

# FPGA Remote-Labor als Ergänzung und Alternative zum Präsenzlabor<sup>1</sup>

MARCO WINZKER, ANDREA SCHWANDT

## Abstract

Der Beitrag untersucht, wie ein Präsenzlabor durch ein Remote-Labor ergänzt und ersetzt werden kann. Dazu wird das Laborpraktikum Digitaltechnik der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg betrachtet, bei dem ein Remote-Labor Flexibilität bei der Versuchsdurchführung bietet und Versuche ermöglicht, die allein mit dem Präsenzlabor nicht möglich wären. Neben der Ergänzung der Präsenzversuche können Studierende das Praktikum auch komplett im Remote-Labor durchführen. Durch klare Anforderungen an die Erteilung eines Testats ist dies sowohl für sie als auch für Lehrende praktikabel zu handhaben.

Rückmeldungen der Studierenden und Nutzungszahlen belegen die Akzeptanz des Remote-Labors. Dabei zeigt sich, dass die Studierenden sehr heterogen mit dem Remote-Labor umgehen: Einige von ihnen nutzen das Remote-Labor als zusätzliche Praktikumszeit für Versuche die auch im Präsenzlabor möglich wären; andere nutzen es als Erweiterung der Praktikumsmöglichkeit für Versuche, die nur im Remote-Labor möglich sind und wieder andere arbeiten intensiv im Remote-Labor und reichen auch das Praktikumsprotokoll elektronisch ein. Für Lehrende besteht über das Protokoll und die Auswertung der Nutzungsdaten ausreichende Sicherheit, um aktive Beteiligung am Praktikum zu testen.

**Schlüsselwörter:** Remote-Labor, Präsenzlabor, Digitaltechnik, Evaluation, Nutzungsdaten

## Laborpraktika in der Digitaltechnik

Die Digitaltechnik hat in den letzten Jahrzehnten bei vielen Anwendungen analoge Techniken abgelöst. Die Speicherung von Audiodaten erfolgt nicht mehr auf Schallplatte und Musikkassette, sondern auf CD und als MP3-Datei, die Fernsehübertragung wurde vom analogen auf das digitale Fernsehen umgestellt und wird durch Streaming mittels digitaler Daten ergänzt und womöglich verdrängt, und für das analoge Telefon kam zunächst ISDN und jetzt Voice over IP (VoIP).

---

<sup>1</sup> Gefördert durch ein Fellowship für Innovationen in der digitalen Hochschullehre des Ministeriums für Kultur und Wissenschaft des Landes Nordrhein-Westfalen und des Stifterverbands.

Studierende der Elektrotechnik lernen die technischen Grundlagen dazu in Lehrveranstaltungen mit dem Titel „Digitaltechnik“ oder „Technische Informatik“. Diese werden üblicherweise durch Praktika begleitet, in denen Studierende die theoretischen Kenntnisse der Lehrveranstaltung anwenden und die Konzepte in eine reale Schaltung umsetzen (Zhu, Wenig & Cheng, 2009).

Die digitale Transformation vieler Bereiche bietet die Möglichkeit, Prozesse und Aktivitäten neu zu denken und zu gestalten. In der Hochschullehre wird eine Anreicherung mit und eine Integration von digitalen Lehrformen diskutiert (Froyd, Wankat & Smith, 2012; Handke, 2017). Das in diesem Beitrag beschriebene Remote-Labor wurde eingerichtet, um zu untersuchen, ob die bislang vorherrschenden Präsenzlabor durch Remote-Labore ergänzt und teilweise ersetzt werden können. Aufgrund der Corona-Pandemie hat diese Fragestellung besondere Aktualität erhalten, denn im Sommersemester 2020 waren Präsenzveranstaltungen nicht möglich und das Remote-Labor wurde als Ersatz des Präsenzlabor eingesetzt.

Dieser Beitrag fokussiert auf die optionale Nutzung des Remote-Labor, wenn Studierende eine Wahl der Laborform haben. Dazu werden Ergebnisse aus studentischen Befragungen und Nutzungszahlen vorgestellt. Ergänzt wird diese Betrachtung durch Beobachtungen im Sommersemester 2020 mit alleiniger Nutzung des Remote-Labor.

## Lernziele und Laboraufbau

An unserer Hochschule werden im betrachteten Themengebiet zwei Lehrveranstaltungen angeboten:

- Digitaltechnik 1 richtet sich an Studierende im 2. Semester und hat als Lernziele die Kenntnis von Grundbegriffen der Digitaltechnik, Analyse und Entwurf von Digitalisaltungen und den Umgang mit Digitalisaltungen, insbesondere Inbetriebnahme und Fehlersuche bei der Schaltungsentwicklung.
- Digitaltechnik 2 richtet sich an Studierende im 4. Semester, die sich für die Vertiefungsrichtung „Elektronische Systementwicklung“ entschieden haben. Lernziele sind die vertiefte Kenntnis des Schaltungsentwurfs für größere Systeme, insbesondere mit der Verwendung von entsprechenden Komponenten, beispielsweise Halbleiterspeicher. Ebenfalls werden Kenntnisse über Mikroelektronik und Energieverbrauch von Schaltungen vermittelt.

Bestandteil beider Lehrveranstaltungen ist ein Laborpraktikum, in dem Studierende mit der Programmiersprache VHDL eine Schaltung entwerfen und auf einer programmierbaren Digitalisaltung, einem FPGA (Field-Programable-Gate-Array), ausführen.

### **Labor Digitaltechnik 1**

In Digitaltechnik 1 werden zunächst einfache Schaltungen entworfen, in denen Grundprinzipien der Digitaltechnik angewendet werden. Dies ist beispielsweise ein Zähler, der mit jedem Taktsignal eine Stelle weiterzählt und den Wert auf einer 7-Segment-Anzeige ausgibt. Studierende variieren die Schaltung, indem per Schalter zwischen Vorwärts- und Rückwärtszählen unterschieden wird, der Zähler angehalten oder neu gestartet werden kann oder nicht bei jedem Takt, sondern nur auf Tastendruck weitergezählt wird. Diese Schaltungen können auf kostengünstigen Experimentierplatinen programmiert werden, die auch zur Ausleihe bereitstehen.

### **Labor Digitaltechnik 2**

In Digitaltechnik 2 sollen Studierende mit größeren Schaltungen arbeiten und reale Anwendungen für Digitaltechnik kennenlernen. Als Anwendungsfeld wird dazu die Bildverarbeitung ausgewählt, wofür mehrere Gründe sprechen: Bildverarbeitung ist eine Anwendung, für die auch in der Industrie FPGAs eingesetzt werden (Intel Press Release, 2015), es werden sowohl Schaltungselemente für Speicher als auch für Rechenoperationen benötigt, und es bestehen Bezüge zur Lehrveranstaltung Signalverarbeitung. Zudem ist Bildverarbeitung ein für Studierende motivierendes Thema, denn die Ergebnisse der Signalverarbeitung, aber auch eventuelle Fehler, können durch Betrachten des Ausgangssignals der Schaltung einfach erfasst werden.

Zwei weitere Anforderungen an die Experimentierplatine ergeben sich durch die Lernziele „Mikroelektronik“ und „Energieverbrauch von Schaltungen“. Für das erste Lernziel sollen die Studierenden zwei verschiedene FPGAs vergleichen, wozu verschiedene Platinen benötigt werden. Für das Lernziel „Energieverbrauch“ soll die Verlustleistung der FPGAs gemessen werden. Dies gibt zum einen Informationen über die Auslastung und genutzte Rechenleistung des FPGAs, zum anderen sind die Messwerte für den Vergleich verschiedener FPGAs und ihrer Mikroelektronik sinnvoll.

Allerdings sind Experimentierplatinen mit Eingang und Ausgang für Bildverarbeitung relativ teuer und verfügen über keine Möglichkeit der Messung des Energieverbrauchs. Darum wurde eine eigene Versuchsplatine mit Eingang und Ausgang für Bildverarbeitung entwickelt, bei der auch direkt Anschlüsse für die Messung der Verlustleistung des FPGAs integriert sind (Schwandt & Winzker, 2017). Die Platine wird in zehnfacher Ausfertigung für die Präsenzpraktika bereitgehalten. Acht Gruppen können parallel arbeiten, zwei weitere Platinen sind Reserve.

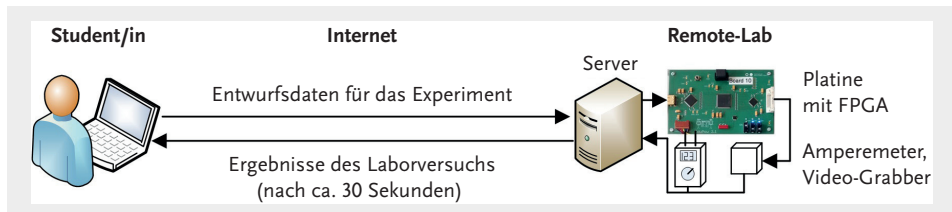
### **Remote-Labor für Digitaltechnik 2**

Für das Präsenzpraktikum ist somit eine sinnvolle Ausstattung vorhanden. Zwei Anforderungen sind jedoch noch nicht erfüllt: Die erste ist, dass Studierende die Möglichkeit erhalten, zwei verschiedene FPGAs zu vergleichen. Hierzu wurde eine zweite Platine entworfen, die prinzipiell ebenfalls in mehrfacher Ausführung erforderlich wäre. Als zweite Anforderung sollen Studierende die Möglichkeit erhalten,

auch unabhängig von den Praktikumszeiten mit der FPGA-Platine zu arbeiten. Diese Möglichkeit wurde in Digitaltechnik 1 von den Studierenden genutzt und soll auch für Digitaltechnik 2 zur Verfügung stehen.

Die beiden Anforderungen werden durch das Remote-Labor erfüllt. Studierende können unabhängig von Praktikumszeiten auf das Laborexperiment zugreifen. Um verschiedene FPGAs zu vergleichen, stehen dort eine Platine mit dem FPGA aus dem Präsenzlabor (Bezeichnung „Cyclone IV“) sowie zwei Platinen mit einem anderen FPGA („Cyclone V“) zur Verfügung. Beide FPGA-Typen stammen vom selben Hersteller (Intel) und sind ausgelegt für gleiche Anwendungsgebiete und Marktsegmente. Das FPGA Cyclone V ist jedoch eine aktuellere Version mit modernerer Schaltungstechnik.

Die Kapazität von insgesamt drei FPGA-Platinen ist ausreichend, da Studierende eine Schaltung zunächst auf dem lokalen Rechner erstellen und mittels einer Entwurfssoftware übersetzen; erst für die Überprüfung der Funktion ist danach das Remote-Labor erforderlich (Bild 1). Für eine Versuchsdurchführung, bestehend aus Upload der Programmierdatei, Ausführung des Versuchs und Rückmeldung der Messwerte, benötigt es weniger als 30 Sekunden. In einem Experiment können Eingangsbilder und Konfigurationsschalter bedient werden, sodass eventuell mehrere Versuchsdurchführungen zu je 30 Sekunden erfolgen.



**Abbildung 1:** Nutzung des Remote-Labors per Internetzugriff

Die insgesamt benötigten Zeiten variieren je nach Versuch, Komplexität der Schaltung und Vorgehensweise der Studierenden. Ein möglicher Ablauf wäre beispielsweise:

- **Rechner Studierende:** 30 bis 120 Minuten für Schaltungskonzept, Schreiben der VHDL-Programme, Simulation, Übersetzen für FPGA-Entwurf
- **Remote-Labor:** 2 Minuten Experiment
- **Rechner Studierende:** 15 Minuten für Schaltungsänderung oder -korrektur
- **Remote-Labor:** 2 Minuten Experiment

Somit können mehrere Studierende die gleiche FPGA-Platine im Remote-Labor nacheinander nutzen. In unserer Konfiguration beträgt die maximale Nutzungsdauer momentan fünf Minuten. Ist die Platine belegt, kommen Studierende in eine Warteschlange. Ist diese leer, kann man direkt nach Ablauf von fünf Minuten erneut ein Experiment starten.

In Einsatz des Remote-Labors sind bislang keine Kapazitätsengpässe aufgetreten, die zu längeren Wartezeiten geführt hätten. Sollte sich dies ändern, kann die Nutzungsdauer verkürzt und können weitere Platinen zum Remote-Labor hinzugefügt werden.

### **Einordnung verfügbarer FPGA-Remote-Labore**

Für einfache Digitalschaltungen, wie im Abschnitt „Labor Digitaltechnik 1“ genannt, sind Remote-Labore verfügbar (vgl. z. B. Garcia-Zubia et al. (2012), Wuttke, Hamann & Henke (2015), Mayoz et al. (2020)). Hier werden jedoch Schaltungen umgesetzt, für die in der industriellen Praxis nicht unbedingt FPGAs, sondern auch Mikrocontroller verwendet werden. Das hier beschriebene FPGA-Remote-Labor hingegen bietet einen Versuchsaufbau der Signalverarbeitung mit hohen Anforderungen an die Datenrate und Verarbeitungsleistung, die eine Implementierung mit FPGAs oder integrierten Schaltungen (IC) erfordert.

## **Einsatz und Aufbau des Remote-Labors**

Das Remote-Labor wurde zunächst in einer ersten Implementierung ab 2016 intern an der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg angeboten (AbuShanab, 2018). Nach positivem Feedback der Studierenden wurde die Implementierung grundlegend überarbeitet, insbesondere im Hinblick auf Bedienungsfreundlichkeit und Cyber-Sicherheit (Schwandt & Winzker, 2019). Diese überarbeitete Implementierung ist seit 2018 verfügbar und auch außerhalb unserer Hochschule als offene Bildungsressource weltweit nutzbar (Winzker & Schwandt, 2019).

Bild 2 zeigt das Benutzerinterface, das auf einer Webseite dargestellt wird. Studierende können links oben die Programmierdatei auswählen und rechts oben die Ausführung starten. Darunter werden Eingangsbild und FPGA-Platine dargestellt sowie das durch die Versuchsausführung erzeugte Ausgangsbild. Über der FPGA-Platine wird der gemessene Strom für das FPGA angezeigt, aus dem durch Multiplikation mit der Versorgungsspannung die Verlustleistung berechnet werden kann. Durch Bedienelemente können das Eingangsbild verändert und die Schalter bedient werden.

Das Remote-Labor verwendet einen PC als Steuerrechner; ein Minicomputer Raspberry-Pi dient als Bildgenerator; Amperemeter und Frame-Grabber erfassen die Ergebnisse des Laborversuchs (Winzker, 2018). Als Remote-Lab-Managementplattform wird WebLab-Deusto eingesetzt (Javier Garcia-Zubia et al., 2012).

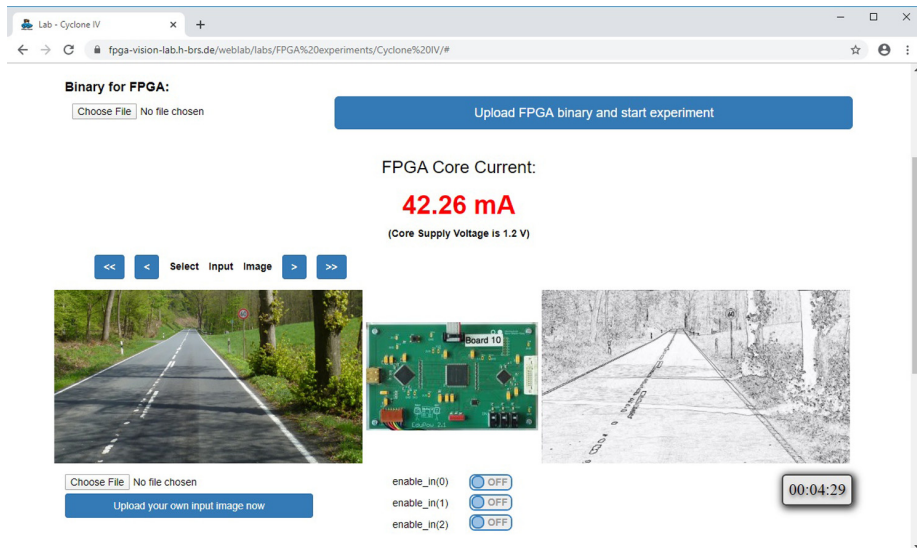


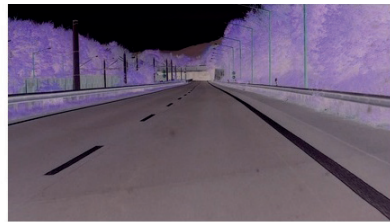
Abbildung 2: Benutzerinterface für das Remote-Labor

## Laborversuche für Präsenzlabor und Remote-Labor

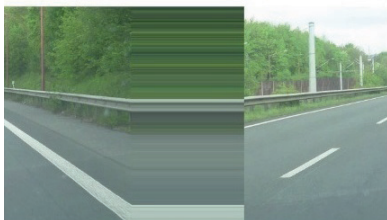
Um den didaktischen Einsatz und die Möglichkeit zur Nutzungsanalyse nachvollziehen zu können, sollen an dieser Stelle die Laborversuche der Lehrveranstaltung erläutert werden. In der Lehrveranstaltung Digitaltechnik 2 werden drei Versuche vorgeschlagen. Bild 3 zeigt ein Eingangsbild und die Ausgangsbilder für die drei Versuche.



Eingangsbild



Ausgangsbild Versuch A



Ausgangsbild Versuch B



Ausgangsbild Versuch C

Abbildung 3: Eingangsbild und drei Ausgangsbilder für Versuche A, B, C

### **Versuch A: Invertierung des Bildsignals**

In diesem Versuch werden die drei Farbwerte des Bildsignals, Rot, Grün und Blau in ihrem Wert invertiert. Dieser Versuch dient zum Kennenlernen des „Design-Flow“, also der Übersetzung der Programmierdateien in die Sprache VHDL und der Übertragung zum FPGA. Als Abwandlung kann die Invertierung der Farbwerte durch einen Schalter gesteuert werden.

### **Versuch B: Verzögerung eines Bildes mit Registerkette**

In diesem Versuch wird die Bildinformation durch Speicherelemente um mehrere Taktschritte verzögert. Diese Speicherelemente werden als Flip-Flop oder Register bezeichnet; die Verzögerung ist eine Registerkette. Als Ergebnis ist das Ausgangsbild um die Anzahl der Registerstufen verschoben. In Bild 3 wird eine Verzögerung von 800 Registerstufen verwendet, und da die verwendeten Bilder eine Breite von 1280 Bildpunkten haben, wird das Bild hier um etwa zwei Drittel nach rechts verschoben. Bildsignale sind zeilenweise aufgebaut. Darum setzt sich der rechte Teil des Bildes auf der linken Seite des Eingangsbildes fort. Nach der rechten Kante des Eingangsbildes gibt es einen ungenutzten Bildbereich (Austastlücke), in dem die Schaltung den letzten Bildpunkt wiederholt (horizontale Streifen).

Diese Verschiebung entspricht keiner realen Anwendung, sondern soll Ausnutzung und Verlustleistung des FPGAs verdeutlichen. Studierende können aus den im FPGA verfügbaren Speicherelementen die maximal mögliche Verzögerung berechnen und damit die Schaltungskapazität einschätzen. Dann können Registerketten der Länge 100, 200, 300, ... programmiert und die jeweilige Verlustleistung gemessen werden.

Studierende lernen somit Zusammenhänge von Schaltungskomplexität und Verlustleistung. Außerdem erkennen sie den Zusammenhang von Bildsignal und Verlustleistung sowie den zeilenweisen Aufbau eines Bildsignals.

### **Versuch C: Reale Anwendung Kantenerkennung**

Im dritten Versuch wird das Bildsignal mit einer Kantenerkennung bearbeitet. Dies ist eine reale Anwendung aus dem Bereich Computer Vision.

Im Versuch wird die Kamera in der Windschutzscheibe moderner Pkws als konkrete Anwendung angenommen, und dies ist auch der Grund für die Auswahl des Eingangsbildes. Die FPGA-Schaltung erkennt die Kanten in der Bildszene und stellt sie als dunkle Bildpunkte dar; Bereiche ohne Kante bleiben hell. Dies wäre die erste Verarbeitungsstufe einer Anwendung, und danach würden weitere Verarbeitungsschritte für Autonomes Fahren folgen. Ein Lane Departure Warning beispielsweise kann erkennen, ob die aktuelle Fahrspur verlassen wird und eine Warnung ausgeben. Im Versuch wird dazu die Kantenerkennung umgesetzt.

Studierende können die Kantenerkennung an vorgegebenen und eigenen Fotos ausprobieren. Verschiedene Modifikationen werden vorgeschlagen, mit denen Schaltungsressourcen und Verlustleistung reduziert werden können. Je nach Modifikation wird die Qualität der Erkennung verändert, sodass ein Abtausch von Aufwand und Qualität erfahrbar wird.

## Praktikumsdurchführung mit Präsenzlabor und Remote-Labor

### Randbedingungen und Ziele

Seit dem ersten Einsatz im Sommersemester 2016 wurde das Remote-Labor bislang in fünf Jahrgängen des Studiengangs Elektrotechnik eingesetzt. Dabei wurden folgende Randbedingungen und didaktischen Ziele berücksichtigt:

- Die Verwendung des Remote-Labors ist prinzipiell für Studierende freiwillig.
  - Im Sommersemester 2020 war das Remote-Labor wegen der Corona-Pandemie quasi verpflichtend. Diese noch andauernde, besondere Nutzungssituation wird in einem eigenen Abschnitt diskutiert.
- Flexibilität:
  - Studierende sollen im Semester zeitliche Flexibilität zur Durchführung der Praktikumsaufgaben haben.
  - Studierende können zeitlich eingeschränkt sein, z. B. durch Berufstätigkeit, Kinderbetreuung oder die Pflege von Angehörigen.
  - Als Vorleistung für die Prüfung müssen Studierende jedoch das Praktikum bis Semesterende abschließen.
- Studierende sollen motiviert werden, selbstorganisiert und eigenverantwortlich die Versuche durchzuführen.
- Zeitumfang:
  - Interessierte Studierende sollen die Möglichkeit für zusätzliche Laborversuche erhalten.
  - Studierende haben mehrere Lehrveranstaltungen und sollen das Praktikum in angemessener Zeit bearbeiten können.

### Aufgabenstellung und Voraussetzungen für Testat

Der im vorherigen Kapitel beschriebene Versuch A dient zum Kennenlernen der Laborumgebung und des Design-Flow und soll von allen Studierenden durchgeführt werden. Entsprechend der Ziele Flexibilität, Selbstorganisation und Eigenverantwortung dürfen sich Studierende danach aussuchen, welche Aufgabenstellung sie bearbeiten möchten. Sie können beide Versuche B und C durchführen oder sich auf einen Versuch konzentrieren und dort mehrere Optionen untersuchen, beispielsweise die Bildverarbeitung verändern oder die zwei FPGA-Bausteine miteinander vergleichen.

Im Präsenzlabor finden vier Termine zu je 90 Minuten statt. Am letzten Laborstag erläutern die Studierenden der Laborbetreuung, welche Versuche sie durchgeführt haben, welche Messwerte gemessen wurden und welche Schlussfolgerungen und Erkenntnisse sie dabei erlangt haben. Daraufhin erhalten sie das Testat für aktive Beteiligung am Praktikum.



### **Ergänzung durch Remote-Labor**

Das Remote-Labor ermöglicht es den Studierenden, die Versuche eigenständig ohne den Besuch der vier Labortermine durchzuführen. Im bisherigen Einsatzes hat sich gezeigt, dass die Elemente des Präsenzpraktikums auf folgende Weise sinnvoll durch das Remote-Labor abgebildet werden können (vgl. Franszkievicz, Frye, Terkowsky & Heix, 2019):

Das Kennenlernen der Laborumgebung mit Versuch A ist weiterhin im Präsenzlabor vorgesehen. Dadurch können Fragen zum Design-Flow und zu Bedingungen für das Testat persönlich geklärt werden. Nach Rücksprache wird auf den ersten Versuch A in Präsenz verzichtet, wenn Studierende sich durch das Praktikum im zweiten Semester bereits genug vorbereitet fühlen.

Die weiteren Versuche B und/oder C können dann unabhängig von den Präsenzterminen im Remote-Labor durchgeführt werden.

Die Diskussion der Versuchsergebnisse erfolgt als Bericht im PDF-Format. Hierfür wird ein Umfang von zwei bis vier Seiten vorgegeben. Die Abgabe erfolgt als Upload im Learning Management System (LMS), und die Abgabefrist wird im System programmiert. Danach ist kein Upload mehr möglich, was dazu führt, dass Studierenden eine solche Frist ernst nehmen und beachten.

Für das Testat kann außerdem über den Nutzernamen im Remote-Labor die aktive Beteiligung nachvollzogen werden.<sup>2</sup> Es sind auch Mischformen möglich – beispielsweise, wenn Studierende einzelne Praktikumstermine durch das Remote-Labor ersetzen möchten, für das Abschlussgespräch und Testat jedoch wieder persönlich ins Präsenzlabor kommen.

Die Flexibilität in der Organisation ist bewusst gewählt, um Studierende zur mündigen Nutzung der Laboreinrichtung anzuhalten. Durch die Überprüfung der Zugriffsdaten und die Abgabe des PDF-Berichts wird die Arbeit der Studierenden sichtbar und kann formell überprüft werden. Gleichzeitig besteht wertschätzende Freiheit in der Wahl der konkreten Aufgabenstellung und in der Zeiteinteilung.

Das Remote-Labor fördert somit technische Lernziele, klassische überfachliche Lernziele wie Selbstorganisation, Selbststeuerung und Eigenverantwortung und digitale Grundfähigkeiten wie „Digital Learning“ (Kirchherr, Klier, Lehmann-Brauns & Winde, 2019, S. 6).

---

2 Auch eine anonyme Nutzung des Remote-Labors ist möglich.

## Evaluation durch studentische Befragung

Eine quantitative und qualitative Untersuchung der Nutzung des Remote-Labors erfolgte im Sommersemester 2018 durch eine studentische Befragung. Das Remote-Labor wurde dort in einem Wahlpflichtfach im 6. Semester Elektrotechnik eingesetzt. Die Befragung erfolgte anonym mit einem Fragebogen in Papierform. 16 Fragebögen wurden abgegeben.

### Akzeptanz

Die Akzeptanz des Remote-Labor wurde abgefragt durch: „Die Hochschule kann Praktikumsversuche als Remote-Lab und als Präsenzpraktikum (klassisch im Labor der Hochschule) anbieten. Wenn Sie an ihr komplettes Studium denken, was ist eine gute Verteilung?“ Fast zwei Drittel der befragten Studierenden könnten auf einige Präsenzpraktika verzichten (Bild 4), was zeigt, dass sie mit dem Konzept eines Remote-Labor zufrieden sind.

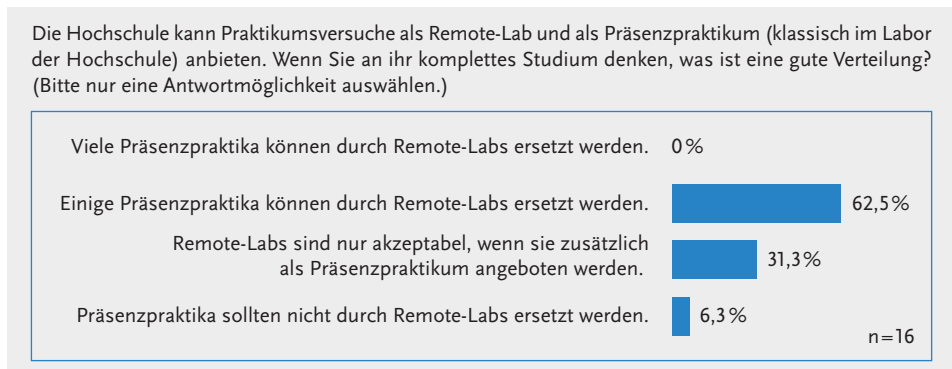


Abbildung 4: Studentische Befragung zur Akzeptanz des Remote-Labors (n = 16)

### Auswahl der Versuchsoptionen

Studierende können in den Praktikumsversuchen verschiedene Optionen untersuchen und damit verschiedene Aspekte der Digitaltechnik vertiefen. Sie konnten zu vier Bereichen (siehe Bild 5) eine Bewertung von „sehr wichtig“ bis „überhaupt nicht wichtig“ abgeben.

Die Rückmeldungen zeigen, dass Studierende insbesondere das Arbeiten mit einer realen FPGA-Anwendung schätzen. Der Vergleich verschiedener FPGAs wird als weniger wichtig angesehen, wobei sich zeigt, dass die Bewertungen fast das gesamte Spektrum umfassen, sodass es auch Studierende gibt, die verschiedene FPGAs miteinander vergleichen.

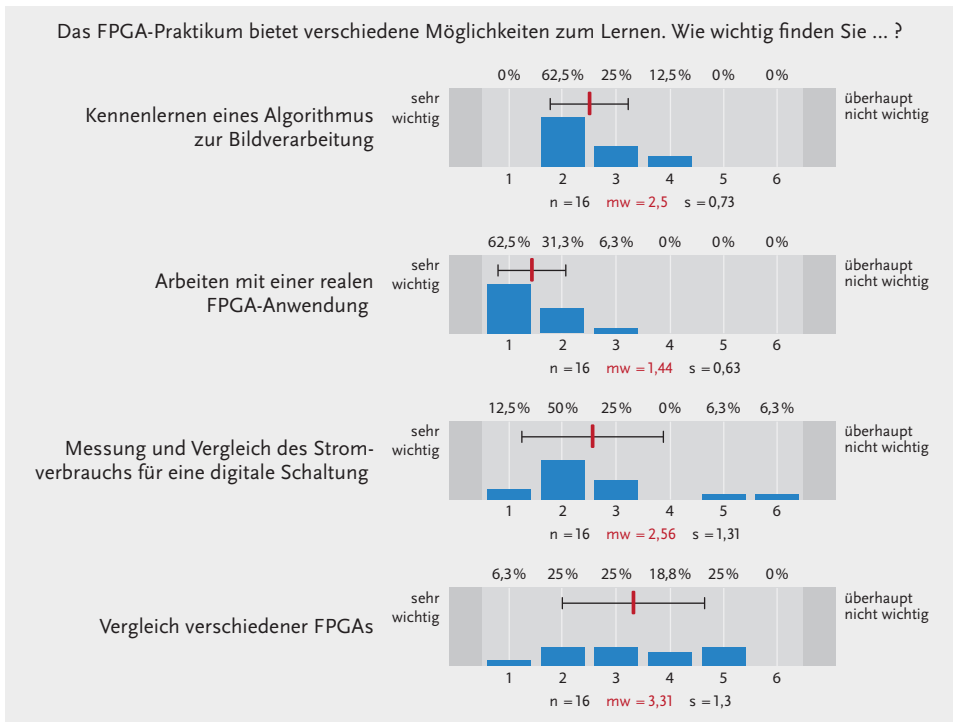


Abbildung 5: Studentische Befragung zur Wichtigkeit der Versuchsoptionen (n = 16)

### Fragen mit Freitextantworten

In Freitexten können die Studierenden angeben, was ihnen am Remote-Labor gefällt. Genannt wurden zeitliche Flexibilität bei der Versuchsdurchführung, zusätzliche Versuche für besonders interessierte Studierende und erneute Versuchsdurchführung bei weniger erfolgreichem Präsenztermin.

Außerdem wurde nach Verbesserungsvorschlägen gefragt. Hier wurde vor allem Feedback zur Bedienung des Remote-Labors genannt, das im Rahmen der Systempflege teilweise berücksichtigt werden konnte (Schwandt & Winzker, 2019).

## Analyse von Nutzungszahlen des Remote-Labors

Eine quantitative Analyse der Nutzung erfolgt durch die Protokollierung der Anmeldevorgänge und der Aktivitäten bei der Nutzung des Remote-Labor. In diesem Kapitel wird die Nutzung im Sommersemester 2019 analysiert.

### Praktikumsteilnahmen und Registrierung für Remote-Labor

Insgesamt wurden 61 Testate vergeben, und dies wird als Grundgesamtheit der aktiv teilnehmenden Studierenden gerechnet. Daraus erfolgten 16 Registrierungen für das

Remote-Labor.<sup>3</sup> Da Studierende in Zweier-Gruppen am Praktikum teilnehmen, können je Registrierung zwei Personen die Versuche durchführen.

Um eine Abschätzung der Nutzung zu errechnen, wird angenommen, dass pro Registrierung im Mittel 1,5 Studierende mit dem Remote-Labor arbeiten. Daraus ergibt sich, dass etwa 40 Prozent der Studierenden auf das Remote-Labor zugegriffen haben:

$$\frac{16 \text{ Registrierungen} \cdot 1,5 \text{ Studierende/Registrierung}}{61 \text{ Studierende}} * 100 \% = 39 \%$$

### Systemanmeldungen und Upload von Binärdateien

Insgesamt wurde von den 16 Nutzerkonten 227mal eine Reservierung vorgenommen, also der Zeitraum von fünf Minuten für Laborexperimente gestartet. Dabei wurde 263mal eine Binärdatei hochgeladen. Pro Reservierung können mehrere Binärdateien hochgeladen werden; es ist jedoch auch möglich, dass keine Binärdatei hochgeladen wird, beispielsweise, wenn lediglich die Reservierung ausprobiert wird.

Die Auswahl des FPGAs erlaubt Rückschlüsse auf die Art des Experiments. Im Präsenzpraktikum wird das ältere Cyclone IV FPGA verwendet, und wenn auch im Remote-Labor dieses FPGA genutzt wird, werden vermutlich Versuche aus dem Präsenzlabor vor- oder nachbereitet. Bei Verwendung des neueren Cyclone V FPGAs erfolgt wahrscheinlich ein Vergleich der beiden FPGAs.

Die Auswertung zeigt, dass beide FPGAs fast gleich häufig verwendet wurden: 128mal wurde das Cyclone IV verwendet und damit Experimente aus dem Präsenzlabor ins Remote-Labor verlagert, und 135mal wurde das Cyclone V verwendet und somit ein Versuch durchgeführt, der nur mit dem Remote-Labor möglich ist.

Zur genaueren Analyse wird unterschieden, welche Bausteine durch die 16 Nutzerkonten verwendet wurden. Einem Nutzerkonto entsprechen, wie erläutert, ein oder zwei Studierende.

- 4 Nutzerkonten verwenden nur das Cyclone IV und somit **Versuche aus dem Präsenzlabor**,
- 4 Nutzerkonten verwenden nur das Cyclone V und somit **Versuche zusätzlich zum Präsenzlabor**,
- 3 Nutzerkonten verwenden beide FPGAs und arbeiten **umfassend mit dem Remote-Labor**,
- 5 Nutzerkonten haben keine Binärdatei hochgeladen und somit **den Zugriff auf das Remote-Labor ausprobiert**.

---

3 Ein Zugriff direkt aus dem Lernmanagementsystem (LMS) der Hochschule ist prinzipiell möglich, wurde aber zunächst nicht umgesetzt. Studierende registrieren sich direkt im Remote-Labor.

### Nutzungszeiten des Remote-Labors

Ebenfalls wurde betrachtet, zu welchen Zeiten Studierende das Remote-Labor nutzen. Dabei wurde erneut gezählt, wie oft eine eigene Binärdatei hochgeladen wurde und neben der Uhrzeit (in Stundenschritten) zusätzlich zwischen den Wochentagen Montag bis Freitag und dem Wochenende unterschieden.<sup>4</sup>

Bild 6 zeigt die Verteilung der insgesamt 263 Uploads auf Uhrzeiten und Tage. Bezüglich der Uhrzeiten arbeiten Studierende hauptsächlich am Abend mit Schwerpunkt um 20 Uhr mit dem Remote-Labor. Aber auch vormittags mit Schwerpunkt um 11 Uhr sowie am späten Abend mit Schwerpunkt um 1 Uhr wird das Remote-Labor häufig genutzt. Bezogen auf die Wochentage kann festgestellt werden, dass Studierende hauptsächlich in der Woche (243 Uploads) und weniger am Wochenende (20 Uploads) arbeiten.

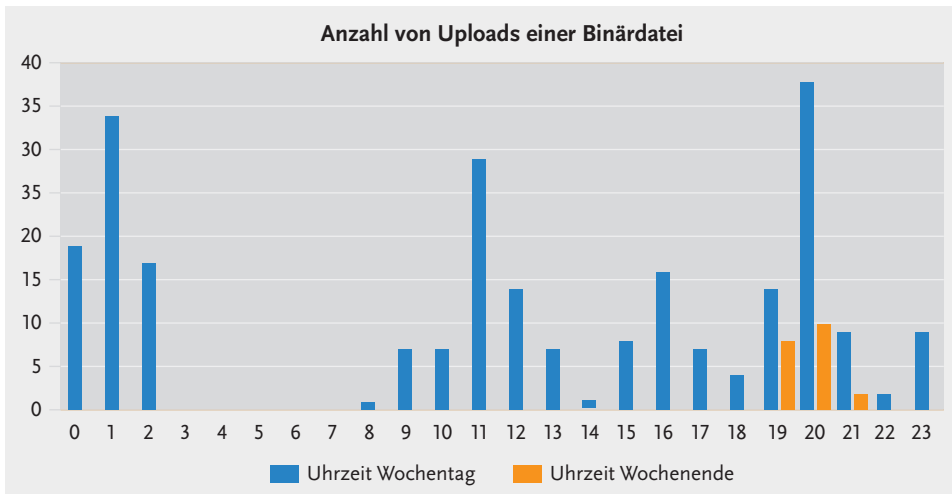


Abbildung 6: Aktive Nutzung des Remote-Labors nach Uhrzeit und Tagen (263 Uploads)

Bei der Interpretation der Nutzungszeiten muss beachtet werden, dass durch E-Learning unterstützte Lehrangebote noch kein Standard sind und insbesondere das hier betrachtete Remote-Labor das momentan einzige unserer Hochschule ist. Wenn zukünftig ein höherer Anteil an digital angereicherten Lehrveranstaltungen angeboten wird (Handke, 2017) und weitere Remote-Labore im Studienverlauf genutzt werden, wird sich das Nutzungsverhalten der Studierenden möglicherweise ändern.

### Wahl der Laborversuche

Das Remote-Labor kann nicht direkt erkennen, welcher der Versuche (A, B, C) durchgeführt wird. Der Quellcode für die Versuche wird auf dem Rechner der Studierenden in eine Binärdatei übersetzt, und dieses Binärformat ist vom FPGA-Her-

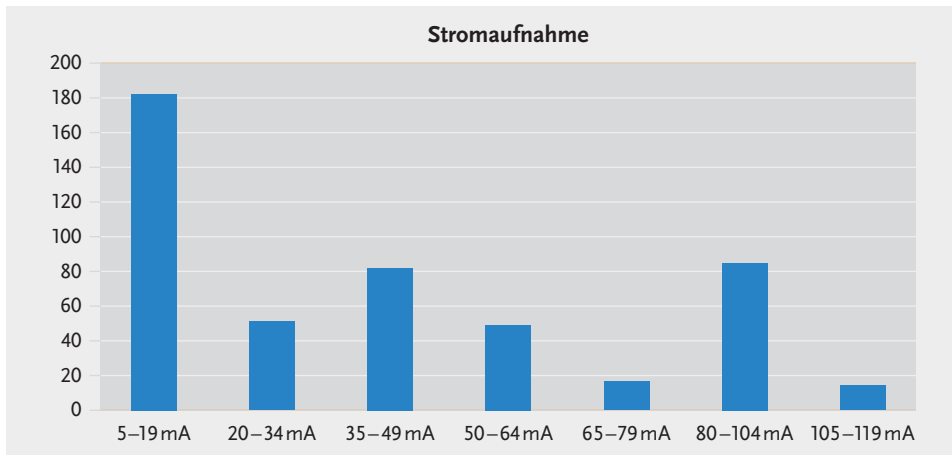
<sup>4</sup> Die Auswertung erfolgt entsprechend des Stundenwerts beim Start des Experiments, das heißt die Zeiten 19:00 bis 19:59 Uhr werden zum Stundenwert 19 Uhr.

steller nicht dokumentiert. Zur Analyse kann jedoch das Verhalten des FPGAs im Experiment genutzt werden. Zum einen erzeugen die Laborversuche Ausgangsbilder mit unterschiedlichen Charakteristiken (vergleiche Bild 3), zum anderen ergeben die Laborversuche unterschiedliche Verlustleistungen, die eine Identifikation ermöglichen.

Im vorliegenden Labor wird die Stromaufnahme des FPGA protokolliert. Aus diesem Wert in der Einheit Milliampere (mA) berechnet sich durch Multiplikation mit der Spannung die Verlustleistung. Die beiden FPGAs haben unterschiedliche Stromaufnahmen und Verlustleistungen, und hier soll das Cyclone IV betrachtet werden.

Für Versuch A beträgt die Stromaufnahme etwa 10 mA, für Versuch C etwa 40 bis 45 mA. Bei Versuch B variiert sie abhängig von der Anzahl der Registerstufen. Die Zuordnung von Versuch zu Stromaufnahme ist somit nicht eindeutig, aber dennoch eine gute Indikation für die durchgeführten Versuche.

Für die 135 Binärdateien, die auf dem Cyclone IV programmiert wurden, erfolgten 479 Messungen. Messungen erfolgen direkt nach dem Upload der Binärdatei, nach Änderung des Eingangsbildes, Betätigung eines Schalters oder durch eine Schaltfläche zum Wiederholen der Messung. Bild 7 zeigt die Verteilung der Messwerte in Bereichen mit Schrittweite von jeweils 15 mA.



**Abbildung 7:** Häufigkeit der Messwerte im Remote-Labor (479 Messungen)

Das wichtigste Ergebnis ist, dass eine große Bandbreite an Messwerten auftritt. Daraus folgt, dass Studierende Versuche mit unterschiedlicher Stromaufnahme und somit unterschiedlicher Schaltungskomplexität durchgeführt haben.

Der erste Bereich (5–19 mA) tritt am häufigsten auf und enthält Experimente mit Versuch A. Der dritte Bereich (35–49 mA) enthält Experimente mit Versuch C und ist ebenfalls häufig verwendet. Messwerte für Versuch B sind in allen Bereichen enthalten, und die Werte von 80 mA und größer zeigen, dass Studierende versuchen, das FPGA mit hoher Anzahl an Registerstufen zu programmieren.

## Nutzung während der Corona-Pandemie

Im Sommersemester 2020 kehrte sich durch die Corona-Pandemie das Verhältnis von Präsenzlehre und Online-Lehre um und die Praktikumsdurchführung per Remote-Labor wurde der Normalfall. Studierende können dabei sowohl eine Betreuung per Videokonferenz zu festen Zeiten nutzen als auch unabhängig von Betreuungszeiten arbeiten.

Um Studierende ohne eigenen Computer nicht auszuschließen, wird für einen späteren Zeitpunkt auch ein Praktikum im Präsenzlabor mit besonderen Hygienemaßnahmen angeboten. Zum momentanen Zeitpunkt (Ende Mai 2020) haben 19 Studierende am Remote-Labor teilgenommen, nur 1 Student hat sich für Präsenztermine angemeldet. Die Beteiligung von 95 Prozent zeigt eine hohe Akzeptanz des Remote-Labors. Da das Semester noch nicht abgeschlossen ist, ist es für eine weitergehende Beurteilung noch zu früh.

## Fazit

Der Beitrag zeigt, wie ein Remote-Labor als Ergänzung zum Präsenzlabor eingesetzt und die zeitliche Beschränkung für die Arbeit im Praktikum aufgehoben wird. Studierende können jederzeit auf die Versuchsanordnung zugreifen, wodurch Selbstorganisation und Eigenverantwortung ermöglicht werden. Außerdem können Studierende verschiedene Bauelemente der Digitaltechnik vergleichen und somit Lernziele erreichen, die ohne Remote-Labor nur mit hohem Aufwand erreichbar wären.

Die Befragung der Studierenden zeigt, dass diese Art der Praktikumsdurchführung von den Studierenden akzeptiert wird. Eine Mehrzahl der Befragten könnte sich vorstellen, dass einige Praktikumsversuche im Studienverlauf komplett in ein Remote-Labor verlagert werden. Und auch die Nutzungszahlen belegen die Akzeptanz von Remote-Laboren.

Für den didaktischen Einsatz in einer Lehrveranstaltung wird aufgezeigt, wie die Aufgabenstellung eine sich ergänzende Nutzung von Präsenzlabor und Remote-Labor ermöglicht. Dabei sind insbesondere transparente Anforderungen an die Studierenden sinnvoll. Die Teilnahme an einem einführenden Präsenztermin, Überprüfung von Login-Zeiten und ein kurzer Bericht belegen die aktive Teilnahme am Praktikum und werden durch Testat bestätigt.

Während der Corona-Pandemie wurde das bislang optionale Remote-Labor zum Ersatz des Präsenzlabor. Nach den noch vorläufigen Erfahrungen ist dieses Einsatzszenario sehr gut umsetzbar und wird von den Studierenden akzeptiert. Es ist daher gut möglich, zukünftig vermehrt Remote-Labore einzusetzen, auch, wenn nach dem Ende der Corona-Pandemie Präsenzlabor wieder ohne Einschränkungen möglich sein werden.

## Literaturverzeichnis

- AbuShanab, S. (2018). *Remote and on-site laboratory system for low-power digital circuit design*. Siegen. <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:hbz:467-13459> URN: urn:nbn:de:hbz:467-13459
- Franuszkiewicz, J.; Frye, S.; Terkowsky, C. & Heix, S. (2019). Flexibles und selbstorganisiertes Lernen im Labor – Remote-Labore in der Hochschullehre. *Zeitschrift für Hochschulentwicklung* 14 (3), 273–285. doi: 10.3217/zfhe-14-03/16.
- Froyd, J. E.; Wankat, P. C. & Smith, K. A. (2012). Five Major Shifts in 100 Years of Engineering Education. *Proc. IEEE 100 (Special Centennial Issue)*, 1344–1360. doi: 10.1109/JPROC.2012.2190167.
- García-Zubía, J.; Angulo, I.; Orduna, P.; Lopez-de-Ipina, D.; Hernández, U.; Rodríguez, L.; Dziabenko, O. & Canivell, V. (2012). Weblab-Deusto-CPLD: A Practical Experience. *International Journal of Online and Biomedical Engineering (IJOE)*, 8(S1), 17–18.
- Handke, J. (2017). *Handbuch Hochschullehre Digital. Leitfaden für eine moderne und medien-gerechte Lehre. 2., überarbeitete Auflage*. Baden-Baden: Tectum Verlag. doi: 10.5771/9783828867819.
- Intel Press Release (2015). *Audi Selects Altera SoC FPGA for Production Vehicles with 'Piloted Driving' Capability*. Verfügbar unter <https://newsroom.intel.com/news-releases/audi-selects-altera-soc-fpga-production-vehicles-piloted-driving-capability/> [29.05.2020]
- Kirchherr, J.; Klier, J.; Lehmann-Brauns, C. & Winde, M. (2019). *Future Skills: Welche Kompetenzen in Deutschland fehlen*. Berlin: Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft e. V.
- Mayoz, C. A.; da Silva Beraldo, A. L.; Villar-Martinez, A.; Rodriguez-Gil, L.; de Souza Seron, W. F. M.; de Oliveira, T. & Orduña, P. (2020). FPGA Remote Laboratory: experience in UPNA and UNIFESP. In: Auer M., May D. (eds) *Cross Reality and Data Science in Engineering. REV 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 1231. Springer, Cham. doi: 10.1007/978-3-030-52575-0\_9
- Schwandt, A. & Winzker, M. (2017). Modular evaluation system for low-power applications: Educating undergraduate students in advanced digital design. In *ICECS 2017. 24th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems*, S. 364–367. doi: 10.1109/ICECS.2017.8292111.
- Schwandt, A. & Winzker, M. (2019). Make it Open – Improving Usability and Availability of an FPGA Remote Lab. In: *Proceedings of 2019 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*, S. 232–236. doi: 10.1109/EDUCON.2019.8725098.
- Winzker, M. (2018). *Behind the Scenes of the FPGA Remote Lab*. Verfügbar unter <https://youtu.be/RjiaqSRyPuw> [29.05.2020].
- Winzker, M. & Schwandt, A. (2019). Open Education Teaching Unit for Low-Power Design and FPGA Image Processing. In *Proceedings of 2019 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE)*. doi: 10.1109/FIE43999.2019.9028694.



- Wuttke, H.-D.; Hamann, M. & Henke, K. (2015). Integration of Remote and Virtual Laboratories in the Educational Process. In *Proceedings of 2015 12th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV)*. doi: 10.1109/REV.2015.7087283.
- Zhu, Y.; Weng, T. & Cheng, C.-K. (2009). Enhancing Learning Effectiveness in Digital Design Courses Through the Use of Programmable Logic Boards. *IEEE Trans. Educ.* 52 (1), S. 151–156. doi: 10.1109/TE.2008.921796.

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Nutzung des Remote-Labors per Internetzugriff .....	178
Abb. 2	Benutzerinterface für das Remote-Labor .....	180
Abb. 3	Eingangsbild und drei Ausgangsbilder für Versuche A, B, C .....	180
Abb. 4	Studentische Befragung zur Akzeptanz des Remote-Labors .....	184
Abb. 5	Studentische Befragung zur Wichtigkeit der Versuchsoptionen .....	185
Abb. 6	Aktive Nutzung des Remote-Labors nach Uhrzeit und Tagen .....	187
Abb. 7	Häufigkeit der Messwerte im Remote-Labor .....	188