen Aufnahme- und Wiedergabepunkt gering.

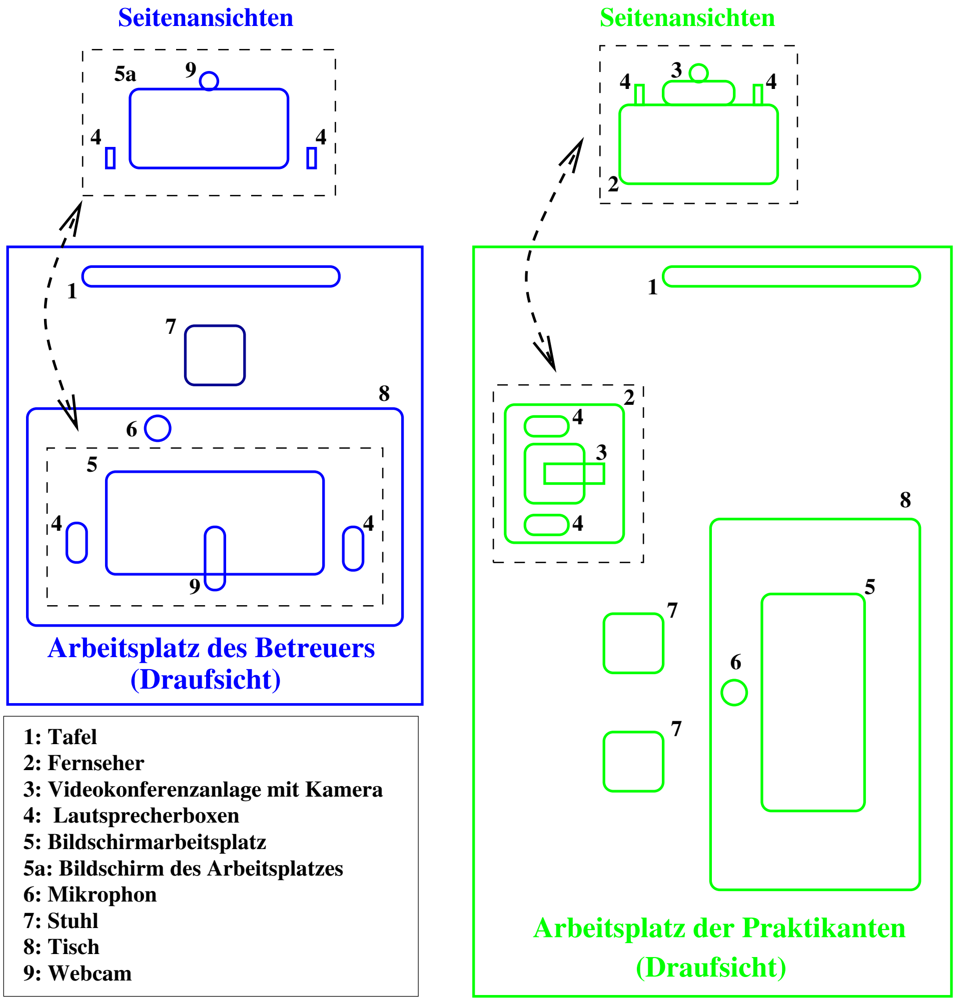


Abbildung 6.1: Links: Arbeitsplatz des Betreuers bei der Betreuung über das Internet. Rechts: Arbeitsplatz der Praktikanten für das internetbetreute Experiment.

Der Betreuer wurde mit Hilfe einer Webcam (siehe Abbbildung (6.1)), die sich direkt über dem Rechnerbildschirm befand, aufgenommen. Hinter dem Betreuer war die Tafel aufgebaut, so dass die Kamera nicht geschwenkt werden musste. Es reichte, wenn der Betreuer sich aus dem Bild entfernte.
Die Toninformation des Betreuers wurde über ein Mikrophon aufgenommen.

Sehen konnte der Betreuer die Praktikanten über seinen Bildschirm, indem ein spezielles Programm eine Verbindung zur Videokonferenzanlage herstellte. Somit waren der Sender und der Empfänger der Bildinformation in ihrer optimalen Position wieder räumlich übereinander.

Abbildung 6.2: Aufbau der Videokonferenzanlage und des Fernsehers für die Kommunikation zwischen Praktikanten und Betreuer.

Der Export der Bildschirmoberfläche des Praktikumsrechners auf den Rechner des Betreuers war für die Betreuung sehr wichtig. Hierfür wurde ein kommerzielles Programm benutzt, welches außerdem den Mauszeiger exportierte. Desweiteren konnte über die Tastatur und Maus des Betreuers der Praktikumsrechner vollständig gesteuert werden, was den Vorteil hat, dass bei Fragen und Problemen der Betreuer den Rechner von fern steuern kann. Außerdem war eine Erklärung der Programmoberfläche mit Hilfe des Mauszeigers sehr gut möglich. Fragen zu speziellen Punkten der Messkurve oder bei der Auswertung konnte dadurch sehr einfach gestellt und beantwortet werden, da beide Seiten den gleichen Bildschirminhalt hatten.

Betreuung des Experimentes

Der Aufbau des rechnergestützten Experimentes war nur einmal vorhanden. Aus diesem Grund wurde bei dieser Art der Betreuung nur eine Zweiergruppe während eines Praktikumstermins betreut.

Zu Beginn erhielten die Studenten eine kurze Einführung zum Projekt „Physik 2000“ und zu der Evaluation der Experimente. Danach wurden die Regeln für die Kommunikation über eine Videokonferenzanlage erklärt. Hierbei wurde besonders auf die

Verzögerung der Sprache eingegangen, sowie auf teilweise vorhandene Probleme mit der Tonqualität. Nach Klärung dieser Sachverhalte wurden die Fragebögen verteilt. Ab der Verteilung der ersten Fragebögen bis zum Verteilen der zweiten Fragebögen wurde das Experiment online betreut, das heißt der Betreuer und Praktikanten konnten nur über den in Abbildung (6.1) dargestellten Aufbau miteinander kommunizieren konnten.

Aufgrund der räumlichen Trennung bei dieser Art der Betreuung konnten Praktikanten und Betreuer nicht auf ein und dieselbe Tafel schreiben. Aus diesem Grund war in jedem Raum eine Tafel angebracht (siehe Abbildung (6.1)), damit die Praktikanten und der Betreuer während des Kolloquiums und der Durchführung des Experimentes Zeichnungen anfertigen konnten. Dieses erschwerte das Kolloquium, weil Zeichnungen nicht gemeinsam entwickelt und nur verbal verändert werden konnten.

Die verbale Betreuung verlief genauso wie bei der Betreuung „vor Ort“. Durch die Kommunikation über das Internet kommt es aber zu einer Verzögerung der Übertragung. Dieses muss bei eventuellen Fragen berücksichtigt werden. Eine Antwort kann nicht sofort erfolgen, da Frage und Antwort verzögert übertragen werden. Durch diese Verzögerung kommt es vor, dass Betreuer und Praktikant gleichzeitig reden. Hier wurde die Absprache getroffen, dass immer der Praktikant weiter redet und der Betreuer wartet.

Die Körpersprache wird über die Videokonferenzanlage nur unzureichend und verzögert übertragen. Dadurch werden diese Reaktionen auf Fragen und Antworten nur verspätet oder gar nicht wahrgenommen. Dieses verschlechtert die Kommunikation. Die Kamera war so eingestellt, dass die Praktikanten von der Seite zu sehen waren, wenn sie am Rechner arbeiteten. Dadurch wurde der Blickwinkel des Betreuers auf die Studenten wie bei der Betreuung „vor Ort“ erhalten. Aus dieser Blickrichtung konnte der Betreuer nicht die Gesichter der Praktikanten sehen, wenn diese auf die Bildschirmoberfläche blickten. Dieses führte häufiger zu Nachfragen, was den Ablauf des Experimentes teilweise störte.

Bei dieser Art der Betreuung wird die gesamte Bildschirminformation des Praktikumsrechners auf den den Betreuers exportiert. Dieses ist ein großer Vorteil dieser Betreuungsart, weil dadurch der Betreuer alle Informationen des jeweiligen Aufgabenteils des Experimentes übersichtlich auf dem eigenen Bildschirm zur Verfügung hat. Desweiteren kann der Betreuer den genauen Fortschritt des Praktikums verfolgen. Fehler können sofort erkannt werden und Hilfestellung kann bei Bedarf erfolgen. Außerdem können Fehler gut analysiert werden. Dadurch erhalten die Praktikanten nicht nur eine Lösung des Problems, sondern zusätzlich eine Analyse des Fehlers, woraus man noch mehr lernen kann.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Betreuung eines rechnergestützten Experimentes über das Internet mit dem in Abschnitt (6.2.3) vorgestellten Aufbau gut durchzuführen ist. Die Videokonferenzanlage ist dabei für die Kommunikation zwischen Praktikant und Betreuer zuständig. Mit Hilfe des Mauszeigers der exportierten Bildschirmoberfläche kann der Betreuer seine Erklärungen unterstreichen, ähnlich als ob er im Praktikumsraum anwesend wäre. Fragen, die sich auf Sachverhalte der Bildschirmoberfläche beziehen, können außerdem mit Hilfe des Mauszeigers dem Betreuer verdeutlicht werden. Somit stehen beiden Seiten alle Möglichkeiten für eine gute Verständigung zur Verfügung.

6.3 Persönliche Erfahrungen aus der Durchführung der Versuchsreihe

Im Folgenden werden die Erfahrungen, die während der Durchführung der Versuchsreihe gemacht wurden, beschrieben. Diese Erfahrungen sind in zwei Abschnitte unterteilt. Im ersten geht es um allgemeine Erfahrungen mit dem Rechnereinsatz im Praktikum, im zweiten erfolgt ein Bericht über die Erfahrungen bei der Betreuung über das Internet.

6.3.1 Erfahrungen mit dem Rechnereinsatz im Praktikum

Vor der Durchführung des Experimentes waren die Praktikanten skeptisch. Sie konnten sich ein Experiment, welches nur am Rechner durchgeführt wird, nicht vorstellen. Während der Durchführung schwand diese Skepsis. Nach der Durchführung waren die Praktikanten vom Sinn dieses Experimentes überzeugt. Die allgemeine Meinung der Praktikanten war, dass ein Praktikum nicht ausschließlich aus rechnergestützten Experimenten bestehen soll, diese Art des Experimentes aber auch im Praktikum vertreten sein sollte.
Aus der Anleitung zu dem Experiment geht hervor, dass dies ein reales Experiment ist, welches über den Rechner gesteuert wird. Die Praktikanten konnten dies meistenteils nicht verstehen. Es wurde häufig gefragt, warum die Messungen so lange dauern und warum nicht sofort die fertige Messkurve zu sehen sei. Nach der Erklärung, dass sie eine normale Messung durchführen und keine vorgefertigten Daten erhalten, stieg die Motivation der Praktikanten. Dies rechtfertigte die Entscheidung ein reales Experiment über das Internet zu bedienen und nicht nur Daten aus einer Datenbank abzurufen.

Häufiger war zu beobachten, dass nur einer der beiden Praktikanten den Rechner bediente, was zur Folge hatte, dass nur der am Rechner arbeitende Praktikant das Experiment durchführte, während sein Partner nur dabei saß. Der Betreuer versuchte in diesen Fällen durch verschiedene Fragen an die Praktikumsgruppe den passiven Praktikanten wieder in die Durchführung mit einzubeziehen.
Zu dieser ausgeprägten dominanten Stellung eines einzelnen Praktikanten kam es meistens, wenn eine Praktikantin und ein Praktikant zusammen das Experiment durchführten. Dabei war der männliche Praktikant meistens dominant gegenüber

dem weiblichen. Zu diesem Ungleichgewicht kann es kommen, da abhängig vom Geschlecht die Praktikanten eine unterschiedliche Vorgehensweise zeigten.
Gruppen mit ausschließlich männlichen Praktikanten experimentierten viel und führen teilweise auch „unsinnige“ Messungen aus. Dieses verstärkte Ausprobieren führt zu einer relativ großen Anzahl an Messungen, die wiederholt wurden.
Gruppen mit ausschließlich weiblichen Praktikanten führten auffällig weniger Messungen durch. Bei diesen Gruppen wurde vor dem Start der Messung sehr genau überlegt, ob die eingestellten Parameter sinnvoll waren. Dabei kam es auch häufiger zu einer Diskussion mit dem Betreuer über die Einstellungen. Es hatte den Anschein, als wollten sie nichts falsch machen.
Bei gemischten Praktikumsgruppen lag die Anzahl der Messungen, die wiederholt wurden, in dem Bereich der Gruppen mit ausschließlich männlichen Praktikanten. Dadurch wird die oben beschriebene beobachtete Dominanz des männlichen Praktikanten bestätigt.
Wenn die Kenntnisse im Umgang mit dem Rechner sehr unterschiedlich waren, entstand häufig auch ein Ungleichgewicht bei der Bearbeitung des Experimentes. Teilweise war es so, dass Praktikanten, die sich mit Rechnern auskannten, ihre Partner dominierten. Aber auch Praktikanten, die starken Respekt vor Rechnern hatten, ließen gern ihre Partner allein arbeiten und sahen nur zu. Bei solchen Gruppen war es sehr schwierig, den schwächeren Partner in die Durchführung mit einzubeziehen.

Positiv bei diesem Experiment war, dass sehr viel Zeit für die Auswertung und Diskussion der Graphen und Ergebnisse zur Verfügung stand. Zum einen wurde gesehen, wie die Graphen sich entwickelten; in der Zeit konnte bereits darüber diskutiert werden. Zum anderen mussten bereits während der Durchführung Messdaten ausgewertet werden, weil die Ergebnisse für spätere Aufgabenteile gebraucht wurden (Parameter für die Simulation). Somit beschäftigten sich die Praktikanten intensiver mit der Thematik.
Durch diese verstärkte Beschäftigung mit den Graphen konnten die Studenten am Ende der Durchführung ihre Ergebnisse sprachlich besser darstellen. Sie hatten gelernt, über physikalische Sachverhalte in korrekter Terminologie zu diskutieren.

6.3.2 Erfahrungen mit der Betreuung über das Internet

Die Erfahrungen bei der Betreuung über das Internet können in zwei Abschnitte unterteilt werden. Der erste Abschnitt behandelt Erfahrungen, die während der Betreuung gemacht wurden, aber nicht direkt den Praktikanten betreffen, in dem zweiten geht es um die Erfahrungen bei der Betreuung selbst.

Erfahrungen, die nicht direkt den Praktikanten betreffen

Eine wichtige Erfahrung war, dass in dem Raum des Betreuers keine andere konzentrierte Arbeit möglich war. Der Raum, in dem der Betreuer saß, ist normalerweise ein Büro für drei Personen. Während der Durchführung des Experimentes konnten die anderen beiden Personen aufgrund der Lautstärke nicht ihrer normalen Arbeit nachgehen. Auch in dem Raum der Praktikanten war auf Grund der Lautstärke nur ein eingeschränktes Arbeiten möglich. Zu der erhöhten Lautstärke kam es aufgrund der schlechten Tonqualität. Die Lautsprecher waren deshalb relativ laut eingestellt. Desweiteren war das Reden lauter als bei einem normalen Gespräch.

Für den Aufbau eines internetgestützten Experimentes war die Erkenntnis wichtig, dass das Internet nicht kontinuierlich stabil ist. Während der Durchführung der Experimente kam es vor, dass die Internetverbindung unterbrochen wurde. In diesen Fällen war es von Vorteil, dass nicht direkt die Messgeräte über den Praktikumsrechner gesteuert wurden, sondern dass ein Rechner am Ort des Experimentaufbaus dieses übernahm. Wurde die Internetverbindung unterbrochen, so kam es zu keinem Abbruch des Messung und auch alle Daten waren gesichert. Es empfiehlt sich also keine direkte Steuerung der Messgeräte, sondern die Steuerung über einen zusätzlichen Rechner.

Die Betreuungszeit für ein Experiment konnte durch den Einsatz des Rechners im Praktikum nicht verringert werden. Bei der Evaluation konnte nur ein Experiment betreut werden. Dies muss aber nicht so sein. Es könnten, bei ausreichend vorhandenen Aufbauten, mehrere Experimente von einem Betreuer über das Internet betreut werden. Auch wäre es denkbar, dass ein Betreuer gleichzeitig Experimente „vor Ort“ und über das Internet betreut. Die Betreuung über das Internet ermöglicht keine Steigerung der Zahl der Experimente, die ein Betreuer betreuen kann.

Bei einer Betreuung über das Internet sind für eine optimale Durchführung zusätzlich weitere Personen erforderlich. Eine Person muss den Praktikanten „vor Ort“ eine Einführung über die Kommunikation über eine Videokonferenzanlage geben. Außerdem muss dieser Betreuer sicherstellen, dass auch die richtigen Praktikanten das Experiment durchführen. Desweiteren muss eine Person in der Nähe des Ortes sein, an dem das Experiment aufgebaut ist. Bei der Durchführung kam es teilweise vor, dass der die Messgeräte steuernde Rechner Betriebssystemfehler aufzeigt oder sogar abstürzt. Auch die Messgeräte können zwischendurch ausfallen oder müssen neu gestartet werden. Aus diesem Grund ist es wichtig, dass in der Nähe des Experimentaufbaus eine Ansprechperson zur Verfügung steht.

Erfahrungen bei der Durchführung

Die meisten Praktikanten hatten ein Problem mit der Kommunikation über die Videokonferenzanlage. Es war für eine gewisse Überwindung nötig, mit einer Person zu reden, die nur auf dem Bildschirm zu sehen war.

Die Kamera der Videokonferenzanlage war während der Durchführung auf die Praktikanten gerichtet. Einige der Praktikanten äußerten, sie fühlten sich dadurch beobachtet. Es wäre ein Unterschied einen Betreuer vor Ort zu haben, den die Praktikanten

beobachten können, dadurch hätten sie das Gefühl, freier arbeiten zu können. Dieses Gefühl hatten aber einige Praktikanten nicht, auch nach der Versicherung, dass sie nicht andauernd beobachtet werden würden, sondern nur wenn sie Fragen stellen, oder der Betreuer sich meldet, würde das Bild der Videokonferenzanlage betrachtet. Die meisten Praktikanten verhielten sich schon ab Ende des Kolloquiums wie bei den üblichen Experimenten. Teilweise wurden sogar, während die Messungen liefen, Gespräche über Vorlesungen geführt. Diese Praktikanten fühlten sich unbeobachtet und hatten keine Probleme mit der Art der Betreuung.
Insgesamt ist diese Art der Betreuung nach anfänglicher Skepsis gut angenommen worden. Für die Studenten wäre es sicherlich einfacher, wenn nicht nur ein Experiment während des Studiums auf diese Art und Weise durchgeführt würde, sondern wenn die Kommunikation über das Internet bei mehreren Experimenten und bei anderen Veranstaltungen, wie zum Beispiel Vorlesungen, eingesetzt werden könnte.

Ein Nachteil dieser Betreuung gegenüber der Betreuung vor Ort ist die schlechtere und verzögerte Beobachtung der Körpersprache. Dadurch kann die Reaktion auf eine Frage bzw. Antwort nur ungenau eingeschätzt werden. Dies führt zu einer schlechteren Kommunikation mit häufigeren Rückfragen. Außerdem kann dadurch die Stimmungslage der Studenten schlechter beurteilt werden. Probleme der Studenten werden teilweise nicht schnell genug erkannt, weshalb es zu Frustrationen kommen kann.
Die durch die Körpersprache des Betreuers ausgedrückte Motivation und das Interesse am Experiment kann der Praktikant nicht wahrnehmen. Vom Praktikanten kann der Eindruck gewonnen werden, der Betreuer habe kein Interesse an der Betreuung des Experimentes hat. Dies kann dann zu einer Demotivation des Praktikanten führen. Deshalb sollte bei der Erklärung der Regeln bei einer Videokonferenz erwähnt werden, dass die Körpersprache schlechter bzw. verzögert übertragen wird.

Bei dieser Art der Betreuung kommt es zu ausführlicheren, verbalen Erklärungen. Während des Kolloquiums benutzten die Praktikanten ihre Tafel seltener als bei der Betreuung „vor Ort“. Sie versuchten Skizzen und Graphen zu beschreiben, wobei eine mangelnde Fähigkeit, physikalische Sachverhalte zu beschreiben, zu bemerken war. Zeichnete der Betreuer diese Beschreibungen an die Tafel, so erkannten sie, dass die Beschreibungen teilweise unzureichend waren. Nach mehreren Verbesserungen sahen sie meist ein, wie eine Beschreibung eines Graphen aufgebaut sein müßte. Dies war während der Durchführung von Vorteil, da die Praktikanten auch hier die Graphen beschreiben und dabei dann auf Besonderheiten hinweisen konnten.

Kapitel 7

Darstellung der Ergebnisse

Dieses Kapitel untergliedert sich in vier Abschnitte. Im ersten werden die Ergebnisse des Vortests, der zum Prüfen des Fragebogens durchgeführt wurde, vorgestellt. Die Grundgesamtheit der Studenten dieser Untersuchung wird im zweiten Teil dargestellt. Im dritten Abschnitt wird dann der Lernerfolg in Abhängigkeit von der Art des Experimentes diskutiert; zusätzlich wird dabei auch die Abhängigkeit von der Studiumsrichtung der Praktikanten betrachtet. Der letzte Abschnitt dieses Kapitels diskutiert die Korrelation zwischen den Fragen des Fragebogens, den Zusatzfragen sowie den Zusatzinformationen aus dem Kopf des Fragebogens mit der Anzahl der jeweils richtig beantworteten Fragen.

7.1 Prä-Test

Die Voruntersuchung soll den Fragebogen, der das Wissen zu den verschiedenen Zeitpunkten ermittelt, überprüfen. Dazu wurde der Fragebogen unterschiedlichen Gruppen zur inhaltlichen Überprüfung gegeben (siehe Abschnitt (5.2.1)). Hier soll nun die Auswertung des Prä-Tests nach der inhaltlichen Überprüfung betrachtet werden.

Art der Gruppen	Anzahl der Personen	Mittlere %-Zahl der richtigen Antworten	Schwankung [%]
Experten	12	69	9
Laien	15	34	3
Alle	27	46	5

Tabelle 7.1: Statistik der Voruntersuchung. Experten: Physiker, deren Arbeitsgebiet inhaltlich mit dem der Experimente zusammenfällt; Laien: Physiker, die inhaltlich auf einem anderen Gebiet arbeiten.

Die Statistik des Prä-Tests ist in Tabelle (7.1) zu sehen. Darin ist zu erkennen, dass insgesamt 27 Personen beim Prä-Test den Fragebogen ausgefüllt haben. Davon waren 12 Physiker, deren Arbeitsbereich die Themen des Experimentes abdeckt; diese Personen werden als Experten angesehen. Die 15 Laien sind Physiker, die inhaltlich auf einem anderen Gebiet arbeiten. Weiter ist in der Tabelle zu erkennen, dass die Experten mehr als doppelt soviele Fragen wie die Laien richtig beantworten. Somit ist der Fragebogen sensitiv auf den physikalischen Inhalt.

Zur Überprüfung der Reliabilität des Fragebogens wurde der Cronbach α-Koeffizient berechnet (siehe Abschnitt (5.2.1) und Anhang (D.1)). Der Wert des Koeffizienten beträgt

$$\alpha = 0.90 \ . \tag{7.1}$$

Dieses bedeutet, dass der Fragebogen eine hohe Gültigkeit besitzt.

Aufgrund dieser Auswertung kann der Fragebogen, der in Anhang (C) dargestellt ist, als geeignet angesehen werden, das Wissen der Praktikanten zu den verschiedenen Zeitpunkten zu ermitteln.

7.2 Statistik der Grundgesamtheit

Statistik der Versuchsdurchführung

In Tabelle (7.2) ist zu erkennen, das insgesamt 222 Personen an der Untersuchung teilnahmen. Desweiteren erkennt man, dass nahezu gleichviele Praktikanten das traditionelle und das rechnergestützte Experiment bearbeitet haben. Diese Verteilung ist nicht zufällig, da die Studenten gleichmäßig auf die Experimente aufgeteilt wurden (siehe Abschnitt (6.1)). Die unterschiedlichen Verhältnisse von männlichen zu weiblichen Praktikanten bei diesen beiden Experimentarten sind rein zufällig, da bei der Einteilung auf die Experimente nicht auf das Geschlecht geachtet wurde. Ein höherer Anteil an männlichen Praktikanten erklärt sich durch einen höheren Anteil an männlichen Studenten in den jeweiligen Fachbereichen. Eine Ausnahme hiervon bilden die Medizin-Studenten

Die Anzahl der Studenten, die das internetbetreute Experiment durchgeführt haben, ist geringer als die der anderen Gruppen. Der Unterschied ist dadurch entstanden, dass Praktikanten von nur zwei Studienrichtungen (siehe Abbildung (7.1) und Tabelle (7.3)) das internetbetreute Experiment durchgeführt haben. Diese beiden Studienrichtungen wurden absichtlich ausgewählt, da bei diesen der größte Unterschied in der Entwicklung zwischen traditionellem und rechnergestützten Experiment zu sehen war (siehe Abschnitt (7.3.1)).

In Tabelle (7.3) ist die Anzahl der teilgenommenen Studenten nach Experimentart und der Studienrichtungen untergliedert.

Art des Experimentes	weiblich	männlich	Gesamt
traditionell	38	48	86
rechnergestützt	28	60	88
internetbetreut	17	31	48
gesamt	83	139	222

Tabelle 7.2: Anzahl der Praktikanten unterteilt nach der Art des Experimentes und dem Geschlecht.(traditionell: traditionelles Experiment, vor Ort betreut; rechnergestützt: rechnergestütztes Experiment, vor Ort betreut; internetbetreut: rechnergestütztes Experiment, über das Internet betreut)

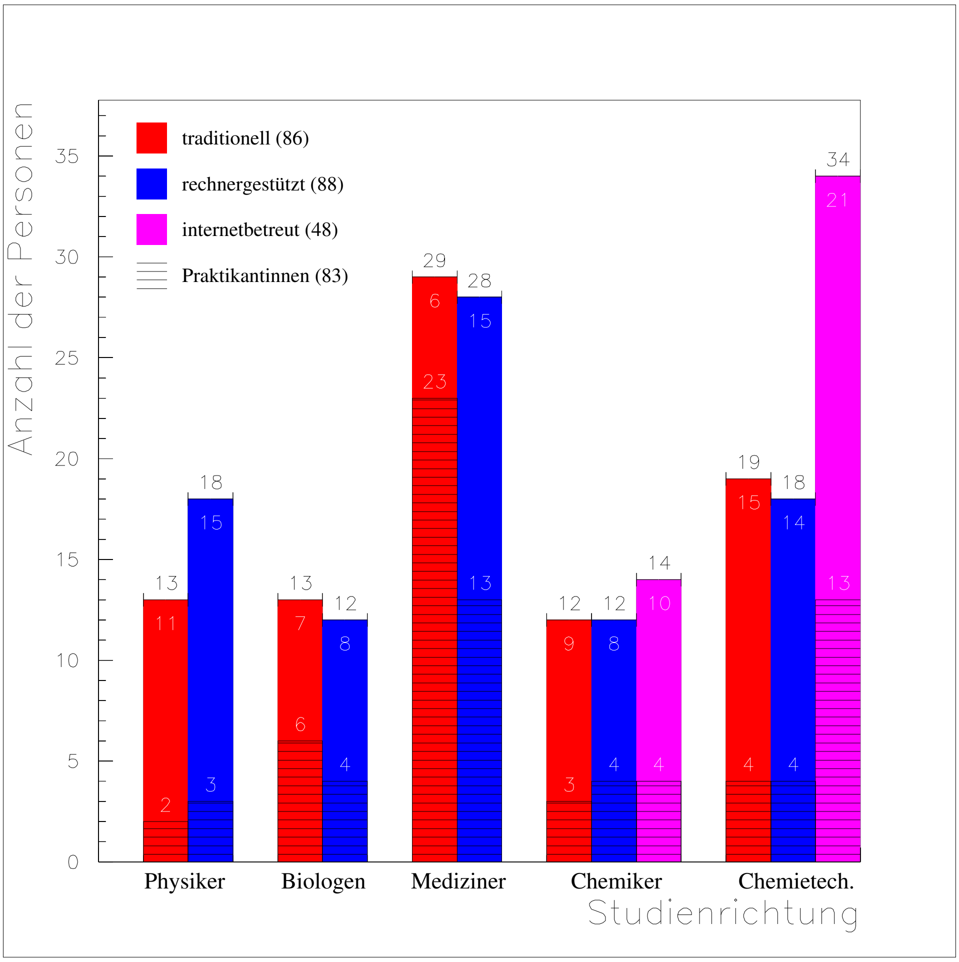


Abbildung 7.1: Anzahl der Praktikanten unterteilt nach der Art des Experimentes und dem Geschlecht.

Art des Versuches	Art des Studiums	weiblich	männlich	Gesamt
traditionell	Physik	2	11	13
	Chemie	3	9	12
	Chemietechnik	4	15	19
	Biologie	6	7	13
	Medizin	23	6	29
rechnergestützt	Physik	3	15	18
	Chemie	4	8	12
	Chemietechnik	4	14	18
	Biologie	4	8	12
	Medizin	13	15	28
internetbetreut	Chemiker	4	10	14
	Chemietechniker	13	21	34

Tabelle 7.3: Anzahl der Praktikanten unterteilt nach der Art des Experimentes, der Studienrichtung und dem Geschlecht.(traditionell: traditionelles Experiment, vor Ort betreut; rechnergestützt: rechnergestütztes Experiment, vor Ort betreut; internetbetreut: rechnergestütztes Experiment, über das Internet betreut)

In der Tabelle ist zu erkennen, dass die Anzahl der Praktikanten, die das traditionelle oder rechnergestützte Experiment durchgeführt haben, fast homogen auf die Fachbereiche verteilt ist. Eine Ausnahme bilden die Medizinstudenten, die deutlich stärker vertreten sind. Diese Studienrichtung bildet auch die einzige Ausnahme im Verhältnis der Geschlechter. Beim traditionellen Experiment absolvierten hier deutlich mehr Praktikantinnen als Praktikanten das Experiment.

Bei dem internetbetreuten Experiment sind die beiden Studienrichtungen nicht homogen vertreten. Die Anzahl der Studenten der Chemietechnik ist mehr als doppelt so groß im Vergleich zu den Chemikern (vgl. Tabelle (7.3)). Der Grund für dieses Ungleichgewicht liegt an der sehr viel größeren Anzahl von Studenten des Fachbereichs Chemietechnik.

Eine graphische Darstellung der Tabelle (7.3) ist in Abbildung (7.1) zu sehen.

Ausfüllquote des Fragebogens am Ende des Praktikums

Die Anzahl der Praktikanten, die den Fragebogen am Ende des Praktikums ausgefüllt haben, ist in Tabelle (7.4) zusammengefasst und in Abbildung (7.2) graphisch dargestellt.

In Abbildung (7.2) ist zu sehen, dass mehr als 60 % der Praktikanten den dritten Fragebogen ausgefüllt haben. Die 40 % der Praktikanten, die den dritten Fragebogen nicht ausgefüllt haben, sind nicht gesondert behandelt worden, sondern waren an

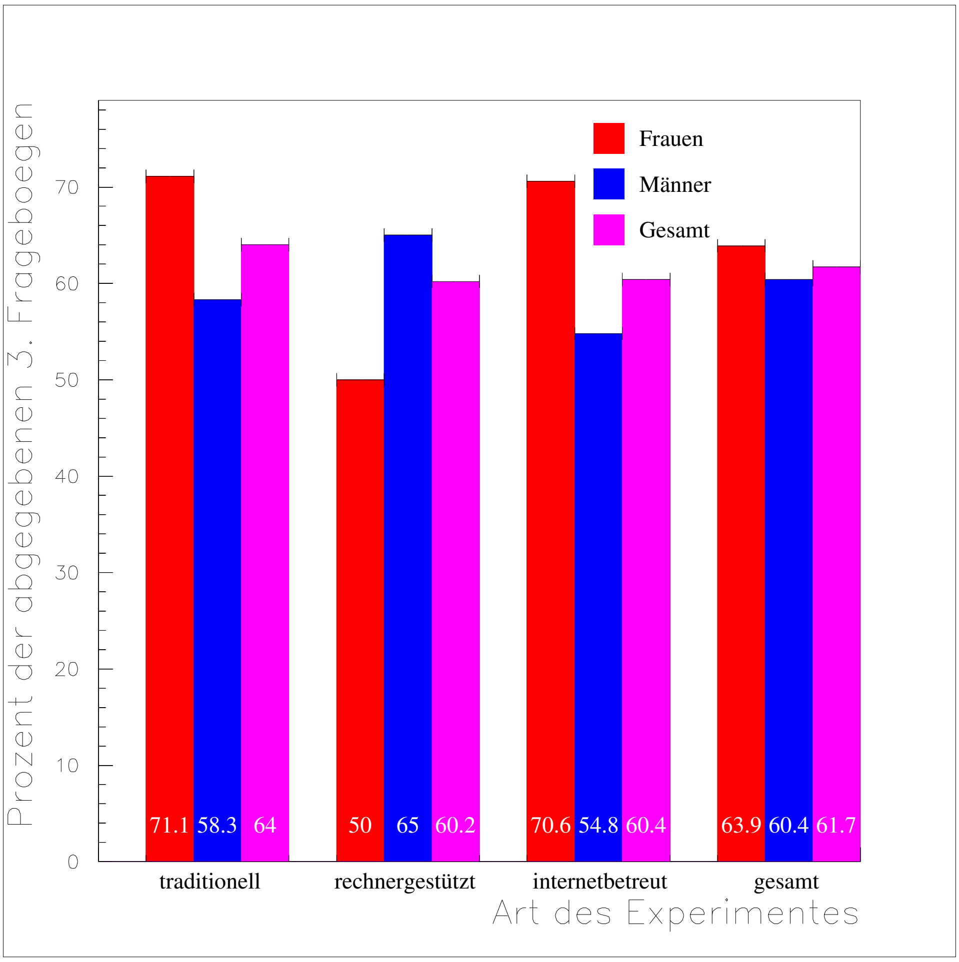


Abbildung 7.2: Anzahl der Praktikanten, die den dritten Fragebogen (am Ende des Praktikums) ausgefüllt haben, unterteilt nach der Art des Experimentes und dem Geschlecht.

dem Tag der Befragung durch Zufall nicht im Praktikum zugegen. Während des Experimentes wurde nicht erwähnt, dass noch ein Fragebogen ausgefüllt werden muss. Dadurch sollte eine unterschiedliche Vorbereitung der Studenten auf diesen dritten Fragebogen vermieden werden, wodurch die Ergebnisse hätten beeinflusst werden können.

Mögliche Gründe für das Fehlen am letzten Befragungszeitpunkt war unter anderem, dass ein Teil der Studenten das Praktikum abgebrochen hatten und somit zur weiteren Befragung nicht mehr zur Verfügung standen. Desweiteren führten am letzten Praktikumstermin, an dem üblicherweise die letzten Fragebögen ausgeteilt wurden, noch einige Praktikanten die Experimente durch. Diese Praktikanten konnten ebenso nicht den dritten Fragebogen ausfüllen.

Weiter ist in Abbildung (7.2) zu erkennen, dass die Rückgabequote fast unabhängig vom Geschlecht und der Art des Experimentes ist. Dies war zu erwarten, da an alle, an dem Tag der Befragung anwesenden, Studenten der Fragebogen ausgeteilt wurde.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Ergebnisse aus dem dritten Fragebogen am Ende des Praktikums verwendet werden können, da die Gesamtstichprobe durch die 60 %, die den letzten Fragebogen ausgefüllt haben, repräsentiert wird.

Art des Versuches	3. Fragebogen	weiblich	männlich	gesamt
traditionell	nein	11	20	31
	ja	27	28	55
rechnergestützt	nein	14	21	35
	ja	14	39	53
internetbetreut	nein	5	14	19
	ja	12	17	29
gesamt	nein	30	55	85
	ja	53	84	137
Insgesamt ausgefüllt (Angabe in %)		63.9 %	60.4 %	61.7 %

Tabelle 7.4: Anzahl der Praktikanten, die den dritten Fragebogen (am Ende des Praktikums) ausgefüllt haben, unterteilt nach der Art des Experimentes und dem Geschlecht.(traditionell: traditionelles Experiment, vor Ort betreut; rechnergestützt: rechnergestütztes Experiment, vor Ort betreut; internetbetreut: rechnergestütztes Experiment, über das Internet betreut)

7.3 Experimentabhängige Lernerfolgsentwicklung

7.3.1 Untersuchung der Gesamtstichprobe

In diesem Abschnitt wird das Wissen der Praktikanten des traditionellen und rechnergestützten Experimentes zu den drei Zeitpunkten dargestellt und miteinander verglichen. Dabei werden zuerst zwei Ergebnisse mit Hilfe des t-Tests in Beziehung gesetzt. Am Ende des Abschnittes wird die zeitliche Entwicklung des Wissensstandes der Studenten mit Hilfe der Varianzanalyse diskutiert. Die mathematischen Grundlagen dieser Auswertemethoden sind im Anhang (D)) beschrieben.

Statistik der richtigen Antworten

Das Wissen der Studenten wurde mit dem in Anhang (C) dargestellten Fragebogen ermittelt. Bei der Auswertung wurde eine Frage entweder als „richtig“ oder als „falsch“

angesehen, eine Zwischenbewertung erfolgte nicht. Die Anzahl der richtigen Antworten (in Prozent), untergliedert nach der Art des Experimentes und dem Zeitpunkt der Befragung, ist in Abbildung (7.3) dargestellt. Die Daten zu diesem Diagramm sind in Tabelle (7.5) angegeben.

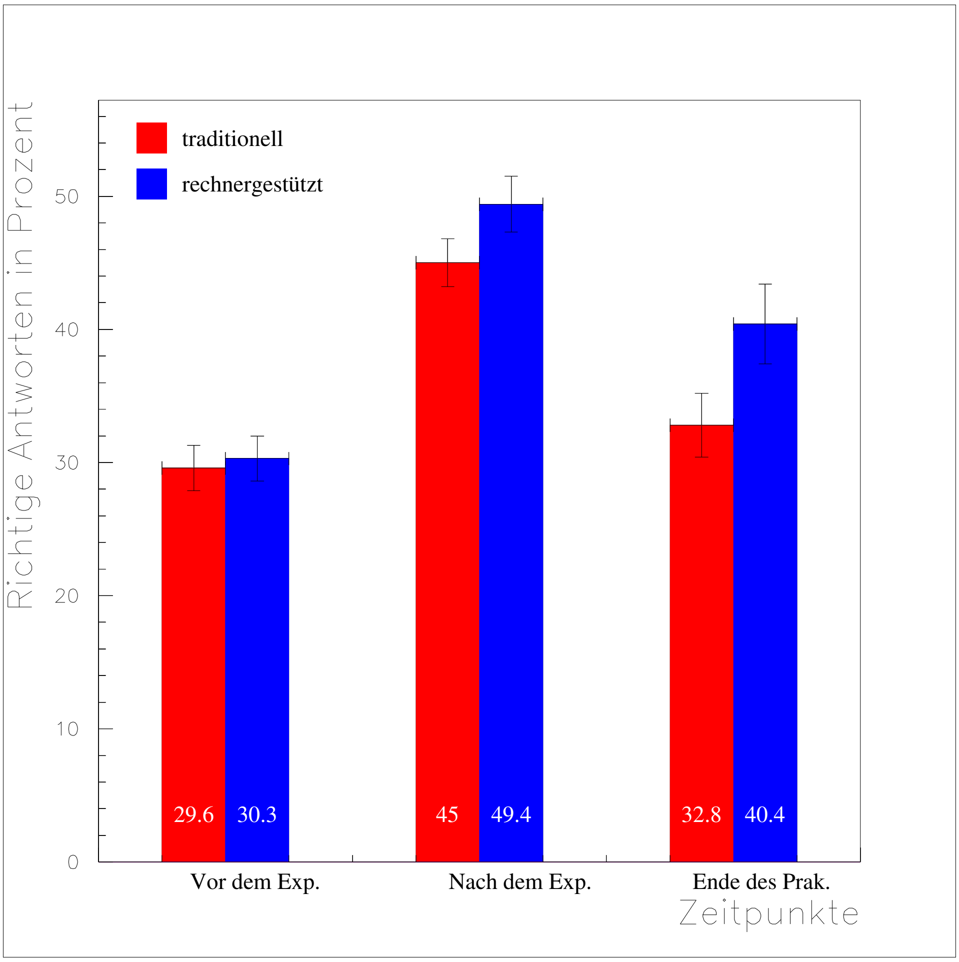


Abbildung 7.3: Anzahl der richtigen Antworten in Prozent, aufgeteilt nach den beiden Experimentarten und Befragungszeitpunkten.

In Abbildung (7.3) ist zu erkennen, dass die beiden Studentengruppen vor der Durchführung des Experimentes, aber nach der eigenständigen Bearbeitung der Anleitung zum Experiment, etwa gleich viel wussten.

Vergleicht man das Wissen der Praktikanten nach dem Experiment miteinander, so ist festzustellen, dass der Unterschied zwischen rechnergestütztem und traditionellem Experiment größer geworden ist.
Der Unterschied zwischen diesen beiden Experimenten ist bei der dritten Befragung,

Art des Experimentes		Zeitpunkte		
		Vor	*Nach*	*Ende*
traditionell	Mittlere %-Zahl d. richtigen Antworten	29.6	45.0	32.8
	Schwankung in %	1.7	1.8	2.4
rechnergestützt	Mittlere %-Zahl d. richtigen Antworten	30.3	49.4	40.4
	Schwankung in %	1.7	2.1	3.0

Tabelle 7.5: Anzahl der richtigen Antworten in Prozent, aufgeteilt nach den beiden Experimentarten und Befragungszeitpunkten.

am Ende des Praktikums, am größten.
Ob die in der Abbildung (7.3) beobachtbaren Wissensunterschiede signifikant sind oder nicht, soll im Folgenden mit Hilfe des t-Tests untersucht werden.

Vergleich des Wissens mit Hilfe des t-Tests

Die Ergebnisse des Mittelwertvergleichs sind in Tabelle (7.6) dargestellt. In der zweiten Spalte steht der Zeitpunkt des Vergleichs. Der t-Wert, der ein Maß für den Unterschied ist, und der DF-Wert, der die Anzahl der Freiheitsgrade angibt, werden in den folgenden Spalten angegeben; näheres zu den Werten findet sich in dem Anhang (D) oder z.B. in [Bor99]. Die t- und DF-Werte werden im Folgenden der Vollständigkeithalber angegeben. Auf diese Wert wird im aber nicht näher eingegangen. In der letzten Spalte steht die Signifikanz dafür, dass die Praktikumsgruppen durchschnittlich gleichviele Fragen richtig beantworteten, oder das Restrisiko, wenn angenommen wird, dass die Mittelwerte unterschiedlich sind. Bei einem Wert kleiner als 5 % wird angenommen, dass das Wissen der Praktikanten zu dem Zeitpunkt unterschiedlich ist.

Vergleich zwischen	Zeitpunkte d. Befragung	Differenz [%]	t	DF	Signifikanz (für Gleichheit)
rech. – trad.	*Vor*	0.67	0.276	172	**0.783**
	Nach	4.35	1.567	172	**0.119**
	Ende	7.58	1.985	106	**0.050**

Tabelle 7.6: Vergleich der Mittelwerte der beiden Experimentarten zu den verschiedenen Zeitpunkten mit Hilfe des t-Tests. (Befragungszeitpunkte Vor: Vor dem Experiment; Nach: Nach dem Experiment; Ende: Am Ende des Praktikums)

In Tabelle (7.6) ist zu erkennen, dass vor dem Experiment kein Unterschied zwischen den Praktikanten zu sehen ist. Nach dem Experiment ist aber ein tendenzieller Unterschied und am Ende des Semesters sogar ein signifikanter Unterschied im Wissen der

Praktikanten festzustellen. Somit konnte der visuelle Eindruck von Abbildung (7.3) bestätigt werden, dass die Praktikanten des rechnergestützten Experimentes zu den letzten beiden Befragungszeitpunkten mehr Fragen richtig beantworten als die Vergleichsgruppe.

Der Wissensvergleich aus Tabelle (7.6) zeigt, dass es vor dem Experiment keinen Wissensunterschied zwischen den Praktikanten, die „vor Ort“ betreut wurden, gibt. Die nun zu betrachtende Frage ist, ob die Wissensunterschiede, das heißt die Differenz der richtig beantworteten Fragen, zwischen den einzelnen Zeitpunkten unterschiedlich sind. Dazu werden die Differenzen zwischen den einzelnen Zeitpunkten in Abhängigkeit von der Experimentart ermittelt (siehe Abbildung (7.4) sowie Tabelle (7.7)).

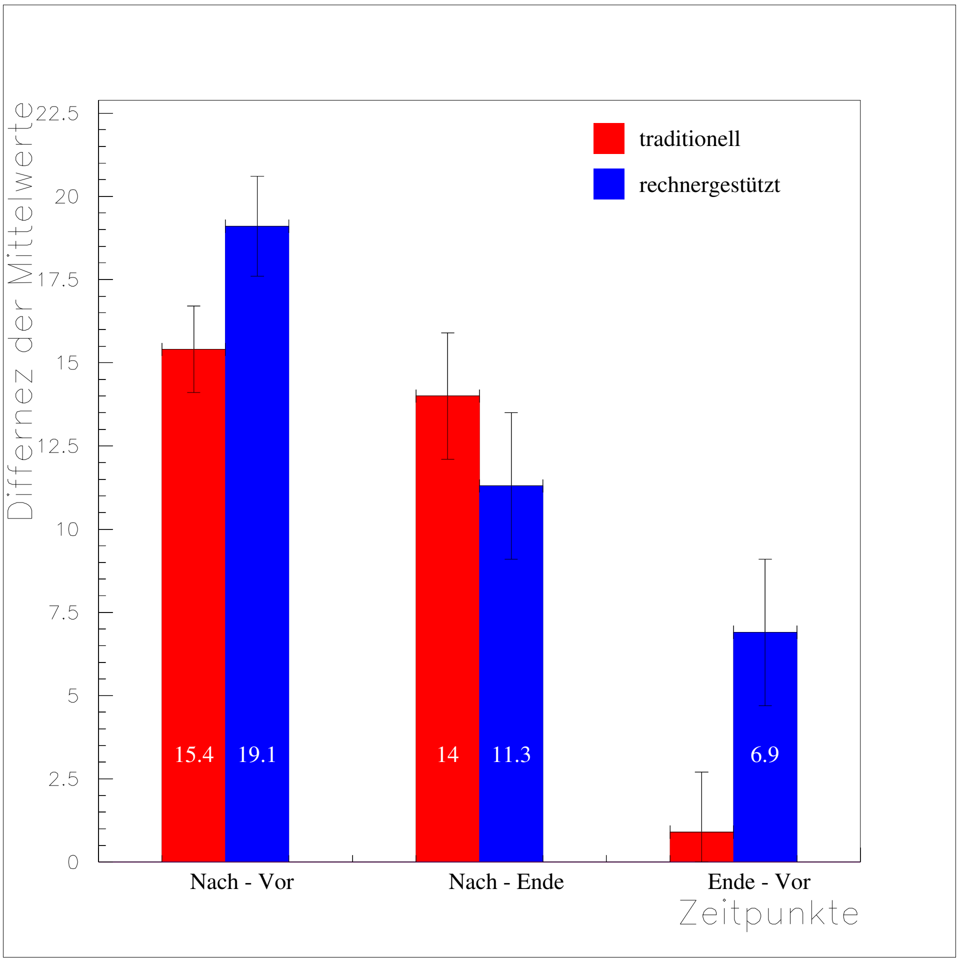


Abbildung 7.4: Wissensänderung zwischen den verschiedenen Zeitpunkten für die Praktikanten des traditionellen und rechnergestützten Experimentes.

Art des Experimentes		Wissensunterschied *Nach – Vor*	*Nach – Ende*	*Ende – Vor*
traditionell	Differenz in %	15.4	14.0	0.9
	Schwankung in %	1.3	1.9	1.8
rechnergestützt	Differenz in %	19.1	11.3	6.9
	Schwankung in %	1.5	2.2	2.2

Tabelle 7.7: Wissensänderung zwischen den verschiedenen Zeitpunkten für die Praktikanten des traditionellen und rechnergestützten Experimentes.

In den letzten beiden Spalten werden nur die Praktikanten berücksichtigt, die auch den dritten Fragebogen ausgefüllt haben. In der ersten Spalte werden alle Praktikanten berücksichtigt. Somit liegt der zweiten und dritten Spalte ein andere Grundgesamtheit zugrunde, so dass die Addition der Zahlen der letzten beiden Spalten nicht die der ersten ergibt.

Betrachtet man Abbildung (7.4), so ist ein großer Unterschied in den Differenzen zwischen den ersten beiden Fragebögen und dem ersten und letzten Fragebogen zu erkennen. Inwieweit diese Unterschiede signifikant sind, soll nun mit Hilfe des t-Tests untersucht werden.

Der t-Test für den Vergleich der Wissensänderung ist in Tabelle (7.8) dargestellt. Betrachtet man darin die letzte Spalte, so ist zu erkennen, dass es einen signifikanten Unterschied (Signifikant für Gleichheit < 0.05) in der Wissensänderung zwischen den Praktikanten gibt, wenn die Befragungszeitpunkte am Ende des Semesters und vor dem Experiment miteinander verglichen werden.
Vergleicht man den Wissenszuwachs vor und nach dem Experiment miteinander, so ist eine starke Tendenz für die Unterschiedlichkeit des Wissenzuwachses festzustellen. Aus diesen beiden Feststellungen kann gefolgert werden, dass die Praktikanten, welche das rechnergestützte Experiment durchführten während des Experimentes tendenziell mehr gelernt und danach weniger vergessen haben.

Vergleich zwischen	Zeitpunkte d. Befragung	t	*DF*	Signifikanz (für Gleichheit)
rech. – trad.	*Nach – Vor*	1.835	172	**0.068**
	Nach – Ende	0.912	106	**0.364**
	Ende – Vor	2.089	106	**0.039**

Tabelle 7.8: Vergleich der Wissensänderung (Differenz der richtig beantworteten Fragen) zwischen dem rechnergestützten und traditionellen Experiment. (Befragungszeitpunkte Vor: Vor dem Experiment; Nach: Nach dem Experiment; Ende: Am Ende des Praktikums)

Bis jetzt wurde das Wissen der Praktikanten zwischen den verschiedenen Experimenten verglichen. Im Folgenden soll nun die zeitliche Entwicklung des Wissens innerhalb eines Experimentes untersucht werden. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Tabelle (7.9) abgebildet.
In der ersten Spalte der Tabelle sind die Zeitpunkte angegeben, die miteinander verglichen werden. In der folgenden Spalte ist das jeweils betrachtete Experiment aufgeführt. Vor der Signifikanz für die Gleichheit der Anzahl der richtigen Antworten zu den verschiedenen Zeitpunkten, welche in der letzten Spalte steht, sind noch der t- und DF-Wert angegeben.

Vergleich zwischen d. Befragungszeitpunkten	Art des Experimentes	t	DF	Signifikanz (für Gleichheit)
Nach - Vor	trad.	12.17	85	$\leq$ **0.001**
	rech.	12.36	87	$\leq$ **0.001**
Nach - Ende	trad.	7.17	54	$\leq$ **0.001**
	rech.	5.25	52	$\leq$ **0.001**
Ende - Vor	trad.	0.50	54	**0.621**
	rech.	3.12	52	**0.003**

Tabelle 7.9: Vergleich der Anzahl der richtigen Antworten zu den drei Befragungszeitpunkten für das traditionelle und rechnergestützte Experiment. (Befragungszeitpunkte Vor: Vor dem Experiment; Nach: Nach dem Experiment; Ende: Am Ende des Praktikums)

Betrachtet man Tabelle (7.9), so ist zu erkennen, dass beide Praktikantengruppen während der Durchführung des Experimentes Wissen erlangt haben (ersten zwei Zeilen der Tabelle).
Es ist weiter zu sehen, dass beide Gruppen in der Zeit bis zum dritten Fragebogen einen Teil ihres Wissens wieder vergessen haben (dritte und vierte Zeile der Tabelle). Dass dieser natürliche Effekt auftritt zeigt, dass die Studenten die Fragen und zugehörigen Antworten des Fragebogens durch das wiederholte Vorlegen nicht gelernt hatten sondern, dass auch beim dritten Ausfüllen des Fragebogens das Wissen der Studenten ermittelt wurde.
Einen Unterschied zwischen den beiden Studenten-Gruppen zeigen die Zeilen fünf und sechs der Tabelle (7.9). Hier wird der Unterschied des Wissens „vor dem Experiment“ mit dem „am Ende des Praktikums“ verglichen. Bei diesem Vergleich ist zu erkennen, dass die Praktikanten, die das rechnergestützte Experiment durchführten zum Zeitpunkt des dritten Fragebogens signifikant mehr wussten als vor dem Experiment. Die Praktikanten, die das traditionelle Experiment durchführten, zeigen diesen Effekt nicht. Sie wissen nach einiger Zeit nicht mehr über das Experiment als zum Zeitpunkt der Vorbereitung.

Varianzanalyse für die Gesamtgruppe

Bis jetzt wurden immer zwei Ergebnisse durch den t-Test miteinander verglichen, im Folgenden soll die Entwicklung des Wissens der Praktikanten in Abhängigkeit verschiedener Variablen mit Hilfe der Varianzanalyse mit Meßwiederholung (siehe Anhang D.3.4) betrachtet werden. Die Ergebnisse dieser Varianzanalyse sind in der Tabelle (7.10) dargestellt.
In der ersten Spalte sind die Variablen aufgeführt. Dabei ist die Betrachtung des Messzeitpunktes (MZP) ausgezeichnet, da alle Ergebnisse aufgrund ihrer Entwicklung betrachtet werden. Der DF-Wert gibt wieder die Anzahl der Freiheitsgrade an und der F-Wert ist wie der t-Wert beim t-Test ein Maß für die Größe der Signifikanz. Diese ist in der darauffolgenden Spalte angegeben. Ein Wert kleiner als 5 % bedeutet dabei, dass eine signifikante Abhängigkeit von den Aufgeführten Variablen besteht. In der letzte Zeile ist das partielle η^2 angegeben, dieses ist ein Maß für die Größe des Effektes, der aufgrund der betrachteten Variablen entsteht. Das partielle η^2 ist proportional zum Verhältnis von Treatment-Quadratsumme zur totalen Quadratsumme (siehe Anhang (D.3.2)).

Variable	DF	F	Signifikanz (für Unabhängigkeit)	Partielles η^2
MZP	2	44.049	**≤0.001**	0.331
MZP * EXP	2	3.979	**0.020**	0.043
MZP * STUDIUM	8	2.915	**0.004**	0.116
MZP * SEX	2	0.174	**0.840**	0.002
MZP * EXP * STUDIUM	8	2.229	**0.027**	0.091
MZP * EXP * SEX	2	0.359	**0.699**	0.004
MZP * STUDIUM * SEX	8	1.996	**0.049**	0.082
MZP * EXP * STUDIUM * SEX	6	2.729	**0.015**	0.084

Tabelle 7.10: Untersuchung der Lernerfolgsentwicklung, mit Hilfe der Varianzanalyse mit Meßwiederholung, für das traditionellen und rechnergestützten Experiment. (MZP: Messzeitpunkt; EXP: Art des Experimentes; STUDIUM: Studienfachrichtung; SEX: Geschlecht)

Bei der Betrachtung der ersten Zeile in der Tabelle (7.10) ist ersichtlich, dass das Wissen abhängig vom Messzeitpunkt ist. Dieses war nach der Betrachtung der Mittelwerte zu erwarten und ist auch logisch, da die Studierenden während des Praktikums etwas lernen und danach einen Teil wieder vergessen. Es ist also eine zeitliche Entwicklung der Studenten festzustellen.
Die nächste Zeile der Tabelle beschreibt die Entwicklung der Praktikanten in Abhängigkeit des Experimentes. Dabei sieht man, dass die Art des Experimentes einen Einfluss auf die Entwicklung der Praktikanten besitzt. Zusammen mit dem Wissen der t-Tests bedeutet dies, dass die mit dem rechnergestützten Experiment arbeiten-

den Praktikanten während der Durchführung tendenziell mehr gelernt und danach signifikant weniger vergessen haben als die Praktikanten, die das traditionelle Experiment durchführten.
Die dritte Zeile in Tabelle (7.10) zeigt eine weitere Abhängigkeit der Entwicklung an: Studenten unterschiedlicher Studienrichtungen entwickeln sich unterschiedlich. Diese Abhängigkeit war zu erwarten, da z.B. Physiker und Mediziner andere Voraussetzungen und Interessen haben und unterschiedlich motiviert sind. Wegen dieser Abhängigkeit erfolgt ein Post-Hoc-Test (siehe z.B. [Ste86]), in welchem untersucht wurde, ob einige Studienrichtungen sich zu einer Gruppe zusammenfassen lassen. Das Ergebnis des Tests ist in Tabelle (7.11) zu sehen und wird im folgenden Abschnitt diskutiert.
In der vierten Zeile ist die Abhängigkeit von der Entwicklung vom Geschlecht zu sehen. Zu erkennen ist, dass das Geschlecht keinen Einfluss auf die Entwicklung der Studenten besitzt. Die Signifikanz für die Gleichheit ist hier sehr hoch.

In den Zeilen fünf bis sieben der Tabelle (7.10) ist dargestellt, ob die Entwicklung der Studenten von mehreren Variablen abhängig ist. Zu erkennen ist, dass sowohl die Kombination „Art des Experimentes“ und „Studienrichtung“ als auch „Studienrichtung“ und „Geschlecht“ einen Einfluss auf die Entwicklung haben. Das bedeutet also, dass die Reaktion der Studenten auf die jeweiligen Experimente abhängig von der Studienrichtung ist. Auch gibt es einige Studienrichtungen, bei denen sich männliche und weibliche Praktikanten unterschiedlich entwickeln. Da bei dieser Arbeit die Entwicklung in Abhängigkeit von der Art des Experimentes untersucht werden soll, wird dieser Punkt nur erwähnt und nicht weiter ausgeführt werden. In diesen drei Zeilen ist außerdem noch zu erkennen, dass es keinen „EXP * SEX“-Effekt gibt. Somit gibt es keine geschlechtsabhängige Bevorzugung einer Experimentart.

In der letzten Zeile von Tabelle (7.10) ist festzustellen, dass es eine signifikante Abhängigkeit der Entwicklung (MZP) von allen drei Variablen (EXP, STUDIUM, SEX) gibt. Auf diese Abhängigkeit wird in dem Abschnitt (7.3.2) eingegengen, wenn die verschiedenen Fachrichtungen betrachtet werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Varianzanalyse die Ergebnisse der t-Tests bestätigt haben. Es gibt eine Abhängigkeit der Entwicklung der Praktikanten von der Art des Experimentes. Zusammen mit den t-Tests ergibt sich daraus die Folgerung, dass die mit dem rechnergestützten Experiment arbeitenden Praktikanten eine wissenssteigernde und Wissen besser speichernde Entwicklung durchlaufen als die Praktikanten, die das traditionelle Experiment durchgeführt haben.

Gruppenbildung mit Hilfe des Post-Hoc-Tests

Im letzten Abschnitt wurde gezeigt, dass die Entwicklung der Studenten fachrichtungsabhängig ist. Dabei wurde aber nicht ermittelt, ob die Lernerfolgsentwicklung grundsätzlich unterschiedlich ist, oder ob es Fachrichtungen gibt, die ein ähnliches

Entwicklungsverhalten zeigen. Um dieses zu ermitteln wurde ein Post-Hoc-Test (siehe z.B. [Ste86]) durchgeführt. Das Ergebnis dieses Tests ist in Tabelle (7.11) dargestellt. Da dieser Test symmetrisch bezüglich der Fachrichtungen ist, ist hier nur eine Richtung angegeben.

Fachrichtung (I)	Fachrichtung (II)	Differenz (I-II) [%]	Schwankung (für Gleichheit)	Signifikanz [%]
Physiker	Chemiker	16.4	3.4	$\leq$ **0.001**
	Chemietechniker	24.6	4.1	$\leq$ **0.001**
	Biologen	29.2	3.4	$\leq$ **0.001**
	Mediziner	31.5	2.8	$\leq$ **0.001**
Chemiker	*Chemietechniker*	8.2	4.2	**0.436**
	Biologen	12.8	3.5	**0.015**
	Mediziner	15.1	2.9	$\leq$ **0.001**
Chemietechniker	*Biologen*	4.6	4.2	**0.881**
	Mediziner	6.9	3.7	**0.486**
Biologen	*Mediziner*	2.3	2.9	**0.961**

Tabelle 7.11: Post-Hoc-Test zur Untersuchung, ob Studenten verschiedener Fachbereiche sich ähnlich entwickeln. Der Test ist symmetrisch, aus diesem Grund ist nur eine Richtung angegeben.

Betrachtet man Tabelle (7.11) so ist zu erkennen, dass die Studenten der Physik sich von den Studenten der anderen Fachbereiche unterscheiden.
Die Praktikanten des Studiengangs Chemie verhalten sich ähnlich wie die Studenten der Chemietechnik, unterscheiden sich aber von den Studenten der Biologie und der Medizin.
In den letzten drei Zeilen der Tabelle (7.11) ist zu sehen, dass es keinen signifikanten Unterschied zwischen den Studenten der Chemietechnik, Biologie und Medizin gibt.

Aufgrund dieser Ergebnisse können die Studenten der Fachrichtungen in drei Gruppen eingeteilt werden (siehe (7.12)). Die Studenten der Physiker bilden eine eigene Gruppe (Gruppe 1), welche 31 Studenten umfasst. Die zweite Gruppe besteht aus den Studenten der Fachbereiche Chemie und Chemietechnik mit 61 Praktikanten. Die Studenten der Studienrichtungen Chemietechnik, Biologie und Medizin bilden die dritte Gruppe, welche mit 119 Studenten die größte Gruppe ist .
Somit sind Studenten der Chemietechnik in zwei Gruppen (Gruppe 2 und Gruppe 3) vertreten. Eine mögliche Erklärung dafür soll im Folgenden betrachtet werden.

Betrachtet man die einzelnen Gruppen, so sind Gemeinsamkeiten der Studenten innerhalb einer Gruppe festzustellen. Ein Ordnungsschema ist die Anzahl der Semester. Die Studenten der Gruppe 1 (Physiker) befinden sich im dritten oder vierten Semester und haben in der Zeit pro Semester mindestens eine vierstündige Vorlesung

	Mittelwert d. richtigen Antworten		
Art des Studiums	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3
Physiker	62.1		
Chemiker		45.7	
Chemietechniker		37.5	37.5
Biologen			33.0
Mediziner			30.7
Signifikanz	1	0.267	0.446

Tabelle 7.12: Die aus dem Post-Hoc-Test bestimmten Gruppen.

in Physik gehört. Die Studenten der Gruppe 2 (Chemiker und Chemietechniker) sind Studenten aus dem zweiten Semester. Dabei absolvieren die Chemietechniker das Praktikum während des Semesters und die Chemiker in der vorlesungsfreien Zeit. Die Studenten dieser Gruppen hatten dieselbe Vorlesung gehört. In der dritten Gruppe (Chemietechniker, Biologen und Mediziner) befinden sich die Studenten aus dem ersten und zweiten Semester. Dabei absolvierten die Studenten der Biologie das Praktikum am Anfang des Semesters, die Studenten der Medizin am Ende der Vorlesungszeit. Diese beiden Studentengruppen hörten auch die gleiche Vorlesung.
Es ist also festzustellen, dass die Aufteilung der Gruppen abhängig von der Semesterzahl der Studenten ist. Wobei die Chemietechniker zu zwei Gruppen gehören, da Studenten dieser Gruppen am Anfang und am Ende des zweiten Semesters die Experimente absolvierten und erstere ähnlich zu Studenten sind, die die Experimente am Ende des ersten Semesters durchführten. Betrachtet man die Mittelwerte der richtigen Antworten der drei Gruppen, so erkennt man, dass diese mit steigender Semesterzahl auch zunehmen. Dadurch liegt die Annahme nahe, dass größeres Vorwissen einen positiven Einfluss auf den Lernerfolg und die Entwicklung der Studenten besitzt. Diese These soll im Folgenden bei der Betrachtung der einzelnen Gruppen und in Abschnitt (7.5.1) diskutiert werden.

7.3.2 Studienrichtungsabhängige Betrachtung

Gruppe 1: Physiker

Nachdem im letzten Abschnitt die Studenten der verschiedenen Fachrichtungen nicht getrennt betrachtet werden, sollen nun die einzelnen Gruppen, die durch den Post-Hoc-Test ermittelt wurden, getrennt betrachtet werden. Die Diskussion des Lernerfolges der einzelnen Gruppen erfolgt dabei in gleicher Art und Weise wie im vorherigen Abschnitt.

Statistik der richtigen Antworten

In Tabelle (7.13) sind die Anzahl der richtigen Antworten für die Physiker aufgeschlüsselt. Eine graphische Darstellung der Tabelle ist in Abbildung (7.5) zu sehen.

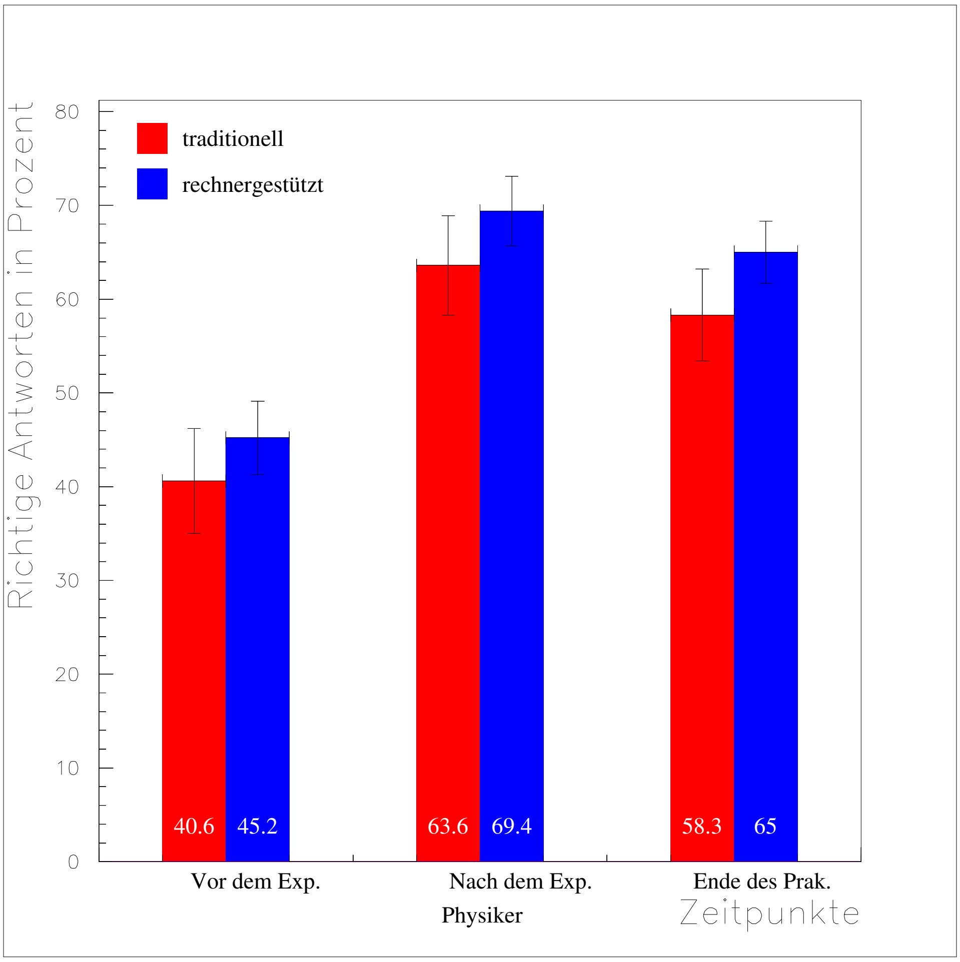


Abbildung 7.5: Anzahl der richtigen Antworten der Physik-Studenten, unterteilt nach den beiden Experimentarten.

In Abbildung (7.5) fällt auf, dass die Studenten, die das traditionelle Experiment durchführten, zu allen Zeitpunkten der Befragung ungefähr 5 % weniger Fragen richtig beantworten als die Vergleichsgruppe. Woher dieser Effekt kommt, kann nicht festgestellt werden. Die Studentengruppen wurden zufällig ausgewählt und führten unter gleichen Voraussetzungen die Experimente parallel durch. Dieser Effekt muss also zufällig sein.

Vergleicht man Abbildung (7.5) mit Abbildung (7.3), so ist festzustellen, dass die

Studenten der Physik durchschnittlich mehr Fragen richtig beantwortet haben als die der anderen Fachbereiche. Dies war zu erwarten, da sie erstens aus einem höheren Semester stammen und zweitens Physik als Hauptfach belegten.
Bei der Betrachtung von Abbildung (7.5) fällt außerdem auf, dass bei beiden Studenten-Gruppen kein starker Abfall des Wissens am Ende des Semesters zu verzeichnen ist. Ob die Unterschiede signifikant sind oder nicht, soll im nächsten Abschnitt betrachtet werden.

Vergleich des Wissens mit Hilfe des t-Tests

Der Vergleich des Wissens zwischen den Experimenten zu den verschiedenen Zeitpunkten ist in Tabelle (7.14) dargestellt.
In der Tabelle ist zu erkennen, dass es zu keinem Zeitpunkt einen Unterschied zwischen den Experimenten gibt. Die Signifikanz dafür, dass die Anzahl der richtig beantworteten Fragen gleich ist, ist zwar nicht konstant, aber auch im kleinsten Fall, am Ende des Semesters, ist kein tendenzieller Unterschied festzustellen.

Am Anfang des Abschnittes in Abbildung (7.5) war schon festgestellt worden, dass der Wissensunterschied zwischen den beiden Studentengruppen zu den verschiedenen Zeitpunkten nahezu konstant ist. Dies wird in Abbildung (7.6) noch einmal deutlich. In dieser Abbildung sind die Wissensunterschiede zwischen den verschiedenen Zeitpunkten in Abhängigkeit von der Art des Experimentes dargestellt. Die Daten der Abbildung sind in Tabelle (7.15) nachzulesen.

Betrachtet man die Abbildung (7.6), so ist zu vermuten, dass die Wissensänderung im Rahmen der Schwankung nicht von der Experimentart abhängt, diese wird durch Tabelle (7.16) bestätigt. Betrachtet man diese Tabelle, so sieht man, dass die Signifikanz für die Gleichheit der Wissensunterschiede der beiden Experimente sehr hoch ist. Somit kann angenommen werden, dass der Unterschied der Wissensänderungen nur zufällig zustande gekommen sind.

Als letzter einzelner Vergleich sollen nun die Wissensunterschiede innerhalb der einzelnen Experimente zwischen den einzelnen Zeitpunkten betrachtet werden. Dieser

Art des Experimentes		Zeitpunkte		
		Vor	*Nach*	*Ende*
traditionell	Mittlere %-Zahl d. richtigen Antworten	40.6	63.6	58.3
	Schwankung in %	5.6	5.3	4.9
rechnergestützt	Mittlere %-Zahl d. richtigen Antworten	45.2	69.4	65.0
	Schwankung in %	3.9	3.7	3.3

Tabelle 7.13: Anzahl der richtigen Antworten der Physik-Studenten, unterteilt nach den beiden Experimentarten.

Vergleich zwischen	Zeitpunkte d. Befragung	Differenz [%]	t	*DF*	Signifikanz (auf Gleichheit)
rech. – trad.	*Vor*	4.643	0.699	29	**0.490**
	Nach	5.808	0.930	29	**0.360**
	Ende	6.702	1.146	17	**0.268**

Tabelle 7.14: Vergleich des Wissens (Anzahl der richtig beantworteten Fragen) der Physik-Studenten zwischen den verschiedenen Experimenten in Abhängigkeit von den Zeitpunkten.

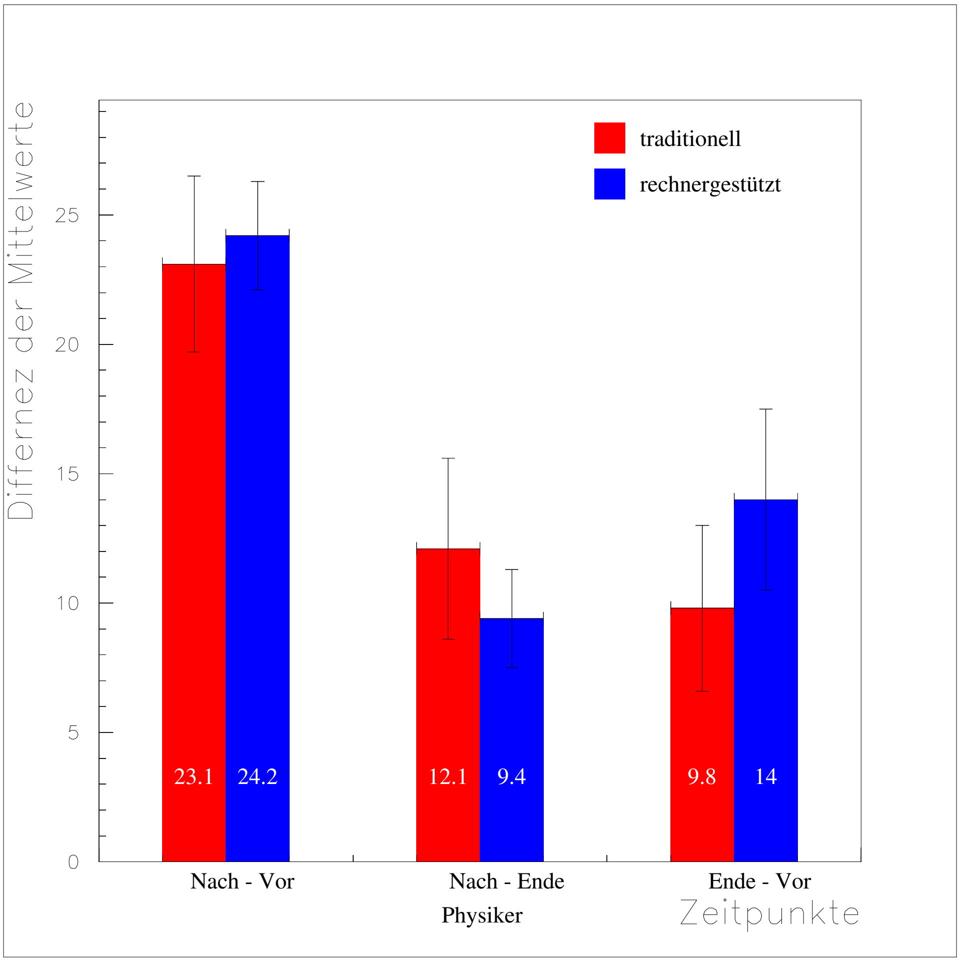


Abbildung 7.6: Wissensänderung der Physik-Studenten zwischen den verschiedenen Zeitpunkten für das traditionelle und rechnergestützte Experiment.

Art des Experimentes		Wissensunterschied *Nach – Vor*	*Nach – Ende*	*Ende – Vor*
traditionell	Differenz in %	23.1	12.1	9.8
	Schwankung in %	3.4	3.5	3.2
rechnergestützt	Differenz in %	24.2	9.4	14.0
	Schwankung in %	2.1	1.9	3.5

Tabelle 7.15: Wissensänderung der Physik-Studenten zwischen den verschiedenen Zeitpunkten für das traditionelle und rechnergestützte Experiment.

Vergleich zwischen	Zeitpunkte d. Befragung	t	DF	Signifikanz (auf Gleichheit)
rechn. – trad.	*Nach – Vor*	0.303	29	**0.764**
	Nach – Ende	0.741	17	**0.469**
	Ende – Vor	0.739	17	**0.470**

Tabelle 7.16: Vergleich der Wissensänderung (Differenz der richtig beantworteten Fragen) der Physik-Studenten zwischen dem rechnergestützten und traditionellen Experiment.

Vergleich ist in Tabelle (7.17) dargestellt.

In dieser Tabelle ist zu erkennen, dass alle Physik-Studenten, unabhängig vom Experiment etwas lernen und auch wieder einen Teil vergessen. Im Unterschied zum Gesamtgruppenvergleich wissen die Studenten beider Experimentarten am Ende des Semesters noch signifikant mehr als vor der Experimentdurchführung.

Vergleich zwischen d. Befragungszeitpunkten	Art des Experimentes	t	DF	Signifikanz (für Gleichheit)
Nach - Vor	trad.	6.72	12	$\leq$ **0.001**
	rech.	11.31	17	$\leq$ **0.001**
Nach - Ende	trad.	3.508	5	**0.017**
	rech.	5.00	12	$\leq$ **0.001**
Ende - Vor	trad.	3.08	5	**0.027**
	rech.	4.03	12	**0.002**

Tabelle 7.17: Vergleich der Anzahl der richtigen Antworten der Physik-Studenten für das rechnergestützte und traditionelle Experiment.

Varianzanalyse für die Physik-Studenten

Nach den Ergebnissen der t-Tests ist zu erwarten, dass auch die Varianzanalyse mit Messwertwiederholung keinen Unterschied in der Entwicklung der Studenten zeigt, diese wird in Tabelle (7.18).

Variable	DF	F	Signifikanz (für Unabhängigkeit)	Partielles η^2
MZP	1.9	20.196	$\leq$ **0.001**	0.574
MZP * EXP	1.9	0.154	**0.853**	0.0100
MZP * SEX	1.9	0.814	**0.450**	0.0510
MZP * EXP * SEX	1.9	0.599	**0.552**	0.038

Tabelle 7.18: Lernerfolgsentwicklung, untersucht mit Hilfe der Varianzanalyse mit Messwertwiederholung, bei dem traditionellen und rechnergestützten Experiment für die Physik-Studenten.(MZP: Messzeitpunkt; EXP: Art des Experimentes; STUDIUM: Studienfachrichtung; SEX: Geschlecht)

Tabelle (7.18) zeigt, dass die Praktikanten einen Entwicklungsprozess durchlaufen, da das Signifikanzniveau für die Unabhängigkeit des Wissens vom Messzeitpunkt sehr klein ($\leq$ 0.1 %) ist.
Die anderen Signifikanzen sagen aus, dass es weder eine Entwicklungsabhängigkeit von der Art, noch vom Geschlecht oder von der Art und dem Geschlecht gibt. Also entwickeln sich männliche und weibliche Praktikanten gleich und diese Entwicklung ist unabhängig von der Art des Experimentes.

Gruppe 2: Chemiker und Chemietechniker

Der Post-Hoc-Test am Ende des Abschnitts (7.3.1) zeigte, dass die Studenten der Chemie und Chemietechnik zu einer Gruppe (Gruppe 2) zusammengefasst werden können. Die Entwicklung dieser Gruppe wird in diesem Abschnitt betrachtet.

Statistik der richtigen Antworten

Die Anzahl der richtigen Antworten bei den verschiedenen Fragebögen ist in Abbildung (7.7) dargestellt; in Tabelle (7.19) stehen die für die Abbildung zugehörigen Daten.

Betrachtet man Abbildung (7.7), so ist festzustellen, dass die Studenten dieser Fachrichtungen zu den verschiedenen Zeitpunkten etwas mehr als der Gesamtdurchschnitt (siehe Tabelle (7.3)) wussten. Der Verlauf des Wissens ist aber ähnlich wie bei der Gesamtgruppe.

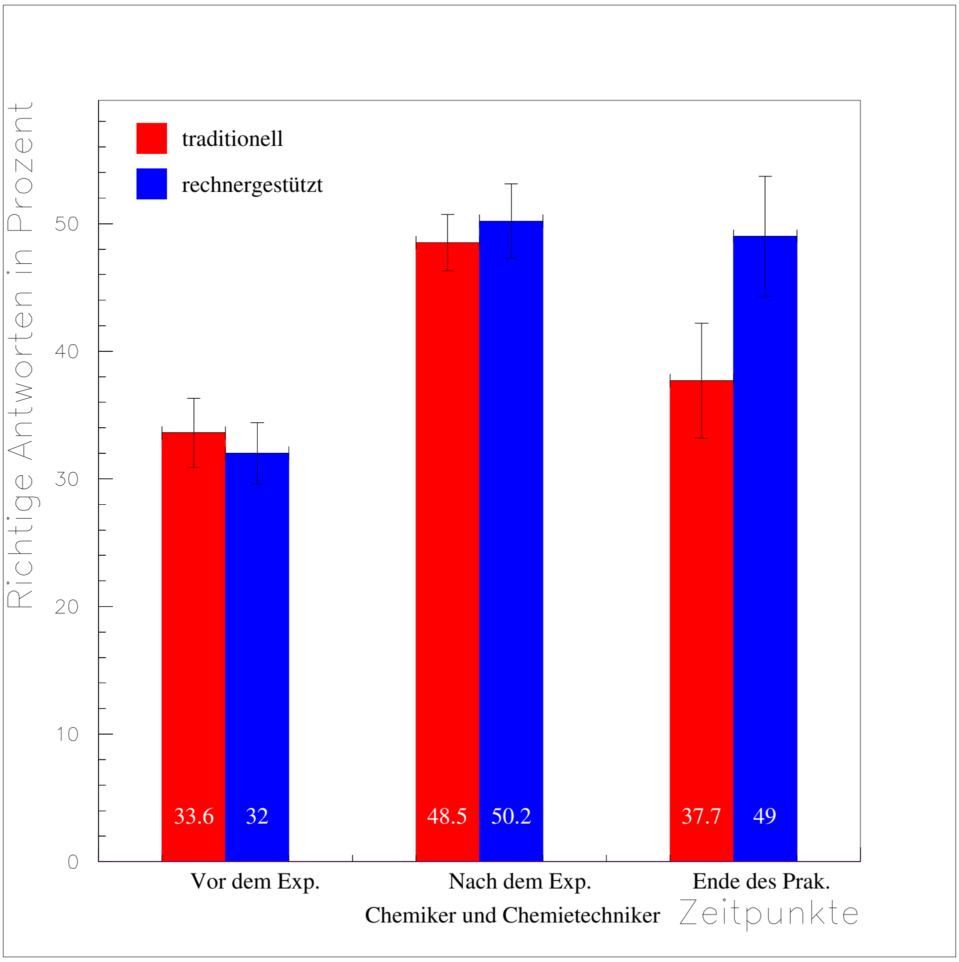


Abbildung 7.7: Anzahl der richtigen Antworten der Gruppe 2 (Chemiker und Chemitechniker), unterteilt nach den beiden Experimentarten.

Vor und nach dem Experiment beantworten die Studenten, die das rechnergestützte und traditionelle Experiment durchführten, ungefähr genausoviele Fragen richtig. Am Ende des Semesters ist aber ein deutlicher Unterschied zu erkennen. Ob dieser Unterschied signifikant ist, wird im nächsten Abschnitt untersucht.

Vergleich des Wissens mit Hilfe des t-Tests

Betrachtet man Tabelle (7.20), so ist derselbe Aufbau wie bei den Tabellen (7.6) und (7.14) festzustellen. Auch hier gibt die Signifikanz, welche in der letzten Zeile der Tabelle angegeben ist, gibt die Wahrscheinlichkeit für die Gleichheit der miteinander verglichenen Ergebnisse an.

Art des Experimentes		Zeitpunkte		
		Vor	*Nach*	*Ende*
traditionell	Mittlere %-Zahl d. richtigen Antworten	33.6	48.5	37.7
	Schwankung in %	2.7	2.2	4.5
rechnergestützt	Mittlere %-Zahl d. richtigen Antworten	32.0	50.2	49.0
	Schwankung in %	2.4	2.9	4.7

Tabelle 7.19: Anzahl der richtigen Antworten der Gruppe 2 (Chemiker und Chemitechniker), unterteilt nach den beiden Experimentarten.

Der Mittelwertvergleich ergibt, dass die Studenten vor und nach dem Experiment gleichviel wussten. Am Ende des Praktikums ist aber ein tendenzieller Unterschied zwischen den Studenten-Gruppen zu erkennen.

Vergleich zwischen	Zeitpunkte d. Befragung	Differenz [%]	t	*DF*	Signifikanz (für Gleichheit)
rech. – trad.	*Vor*	-1.61	-0.443	59	**0.660**
	Nach	1.62	0.443	59	**0.659**
	Ende	11.29	1.584	24	**0.126**

Tabelle 7.20: Vergleich des Wissens (Anzahl der richtig beantworteten Fragen) der Studenten von Gruppe 2 zwischen den beiden Experimentarten in Abhängigkeit der Zeitpunkte.

Betrachtet man Abbildung (7.7), so ist zu sehen, dass der Wissensunterschied zwischen den beiden Gruppen nicht konstant ist, sondern sich zu jedem Zeitpunkt unterscheidet. Aus diesem Grund werden nun die Differenzen zwischen zwei Untersuchungszeitpunkten ermittelt, diese Differenzen können danach mit dem t-Test in Beziehung gesetzt werden.

Art des Experimentes		Wissensunterschied		
		Nach – Vor	*Nach – Ende*	*Ende – Vor*
traditionell	Differenz in %	15.0	12.0	2.4
	Schwankung in %	1.9	3.5	4.4
rechnergestützt	Differenz in %	18.2	8.1	15.2
	Schwankung in %	2.8	4.7	6.2

Tabelle 7.21: Wissensänderung der Studenten von Gruppe 2 (Chemiker und Chemitechniker) zwischen den verschiedenen Zeitpunkten für das traditionelle und rechnergestützte Experiment.

Abbildung (7.8) sowie Tabelle (7.21) zeigen die Wissensunterschiede innerhalb einer Experimentartgruppe zwischen den unterschiedlichen Zeitpunkten. In dem Diagramm ist auf den ersten Blick eine größere Struktur als in Abbildung (7.7) zu erkennen. Berücksichtigt man auch die Fehlerbalken mit, so ist zu vermuten, dass die Wissensunterschiede zwischen den Experimenten nicht signifikant sind. Diese Vermutung bestätigt sich bei Betrachtung von Tabelle (7.22), welche im Folgenden diskutiert wird.

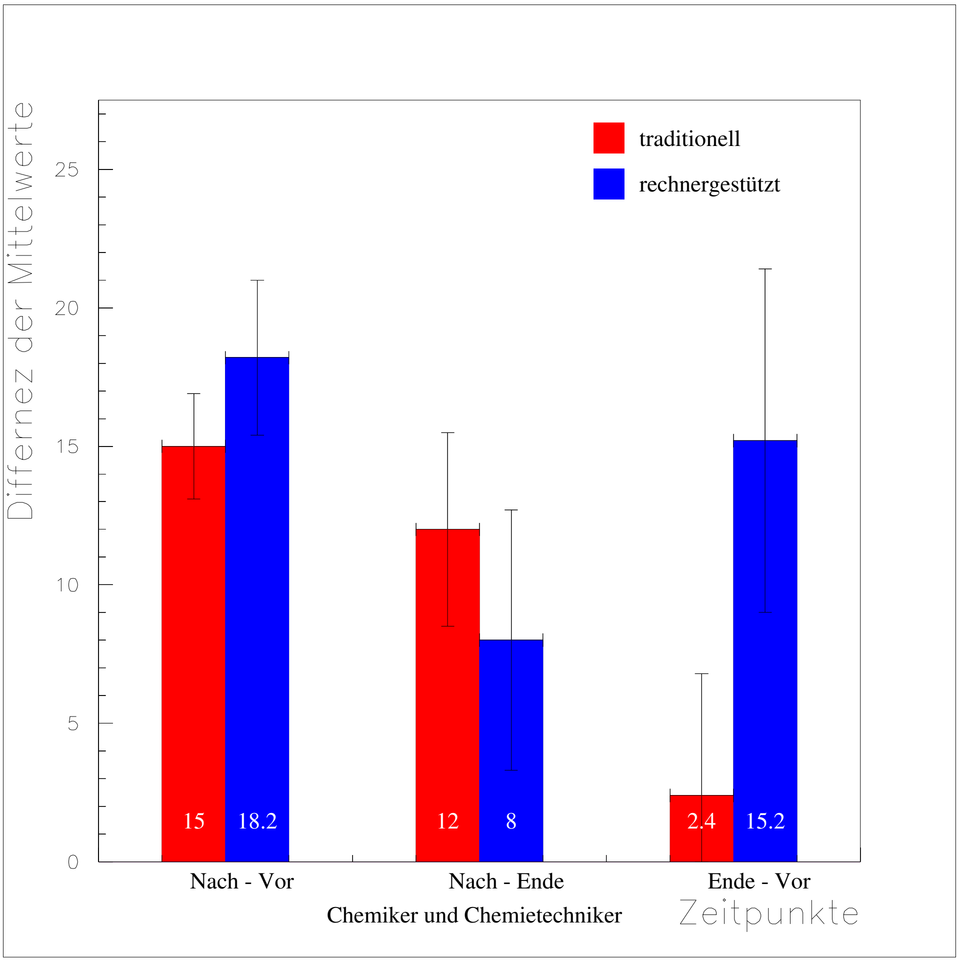


Abbildung 7.8: Wissensänderung der Studenten von Gruppe 2 (Chemiker und Chemitechniker) zwischen den verschiedenen Zeitpunkten für das traditionelle und rechnergestützte Experiment.

Bei dem Vergleich der Wissensunterschiede (siehe Tabelle (7.22)) zwischen dem rechnergestützten und traditionellen Experiment gibt es nur einen tendenziellen Unterschied der Wissensänderung, bei der Veränderung zwischen der letzten und ersten Beantwortung des Fragebogens. Dies bedeutet wieder, dass die Studenten, die das

Vergleich zwischen	Zeitpunkte d. Befragung	t	DF	Signifikanz (für Gleichheit)
rech. – trad.	*Nach – Vor*	0.959	59	**0.341**
	Nach – Ende	0.670	24	**0.509**
	Ende – Vor	1.696	24	**0.103**

Tabelle 7.22: Vergleich der Wissensänderung (Differenz der richtig beantworteten Fragen) der Gruppe 2 (Chemiker und Chemitechniker) zwischen dem rechnergestützten und traditionellen Experiment.

rechnergestützte Experiment durchgeführt haben, bei der letzten Befragung tendenziell mehr wussten im Vergleich zur ersten Befragung als die Vergleichsgruppe.

Zum Abschluss der Einzelvergleiche soll nun die Anzahl der richtigen Antworten zu den einzelnen Zeitpunkten innerhalb eines Experimentes verglichen werden. Hier soll die Signifikanz der in Abbildung (7.8) dargestellten Wissensunterschiede untersucht werden. Eine Antwort auf diese Untersuchung gibt Tabelle (7.23), welche nun diskutiert wird. Der Aufbau der Tabelle ist identisch mit den Tabellen (7.9) und (7.17).

Bei dem Vergleich der ersten beiden Erhebungszeitpunkte ist in Tabelle (7.23) zu erkennen, dass es unabhängig von der Art des Experimentes einen Zuwachs des Wissens der Studenten zu diesen Zeitpunkten gibt. Also lernen die Studenten etwas während des Experimentes.
Der Vergleich des zweiten und dritten Zeitpunktes zeigt, dass die Studenten, die das rechnergestützte Experiment durchgeführt haben, zum Zeitpunkt der dritten Befragung nur tendenziell weniger wussten als direkt nach dem Experiment. Die Vergleichsgruppe wusste nach einiger Zeit wesentlich weniger.
Vergleicht man die Wissensänderung zwischen dem ersten und letzten Fragebogen innerhalb der Experimentart, so ist eine von der Experimentart abhängende Ent-

Vergleich zwischen d. Befragungszeitpunkten	Art des Experimentes	t	DF	Signifikanz (für Gleichheit)
Nach - Vor	traditionell	7.826	30	$\leq$ **0.001**
	rechnergestützt	6.515	29	$\leq$ **0.001**
Nach - Ende	traditionell	3.431	16	**0.003**
	rechnergestützt	1.735	8	**0.121**
Ende - Vor	traditionell	0.55	16	**0.590**
	rechnergestützt	2.443	8	**0.040**

Tabelle 7.23: Vergleich der Anzahl der richtigen Antworten der Studenten von Gruppe 2 (Chemiker und Chemitechniker) für das rechnergestützte und traditionelle Experiment.

wicklung festzustellen. Die Studenten, die das traditionelle Experiment durchgeführt haben, wussten am Ende des Praktikums nicht mehr über das Experiment als nach der Bearbeitung der Anleitung. Die Studenten, die das rechnergestützte Experiment durchführten, wussten bei der letzten Befragung signifikant mehr als am Anfang. Bei den Studenten, die dieses Experiment durchführten kann man also davon ausgehen, dass sie den physikalischen Inhalt des Experimentes besser gelernt und behalten haben, als die Vergleichsgruppe.

Varianzanalyse für die Studenten der Gruppe 2

Nachdem bis jetzt immer nur zwei Ergebnisse miteinander in Beziehung gesetzt worden sind, soll bei der nun folgenden Varianzanalyse die Entwicklung des Wissens in Abhängigkeit verschiedener Parameter untersucht werden.

In Tabelle (7.24) ist die Varianzanalyse mit Messwertwiederholung für die Studenten der Chemie und Chemietechnik (Gruppe 2) abgebildet. Diese Tabelle ist so aufgebaut wie alle vorherigen Tabellen für die Varianzanalyse; auch hier wird die Unabhängigkeit der Variable getestet. Ein Signifikanzwert nahe eins zeigt an, dass das Wissen nicht von dieser Variable abhängt. Umgekehrt zeigt ein Wert nahe Null an, dass die Entwicklung des Wissens von dieser Variable signifikant abhängig ist.

Variable	DF	F	Signifikanz (für Unabhängigkeit)	Partielles η^2
MZP	2	32.509	$\leq$ **0.001**	0.425
MZP * EXP	4	3.391	**0.013**	0.134
MZP * SEX	2	3.194	**0.046**	0.068
MZP * EXP * SEX	4	1.078	**0.372**	0.047

Tabelle 7.24: Untersuchung der Lernerfolgsentwicklung, mit Hilfe der Varianzanalyse mit Meßwiederholung, bei der Gruppe 2 (Chemie und Chemietechnik) zwischen dem traditionellen und rechnergestützten Experiment.(MZP: Messzeitpunkt; EXP: Art des Experimentes; STUDIUM: Studienfachrichtung; SEX: Geschlecht)

Betrachtet man daraufhin Tabelle (7.24), so ist nachzuvollziehen, dass das Wissen der Studenten eindeutig vom Messzeitpunkt abhängig ist, es erfolgt also ein Entwicklungsprozess. Ebenso ist festzustellen, dass die Entwicklung der Studenten von der Art des durchgeführten Experimentes beeinflusst wird. Desweiteren gibt hier es eine geschlechtsabhängige Entwicklung der Studenten. Da diese aber allgemein ist und nicht von der Art des Experimentes abhängt, wurde diese Signifikanz nicht weiter untersucht.

Gruppe 3: Chemietechniker, Biologen und Mediziner

Als letzte Untergruppe soll die Gruppe aus den Studenten der Chemietechnik, Biologie und Medizin betrachtet werden. Die Vorgehensweise ist dabei die gleiche wie bei den anderen Gruppen.

Statistik der richtigen Antworten

In Tabelle (7.25) sind die Prozentzahlen der richtigen Antworten in Abhängigkeit des jeweiligen Experimentes für die verschiedenen Befragungszeitpunkte angegeben; graphisch dargestellt werden diese Ergebnisse in Abbildung (7.9).

Art des Experimentes		Zeitpunkte		
		Vor	*Nach*	*Ende*
traditionell	Mittlere %-Zahl d. richtigen Antworten	25.6	39.3	27.3
	Schwankung in %	1.8	1.7	1.9
rechnergestützt	Mittlere %-Zahl d. richtigen Antworten	25.0	42.9	28.8
	Schwankung in %	1.8	2.1	3.1

Tabelle 7.25: Anzahl der richtigen Antworten der Gruppe 3 (Chemietechniker, Biologen und Mediziner) in Prozent, unterteilt nach den beiden Experimentarten.

Vergleicht man die Ergebnisse aus Tabelle (7.25) mit denen der Gesamtgruppe aus Tabelle (7.5) so stellt man fest, dass die hier betrachtete Gruppe zu allen Zeitpunkten im Durchschnitt weniger Fragen richtig beantworten konnte als der Durchschnitt der Gesamtstichprobe.
Bei der Betrachtung von Abbildung (7.9) fällt auf, dass es bei der letzten Befragung fast keinen Unterschied im Wissen zwischen den beiden Gruppen gibt. Außerdem ist das Wissen ungefähr genauso groß wie vor der Durchführung der Experimente.
Ob das Wissen der Studenten unabhängig von der Durchführungsart ist und ob am Ende des Praktikums nur soviel wie vor der Durchführung über das Experiment gewusst wurde, soll im Folgenden untersucht werden.

Vergleich des Wissens mit Hilfe des t-Test

In Tabelle (7.26) ist zu sehen, dass die Signifikanz für die Gleichheit des Wissens der beiden Studentengruppen zu allen Zeitpunkten gegeben ist. Somit wird die Vermutung bestätigt, dass das Wissen der Studenten zu den verschiedenen Zeitpunkten nicht von der Art des Experimentes abhängig ist.

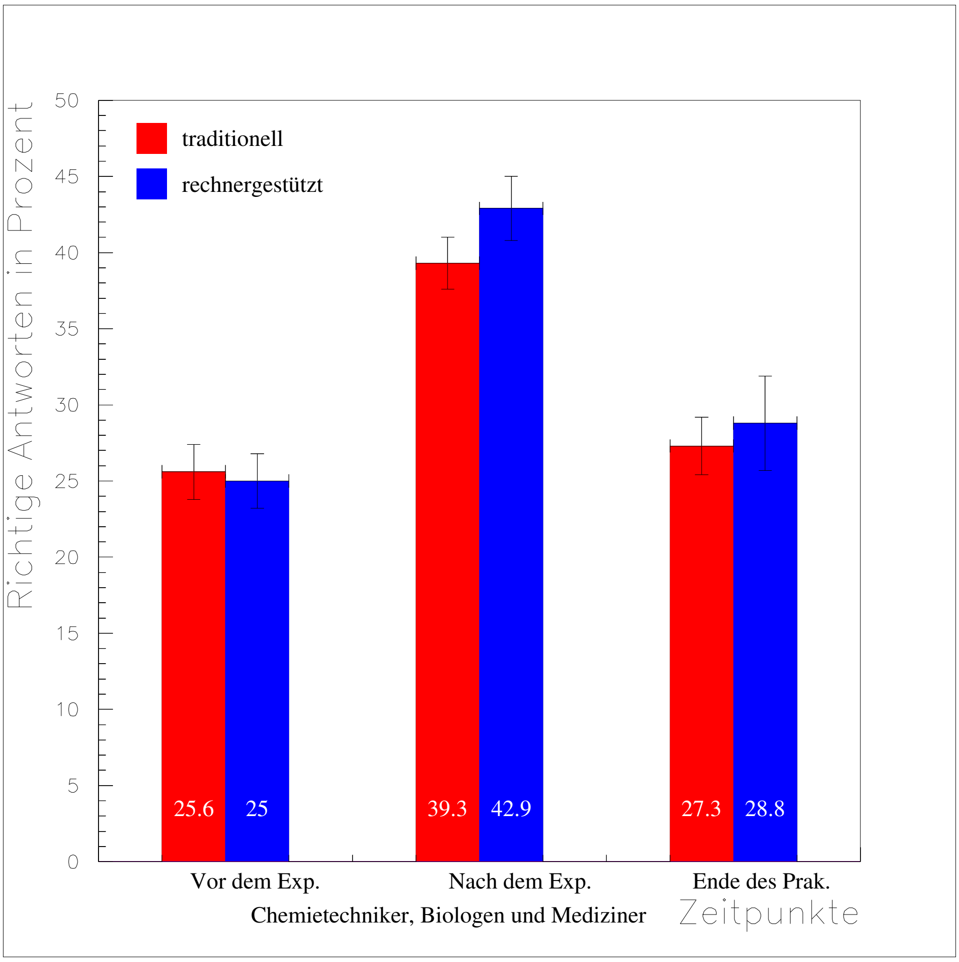


Abbildung 7.9: Anzahl der richtigen Antworten der Gruppe 3 in Prozent, unterteilt nach den beiden Experimentarten.

Vergleich zwischen	Zeitpunkte d. Befragung	Differenz [%]	t	*DF*	Signifikanz (für Gleichheit)
rech. – trad.	*Vor*	-0.63	-0.248	117	**0.804**
	Nach	3.60	1.325	117	**0.188**
	Ende	1.52	0.436	70	**0.664**

Tabelle 7.26: Vergleich des Wissens der Studenten von Gruppe 3 (Chemietechniker, Biologen und Mediziner) zwischen den beiden Experimentarten in Abhängigkeit der Zeitpunkte.

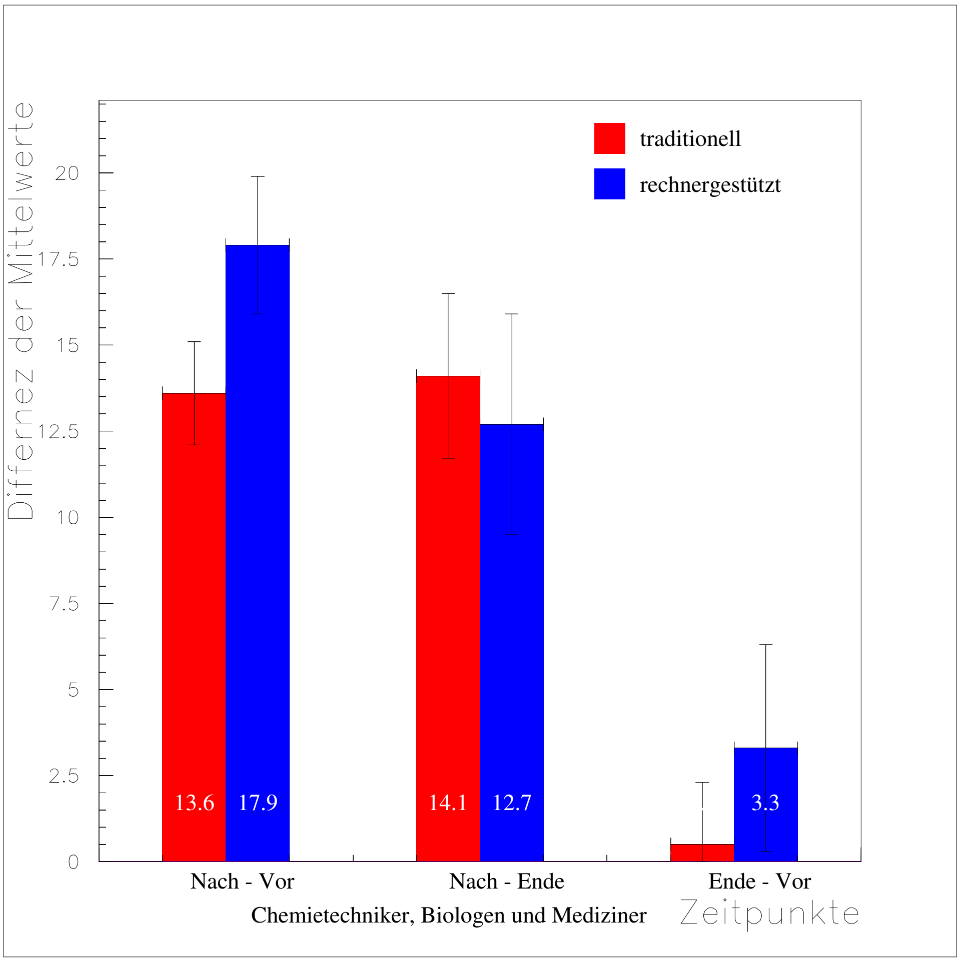


Abbildung 7.10: Wissensänderung der Studenten von Gruppe 3 zwischen den verschiedenen Zeitpunkten für das traditionelle und rechnergestützte Experiment.

Untersucht man nun die Wissensänderung der Studenten in Abhängigkeit der Experimente zwischen den verschiedenen Befragungszeitpunkten, so erhält man Tabelle (7.27) sowie Abbildung (7.10). In der Abbildung ist erkennen, das die Studenten, die das rechnergestützte Experiment bearbeiteten, während der Durchführung des Experimentes mehr lernen als die Vergleichsgruppe. Alle anderen Differenzen sind nahezu identisch. Ob die zu sehenden Differenzen signifikant sind oder nicht soll im Folgenden untersucht werden.

Bei der Betrachtung von Tabelle (7.28) ist zu erkennen, dass sich der visuelle Eindruck von Abbildung (7.10) teilweise bestätigt. Zu erkennen ist, dass die Studenten, die das rechnergestützte Experiment bearbeitet haben, nur tendenziell mehr gelernt

Art des Experimentes		Wissensunterschied *Nach – Vor*	*Nach – Ende*	*Ende – Vor*
traditionell	Differenz in %	13.6	14.1	-0.5
	Schwankung in %	1.5	2.4	1.8
rechnergestützt	Differenz in %	17.9	12.7	3.3
	Schwankung in %	2.0	3.2	3.0

Tabelle 7.27: Wissensänderung der Studenten von Gruppe 3 (Chemietechniker, Biologen und Mediziner) zwischen den verschiedenen Zeitpunkten für das traditionelle und rechnergestützte Experiment.

Vergleich zwischen	Zeitpunkte d. Befragung	t	*DF*	Signifikanz (für Gleichheit)
	Nach – Vor	1.74	117	**0.084**
rech. – trad.	*Nach – Ende*	0.368	70	**0.714**
	Ende – Vor	1.117	70	**0.268**

Tabelle 7.28: Vergleich der Wissensänderung (Differenz der richtig beantworteten Fragen) der Gruppe 3 (Chemietechniker, Biologen und Mediziner) zwischen dem rechnergestützten und traditionellen Experiment.

haben als die Studenten, die das traditionelle Experiment bearbeitet haben. Bestätigt hat sich, dass die Wissensänderungen zwischen den anderen Zeitpunkten nur zufällig sind; die Signifikanz für die Gleichheit ist in diesen beiden Fällen hoch.

In Tabelle (7.29) ist der Vergleich des Wissens zwischen den verschiedenen Befragungszeitpunkten innerhalb eines Experimentes dargestellt. In der letzten Spalte dieser Tabelle steht die Signifikanz für die Gleichheit des Wissens zu den Vergleichs-

Vergleich zwischen d. Befragungszeitpunkten	Art des Experiment	t	*DF*	Signifikanz (für Gleichheit)
Nach - Vor	trad.	9.31	60	$\leq$ **0.001**
	rech.	9.109	57	$\leq$ **0.001**
Nach - Ende	trad.	5.99	38	$\leq$ **0.001**
	rech.	3.99	32	$\leq$ **0.001**
Ende - Vor	trad.	-0.253	38	**0.802**
	rech.	1.118	32	**0.272**

Tabelle 7.29: Vergleich der Anzahl der richtigen Antworten der Studenten von Gruppe 3 (Chemietechniker, Biologen und Mediziner) für das rechnergestützte und traditionelle Experiment.

punkten. Für die ersten beiden Vergleiche ist diese Signifikanz unabhängig von der Durchführungsart sehr klein, für den letzten Vergleich ist sie so groß, dass noch nichteinmal ein tendenzieller Unterschied festgestellt werden kann. Dies bedeutet, dass die Studenten zwar während des Experimentes Wissen erlangten, jedoch bis zum Ende des Praktikums dieses Wissen wieder vollständig vergessen haben. Dieser Effekt ist im Unterschied zu der Gesamtstichprobe unabhängig von der Art des Experimentes, welches die Studenten bearbeitet haben.

Varianzanalyse für die Studenten der Gruppe 3

Zum Schluss dieser Gruppenauswertung soll mit der Varianzanalyse mit Messwertwiederholung untersucht werden, ob es eine unterschiedliche Entwicklung der Studenten in Abhängigkeit des Experimentes gibt, und ob diese Entwicklung vielleicht auch noch abhängig von dem Geschlecht ist. Diese Varianzanalyse ist in Tabelle (7.30) abgebildet.

Variable	DF	F	Signifikanz (für Unabhängigkeit)	Partielles η^2
MZP	2	22.974	$\leq$ **0.001**	0.274
MZP * EXP	2	2.201	**0.115**	0.035
MZP * SEX	2	1.484	**0.231**	0.024
MZP * EXP * SEX	2	0.574	**0.565**	0.009

Tabelle 7.30: Untersuchung der Lernerfolgsentwicklung, mit Hilfe der Varianzanalyse mit Meßwiederholung, bei der Gruppe 3 (Chemietechnik, Biologie und Medizin) zwischen dem traditionellen und rechnergestützten Experiment. (MZP: Messzeitpunkt; EXP: Art des Experimentes; STUDIUM: Studienfachrichtung; SEX: Geschlecht)

Betrachtet man Tabelle (7.30), so ist zu erkennen, dass auch bei dieser Gruppe eine Abhängigkeit des Wissens vom Messzeitpunkt (MZP) gibt. Dieses war nach den t-Tests (z.B. Tabelle (7.29)) zu erwarten. Bei dieser Gruppe gibt es aber nur einen tendenziellen Unterschied der Entwicklung in Abhängigkeit von der Art des Experimentes. Die dritte und vierte Zeile der Tabelle (7.30) bedeuten, dass es keine geschlechtsabhängige Entwicklung der Studenten gibt.

7.4 Betreuungsabhängige Lernerfolgsentwicklung

Im vorherigen Abschnitt wurde der Lernerfolgsvergleich in Abhängigkeit von der Experimentart betrachtet. Dieser ergab, dass die Studenten der Chemie und Chemietechnik einen von der Experimentart abhängigen Lernerfolg aufwiesen. Aus diesem Grund wurde bei dieser Gruppe untersucht ob sich der Lernerfolg verändert, wenn das rechnergestützte Experiment über das Internet betreut wird.

Statistik der richtigen Antworten

In Abbildung (7.11) ist die Anzahl der richtigen Antworten zu den verschiedenen Zeitpunkten abgebildet; in Tabelle (7.31) stehen die für die Abbildung zugehörigen Daten.

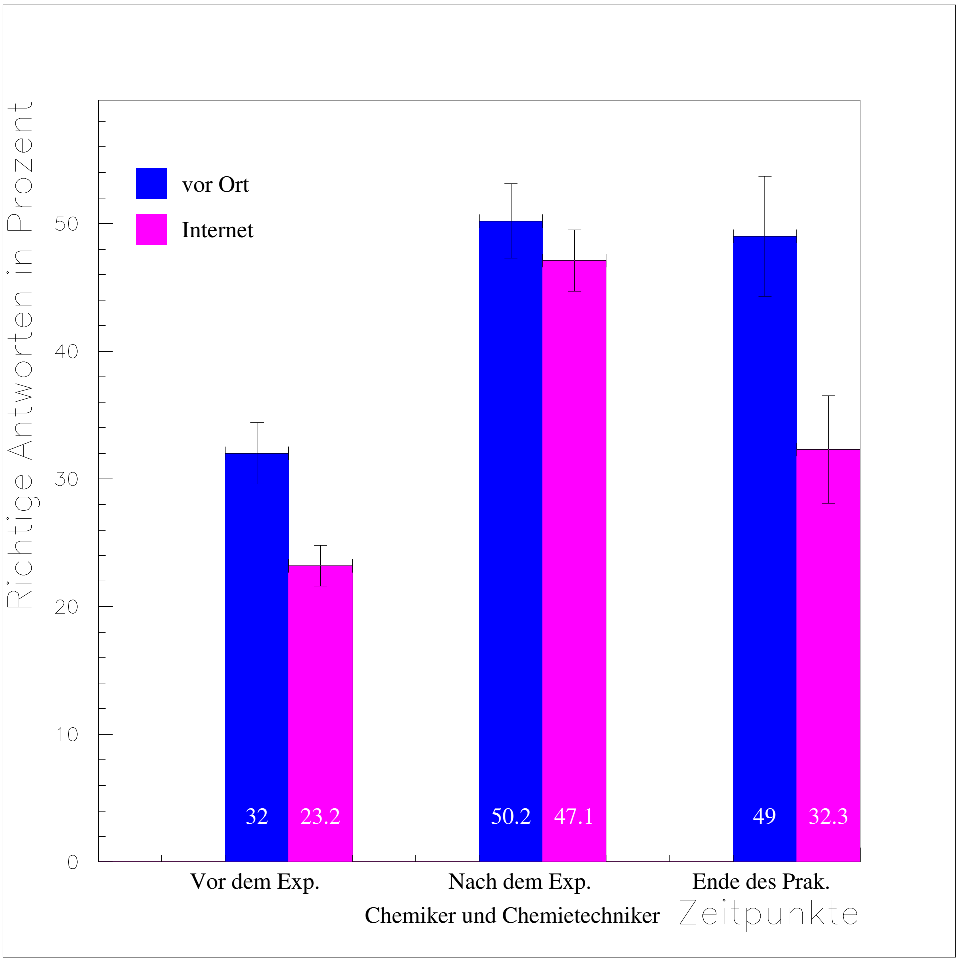


Abbildung 7.11: Anzahl der richtigen Antworten der rechnergestützten Experimente in Abhängigkeit von der Betreuungsart.

Betrachtet man Abbildung (7.7) so ist zu erkennen, dass die Studenten, welche über das Internet betreut wurden, deutlich weniger Fragen richtig beantworteten als die Vergleichsgruppen. Nach dem Experiment ist dieser Unterschied geringer, aber zum letzten Befragungszeitpunkt hin wächst die Differenz wieder. Ob diese Differenzen signifikant sind, soll im Folgenden untersucht werden.

Art der Betreuung		Zeitpunkte *Vor*	*Nach*	*Ende*
Vor Ort	Mittlere %-Zahl d. richtigen Antworten	32.0	50.2	49.0
	Schwankung in %	2.4	2.9	4.7
Internet	Mittlere %-Zahl d. richtigen Antworten	23.2	47.1	32.3
	Schwankung in %	1.6	2.4	4.2

Tabelle 7.31: Anzahl der richtigen Antworten der rechnergestützten Experimente in Abhängigkeit von der Betreuungsart.

Vergleich des Wissens mit Hilfe des t-Tests

Der Aufbau von Tabelle (7.32), in der untersucht wird, ob die Mittelwertunterschiede von Abbildung (7.11) signifikant sind, gleicht denen aus den Abschnitten (7.3.1) und (7.3.2). Auch hier steht die Signifikanz für die Gleichheit der Mittelwerte in der letzten Spalte.

Vergleich zwischen	Zeitpunkte d. Befragung	Differenz	t	DF	Signifikanz (für Gleichheit)
Vor Ort	*Vor*	8.77	3.189	76	**0.002**
–	*Nach*	3.09	0.805	76	**0.424**
Internet	*Ende*	16.70	2.074	36	**0.045**

Tabelle 7.32: Vergleich des Wissens (Anzahl der richtig beantworteten Fragen) der Studenten, die vor Ort betreut wurden mit denen, die über das Internet betreut wurden in Abhängigkeit der Zeitpunkte.

Zu erkennen ist, dass sich die Studentengruppen schon vor dem Experiment unterscheiden. Woher dieser Unterschied kommt, kann nur vermutet werden. Die Vorbereitung für die Studentengruppen wurde zwar konstant gehalten, aber die Studenten, die über das Internet betreut wurden, absolvierten das Praktikum ein Jahr später als die Studenten, welche vor Ort betreut wurden. Es wurde also zwei verschiedene Semester miteinander verglichen. Somit kann es zu Schwankungen im Vorwissen der Studenten kommen.
Nach dem Experiment ist kein Wissensunterschied festzustellen. Die Studenten, die über das Internet betreut wurden, lernen also mehr als diejenigen, die vor Ort betreut werden. Dieser Effekt kann damit erklärt werden, dass bei der Internetbetreuung immer nur eine Gruppe betreut werden konnte, während bei der Betreuung vor Ort zwei Gruppen parallel betreut werden konnten. Durch diese intensivere Betreuung der Studenten könnte der größere Lernenerfolg zustande kommen.

Art der Betreuung		Wissensunterschied Nach – Vor	Nach – Ende	Ende – Vor
Vor Ort	Differenz in %	18.2	8.1	15.2
	Schwankung in %	2.8	4.7	6.2
Internet	Differenz in %	23.9	15.7	6.9
	Schwankung in %	2.1	3.3	4.1

Tabelle 7.33: Wissensänderung der Studenten der rechnergestützten Experimente zwischen den verschiedenen Zeitpunkten in Abhängigkeit der Betreuungsart.

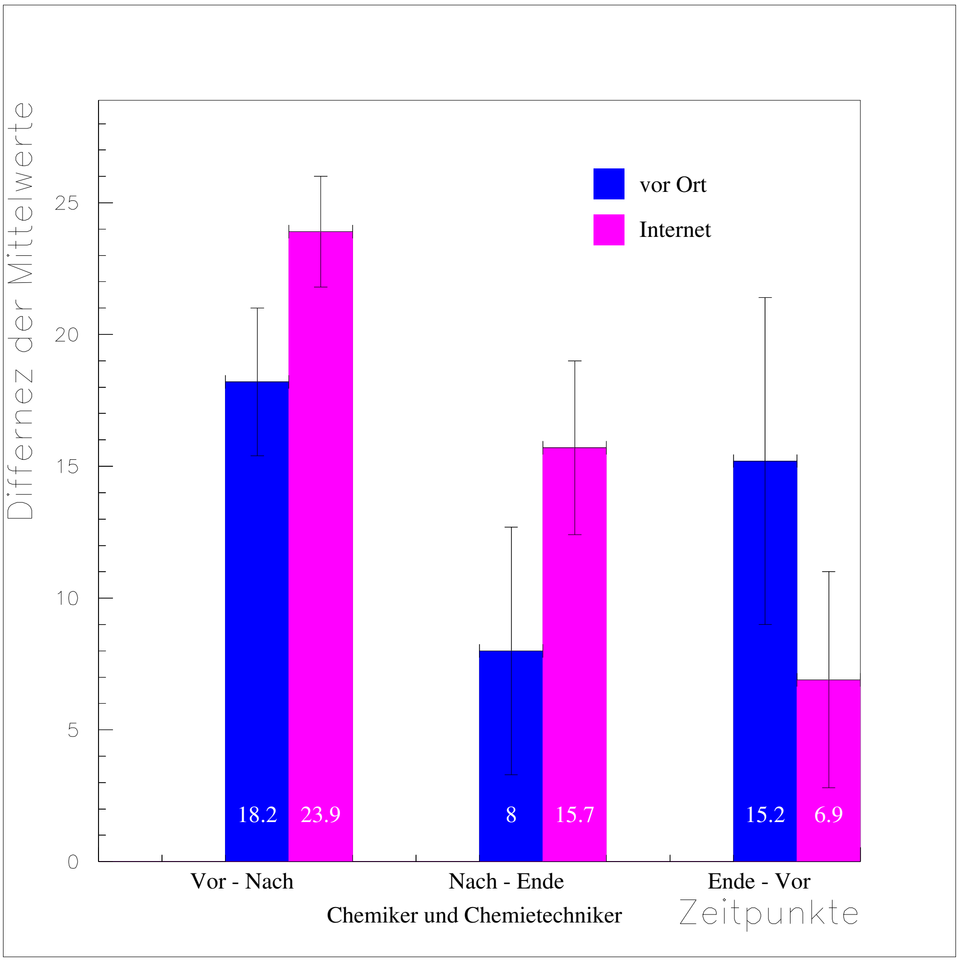


Abbildung 7.12: Wissensänderung der Studenten der rechnergestützten Experimente zwischen den verschiedenen Zeitpunkten in Abhängigkeit der Betreuungsart.

Am Ende des Praktikums ist wieder ein signifikanter Wissensunterschied zu erkennen. Die internetbetreuten Studenten vergessen also mehr als die Praktikanten aus der Vergleichsgruppe. Ob sie aber im Vergleich zu vor dem Experiment etwas gelernt haben soll im Folgenden betrachtet werden.

Vergleich zwischen	Zeitpunkte d. Befragung	t	DF	Signifikanz (für Gleichheit)
vor Ort	*Nach – Vor*	-1.650	76	**0.103**
–	*Nach – Ende*	1.186	36	**0.243**
Internet	*Ende – Vor*	1.018	36	**0.316**

Tabelle 7.34: Vergleich der Wissensänderung (Differenz der richtig beantworteten Fragen) zwischen der Betreuung „vor Ort“ und über das „Internet“.

In Abbildung (7.12) sowie in Tabelle (7.33) sind die Wissensunterschiede zwischen den unterschiedlichen Zeitpunkten innerhalb einer Gruppe aufgeführt. Die Ergebnisse spiegeln die obige Betrachtung wider, dass die Studenten, die über das Internet betreut wurden, mehr gelernt, aber auch mehr vergessen haben.
Diese visuelle Eindruck wird aber durch Tabelle (7.34) relativiert. In dieser Tabelle ist zu sehen, dass die internet-betreuten Studenten zwar tendenziell mehr gelernt haben, aber die anderen Differenzen zeigen keine Unterschiede der Wissensänderung auf.

Zum Abschluss dieser Einzelvergleiche soll nun die Anzahl der richtigen Antworten zu den einzelnen Zeitpunkten innerhalb eines Experimentes untersucht werden. Die Ergebnisse sind in Tabelle (7.35) abgebildet.
Betrachtet man hier die Unterschiede, so ist festzustellen, dass beide Studentengruppen, unabhängig von der Art der Betreuung, am Ende des Praktikums mehr über den physikalischen Inhalt des Experimentes wussten als vor der Durchführung. Dieser Effekt ist bei der Betreuung über das Internet im Gegensatz zur Betreuung vor Ort

Vergleich zwischen d. Befragungszeitpunkten	Art des Betreuung	t	DF	Signifikanz (für Gleichheit)
Nach - Vor	vor Ort	6.515	29	$\leq$ **0.001**
	Internet	11.417	47	$\leq$ **0.001**
Nach - Ende	vor Ort	1.735	8	**0.121**
	Internet	4.822	28	$\leq$ **0.001**
Ende - Vor	vor Ort	2.443	8	**0.040**
	Internet	1.692	28	**0.102**

Tabelle 7.35: Vergleich der Anzahl der richtigen Antworten der Studenten der rechnergestützten Experimente für die beiden Betreuungsarten.

nur tendenziell zu erkennen. Dies kann möglicherweise dadurch erklärt werden, dass die Studenten, die über das Internet betreut wurden, von der ungewohnten Betreuungsart teilweise abgelenkt wurden und so die Konzentration auf den physikalischen Inhalt nicht so gut wie bei der Vergleichsgruppe war.

Varianzanalyse für die Studenten des Betreuungsvergleiches

In Tabelle (7.36) ist mit Hilfe der Varianzanalyse untersucht worden, ob die Entwicklung der Praktikanten von der Art der Betreuung oder anderen Parametern abhängt. Die Ergebnisse dieser Varianzanalyse mit Messwertwiederholung sind in Tabelle (7.36) so aufbereitet, wie bei allen vorangegangenen Varianzanalysen.
In der Tabelle ist zu erkennen, dass auch bei diesem Vergleich eine Entwicklung der Studenten festzustellen ist, da die Signifikanz auf die Unabhängigkeit dieser Variable kleiner als 1 % ist. Als nächstes wird in der Tabelle die Unabhängigkeit der Entwicklung des Lernerfolges von der Art der Betreuung untersucht. Betrachtet man dafür die Signifikanz, so ist zu sehen, dass hier keine signifikante Abhängigkeit von dieser Variable festzustellen ist. Also entwickeln sich die Studenten unabhängig von der Art der Betreuung. Diese Ergebnis deutet sich schon bei den Mittelwertvergleichen an.
Bei der Betrachtung der anderen Parameter ist keine weitere signifikante Abhängigkeit festzustellen.

Variable	DF	F	Signifikanz (für Unabhängigkeit)	Partielles η^2
MZP	2	25.058	$\leq$ **0.001**	0.447
MZP * BETR	2	0.690	**0.291**	0.039
MZP * SEX	2	2.995	**0.057**	0.088
MZP * BETR * SEX	2	0.337	**0.718**	0.011

Tabelle 7.36: Untersuchung, ob die Entwicklung des Lernerfolges von der Art der Betreuung und anderen Parametern abhängt.(MZP: Messzeitpunkt; BETR: Art der Betreuung; SEX: Geschlecht)

7.5 Zusatzinformationen

In dem folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse aus der Auswertung der Zusatzinformationen von beiden Vergleichen betrachtet. Mit „traditionell“ wird die Praktikums-Gruppe bezeichnet, die das traditionelle Experiment mit der Betreuung vor Ort durchführte. Als „rechnergestützt“ wird das rechnergestützte Experiment bezeichnet, welches vor Ort betreut werde. Mit „internetbetreut“ soll im Folgenden das rechnergestützte Experiment bezeichnet werden, welches über das Internet betreut wurde.

7.5.1 Auswertung der Zusatzfragen

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse von ausgewählten Zusatzfragen (siehe Anhang (C) diskutiert. Dabei wird zuerst die selbsteingeschätzte Rechnerkompetenz betrachtet und die jeweilige Auswirkung auf das Lernen. Danach geht es um die Frage der Bewertung des jeweiligen Experimentes im Vergleich zu anderen Experimenten im Praktikum. Als letzte Zusatzfrage soll noch die Frage nach der Möglichkeit des Ausprobierens bei dem jeweiligen Experiment untersucht werden.

Selbsteinschätzung der Rechnerkenntnisse (Zusatzfrage 1)

Die erste von den Studenten zu beantwortende Zusatzfrage lautet: „Wie gut sind Ihre Computerkenntnisse?“ Als Antwort stand den Studenten eine fünfstufige Skala (siehe Anhang (C)) zur Verfügung. Die durchschnittliche Selbsteinschätzung der Studenten ist in Abbildung (7.13) sowie in Tabelle (7.37) dargestellt.

In Abbildung (7.13) ist zu erkennen, dass die Studenten ihre Rechnerkenntnisse durchschnittlich mit gut bis mittelmäßig bewerten. Auch sieht man, dass die Selbsteinschätzung der Rechnerkenntnisse bei allen Gruppen nahezu gleich ist. Somit kann gesagt werden, dass nicht nur Computer-Spezialisten das rechnergestützte oder internetbetreute Experiment durchgeführt haben. Die Praktikanten, die diese Experimente durchführten, sind also auf diesem Gebiet vergleichbar mit denen, die das traditionelle Experiment bearbeiteten.

Desweiteren ist zu sehen, dass die Studenten ihre Fähigkeit am Rechner am Ende des Semesters oder Praktikums im Durchschnitt nicht wesentlich besser bewerten als vor dem Experiment. Aus diesem Effekt könnte der Rückschluss gezogen werden, dass

Art des Experimentes		Mittelwert Zusatzfrage 1 Vor dem Experiment	Nach dem Experiment	Am Ende des Praktikums
traditionell	Mittelwert d. Note	2.72	2.64	2.65
	Fehler	0.11	0.10	0.11
rechnergestützt	Mittelwert d. Note	2.60	2.63	2.57
	Fehler	0.12	0.10	0.13
internetbetreut	Mittelwert d. Note	2.74	2.81	2.74
	Fehler	0.12	0.10	0.13

Tabelle 7.37: Mittelwert der Notengebung für die erste Zusatzfrage (Einschätzung der Rechnerkenntnisse). Die Praktikanten konnten Noten von 1 (sehr gut) bis 5 (sehr schlecht) vergeben. (traditionell: traditionelles Experiment und vor Ort betreut; rechnergestützt: rechnergestütztes Experiment und vor Ort betreut; internetbetreut: rechnergestütztes Experiment und über das Internet betreut)

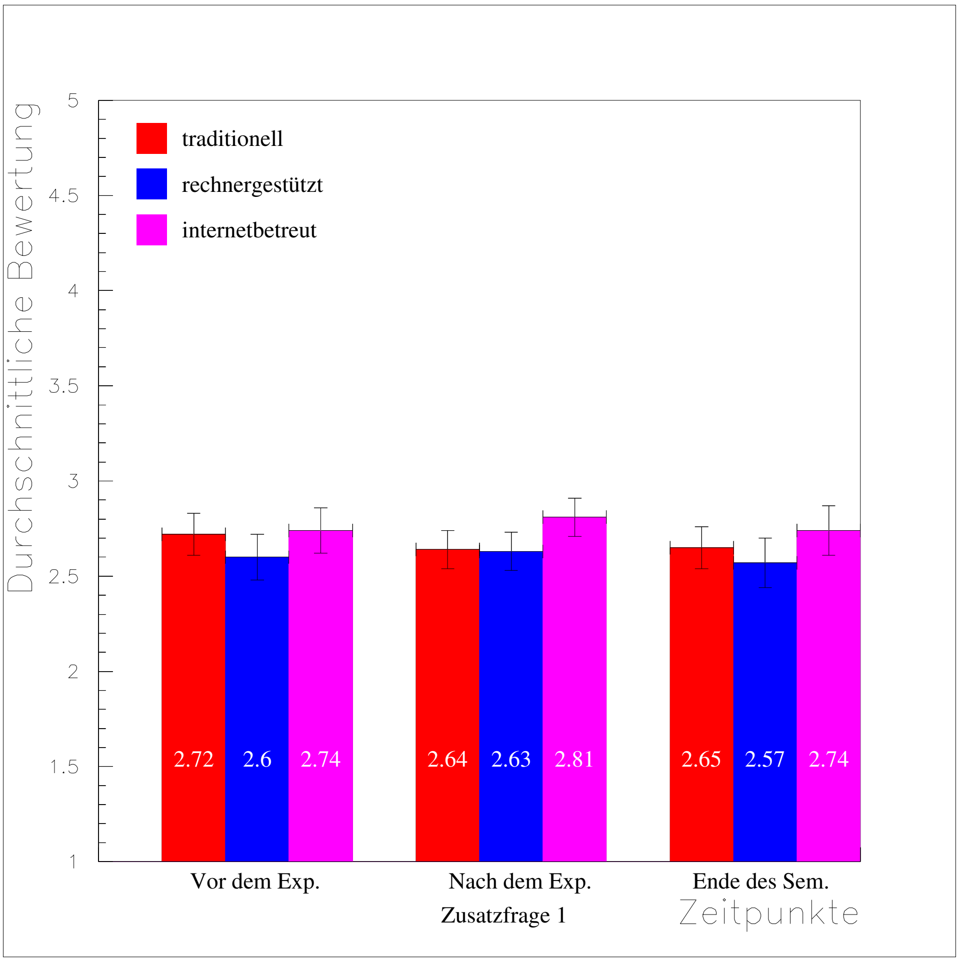


Abbildung 7.13: Durchschnittliche Einschätzung der Rechnerkenntnisse (Zusatzfrage 1) für die Studenten der verschiedenen Experimente in Abhängigkeit vom Befragungszeitpunkt. Die Praktikanten konnten Noten von 1 (sehr gut) bis 5 (sehr schlecht) vergeben.(traditionell: traditionelles Experiment und vor Ort betreut; rechnergestützt: rechnergestütztes Experiment und vor Ort betreut; internetbetreut: rechnergestütztes Experiment und über das Internet betreut)

die Studenten im restlichen Praktikum wenig bis gar nicht mit Rechnern umgehen. Dadurch geht eine Möglichkeit verloren, den Praktikanten den Computer als neues und nützliches Arbeitsmedium nahezubringen.

In Tabelle (7.38) ist die Korrelation zwischen den Rechnerkenntnissen (Zusatzfrage 1) und der Anzahl der richtigen Antworten dargestellt. Da die Antwort der Studenten in Noten (1-5) umgerechnet wurden, bedeutet hier eine negative Korrelation, dass die

Studenten, die meinten gut mit dem Rechner umgehen zu können, auch relativ viele Fragen richtig beantwortet haben. Die in der Tabelle angegebene Signifikanz sagt bei großen Werten aus, dass die Korrelation nur zufällig und nicht von Bedeutung ist.

Betrachtet man die Signifikanzen in Tabelle (7.38), so ist festzustellen, dass die Anzahl der richtigen Antworten nach dem Experiment bei allen Experimentarten sehr stark mit den Rechnerkenntnissen korrelieren, auch wenn es vor dem Experiment diese Korrelation nicht gab. Auch am Ende des Semesters oder Praktikums ist bei dem rechnergestützten Experiment diese Korrelation noch signifikant und bei dem traditionellen Experiment immerhin noch tendenziell. Das internetbetreute Experiment zeigt zu diesem letzten Zeitpunkt keine Abhängigkeit mehr.

Einschätzung der Rechnerkenntnisse (Zusatzfrage 1)

Zeitpunkt des Vergleiches	Art des Experimentes	Korrelation[1]	Signifikanz (der Korrelation)	Anzahl der Personen
Vor dem Experiment	traditionell	-0.134	**0.274**	69
	rechnergestützt	-0.265	**0.023**	73
	internetbetreut	-0.131	**0.408**	42
Nach dem Experiment	traditionell	-0.278	**0.010**	84
	rechnergestützt	-0.364	**0.001**	87
	internetbetreut	-0.300	**0.041**	47
Am Ende des Semesters	traditionell	-0.247	**0.088**	49
	rechnergestützt	-0.345	**0.019**	46
	internetbetreut	-0.196	**0.328**	27

Tabelle 7.38: Korrelation der Anzahl der richtigen Antworten mit den selbsteingeschätzten Rechnerkenntnissen. [1]: Angegeben ist die Korrelation zwischen der Beantwortung dieser Frage mit der Anzahl der richtig beantworteten Fragen. (traditionell: traditionelles Experiment und vor Ort betreut; rechnergestützt: rechnergestütztes Experiment und vor Ort betreut; internetbetreut: rechnergestütztes Experimentund über das Internet betreut)

Die Studenten sollten sich Noten von 1 (sehr gut) bis 5 (sehr schlecht) geben. Somit bedeutet eine negative Korrelation, dass die Studenten mit guten Rechnerkenntnissen auch viele Fragen richtig beantwortet haben.

Bewertung der jeweiligen Experimente (Zusatzfrage 3)

Bei der dritten Zusatzfrage sollen die Praktikanten das durchgeführte Experiment mit den anderen Experimenten im Praktikum vergleichen (siehe Anhang (C)). Auch hier wurden die Bewertungen in Noten (1-5) umgewandelt. Die Ergebnisse sind in Abbildung (7.14), die zugehörigen Daten in Tabelle (7.39) dargestellt.

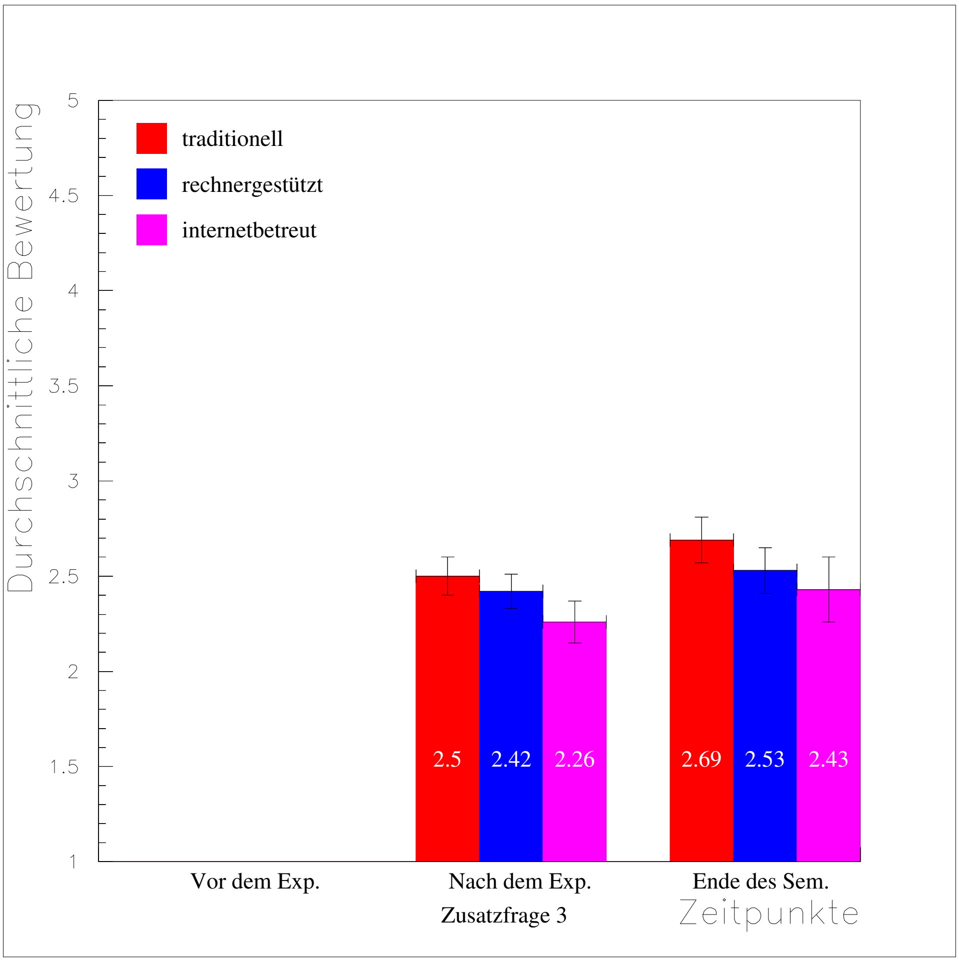


Abbildung 7.14: Durchschnittliche Bewertung des jeweiligen Experimentes im Vergleich zu anderen Experimenten (Zusatzfrage 3) für die Studenten der verschiedenen Experimente in Abhängigkeit des Befragungszeitpunktes. Die Praktikanten konnten Noten von 1 bis 5 vergeben. 3 $\hat{=}$ genausogut wie die anderen Praktikumsexperimente.

In Abbildung (7.14) ist zu erkennen, dass diese Frage vor dem Experiment noch nicht gestellt werden konnte, somit sind diese Spalten leer.
Desweiteren sieht man, dass die Praktikanten unabhängig von der Experimentart das jeweilige Experiment genauso gut oder schlecht wie die anderen Experimente im Praktikum bewertet haben.
Die Unterschiede zwischen den Zeitpunkten sind durch den weiteren Praktikumsverlauf zu erklären.

Art des Experimentes		Mittelwert Zusatzfrage 3 Vor dem Experiment	 Nach dem Experiment	 Am Ende des Praktikums
traditionell	Mittelwert d. Note	.	2.50	2.69
	Fehler	.	0.10	0.12
rechnergestützt	Mittelwert d. Note	.	2.42	2.53
	Fehler	.	0.09	0.12
internetbetreut	Mittelwert d. Note	.	2.26	2.43
	Fehler	.	0.11	0.17

Tabelle 7.39: Mittelwert der Notengebung für die dritte Zusatzfrage (Beurteilung des Experimentes im Vergleich zu anderen Experimenten. Die Praktikanten konnten Noten von 1 (sehr gut) bis 5 (sehr schlecht) vergeben.

In Tabelle (7.40) ist die Korrelation zwischen der Beantwortung der dritten Zusatzfrage und dem jeweiligen Gesamtergebnis dargestellt. Da die Beantwortung der Fragen in Noten von eins bis fünf kodiert wurde, bedeutet hier eine negative Korrelation, dass, wenn das Experiment im Vergleich zu anderen als gut gewertet worden ist, dann beantwortete der Praktikant auch viel Fragen richtig.
Zusätzlich zu der Korrelation ist in der vierten Spalte die Signifikanz für diese Korrelation angegeben. Hier bedeutet eine hohe Signifikanz (> 0.05), dass die Korrelation zufällig zustande gekommen ist.

Beurteilung des Experimentes im Vergleich (Zusatzfrage 3)

Zeitpunkt des Vergleiches	Art des Experimentes	Korrelation	Signifikanz (der Korrelation)	Anzahl der Personen
Nach dem Experiment	traditionell	-0.163	**0.144**	82
	rechnergestützt	-0.013	**0.910**	84
	internetbetreut	0.054	**0.721**	46
Am Ende des Semesters	traditionell	-0.247	**0.088**	49
	rechnergestützt	-0.026	**0.860**	49
	internetbetreut	0.073	**0.628**	47

Tabelle 7.40: Korrelation der Anzahl der richtigen Antworten mit der Beurteilung des Experimentes im Vergleich zu anderen Experimenten des Praktikums. [1]: Angegeben ist die Korrelation zwischen der Beantwortung dieser Frage mit der Anzahl der richtig beantworteten Fragen.

Die Studenten sollten das Experiment mit Noten von 1 (sehr gut) bis 5 (sehr schlecht) bewerten. Somit bedeutet eine negative Korrelation, dass die Studenten, die das Experiment mit gut bewerteten, auch viele Fragen richtig beantwortet haben.

Betrachtet man nun die Signifikanz in Tabelle (7.40), so ist festzustellen, dass in jeder Zeile die Signifikanz größer als 5 % ist. Somit kann man davon ausgehen, dass die Korrelationen zufällig zustande gekommen sind. Also spiegelt sich die subjektive Bewertung des Experimentes nicht in der Anzahl der richtigen Fragen wieder. Das bedeutet, dass auch Praktikanten, denen das jeweilige Experiment nicht so viel Spaß gemacht hat, genausoviel lernen wie Praktikanten, die solch ein Experiment befürworteten. Dieser Effekt ist unabhängig davon, ob das traditionelle oder das rechnergestützte Experiment durchgeführt wurde, oder ob die Studenten über das Internet betreut wurden.

Bewertung der Möglichkeit des Experimentierens (Zusatzfrage 6)

Die letzte Zusatzfrage im Fragebogen zielte darauf ab, inwieweit die Studenten eigene Ideen in das Experiment miteinbringen konnten. Es wurde gefragt: „Wie sehen Sie das Ausprobieren und „Experimentieren“ beim vorliegenden Versuch?“ (Siehe Anhang (C)).
Die Praktikanten hatten auch hier fünf Antwortmöglichkeiten. Diese wurden wieder in Noten von eins bis fünf kodiert.
Wie die Praktikanten des jeweiligen Experimentes die Frage durchschnittlich beantwortet haben, ist in Tabelle (7.41) und Abbildung (7.15) dargestellt.

In Abbildung (7.15) ist zu erkennen, dass das Ausprobieren bei den jeweiligen Experimenten insgesamt mit gut bis mittelmäßig bewertet worden ist. Auffällig ist aber, dass die Praktikanten, die das Experiment auf traditionelle Art und Weise durchführten, meinten, sie könnten weniger ausprobieren und beeinflussen als die beiden anderen Gruppen. Ob diese Unterschiede signifikant sind, soll im Folgenden betrachtet werden.

Tabelle (7.42) zeigt den Mittelwertvergleich für die Zusatzfrage 6 zwischen den Ex-

Art des Experimentes		**Mittelwert Zusatzfrage 6** Vor dem Experiment	Nach dem Experiment	Am Ende des Praktikums
traditionell	Mittelwert d. Note	.	2.73	2.76
	Fehler	.	0.10	0.11
rechnergestützt	Mittelwert d. Note	.	2.16	2.39
	Fehler	.	0.09	0.13
internetbetreut	Mittelwert d. Note	.	2.26	2.59
	Fehler	.	0.12	0.17

Tabelle 7.41: Mittelwert der Notengebung für die sechste Zusatzfrage (Beurteilung des Experimentierens). Die Praktikanten konnten Noten von 1 (sehr gut) bis 5 (sehr schlecht) vergeben.

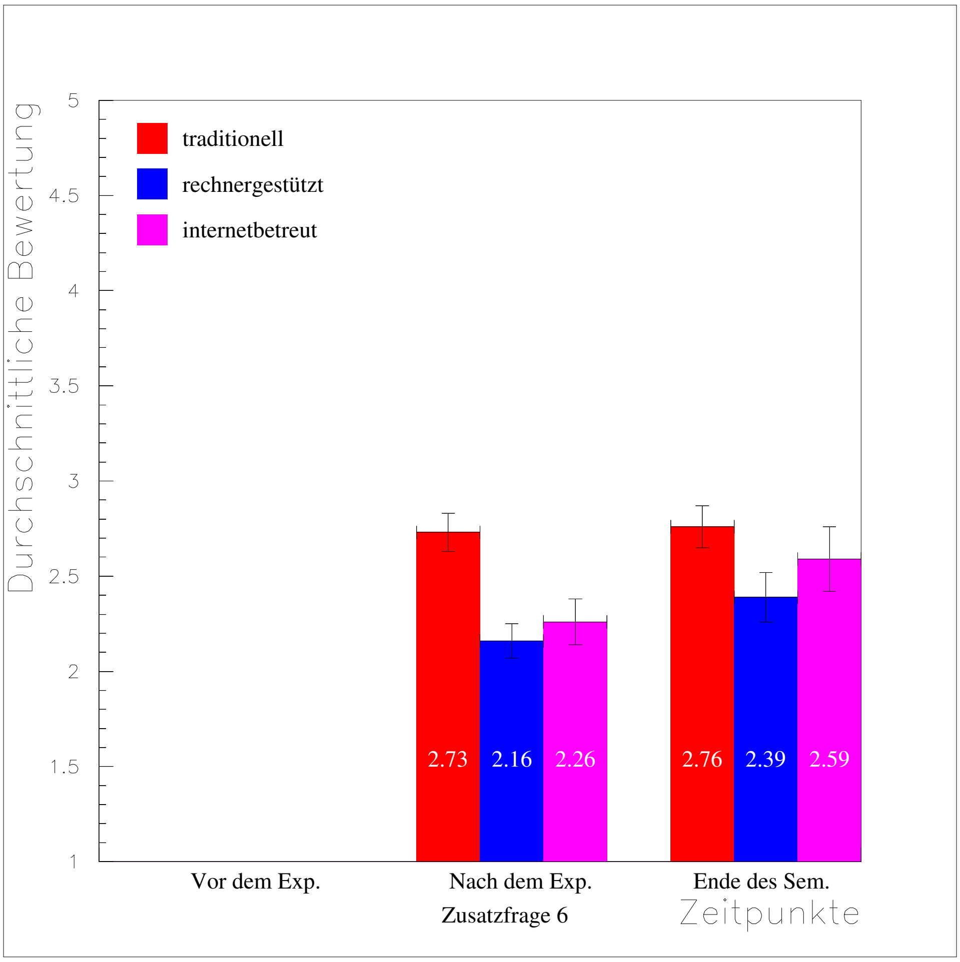


Abbildung 7.15: Durchschnittliche Bewertung des Ausprobierens und Experimentierens bei dem jeweiligen Experiment (Zusatzfrage 6) für die Studenten der verschiedenen Experimente in Abhängigkeit vom Befragungszeitpunkt. Die Praktikanten konnten Noten von 1 (sehr gut) bis 5 (sehr schlecht) vergeben.

perimenten zu den unterschiedlichen Zeitpunkten. Die in der Tabelle angegebene Signifikanz testet auf die Gleichheit der Mittelwerte. Eine kleine Signifikanz (≤ 0.05) bedeutet also, dass sich die Mittelwerte unterscheiden.
Betrachtet man daraufhin die Tabelle (7.42), so ist festzustellen, dass die Praktikanten des ersten Vergleiches das Experimentieren und Ausprobieren während des Experimentes unterschiedlich bewertet haben.
Die Praktikanten, welche das Experiment am Rechner durchführten, beantworteten die Frage gleich, egal wie sie betreut wurden.
Bei dem letzten Vergleich ist direkt nach dem Experiment ein Unterschied festzu-

Vergleich zwischen	Zeitpunkte d. Befragung	t	DF	Signifikanz (für Gleichheit)
rech. – trad.	*Nach*	-4.345	168	$\leq$ **0.001**
	Ende	-2.189	92	**0.031**
rech. – int.	*Nach*	-0.645	133	**0.520**
	Ende	-0.957	71	**0.342**
trad. – int.	*Nach*	2.949	127	**0.004**
	Ende	0.851	73	**0.397**

Tabelle 7.42: Vergleich der Mittelwerte zwischen den verschiedenen Experimentarten bei der Frage nach der Beurteilung des Experimentierens (Zusatzfrage 6)

stellen, dieser verschwindet aber bei der letzten Befragung.
Zusammenfassend kann also gesagt werden, dass die Studenten, die das Experiment am Rechner durchführten, sich nicht eingeschränkt fühlten. Sie hatten sogar eher das Gefühl, sie könnten bei dieser Experimentart mehr ausprobieren, als wenn sie das Experiment selbst aufgebaut hätten.

Untersucht man nun den Zusammenhang zwischen der Bewertung von Zusatzfrage 6 und der Anzahl der richtigen Antworten zu dem jeweiligen Zeitpunkt, so erhält man Tabelle (7.43).

In Tabelle (7.43) ist zu erkennen, dass das Gefühl, bei einem Experiment etwas

		Beurteilung des Experimentierens (Zusatzfrage 6)		
Zeitpunkt des Vergleiches	Art des Experimentes	Korrelation	Signifikanz (der Korrelation)	Anzahl der Personen
Nach dem Experiment	traditionell	0.048	**0.666**	82
	rechnergestützt	-0.102	**0.346**	88
	internetbetreut	-0.190	**0.200**	47
Am Ende des Semesters	traditionell	-0.247	**0.088**	49
	rechnergestützt	0.078	**0.600**	48
	internetbetreut	0.025	**0.867**	46

Tabelle 7.43: Korrelation der Anzahl der richtigen Antworten mit der Bewertung der Möglichkeit des Experimentierens/Ausprobierens. [1]: Angegeben ist die Korrelation zwischen der Beantwortung dieser Frage mit der Anzahl der richtig beantworteten Fragen.

Die Studenten sollten das Ausprobieren und Experimentieren mit Noten von 1 (sehr gut) bis 5 (sehr schlecht) bewerten. Somit bedeutet eine negative Korrelation, dass die Studenten, die das Ausprobieren und Experimentieren mit gut bewertet haben, auch viele Fragen richtig beantwortet haben.

ausprobieren zu können, nicht mit der Anzahl der richtig beantworteten Fragen zusammenhängt. Die Signifikanz ist immer größer als 5 % und somit können die Korrelationen als zufällig angenommen werden. Einzig bei den Praktikanten, die das traditionelle Experiment durchgeführt haben, ist ein tendenzieller Zusammenhang bei der letzten Befragung festzustellen, wobei die Korrelation nicht sehr groß ist.

7.5.2 Informationen aus dem Fragebogenkopf

In diesem Abschnitt wird untersucht, ob der Lernerfolg von dem Vorwissen (Physik in der Oberstufe) oder dem Alter abhängt. Eine Abhängigkeit von der Note in der letzten Physik-Klausur wurde nicht untersucht, da diese Frage häufig nicht beantwortet wurde. Außerdem bezogen sich die angegebenen Klausurnoten innerhalb eines Studienganges teilweise auf unterschiedliche Klausuren, so dass eine Studienfachabhängige Auswertung nicht gemacht werden konnte.

Abhängigkeit des Lernerfolges vom schulischen Vorwissen

Im Fragebogenkopf wurde den Praktikanten die Frage gestellt, ob sie Physik in der Oberstufe belegt hatten. Diese Frage kann auf verschiedene Weise interpretiert werden, zum einen zeigt sie das Interesse für Physik auf und zum anderen spiegelt sie das physikalische Vorwissen wieder. Jedoch unabhängig davon, wie die Frage interpretiert wird, ist eine Korrelation mit der Anzahl der richtigen Antworten zu vermuten. Einerseits, ist bei Praktikanten mit Interesse an der Physik zu erwarten, dass sie sich auch stärker mit dem Inhalt beschäftigen, und andererseits kann es bei größerem Vorwissen zu einer stärkeren Verknüpfung und Assoziation des neu zu lernenden Inhalts mit bereits Bekanntem kommen, was zu einem größeren Lernerfolg führt [Zim95]. Die Korrelation zwischen der Frage nach der Belegung von Physik in der Oberstufe mit der jeweiligen Anzahl der richtigen Antworten ist in Tabelle (7.44) zu sehen.

In Tabelle (7.44) sind in der ersten Spalte die Zeitpunkte der Befragung aufgeführt und in der zweiten die jeweiligen Experimentarten. In der dritten Spalte ist die Korrelation zwischen der Anzahl der richtig beantworteten Fragen in Abhängigkeit vom Experiment und Zeitpunkt und der Frage nach der Belegung von Physik in der Oberstufe aufgeführt. Eine positive Korrelation bedeutet dabei, dass die Praktikanten, die Physik in der Oberstufe belegt hatten, viele Fragen richtig beantworten konnten. Ob diese Korrelation zufällig ist oder nicht, wird in der vorletzten Spalte betrachtet. Dort steht die Signifikanz dafür, dass es keine Korrelation zwischen den betrachteten Größen gibt. In der letzten Spalte ist noch die Anzahl der Praktikanten angegeben, die diese Zusatzfrage im Kopf des Fragebogens beantwortet haben.

Betrachtet man die Signifikanz in Tabelle (7.44), so ist festzustellen, dass bei der Betreuung der Experimente vor Ort fast immer eine signifikante Korrelation zwischen den untersuchten Größen auftritt. Eine Ausnahme bildet dabei der Untersuchungs-

			Physik in der Oberstufe	
Zeitpunkt des Vergleiches	Art des Experimentes	Korrelation	Signifikanz (der Korrelation)	Anzahl der Praktikanten
Vor dem Experiment	traditionell	0.196	**0.088**	77
	rechnergestützt	0.451	$\leq$ **0.001**	82
	internetbetreut	0.196	**0.207**	43
Nach dem Experiment	traditionell	0.313	**0.006**	77
	rechnergestützt	0.530	$\leq$ **0.001**	82
	internetbetreut	0.165	**0.289**	43
Am Ende des Semesters	traditionell	0.400	**0.004**	50
	rechnergestützt	0.593	$\leq$ **0.001**	51
	internetbetreut	0.373	**0.061**	26

Tabelle 7.44: Korrelation der Anzahl der richtigen Antworten mit der Belegung von Physik in der Oberstufe.

Eine positive Korrelation bedeutet hier, dass die Studenten, die Physik in der Oberstufe belegt hatten, relativ viele Fragen im Test richtig beantworten konnten.

zeitpunkt „vor dem Experiment" bei den Praktikanten, die das traditionelle Experiment durchgeführt haben. Betrachtet man daraufhin die Größe der Korrelationen, so ist zu sehen, dass die Korrelationen im Laufe der Zeit stärker werden. Die Korrelation bei den Praktikanten, die das rechnergestützte Experiment bearbeiteten, ist viel größer als bei der Vergleichsgruppe.
Die internetbetreute Gruppe verhält sich bei dieser Untersuchung anders. Hier ist nur bei der letzten Befragung eine (starke) tendenzielle Korrelation zwischen den untersuchten Größen festzustellen, vorher sind die Korrelationen zufällig. Die Korrelation bei der letzten Befragung ist im Vergleich zu den anderen Befragungszeitpunkten groß.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass bei den Experimenten, die vor Ort betreut wurden, die obige Vermutung, dass bei einer Belegung von Physik in der Oberstufe mehr Fragen richtig beantwortet werden, zutrifft. Weiterhin ist die These zutreffend, dass die Korrelation im Laufe der Zeit sogar zunimmt, da das Wissen besser verankert werden kann. Dieser letzte Effekt ist auch bei den Praktikanten, die über das Internet betreut wurden, zu sehen. Bei den ersten beiden Befragungszeitpunkten gibt es aber keinen Zusammenhang zwischen diesen Größen. Ein Grund dafür könnte sein, dass nur Studenten von zwei Studienrichtungen bei der Untersuchung berücksichtigt wurden und dass die Anzahl der Praktikanten relativ gering ist. Somit wird der Effekt des größeren Vorwissens bei den ersten beiden Befragungszeitpunkten überlagert. Kommt neben dem größeren Vorwissen auch die bessere Speicherung des Wissens als zweiter Effekt dazu, so ist eine Korrelation zwischen der Anzahl der richtigen Antworten und der Belegung von Physik in der Oberstufe zu sehen (Fragebogen am Ende des Praktikums).

Abhängigkeit des Lernerfolges von dem Alter der Praktikanten

Als letzter Punkt dieses Abschnittes soll nun die Anzahl der richtig beantworteten Fragen in Abhängigkeit vom Alter der Praktikanten betrachtet werden. Die Korrelation zwischen diesen beiden Größen ist in Tabelle (7.45) dargestellt. Der Aufbau der Tabelle entspricht dem in Tabelle (7.44).

In der Tabelle (7.45) ist zu erkennen, dass es keine signifikante Korrelation zwischen dem Alter der Praktikanten und der Anzahl der richtig beantworteten Fragen gibt. Dies kann daran liegen, dass der Altersunterschied zwischen den Studenten gering ist, da nur Studenten des ersten bis vierten Semesters eines der Experimente durchgeführt haben. Somit kann keine Aussage darüber getroffen werden, wie ältere Studenten mit Experimenten am Rechner oder mit der Betreuung von Experimenten über das Internet umgehen und wie sie diese bewerten würden.

		Alter der Praktikanten		
Zeitpunkt des Vergleiches	Art des Experimentes	Korrelation	Signifikanz (der Korrelation)	Anzahl der Personen
Vor dem Experiment	traditionell	-0.126	**0.250**	85
	rechnergestützt	-0.023	**0.835**	86
	internetbetreut	-0.002	**0.989**	48
Nach dem Experiment	traditionell	-0.128	**0.242**	85
	rechnergestützt	-0.086	**0.432**	86
	internetbetreut	0.024	**0.871**	48
Am Ende des Semesters	traditionell	-0.187	**0.172**	55
	rechnergestützt	0.021	**0.882**	52
	internetbetreut	0.199	**0.301**	29

Tabelle 7.45: Korrelation der Anzahl der richtigen Antworten mit dem Alter der Praktikanten.

Kapitel 8

Diskussion der Ergebnisse

Die Diskussion der Ergebnisse untergliedert sich in zwei Abschnitte. Zuerst werden die Ergebnisse aus dem Vergleich zwischen dem rechnergestützten und dem traditionellen Experiment diskutiert. Der zweite Abschnitt dieses Kapitels beschäftigt sich mit der unterschiedlichen Betreuung des rechnergestützten Experimentes. Die Ergebnisse der Betreuung vor Ort werden mit den internetbetreuten in Beziehung gesetzt.

8.1 Vergleich der unterschiedlichen Experimentarten

In Abschnitt (5.2.1) und Abschnitt (7.1) konnte gezeigt werden, dass der Fragebogen geeignet ist, das Wissen der Praktikanten zu testen. Die Ergebnisse, die mit diesem Fragebogen ermittelt wurden, sind in Kapitel (7) vorgestellt worden.
An dem Teil der Untersuchung, der die verschiedenen Experimentarten betrachtet, nahmen 174 Studenten teil. 86 von diesen Studenten bearbeiteten das traditionelle Experiment, die anderen 88 das rechnergestützte (näheres hierzu siehe Abschnitt (7.2)). Wie in Abschnitt (6.1) beschrieben, wurden die Studenten zufällig auf die Experimente aufgeteilt.
Diese Untersuchung umfasst drei Untersuchungszeitpunkte. Den ersten Fragebogen erhielten die Studenten vor der Durchführung des Experimentes, aber nach der eigenständigen Bearbeitung der Anleitung zu dem Experiment. Der zweite Fragebogen wurde von den Studenten direkt nach der Durchführung des Experimentes ausgefüllt. Der dritte Fragebogen wurde am letzten Praktikumstermin verteilt. Da an diesem Termin aus unterschiedlichen Gründen nicht alle Studenten anwesend waren, füllten nur ca. 60 % der 174 Studenten den letzten Fragebogen aus. Da sich diese 60 % auf beide Gruppen und Geschlechter gleich verteilen und es zufällig war, wer an diesem Termin anwesend war, können die Ergebnisse dieses dritten Fragebogens mit den anderen Fragebögen und zueinander in Beziehung gesetzt werden.

Beide Experimente sind so entwickelt worden, dass sie sich gut in die laufenden Praktika eingefügt haben, denn die Studenten bewerteten die jeweiligen Experimente etwas besser als die sonstigen Experimente im Praktikum (siehe Kapitel (7) Abbildung (7.14)). Diese fast gleichwertige Bewertung der Experimente ist positiv, da so auch die Motivation der Studenten weitestgehend vergleichbar ist.

Betrachtet man den Lernerfolg der Studenten, so kann festgestellt werden, dass die Studenten, unabhängig von der Art des Experimentes, während der Durchführung etwas gelernt haben (siehe Kapitel (7) Abbildung (7.3)). Dieser Lernerfolg, der mit der Anzahl der richtig beantworteten Fragen innerhalb des Fragebogens gemessen wird, ist bei den Praktikanten, die das rechnergestützte Experiment bearbeiteten, größer.
Am Ende des Praktikums war der Unterschied zwischen den beiden Praktikumsgruppen signifikant. Es konnte kein tendenzieller Wissenszuwachs der Studenten, die das traditionelle Experiment bearbeitet haben, am Ende des Praktikums im Vergleich zu vor dem Experiment festgestellt werden. Im Durchschnitt haben diese Praktikumsgruppen somit alles, was sie gelernt haben, wieder vergessen. Die Praktikanten, die das rechnergestützte Experiment bearbeiteten, lieferten ein abweichendes Bild. Diese Gruppe konnte am Ende des Praktikums signifikant mehr Fragen des Fragebogens richtig beantworten als vor dem Experiment. Diese Gruppe konnte also das erlernte Wissen besser speichern.
Ein möglicher Grund für diesen Unterschied ist, dass die Informationen bei dem rechnergestützten Experiment auf unterschiedliche Art und in unterschiedlichen Zusammenhängen häufiger angeboten wird als bei dem traditionellen Experiment. So werden zum Beispiel bei dem traditionellen Experiment Messdaten für die Kapazitäts-Spannungs-Charakteristik aufgenommen, dann wird die Kurve gezeichnet und die wichtigen Daten aus der Kurve abgelesen. Bei dem rechnergestützten Experiment sieht man während der Aufnahme der Messdaten schon, wie sich die Kurve entwickelt und die Studenten können verschiedene Auftragungsweisen auswählen, um den mathematischen Zusammenhang der aufgetragenen Größen zu verstehen. Danach werden die Messdaten graphisch ausgewertet, indem an den gemessenen Graphen eine zweite Kurve angepasst wird. Zum Schluss sehen die Studenten während der Simulation der Verarmungstiefe die zugehörige Kapazitäts-Spannungs-Charakteristik auf dem Bildschirm. Durch die häufigere und eingehendere Betrachtung der Kurve und das Verändern der Auftragungsweise dieser können die Studenten besser Verknüpfungen mit bekannten Sachverhalten herstellen und somit das neue Wissen besser erinnern.

Die 174 Studenten, die eines dieser beiden Experimente durchführten, kamen aus fünf Fachbereichen. Betrachtet man die Entwicklung der Studenten in Abhängigkeit der Fachbereiche, so konnten aus diesen fünf Fachbereichen drei sich ähnlich entwickelnde Gruppen gebildet werden (siehe Abschnitt (7.3.1)). Eine Gruppe, die aus Studenten der Fachbereiche Chemie und Chemietechnik gebildet wurde, zeigt ein vergleichbares Verhalten wie die Gesamtgruppe (siehe Abschnitt (7.3.2)). Die beiden anderen Gruppen unterschieden sich davon und zeigen zueinander ein unterschiedli-

ches Verhalten.
Die Gruppe 1, die nur aus Physik-Studenten bestand, hatte den besten Lernerfolg und bei dieser Gruppe wussten die Praktikums-Gruppen unabhängig von der Art des Experimentes am Ende des Praktikums signifikant mehr als vor dem Experiment (siehe Abschnitt (7.3.2)). Somit war die Entwicklung der Studenten nicht abhängig davon, welches Experiment sie bearbeitet hatten. Einen ähnlichen Effekt zeigt auch eine Untersuchung an Interaktiven Bildschirm-Experimenten (IBE) (siehe dazu z.B. [Zie00]). Bei dieser Untersuchung wurden Studenten der Physik und Nebenfachstudenten zur Vorbereitung auf ein Praktikumsexperiment ein IBE als zusätzliche Hilfe gegeben. Die Nebenfachstudenten zeigten danach eine deutlich bessere Vorbereitung, während bei den Physik-Studenten kein Unterschied zu erkennen war. Dies wurde damit erklärt, dass Physik-Studenten einen höheren Abstraktionsgrad von physikalischen Phänomenen und Aufbauten besitzen. Sie brauchen also nicht zusätzliche Informationen oder eine häufigere Darbietung des Inhalts.
Die Studenten der Gruppe 3 (siehe Abschnitt (7.3.2)) zeigen, im Vergleich zu den Physikern, den gegenteiligen Effekt. Bei dieser Gruppen wussten im Durchschnitt die Studenten am Ende des Praktikums nicht mehr als vorher. Diese Studenten kamen zum großen Teil aus dem ersten Semester und somit konnten die Praktikanten, die das rechnergestützte Experiment bearbeiteten, das neu erworbene Wissen nicht mit vorhandenen Fakten verknüpfen und somit schlechter oder gar nicht erinnern.

In Abschnitt (7.5.2) konnte gezeigt werden, dass es einen Zusammenhang zwischen der Anzahl der richtig beantworteten Fragen und der Belegung von Physik in der Oberstufe gibt (siehe Tabelle (7.44)). Setzt man dieses Ergebnis in Beziehung mit dem vorherigen Absatz, so kann man zu der Aussage kommen, dass das Vorwissen einen sehr großen Einfluss auf des Lernen und Behalten von Wissen im physikalischen Praktikum hat. Ein Ziel eines Praktikums sollte die Veranschaulichung der Theorie durch ein Experiment sein. Dieses geht aber nur dann, wenn die Praktikanten die Theorie hinreichend gut verstanden haben oder zu anderen physikalischen Phänomenen Assoziationen herstellen können. Daraus würde sich dann ergeben, dass die Studenten entweder erst nach einer Einführungsvorlesung in Physik das Physikpraktikum belegen dürften (bei den Biologen und Medizinern lief parallel zum Praktikum die Einführungsvorlesung in Physik) oder zu Beginn des Praktikums müssten Phänomene stehen, die die Praktikanten aus ihrer Umwelt kennen und womit sie Inhalte assoziieren könnten. Dies würde bedeuten, keine abstrakten Experimente sondern alltagsnahe Experimente im Praktikum durchzuführen.
Auch wäre zu überlegen, ob die Studenten diese Vielzahl an Experimenten durchführen müssen (ein Experiment pro Woche in der Vorlesungszeit oder drei in der Woche als Blockveranstaltung in der vorlesungsfreien Zeit). Bei der Belastung durch andere Veranstaltungen bereiten sich die Praktikanten, besonders diejenigen mit Physik als Nebenfach, teilweise nur notdürftig auf das Praktikum vor. In solchen Fällen wäre es vielleicht besser, dass nicht jede Woche sondern nur jede zweite oder dritte Woche ein neues Experiment durchgeführt würde. Dadurch haben die Studenten dann zwei oder drei Termine Zeit, die Theorie und das Phänomen, das sie bearbeiten sollen, zu

verstehen (siehe hierzu z.B. [Wag89]). Somit könnten die Praktikanten lernen, wie sie eigenständig Phänomene erarbeiten könnten. Im Moment werden diese eher nach der Anleitung abgearbeitet. Das selbständige Erarbeiten würde das Wissen verfestigen und gleichzeitig würden die Praktikanten eine nützliche Fähigkeit für das jeweilige Studium erlernen.

Eine Frage bei der Durchführung eines rechnergestützten Experimentes ist immer, ob die Praktikanten sich durch den Rechner in ihrer Möglichkeit zu Experimentieren eingeschränkt fühlen. Dies war früher beim „Programmierten Lernen“ der Fall, da die Studenten nur einen vorgedachten Weg einschlagen konnten [Ker01]. Auch bei den IBEs kann dies sein, wobei diese aber auch nur als Vorbereitung zu einem Experiment dienen und nicht als eigenständiges Experiment durchgeführt werden.
Um festzustellen, ob die Studenten sich mit dem Rechner eingeschränkt fühlen, wurde die Frage gestellt, wie die Studenten das Ausprobieren und Experimentieren während des Experimentes empfanden. Das Ausprobieren während des Experimentes wurde von den Studenten, die das rechnergestützte Experiment durchführten, signifikant besser bewertet als von der Vergleichsgruppe (siehe Abschnitt (7.5.1) Tabelle (7.42)). Dies war bemerkenswert, da die Studenten am Rechner keine Messgeräte in der Hand hatten und „aufbauen konnten“. Einige Studenten wurden gefragt, was ihnen an dem rechnergestützten Experiment besonders gut gefallen habe und diese erwähnten dann meistens die Simulation zum Schluss des Experimentes. (Zitat einer Physik-Studentin: „Rechner-Experimente sind gut, weil man mal sehen kann, wie gefittet wird. Man kann viel rumprobieren. Es gibt mehr auszuprobieren als oft bei traditionellen Experimenten möglich ist, z.B. 10 verschiedene Dioden auszuprobieren“(bei der Simulation)). Daraus kann man folgern, dass wenn ein Experiment speziell für den Rechner entwickelt wird, und nicht bei einem herkömmlichen Experiment nur die Datenaufnahme über den Rechner erfolgt, dann sehen die Studenten in solchen Experimenten keine Einschränkung in ihren Möglichkeiten etwas auszuprobieren.

In Abschnitt (7.5.1) wurde unter anderem untersucht, ob der Lernerfolg der Praktikanten, die das rechnergestützte Experiment durchführten, von Vorkenntnissen mit dem Rechner abhängen. Dazu sollten die Praktikanten ihre Rechnerkenntnisse selber einschätzen. Das Ergebnis dieser Befragung war, dass die Anzahl der richtig beantworteten Fragen signifikant mit den selbsteingeschätzten Rechnerkenntnissen korreliert war (siehe Tabelle (7.38)). Dieses Ergebnis ist nicht besonders überraschend, da Studenten, die mit der Bedienung von Rechnern vertraut sind, sich ganz auf den Inhalt konzentrieren können. Bei den anderen dient ein Teil der Konzentration jedoch dazu die Bedienung des Rechners zu verstehen. Erstaunlich ist die Tatsache, dass schon vor dem Experiment diese signifikante Korrelation besteht. Zu diesem Zeitpunkt hatten die Studenten nur eine Anleitung zu dem Experiment in Papierform ausgeteilt bekommen und mussten diese durcharbeiten. Nur auf dem Deckblatt war erwähnt, welche Art von Experiment die Studenten durchführen sollten. Also ohne irgendetwas am Rechner bearbeitet zu haben, beantworteten die Praktikanten, die ihre Rechnerkenntnisse geringer einschätzten, den Fragebogen signifikant schlechter

als wenn sie ihre Fähigkeiten gut einschätzten. Dieser Effekt ist aber nur bei den Praktikanten, die das rechnergestützte Experiment durchführten, zu sehen. Bei denen, die das traditionelle Experiment bearbeiteten, ist die Fähigkeit im Umgang mit dem Rechner vor dem Experiment unerheblich für die Anzahl der richtig beantworteten Fragen. Bei dieser Gruppe fällt auf, dass nach dem Experiment ein signifikanter Zusammenhang und am Ende des Praktikums ein tendenzieller Zusammenhang zwischen den Rechnerkenntnissen und der Anzahl der richtig beantworteten Fragen besteht. Diese Gruppe arbeitete während des Experimentes nicht mit dem Rechner, und auch während des restlichen Praktikums hatten diese Studenten wenig Umgang mit Rechnern (siehe Tabelle (7.37)). Somit liegt die Vermutung nahe, dass der in dem Fragebogen abgefragte Inhalt eher abstrakt ist, so dass Studenten, die es gewohnt sind mit Rechnern umzugehen, diesen Inhalt besser lernen und bearbeiten können. Somit kann der oben beschriebene Effekt bei den Studenten, die das rechnergestützte Experiment durchführten, relativiert werden. Die Tatsache bleibt jedoch, dass die Studenten, die meinen nicht gut mit dem Rechner umgehen zu können, schon vor dem Experiment resignieren und den Fragebogen signifikant schlechter beantworten als die übrigen Studenten.
Diese Befragung ergab außerdem, dass die Studenten während der Zeit ihres Praktikums wenig Umgang mit dem Rechner haben, da die durchschnittliche Selbsteinschätzung nahezu konstant ist (siehe Tabelle (7.37)). Somit wird eine Möglichkeit verpasst, den Praktikanten den Rechner als sinnvolles Hilfmittel näher zu bringen und dadurch Vorurteile und Hemmschwellen abzubauen.

Zusammenfassend kann nach diesem Vergleich gesagt werden, dass die Studenten, die das rechnergestützte Experiment bearbeitet haben, mindestens genauso viel über den physikalischen Inhalt während des Experimentes gelernt haben und dieses Wissen besser behalten haben als die Vergleichsgruppe. Außerdem fühlten sich die Studenten am Rechner nicht eingeschränkt, sondern empfanden sogar eine größere Freiheit im Ausprobieren als die Praktikanten, die das traditionelle Experiment durchgeführt haben. Da aber in einem Praktikum nicht nur der physikalische Inhalt vermittelt werden soll, sondern beispielsweise auch wie eine Schaltung aufgebaut wird, sollte nur ein Anteil an Experimenten über den Rechner gesteuert durchgeführt werden. (Zitat der oben genannten Physik-Studentin: „Nur Rechner-Experimente sind nicht gut! Man muss Bauteile auch zusammenstecken, und verkabeln und sowie messen, ... “).

Nachdem gezeigt werden konnte, dass das rechnergestützte Experiment sinnvoll ist, stellt sich die Frage, ob dieses Experiment, bei dem nichts aufgebaut werden muss, sinnvoll über das Internet betreut werden kann. Mit dieser Fragestellung beschäftigt sich der nächste Abschnitt.

8.2 Vergleich der unterschiedlichen Betreuungsarten

Der zweite Teil der Evaluation des realen-internetgesteuerten Experimentes beschäftigt sich mit dem Vergleich zweier unterschiedlicher Betreuungsarten. Zum einen wird das rechnergestützte Experiment vor Ort betreut, wie es in normalen Praktika an der Hochschule üblich ist, und zum anderen erfolgt die Betreuung über das Internet per WebCam. An dieser Untersuchung nahmen 136 Studenten teil (siehe Tabelle (7.5)), davon wurden 48 über das Internet betreut und 88 Studenten vor Ort (diese Studenten waren auch Teil des ersten Vergleiches (Abschnitt (8.1)). Der Aufbau für die Betreuung über das Internet ist in Abbildung (6.1) dargestellt und in Abschnitt (6.2.3) diskutiert worden. An diesem Vergleich nahmen nur Studenten zweier Fachbereiche teil: der Chemie und der Chemietechnik. Diese beiden Fachbereiche wurden ausgewählt, da bei diesen im ersten Vergleich (Abschnitt (8.1)) ein Unterschied der Entwicklung in Abhängigkeit der Art des Experimentes gesehen wurde. Deswegen sollte jetzt getestet werden, ob der positive Effekt des rechnergestützten Experimentes erhalten bleibt, wenn dieses über das Internet betreut wird. Im Folgenden sollen die Ergebnisse aus dieser Untersuchung diskutiert werden.

Die Studenten dieser Untersuchung kamen nicht alle aus einem Jahrgang, wie in Abschnitt (8.1), sondern die Praktikanten, die vor Ort betreut wurden, absolvierten das Praktikum ein Jahr eher als die Studenten, die über das Internet betreut wurden. Leider hatte sich in diesem Zeitraum die Studienordnung der Chemietechnik verändert und in dem Praktikum waren nicht nur Studenten der Chemietechnik, sondern auch der Biotechnik, welches ein untergeordneter Studiengang der Chemietechnik ist. Ob dies eine Erklärung dafür ist, dass die zu vergleichenden Studenten-Gruppen vor dem Experiment signifikant unterschiedlich viel wussten, konnte nicht geklärt werden. Festzuhalten ist aber, dass die Studenten, die über das Internet betreut wurden, vor dem Experiment signifikant weniger wussten (siehe Tabelle (7.20)).
Nach dem Experiment ist dieser Unterschied nicht mehr festzustellen, somit haben die Studenten, die über das Internet betreut wurden, während des Praktikums tendenziell mehr gelernt als die Vergleichsgruppe (siehe Tabelle (7.22)). Dieser Effekt kann vielleicht damit erklärt werden, dass bei der Betreuung über das Internet immer nur eine Gruppe betreut wurde. Bei der Betreuung vor Ort wurden die zwei Praktikumsgruppen (rechnergestützt und traditionell) parallel betreut. Da nur ein rechnergestützter Experimentaufbau vorhanden war, konnte nur eine Gruppe über das Internet betreut werden. Aus technischen Gründen war eine gleichzeitige Betreuung des traditionellen Experimentes vor Ort und über des rechnergestützten über das Internet nicht möglich.
Die langzeitliche Entwicklung des Wissens der Studenten dieses Vergleiches, wurde mit Hilfe der Varianzanalyse untersucht (siehe Tabelle (7.36)). Diese Untersuchung ergab, dass keine betreuungsabhängige Entwicklung zu erkennen ist.

Bei der Betreuung über das Internet stellt sich die Frage, wie die Studenten diese Art der Betreuung aufnehmen und daraufhin das Experiment bewerten. Diese Frage kann mit gut beantwortet werden (siehe Abschnitt (7.5.1)). Die Studenten, die über das Internet betreut wurden, bewerteten das Experiment und die Möglichkeit des Ausprobierens nahezu identisch im Vergleich zu denen, die vor Ort betreut wurden. Somit empfanden die Studenten es nicht als Nachteil, wenn der Betreuer nicht im Praktikumsraum war, sondern nur über die Kamera zugeschaltet wurde.

Zusammenfassend kann also gesagt werden, dass bei der Betreuung eines sinnvollen rechnergestützten Experimentes über das Internet, unter Verwendung eines ähnlichen Aufbaus wie in Abschnitt (6.2.3) der Lernerfolg der Studenten sich nicht wesentlich von der Betreuung vor Ort unterscheidet. Die Unterschiede zwischen den Gruppen, die die Experimente durchführten, kommen wohl eher von den unterschiedlichen Voraussetzungen der Studentengruppen als von der Art der Betreuung. Kleine Effekte, die auf die unterschiedliche Art der Betreuung zurückzuführen wären, könnten auch mit der Unerfahrenheit von Betreuer und Praktikanten bei dieser Art der Betreuung erklärt werden. Sollte also diese Art der Betreuung in ein Praktikum integriert werden, so sollten mehrere Experimente auf diese Art und Weise betreut werden, oder die Kommunikation über das Internet sollte an anderer Stelle, z.B. über Videoseminare und Online-Vorlesungen geübt werden. Beherrschen Praktikanten und Betreuer die Kommunikation über das Internet, so zeigt diese Untersuchung, dass es keinen Unterschied in der Entwicklung des Lernerfolges bei der Betreuung über das Internet im Vergleich zu der Betreuung vor Ort gibt.

Kapitel 9

Weiterentwicklung

Dieses Kapitel untergliedert sich in zwei Abschnitte. In dem ersten Abschnitt wird aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse die Erweiterung des rechnergestützten Experimentes zu einem F-Praktikumsexperiment diskutiert. Der zweite Abschnitt beschäftigt sich mit der Möglichkeit, Teile des Experimentes als Schülerexperimente durchzuführen.

9.1 Praktika im Hauptstudium

Im Kapitel (7) wurden die Ergebnisse der Untersuchung vorgestellt und in Kapitel (8) diskutiert. Das Ergebnis dieser Diskussion war, dass die Lernerfolgsentwicklung der Studenten, die das rechnergestützte Experiment bearbeiteten, besser oder vergleichbar war mit dem Lernerfolg der Studenten, die das Experiment auf traditionelle Art und Weise durchführten. Desweiteren konnte festgestellt werden, dass die Betreuung des rechnergestützten Experimentes über das Internet keine wesentliche Auswirkung auf die Entwicklung des Lernerfolges hat. Aus diesem Grund soll das vorgestellte rechnergestützte Experiment zu einem in dem Projekt „Physik 2000" einsetzbaren F-Praktikumsexperiment erweitert werden.
Die Erweiterung wird dabei in zwei Teilen diskutiert. In dem ersten geht es um die inhaltliche Erweiterung des Experimentes, in dem zweiten Teil wird die veränderte Durchführung des Experimentes diskutiert.

9.1.1 Inhaltliche Erweiterung

Der zeitliche Rahmen der Durchführung eines F-Praktikumsexperimentes liegt zwischen sechs und acht Stunden. Damit ist der Zeitrahmen doppelt so groß wie der eines A-Praktikumsexperimentes. Aus diesem Grund muss das vorgestellte rechnergestützte Experiment erweitert werden.

Bei dieser Erweiterung ist zusätzlich zu berücksichtigen, dass Studenten aus dem fünften bis siebten Semester das F-Praktikum absolvieren. Desweiteren sind hauptsächlich Physik-Studenten in dem Praktikum vertreten, sodass eine größere selbständige Arbeitsweise in diesem Praktikum verlangt werden kann.
Da sich das kybernetische Prinzip des Experimentaufbaus im A-Praktikum bewährt hat, soll auch die Erweiterung des Experimentes modularisiert erfolgen.

In dem F-Praktikumsexperiment untersuchen die Studenten die Entwicklung von Dioden in Abhängigkeit von der radioaktiven Strahlenschädigung. Dazu sollen die Praktikanten fünf Dioden analysieren, die sich in der Stärke der Strahlenschädigung unterscheiden. Für diese Untersuchung können die Studenten dieselben Messprogramme, wie sie in Abschnitt (4.3.2) und Anhang (A) vorgestellt sind, verwenden. Die verwendeten Programme unterscheiden sich einzig darin, dass auf der Bildschirmoberfläche die einzelnen Dioden ausgewählt werden können.

Das Projekt „Physik 2000“ hat als Teilziel die Förderung eines forschungsnahen Studiums definiert. Die inhaltliche Erweiterung des Experimentes hängt mit diesem Ziel wie folgt zusammen:
Zur Zeit wird in Genf am CERN[1] das ATLAS[2]-Experiment aufgebaut. Bei diesem Experiment werden in Sperrrichtung betriebene Dioden als Detektoren benutzt. Diese Dioden sind während des Experimentes einer hohen radioaktiven Strahlenbelastung ausgesetzt. Aus diesem Grund ist es wichtig zu wissen, wie sich Dioden verhalten, wenn sie radioaktiver Strahlenbelastung ausgesetzt sind. Somit ist die in dem F-Praktikumsexperiment behandelte Fragestellung nahe an der aktuellen Forschung, was mit dem Ziel des Projektes „Physik 2000 – Neue Medien im Universitätsverbund für ein forschungsorientiertes Studium“ , in dem diese Arbeit geschrieben wurde, übereinstimmt.

9.1.2 Veränderung der Durchführung

Die eigentliche Durchführung des Experimentes und die Betreuung über das Internet soll nicht verändert werden, da sie sich sich in dem A-Praktikumsexperiment bewährt hat. Was aber verändert wird, ist das Kolloquium und die Protokolle nach dem Experiment.

Bei dem F-Praktikumsexperiment sollen nun die Praktikanten in einem kurzen Vortrag den theoretischen Hintergrund des Experimentes eigenständig erläutern. Desweiteren sollen sie in dem Vortrag diskutieren, was untersucht werden soll und wie die Durchführung des Experimentes erfolgen soll. Dieser Studentenvortrag hat den Vorteil, dass die Studenten sich intensiver mit dem Hintergrund des Experimentes befassen, was zu einem besseren Verständnis des Experimentes führt. Außerdem hat

[1] **C**onseil **E**uropéene pour la **R**echerche **N**ucléaire
(Europäisches Forschungszentrum für Teilchenphysik)
[2] **A** **T**oroidal **L**HC **A**pparatu**s**

der Betreuer so leichter die Möglichkeit, Misskonzepte der Studenten zu entdecken und aufzuklären.
Nach dem Experiment sollen die Studenten einen Vortrag über ihre Ergebnisse halten. Dies hat auch hier wieder den Vorteil, dass die Studenten sich intensiver mit ihrer Arbeit und den Ergebnissen auseinandersetzen müssen. Somit kann das anzufertigende Protokoll zu dem Experiment knapp gehalten werden.
Durch die Vorträge soll der Student darin geschult werden, Vorträge zu halten und dabei seine Ergebnisse vorzustellen. Diese Fähigkeit ist in der späteren Forschung sehr wichtig. Aus diesem Grund deckt sich diese Änderung des Ablaufes mit dem Teil-Ziel des Projektes, in welches diese Arbeit eingebettet ist, das Studium forschungsorientierter zu gestalten.

9.2 Teile des Experimentes als Schülerexperiment

Das in dieser Arbeit evaluierte rechnergestützte A-Praktikumsexperiment und das im obigen Abschnitt vorgestellte F-Praktikumsexperiment sind in einzelne Module unterteilt. Wie in Kapitel (4) beschrieben, bauen einzelne Module aufeinander auf, sie können aber auch unabhängig voneinander bearbeitet werden. Durch diese Modularisierung ist es möglich, dass Teile des Experimentes während des Unterrichts in der Schule von Schülern bearbeitet werden können. Aber auch zur Demonstration eignet sich das Experiment. So kann die Bildschirmoberfläche mit Hilfe eines Beamers an die Tafel projiziert werden, sodass die gesamte Schulklasse die Entwicklung der Messkurven sehen kann.

Bei der Erweiterung des rechnergestützten Experimentes zu einem F-Praktikumsexperiment wird berücksichtigt, dass auch Widerstände mit den Messprogrammen gemessen werden können. Schüler können so schnell hintereinander verschiedene Bauteile messen und so die Unterschiede in den Charakteristiken klar erkennen.

Das Experiment wird so weiterentwickelt, dass die Programme über einen Web-Browser bedient werden können. Somit kann ein Lehrer dieses Experiment problemlos in seinem Unterricht einsetzen. Desweiteren können sich auch Schüler für das Experiment anmelden, um sich in ihrer Freizeit sinnvoll mit physikalischen Phänomenen zu beschäftigen. Somit ist das rechnergestützte Experiment auch für Schüler und die Schule eine reizvolle Alternative zu traditionellen Experimenten.

Kapitel 10

Zusammenfassung

Das BMBF[1] startete im März 2000 das Förderprogramm „Neue Medien in der Bildung„. Ziel diese Programmes ist es, “*Deutschland zu einem Spitzenreiter im Bereich der Lernsoftware zu machen und so Kinder, Jugendliche und Hochschulangehörige bei IT- und Medienkompetenz zu unterstützen und vor allem, die Möglichkeiten des IT-Einsatzes in der Bildung verstärkt nutzbar zu machen*“ (vgl. $http://www.bmbf.de/619\_934.html$).

Eines der durch dieses Programm geförderten Forschungsprojekte ist das Projekt „Physik 2000 – Neue Medien im Universitätsverbund für ein forschungsorientiertes Studium“ welches von sechs Hochschulen (Bonn, Berlin, Dortmund, Jena, Rostock, Siegen) gemeinsam durchgeführt wird. Ziel dieses Projektes ist es, Lehrveranstaltungen, darunter auch Praktikumsexperimente, über das Internet anzubieten. Die neu entwickelten Experimente sollen reale Experimente sein, welche jeweils lokal an einer der beteiligten Universitäten aufgebaut sind. Die Durchführung und Betreuung der Experimente soll über das Internet erfolgen.

Bei der Entwicklung solcher neuen Experimente stellt sich die Frage, ob es aus der Sicht des Lernerfolges des physikalischen Inhaltes sinnvoll ist, solche Experimente zu entwickeln. Diese Problematik wurde in dieser Arbeit behandelt.
Wie gut oder schlecht der Lernerfolg eines rechnergestützten Experimentes ist, wurde hier anhand eines Vergleiches untersucht. Würde man ein rechnergestütztes Experiment, welches über das Internet betreut wird, mit einem traditionellen Experiment, welches vor Ort betreut wird, vergleichen, so würden zwei Parameter den Lernerfolg beeinflussen: die Art des Experimentes und die Art der Betreuung. Aus diesem Grund wurden in dieser Arbeit zwei Vergleiche durchgeführt (vgl. Kapitel (3)). Zuerst wurde der Lernerfolg eines rechnergestützten Experimentes mit dem eines traditionellen Experimentes verglichen, wobei beide Experimente vor Ort betreut wurden. Bei dem zweiten Vergleich wurde der Lernerfolg von Studenten, die vor Ort betreut wurden,

[1] Bundesministerium für Bildung und Forschung

mit denen, die über das Internet betreut wurden, verglichen. Beide Studentengruppen führten dabei das rechnergestützte Experiment durch. Aus diesen Vergleichen ergaben sich zwei Fragestellungen, die beantwortet werden sollen:
1. Ist die Entwicklung des Lernerfolges abhängig von der Art des Experimentes?
2. Ist die Entwicklung des Lernerfolges abhängig von der Art der Betreuung?

Zur Beantwortung der Fragen wurden ein rechnergestütztes und eine traditionelles Experiment nach dem kybernetischen Prinzip modular entwickelt (siehe Kapitel (3) und (4)). Bei der Entwicklung der Experimente wurde neben der inhaltlichen Gleichheit auch darauf geachtet, dass die Bearbeitungszeit der Experimente vergleichbar ist, sodass der Lernerfolg bei nahezu identischer Bearbeitungszeit untersucht wurde. Inhaltlich befassten sich die Experimente mit der Funktionsweise von Dioden. Dazu werden bei dem Experiment Kennlinien von Si-Dioden in Durchlass- und Sperrrichtung aufgenommen. Die Anleitung zu den Experimenten ist im Anhang (A) und (B) nachzulesen.

Das Wissen der Studenten wurde durch einen in dieser Arbeit entwickelten Fragebogen ermittelt (siehe Anhang (C)). Inhaltlich beschäftigen sich die Test-Fragen mit dem physikalischen Thema des Experimentes. Es wurde also weder die Medienkompetenz, noch die Fähigkeit Experimente aufzubauen, überprüft. Die Validitäts- und Reliabilitätsüberprüfung des Fragebogens ergab, dass der Fragebogen geeignet ist, das Wissen der Studenten über die Experimente abzufragen (siehe Kapitel (3) und (5)).
Es gab drei Erhebungszeitpunkte: Vor dem Experiment, nach dem Experiment und am Ende des Praktikums. Dadurch konnte die zeitliche Entwicklung des Lernerfolges untersucht werden.

An der Untersuchung nahmen 222 Studenten von 5 Universitäten teil. Um die Aussagen möglichst allgemein zu halten, führten Studenten aus 5 Fachbereichen (Physik und 4 Fachbereiche mit Nebenfach Physik) die Experimente durch, wobei an jeder Universität ein oder mehrere Fachbereiche untersucht wurden. Die Untersuchung erfolgte über einen Zeitraum von 18 Monaten.

Der erste Vergleich untersucht den Lernerfolg zwischen den Studenten, die das rechnergestützte Experiment bearbeiteten und den Studenten die das traditionelle Experiment durchführten. Beide Studenten-Gruppen wurden vor Ort betreut. Dieser Vergleich ergab, dass der Lernerfolg der Studenten, die das rechnergestützte Experiment bearbeiteten, genauso gut oder besser war als der Lernerfolg der Vergleichsgruppe (siehe Kapitel (7) und Abschnitt (8.1)).
Eine genauere Untersuchung des Lernerfolges ergab, dass die Entwicklung des Lernerfolges stark vom dem physikalischen Vorwissen der Praktikanten abhing.
Bei Studenten der Physik und Nebenfach-Studenten, die keine guten Vorkenntnisse besaßen, entwickelte sich der Lernerfolg der Praktikanten unabhängig von der Art des Experimentes, welches sie bearbeiteten. Diese beiden Gruppen unterschieden sich aber insofern, dass die Physik-Studenten am Ende das Praktikums mehr über den physikalischen Inhalt des Experimentes wussten als vor der Durchführung. Die

Nebenfachstudenten wussten nachher genausoviel wie vor der Durchführung. Die positive Entwicklung des Lernerfolges der Physik-Studenten, unabhängig von der Art des Experimentes, ist mit dem relativ hohen Abstraktionsvermögen dieser Studenten zu erklären. Dass bei den Nebenfach-Studenten am Ende des Praktikums kein signifikanter Lernerfolg festzustellen war, lag mit hoher Wahrscheinlichkeit daran, dass die Studenten das neu erlernte Wissen nicht mit bekanntem Wissen verknüpfen konnten, um es so besser zu behalten.
Einen Unterschied in der Entwicklung trat bei Nebenfachstudenten mit guten physikalischen Vorkenntnissen auf. Bei dieser Gruppe wussten die Studenten, die das rechnergestützte Experiment bearbeiteten, am Ende des Praktikums mehr über den physikalischen Inhalt des Experimentes als vor dem Experiment. Bei den Praktikanten des traditionellen Experimentes war dieses Verhalten nicht zu sehen. Hier wussten die Studenten etwa genausoviel wie vor der Durchführung des Experimentes. Die Unterschiede in der Entwicklung sind vermutlich darauf zurückzuführen, dass die Studenten sich bei dem rechnergestützten Experiment länger mit dem physikalischen Inhalt des Experimentes beschäftigen können, da das Experiment nicht mehr aufgebaut werden musste und die Aufnahme der Messdaten automatisiert ist (siehe hierzu auch Abschnitt (2.3)).

Der zweite Vergleich wurde in Praktika mit Studenten aus den Fachbereichen durchgeführt, die eine von der Experimentart abhängende Entwicklung zeigten. Bei diesem Vergleich wurde untersucht, ob die Entwicklung des Lernerfolges abhängig ist von der Art der Betreuung. Für die Betreuung über das Internet wurde der in Abschnitt (6.2.3) vorgestellte Aufbau entwickelt und verwendet.
Die Untersuchung des Lernerfolges ergab, dass es keinen Unterschied in der Entwicklung des Lernerfolges in Abhängigkeit von der Art des Experimentes gab. Geringe Unterschiede in dem Wissen der Studenten zu den verschiedenen Zeitpunkten sind zum größten Teil auf die Unerfahrenheit in dem Umgang mit neuen Medien zurückzuführen. Würden neuen Medien verstärkt im Studium eingesetzt und damit der Umgang mit diesen eingeübt, so würde wohl kein Unterschied in der Entwicklung des Lernerfolges in Abhängigkeit der Betreuung festzustellen sein. Fasst man diesen Vergleich zusammen, so kann gesagt werden, dass es bei diesem Experiment und bei der hier vorgenommenen Art der Betreuung keinen von der Betreuungsart abhängenden Unterschied in der Lernerfolgsentwicklung gibt.

Zusammenfassend kann also gesagt werden, dass bei einem Experiment, bei dem das Erlernen des physikalischen Inhaltes im Vordergrund steht und bei dem der Aufbau des Experimentes vergleichsweise statisch ist, der Lernerfolg der Praktikanten, die ein Experiment rechnergestützt durchführen, genauso gut oder besser ist im Vergleich zur traditionellen Durchführung von Experimenten. Dabei gibt es keinen Unterschied in der Entwicklung des Lernerfolges, wenn das rechnergestützte Experiment vor Ort oder über das Internet betreut wird. wird. Kann ein Experiment nur mit Hilfe eines Rechners durchgeführt werden, wie zum Beispiel bei einem Praktikumsexperiment an einem Teilchen-Beschleuniger, so ist der Lernerfolg bei einer Betreuung über das

Internet vermutlich vergleichbar mit der Betreuung vor Ort, sofern ein ähnlicher Aufbau wie in diesem Experiment verwendet wird.

Diese Untersuchung ergab außerdem, dass die Studenten, die das Experiment am Rechner durchführten, sich dabei nicht eingeschränkt fühlen. Im Vergleich wurde von den Studenten, die das rechnergestützte Experiment bearbeiteten, das Ausprobieren und „Herumexperimentieren“ während des Experimentes besser bewertet als von den Praktikanten, die das traditionelle Experiment bearbeiteten.

Die in dieser Arbeit vorgestellte Untersuchung konnte aufzeigen, dass bei dem hier untersuchten Halbleiterexperiment der Lernerfolg eines realen-rechnergestützten Experimentes, welches über das Internet betreut wird, genausogut oder besser ist, als der eines traditionellen vor Ort betreuten Experimentes.

An diese Untersuchung schließt sich die Frage an, ob der Lernerfolg der Studenten gleich gewesen wäre, wenn sie kein reales Experiment bedient hätten, sondern nur Daten für eine Simulation eingegeben hätten. Auch der Einfluss des Aufbaus der Bildschirmoberfläche konnte nicht mitberücksichtigt werden. Desweiteren konnte in dieser Arbeit nur für ein Experiment gezeigt werden, dass der Lernerfolg bei einem rechnergestützten Experiment nicht schlechter als bei traditionellen Experimenten ist. Diese Aussage ist nicht allgemeingültig und ist zweifelsohne nicht auf alle Experimente übertragbar. Daher würde es sich anbieten, im Anschluss an diese Arbeit zu untersuchen, für welche Art von Experiment eine rechnergestützte Variante dem traditionellen Aufbau vorzuziehen ist, und wie die Entwicklung des Lernerfolges dabei verläuft. Diese Fragestellungen dienen als Ausblick und Anregung für weitere Untersuchungen.

Literaturverzeichnis

[And88] J. R. Anderson. *Kognitive Psychologie* (Springer Verlag, 1988).

[Auf99] S. Aufenanger. *Lernen mit neuen Medien – Was bringt es wirklich?*. Medien Praktisch (4), 4 ff. (1999).

[Büh02] A. Bühl and P. Zöfel. *SPSS 11*. 8 (Pearson Studium, 2002).

[Bor99] J. Bortz. *Statistik - für Sozialwissenschaftler* (Springer Verlag, 1999).

[Bou80] D. J. Boud, J. Dunn, T. Kennedy et al. *The aims of science laboratory courses: A survey of students, graduates aund practising scientists*. European journal of science education (2(4)), 415 ff. (1980).

[Bra96] S. Brandt. *Datenanalyse*, Volume 4 (Spektrum Verlag, 1996).

[Col89] A. Collins, J. S. Brown and S. E. Newman. Cognitiv apprenticeship: Teaching the craft of reading, writing and mathematics. In L. B. Resnick (Hg.) *Knowing learning and instruction* (S. 453 ff.) Lawrence Erlbaum Associates 453ff. (1989).

[Cro51] L. J. Cronbach. *Coefficient alpha and the internal structure of tests*. Psychometrika **16** (3), 297 ff. (1951).

[Cro63] L. J. Cronbach et al. *Theory of generalizability: a liberalization of reliability theory*. Brit. J. of stat. psychol. **16**, 137 ff. (1963).

[Die98] U. Diemer, B. Baser and H. J. Jodl. *Computer im Praktikum* (Springer Verlag, 1998).

[Erd01] E. Erdfelder. *Vorlesung WS 2001/02: Multivariante Datenanalyse* (Universität Bonn, 2001).

[Fin92] S. Finke. *Versuchsanleitungen zum Anfänger-Praktikum in Physik*. 23 (Fachbereich Physik, Universität Dortmund, 1992).

[Fra71] H. Frank and B. S. Meder. *Einführung in die kybernetische Pädagogik* (dtv, 1971).

[Fre97] M. P. Freedman. *Relationship among laboratory instruction, attitude towards science and achievement in science knowledge*. Journal of research in science (27), 173 ff. (1997).

[Gee92] B. Gee and S. Clackson. *The origin of practical work in the English school science curriculum*. School Science Review (73(265)), 79 ff. (1992).

[Gei58] S. Geisser and S. Greenhouse. *An extension of Box's results on the use of F-distribution in multivariate analysis*. Annals of math. statistics **29**, 885 ff. (1958).

[Glo95] U. Glowaller and G. Häfele. *Einsatz elektronischer Medien: Befunde, Probleme und Perspektiven*. Issinger L.J./ Häfele G.: Informationen und Lernen mit Multimedia. Psychologie Verlags Union 415 ff. (1995).

[Has94] J. P. Hasebrook. *Lernwirksamkeit von Multimedia- und Hypermedia-Systemen*. Gutachten Bonn:Büro für Technikfolgenabschätzung des Deutschen Bundestages (TAB) (1994).

[Hel82] C. Hellingmann. *A trial list of objectives experimental work in science education*. European journal of science education (4), 29 ff. (1982).

[Hig77] M. J. Higatsberger. *Physik in 700 Experimenten*. 1 (Blick in die Welt - Verlag, 1977).

[Huc99] L. Hucke. *Handlungsregulation und Wissenserwerb in traditionellen und computergestützten Experimenten des physikalischen Praktikums* (Logo, 1999).

[Huy76] H. Huynh and L. S. Feldt. *Estimation of the box correction for derees of freedom from sample data in randomized block and splitplot designs*. J. Educ. Stat **1**, 69 ff. (1976).

[Kai65] H. F. Kaiser. *Alpha factor analysis*. Psychometrika **30** (1), 1 ff. (1965).

[Ker01] M. Kerres. *Multimediale und telemediale Lernumgebungen*. 2 (Oldenburg Verlag, 2001).

[Kir99] J. Kirstein. *Interaktive Bildschirmexperimente – Technik und Didaktik eines neuartigen Verfahrens zur multimedialen Abbildung physikalischer Experimente* (Dissertation, Berlin, 1999).

[Kir00a] E. Kircher, R. Girwidz and P. Häussler. *Physikdidaktik – Einführung in Theorie und Praxis* (Vieweg Verlag, 2000).

[Kir00b] S. Kirchhoff, S. Kuhnt, P. Lipp et al. *Machen wir einen Fragebogen* (Leske + Budrich, 2000).

[Kol73] A. Kolmogoroff. *Grundbegriffe der Wahrscheinlichkeitsrechnung* (Springer Verlag, 1973).

[Kom03] Kompetenzzentrum für Videokonferenzdienste. *Empfehlungen zur Vorbereitung einer Videokonferenz* (Technische Universität Dresden, 2003).

[Lav91a] J. Lave and F. Wenger. *Situated learning:Legitimate peripheral participation* (New York: Cambridge University Press, 1991).

[Lav91b] J. Lave and F. Wenger. *Situated learning:Legitimate peripheral participation* (New York: Cambridge University Press, 1991).

[Lin87] M. C. Linn, J. Layman and R. Nachmias. *The cognitive consequences of micro-computer-based laboraties: Graphing skills development*. Journal of Contemporary Educational Psychology (12), 244 ff. (1987).

[Lor58] F. M. Lord. *Some relations between Guttman's principal components of scale analysis and others psychometric theories*. Psychometrika **23**, 291 ff. (1958).

[Lun98] V. N. Lunetta. *The school science laboratory: Historical perspectives and contextes for contemporary teaching* (FRASER, B.J. and TOBIN, K.G.: International handbook of science education, Dordecht:Kluwer, 1998).

[Mey94] M. A. Meyer and W. Plöger. *Allgemeine Didaktik, Fachdidaktik und Fachunterricht*. 10 (Belz Verlag, 1994).

[Mum95] H. D. Mummendey. *Die Fragebogen-Methode* (Hogrefe, 1995).

[Nie91] H. Nieddererer, H. Schecker and T. Bethge. *The role of computer-aided modeling in learning physics*. Journal of Computer Assisted Learning (7), 84 ff. (1991).

[Noe00] E. Noelle-Neumann and T. Petersen. *Alle, nicht jeder - Einführung in die Methode der Demoskopie* (Springer Verlag, 2000).

[Not97] M. Nott. *Keeping scientists in their place: A historical perspective on the introdcution of the laboratory school science education*. School Science Review (78(285)), 49 ff. (1997).

[Ogu83] M. B. Ogunniyi. *An analysis of laboratory activities in selected Nigerian secondary schools*. European journal of science education (5(2)), 195 ff. (1983).

[PH-00] *Physik 2000 – Neue Medien im Universitätsverbund für ein forschungsorientiertes Studium.* (Projektantrag zur Förderung beim Bundesministerimum für Bildung und Forschung, „Neue Medien in der Bildung“ (Förderprogramm), 2000).

[Por85] R. PORST. *Praxis der Umfrageforschung* (Teubner Studienskripten, 1985).

[Red97] E. F. REDISH, J. M. SAUL and S. R. N. *On the effectiveness of active engagement microcomputer-based laboratories*. American journal of physics (65(1)), 45 ff. (1997).

[Ros96] J. ROST. *Testtheorie Testkonstruktion* (Hans Huber, 1996).

[Sal79] G. SALOMON. *Interaction of media, cognition and learning* (Jossey-Bass, 1979).

[Sch02] R. SCHULMEISER. *Grundlagen hypermedialer Lernsysteme*. 3 (Oldenburg Verlag, 2002).

[Ste86] J. STEVENS. *Applied multivariante statistics for social sciences* (Erlbaum, 1986).

[Tho92] R. K. THORNTON. *Tools for scientific thinking: Learning physical concepts with real-time laboratory measurement tools.*. Scanlon, E./O'Shea, T. (eds): New directions in educational technology (1992).

[Tob90] K. G. TOBIN. *Research in science laboratory activities: In pursuit of better questions and answers to improve learning*. School science and mathematics (90), 403 ff. (1990).

[Tul99] G. TULODZIECKI. *Multimediale Angebote – verbessern sie Lernen und Lehren?*. Medien Praktisch (4), 10 ff. (1999).

[Ves00] F. VESTER. *Denken, Lernen, Vergessen*. 27 (dtv, 2000).

[Vos92] S. VOSNIADOU. *Fostering conceptual change: The role of computer-based environments*. DE COURTE et al.: Computer-based learnig enviroments and problem solving. Springer Verlag 149 ff. (1992).

[Wag89] M. WAGENSCHEIN. *Verstehen lehren*. 8 (Beltz Verlag, 1989).

[Wel98] M. WELZEL, K. HALLER, M. BANDIERA ET AL. *Ziele, die Lehrende mit experimentellem Arbeiten in der naturwissenschaftlichen Ausbildung verbinden – Ergebnisse einer Europäischen Umfrage*. 4(1) (1998).

[Whi96] R. T. WHITE. *The link between laboratory and learning*. International journal of science education (18(7)), 761 ff. (1996).

[Zei96] E. ZEIDLER. *Teubner-Taschenbuch der Mathematik* (Teubner Verlag, 1996).

[Zie00] J. ZIEGLER. *Herstellung Interaktiver-Bildschirm-Experimente und deren Erprobung im physikalischen Grundpraktikum* (Technische Universität Darmstadt, 2000).

[Zim95] P. G. ZIMBARDO. *Psychologie*. 6 (Springer Verlag, 1995).

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Anhang A

Versuchsanleitung für das rechnergestützte Experiment

Zu Teilen der Theorie vgl. S. Finke [Fin92]

Kennlinien von Siliziumdioden

Sonderversuch im Physikpraktikum an der Universität Dortmund

Rechnergestützter Versuch

A.1 Halbleiter

A.1.1 Elektrische Leitfähigkeit

Unter Halbleitern versteht man kristalline Stoffe, deren spezifische elektrische Leitfähigkeit zwischen denen von Isolatoren und Metallen liegt. Ihre elektrischen Eigenschaften können verstanden werden, wenn man die Energieverteilung der Elektronen im Kristall betrachtet. Die Anwendung der Quantenmechanik auf dieses Vielteilchenproblem liefert das Ergebnis, dass in einem einzelnen Atom unterhalb der Ionisationsgrenze nur scharf definierte Energiewerte für die Hüllenelektronen möglich sind (siehe hierzu V 601 und 602), während ihnen im Kristall gewisse Energie*bereiche*, die man als *Bänder* bezeichnet, zur Verfügung stehen.

Zwischen den Energiebändern liegen die sogenannten *verbotenen Zonen*. Das sind Energiebereiche, die die Elektronen nicht annehmen können. Abbildung A.1 verdeutlicht diesen Zusammenhang.

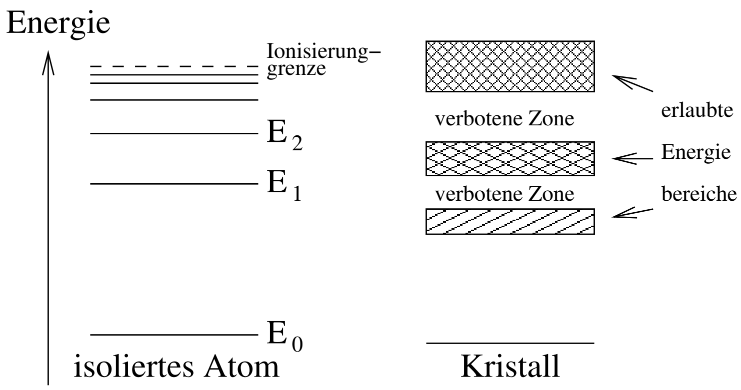


Abbildung A.1: Energieniveaus eines einzelnen Atoms und eines Kristalls

Elektronen sind Teilchen mit *halbzahligem Spin* (näheres hierzu siehe V 505) und unterliegen deshalb im Kristall dem *Pauli-Verbot*, welches besagt, dass jeder mögliche Zustand mit der Energie E nur von höchstens zwei Elektronen, die entgegengesetzten Spin haben müssen, besetzt sein kann. Das hat zur Konsequenz, dass die eben erwähnten Bänder nur *endlich* viele Elektronen aufnehmen können. Da zunächst die Zustände niedrigster Energie besetzt werden, sind in einem Kristall die unteren Bänder stets gefüllt, während die oberen leer oder teilweise gefüllt sein können
(Für T = 0).

Die Elektronen eines voll besetzten Bandes können nicht zur elektrischen Leitfähigkeit beitragen; denn wenn sich ein Elektron in einem elektrischen Kraftfeld bewegen soll, muss es Energie aufnehmen. Das ist aber nicht möglich, da alle Energiezustände innerhalb des Bandes besetzt sind. Die Elektrizitätsleitung wird also von den Elektronen ermöglicht, die sich in den teilweise gefüllten Bändern aufhalten. Bei den Metallen mit ihrer hohen Leitfähigkeit ist daher das oberste Band immer nur teilweise gefüllt. Man bezeichnet dieses auch als *Leitungsband*. Dieses ist bei Halbleitern bei niedrigen Temperaturen praktisch leer. Das darunterliegende Band ist nahezu voll besetzt; dieses Band wird als *Valenzband* bezeichnet, da es von Elektronen, die die chemische Bindung innerhalb des Kristalls bewirken, gebildet wird. Die Breite der verbotenen Zone zwischen diesen beiden Bändern ist bei den Halbleitern im Vergleich zu den Isolatoren so gering, dass bei Raumtemperatur Halbleiter elektrischen Strom leiten können, da bei diesen Temperaturen einige Elektronen in der Lage sind, durch thermische Anregung die verbotene Zone zu überspringen und in das Leitungsband zu gelangen. Auf diese Weise erhält man bei Halbleitern eine geringe, mit der Temperatur jedoch stark zunehmende Leitfähigkeit, die man als *Eigenleitung* bezeichnet. Elektronen, die das Valenzband verlassen haben, hinterlassen dort unbesetzte Zustände, sodass jetzt auch im Valenzband Elektrizitätsleitung möglich ist. Die von den Elektronen nicht besetzten Plätze heißen Löcher. Sie verhalten sich wie positive Ladungen und bewegen sich daher im äußeren elektrischen Feld entgegengesetzt zu den Elektronen des Leitungsbandes. Aus dem Entstehungsmechanismus der Löcher kann man folgern, dass bei der Eigenleitung Elektronen und Löcher stets in der gleichen Zahl vorhanden sein müssen (siehe Abbildung A.2a).

A.1.2 Dotierte Halbleiter

Es gibt noch eine weitere, wichtige Möglichkeit, Ladungträger in Halbleitern zu erzeugen, die man als *Störstellenleitung* bezeichnet. Bringt man in das Gitter des Halbleitermaterials Fremdatome ein, die mehr Valenzelektronen als die Atome des Wirtskristalles besitzen, so sind die „überschüssigen“ Valenzelektronen nur sehr schwach an das Fremdatom gebunden und können daher leicht an das Leitungsband abgegeben werden. Auf diese Weise erhält man eine reine Elektronenleitung (n-Leitung), deren Leitfähigkeit je nach Konzentration der Fremdatome, auch *Donatoratome* genannt, die Leitfähigkeit der Eigenleitung bei Zimmertemperatur um mehrere Größenordnungen überschreiten kann. Da die Aktivierungsenergie der Donatoren klein gegen die Breite der verbotenen Zone ist, liegen ihre Energieniveaus an der in Abbildung A.2b gezeichneten Stelle. Bei Zimmertemperatur sind praktisch alle Donatoren aktiviert. Auch durch den Einbau von Fremdatomen mit geringerer Valenzelektronenzahl als die der Atome des Wirtsgitters lassen sich bewegliche Ladungsträger in Halbleitern erzeugen. Diese als *Akzeptoren* bezeichneten Atome nehmen leicht Elektronen auf, sodass im Valenzband unbesetzte Plätze entstehen. Auf diese Weise kann man eine reine *Löcherleitung* oder *p-Leitung* erzeugen. Die Akzeptorniveaus müssen dicht über der Bandkante des Valenzbandes liegen, wie in Abbildung A.2c angedeutet.

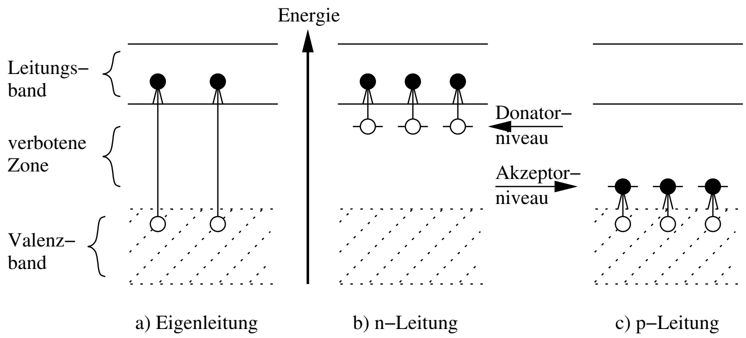


Abbildung A.2: a) Skizze der Eigenleitung bei einem Halbleiter b) Skizze der n-Leitung c) Skizze der p-Leitung bei einem Halbleiter (siehe Abschnitt A.1.2)

Die Elektronen im n-Gebiet und die Löcher im p-Gebiet werden als Majoritätsladungsträger bezeichnet.
Die Löcher im n-Gebiet und die Elektronen in p-Gebiet werden als Minoritätsladungsträger bezeichnet.

A.2 pn-Übergang

A.2.1 Symmetrischer pn-Übergang

In Kapitel A.1 wurden nur homogene Halbleitermaterialien betrachtet. Im folgenden geht es um Proben, bei denen p-leitendes Material abrupt in n-leitendes übergeht, sodass innerhalb der Probe eine pn-Grenzschicht entsteht (siehe Abbildung A.3a).

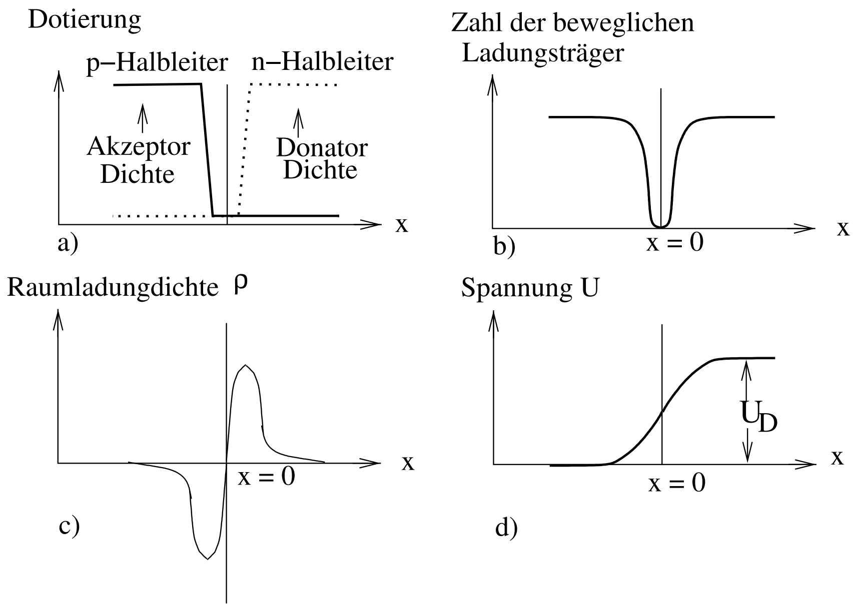


Abbildung A.3: a) Dotierungsprofil gegen Ortskoordinate,
b) Anzahl der beweglichen Ladungsträger gegen Ortskoordinate,
c) Raumladungsdichte gegen Ortskoordinate,
d) Spannung gegen Ortskoordinate

An der Grenzschicht zwischen dem n-dotierten und dem p-dotierten Material existiert eine Konzentrationsdifferenz der verschiedenen Ladungsträgersorten. Um diese auszugleichen, diffundieren die Majoritätsladungsträger eines Gebietes in das entgegengesetzt dotierte Gebiet und rekombinieren mit den dortigen Majoritätsladungsträgern. Der so entstandene Stromfluss wird als Diffusionsstrom I_D bezeichnet. Es entsteht somit eine Zone, die an beweglichen Ladungsträgern verarmt ist (siehe Abbildung A.3b). Demzufolge ist festzustellen, dass die Dotierungskonzentration eine feste Größe ist, während die Ladungsträgerkonzentration variieren kann.

Als Folge der Diffusion fehlen in den dotierten Gebieten die Majoritätsladungsträger, um diese Bereiche elektrisch neutral zu halten. Es kommt zu einer positiven

Raumladung im n-Gebiet und zu einer negativen Raumladung im p-Gebiet (siehe Abbildung A.3c). Aufgrund der Raumladung im Übergangsbereich entsteht ein elektrisches Feld, das einen Strom von Minoritätsladungsträgern auslöst. Dieser Strom wird als Feldstrom bezeichnet und ist dem Diffusionsstrom entgegengerichtet.

Durch die so entstandene Raumladung wird ein elektrisches Feld aufgebaut, das der Diffusion entgegenwirkt. Der Feldstrom erhöht sich so lange, bis die beiden entgegengesetzt gerichteten, elektrischen Ströme sich gegenseitig kompensieren, sodass kein resultierender Strom mehr fließt, obwohl infolge des elektrischen Feldes dort ein Potentialsprung U_D (Diffusionspotential) vorhanden ist (siehe Abbildung A.3d). Diese von freien Ladungsträgern verarmte Zone wird als Verarmungszone oder Sperrschicht bezeichnet.

Durch eine externe Spannung U_B (Biasspannung), die auch Sperrspannung genannt wird, wenn sie die gleiche Richtung wie die Diffusionsspannung hat, kann die Verarmungszone ausgedehnt werden (Näheres siehe Abschnitt A.3.1). Die Breite der Verarmungszone lässt sich nunmehr aus der Poissongleichung

$$\frac{\mathrm{d}^2\mathrm{V}}{\mathrm{d}x^2} = \frac{\varrho(x)}{\epsilon_{Si}\epsilon_0} \tag{A.1}$$

herleiten:

$$x_n = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_{Si}}{e_0 N_D(1 + N_D/N_{A_n})}(U_B + U_{\mathrm{diff}})} \tag{A.2}$$

$$x_p = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_{Si}}{e_0 N_A(1 + N_A/N_{D_p})}(U_B + U_{\mathrm{diff}})} \tag{A.3}$$

mit

V : *Potenzial*,
ρ : *Raumladungsdichte*,
$x_{n/p}$: Dicke der verarmten Zone auf der n-/p-Seite,
ϵ_0 : $8{,}854 \cdot 10^{-12}\,\frac{\mathrm{As}}{\mathrm{Vm}}$ (elektrische Feldkonstante),
ϵ_{Si} : 11,74 (Dielektrizitätszahl für Silizium),
N_D : Donatorkonzentration in der n-dotierten Schicht,
N_{D_p} : Donatorkonzentration in der p-dotierten Schicht,
N_A : Akzeptorkonzentration in der p-dotierten Schicht,
N_{A_n} : Akzeptorkonzentration in der n-dotierten Schicht,
e_0 : $1{,}602 \cdot 10^{-19}$ C (Elementarladung),
U_B : angelegte externe Spannung,
U_{diff} : Diffusionsspannung.

Die Verarmungszone kann nicht größer werden als die Sensordicke d. Die Spannung, die nötig ist, um die Sperrschicht auf diese Größe auszuweiten, wird als „Spannung für vollständige Verarmung“ (Depletionsspannung) U_{depl} bezeichnet.

A.2.2 Asymmetrischer pn-Übergang

Die in diesem Praktikum verwendete Diode besteht aus einem asymmetrischen pn-Übergang, das heißt, dass eine Seite des pn-Überganges um Größenordnungen stärker dotiert ist als die andere Seite. Bei der hier verwendeten Diode existiert ein p^+n-Übergang, was bedeutet, dass die p-Seite viel stärker dotiert ist als die n-Seite, also ist $N_A \gg N_D$. Wird dieses in den Gleichungen A.2 und A.3 berücksichtigt, so ist zu erkennen, dass sich die Verarmungszone hauptsächlich im schwächer dotierten Gebiet ausbreitet. Die Ausbreitung der Verarmungszone im p-Gebiet kann somit vernachlässigt werden und die Tiefe der Verarmungszone errechnet sich zu

$$x_n = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_{Si}}{e_0 N_D}(U_B + U_{\mathrm{diff}})}. \tag{A.4}$$

In Gleichung A.4 muss nun noch die Donatorkonzentration durch die effektive Dotierung

$$N_{\mathrm{eff}} = |N_D - N_{A_n}| \tag{A.5}$$

ersetzt werden, wobei N_D : Donatorkonzentration in der n-dotierten Schicht, und N_{A_n} : Akzeptorkonzentration in der n-dotierten Schicht. Dies ist notwendig, da in realen n-dotierten Halbleitern neben den Donatoren auch immer eine gewisse Zahl von Akzeptoren enthalten ist.

Außerdem kann die Diffusionsspannung U_{diff}, die in der Größenordnung von einem Volt liegt, gegenüber der meist viel höheren externen Betriebsspannung im Sperrfall vernachlässigt werden. Damit errechnet sich die Tiefe der Verarmungzone bei einem p^+n-Übergang mit

$$x_n = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_{Si}}{e_0 N_{\mathrm{eff}}} \cdot U_B}. \tag{A.6}$$

Setzt man dann in Gleichung A.6 anstelle der Sperrspannung U_B die Verarmungsspannung U_{depl} ein, so erhält man die Sensordicke d:

$$d = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_{Si}}{e_0 N_{\mathrm{eff}}} \cdot U_{depl}}. \tag{A.7}$$

A.3 Dioden-Charakteristik

A.3.1 Strom-Charakteristik

Durchlassrichtung

Durch Anlegen einer äußeren Spannung U_B (Biasspannung) an den pn-Übergang wird in das Gleichgewicht zwischen Diffusions- und Feldstrom eingegriffen. Durch Anlegen eines zusätzlichen Potenzials wird ein Term (je nach Vorzeichen des Potenzials) zu dem Diffusionspotenzial addiert oder von ihm subtrahiert.
Durch den veränderten Potenzialsprung am pn-Übergang kann nun ein anderer Teil an Ladungsträgern n die Potenzialbarriere überwinden, nämlich:

$$z \sim \exp(e_0 \cdot (U_B - U_D)/k_B T) \tag{A.8}$$

(mit e_0 : Elementarladung, U_B : Biasspannung, U_D : Diffusionspotenzial, k_B : Bolzmann-Konstante, T : Temperatur in Kelvin).
Ist die Biasspannung dem Diffusionspotenzial entgegengesetzt (das ist der Durchlassfall), so vergrößert sich der Diffusionsstrom I_D exponenziell. Bei gleichen Vorzeichen von Diffusionspotenzial und externem Potenzial (das ist der Sperrfall) geht dieser Strombeitrag mit $U_B < 0$ gegen Null. Betrachtet man nur diesen Strombeitrag, so kann er geschlossen als

$$I_D(U) = I_0 \cdot \exp(e_0 U_B / k_B T) \tag{A.9}$$

wobei $U_B < U_D$ und $I_0 \sim \exp -(e_0 U_D / k_B T)$ dargestellt werden.

Sperrrichtung

Zu dem in Abschnitt A.3.1 behandelten Diffusionsstrom I_D kommt im Sperrfall noch der Volumengenerationsstrom hinzu, welcher bei diesem Versuch den dominierenden Beitrag ausmacht. Dieser Strom entsteht in dem verarmten Diodenvolumen. Als Generationszentren für Ladungsträger wirken Störstellen im Kristall, deren Energieniveaus innerhalb der Bandlücke des Siliziums liegen und die durch thermische Anregung freie Ladungsträger generieren. Aus diesem Grund ist der Volumengenerationsstrom stark temperaturabhängig und proportional zum verarmten Volumen. Es ergibt sich :

$$I_{\mathrm{Vol}} = \frac{e_0 n_i x A}{2\tau}, \tag{A.10}$$

wobei

$$\begin{array}{rcl} \tau & : & \text{effektive Lebensdauer der freien Ladungsträger,} \\ \tau & = & 5\ \text{ms} \\ n_i & : & \text{intrinsische Ladungsträgerdichte,} \\ n_i & = & 5{,}73 \cdot 10^9 \text{cm}^{-3} \quad \text{bei } 293{,}15\ \text{K} \\ x & : & \text{Verarmungszonendicke,} \\ A & : & \text{Fläche des pn-Übergangs.} \end{array}$$

Unter Berücksichtigung von Gleichung A.6 erhält man

$$I_{\text{Vol}} = \frac{n_i A}{\tau} \sqrt{\frac{e_0 \epsilon_0 \epsilon_{\text{Si}}}{2N_{\text{eff}}} \cdot U_B}. \tag{A.11}$$

Zu sehen ist, dass bei konstanter Temperatur und bei Sperrspannungen U_B, die kleiner als die Verarmungsspannung U_{depl} sind, der Volumenstrom proportional zu $\sqrt{U_B}$ ist. Wird die Verarmungsspannung erreicht, so bleibt dieser Stromanteil im Idealfall konstant, da eine Ausweitung der Verarmungszone nicht mehr erfolgt. Ein leichter Anstieg des Stromes ist bei realen Sensoren zu beobachten. Ein Grund dafür ist die Vergrößerung des effektiven Volumens durch eine laterale Ausweitung der Sperrzone.

A.3.2 Kapazitäts-Charakteristik

Im Abschnitt A.2.1 wurde die „Spannung für vollständige Verarmung“ U_{depl} eingeführt. Die Depletionsspannung ist von Interesse, da zum Beispiel ab diesem Spannungswert der gesamte Sensor sensitiv für den Nachweis von ionisierenden Teilchen ist.

Aus der Gleichung A.7 kann die Verarmungsspannung errechnet werden, die sich zu

$$U_{\text{depl}} = \frac{e_0 N_{\text{eff}}}{2\epsilon_0 \epsilon_{Si}} \cdot d^2 \tag{A.12}$$

ergibt.

Um die Verarmungsspannung zu bestimmen, wird eine Kennlinie der dynamischen Kapazität aufgenommen. Die dynamische Kapazität ist eine Funktion der externen Spannung U_B,

$$C := \frac{\Delta Q}{\Delta U_B}. \tag{A.13}$$

Zur Messung muss die Sperrspannung mit einer kleinen, sinusförmig oszillierenden Spannung überlagert werden (die Frequenz beträgt bei diesem Versuch 10 kHz).

Durch die Wechselspannung kommt es zu einer Variation der Verarmungstiefe Δx. Dadurch wird eine Ladung von

$$\Delta Q = e_0 \cdot |N_{\text{eff}}| \cdot A \cdot \Delta x \tag{A.14}$$

bewegt, wobei A die Fläche des pn-Übergangs bezeichnet. Somit folgt mit den Gleichungen A.6 und A.2

$$C_{\text{Sperr}} = A\sqrt{\frac{e_0 \epsilon_0 \epsilon_{Si} N_{\text{eff}}}{2U_B}} \quad = \quad A\frac{\epsilon_0 \epsilon_{Si}}{x(U_B)}, \tag{A.15}$$

sowie mit Gleichung A.12

$$C_{\text{Sperr,depl}} = A\sqrt{\frac{e_0 \epsilon_0 \epsilon_{\text{Si}} N_{\text{eff}}}{2U_{\text{depl}}}} \quad = \quad A\frac{\epsilon_0 \epsilon_{Si}}{d}. \tag{A.16}$$

In Gleichung A.15 ist zu sehen, dass die Sperrschichtkapazität C_{Sperr} umgekehrt proportional zur Wurzel der Biasspannung ist. In der Auftragungsweise C_{Sperr} gegen $1/\sqrt{U_B}$ ergibt sich also eine Gerade mit positiver Steigung bis die Biasspannung gleich der Verarmungsspannung ist, vergleiche dazu Abbildung A.4 Gerade f_2. Ab dieser Spannung ist die Sperrschichtkapazität konstant (siehe Gleichung A.16), sodass an diesem Knick die Verarmungsspannung abgelesen werden kann.

In Abbildung A.4 ist die Kapazitäts-Charakteristik eines pn-Übergangs in der Auftragungsweise Kapazität gegen $1/\sqrt{U_B}$ dargestellt. Aus diesem Diagramm kann die Verarmungsspannung berechnet werden, in dem der Schnittpunkt der beiden Geraden f_1 und f_2 bestimmt wird.

Die gemessene Kapazität setzt sich additiv aus der Sperrschichtkapazität und den Streukapazitäten zusammen. Diese stammen von dem Messaufbau. Die Streukapazität kann auch aus dem Diagramm 3.1 bestimmt werden. Sie ist die Kapazität, bei der die Gerade f_2 die y-Achse schneidet.

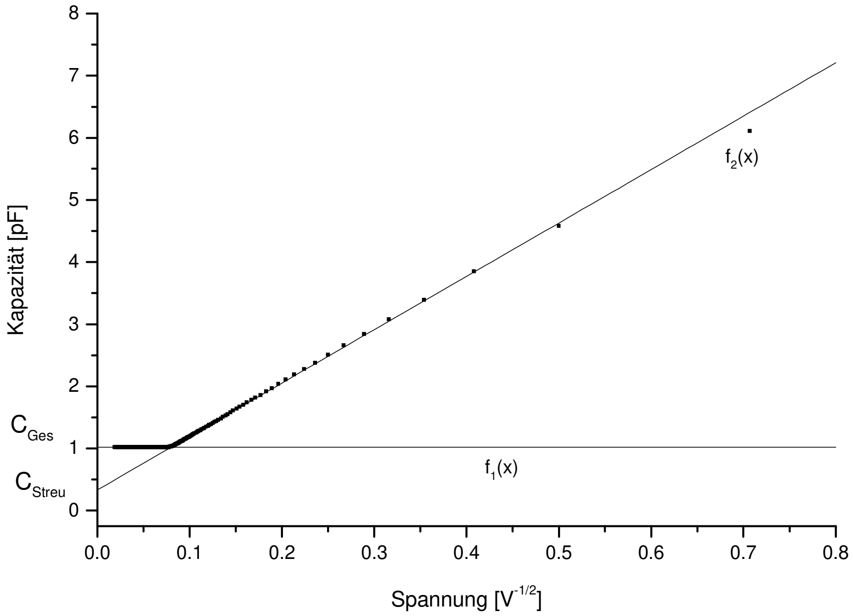


Abbildung A.4: Kapazitäts-Spannungs-Kurve, Auftragungsweise $C \sim 1/\sqrt{U}$

A.4 Aufgabenstellung und Versuchsdurchführung

A.4.1 Messvorschrift

1. Messen Sie die Strom-Spannungs-Kennlinie der Diode in Durchlassrichtung.
2. Messen Sie die Strom-Spannungs-Kennlinie der Diode in Sperrrichtung.
3. Messen Sie die Kapazitäts-Spannungs-Kennlinie der Diode in Sperrrichtung.
4. Simulieren Sie die Verarmungszone einer Diode in Abhängigkeit der Sperrspannung für vier verschiedene Dioden. Dabei sollte gegenüber der ersten Simulation immer nur ein Paramter variiert und die anderen konstant gelassen werden.

A.4.2 Auswertung

1. Zu A.4.1.1 : Tragen Sie die Datenpunkte in ein halblogarithmisches Diagramm ein, um den exponentiellen Zusammenhang zwischen Strom und Spannung in Durchlassrichtung darzustellen.
2. Zu A.4.1.2 : Bestimmen Sie die Verarmungsspannung der Diode aus den Messwerten, indem Sie die Stromwerte gegen $\sqrt{U_B}$ auftragen und den Abknickpunkt ablesen.
3. Zu A.4.1.3 : Erstellen Sie ein C vs $1/\sqrt{U_B}$ Diagramm. Bestimmen Sie aus diesem Diagramm die Verarmungsspannung der Diode und vergleichen Sie diese mit dem Ergebnis aus Aufgabenteil 2.
   Bestimmen Sie die effektive Dotierung der Diode.
   Berechnen Sie die Dicke der Diode.
   (Die Fläche der Diode beträgt 10 mm^2)
4. Zu A.4.1.4 : Tragen Sie die aus den vier Simulationen erhaltenen Daten in ein Diagramm ein , wobei die Verarmungstiefe gegen Sperrspannung aufgetragen werden soll.
   Berechnen Sie für diese vier Simulationen die jeweilige Strom- und Kapazitäts-Spannungs-Kurve und tragen Sie die vier Strom- und die Kapazitäts-Spannungs-Kurven in jeweils ein Diagramm ein. Wählen Sie dabei eine sinnvolle Auftragungsweise.
   Beschreiben Sie die Diagramme und erläutern Sie die Auffälligkeiten.

A.4.3 Durchführung

ALLE ANGABEN DER SPANNUNG IN VOLT SIND NUR BETRÄGE DER SPANNUNG DIE AN DER DIODE ANLIEGT. DIE DEN VERSUCH DURCHFÜHRENDE PERSON MUSS BEI DEN JEWEILIGEN AUFGABENSTELLUNGEN DAS RICHTIGE VORZEICHEN NOCH BESTIMMEN

Zu A.4.1.1: Um die Strom-Spannungs-Kennlinie der Diode in Durchlassrichtung aufzunehmen soll der Messaufbau, der in Abbildung A.5 dargestellt ist, verwendet werden. Dabei soll die Schrittweite so angepasst werden, dass die Form der Kurve gut zu erkennen ist. Die Messkurve soll bis zu einer Spannung von 1 Volt, oder bis zum Messabbruch aufgenommen werden.

Zu A.4.1.2: Zur Messung der Strom-Spannungs-Kennlinie der Diode in Sperrrichtung soll der Messaufbau, der in Abbildung A.5 abgebildet ist, verwendet werden. Die Schrittweite der Messung soll dabei so gewählt werden, dass die Form der Kurve gut zu erkennen ist. Diese Kurve soll bis zu einer Spannung von 250 Volt oder bis zum Messabbruch aufgenommen werden.

Zu A.4.1.3: Zur Messung der Kapazitäts-Spannungs-Kennlinie der Diode in Sperrrichtung kann der Messaufbau aus Abbildung A.6 verwendet werden. Die Messkurve soll entweder bis 250 Volt aufgenommen werden, oder bis zu der Spannung bei der die Messung der Dioden-Stromkennlinie in Durchlassrichtung abgebrochen wurde. Der Abstand der Messpunkte soll so gewählt werden, dass die Form der Kurve gut erkennbar und der Abknickpunkt gut auswertbar ist.

A.5 Versuchsaufbau

A.5.1 Strommessung

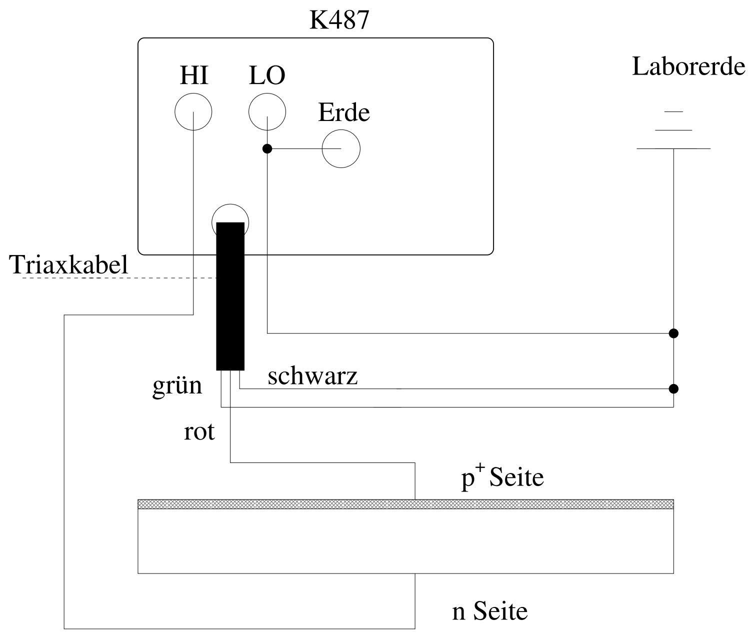


Abbildung A.5: Messaufbau für die Strom-Spannungs-Messungen

In Abbildung A.5 ist der Versuchsaufbau für die Strom-Spannungs-Messung abgebildet. Zu sehen ist, dass bei dieser Messung nur ein Gerät verwendet wird, das Keithley 487 (K487). Dieses Gerät ist Spannungsquelle und Strommessgerät in einem.
Beim Anschliessen der Spannung an die Diode ist sorgfälltig auf die Verkabelung zu achten, da schon bei einer Spannung von nur 1 Volt die Diode zerstört werden kann, wenn sie in Durchlassrichtung betrieben wird. Deshalb ist immer auf das Vorzeichen der Spannung zu achten.

Die Strommessung erfolgt über das Triax-Kabel. Wie der Name schon andeutet, besteht dieses Kabel aus drei koaxialen Adern. Zwei dieser Adern dienen dazu den Stromkreis zu schließen. Die dritte Ader ist als Abschirmung um die beiden anderen herumgelegt. Bei herkömmlichen zweiadrigen Koaxialkabeln wird die Abschirmung auch als Rückleiter verwendet. Da aber bei diesen Messungen Ströme im Bereich von einigen Nanoampere gemessen werden, ist dieses Kabel erforderlich, um mögliche Störungen abzuschirmen.

Bei der Messung ist auch noch darauf zu achten, dass alle Erdungen auf dem gleichen Potenzial liegen, da schon kleine Schwankungen die Messung unbrauchbar machen.

A.5.2 Kapazitätsmessung

Der Messaufbau, der für die Kapazitäts-Spannungs-Messung verwendet werden soll, ist in Abbildung A.6 dargestellt.

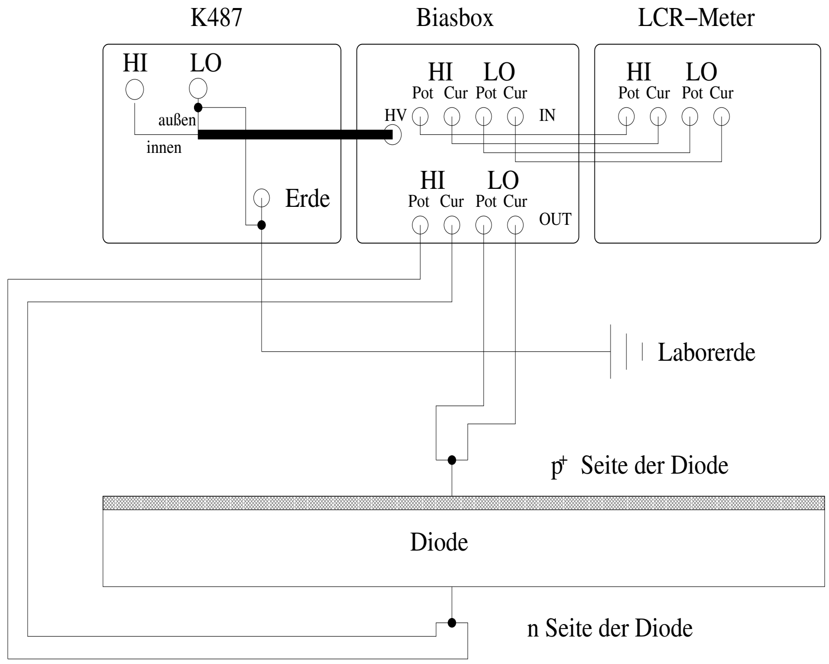


Abbildung A.6: Messaufbau für die Kapazitäts-Spannungs-Messung

Bei dieser Messung wird dieselbe Spannungsquelle verwendet wie bei der Strommessung; zusätzlich braucht man noch ein LCR-Meter. Dieses liefert die kleine Oszillatiosspannung und mißt die dynamische Kapazität der Diode bei verschiedenen Spannungen.
In der Biasbox werden die Oszillationsspannung aus dem LCR-Meter und die Spannung aus der Spannungsquelle überlagert.

Danach werden dann die Anschlüsse, wie in der Abbildung A.6 eingezeichnet, miteinander verbunden. Dabei ist wieder darauf zu achten, auf welcher Seite der HI-Ausgang der Spannungsquelle liegt, damit bei der Messung auch das richtige Vorzeichen der Spannung gewählt wird, um die Diode nicht zu zerstören.

A.6 Beschreibung der Bildschirmoberflächen

Startoberfläche

Beim Start des Versuches ist die in Abbildung A.7 dargestellte Bildschirmoberfläche zu sehen.
Die für das Praktikum wichtigen Programme sind oben in der Mitte als *Icons* abgelegt. Mit den *Icons* in der obersten Reihe können die Programme für die Strom- und Kapazitäts-Spannungs-Messung aufgerufen werden. Dabei ist darauf zu achten, dass zuerst die Strom-Spannungs-Messung durchgeführt werden soll (siehe Abschnitt A.4.3). Darunter sind dann die Programme angeordnet, die für die Auswertung der Messungen gebraucht werden. Unter dem jeweiligen Messprogramm befindet sich das Auswerteprogramm.

In der dritten Reihe befindet sich nur ein Programm. Dieses dient dazu, die Verarmungszone der Diode zu simulieren. Dieses Programm soll zuletzt bearbeitet werden.

Messprogramme

Strom-Messprogramm

In Abbildung A.8 ist die Messoberfläche für die Strom-Spannungs-Messungen zu sehen. Die Oberfläche unterteilt sich in zwei Bereiche. Auf der linken Seite, unter dem rosafarbenen Balken, können die Parameter für die Messung eingestellt werden. Der Bereich unter dem blauen Balken, also der mittlere bis rechte Bereich, zeigt die aktuellen Messdaten sowie ein Diagramm mit der Messung.

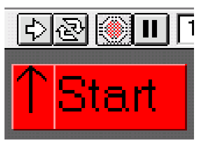


Abbildung A.9: Position des Start-Buttons

In der Kopfzeile, die über der Beschriftung *Strom gegen Spannung* liegt, ist ganz links, über dem roten Hinweis, ein Button mit einem Pfeil zu sehen, mit welchem die Messung gestartet wird. Ist die Messung einmal gestartet, kann auf der Oberfläche nichts mehr geändert werden.
Im Folgenden sollen die verschiedenen Bereiche der Messoberfläche näher betrachtet werden.

Im linken Bereich, dem Parameterbereich (siehe Abb. A.10), sind in dem oberen Kästchen die Parameter für die Messung anzugeben. Die Messung startet immer bei 0 Volt. Die Spannung, bis zu der gemessen werden soll, muss dann noch angegeben werden. Die angegebene Spannung ist in Bezug auf die n-Seite zu sehen, sie liegt also an der p-Seite an.

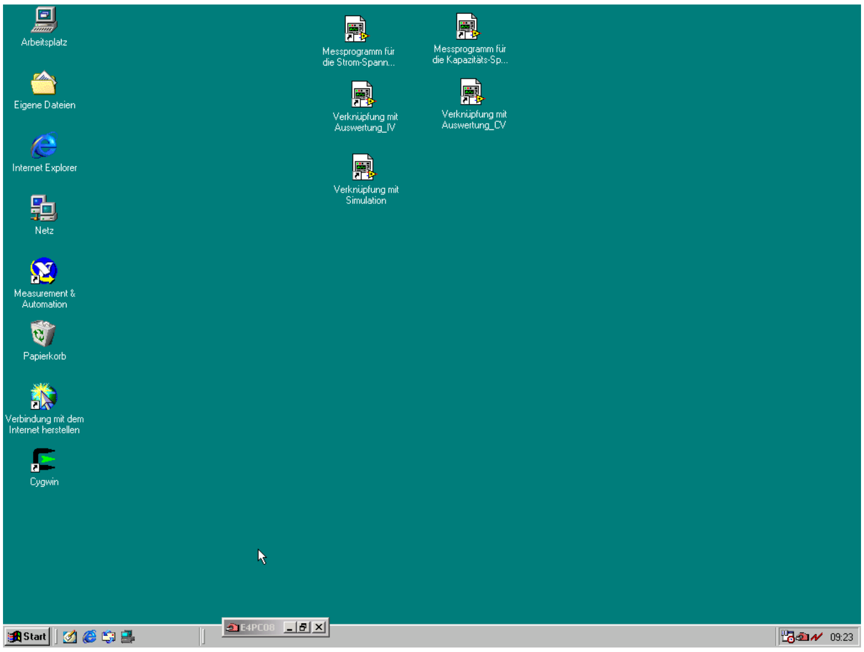


Abbildung A.7: Bildschirmoberfläche zu Beginn der Versuches.

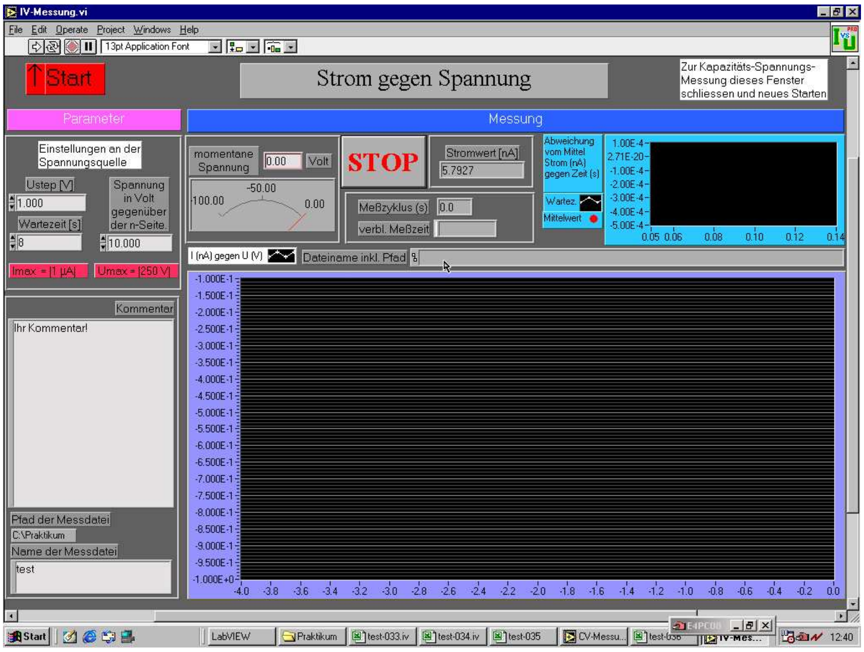


Abbildung A.8: Bildschirmoberfläche des Messprogramms für die Strom-Spannungs-Messungen

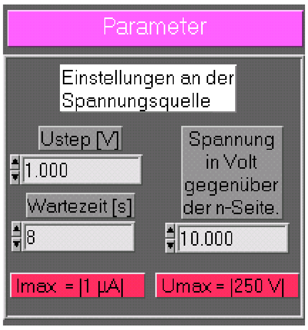


Abbildung A.10: Parameterbereich bei der Strom-Spannungs-Messung

In diesem Fenster können als Parameter noch die Schrittweite und die Wartezeit verändert werden. Die Schrittweite sollte so gewählt werden, dass der Kurvenverlauf gut zu erkennen ist. Als Wartezeit empfehlen sich Werte zwischen einer und zehn Sekunden. Ob die gewählte Wartezeit richtig ist, kann bei der Messung in dem Diagramm rechts oben im Messbereich überprüft werden. Dort wird der Strom bei der jeweiligen Spannung gegen die Wartezeit aufgetragen, wenn diese Kurve gegen Ende der Wartezeit flach ist, dann ist die Wartezeit richtig gewählt. Eine genauere Erklärung dieses Diagrammes erfolgt weiter unten.
Im unteren Bereich auf der linken Seite kann vor der Messung ein Kommentar eingegeben werden. Dieser wird dann in das Messfile mit eingetragen. Der Dateipfad ist unter dem Kommentarfeld angegeben. Darunter muss noch der Name der Messung eingetragen werden. Wenn ein Name mehrmals vergeben wird, so wird die vorherige Messung nicht überschrieben, sondern es wird automatisch eine fortlaufende Nummer an den Messnamen angehängt.

Auch der Messbereich (siehe Abb. A.11) unterteilt sich in mehrere Unterbereiche. Links oben im Messbereich wird die bei der Messung aktuell anliegende Spannung angezeigt. Vorsicht, nach der Messung gehen diese Werte nicht wieder auf 0 Volt, sondern bleiben bei der letzten Spannung stehen! Die Spannung wird aber nach der Messung automatisch herunter gefahren.

Abbildung A.11: Messbereich bei der Strom-Spannungs-Messung

Oben in der Mitte befindet sich eine STOP-Taste. Mit dieser Taste kann die Messung abgebrochen werden, falls Fehler auftreten sollten. Die Spannung wird aber noch heruntergefahren, so dass es etwas dauern kann bis ein erneuter Zugriff auf die Oberfläche wieder möglich ist.
Neben der STOP-Taste ist der aktuelle Messwert des Stromes (in nA) abzulesen. Unter der STOP-Taste ist die Zeit angegeben, wie lange ein Messzyklus braucht und wie lange die gesamte Messung noch dauern wird.
Rechts oben ist ein Diagramm abgebildet, in dem die Stromwerte gegen die Wartezeit bei der jeweiligen Spannung eingetragen werden. Dort ist dann zu sehen, ob die Schrittweite groß genug gewählt wurde, das heißt, dass die Kurve zum Ende hin

konstant wird. Am rechten Rand des Diagrammes wird der jeweilige Mittelwert über die Wartezeit als roter Punkt angegeben. Bei der Betrachtung dieses Diagrammes ist auch auf die Skala der Stromachse zu achten; die Einheit dieser Achse ist nA und wird automatisch bei jedem Messschritt mitskaliert.
In dem unteren Bereich ist ein großes Diagramm zu sehen. In dieses Diagramm werden die Messwerte automatisch eingetragen. Die Skalierung der beiden Achsen erfolgt automatisch und ändert sich während der Messung. Dabei ist zu beachten, dass die Werte auf der y-Achse die Einheit nA besitzen. In dem breiten Fenster über dem Diagramm ist der Messpfad und -name mit der zugehörigen Nummer und Endung der Ausgabedatei zu lesen.

Die Messdaten werden als .iv File ausgegeben. In diesem File stehen in zwei Spalten die Spannungswerte gegen die Stromwerte eingetragen. Dieses File kann z.B. mit Excel oder mit Origin geöffnet werden. Dabei ist auf die Ländereinstellung in der Systemsteuerung zu achten. Damit die Daten richtig interpretiert werden, muss dort der „Punkt“ als „Dezimaltrennung“ und das „Komma“ als „Trennung für Zifferngruppierung“ eingestellt werden.

Kapazitäts-Messprogramm

Auch die Bildschirmoberfläche für die Kapazitäts-Spannungs-Messung (siehe Abbildung A.12) unterteilt sich in einen Parameterbereich und einen Messbereich. Und auch dieses Programm kann, nachdem alle Parameter eingegeben sind, durch Drücken des Pfeils in der oberen Menü-Leiste, über dem roten Hinweis, gestartet werden.

Abbildung A.13: Messbereich bei der Kapazitäts-Spannungs-Messung

Der linke Bereich der Programmoberfläche ist wieder der Parameterbereich. Auch hier sind in dem obersten Kästchen, wie bei der Strom-Spannungs-Messung, die Parameter für die Messung anzugeben.
Darunter ist wieder Platz, um sich Notizen zu der Messung zu machen und den Datei-Namen anzugeben. Die Dateiausgabe geschieht bei dieser Messung in einem .cv-File. Es muss auch wieder auf die Ländereinstellungen geachtet werden und es kann mit den gleichen Programmen geöffnet werden.
Der Messbereich der Programmoberfläche (siehe Abb. A.13) ist ähnlich aufgebaut

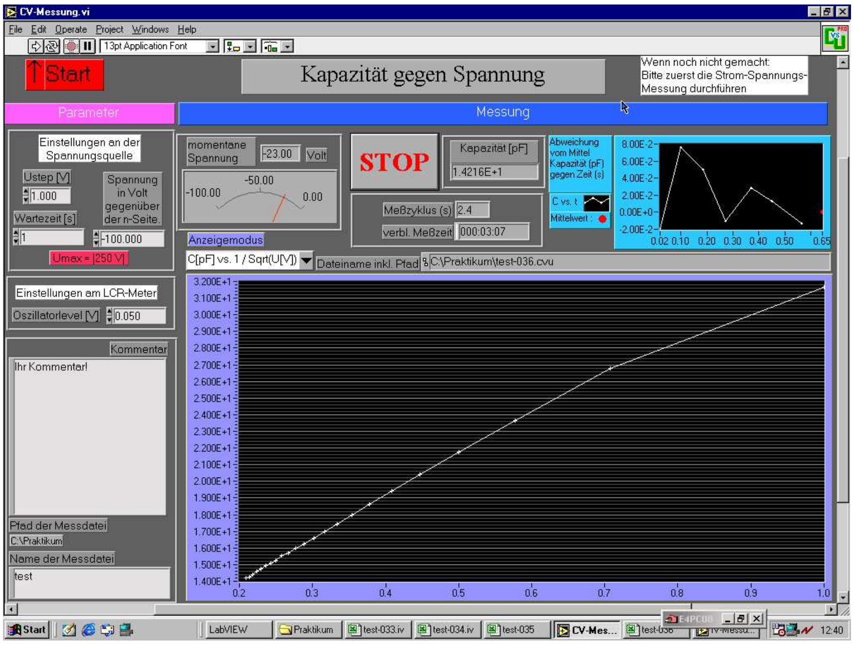


Abbildung A.12: Bildschirmoberfläche des Messprogramms für die Kapazitäts-Spannungs-Messungen

wie bei der Strom-Spannungs-Messung. Die Unterschiede liegen darin, dass in dem Fenster neben der STOP-Taste nicht der Strom, sondern die Kapazität angezeigt wird. Ausserdem wird in dem Diagramm rechts oben in der Ecke nicht der Strom, sondern die Kapazität gegen die Zeit bei einer festen Spannung eingetragen, und es kann die Auftragungsweise des großen Diagramms geändert werden, denn links oben an diesem Diagramm ist ein kleines Menü angebracht. Drückt man auf dieses Menü, so kann man entscheiden, in welcher Auftragungsweise die Daten dargestellt werden sollen. Bei der Auswahl der Auftragungsweisen gibt es auch eine Auftragungsweise C vs. $1/\sqrt{U}$, bei diesem Diagramm wird der Datenpunkt bei 0 Volt weggelassen, da dort eine Singularität vorliegt.

Auswertung der Strom-Spannungs-Messung

Um die Strom-Spannungs-Kurve während des Praktikums auszuwerten, kann das Programm, von dem die Bildschirmoberfläche in Abbildung A.14 dargestellt ist, verwendet werden.

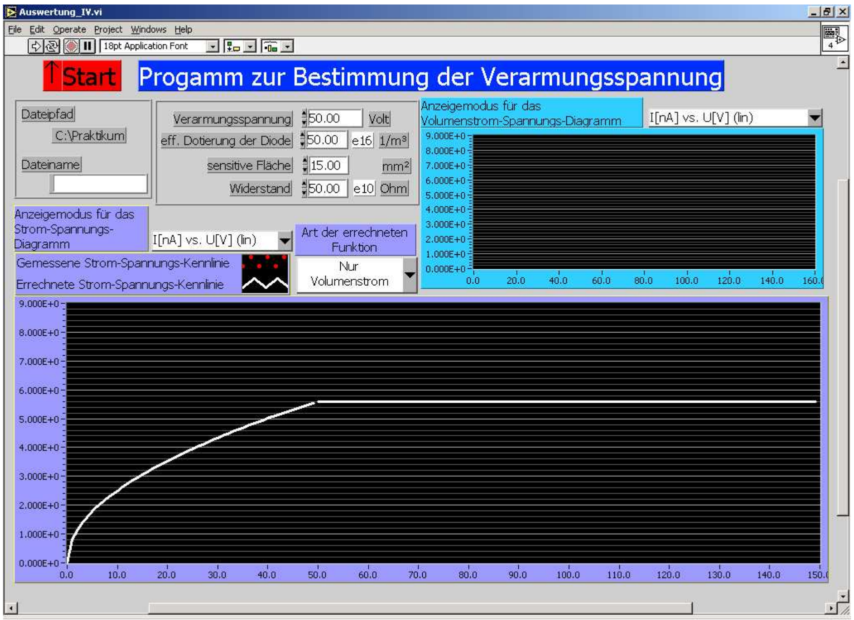


Abbildung A.14: Bildschirmoberfläche des Auswerteprogramms für die Strom-Spannungs-Messungen.

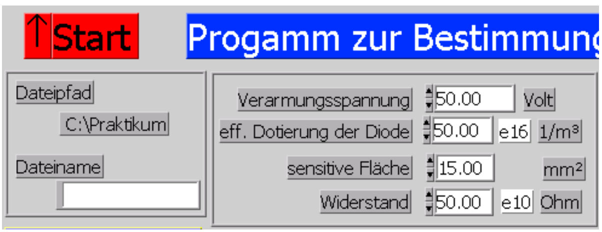


Abbildung A.15: Einlese- und Parameterbereich bei der Strom-Spannungs Auswertung

Diese Programm unterteilt sich in einen Bereich in dem die Messdaten eingelesen werden und in einen Bereich, in dem diese Daten dann ausgewertet werden sollen. Der Bereich zum Einlesen der Daten ist sehr klein (siehe Abb. A.15). Er beschränkt sich auf das kleine abgeteilte Feld unter dem roten Hinweis auf dem Startknopf. Dort muss nur der Name der Messung angegeben werden, welche ausgewertet werden soll. Der Rest der Oberfläche dient zur Auswertung der Daten. Die eingelesenen Daten sind Beträge der gemessenen Daten.

Neben dem Feld, in dem der Dateiname angegeben werden soll, ist ein Feld angelegt, in welchem die Parameter zur theoretischen Berechnung der Messkurve angegeben werden müssen (weiße Felder) (siehe Abb. A.15) .
In einem dieser Felder kann der Widerstand als ein Parameter eingetragen werden. Der Widerstand ist kein Parameter in der Formel zur Berechnung des Volumenstroms einer Diode, aber wenn die Diode vollständig verarmt ist, so verhält sie sich in erster Näherung wie ein Ohmscher Widerstand. Aus diesem Grund kann bei der errechneten Stromkurve die Art der errechneten Kurve verändert werden. Diese kann mit dem Regler, der sich unter diesem Feld befindet, vorgenommen werden. Zum einen kann

zur Berechnung der Fitfunktion nur der Volumenstrom beitragen, zum anderen kann aber zum Volumenstrom noch ein Ohmscher Beitrag dazu addiert werden. Bei dieser zweiten Fitfunktion geht dann der Parameter des Widerstandes in die Berechnung des Stromes ein.
Bei der Auswertung sollen beide Kurven möglichst gut an die Messung angepasst werden.

In der Abbildung A.14 sind zwei Diagramme zu erkennen; ein großes und ein etwas kleineres. In dem großen, hellblau unterlegten Diagramm, wird der Sperrstrom gegen die Sperrspannung dargestellt und in dem kleineren, dunkelblau unterlegten Diagramm, wird die Verarmungstiefe gegen die Sperrspannung aufgetragen. In beiden Diagrammen kann die Auftragungsweise der Daten durch die weiß unterlegen Balken verändert werden. Als Starteinstellung sind die linearen Darstellungen gewählt.

In der Legende des großen Diagramms ist zu sehen, dass in diesem Diagramm zwei Kurven dargestellt werden. Die rote Kurve ist die vorher durchgeführte Messung, die weiße Kurve ist die aus den Daten errechnete Kurve. Ziel ist es nun, durch Verändern der Parameter diese beiden Kurven zur Deckung zu bringen.

Mit den gleichen Parametern wird das kleine Diagramm erzeugt. In diesem Diagramm wird dargestellt, wie sich die Verarmungstiefe in Abhängigkeit der Sperrspannung verändert.

Zum Starten dieses Programmes muss der kleine Button auf dem 2 Pfeile einen Kreis beschreiben (siehe Abbildung A.16) , über dem roten Hinweis, gedrückt werden.

Nach der Auswertung der Kapazitäts-Spannungs-Messung soll die Strom-Spannungs-Kurve erneut ausgewertet werden. Dabei sollen dann die Parameter Verarmungsspannung und effektive Dotierung von der Auswertung der Kapazitäts-Spannungs-Messung genommen werden. Als freie Parameter bleiben dann nur noch die sensitive Fläche der Diode und der Widerstand.

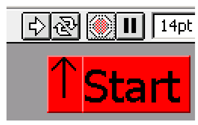


Abbildung A.16: Position des Start-Buttons

Auswertung der Kapazitäts-Spannungs-Messung

Um die Kapazitäts-Spannungs-Kurve während des Praktikums auszuwerten, kann ein Programm, welches dem aus Abschnitt A.6 ähnelt, verwendet werden. Die Bildschirmoberfläche dieses Programms ist in Abbildung A.17 abgebildet.

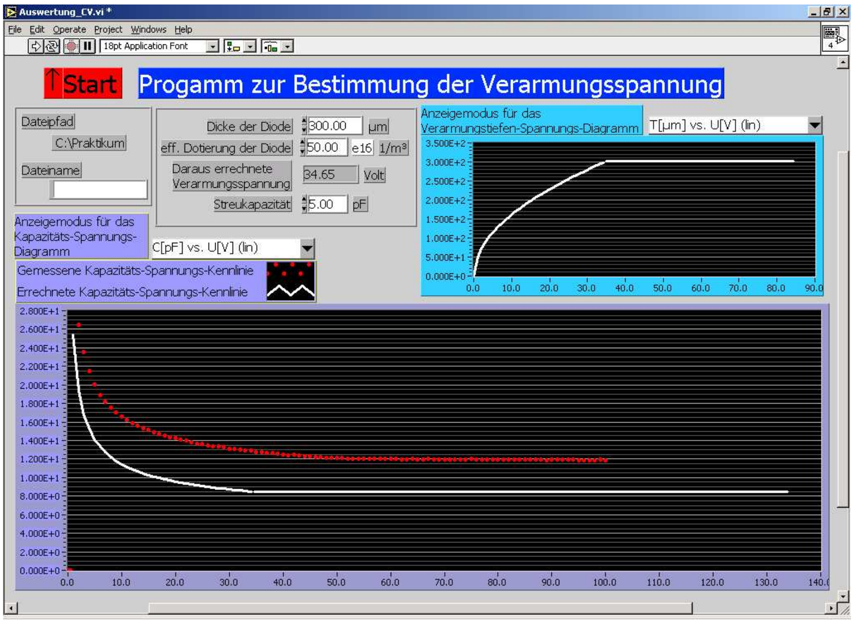


Abbildung A.17: Bildschirmoberfläche des Auswerteprogramms für die Kapazitäts-Spannungs-Messungen.

Auch bei diesem Programm muss der Dateiname der Messung in dem weißen Feld oben links eingetragen werden (siehe Abbildung A.18). Die eingelesenen Daten sind Beträge der gemessenen Daten.

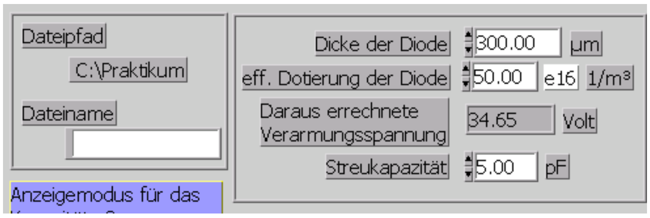


Abbildung A.18: Einlese- und Parameterbereich bei der Kapazitäts-Spannungs Auswertung

Als Parameter dienen bei dieser Auswertung (siehe Abbildung A.18) die effektive Dotierung der Diode und die Dicke der Diode (weiß unterlegte Eingabefelder). Daraus wird dann die Verarmungsspannung berechnet.
Als zusätzlicher Parameter wird die Streukapazität, welche in Abschnitt A.3.2 eingeführt wurde, zum Anpassen der errechneten an die gemessene Kurve benötigt, da die errechnete Sperrschichtkapazität um den Betrag der Streukapazität kleiner ist als in der gemessenen Kurve.

Auch in diesem Programm können wieder die Auftragungsweisen der Diagramme durch die weißen Balken oberhalb der Diagramme verändert werden.

Zum Starten des Programms muss auch hier der Button mit den zwei Pfeilen, die einen Kreis bilden, oberhalb des roten Hinweises, gedrückt werden.

Simulation der Verarmungstiefe

Zur Simulation der Verarmungstiefe soll das Programm verwendet werden, dessen Bildschirmoberfläche in Abbildung A.19 dargestellt ist.

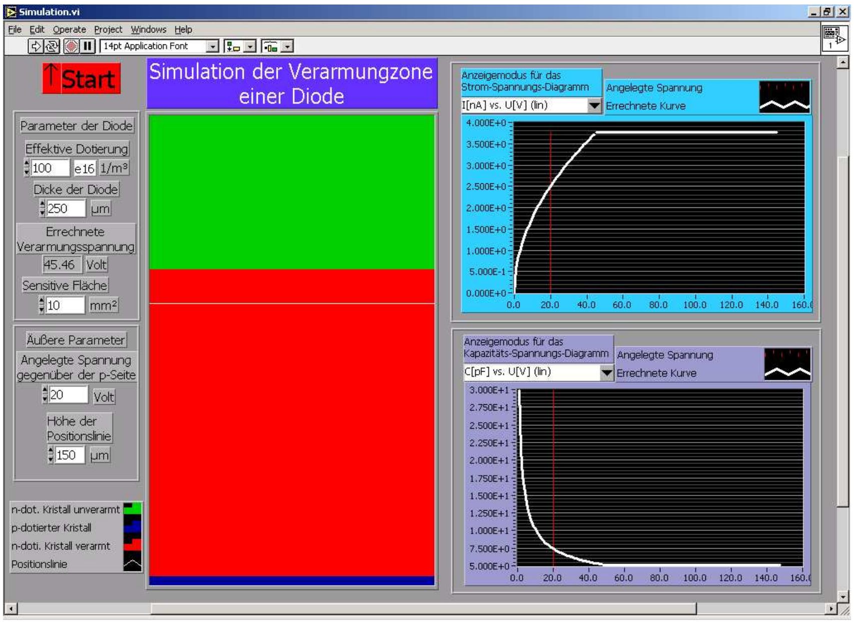


Abbildung A.19: Bildschirmoberfläche des Programms für die Simulation der Verarmungstiefe.

Dieses Programm kann direkt nach dem Aufrufen durch Drücken des selben Buttons wie bei den Auswerteprogrammen, welcher sich über dem roten Hinweise befindet, gestartet werden.

In dem abgeteilten Bereich unter dem roten Hinweis können die Parameter der Diode angegeben werden (siehe Abbildung A.20). Die für die Diode wichtigen Parameter sind wieder die effektive Dotierung, die Dicke der Diode und die Fläche der Diode (sensitive Fläche). Aus den ersten beiden Parametern kann dann wieder die Verarmungsspannung berechnet werden.

Abbildung A.20: Parameter der Diode bei der Simulation der Verarmungstiefe.

In dem darunterliegenden Bereich (siehe Abbildung A.21) kann die Spannung gegenüber der p-Seite, also die, die an der n-Seite anliegt, angegeben werden.

Darunter kann dann die Höhe der Positionslinie verändert werden. Die Positionslinie dient zum Bestimmen der Tiefe der Verarmungsspannung.

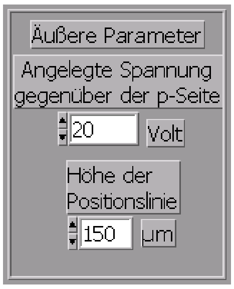


Abbildung A.21: Externe Parameter bei der Simulation der Verarmungstiefe.

In der Mitte der Bildschirmoberfläche ist die simulierte Diode dargestellt; unten befindet sich die p^+-Dotierung, welche blau dargestellt ist; der n-Kristall ist grün, das sich mit steigender Spannung ausbreitende verarmte Volumen ist rot dargestellt; die Positionslinie ist weiß.

In den Diagrammen auf der rechten Seite werden der Sperrstrom gegen die Sperrspannung (oben) und die Sperrkapazität gegen die Sperrspannung (unten) dargestellt. Die Auftragungsweisen dieser Diagramme können wieder mit den weißen Balken verändert werden. Der rote Strich in diesen beiden Diagrammen gibt die momentan angelegte Spannung an.

Anhang B

Versuchsanleitung für das traditionellen Experiment

Zu Teilen der Theorie vgl. S. Finke [Fin92]

Kennlinien von Siliziumdioden

Sonderversuch im Physikpraktikum an der Universität Dortmund

Herkömmlicher Versuch

B.1 Halbleiter

B.1.1 Elektrische Leitfähigkeit

Unter Halbleitern versteht man kristalline Stoffe, deren spezifische elektrische Leitfähigkeit zwischen denen von Isolatoren und Metallen liegt. Ihre elektrischen Eigenschaften können verstanden werden, wenn man die Energieverteilung der Elektronen im Kristall betrachtet. Die Anwendung der Quantenmechanik auf dieses Vielteilchenproblem liefert das Ergebnis, dass in einem einzelnen Atom unterhalb der Ionisationsgrenze nur scharf definierte Energiewerte für die Hüllenelektronen möglich sind (siehe hierzu V 601 und 602), während ihnen im Kristall gewisse Energie*bereiche*, die man als *Bänder* bezeichnet, zur Verfügung stehen.

Zwischen den Energiebändern liegen die sogenannten *verbotenen Zonen*. Das sind Energiebereiche, die die Elektronen nicht annehmen können. Abbildung B.1 verdeutlicht diesen Zusammenhang.

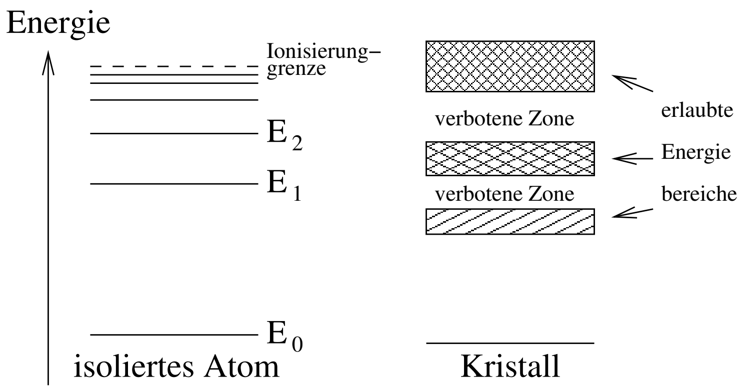


Abbildung B.1: Energieniveaus eines einzelnen Atoms und eines Kristalls

Elektronen sind Teilchen mit *halbzahligem Spin* (näheres hierzu siehe V 505) und unterliegen deshalb im Kristall dem *Pauli-Verbot*, welches besagt, dass jeder mögliche Zustand mit der Energie E nur von höchstens zwei Elektronen, die entgegengesetzten Spin haben müssen, besetzt sein kann. Das hat zur Konsequenz, dass die eben erwähnten Bänder nur *endlich* viele Elektronen aufnehmen können. Da zunächst die Zustände niedrigster Energie besetzt werden, sind in einem Kristall die unteren Bänder stets gefüllt, während die oberen leer oder teilweise gefüllt sein können
(Für T = 0).

Die Elektronen eines voll besetzten Bandes können nicht zur elektrischen Leitfähigkeit beitragen; denn wenn sich ein Elektron in einem elektrischen Kraftfeld bewegen soll, muss es Energie aufnehmen. Das ist aber nicht möglich, da alle Energiezustände innerhalb des Bandes besetzt sind. Die Elektrizitätsleitung wird also von den Elektronen ermöglicht, die sich in den teilweise gefüllten Bändern aufhalten. Bei den Metallen mit ihrer hohen Leitfähigkeit ist daher das oberste Band immer nur teilweise gefüllt. Man bezeichnet dieses auch als *Leitungsband*. Dieses ist bei Halbleitern bei niedrigen Temperaturen praktisch leer. Das darunterliegende Band ist nahezu voll besetzt; dieses Band wird als *Valenzband* bezeichnet, da es von Elektronen, die die chemische Bindung innerhalb des Kristalls bewirken, gebildet wird. Die Breite der verbotenen Zone zwischen diesen beiden Bändern ist bei den Halbleitern im Vergleich zu den Isolatoren so gering, dass bei Raumtemperatur Halbleiter elektrischen Strom leiten können, da bei diesen Temperaturen einige Elektronen in der Lage sind, durch thermische Anregung die verbotene Zone zu überspringen und in das Leitungsband zu gelangen. Auf diese Weise erhält man bei Halbleitern eine geringe, mit der Temperatur jedoch stark zunehmende Leitfähigkeit, die man als *Eigenleitung* bezeichnet. Elektronen, die das Valenzband verlassen haben, hinterlassen dort unbesetzte Zustände, sodass jetzt auch im Valenzband Elektrizitätsleitung möglich ist. Die von den Elektronen nicht besetzten Plätze heißen Löcher. Sie verhalten sich wie positive Ladungen und bewegen sich daher im äußeren elektrischen Feld entgegengesetzt zu den Elektronen des Leitungsbandes. Aus dem Entstehungsmechanismus der Löcher kann man folgern, dass bei der Eigenleitung Elektronen und Löcher stets in der gleichen Zahl vorhanden sein müssen (siehe Abbildung B.2a).

B.1.2 Dotierte Halbleiter

Es gibt noch eine weitere, wichtige Möglichkeit, Ladungträger in Halbleitern zu erzeugen, die man als *Störstellenleitung* bezeichnet. Bringt man in das Gitter des Halbleitermaterials Fremdatome ein, die mehr Valenzelektronen als die Atome des Wirtskristalles besitzen, so sind die „überschüssigen“ Valenzelektronen nur sehr schwach an das Fremdatom gebunden und können daher leicht an das Leitungsband abgegeben werden. Auf diese Weise erhält man eine reine Elektronenleitung (n-Leitung), deren Leitfähigkeit je nach Konzentration der Fremdatome, auch *Donatoratome* genannt, die Leitfähigkeit der Eigenleitung bei Zimmertemperatur um mehrere Größenordnungen überschreiten kann. Da die Aktivierungsenergie der Donatoren klein gegen die Breite der verbotenen Zone ist, liegen ihre Energieniveaus an der in Abbildung B.2b gezeichneten Stelle. Bei Zimmertemperatur sind praktisch alle Donatoren aktiviert. Auch durch den Einbau von Fremdatomen mit geringerer Valenzelektronenzahl als die der Atome des Wirtsgitters lassen sich bewegliche Ladungsträger in Halbleitern erzeugen. Diese als *Akzeptoren* bezeichneten Atome nehmen leicht Elektronen auf, sodass im Valenzband unbesetzte Plätze entstehen. Auf diese Weise kann man eine reine *Löcherleitung* oder *p-Leitung* erzeugen. Die Akzeptorniveaus müssen dicht über der Bandkante des Valenzbandes liegen, wie in Abbildung B.2c angedeutet.

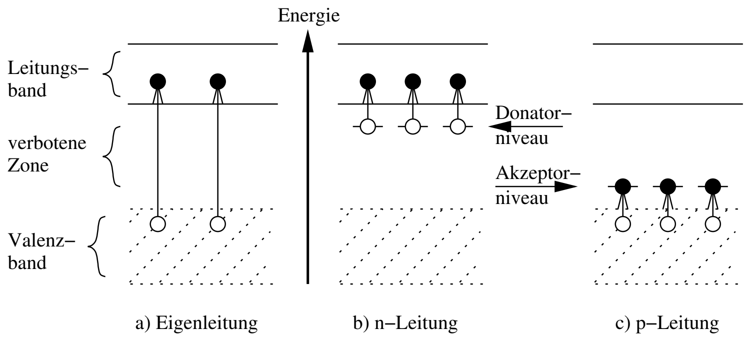


Abbildung B.2: a) Skizze der Eigenleitung bei einem Halbleiter b) Skizze der n-Leitung c) Skizze der p-Leitung bei einem Halbleiter (siehe Abschnitt B.1.2)

Die Elektronen im n-Gebiet und die Löcher im p-Gebiet werden als Majoritätsladungsträger bezeichnet.
Die Löcher im n-Gebiet und die Elektronen in p-Gebiet werden als Minoritätsladungsträger bezeichnet.

B.2 pn-Übergang

B.2.1 Symmetrischer pn-Übergang

In Kapitel A.1 wurden nur homogene Halbleitermaterialien betrachtet. Im folgenden geht es um Proben, bei denen p-leitendes Material abrupt in n-leitendes übergeht, sodass innerhalb der Probe eine pn-Grenzschicht entsteht (siehe Abbildung A.3a).

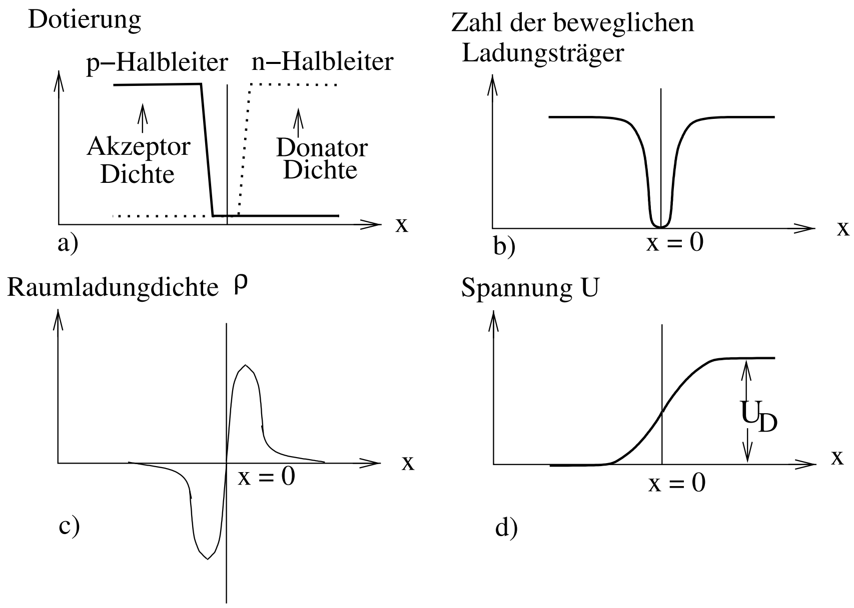


Abbildung B.3: a) Dotierungsprofil gegen Ortskoordinate,
b) Anzahl der beweglichen Ladungsträger gegen Ortskoordinate,
c) Raumladungsdichte gegen Ortskoordinate,
d) Spannung gegen Ortskoordinate

An der Grenzschicht zwischen dem n-dotierten und dem p-dotierten Material existiert eine Konzentrationsdifferenz der verschiedenen Ladungsträgersorten. Um diese auszugleichen, diffundieren die Majoritätsladungsträger eines Gebietes in das entgegengesetzt dotierte Gebiet und rekombinieren mit den dortigen Majoritätsladungsträgern. Der so entstandene Stromfluss wird als Diffusionsstrom I_D bezeichnet. Es entsteht somit eine Zone, die an beweglichen Ladungsträgern verarmt ist (siehe Abbildung A.3b). Demzufolge ist festzustellen, dass die Dotierungskonzentration eine feste Größe ist, während die Ladungsträgerkonzentration variieren kann.

Als Folge der Diffusion fehlen in den dotierten Gebieten die Majoritätsladungsträger, um diese Bereiche elektrisch neutral zu halten. Es kommt zu einer positiven

Raumladung im n-Gebiet und zu einer negativen Raumladung im p-Gebiet (siehe Abbildung A.3c). Aufgrund der Raumladung im Übergangsbereich entsteht ein elektrisches Feld, das einen Strom von Minoritätsladungsträgern auslöst. Dieser Strom wird als Feldstrom bezeichnet und ist dem Diffusionsstrom entgegengerichtet.

Durch die so entstandene Raumladung wird ein elektrisches Feld aufgebaut, das der Diffusion entgegenwirkt. Der Feldstrom erhöht sich so lange, bis die beiden entgegengesetzt gerichteten, elektrischen Ströme sich gegenseitig kompensieren, sodass kein resultierender Strom mehr fließt, obwohl infolge des elektrischen Feldes dort ein Potentialsprung U_D (Diffusionspotential) vorhanden ist (siehe Abbildung B.3d). Diese von freien Ladungsträgern verarmte Zone wird als Verarmungszone oder Sperrschicht bezeichnet.

Durch eine externe Spannung U_B (Biasspannung), die auch Sperrspannung genannt wird, wenn sie die gleiche Richtung wie die Diffusionsspannung hat, kann die Verarmungszone ausgedehnt werden (Näheres siehe Abschnitt B.3.1). Die Breite der Verarmungszone lässt sich nunmehr aus der Poissongleichung

$$\frac{\mathrm{d}^2\mathrm{V}}{\mathrm{d}x^2} = \frac{\varrho(x)}{\epsilon_{Si}\epsilon_0} \tag{B.1}$$

herleiten:

$$x_n = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_{Si}}{e_0 N_D(1 + N_D/N_{A_n})}(U_B + U_{\mathrm{diff}})} \tag{B.2}$$

$$x_p = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_{Si}}{e_0 N_A(1 + N_A/N_{D_p})}(U_B + U_{\mathrm{diff}})} \tag{B.3}$$

mit

V : *Potenzial*,
ρ : *Raumladungsdichte*,
$x_{n/p}$: Dicke der verarmten Zone auf der n-/p-Seite,
ϵ_0 : $8{,}854 \cdot 10^{-12}\,\frac{\mathrm{As}}{\mathrm{Vm}}$ (elektrische Feldkonstante),
ϵ_{Si} : 11,74 (Dielektrizitätszahl für Silizium),
N_D : Donatorkonzentration in der n-dotierten Schicht,
N_{D_p} : Donatorkonzentration in der p-dotierten Schicht,
N_A : Akzeptorkonzentration in der p-dotierten Schicht,
N_{A_n} : Akzeptorkonzentration in der n-dotierten Schicht,
e_0 : $1{,}602 \cdot 10^{-19}$ C (Elementarladung),
U_B : angelegte externe Spannung,
U_{diff} : Diffusionsspannung.

Die Verarmungszone kann nicht größer werden als die Sensordicke d. Die Spannung, die nötig ist, um die Sperrschicht auf diese Größe auszuweiten, wird als „Spannung für vollständige Verarmung“ (Depletionsspannung) U_{depl} bezeichnet.

B.2.2 Asymmetrischer pn-Übergang

Die in diesem Praktikum verwendete Diode besteht aus einem asymmetrischen pn-Übergang, das heißt, dass eine Seite des pn-Überganges um Größenordnungen stärker dotiert ist als die andere Seite. Bei der hier verwendeten Diode existiert ein p^+n-Übergang, was bedeutet, dass die p-Seite viel stärker dotiert ist als die n-Seite, also ist $N_A \gg N_D$. Wird dieses in den Gleichungen B.2 und B.3 berücksichtigt, so ist zu erkennen, dass sich die Verarmungszone hauptsächlich im schwächer dotierten Gebiet ausbreitet. Die Ausbreitung der Verarmungszone im p-Gebiet kann somit vernachlässigt werden und die Tiefe der Verarmungszone errechnet sich zu

$$x_n = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_{Si}}{e_0 N_D}(U_B + U_{\mathrm{diff}})}. \tag{B.4}$$

In Gleichung B.4 muss nun noch die Donatorkonzentration durch die effektive Dotierung

$$N_{\mathrm{eff}} = |N_D - N_{A_n}| \tag{B.5}$$

ersetzt werden, wobei N_D : Donatorkonzentration in der n-dotierten Schicht, und N_{A_n} : Akzeptorkonzentration in der n-dotierten Schicht. Dies ist notwendig, da in realen n-dotierten Halbleitern neben den Donatoren auch immer eine gewisse Zahl von Akzeptoren enthalten ist.

Außerdem kann die Diffusionsspannung U_{diff}, die in der Größenordnung von einem Volt liegt, gegenüber der meist viel höheren externen Betriebsspannung im Sperrfall vernachlässigt werden. Damit errechnet sich die Tiefe der Verarmungzone bei einem p^+n-Übergang mit

$$x_n = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_{Si}}{e_0 N_{\mathrm{eff}}} \cdot U_B}. \tag{B.6}$$

Setzt man dann in Gleichung B.6 anstelle der Sperrspannung U_B die Verarmungsspannung U_{depl} ein, so erhält man die Sensordicke d:

$$d = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_{Si}}{e_0 N_{\mathrm{eff}}} \cdot U_{depl}}. \tag{B.7}$$

B.3 Dioden-Charakteristik

B.3.1 Strom-Charakteristik

Durchlassrichtung

Durch Anlegen einer äußeren Spannung U_B (Biasspannung) an den pn-Übergang wird in das Gleichgewicht zwischen Diffusions- und Feldstrom eingegriffen. Durch Anlegen eines zusätzlichen Potenzials wird ein Term (je nach Vorzeichen des Potenzials) zu dem Diffusionspotenzial addiert oder von ihm subtrahiert.
Durch den veränderten Potenzialsprung am pn-Übergang kann nun ein anderer Teil an Ladungsträgern n die Potenzialbarriere überwinden, nämlich:

$$z \sim \exp(e_0 \cdot (U_B - U_D)/k_B T) \tag{B.8}$$

(mit e_0 : Elementarladung, U_B : Biasspannung, U_D : Diffusionspotenzial, k_B : Bolzmann-Konstante, T : Temperatur in Kelvin).
Ist die Biasspannung dem Diffusionspotenzial entgegengesetzt (das ist der Durchlassfall), so vergrößert sich der Diffusionsstrom I_D exponenziell. Bei gleichen Vorzeichen von Diffusionspotenzial und externem Potenzial (das ist der Sperrfall) geht dieser Strombeitrag mit $U_B < 0$ gegen Null. Betrachtet man nur diesen Strombeitrag, so kann er geschlossen als

$$I_D(U) = I_0 \cdot \exp(e_0 U_B / k_B T) \tag{B.9}$$

wobei $U_B < U_D$ und $I_0 \sim \exp -(e_0 U_D / k_B T)$ dargestellt werden.

Sperrrichtung

Zu dem in Abschnitt B.3.1 behandelten Diffusionsstrom I_D kommt im Sperrfall noch der Volumengenerationsstrom hinzu, welcher bei diesem Versuch den dominierenden Beitrag ausmacht. Dieser Strom entsteht in dem verarmten Diodenvolumen. Als Generationszentren für Ladungsträger wirken Störstellen im Kristall, deren Energieniveaus innerhalb der Bandlücke des Siliziums liegen und die durch thermische Anregung freie Ladungsträger generieren. Aus diesem Grund ist der Volumengenerationsstrom stark temperaturabhängig und proportional zum verarmten Volumen. Es ergibt sich :

$$I_{\mathrm{Vol}} = \frac{e_0 n_i x A}{2\tau}, \tag{B.10}$$

wobei

$$\begin{aligned}
\tau &: \text{effektive Lebensdauer der freien Ladungsträger,}\\
\tau &= 5\ \text{ms}\\
n_i &: \text{intrinsische Ladungsträgerdichte,}\\
n_i &= 5{,}73 \cdot 10^9 \text{cm}^{-3} \quad \text{bei } 293{,}15\ \text{K}\\
x &: \text{Verarmungszonendicke,}\\
A &: \text{Fläche des pn-Übergangs.}
\end{aligned}$$

Unter Berücksichtigung von Gleichung B.6 erhält man

$$I_{\text{Vol}} = \frac{n_i A}{\tau} \sqrt{\frac{e_0 \epsilon_0 \epsilon_{\text{Si}}}{2 N_{\text{eff}}} \cdot U_B}. \tag{B.11}$$

Zu sehen ist, dass bei konstanter Temperatur und bei Sperrspannungen U_B, die kleiner als die Verarmungsspannung U_{depl} sind, der Volumenstrom proportional zu $\sqrt{U_B}$ ist. Wird die Verarmungsspannung erreicht, so bleibt dieser Stromanteil im Idealfall konstant, da eine Ausweitung der Verarmungszone nicht mehr erfolgt. Ein leichter Anstieg des Stromes ist bei realen Sensoren zu beobachten. Ein Grund dafür ist die Vergrößerung des effektiven Volumens durch eine laterale Ausweitung der Sperrzone.

B.3.2 Kapazitäts-Charakteristik

Im Abschnitt B.2.1 wurde die „Spannung für vollständige Verarmung" U_{depl} eingeführt. Die Depletionsspannung ist von Interesse, da zum Beispiel ab diesem Spannungswert der gesamte Sensor sensitiv für den Nachweis von ionisierenden Teilchen ist.

Aus der Gleichung B.7 kann die Verarmungsspannung errechnet werden, die sich zu

$$U_{\text{depl}} = \frac{e_0 N_{\text{eff}}}{2 \epsilon_0 \epsilon_{Si}} \cdot d^2 \tag{B.12}$$

ergibt.

Um die Verarmungsspannung zu bestimmen, wird eine Kennlinie der dynamischen Kapazität aufgenommen. Die dynamische Kapazität ist eine Funktion der externen Spannung U_B,

$$C := \frac{\Delta Q}{\Delta U_B}. \tag{B.13}$$

Zur Messung muss die Sperrspannung mit einer kleinen, sinusförmig oszillierenden Spannung überlagert werden (die Frequenz beträgt bei diesem Versuch 10 kHz).

Durch die Wechselspannung kommt es zu einer Variation der Verarmungstiefe Δx. Dadurch wird eine Ladung von

$$\Delta Q = e_0 \cdot |N_{\text{eff}}| \cdot A \cdot \Delta x \tag{B.14}$$

bewegt, wobei A die Fläche des pn-Übergangs bezeichnet. Somit folgt mit den Gleichungen B.6 und B.2

$$C_{\text{Sperr}} = A\sqrt{\frac{e_0 \epsilon_0 \epsilon_{Si} N_{\text{eff}}}{2U_B}} \quad = \quad A\frac{\epsilon_0 \epsilon_{Si}}{x(U_B)}, \tag{B.15}$$

sowie mit Gleichung B.12

$$C_{\text{Sperr,depl}} = A\sqrt{\frac{e_0 \epsilon_0 \epsilon_{\text{Si}} N_{\text{eff}}}{2U_{\text{depl}}}} \quad = \quad A\frac{\epsilon_0 \epsilon_{Si}}{d}. \tag{B.16}$$

In Gleichung B.15 ist zu sehen, dass die Sperrschichtkapazität C_{Sperr} umgekehrt proportional zur Wurzel der Biasspannung ist. In der Auftragungsweise C_{Sperr} gegen $1/\sqrt{U_B}$ ergibt sich also eine Gerade mit positiver Steigung bis die Biasspannung gleich der Verarmungsspannung ist, vergleiche dazu Abbildung B.4 Gerade f_2. Ab dieser Spannung ist die Sperrschichtkapazität konstant (siehe Gleichung B.16), sodass an diesem Knick die Verarmungsspannung abgelesen werden kann.

In Abbildung B.4 ist die Kapazitäts-Charakteristik eines pn-Übergangs in der Auftragungsweise Kapazität gegen $1/\sqrt{U_B}$ dargestellt. Aus diesem Diagramm kann die Verarmungsspannung berechnet werden, in dem der Schnittpunkt der beiden Geraden f_1 und f_2 bestimmt wird.

Die gemessene Kapazität setzt sich additiv aus der Sperrschichtkapazität und den Streukapazitäten zusammen. Diese stammen von dem Messaufbau. Die Streukapazität kann auch aus dem Diagramm 3.1 bestimmt werden. Sie ist die Kapazität, bei der die Gerade f_2 die y-Achse schneidet.

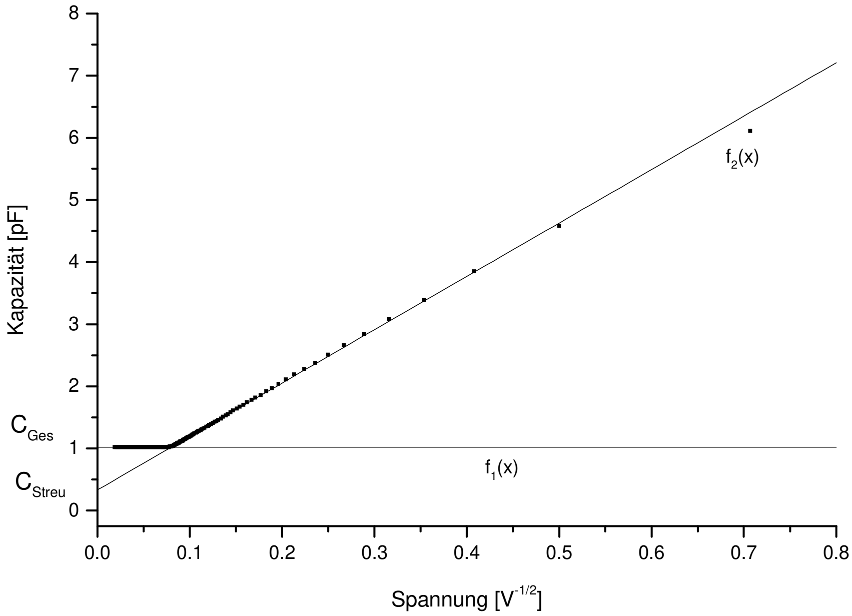


Abbildung B.4: Kapazitäts-Spannungs-Kurve, Auftragungsweise $C \sim 1/\sqrt{U}$

B.4 Aufgabenstellung und Versuchsdurchführung

B.4.1 Messvorschrift

1. Messen Sie die Strom-Spannungs-Kennlinie der Diode in Durchlassrichtung.
2. Messen Sie die Strom-Spannungs-Kennlinie der Diode in Sperrrichtung.
3. Messen Sie die Kapazitäts-Spannungs-Kennlinie der Diode in Sperrrichtung.

B.4.2 Auswertung

1. Zu B.4.1.1 : Tragen Sie die Datenpunkte in ein halblogarithmisches Diagramm ein, um den exponentiellen Zusammenhang zwischen Strom und Spannung in Durchlassrichtung darzustellen.
2. Zu B.4.1.2 : Bestimmen Sie die Verarmungsspannung der Diode aus den Messwerten, indem Sie die Stromwerte gegen $\sqrt{U_B}$ auftragen und den Abknickpunkt ablesen.
3. Zu B.4.1.3 : Erstellen Sie ein C gegen $1/\sqrt{U_B}$ Diagramm. Bestimmen Sie aus diesem Diagramm die Verarmungsspannung der Diode und vergleichen Sie diese mit dem Ergebnis aus Aufgabenteil 2.
   Bestimmen Sie die effektive Dotierung der Diode.
   Berechnen Sie die Dicke der Diode.
   (Die Fläche der Diode beträgt 10 mm^2)

B.4.3 Durchführung

ALLE ANGABEN DER SPANNUNG IN VOLT SIND NUR BETRÄGE DER SPANNUNG. DIE DEN VERSUCH DURCHFÜHRENDE PERSON MUSS BEI DEN JEWEILIGEN AUFGABENSTELLUNGEN DAS RICHTIGE VORZEICHEN NOCH BESTIMMEN

Zu B.4.1.1: Um die Strom-Spannungs-Kennlinie der Diode in Durchlassrichtung aufzunehmen soll der Messaufbau, der in Abbildung B.5 dargestellt ist, verwendet werden. Die Kurve soll bis zu einer Spannung von 0.3 Volt aufgenommen werden.
Wenn die Spannungsquelle/Picoampermeter eingeschaltet wird, muss vor Beginn der Messung der Knopf „CHECK ZERO“ gedrückt werde (Lampe leuchtet dann nicht) sowie der Knopf „OPERATE“gedrückt werden (Lampe leuchtet dann). Danach kann die Spannung an dem Rad links eingestellt werden.

Zu B.4.1.2: Zur Messung der Strom-Spannungs-Kennlinie der Diode in Sperrrichtung soll der Messaufbau, der in Abbildung B.5 abgebildet ist, verwendet werden.

Diese Kurve soll bis zu einer Spannung von 250 Volt oder bis zum Messabbruch aufgenommen werden.

Zu B.4.1.3: Zur Messung der Kapazitäts-Spannungs-Kennlinie der Diode in Sperrrichtung kann der Messaufbau aus Abbildung B.6 verwendet werden. Die Messkurve soll entweder bis 250 Volt aufgenommen werde, oder bis zu der Spannung bei der die Messung der Dioden-Stromkennlinie in Durchlassrichtung abgebrochen wurde.
Nach einschalten des LCR-Meter muss noch der Knopf „DC-Bias“ gedrückt werden (Lampe leuchtet dann). Danach muss der Trigger auf „Manuel“ gestellt werden. Für die einzelnen Messschritte muss dann die Spannung an der Spannungsquelle eingestellt werden und dann der Trigger gedrückt werden um einen Messwert zu erhalten.

B.5 Versuchsaufbau

B.5.1 Strommessung

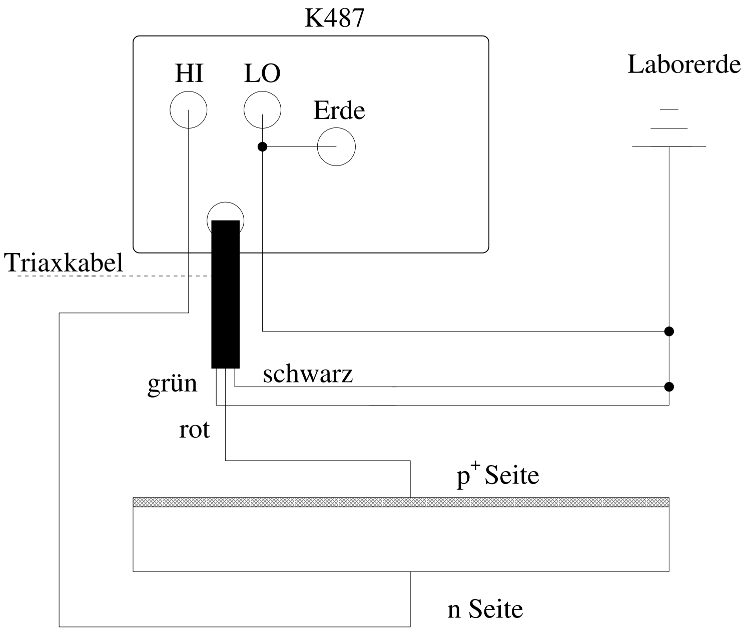


Abbildung B.5: Messaufbau für die Strom-Spannungs-Messungen

In Abbildung B.5 ist der Versuchsaufbau für die Strom-Spannungs-Messung abgebildet. Zu sehen ist, dass bei dieser Messung nur ein Gerät verwendet wird, das Keithley 487 (K487). Dieses Gerät ist Spannungsquelle und Strommessgerät in einem.
Beim Anschliessen der Spannung an die Diode ist sorgfältig auf die Verkabelung zu achten, da schon bei einer Spannung von nur 1 Volt die Diode zerstört werden kann, wenn sie in Durchlassrichtung betrieben wird. Deshalb ist immer auf das Vorzeichen der Spannung zu achten.

Die Strommessung erfolgt über das Triax-Kabel. Wie der Name schon andeutet, besteht dieses Kabel aus drei koaxialen Adern. Zwei dieser Adern dienen dazu den Stromkreis zu schließen. Die dritte Ader ist als Abschirmung um die beiden anderen herumgelegt. Bei herkömmlichen zweiadrigen Koaxialkabeln wird die Abschirmung auch als Rückleiter verwendet. Da aber bei diesen Messungen Ströme im Bereich von einigen Nanoampere gemessen werden, ist dieses Kabel erforderlich, um mögliche Störungen abzuschirmen.

Bei der Messung ist auch noch darauf zu achten, dass alle Erdungen auf dem gleichen Potenzial liegen, da schon kleine Schwankungen die Messung unbrauchbar machen.

B.5.2 Kapazitätsmessung

Der Messaufbau, der für die Kapazitäts-Spannungs-Messung verwendet werden soll, ist in Abbildung B.6 dargestellt.

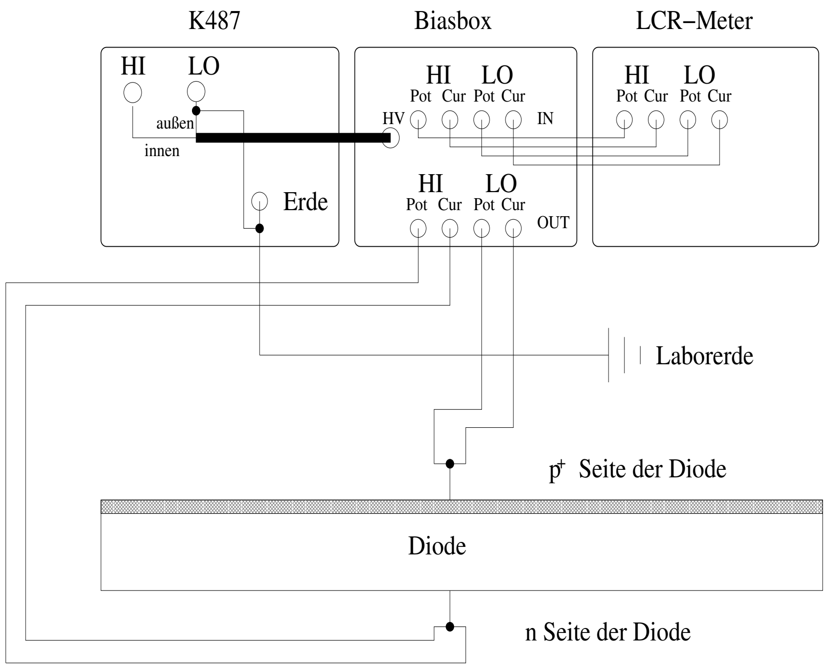


Abbildung B.6: Messaufbau für die Kapazitäts-Spannungs-Messung

Bei dieser Messung wird dieselbe Spannungsquelle verwendet wie bei der Strommessung; zusätzlich braucht man noch ein LCR-Meter. Dieses liefert die kleine Oszillatiosspannung und mißt die dynamische Kapazität der Diode bei verschiedenen Spannungen.
In der Biasbox werden die Oszillationsspannung aus dem LCR-Meter und die Spannung aus der Spannungsquelle überlagert.

Danach werden dann die Anschlüsse, wie in der Abbildung B.6 eingezeichnet, miteinander verbunden. Dabei ist wieder darauf zu achten, auf welcher Seite der HI-Ausgang der Spannungsquelle liegt, damit bei der Messung auch das richtige Vorzeichen der Spannung gewählt wird, um die Diode nicht zu zerstören.

Anhang C

Fragebogen zu den Experimenten

Fragebogen nach dem Versuch
Kennlinien von Siliziumdioden

Geb.Datum: ________ Geschlecht: ( ) Datum: ________________

Zweiter Buchstabe des Vornamens: ( )

Ergebnis d. letzten Physik Klausur: ( ) Physik i. d. Oberst.: ( ) nein ( ) ja

( ) Versuch ohne Computer ( ) Computergestützter Versuch

1. An der p-Seite eines pn-Überganges wird größeres Potenzial als an der n-Seite angelegt. Wird die Diode auf diese Weise in
   ( ) Durchlassrichtung
   ( ) Sperrrichtung
   betrieben?

2. Wächst bei einem asymmetrischen p^+n-Übergang die Verarmungszone vorwiegend im :
   ( ) n-dotierten Bereich
   ( ) p-dotierten Bereich?

3. Ohne externe Spannung
   ( ) existiert
   ( ) existiert nicht
   eine Sperrschicht am pn-Übergang.

4. Der Strom steigt als Funktion der Spannung, dem Betrag nach, im Durchlassfall
   ( ) stärker
   ( ) weniger stark
   ( ) genauso stark
   als im Sperrfall.

5. Die Diode soll in Sperrrichtung betrieben werden, dann muss das Potenzial an der n-Seite
   ( ) höher
   ( ) niedriger
   als an der p-Seite sein.

6. Wie verhält sich der Strom nach Erreichen der Verarmungsspannung?
   ( ) Er wird größer.
   ( ) Er wird kleiner.
   ( ) Er bleibt gleich.
   Begründung? ____

   ____

7. Die Kapazität eines pn-Überganges wird bei einer Erhöhung der Sperrspannung, solange diese kleiner als die Verarmungsspannung ist,
   ( ) größer
   ( ) kleiner
   ( ) bleibt gleich.

8. Die Kapazität eines pn-Überganges wird bei einer Erhöhung der Sperrspannung, die größer als die Verarmungsspannung ist,
   ( ) größer
   ( ) kleiner
   ( ) bleibt gleich.

9. Wie lautet der Zusammenhang zwischen Durchlassstrom I_D und der Durchlassspannung U_D?
   ( ) I_D hängt nicht von U_D ab.
   ( ) $I_D \sim \sqrt{U_D}$
   ( ) $I_D \sim U_D^2$
   ( ) $I_D \sim \exp(U_D)$

10. Wie lautet der Zusammenhang zwischen Sperrstrom I_S und der Sperrspannung U_S, solange diese kleiner als die Verarmungsspannung ist?
    ( ) $I_S \sim U_S$
    ( ) $I_S \sim \sqrt{U_S}$
    ( ) I_S hängt nicht von U_S ab.
    ( ) $I_S \sim \exp(U_S)$

11. Wie lautet der Zusammenhang zwischen der Verarmungstiefe d(S) und der Sperrspannung U_S, solange diese kleiner als die Verarmungsspannung ist?
    ( ) d_S hängt nicht von U_S ab.
    ( ) $d_S \sim \sqrt{U_S}$
    ( ) $d_S \sim U_S^2$
    ( ) $d_S \sim \exp(U_S)$

12. Wie lautet der Zusammenhang zwischen Sperrkapazität C_S und der Sperrspannung U_S, solange diese kleiner als die Verarmungsspannung ist?
    ( ) $C_S \sim U_S$
    ( ) C_S hängt nicht von U_S ab.
    ( ) $C_S \sim 1/\sqrt{U_S}$
    ( ) $C_S \sim U_S^{-2}$
    ( ) $C_S \sim \exp(-U_S)$

13. Wie lautet der Zusammenhang zwischen der effektiven Dotierung $N_{eff(S)}$ und der Sperrspannung U_S, solange diese kleiner als die Verarmungsspannung ist?
( ) $N_{eff(S)} \sim U_S$
( ) $N_{eff(S)}$ hängt nicht von U_S ab.
( ) $N_{eff(S)} \sim 1/\sqrt{U_S}$
( ) $N_{eff(S)} \sim U_S^{-2}$
( ) $N_{eff(S)} \sim \exp(-U_S)$

14. Von welchen Parametern ist die Sperrkapazität C_S abhängig?
( ) Spannung ( ) Widerstand ( ) Luftfeuchtigkeit ( ) Temperatur
( ) Fläche der Diode ( ) Dicke der Diode
( ) Strom ( ) Geschwindigkeit des Stromes

15. Von welchen Parametern ist der Volumenstrom I_S abhängig?
( ) Spannung ( ) Widerstand ( ) Luftfeuchtigkeit ( ) Temperatur
( ) Fläche der Diode ( ) Dicke der Diode
( ) Strom ( ) Geschwindigkeit des Stromes

16. Von welchen Parametern ist der Durchlassstrom I_D abhängig?
( ) Spannung ( ) Widerstand ( ) Luftfeuchtigkeit ( ) Temperatur
( ) Fläche der Diode ( ) Dicke der Diode ( )
( ) Strom ( ) Geschwindigkeit des Stromes

17. Welche Messgeräte werden für die Strom-Spannungsmessung benötigt?

____

18. Welche Messgeräte werden für die Kapazitäts-Spannungsmessung benötigt?

____

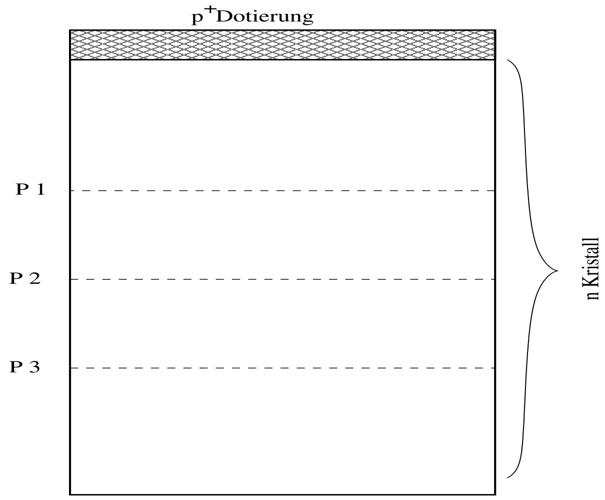
19. Wird bei der Kapazitätsmessung
( ) die dynamische
( ) die statische
( ) beide Kapazitäten
gemessen?

20. Warum wird für die Strommessung ein Triax-Kabel verwendet?

____

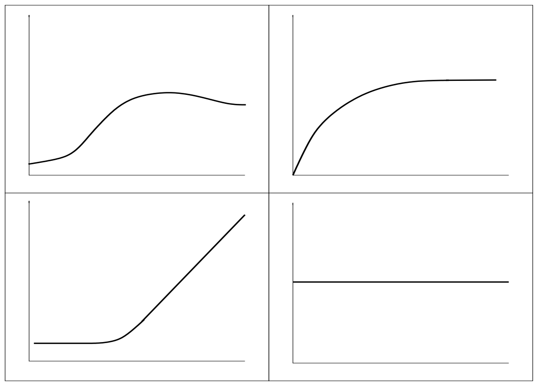
____

21. Eine Diode sei bei 100 Volt Sperrspannung vollständig verarmt. Bei 50 Volt Sperrspannung ist die Diode dann bis zu
( ) Punkt 1
( ) Punkt 2
( ) Punkt 3
verarmt.
Zeichnen Sie durch einen Pfeil die Richtung ein, in die die Verarmungszone bei Vergrößerung der Sperrspannung wächst.

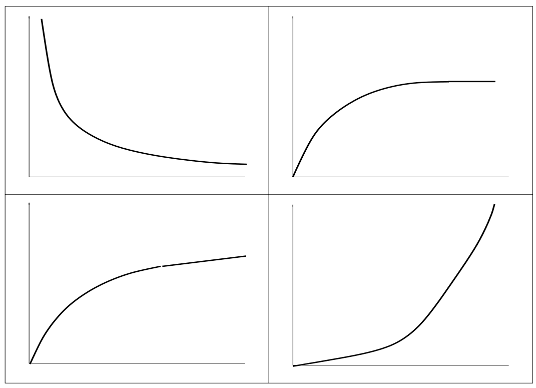


Vergessen Sie nicht die Achsen zu beschriften!

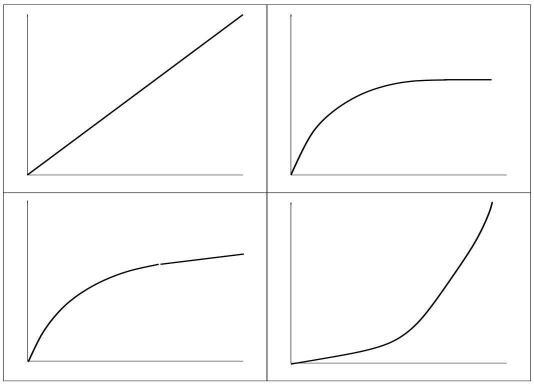
22. Welches der nebenstehenden Diagramme zeigt die Abhängigkeit der effektiven Dotierung von der Sperrspannung? Zeichnen Sie in dieses Diagramm ein, ab wann die Diode vollständig verarmt ist! Ist das möglich?



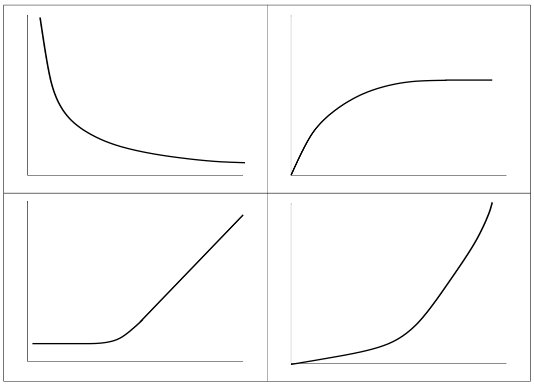
23. Welches der nebenstehenden Diagramme zeigt die Strom-Spannungs-Kennlinie einer Diode, wenn die Diode in Sperrrichtung betrieben wird? Zeichnen Sie in die Kurve ein, ab wann die Diode vollständig verarmt ist! Ist das möglich?



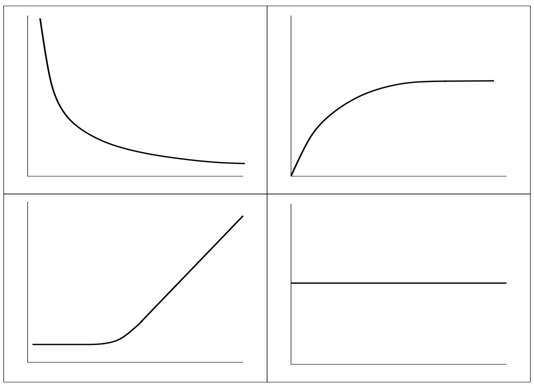
24. Welches der nebenstehenden Diagramme zeigt die Strom-Spannungs-Kennlinie einer Diode, wenn die Diode in Durchlassrichtung betrieben wird?
    Zeichnen Sie in die Kurve ein, ab wann die Diode vollständig verarmt ist! Ist das möglich?



25. Welches der nebenstehenden Diagramme zeigt die Kapazitäts-Spannungs-Kennlinie einer Diode in Sperrrichtung? Tragen Sie in diese Kurve die Verarmungsspannung ein! Ist das möglich?



26. Welches der nebenstehenden Diagramme zeigt die Abhängigkeit der Verarmungstiefe von der Sperrspannung bei einer Diode?
    Tragen Sie in diese Kurve die Verarmungsspannung ein! Ist das möglich?



Vergessen Sie nicht die Achsen zu beschriften!

27. Skizzieren Sie den Versuchsaufbau für die Strom-Messung an einer Diode. Tragen Sie in diese Zeichnung die Spannungen so ein, dass die Diode in Durchlassrichtung betrieben wird.

- Wie gut sind Ihre Computerkenntnisse?
  ( ) sehr gut ( ) gut ( ) mittelmäßig ( ) schlecht ( ) sehr schlecht
- Wieviel Spaß hat Ihnen der Versuch gemacht?
  ( ) sehr viel ( ) viel ( ) mittelmäßig ( ) wenig ( ) sehr wenig
- Wieviel Spaß hat Ihnen der Versuch im Vergleich zu den anderen Praktikumsversuchen gemacht?
  ( ) sehr viel ( ) viel ( ) mittelmäßig ( ) wenig ( ) sehr wenig
- Würden Sie gerne noch die andere Art der Versuchsdurchführung ausprobieren?
  ( ) ja ( ) nein
- Für wie sinnvoll halten Sie rechnergestützte Versuche?
  ( ) sehr sinnvoll ( ) sinnvoll ( ) mittelmäßig ( ) nicht sinnvoll ( ) sinnlos
- Wie sehen Sie das Ausprobieren und „Experimentieren“ beim vorliegenden Versuch?
  ( ) sehr gut ( ) gut ( ) mittelmäßig ( ) schlecht ( ) sehr schlecht

Anhang D

Mathematische Grundlagen zur Auswertung der Fragebögen

Im Folgenden werden die mathematischen Grundlagen der Analyse der Fragebögen vorgestellt. Die Herleitung der Analyseverfahren geschieht nicht in einem mathematisch strengen Sinne eines Lehrbuches, sondern sie soll zu einem besseren Verständnis der Analysemethoden dienen. Für eine vertiefende Beschäftigung mit den Analyseverfahren empfehlen sich, je nach Wissensstand, die Werke von A. Kolmogoroff (z.B. [Kol73]), sowie die Bücher von J. Stevens [Ste86] und J. Bortz [Bor99].

Im darauffolgenden Abschnitt wird der Cronbach α -Koeffizient zur Bestimmung der Reliabilität eingeführt und diskutiert. Im darauffolgend wird die t-Verteilung hergeleitet. Im Anschluss daran wird erläutert, wie diese Verteilung genutzt werden kann, zwei Mittelwerte (von abhängige und unabhängigen Stichproben) miteinander zu vergleichen. Der letzte Abschnitt beschäftigt sich mit der Varianzanalyse. Diese wird im Hinblick auf die mehrfaktorielle Varianzanalyse mit Messwertwiederholung eingeführt. Mit dieser kann die zeitliche Abfolge von Mittelwerten untersucht werden.

D.1 Cronbach α-Koeffizienten

Im Folgenden wird der Cronbach α-Koeffiziente diskutiert. Die Berechnung des Cronbach α-Koeffizienten ist ein Standardverfahren um die Reliabilität eines Fragebogens zu ermitteln. Die Reliabilität des in dieser Arbeit verwendeten Bogens wird in Abschnitt (7.1) betrachtet.

D.1.1 Berechnung des Cronbach α-Koeffizienten

Unter der Annahme, dass zwei Tests dieselbe Variable untersuchen und die gleiche Messgenauigkeit haben, entspricht die Reliabilität beider Tests der Korrelation ihrer

Messwerte.

$$\mathrm{Rel(X)} = \mathrm{Rel(Y)} = \mathrm{Korr(X, Y)}. \tag{D.1}$$

Mit diesem Ansatz können verschiedene Arten der Reliabilität bestimmt werden. Im Folgenden soll nur die Paralleltest-Reliabilität betrachtet werden, da diese bei der Berechnung des Cronbach α-Koeffizienten benötigt wird.

Die Güte der Reliabilität (siehe Abschnitt 5.2.1) eines Tests kann mit Hilfe des Cronbach α-Koeffizienten [Cro51] [Cro63] bestimmt werden. Diese allgemeingültige Faktoranalyse wurde 1965 von Kaiser und Caffrey [Kai65] veröffentlicht. Dabei wird der α-Koeffizient aus den Summenscores (Summe der Einzelantworten) gebildet. Jede Frage wird somit als einzelner Test für das zu untersuchende Merkmal gesehen. Somit wird hierbei die Paralleltest-Reliabilität bestimmt, mit so vielen Paralleltests, wie es Fragen gibt.

Der α-Koeffizient kann wie folgt berechnet werden (vergleiche [Lor58])

$$\alpha = \frac{N}{N-1} \cdot \left(1 - \frac{\sum_i s_i^2}{s_{\mathrm{tot}}^2}\right). \tag{D.2}$$

Hierbei sind

$$\begin{aligned} N &: \text{Anzahl der Fragen}, (\mathrm{N} > 1) \\ s_i^2 &: \text{Varianz der Frage } i \text{ und} \\ s_{\mathrm{tot}}^2 &: \text{Varianz der Linearkombination (Summe).} \\ s_{\mathrm{tot}} &: \sum s_i, \ (s_i \geq 0) \end{aligned} \tag{D.3}$$

D.1.2 Diskussion des Cronbach α-Koeffizienten

Betrachtet man die Formel zur Berechnung des α-Koeffizienten (Gleichung (D.2)), so ist festzustellen, dass je kleiner die Summe der Einzelvarianzen, desto größer wird der α-Koeffizient und damit die Reliabilität. Der α-Koeffizienten kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen.
Wenn die Summe über die Varianz der einzelnen Fragen Null ist, dann bedeutet dies, dass alle Fragen entweder immer richtig oder falsch beantwortet sind. Damit wäre die Gesamtsumme immer gleich, weil alle Fragen gleich beantwortet sind und somit ist die Varianz der Linearkombinationen Null.
Wird nur eine Frage unterschiedlich beantwortet, so ist die Summe über die anderen Varianzen Null, außer bei dieser Frage. Die Varianz der Linearkombinationen ist im Vergleich dann relativ klein, was zur Folge hat, dass der hintere Bruch in Gleichung (D.2) relativ groß wird und somit der α-Koeffizient nahe Null ist.
Angenommen alle Fragen besitzen die gleiche Varianz, so ist die Summe über das

Quadrat der einzelnen Varianzen kleiner als das Quadrat über die Summe der einzelnen Varianzen. Somit wird der Bruch in der Klamma von Gleichung (D.2) minimal und der α-Koeffizient wird maximal.

D.2 t-Test (Student-Test) – Vergleich von Mittelwerten

Bevor auf die Nutzung des t-Tests für den Vergleich von Mittelwerten eingegangen wird, wird im folgenden die Herleitung der t-Verteilung diskutiert. In den darauffolgend wird der Mittelwertvergleich mit Hilfe des t-Tests erläutert, erst für abhängige und danach für unabhängige Stichproben.

Der T-Test wird im Kapitell (7) dazu benutzt zwei Mittelwerte miteinander zu vergleichen. Dabei wird untersucht ob die beiden Mittelwerte aus der gleichen Grundgesamtheit entstehen oder oder ob jeder Mittelwerte eine eigene Grundgesamtheit besitzt.

D.2.1 Mathematische Grundlagen der t-Verteilung

Herleitung der t-Verteilung

Sei $\bar{x}$ das arithmetische Mittel einer Stichprobe vom Umfang n. Diese sei normalverteilt. Somit ist die Varianz von $\bar{x}$ gegeben als

$$\sigma^2(\bar{x}) = \frac{\sigma^2(x)}{n}. \tag{D.4}$$

Ist n hinreichend groß, so folgt $\bar{x}$ wegen des Zentralen Grenzwertsatzes[1] auch der Normalverteilung mit dem Mittelwert μ, sowie der Streuung $\sigma^2(\bar{x})$. $\bar{x}$ kann durch Transformation in eine neue Zusfallsvariable y überführt werden, die den Erwartungswert 0 und die Breite 1 besitzt. Diese neue Variable kann dadurch mit der standardsierten Gauß-Verteilung verglichen werden. y ergibt sich zu

$$y = (\bar{x} - \mu)/\sigma(\bar{x}). \tag{D.5}$$

Aus Gleichung (D.4) ist $\sigma^2(x)$ nicht bekannt. Es gibt lediglich eine Schätzung dafür. Diese ist gegeben durch

$$s_x^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{j=1}^{n}(x_j - \mu)^2. \tag{D.6}$$

[1] X_i unabhängige identisch verteilte Zufallsvariablen => $X = \lim_{x\to\infty}\sum_{i=1}^{n} X_i$ normalverteilt. (siehe z.B. [Zei96])

Wird Gleichung D.6 in die Gleichung (D.4) eingesetzt, so erhält man

$$s_{\bar{x}}^2 = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{j=1}^{n} (x_j - \mu)^2. \tag{D.7}$$

Die Frage ist nun, inwieweit Gleichung D.5 von der standardisierten Gauß-Verteilung abweicht, wenn $\sigma(\bar{x})$ durch $s_{\bar{x}}$ ersetzt wird. Ohne Beschränkung kann $\mu = 0$ gesetzt werden, da dieses durch eine Koordinatentransformation erreicht werden kann. Somit kann die Verteilung als

$$T = \frac{\bar{x}}{s_{\bar{x}}} = \frac{\bar{x}\sqrt{n}}{s_x} \tag{D.8}$$

betrachtet werden. Wird nun s_x^2 mit $(n-1)$ multipliziert $((n-1) \cdot s_x^2 = DF \cdot s_x^2)$, so folgt dies einer χ^2-Verteilung mit $DF = n - 1$ Freiheitsgraden. Dadurch kann die Gleichung (D.8) geschrieben werden als

$$T = \frac{\bar{x}\sqrt{n \cdot DF}}{\chi} \tag{D.9}$$

Daraus ergibt sich die Verteilungsfunktion von t durch die Wahrscheinlichkeit

$$F_T(t) = P(T < t) = P\left(\frac{\bar{x}\sqrt{n \cdot DF}}{\chi} < t\right), \tag{D.10}$$

sowie nach Rechnung die Gleichung

$$F(t) = \frac{\Gamma(\frac{1}{2}(DF+1))}{\Gamma(\frac{1}{2}DF)\sqrt{\pi \cdot DF}} \int_{-\infty}^{t} \left(1 + \frac{t^2}{DF}\right)^{-\frac{1}{2}(DF+1)} dt. \tag{D.11}$$

Als Wahrscheinlichkeitsdichte ergibt sich dann

$$f(t) = \frac{\Gamma(\frac{1}{2}(DF+1))}{\Gamma(\frac{1}{2}DF)\sqrt{\pi \cdot DF}} \left(1 + \frac{t^2}{DF}\right)^{-\frac{1}{2}(DF+1)}. \tag{D.12}$$

Die Wahrscheinlichkeitsdichte $f(t)$ ist in Abbildung D.2.1 für verschiedene Auswahl der Freiheitsgrade DF abgebildet. Zu erkennen ist, dass die t-Verteilung eine glockenförmige Verteilung mit Erwartungswert $\mu = 0$ ist. Die Streuung einer t-Verteilung beträgt

$$\sigma = \sqrt{\frac{DF}{DF-2}}. \tag{D.13}$$

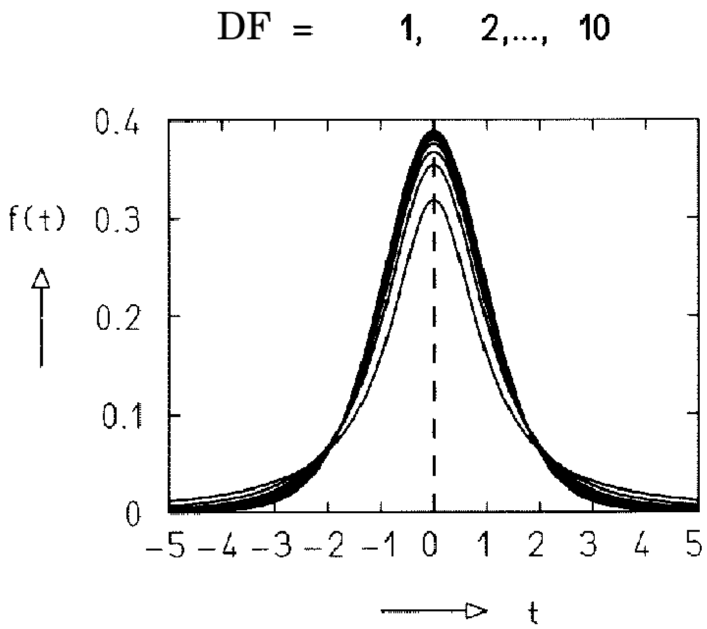


Abbildung D.1: t-Verteilung für verschiedene Freiheitsgrade

Somit ist die t-Verteilung schmalgipfliger als die Standardnormalverteilung, in die diese für $DF \to \infty$ übergeht.

Der t-Test arbeitet folgendermassen: Aus einer Stichprobe vom Umfang n wird der Mittelwert $\bar{x}$ und die empirische Varianz $s_{\bar{x}}^2$ ermittelt. Desweiteren besteht eine Hypothese H_0 für den Erwartungswert einer normalverteilten Grundgesamtheit. Die Wahrscheinlichkeit, dass dieser innerhalb eines 2 t breiten Streifens um den Erwartungswert liegt, ist

$$P(|t| < T) = 2F(|t|) - 1 \tag{D.14}$$

mit

$$|t| = \frac{|\bar{x} - H_0|\sqrt{n}}{s_{\bar{x}}}. \tag{D.15}$$

Nach einer kurzen Rechnung erhält man dann die Bedingung, dass

$$|t| > t_{1-\frac{1}{2}\alpha} \tag{D.16}$$

sein muss, wobei $t_{1-\frac{1}{2}\alpha}$ eine tabellierte Größe (siehe z.B. [Bra96]) ist, die von den Freiheitsgraden DF und dem Signifikanzniveau α abhängt. (Im Folgenden wird $t = t_{1-\frac{1}{2}\alpha}$ gesetzt.)

Bestimmung der Freiheitsgrade

Die Varianz kann nach folgender Formel berechnet werden

$$\sigma^2(x) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{1=i}^{n} (x_i - \bar{x})^2, \tag{D.17}$$

wobei n die Größe der Stichprobe ist. Betrachtet man nicht die Summe der Abweichungsquadrate, sondern nur die Summe der Abweichungen vom Mittelwert (Gleichung (D.18)), so ist diese Summe Null:

$$\sum_{1=i}^{n} (x_i - \bar{x}) = 0. \tag{D.18}$$

Daraus folgt, dass nur $(n-1)$ Abweichungen frei variiert werden können. Das gleiche gilt auch für die Abweichungsquadrate. Also ist bei der Berechnung der Varianz eine Differenz festgelegt, sodass die Varianz nur noch $(n-1)$ Freiheitsgrade besitzt. Somit ist die Anzahl der Freiheitsgrade eines t-Wertes auch $(n-1)$, wenn n die Anzahl der Stichproben ist.

D.2.2 t-Test für unabhängige Stichproben

Der t-Test kann weiter verallgemeinert werden, um die Mittelwerte zweier verschiedener Stichproben miteinander zu vergleichen. Dabei können die Stichproben voneinander abhängig oder unabhängig sein. Im Folgenden soll der unabhängige Fall betrachtet werden. Der abhängige Fall wird in Abschnitt (D.2.3) diskutiert.

Bei dem t-Test für unabhängige Stichproben geht man von zwei unabhängigen Grundgesamtheiten aus, daraus werden Stichproben mit dem Umfang n_1 und n_2 gezogen. Überprüft werden soll die Nullhypothese H_0, die aussagt, dass die beiden Grundgesamtheiten gleich sind. Daraus folgt dann für die Mittelwerte μ_1 und μ_2:

$$H_0: \quad \mu_1 - \mu_2 = 0. \tag{D.19}$$

Geht man davon aus, dass die Mittelwerte voneinander unabhängig sind, so kann man sie durch zwei unabhängige Zufallsvariablen $\bar{x_1}$ und $\bar{x_2}$ beschreiben. Die Varianz der Differenz zweier Zufallszahlen kann wie folgt berechnet werden:

$$\sigma_{\bar{x_1}-\bar{x_2}} = \sqrt{\sigma^2_{\bar{x_1}} + \sigma^2_{\bar{x_2}}}, \tag{D.20}$$

wobei $\sigma^2_{\bar{x_i}} = \sigma_i / n_i$ mit $i = 1, 2$ wie in Gleichung D.4 bestimmt werden kann.

Bei Annahme der Hypothese kann desweiteren angenommen werden, dass

$$\sigma^2_{\bar{x_1}} = \sigma^2_{\bar{x_2}} = \sigma^2 \tag{D.21}$$

ist, weil dann meist die gleiche Grundgesamtheit für beide Stichproben zugrunde liegt. Somit ergibt sich aus Gleichung D.20

$$\sigma_{\bar{x_1}-\bar{x_2}} = \sqrt{\sigma^2 \cdot \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right)}. \tag{D.22}$$

Häufig ist die Populationsinvarianz σ^2 nicht bekannt, sie kann aber mit Hilfe der Datensätze wie folgt geschätzt werden:

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_1}(x_{i1} - \bar{x}_1)^2 + \sum_{i=1}^{n_2}(x_{i2} - \bar{x}_2)^2}{(n_1 - 1) + (n_2 - 1)}. \tag{D.23}$$

Wird diese Schätzung und die Annahme der Gleichung (D.21) berücksichtigt, so ergibt sich nach kurzer Rechnung für die Varianz die Gleichung

$$\hat{\sigma}_{\bar{x_1}-\bar{x_2}} = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)\hat{\sigma}_1^2 + (n_2 - 1)\hat{\sigma}_2^2}{(n_1 - 1) + (n_2 - 1)}} \cdot \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}. \tag{D.24}$$

Da für hinreichend große n_i die Zufallsvariabeln $\bar{x_i}$ $(i = 1, 2)$ normalverteilt sind, geht auch ihre Differenz in eine Normalverteilung über. Nun kann man zeigen, dass der Quotient

$$\frac{(\bar{x_1} - \bar{x_2}) - (\mu_1 - \mu_2)}{\hat{\sigma}_{\bar{x_1}-\bar{x_2}}} \tag{D.25}$$

einer t-Verteilung mit n_1+n_2-2 Freiheitsgraden folgt. Unter der Annahme H_0 (siehe Gleichung (D.19)) kann Gleichung (D.25) also als

$$t = \frac{\bar{x_1} - \bar{x_2}}{\hat{\sigma}_{\bar{x_1}-\bar{x_2}}} \tag{D.26}$$

geschrieben werden. Dabei kann nun der Bruch ausgerechnet werden. Der ausgerechnete Wert wird unter Berücksichtigung der Freiheitsgrade mit Tabellenwerten verglichen und so das Signifikanzniveau α bestimmt.

D.2.3 t-Test für abhängige Stichproben

Diese Testart benötigt man unter anderem dann, wenn mittels einer Stichprobe zwei Messungen durchführt werden, zum Beispiel vor $(\bar{x_1})$ und nach $(\bar{x_2})$ der Durchführung einer Lerneinheit. Bei dieser Art der Auswertung wird berücksichtigt, dass sich die Varianz der beiden Messreihen (vor der Lerneinheit und nach der Lerneinheit) gegenseitig beeinflussen können.

Das arithmetische Mittel der Differenz der Messwertpaare wird dann wie folgt gebildet

$$\bar{x_d} = \frac{\sum_{i=1}^{n} d_i}{n}, \tag{D.27}$$

wobei $d_i = x_{i1} - x_{i2}$ ist und n die Anzahl der Probanden bezeichnet.

Somit ergibt sich für die Streuung von $\bar{x}$ der Ausdruck

$$\hat{\sigma}_{\bar{x}_d} = \frac{\hat{\sigma}_d}{\sqrt{n}}, \tag{D.28}$$

wobei aufgrund der Stichprobendifferenzen die Streuung der Differenzen in der Population ($\hat{\sigma}_d$) wie folgt abgeschätzt werden kann

$$\hat{\sigma}_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(d_i - \bar{x}_d)^2}{n-1}}. \tag{D.29}$$

Somit kann wie in Gleichung (D.26) ein Zusammenhang zwischen $\bar{x}$ und $\hat{\sigma}_{\bar{x}_d}$ hergestellt werden:

$$t = \frac{\bar{x}}{\hat{\sigma}_{\bar{x}_d}}. \tag{D.30}$$

Die Vorgehensweise ist hier identisch zu dem unabhängigen Fall. Die Gleichung (D.30) wird ausgerechnet und der erhaltene Wert mit Tabellenwerten für die zugehörigen Freiheitsgrade verglichen, um so das Signifikanzniveau α zu ermitteln.

D.3 Varianzanalyse

In diesem Abschnitt soll zu Beginn kurz der F-Test diskutiert werden, da dieser in der Varianzanalyse benötigt wird. Danach wird, um das Prinzip der Varianzanalyse zu verstehen, zuerst die *einfaktorielle Varianzanalyse* betrachtet werden. Dabei werden die verschiedenen Begriffe eingeführt, die in den nachfolgenden Abschnitten gebraucht werden. Die darauffolgenden Abschnitte beschäftigen sich mit der Varianzanalyse mit Messwertwiederholung. Diese wird im Kapitle (7) benötigt um den Verlauf des Lernerfolgs in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern zu untersuchen.

D.3.1 F-Test

Gegeben sei eine standard-normalverteilte Zufallsvariable x_i. Das Quadrat dieser Zufallsvariablen wird als χ_1^2-verteilte Zufallsvariable bezeichnet

$$\chi_1^2 = x_i^2. \tag{D.31}$$

Als eine χ_n^2-verteilte Zufallsvariable bezeichnet man die Summe der Quadrate von standard-normalverteilten Zufallsvariablen

$$\chi_n^2 = \sum_{i=1}^{n} x_i^2. \tag{D.32}$$

Für große n nähert sich diese χ^2-Verteilung einer Normalverteilung mit Mittelwert n und $\sigma = \sqrt{2n}$ an.

Die F-Verteilung ist der Quotient von 2 unabhängigen χ^2-Verteilungen $(\chi^2_{n_1}, \chi^2_{n_2})$ und ihren Freiheitsgraden (n_1, n_2)

$$F_{n_1,n_2} = \frac{\chi^2_{n_1}}{\chi^2_{n_2}} \cdot \frac{n_2}{n_1}. \tag{D.33}$$

Unter der Bedingung, dass zwei zu untersuchende Varianzen $(\hat{\sigma}_1^2, \hat{\sigma}_2^2)$ normalverteilt sind, können diese mit dem F-Test verglichen werden. Dazu wird die Nullhypothese H_0 aufgestellt, dass die wahren Varianzen (σ_1, σ_2) gleich sind

$$H_0 : \sigma_1 = \sigma_2. \tag{D.34}$$

Somit kann, wenn man von den zu untersuchenden Varianzen ausgeht, folgender F-Wert gebildet werden

$$F = \frac{\hat{\sigma}_1^2/\sigma_1^2}{\hat{\sigma}_2^2/\sigma_2^2}. \tag{D.35}$$

Unter Berücksichtigung von H_0 ergibt sich

$$F = \frac{\hat{\sigma}_1^2}{\hat{\sigma}_2^2}. \tag{D.36}$$

Die Varianzen $\hat{\sigma}_1^2, \hat{\sigma}_2^2$ können auch ausgedrückt werden durch (Herleitung siehe [Bor99])

$$\hat{\sigma}_i^2 = \frac{\chi^2_{n-1} \cdot \sigma_i^2}{n_i - 1} \tag{D.37}$$

für $i = 1, 2$ und $n_i - 1$ die Anzahl der jeweiligen Freiheitsgrade. Setzt man nun Gleichung (D.37) in Gleichung (D.36) ein und berücksicht H_0, so erhält man

$$F_{n_1-1,n_2-1} = \frac{\chi^2_{n_1-1}}{\chi^2_{n_2-1}} \cdot \frac{n_2 - 1}{n_1 - 1}. \tag{D.38}$$

D.3.2 Einfaktorielle Varianzanalyse

Bei der einfaktoriellen Varianzanalyse soll überprüft werden, ob bei einer Grundgesamtheit die Höhe der Zufallsvariablen von einem Parameter abhängig ist. Ein Beispiel hierfür wäre, dass eine Anzahl von Studenten verschiedene Lehrmodule bearbeitet und nach der Durchführung wird ein Leistungstest durchgeführt. Nun soll untersucht werden, ob die Leistung der Studenten von dem jeweiligen Lehrmodul abhängt. Die einfaktorielle Varianzanalyse ist als Gegenstück zum t-Test für unabhängige Stichproben zu sehen, nur dass bei ihr mehrere Mittelwerte miteinander verglichen werden können; beim t-Test sind es immer nur zwei. Der Vorteil ist, dass nicht mehrere t-Tests gemacht werden müssen, was zu einer Erhöhung des Fehlers führen würde.

Totale Quadratsumme

Zunächst wird die Quadratsumme der Varianz von Zufallsstichproben betrachtet. Da sich der Erwartungswert des Stichprobenumfangs n gegenüber der „normalen" Populationsvarianz um den Faktor $(n-1)$ unterscheidet und somit die Varianz der Stichprobe um den Faktor $(n-1)/n$ gegenüber der wahren Varianz unterschätzt, ergibt sich als Varianz für die Zufallsstichproben der Größe n:

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{\sum_m (x_m - \bar{x})^2}{n-1}. \tag{D.39}$$

Hierbei durchläuft m die Anzahl der Versuchspersonen, x_m sei der Messwert der m-ten Versuchsperson, $\bar{x}$ das arithmetische Mittel aller Versuchspersonen und $(n-1)$ die Anzahl der Freiheitsgrade.

Betrachtet man nur die Quadratsumme „QS" in die Gleichung (D.39), so erhält man Gleichung (D.40)

$$\mathrm{QS}_{\mathrm{tot}} = \frac{\sum_m (x_m - \bar{x})^2}{n-1} \tag{D.40}$$

oder

$$\mathrm{QS}_{\mathrm{tot}} = \sum_i \sum_m (x_{mi} - \bar{x})^2, \tag{D.41}$$

wobei i über die Anzahl der verschiedenen Lehrmodule läuft. Die Varianz erhält man, wenn diese Gleichungen durch die Anzahl der Freiheitsgrade DF_{tot} dividiert werden. Bei n Versuchspersonen ist $DF_{\mathrm{tot}} = n - 1$. (Zur Berechnung der Freiheitsgrade siehe Abschnitt D.2.1.)

Treatment-Quadratsumme

In dem Treatmentanteil[2] der Quadratsumme soll die Unterschiedlichkeit in den Messwerten bestimmt werden, die auf die verschiedenen Lehrmodule zurückgeht. Im Idealfall hätten alle Versuchspersonen, die dasselbe Lehrmodul bearbeitet haben, den gleichen Messwert. Dies ist im Allgemeinen nicht der Fall. Als Schätzung für die Wirkungsweise der Lehrmodule kann aber der Mittelwert $\bar{A}_i$ der Messwerte der Versuchspersonen, die das Lehrmodul bearbeitet haben, genommen werden.

Um die Unterschiede zu quantifizieren, wird die quadratische Abweichung zwischen $\bar{A}_i$ und dem Gesamtmittelwert $\bar{x}$ wie folgt gebildet:

$$\mathrm{QS}_{\mathrm{treat}} = \sum_i k_i (\bar{A}_i - \bar{x})^2, \tag{D.42}$$

[2] treatment(engl.):Aufbereitung, Behandlung

wobei k_i die Anzahl der Versuchspersonen ist, die das jeweilige Lehrmodul bearbeitet haben.

Für die Varianz dieses Anteils ergibt sich

$$\hat{\sigma}^2_{\text{treat}} = \frac{\sum_i k_i(\bar{A}_i - \bar{x})^2}{p-1}, \quad \text{(D.43)}$$

wobei p die Anzahl der verschiedenen Lehrmodule ist.

Wird nun die Treatment-Quadratsumme durch die totale Quadratsumme dividiert und mit 100 multipliziert erhält man die Varianzaufklärung η^2

$$\eta^2 = \frac{\text{QS}_{\text{treat}}}{\text{QS}_{\text{tot}}} \cdot 100. \quad \text{(D.44)}$$

Hierbei ist η^2 der Anteil der abhängigen Variablen in Prozent, der auf die unabhängige Variable zurückzuführen ist; oder anders ausgedrückt, der Anteil an der totalen Quadratsumme, der durch die verschiedenen Lehrmodule entsteht.

Offen ist aber noch die Frage, ob dieser Anteil zufällig entstanden ist, oder ob er einen tatsächlichen Unterschied wiederspiegelt. Dieses soll nachfolgend betrachtet werden.

Fehlerquadratsumme

Die anderen Anteile in der Varianz, neben dem Treatmentanteil, werden nun zu einem Fehlervarianzanteil zusammengefasst. Dieser enthält diejenigen Unterschiede, die nicht auf das Treatment zurückzuführen sind und ist deswegen unabhängig vom Treatmentanteil. Der Fehlervarianzanteil entsteht durch unterschiedliche Motivation und Begabung, aber auch durch Messungenauigkeit; diese Faktoren werden als „Störvariablen“ bezeichnet. Ziel ist es nun ein quantitatives Maß zu bestimmen, um die Größe dieser Störvariablen abzuschätzen und damit den Fehlervarianzanteil zu bestimmen.

Als Schätzung für die Größe der Störvariablen kann die Differenz des Messwertes von dem Mittelwert des jeweiligen Lehrmoduls

$$\sum_m x_{mi} - \bar{A}_i \quad \text{(D.45)}$$

genommen werden.

Damit ergibt sich für die Fehlerquadratsumme

$$\text{QS}_{\text{Fehler}} = \sum_i \sum_m (x_{mi} - \bar{A}_i)^2. \quad \text{(D.46)}$$

Für die Bestimmung des Fehlers dieser Quadratsumme wird noch die Anzahl der Freiheitsgrade benötigt. Diese berechnen sich für diesen Anteil wie folgt:

$$DF_{\text{Fehler}} = \sum_i (k_i - 1), \quad \text{(D.47)}$$

wobei, wie oben schon erwähnt, k_i die Anzahl der Versuchspersonen ist, die das jeweilige Lehrmodul bearbeitet haben.

Daraus kann dann die Varianz des Fehleranteils berechnet werden:

$$\hat{\sigma}^2_{\text{Fehler}} = \frac{\sum_i \sum_m (x_{mi} - \bar{A}_i)^2}{\sum_i (k_i - 1)}. \tag{D.48}$$

Signifikanzuntersuchung

Mit dem F-Test soll nun untersucht werden, ob die Varianzaufklärung η^2 zufällig entstanden, oder ob sie eine Folge der verschiedenen Lehrmodule ist.

Dazu werden die Mittelwertunterschiede $\bar{A}_i$ betrachtet, wobei i die verschiedenen Module durchläuft. Nun soll die Hypothese H_0, die besagt, dass die Mittelwerte der einzelnen Module gleich sind, betrachtet werden.

$$H_0 : \bar{A}_1 = \bar{A}_2 = \bar{A}_3 = ... = \bar{A}_p \tag{D.49}$$

Wenn diese Hypothese gelten soll, so müssten die einzelnen Stichprobenmittelwerte $\bar{A}_i$ um den Gesamtmittelwert $\bar{x}$ streuen. Daraus würde sich folgende Varianz ergeben:

$$\hat{\sigma}^2_A = \frac{\sum_i (\bar{A}_i - \bar{x})^2}{p - 1}, \tag{D.50}$$

wobei p die Anzahl der verschiedenen Lehrmodule ist.

Unter der Bedingung, dass die Hypothese H_0 stimmt, kann angenommen werden, dass die p Stichproben einer Grundgesamtheit angehören. Somit kann die Varianz der Mittelwerte wie folgt dargestellt werden:

$$\hat{\sigma}^2_A = \frac{\hat{\sigma}^2}{n} \tag{D.51}$$

mit

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}, \tag{D.52}$$

wobei n die Anzahl der gesamten Stichprobe ist.

Werden unter der Annahme von H_0 beide Seiten der Gleichung (D.51) multipliziert, so erhält man die Varianz der Treatment-Quadratsumme (siehe Gleichung (D.43))

$$\hat{\sigma}^2_{\text{treat}} = n \cdot \hat{\sigma}^2_A = \hat{\sigma}^2. \tag{D.53}$$

Desweiteren kann unter der Annahme von H_0 geschlossen werden, dass $\hat{\sigma}^2$ der Varianz entspricht, die durch die Fehlervarianz $\hat{\sigma}^2_{\text{Fehler}}$ abgeschätzt wird. Es ergibt sich

$$\hat{\sigma}^2_{\text{treat}} = \hat{\sigma}^2_{\text{Fehler}}. \tag{D.54}$$

Somit stellt die Treatment-Varianz eine erwartungstreue Schätzung der Fehlervarianz dar, wenn angenommen wird, dass die Mittelwerte der einzelnen Lehrmodule einer Grundgesamtheit entstammen.

Diese beiden Varianzen können nun mit Hilfe des F-Tests (siehe Gleichung (D.38)) miteinander verglichen werden. Es ergibt sich

$$\mathrm{F} = \frac{\hat{\sigma}^2_{\text{treat}}}{\hat{\sigma}^2_{\text{Fehler}}}. \tag{D.55}$$

Der so ermittelte F-Wert wird mit dem Wert verglichen, den man aus der F-Verteilung mit den zugehörigen Freiheitsgraden erhält, wobei ein Parameter, der mit α bezeichnet wird, noch variabel ist und so gewählt wird, dass dieser F-Wert mit dem aus Gleichung (D.62) erhaltenen identisch ist. Dieser freie Parameter α gibt die Wahrscheinlichkeit an, dass die Hypothese in Gleichung (D.49) wahr ist. Allgemein üblich ist ab einem α kleiner als 0,05 anzunehmen, dass die Hypothese H_0 falsch ist und die Mittelwertsunterschiede als signifikant anzunehmen.

D.3.3 Einfaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung

Die einfaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung ist entsprechend dem t-Test für abhängige Stichproben zu sehen, nur dass bei der Varianzanalyse mehrere Werte miteinander verglichen werden können. Dies führt im Vergleich zum t-Test zu einer Verringerung des Fehlers.

Quadratsummenzerlegung

Bei der Quadratsummenzerlegung QS_{tot} wird auch hier die totale Quadratsumme in zwei Teile zerlegt. Der erste Teil QS_{ZW} beschreibt die Unterschiedlichkeit zwischen den Versuchspersonen und der zweite Teil QS_{IN} erfasst die Entwicklung der Personen zwischen den verschiedenen Zeitpunkten. Die Unterschiede zwischen den Versuchspersonen sind bei dieser Art der Auswertung nicht von Bedeutung, da sie Unterschiede, die unabhängig von der Untersuchung sind, darstellen.

Die Unterschiede zwischen den Personen zu den verschiedenen Zeitpunkten QS_{IN} können weiter unterteilt werden. Der Anteil, auf den es in der Auswertung ankommt, wird wieder mit $\mathrm{QS}_{\text{treat}}$ bezeichnet. Die Interaktionseffekte zwischen Versuchspersonen und dem Treatment-Anteil sowie die Fehlereffekte, wie z.B. unterschiedliche Motivation und Verfassung zu den verschiedenen Zeitpunkten, werden zu einem Residualanteil QS_{res} zusammengefasst.

Die totale Quadratsumme berechnet sich so wie im vorigen Abschnitt (D.3.2) beschrieben zu

$$\mathrm{QS}_{\text{tot}} = \sum_i \sum_m (x_{mi} - \bar{x})^2 \tag{D.56}$$

und ist identisch zu Gleichung (D.56).

Die Quadratsumme des Treatment-Anteils QS_{treat} berechnet sich ähnlich wie bei der einfaktoriellen Varianzanalyse (Herleitung siehe Abschnitt (D.3.2)), nur dass hier zu den verschiedenen Zeitpunkten die gleiche Anzahl der Versuchspersonen den Test durchführt und somit die k_i aus der Summe gezogen werden können (siehe Gleichung (D.42)). Also ergibt sich

$$\mathrm{QS}_{\mathrm{treat}} = n \cdot \sum_i (\bar{A}_i - \bar{x})^2. \tag{D.57}$$

Dabei ist n die Anzahl der Versuchspersonen, $\hat{A}_i$ der Mittelwert aller Versuchspersonen zu einem Messzeitpunkt und $\bar{x}$ der Gesamtmittelwert über alle Zeitpunkte und Versuchspersonen.

Bei der Residualquadratsumme kommt neben dem Fehlerquadratanteil (siehe Gleichung (D.46)) noch der Anteil, der auf die Wechselwirkung zwischen Versuchspersonen und dem Treatment beruht, hinzu. Dieser wird mit der Differenz zwischen dem Gesamtmittelwert $\bar{x}$ und der Mittelwert einer Versuchsperson $\bar{P}$ abgeschätzt. Aus duesem Grunde ergibt sich für QS_{res} folgende Gleichung:

$$\mathrm{QS}_{\mathrm{res}} = \sum_i \sum_m (x_{im} - \bar{A}_i - \bar{P_m} + \bar{x})^2. \tag{D.58}$$

Signifikanztest

Im letzten Abschnitt (D.3.3) wurden die verschiedenen Quadratsummen hergeleitet. Um aus diesen die einzelnen Varianzen zu erhalten, müssen die Quadratsummen durch die jeweiligen Freiheitsgrade dividiert werden. Daraus ergeben sich folgende Varianzen:

$$\hat{\sigma}^2_{\mathrm{tot}} = \frac{\sum_i \sum_m (x_{mi} - \bar{x})^2}{np - 1}, \tag{D.59}$$

$$\hat{\sigma}^2_{\mathrm{treat}} = \frac{n \cdot \sum_i (\bar{A}_i - \bar{x})^2}{p - 1}, \tag{D.60}$$

$$\hat{\sigma}^2_{\mathrm{res}} = \frac{\sum_i \sum_m (x_{im} - \bar{A}_i - \bar{P_m} + \bar{x})^2}{(n-1)(p-1)}, \tag{D.61}$$

wobei n die Anzahl der Versuchspersonen und p die Anzahl der Zeitpunkte darstellt, zu denen der Test durchgeführt wurde.

Wie bei der einfaktoriellen Varianzanalyse ohne Messwertwiederholung wird auch hier auf dieselbe Art ein F-Wert mit

$$\mathrm{F} = \frac{\hat{\sigma}^2_{\mathrm{treat}}}{\hat{\sigma}^2_{\mathrm{Fehler}}}. \tag{D.62}$$

(vergleiche Gleichung (D.62)) ermittelt. Dieser wird mit einem Wert der F-Verteilung verglichen, welcher aus den Freiheitsgraden der Varianzquadrate und einem freien Parameter α ermittelt wird. So kann bestimmt werden, ob die Unterschiede zu den verschiedenen Zeitpunkten signifikant sind, oder ob die Mittelwertsunterschiede zufällig entstanden. (Näheres siehe Abschnitt (D.3.3)).

Auch die Varianzaufklärung, die den Treatment-Anteil am Gesamtunterschied beschreibt, kann auf dieselbe Art wie im Abschnitt ohne Messwiederholung (siehe Abschnitt (D.3.2)) gebildet werden.

Korrektur der Freiheitsgrade

Führt man die Varianzanalyse durch, so muss gewährleistet sein, dass die einzelnen Treatmentstufen voneinander unabhängig sind. Diese ist bei der Messwertwiederholung im Regelfall verletzt. Dennoch führen die hier vorgestellten Tests zu richtigen Ergebnissen, wenn zusätzliche Voraussetzungen, wie die Korrelationen zwischen Messzeitpunkten, erfüllt sind. Sind diese verletzt, so kommt es zu einem zu kleinen α-Wert, was bedeuten würde, dass die Hypothese H_0 (Gleichung (D.49) zu häufig verworfen wird.

Sind Voraussetzungen verletzt, gibt es aber Korrekturverfahren, die die Anzahl der Freiheitsgrade modifizieren. Dabei werden die Freiheitsgrade, für den Zähler $(p-1)$ und für den Nenner $(p-1)\cdot(n-1)$ (Variablen wie vorher), mit einem Faktor $\epsilon < 1$ multipliziert. Durch diese Gewichtung erhält man eine geringere Anzahl an Freiheitsgraden und somit einen größeren α-Wert. In [Gei58] konnte gezeigt werden, dass für diesen Korrekturfaktor gilt

$$\frac{1}{p-1} \leq \epsilon \leq 1. \tag{D.63}$$

Huynh und Feldt [Huy76] entwickelten 1976 eine Abschätzung für ϵ, die wie folgt berechnet werden kann

$$\hat{\epsilon} = \frac{1}{p-1} \cdot \frac{p^2 \cdot \left(\bar{\hat{\sigma}}_{ii}^2 - \hat{\sigma}_{..}^2\right)}{\sum_i \sum_j \left(\hat{\sigma}_{ij}^2\right)^2 - 2 \cdot p \cdot \sum_i \left(\hat{\sigma}_{i.}^2\right)^2 + p^2 \left(\hat{\sigma}_{..}^2\right)^2} \tag{D.64}$$

mit

$$\begin{aligned}
p &: \text{ Anzahl der Treatmentstufen (Messzeitpunkte)} \\
\bar{\hat{\sigma}}_{ii}^2 &: \text{ Mittelwert der unter den } p \text{ Treatmentstufen beobachteten Varianzen} \\
\hat{\sigma}_{ij}^2 &: \text{ Kovarianz zwischen der i} - \text{ten und j} - \text{ten Treatmentstufe} \\
\hat{\sigma}_{i.}^2 &: \text{ Mittelwerrt aus der Varinz der i} - \text{ten Treatmentstufe und den Kovarianzen} \\
&\ \text{ aller übrigen Treatmentstufen mit Treatmentstufe i} \\
\hat{\sigma}_{..}^2 &: \text{ Gesamtmittel aller Varianzen und Kovarianzen.} \qquad \text{(D.65)} \\
& \qquad \text{(D.66)}
\end{aligned}$$

Damit berechnen sich dann die Freiheitsgrade für den Zähler zu

$$\begin{aligned} \mathrm{DF}_{\mathrm{Zhler}} &= \hat{\epsilon} \cdot (p-1) \quad \text{und} & \text{(D.67)} \\ \mathrm{DF}_{\mathrm{Nenner}} &= \hat{\epsilon} \cdot (p-1) \cdot (n-1). & \text{(D.68)} \end{aligned}$$

Sofern die zusätzliche Voraussetzung der Korrelation nicht gegeben ist, wird in Kapitel (7) mit diesem Korrekturfaktor gerechnet werden.

D.3.4 Mehrfaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung

Als Beispiel für die mehrfaktorielle Varianzanalyse mit Messwertwiederholung soll hier die dreifaktorielle Varianzanalyse genommen werden. Diese drei Faktoren teilen sich bei diesem Beispiel in zwei Gruppenfaktoren und einen Messwiederholungsfaktor auf. Für diesen Fall sollen nun im Folgenden zuerst die Quadratsummen diskutiert werden. Im Anschluss daran werden die einzelnen Prüfgrößen vorgestellt.
Ein allgemeinerer Ansatz ist z.B. bei [Bor99] nachzulesen.

Quadratsummenzerlegung

Die mehrfaktorielle Varianzanalyse mit Messwertwiederholung unterteilt die einzelnen Messzeitpunkte noch weiter. So wird jetzt nicht nur die Gesamtpunktzahl zu den verschiedenen Zeitpunkten des Tests untersucht, sondern es wird diese Punktzahl nach verschiedenen Aspekten unterteilt: Dies kann zum einen das Geschlecht sein, aber auch eine Unterteilung nach Studienrichtungen oder Lehrmodul sind möglich. Im Folgenden soll auf die dreifaktorielle Varianzanalyse näher eingegangen werden. Man kann bei diesem Fall noch unterscheiden, ob man eine oder zwei Messwiederholungen und dementsprechend zwei oder einen Gruppenfaktor betrachtet. Hier soll die Varianzanalyse mit einer Messwiederholung in zwei Gruppenfaktoren betrachtet werden, da dieser Fall unter anderem in Kapitel (7) diskutiert wird.

Die totale Quadratsumme $\mathrm{QS}_{\mathrm{tot}}$ wird auch hier in einen Faktor $\mathrm{QS}_{\mathrm{ZW\ Vpn}}$ zerlegt, der die Effekte zwischen den Versuchspersonen beinhaltet, und einen, der die Veränderung innerhalb der Versuchsperson $\mathrm{QS}_{\mathrm{IN\ Vpn}}$ darstellt.

Anders als bei der einfaktoriellen Varianzanalyse mit Messwiederholung werden hier auch die Effekte zwischen den Versuchspersonen berücksichtigt. Dazu wird die Quadratsumme $\mathrm{QS}_{\mathrm{ZW\ Vpn}}$ in folgender Weise zerlegt

$$\mathrm{QS}_{\mathrm{ZW\ Vpn}} = \mathrm{QS}_{\mathrm{A}} + \mathrm{QS}_{\mathrm{B}} + \mathrm{QS}_{\mathrm{A\times B}} + \mathrm{QS}_{\mathrm{IN\ S}}. \tag{D.69}$$

Die Quadratsumme $\mathrm{QS}_{\mathrm{IN\ Vpn}}$ kann noch weiter zerlegt werden, dies geschieht wie folgt:

$$\mathrm{QS}_{\mathrm{IN\ Vpn}} = \mathrm{QS}_{\mathrm{C}} + \mathrm{QS}_{\mathrm{A\times C}} + \mathrm{QS}_{\mathrm{B\times C}} + \mathrm{QS}_{\mathrm{A\times B\times C}} + \mathrm{QS}_{\mathrm{C\times VPN}}. \tag{D.70}$$

Dabei bedeutet

$$\begin{aligned}
\mathrm{QS}_{\mathrm{A}} &: \text{Gruppenfaktor A,} \\
\mathrm{QS}_{\mathrm{B}} &: \text{Gruppenfaktor B,} \\
\mathrm{QS}_{\mathrm{C}} &: \text{Faktor der Messwiederholung,} \\
\mathrm{QS}_{\mathrm{IN\ S}} &: \text{Unterschiede zwischen den Versuchspersonen (VPN)} \\
&\quad\ \text{innerhalb der einzelnen Stichproben,} \\
\mathrm{QS}_{\mathrm{X\times Y}} &: \text{Interaktion der Kombination X, Y.}
\end{aligned} \tag{D.71}$$

Die Varianzen erhält man wieder, indem die einzelnen Quadratsummen durch die zugehörigen Freiheitsgrade dividiert werden (vergleiche Abschnitt (D.3.2)).

Die einzelnen Summanden der angegebenen Quadratsummen, sowie die Freiheitsgrade und Varianzen können z.B. bei [Bor99] im Kapitel 9.2 nachgelesen werden und sind hier nicht explizit aufgeschrieben.

Prüfvarianzen

Auch bei dieser dreifaktoriellen Varianzanalyse werden die Ergebnisse, wie in den vorangegangenen Fällen, durch den F-Test ermittelt. Dazu wird die zu untersuchende Varianz durch eine andere Varianz dividiert und das Ergebnis mit dem F-Wert für die zugehörigen Freiheitsgrade verglichen, wobei ein variabler Parameter, der mit α bezeichnet wird, noch zum Anpassen der beiden F-Werte frei ist. Näheres hierzu siehe Abschnitt (D.3.2).

Bei der in dieser Arbeit durchgeführten Auswertung wird davon ausgegangen, dass die verschiedenen untersuchten Faktoren feste Effekte haben, die diese beeinflussen. In diesem Fall werden die F-Werte wie folgt ermittelt:

$$F_{\mathrm{A}} = \frac{\hat{\sigma}^2_{\mathrm{A}}}{\hat{\sigma}^2_{\mathrm{IN\ S}}} \tag{D.72}$$

$$F_{\mathrm{B}} = \frac{\hat{\sigma}^2_{\mathrm{B}}}{\hat{\sigma}^2_{\mathrm{IN\ S}}} \tag{D.73}$$

$$F_{\mathrm{A\times B}} = \frac{\hat{\sigma}^2_{\mathrm{A\times B}}}{\hat{\sigma}^2_{\mathrm{IN\ S}}} \tag{D.74}$$

$$F_{\mathrm{C}} = \frac{\hat{\sigma}^2_{\mathrm{C}}}{\hat{\sigma}^2_{\mathrm{C\times VPN}}} \tag{D.75}$$

$$F_{\mathrm{A\times C}} = \frac{\hat{\sigma}^2_{\mathrm{A\times C}}}{\hat{\sigma}^2_{\mathrm{C\times VPN}}} \tag{D.76}$$

$$F_{\mathrm{B\times C}} = \frac{\hat{\sigma}^2_{\mathrm{B\times C}}}{\hat{\sigma}^2_{\mathrm{C\times VPN}}} \tag{D.77}$$

$$F_{\mathrm{A\times B\times C}} = \frac{\hat{\sigma}^2_{\mathrm{A\times B\times C}}}{\hat{\sigma}^2_{\mathrm{C\times VPN}}}. \tag{D.78}$$

Die Erläuterung der Variablen zu den Gleichungen (D.72) bis (D.78) sind in unter (D.71) aufgeführt.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich die Gelegenheit nutzen und mich bei allen bedanken, die mich beim Erstellen dieser Arbeit unterstützt haben.

Zuerst möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Alfred Pflug für das Vertrauen und die Betreuung der letzten Jahre bedanken. Die anregenden Diskussionen über die Arbeit und darüber hinaus waren sehr förderlich und interessant.

Bei Herrn Prof. Dr. Claus Gößling möchte mich für die Möglichkeit bedanken, diese Arbeit in dem Projekt „Physik 2000“ durchzuführen. Desweiteren möchte ich mich für die offene Tür und die effektiven Diskussionen bedanken.

Meinen Arbeitskollegen Christoph Hoffmann und Thomas Wenk sei an dieser Stelle gedankt für die technischen Ideen bei der Realisierung der Internetbetreuung.

Für die inhaltlich konstruktive Diskussion möchte ich mich bei Frau Beatrice Venohr und Frau Susan Wettig von der Friedrich-Schiller-Universität Jena sowie Herrn Hartmut Kesper von der Humboldt-Universität Berlin bedanken.

Allen Praktikumsleitern und Verantwortlichen, die es mir ermöglicht haben, diese Untersuchung an den Universitäten und in vielen Praktika durchzuführen, sei an dieser Stelle herzlichst gedankt. Ohne diese Unterstützung wäre die Anfertigung dieser Arbeit nicht möglich gewesen.

Herrn Martin Maß sei für seine konstruktive und teilweise auch ironische Kritik gedankt. Gemeinsam haben wir viele Hürden genommen und dabei eine schöne und erfolgreiche Zeit verlebt.

Meinen Eltern möchte ich für Ihre fortwährende Unterstützung während des Studiums und der Dissertation danken. Es ist schön zu wissen, dass sie immer für mich da sind.

Mein ganz besonderer Dank gilt meiner Lebenspartnerin Frau Uta Magdans. Sie half mir den Blick für das Wesentliche zu bewahren.