

Das Experiment und die eLTR-Technologien: Magnetismus in Virtuellen Laboren und Remote-Experimenten

Sabina Jeschke (sabina@math.tu-berlin.de)
Thomas Richter (thor@math.tu-berlin.de)
Harald Scheel (harry@physik.tu-berlin.de)
Ruedi Seiler (seiler@math.tu-berlin.de)
Christian Thomsen (thomsen@physik.tu-berlin.de)

Abstract: eLearning nimmt an Universitäten einen immer größeren Stellenwert in der akademischen Lehrmethodik ein. Das ist einesteils in den neuartigen pädagogischen Konzepten interaktiver Lernsysteme begründet, es hat seine Ursachen jedoch auch darin, dass mit Hilfe von eLearning-Technologien vielfach wesentlich größere Studierendenzahlen erreicht und vor allem aktiv in den Unterricht eingebunden werden können. Wir stellen ein neuartiges Lehrkonzept vor, das – mit Hilfe der Neuen Medien und neuen Technologien – den Studierenden ermöglicht, mit Hilfe von Experimenten sowohl theoretische als auch experimentelle Aspekte eines Gebietes zu erkunden. Wir diskutieren dieses Konzept am Modell des Ferromagnetismus, das – als ein wichtiges und prominentes Beispiel für einen Phasenübergang – nicht nur einen Teil der Grundlagenausbildung von Physikstudierenden, sondern auch einen Bestandteil jeder ingenieurwissenschaftlichen Ausbildung darstellt.

1 Hintergrund

Natur- und ingenieurwissenschaftliche Methodik zeichnet sich durch die Kombination von Experiment und Theorie aus. Eine große Herausforderung ist deshalb, eLearning und eTeaching-Szenarien zu realisieren, die das Zusammenwirken dieser beiden Konzepte adäquat widerspiegeln. Dabei ist die Rolle des Experiments für die theoretischen und die experimentellen Teilgebiete dieser Disziplinen durchaus verschieden: In den theoretischen Teildisziplinen ermöglichen Experimente in virtuellen Räumen eine neue Möglichkeit, abstrakte Konzepte zu demonstrieren und “greifbar” zu machen. Während jedoch in diesen theoretischen Bereichen reine Simulationen durchaus ausreichend sind und dies im Allgemeinen die einzigen zur Verfügung stehenden Experimentmöglichkeiten darstellen, gilt dies nicht für die experimentellen Teilgebiete: Hier ist es entscheidend, sowohl das “eigentliche” Phänomen mittels einer abstrahierten Darstellung zugänglich zu machen, als auch, Studierenden Zugang zu dem realen Experiment mit realistischem Versuchsaufbau, Benutzung realer Geräte und typischen Messfehlern zu ermöglichen.

Am Beispiel der Physik der Phasenübergänge in ferromagnetischen Materialien stellen wir hier die Kombination von einerseits abstrakten, andererseits experimentellen Zugängen zu diesem Gebiet innerhalb von eLearning- und eTeaching-Szenarien vor.

2 Eine kurze Einführung in die Physik der Phasenübergänge

Heuristisch versteht man unter einem Phasenübergang eine plötzliche, qualitative Veränderung des Verhaltens eines Vielteilchensystems bei Über- oder Unterschreiten gewisser Schwellenwerte äußerer Parameter. Phasenübergänge sind keinesfalls vereinzelte pathologische Phänomene, sondern finden in sehr vielen und sehr unterschiedlichen Systemen statt. Theoretiker untersuchen insbesondere die gemeinsamen, charakteristischen Größen von Materialien im Bereich des Phasenübergangs. Bereits einfache magnetische Systeme zeigen Phasenübergänge verschiedener Komplexität. Eines der bekanntesten magnetischen Systeme ist das sogenannte “Ising-Modell” [Isi25], das sowohl in ein, zwei oder höheren Dimensionen intensiv untersucht wurde. In seiner relativen Einfachheit erlaubt es Fokussierung auf den zentralen Kern der Theorie und ist deshalb in besonderer Weise geeignet, Studierenden eine Einsicht in die Physik der Phasenübergänge zu vermitteln. Viele Eigenschaften des Ising-Modells können exakt gezeigt werden, für andere existieren vielfach – mehr oder weniger scharfe – analytische Abschätzungen [Nol01]. Wird allerdings ein magnetisches Feld angelegt, so können viele Systemeigenschaften nur noch im Rahmen von Simulationen numerisch gezeigt werden. Die Untersuchung magnetischer Systeme umfasst also analytische Zugänge, numerische Studien und “reale Experimente”, die in dem hier vorgestellten Konzept in *einem* Lernszenario innerhalb *einer* eLearning-Umgebung integriert werden.

Die Theorie der Phasenübergänge wird oft mittels sogenannter *zellulärer Automaten* untersucht [TM87], die eine wichtige Untersuchungsmethodik für die Untersuchung vielzähliger Phänomene der statistischen Physik darstellen. Zelluläre Automaten ermöglichen beispielsweise die Bestimmung der “Curie-Temperatur”, definiert als Temperatur, an der das ferromagnetische Verhalten verschwindet, und der kritischen Exponenten, die das Verhalten gewissen Parameter nahe dem Phasenübergang beschreiben [SA95, Tho02]. Ebenso kann die Hysteresekurve für verschiedene Temperaturen ermittelt werden, der Zusammenhang zwischen freier Energie und Magnetisierung kann erläutert werden, um nur einige Anwendungen zu nennen.

Entsprechende Untersuchungen können nun auch als “reale Experimente” durchgeführt werden. Damit wird für den Studierenden der Vergleich zwischen der numerischen Simulation, also des idealisierten Modells, und dem realen Systemverhalten möglich und damit eine Beurteilung der Qualität des theoretischen Modells in Hinblick auf das reale Systemverhalten. Die enge Kombination virtueller und realer Experimente ist damit von entscheidender Bedeutung für eine qualitativ hochwertige Ausbildung, und es wird deutlich, dass hybride eLearning-Umgebungen benötigt werden, die diese Zugänge zusammenzuführen.

3 Phasenübergänge in Virtuellen Laboren

Das **Virtuelle Labor VideoEasel** [Ric], entwickelt an der TU Berlin, fokussiert inhaltlich auf das Gebiet der statistischen Physik. Die frei programmierbare Plattform ermöglicht derzeit die Simulation verschiedener Modelle der statistischen Mechanik, darunter diverse Gittergasmodelle, Bildentrauschungstechniken und Experimente zu Random Walks. Mit Hilfe virtueller Messtools, die frei an Experimente an- und abgekoppelt werden können, können Magnetisierung, Entropie, freie Energie und andere Messgrößen während des laufenden Experiments ermittelt werden. Bei Experimenten hoher Komplexität können die Messresultate zur weiteren Analyse automatisch an Computer-Algebra-Systeme übermittelt werden. Um die Kooperation zwischen Lehrenden und Studierenden bzw. den Studierenden untereinander zu ermöglichen, erlaubt die **VideoEasel**-Architektur verteilte Messprozesse an einem Experiment, d.h. Gruppen von Studierenden können gemeinsam an einem Experiment von verteilten, evtl. sogar räumlich getrennten Arbeitsplätzen aus messen, vergl. [JRS05] für technische Details.

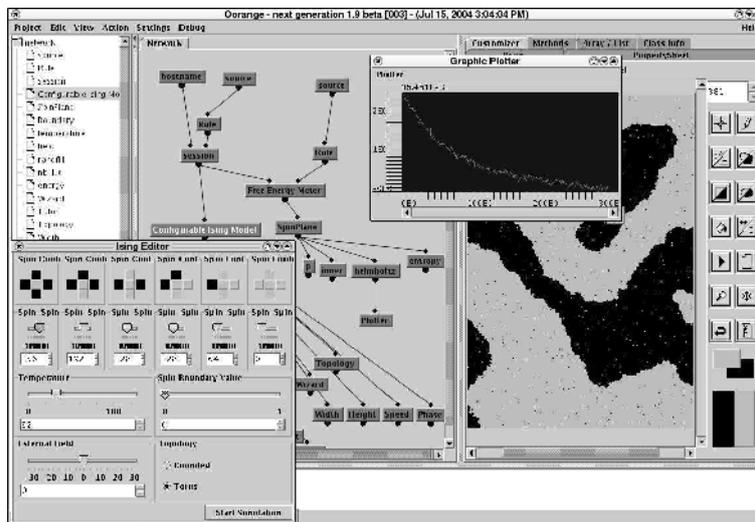


Abbildung 1: Phasenübergänge in Virtuellen Laboren

Ein typisches Experiment ist die Messung der Hystereseurve des Ising-Modells: Zunächst wird die Simulation gestartet. Eine Probe als Teilgebiet der Spinkonfiguration wird markiert, in der die Magnetisierung gemessen wird. Das User-Interface erlaubt nun die Variation der Parameter des Modells, etwa der Stärke des externen Magnetfeldes. Integrieren eines Plotters, der die Magnetisierung über dem externen Feld aufträgt, visualisiert die Hystereseurve. Durch Variation der Temperatur wird der Phasenübergang des Modells sichtbar. Das Virtuelle Labor ist zudem in der Lage, Experimente am Ising-Modell zu realisieren, die im realen Experiment kaum möglich wären: Variation der Randbedingungen zeigt deren Einfluss auf die spontane Magnetisierung des Modells, diese Ergebnisse

können nun wiederum mit den theoretischen Ergebnissen des Peierls-Arguments [Pei36] verglichen werden.

Durch Ankopplung an externe Computer-Algebra-Systeme wie Maple oder durch Steuerung mittels Script-Sprachen wie Python lassen sich auch komplexere Messaufgaben realisieren und automatisieren. Entsprechende Erweiterungen für Maple oder Python liegen als externe Bibliotheken beider Softwarepakete vor.

4 Die Untersuchung von Phasenübergängen im Remote-Experiment

Im Gegensatz zu Experimenten in Virtuellen Laboren sind **Remote-Experimente** reale Experimente, die von einem Standort außerhalb des Labors kontrolliert werden. Remote-Experimente bestehen aus zwei zentralen Komponenten, dem eigentlichen Versuchsaufbau einerseits und andererseits der Technologie, die den Remote-Zugriff ermöglicht. In unseren Remote-Experimenten an der TU Berlin wird die Software Labview (National Instruments) eingesetzt, um die Hardware zu kontrollieren und die gemessenen Daten zu speichern. Labview verfügt über ein Web-Interface, um dem Experimentator die Veränderung der Parameter zu ermöglichen. Ein frei verfügbares Browser-Plugin ermöglicht es, das Experiment verfolgen und kontrollieren zu können. Es erlaubt einem Studierenden die Steuerung des Experimentes zu übernehmen, und zeitgleich fast beliebig vielen anderen Studenten die Beobachtung des laufenden Experimentes. Eine Begrenzung der Teilnehmerzahl ist hierbei nur durch die verfügbare Bandbreite der Internetanbindung gegeben. Nach einer bestimmten Zeit kann die Kontrolle über das Experiment an einen weiteren Experimentatoren übergeben werden. Aufgrund der modularen Software-Architektur von Labview können Remote-Experimente leicht kombiniert und erweitert werden [TSM05]. Im vorgestellten Experiment könnte zum Beispiel die Temperaturabhängigkeit des Phasenüberganges ohne größeren Aufwand implementiert werden.

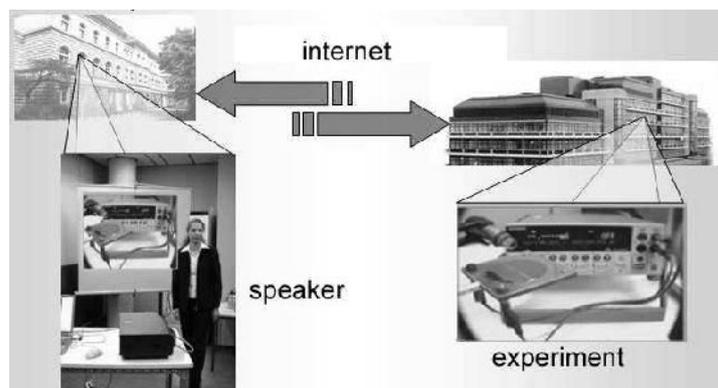


Abbildung 2: Schematische Darstellung eines Remote-Experiments

Wir führen nun das im vorangegangenen Kapitel beschriebene Experiment der Messung der Hysteresekurve als Remote-Experiment durch: Eine Magnetspule generiert ein Magnetfeld proportional zu dem sie durchströmenden elektrischen Strom, dieser wird durch einen Computer aufgezeichnet. Das Magnetfeld magnetisiert einen ferromagnetischen Eisenkern, dessen Magnetisierung durch eine Hall-Sonde gemessen wird. Die gemessenen Werte werden mit Hilfe eines üblichen Multimeters digitalisiert und über eine digitale Schnittstelle an das Computersystem zurückgeliefert. Abbildung 3 zeigt ein mögliches Ergebnis des Experiments, wobei die magnetische Induktion über dem Spulenstrom aufgetragen ist. Der Vergleich dieser Ergebnisse mit denen des theoretischen Modells ermöglicht dem Studierenden tiefe Einsichten in die theoretischen Hintergründe und vermittelt so auch Konzepte zur Modellbildung realer physikalischer Phänomene. Dort, wo theoretisches Modell und reales Experiment nicht übereinstimmen, werden die Grenzen der gewählten Modellbildung sichtbar.

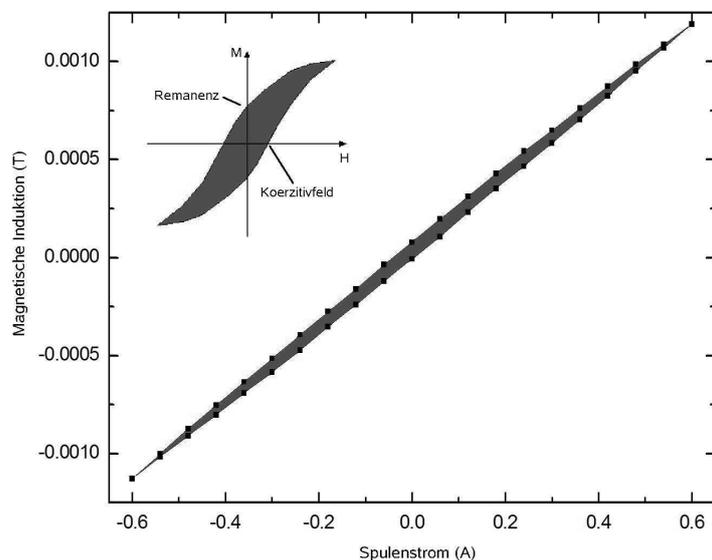


Abbildung 3: Die Hystereseschleife im Remote-Experiment

5 Evaluation Virtueller Labore in der Ausbildung

Im Rahmen des Kurses “Mathematische Physik II” an der TU Berlin wurde das oben besprochene virtuelle Labor VideoEasel bereits im Übungsbetrieb eingesetzt. Studienobjekt war hier, genau wie in diesem Artikel beschrieben, das Ising-Modell. Entsprechend dem Vorgehen der Vorlesung wurden Hausaufgaben erstellt, in denen Studenten gebeten wurden, mit Hilfe des Labors die kritische Temperatur, die Hysteresekurve, den Einfluss der Randbedingung und freie Energie sowie Magnetisierung zu vermessen, die erhaltenen

Kurven zu diskutieren und mit dem Inhalt der Vorlesung zu vergleichen.

Abbildung 4 zeigt exemplarisch die hierbei entstandenen Resultate einer Arbeitsgruppe zur Vermessung der freien Energie und Magnetisierung eines Ising-Modells in Abhängigkeit von Temperatur und äußerem Magnetfeld. Aufgetragen sind hier links die freie Energie, rechts die Magnetisierung als Funktionen des äußeren Magnetfeldes, verschiedene Farben, auch am linken Rand notiert, codieren die Temperatur.

In der Mehrzahl der Fälle vermuteten die einzelnen Arbeitsgruppe aufgrund dieser Graphen richtigerweise einen differenziellen Zusammenhang zwischen Magnetisierung und freier Energie – mehrere Gruppen waren darüber hinaus selbständig in der Lage, einen kurzen Beweis dafür zu erbringen, dass dieser Zusammenhang in der Tat für den Gibbs-Zustand des Ising-Modelles gilt. (Beweise wurden in der Aufgabenstellung bisher nicht explizit eingefordert.)

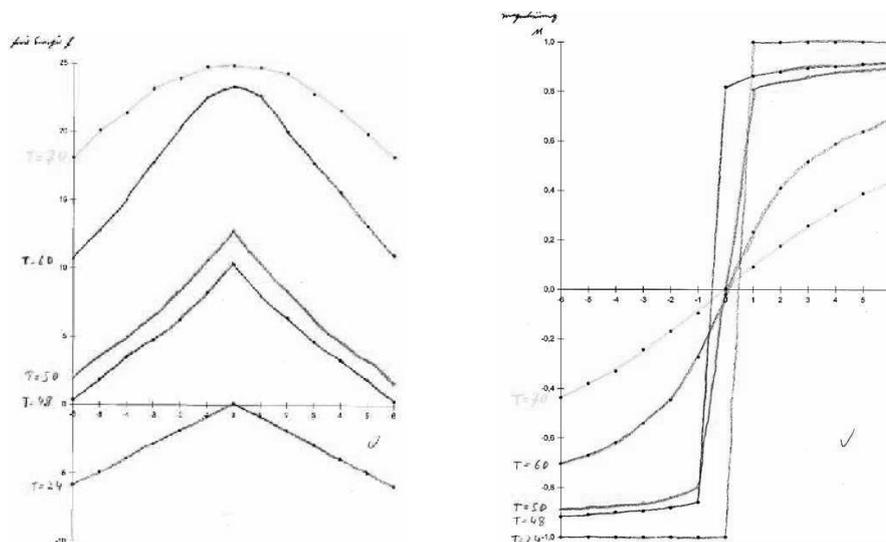


Abbildung 4: Studentische Auswertung eines Experiments: Freie Energie und Magnetisierung

Eine anonyme schriftliche Befragung der Studenten im Anschluss an die Übungseinheiten erbrachte, dass die Mehrzahl der Studenten die Arbeit am Labor als sehr motivierend und lehrreich einstufte, weil die in der Vorlesung vermittelten Konzepte selbständig experimentell erfahrbar wurden. Ein weiteres interessantes Resultat war das spontane Interesse vieler Studenten für die *mathematischen Grundlagen der verwendeten Simulation* (die jedoch nicht Gegenstand der Vorlesung "Mathematische Physik" sind und somit nicht besprochen wurden) – hier wurde deutlich, dass Experimente in virtuellen Laboren dazu beitragen können, Interesse von Lernenden über den – oft engen – Rahmen des vorgegebenen Pflicht-Curriculums hinaus anzuregen.

6 Remote-Experimente in der Ausbildung

Das Remote-Experiment zur Hysterese ist zusammen mit einem zweiten Experiment zur Vermessung einer Solarzelle und weiteren multimedialen, internet-basierten Applets in die Lehrveranstaltung "Einführung in die Physik für Ingenieure" eingebunden. Sowohl in der Vorlesung als auch in der zugehörigen Übungsveranstaltung werden die Remote-Experimente eingesetzt, wobei die Demonstration in der Vorlesung einer üblichen Vorführung des jeweiligen Experimentes gleicht. In der Übungsveranstaltung haben die Studierenden jedoch die Möglichkeit, in kleinen Gruppen an Notebooks eigene Erfahrungen am zuvor erläuterten Experiment zu sammeln und selbsttätig zu experimentieren. Die Anbindung der Experimente an das Internet erlaubt dann eine eigenständige und vom Übungsleiter unabhängige Vertiefung der Experimente am eigenen PC, wie etwa durch Wahl anderer Parameter.

Auch in dieser Lehrveranstaltung wurden die Studierenden in einer anonymen Umfrage um ihre Meinungen und Anregungen gebeten. Ein Großteil der Befragten empfand den Einsatz der erläuterten Medien als eine sehr sinnvolle Komponente ihrer physikalischen Ausbildung. Viele der Befragten wünschen sich einen noch umfangreicheren Einsatz multimedialer Hilfsmittel in der Lehrveranstaltung.

7 Virtuelle Labore & Remote-Experimente – Gemeinsamkeiten und Unterschiede

Die in den Kapiteln 3 und 4 beschriebenen Beispiele illustrieren typische Setups eines Remote-Experiments und des entsprechenden virtualisierten Experiments in einem Virtuellen Labor. In beiden Szenarien reguliert der Experimentator einen Satz von Parametern, um so das Experiment zu kontrollieren und zu steuern, z.B. einen Motor, das magnetische Feld, oder – wie im Fall des Virtuellen Labors – auch die Randbedingungen. Zusätzlich existieren jeweils Messinstrumente zur Bestimmung etwa der Temperatur, der Magnetisierung, einer Rotationsfrequenz, mechanischer Kräfte etc. Es wird offensichtlich, dass beide Zugänge viele Gemeinsamkeiten besitzen, sich aber auch – durch ihre Unterschiede – bereichern: Remote-Experimente ermöglichen die Untersuchung realer Objekte und vermitteln experimentelle "hands-on"-Kompetenz, wozu Virtuelle Labore, quasi per Definition, nicht in der Lage sind. Andererseits sind Virtuelle Labore in der Lage, auch den komplexen Prozess des Versuchsaufbaus abzubilden; diese Art der Flexibilität ist wiederum in einem Remote-Experiment sehr eingeschränkt.

Wie in den Kapiteln 5 und 6 beschrieben, werden beide Technologien von verschiedenen Benutzergruppen zu verschiedenen Zwecken eingesetzt: vom Dozenten zur Vorführung von Demonstrationsexperimenten, von Studierenden zur Durchführung von Experimenten in Übungsgruppen, oder zum eigenständigen Experimentieren. Die Vielfalt der Einsatzzwecke muss dabei durch die Architektur der jeweiligen Software adressiert werden, um den verschiedenen Ansprüchen in diesen Einsatzgebieten gerecht zu werden: Die hier vorgestellten virtuellen Labore verfügen demnach auch über mehr als ein Benutzerinterface,

siehe etwa [JRS05] für eine weiterführende Diskussion der Software-Architektur.

8 Zusammenfassung

Die Durchführung von Experimenten in eLearning-Szenarien berührt vielfältige Aspekte des Lernprozesses natur- bzw. ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, von der tatsächlichen Messung physikalischer Größen über die Erfahrung im Umgang mit realen Experimentierumgebungen bis hin zur Betrachtung des entsprechenden theoretischen Modells des untersuchten physikalischen Phänomens. Obwohl – oder besser: gerade weil – diese beiden Systeme nicht identisch sind (welches Modell ist vollständig identisch zu seinem physikalischen Gegenstück?), unterstützt die Kombination von Remote-Experimenten und Simulationen in einzigartiger Weise den wissenschaftlichen Verständnisprozess, der für Naturwissenschaftler und Ingenieure von entscheidender Bedeutung ist.

Unsere bisherige Erfahrung beim Einsatz beider Technologien in der Lehre sind durchweg positiv: Studierende nehmen sie nicht nur als Teil ihrer Ausbildung an und vermögen sie zu nutzen, sondern fühlen sich auch durch die hierbei gemessenen und erlebten Phänomene über das normale Maß hinaus motiviert, die tieferliegenden Grundlagen selbständig zu ergründen.

Literatur

- [Isi25] E. Ising. Beitrag zur Theorie des Ferromagnetismus. *Zeitschrift für Physik*, 31, 1925.
- [JRS05] S. Jeschke, T. Richter und R. Seiler. VideoEasel: Architecture of Virtual Laboratories on Mathematics and Natural Sciences. Proceedings of the 3rd International Conference on Multimedia and ICTs in Education, June 7-10, 2005, Careres/Spain, June 2005.
- [LS72] L.L. Liu und H.E. Stanley. Some Results Concerning the Crossover Behavior of Quasi-Two Dimensional and Quasi-One Dimensional Systems. *Phys. Rev. Lett.*, 29:927, 1972.
- [Nol01] W. Nolting. *Grundkurs: Theoretische Physik*, Jgg. 6. Springer, 2001.
- [Pei36] R. Peierls. *On Ising's model of ferromagnetism*, *Proc. Camb. Philos. Soc.* 32, S. 477-82. 1. Auflage, 1936.
- [Ric] T. Richter. VideoEasel. <http://www.math.tu-berlin.de/thor/videoeasel>.
- [SA95] D. Stauffer und A. Aharony. *Perkolationstheorie (Eine Einführung)*. VCH-Verlag, 1. Auflage, Weinheim, 1995.
- [Tho02] C. Thomsen. Critical exponents and percolation thresholds in two-dimensional systems with a finite interplane coupling. *Phys. Rev. E*, 65:065104, 2002.
- [TM87] T. Toffoli und N. Margolus. *Cellular Automata Machines*. MIT Press Cambridge, 1987.
- [TSM05] C. Thomsen, H. Scheel und S. Morgner. Remote Experiments in Experimental Physics. Proceedings of the ISPRS E-Learning 2005, June 1-3, Potsdam/Germany, June 2005.