Einleitung und Übersicht

Was ist Quantenelektronik?

Das Gebiet Quantenelektronik existiert erst seit der Erfindung des Lasers in 1960. Am 16. Mai 1960 wurde der erste Laser, ein sogenannter Rubinlaser, durch Theodore H. Maiman in den Hughes Research Laboratories, Malibu, Kalifornien, USA vorgeführt. Die Voraussetzung für diesen Erfolg war eine jahrelange Grundlagenforschung, die zurückging bis auf die Arbeit von Albert Einstein im Jahre 1916. In dieser Arbeit hatte er die Wechselwirkung von Atom und Licht untersucht und zwischen der spontanen und der stimulierten Emission von Licht durch Atome unterschieden - eine notwendige aber nicht ausreichende Erkenntnis für die Entwicklung des Lasers. Viele zusätzlichen Schritte mussten noch gemacht werden.

Laser ist eine Kurzbezeichnung und steht für : **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation. Die Erfindung des Lasers war ein grosser Durchbruch, aber es brauchte Zeit bis sich praktische Anwendungen durchsetzten. So wurde der Laser 1960 als "a solution looking for a problem" bezeichnet. Heute hat fast jeder Haushalt einen Laser in einem CD-Spieler. Wer hätte sich 1960 je vorstellen koennen, dass Laserlicht später einmal zum Musikhören verwendet wird? Natürlich gibt es noch eine Vielzahl von Anwendungen in der Forschung, Medizin, optischen Kommunikation, Materialbearbeitung u.s.w.

Das Gebiet **Quantenelektronik** umschreibt das Studium von Lasern oder elektromagnetische Strahlung ganz generell und ihre Wechselwirkung mit Materie. Wichtige Teildisziplinen sind zum Beispiel die Spektroskopie, nichtlineare Optik, Kurzzeitspektroskopie, Holographie, u.s.w. Diese Gebiete sind zum Teil nur durch den Laser ermöglicht worden.

Hier möge die Bemerkung genügen, dass das Laserlicht sich grundsätzlich vom Licht natürlicher Lampen unterscheidet. Könnten wir Licht hören, so nähmen wir das Licht herkömmlicher thermischer Lichtquellen (z.B. Glühbirne) als Rauschen wahr, Laserlicht hingegen als einen reinen Ton. Dies rührt daher, dass Laserlicht praktisch völlig kohärent ist, d.h. aus einem fast unendlich grossen, ununterbrochenen Wellenzug besteht. Diese hohe Kohärenz ist oft gekoppelt mit einer enorm hohen Intensität und einer starken Bündelung. Dies macht den Laser zu einem idealen Mittel für die spektroskopische Forschung, gibt aber auch Anlass zu grundsätzlich neuen

Phänomenen, von denen ein grosser Teil in der nichtlinearen Optik behandelt wird. Die Erzeugung äusserst kurzer Lichtblitze (d.h. Laserpulse) von weniger als 10 fs (10^{-14} s) Dauer und sehr hoher Intensität erlaubt u.a. die Untersuchung ultrakurzer Vorgänge in Festkörpern, Flüssigkeiten, Molekülen usw. Vergleicht man das kontinuierliche Licht von einem Laser mit einem lang andauernden Flötenton, so entspricht ein Laserpuls eher einem Trommelschlag. Meist folgen diese Pulse allerdings so schnell aufeinander, dass unser träges Auge meint, einen Lichtstrahl gleichbleibender, mittlerer Helligkeit zu sehen. Tatsächlich leuchten die einzelnen Pulse aber viel heller und sind durch Dunkelphasen getrennt. Ein wichtiges Anwendungsgebiet ist die Kurzzeitspektroskopie, mit der WissenschaftlerInnen rasche Zeitabläufe untersuchen: Genauso wie eine Photographin von einem vorbeirasenden Zug nur ein scharfes Bild erhält, wenn sie eine kurze Belichtungszeit wählt, werden extrem schnelle Prozessse mit ultrakurzen Lichtpulsen beleuchtet, um wie mit einem Stroboskop gezielte Schnappschüsse der rasch aufeinanderfolgenden Schritte abzulichten. Dadurch kann man zeitlich schnelle Prozesse beobachten, wie z.B. chemische Reaktionen, Kühlung eines Elektronengases in einem Festkörper usw., die durch keine andere Technik möglich sind. Im Vergleich dazu sind rein elektronische Messverfahren limitiert auf etwa 1 ps (10^{-12} s).

Klassische Behandlung der Quantenelektronik

Die Wechselwirkung von Laserlicht mit Materie kann auf verschiedenen Ebenen behandelt werden. In den meisten Fällen kann man beide, das Laserlicht und die Wechselwirkung mit der Materie, klassisch behandeln:

Geometrische Optik:

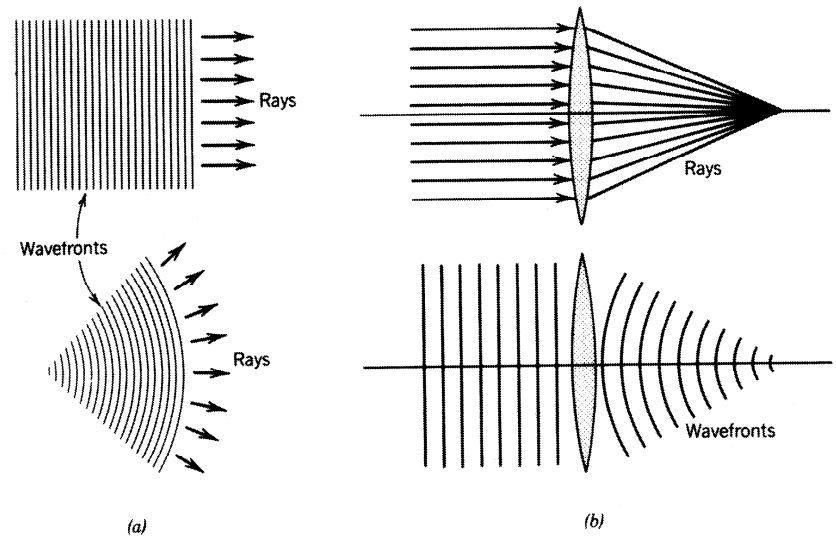

Fig. 1: (a) Strahlen ("rays") in der geometrischen Optik stehen senkrecht auf den Wellenfronten ("wave fronts") in der Wellenoptik, (b) Der Effekt von einer Linse auf Strahlen und Wellenfronten.

Die Ausbreitung von Licht wird durch Lichtstrahlen auf Grund des **Reflexions- und Brechungsgesetzes** (Snelliusgesetz) beschrieben. Diese Gesetze sind in der geometrischen Optik nur phänomenologisch begründet und werden nur in der Wellenoptik hergeleitet (-> **Fresnel'sche Gleichungen**). Die Wechselwirkung mit der Materie wird durch den **Brechungsindex** (oder die dielektrische Suszeptibilität) beschrieben. Die geometrische Optik ist eine gute Näherung solange die Dimension der Spiegel und anderer Objekte zur Wellenführung gross gegenüber der Wellenlänge sind.

Wellenoptik:

Die Wellenoptik basiert auf den **Maxwellgleichungen.** Hier erst werden Effekte der **Beugung** und **Interferenz** verständlich. Aus den Maxwellgleichungen folgt die **Wellengleichung**, die die Ausbreitung von e.m. Wellen beschreibt. Für nicht zu hohe Intensitäten, d.h. in der herkömmlichen Optik, wird angenommen, dass bei der Lichtausbreitung in Materie das **Superpositionsprinzip** gilt, d.h. dass die Gesamtamplitude zweier Wellen, die durch ein Material laufen, sich addititv aus den einzelnen Amplituden der beiden Wellen zusammensetzen**.**

Dispersion (d.h. die Frequenzabhängigkeit des Brechungsindexes) und die **Ausbreitung von Lichtpulsen** können sehr leicht im Spektralraum beschrieben werden. Lichtpulse können z.B. als lineare Überlagerungen von ebenen Wellen mit unterschiedlichen Frequenzen beschrieben werden, d.h. als sogenannte Wellenpakete. Im Spektralraum wird die Ausbreitung für jede Frequenz separat behandelt. Die Wellengleichung im Spektralraum wird **Helmholtzgleichung** genannt. Die **Fouriertransformation** verbindet die Beschreibung im Zeitraum und Spektralraum.

In der **Kristalloptik** wird die elektromagnetische Wellenausbreitung in einem **anisotropen Körper** beschrieben. Wenn sich eine transversale Welle durch ein anisotropes Medium ausbreitet, kann die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle sowohl von der Richtung der Polarisation als auch von der Ausbreitungsrichtung der Welle abhängen. Die Tatsache, dass die Polarisierbarkeit des Mediums nicht in allen Richtungen gleich ist, hat zur Folge, dass die Ausbreitungsrichtung der Energie (gegeben durch den Pointing-Vektor) nicht mehr unbedingt senkrecht zu den Wellenfronten steht. Neue Effekte wie die **optische Doppelbrechung** können auftreten. Bei der optischen Doppelbrechung wird z.B. ein unpolarisierter Laserstrahl durch einen doppelbrechenden Kristall in zwei Strahlen zerlegt.

Der Brechungsindex kann durch verschiedene Effekte verändert werden. Zum Beispiel kann eine akustische Welle in einem Material den Brechungsindex so beeinflussen, dass die optische Welle daran reflektiert wird (d.h. **Akustooptik**). Eine optische Anisotropie kann auch künstlich erzeugt werden durch z.B. ein von aussen angelegtes elektrisches Feld (d.h. **Elektrooptik**) oder durch einen von aussen angelegten Druck (d.h. **Elastooptik**). Besonders mit Hilfe des

akustooptischen und elektrooptischen Effektes können unter anderem sehr gute **Lichtmodulatoren** hergestellt werden.

In der **nichtlinearen Optik** sind die Intensitäten so hoch, dass die elektromagnetisch induzierte Polarisation in einem Material nicht mehr proportional zum elektrischen Feld ist. In diesem Fall gilt das Superpositionsprinzip nicht mehr! Es kommt zu nichtlinearen Erscheinungen wie zum Beispiel **Frequenzverdoppelung**, bei welcher die Frequenz des Lichtes durch die Wechselwirkung mit dem Material "verändert" wird. Es ist zu beachten, dass sich in der herkömmlichen linearen Optik die Frequenz während der Ausbreitung nicht ändert. Strahlt man bei hohen Intensitäten z.B. in einen Kristall zwei Wellen mit den Frequenzen ω_1 und ω_2, so kann in dem Kristall eine neue Welle mit der Frequenz $\omega_3 = \omega_1 + \omega_2$ entstehen. Auch eine einzelne Welle mit der Frequenz ω kann in einen neuen Wellenzug mit der doppelten Frequenz 2ω (d.h. Frequenzverdopplung) verwandelt werden, oder in zwei Wellenzüge mit zwei neuen Frequenzen zerfallen. Zusätzliche nichtlineare Effekte wie die Selbstphasenmodulation kann die Dispersion so kompensieren, dass sich ein kurzer Puls (d.h. ein **Soliton**) unverändert durch ein dispersives Medium ausbreiten kann. Solche Solitonen können vor allem in der zukünftigen optischen Langstreckenkommunikation wichtig werden. Auch die ursprünglichen Vorstellungen über die Absorption und Emission von Licht, bei der nach dem Bohrschen Postulat $h\nu = E_2 - E_1$ galt, müssen revidiert werden. Bei hohen Feldintensitäten können mehrere Photonen gleichzeitig absorbiert werden (d.h. **Multi-Photonenabsorption**), so dass auch viel grössere Energiedifferenzen übersprungen und Atome sogar ionisiert werden können.

Halbklassische Behandlung der Quantenelektronik:

In der halbklassischen Behandlung der Quantenelektronik wird das elektromagnetische Feld immer noch klassisch, d.h. durch die Maxwellschen Gleichungen, behandelt. Aber die Wechselwirkung mit dem Atom, Molekül oder Festkörper wird quantenmechanisch, d.h. mittels Schrödingergleichung, behandelt. Der Laser kann nur in diesem halbklassischen oder sogar voll-quantenmechanischen Regime behandelt werden.

Im einfachsten Fall reduziert sich die Behandlung des Lasers auf die **Ratengleichungen** (oder auch Bilanzgleichungen, "rate equations") für die Photonenzahlen und Besetzungszahlen der Atome. Die Atome werden als diskrete Energieniveausysteme behandelt. Die quantenmechanischen Prozesse der spontanen und stimulierten Emission eines angeregten Atomes (oder Moleküls oder Festkörpers) werden durch phänomenologische Übergangs-wahrscheinlichkeiten beschrieben. Auf diese Weise können wir die meisten Lasereigenschaften korrekt beschreiben wie z.B. Laserschwellenbedingung, Verteilung der Intensitäten auf verschiedenene Moden (d.h. Photonensorten), gütegeschalteter ("Q-switched") Laser, ultakurze Laserpulse usw.

Die Eigenschaften und Form des Laserstrahls, im Idealfall ein Gauss-Strahl, wird durch die Randbedingungen des Laserresonators bestimmt. Die Problematik der Laserresonatoren und Laserstrahlen ist ein vollständig klassisches Problem, beschrieben durch die Maxwellschen Gleichungen.

Die Ratengleichungen beschränken die Beschreibung der Wechselwirkung von e.m. Strahlung mit dem Atom auf Photonen- und die Besetzungszahlen, bei denen kohärente (d.h. phasenabhängige) Prozesse vernachlässigt werden. Die Erweiterung auf kohärente Effekte werden durch die **Blochgleichungen** beschrieben. Durch diese Gleichungen können auch neue **kohärente Effekte** wie z.B. Photonecho, selbstinduzierte Transparenz und Multiphotonenabsorption beschrieben werden.

Vollquantenmechanische Behandlung der Quantenelektronik -> Quantenelektrodynamik (QED)

Hier werden sowohl das Lichtfeld als auch die Atome vollständig quantenmechanisch behandelt, d.h. sowohl die Bewegung der Elektronen als auch die Schwingungen des elektromagnetischen Feldes werden quantisiert (d.h. Quantenelektrodynamik, oder kurz QED).

Durch die Quantisierung des Feldes können bis dahin phänomenologisch behandelte Tatsachen physikalisch verstanden werden, z.B. das nicht mechanisch limitierte Rauschen des Lasers. Zusätzlich kann die Spontanemission als induzierte Emission in Folge der Vakuumfluktuationen des Feldes betrachtet werden. Dadurch ist es einfach einsehbar, dass die spontane Emission auch gezielt durch kurze Resonatoren (d.h. von der Grössenordnung einer Wellenlänge oder kleiner) direkt beeinflusst werden können ("micro cavity"). Dadurch wurden Halbleiterlaser mit extrem niedrigen Schwellenstömen von $\approx 1\ \mu$A hergestellt. Zusätzlich neue Effekte wie Casimireffekt, Lamb shift, gequetschte Zustände werden hier physikalisch erklärt. Auch können Atome durch Laserlicht zu extrem tiefen Temperaturen im Bereich von nK gekühlt werden ("laser cooling"). Dadurch wurde kürzlich zum ersten Mal die Bose-Einstein-Kondensation von Rb-Atomen experimentell nachgewiesen.

Die vollquantenmechanische Behandlung der Wechselwirkung mit Atomen wird auch als **Quantenoptik** bezeichnet. Eine ausführliche Behandlung der QED würde den Rahmen einer Vorlesung QEI bei weitem übersteigen. Wir verweisen die interessierten Leser auf experimentelle und theoretische Spezialvorlesungen.

Was wird in der Vorlesung Quantenelektronik I behandelt?

Obwohl das Gebiet der Quantenelektronik durch den Laser erst entstanden ist, werden wir nicht mit der Behandlung des Lasers anfangen. Die Diskussion zuvor hat zu zeigen versucht, dass die klassische Behandlung sehr viele Phänomene in der Quantenelektronik erklären kann. Das

Studium der Grundlagen der Quantenelektronik setzt ein solides Grundwissen in der Wellenoptik voraus. Darum wird dies den ersten Teil dieser Vorlesung in Anspruch nehmen.

Die Diskussion des Lasers wird hauptsächlich auf der Basis der Einstein-Koeffizienten und Ratengleichungen behandelt.

Aufgrund der Vielfalt von möglichen Themen werde ich gewisse Schwerpunkte setzen müssen. Das Ziel dieser Vorlesung ist auch, mit einer kurzen Einführung in Spezialgebiete wie integrierte Optik, nichtlineare Optik, Elektrooptik, Kristalloptik, Holographie und Phasenkonjugation, Spektroskopie, Kurzzeitlaserphysik, Quantenoptik usw., den ersten Eindruck vom Gebiet der Quantenelektronik etwas zu erweitern und das Interesse für mögliche Wahlfachvorlesungen zu wecken.

Die Quantenelektronik hat einen stark ausgeprägten interdisziplinären Charakter. Quantenelektronik beinhaltet auch die Anwendung von Lasern, welche heute in vielen anderen Gebieten ausserhalb der Physik eingesetzt werden. So werden Laser in der Elektrotechnik, Chemie, Biologie, Umweltphysik, Medizin, Materialbearbeitung und Bauphysik verwendet. Grundsätzlich ist ein gutes Grundwissen in Festkörperphysik, Atom- und Molekülphysik in der Quantenelektronik fast immer eine gute Voraussetzung für wissenschaftliches Arbeiten.

Wie kann es nachher weitergehen?

Wahlfachvorlesungen, empfohlene Vorlesungen und Laserseminar

Alle Wahlfachvorlesungen setzen die Vorlesung Quantenelektronik I voraus, sonst aber können sie in beliebiger Reihenfolge besucht werden. Die Inhaltsangaben sind nicht verbindlich und können etwas variieren. Für genauere Informationen sollten Sie direkt die entsprechenden ProfessorInnen und PrivatdozentInnen kontaktieren. Bitte beachten Sie auch, dass gewisse Wahlfachvorlesungen nicht jedes Jahr, sondern nur alle zwei Jahre stattfinden werden. Einige Beispiele sind unten aufgeführt.

Im Institut für Quantenelektronik haben wir immer wieder GastprofessorInnen, die für ein Semester an unser Institut kommen. Sie werden in den meisten Fällen auch eine Vorlesung halten, die nicht als Wahlfachvorlesung gilt, aber empfohlen wird. Oft sind diese GastprofessorInnen sehr berühmte WissenschaftlerInnen, die vielleicht ein Thema behandeln, das sonst üblicherweise hier nicht gelesen wird.

Während des Semesters veranstalten wir regelmässig ein Laserseminar (jeden Montag, 16:45 Uhr, HPF G6), bei dem WissenschaftlerInnen einen Vortrag über ihre aktuelle Forschung geben. Diese Veranstaltung ist selbstverständlich auch für Sie alle offen und ist speziell für StudentenInnen in den höheren Semestern geeignet.

Quantum Optics HS07 and HS08 (Prof. T. Esslinger)

Topics (tentative): Light fields: Optical fluctuations and coherences, quantized field, non-classical states. Atom-field interaction I: semiclassical theory; Bloch equations, Bloch vector, semiclassical laser theory. Atom-field interaction II: quantum theory, interaction of a single two-level atom with a single mode field, spontaneous emission. Quantum optical systems: selected topics, e.g. Bell's inequality experiments, laser cooling, Schrödinger's cats, ...

Ultrafast Laser Physics HS07 (Prof. U. Keller)

Dispersion and dispersion compensation, linear and nonlinear pulse propagation, relaxation oscillations, Q-switching, modelocking, pulse diagnostics, pulse generation in the few-optical-cycle regime (i.e. around 5 fs in the near infrared wavelength regime), carrier envelope offset control and frequency combs, ultrafast measurement techniques (pump-probe measurements, time-resolved four-wave mixing, THz-Spectroscopy, optical coherence tomography), hot topics such as attosecond pulse generation and supercontinuum generation.

Elektro-Optik (Prof. P. Günter)

Kristall- und Elektrooptik, Akustooptik, elektrooptische und akustooptische Modulatoren und Deflektoren, photorefraktive Effekte, optische Bistabilität und deterministisches Chaos

Nichtlineare Optik (Prof. P. Günter)

Optisch nichtlineare Medien, Phasenkonjugation, stimulierte Ramanstreuung, dynamische Holographie, Frequenzverdopplung, Summen- und Differenzfrequenzerzeugung, optisch parametrische Oszillatoren, optische Informationsverarbeitung

Bose-Einstein-Condensation SS07 and SS08 (Prof. T. Esslinger)

The non-interacting Bose gas, a weakly-interacting Bose gas, the second quantized matter wave field, coherences and correlations, elementary excitations, vortices, superfluidity, fermionic systems, optical lattices and low-dimensional systems.

Optical properties of semiconductors (Prof. J. Faist)

The rich physics of the optical properties of semiconductors, as well as the advanced processing available on these material, enabled numerous applications in everyday devices (semiconductor lasers, LEDs) as well as the realization of new physical concepts. This lecture aims at giving an introduction to this topic in bulk, quantum well semiconductors and a brief introduction to quantum wires and quantum dots. Interband absorption (matrix element, kp approach), free carrier absorption (Drude and quantum model), intersubband absorption, electron-hole injection, optical gain, carrier dynamics, many-body properties, nonlinear effects, microcavities and

Quantum Information (Prof. A. Imamoglu)

The goal of this course is to introduce the physics underlying quantum information science. The emphasis will be on the basic notions such as 1) quantum entanglement and its use as a resource

in information processing; 2) quantum measurements and decoherence; 3) quantum error correction. The only prerequisite is the knowledge of basic quantum mechanics.

Mesoscopic quantum optics (Prof. A. Imamoglu)
This course covers basic concepts in quantum optics and physics of semiconductor quantum dots. The specific topics that will be discussed include quantization of electromagnetic fields, coherence properties of quantized fields, atom-field interaction in the electric-dipole limit, spontaneous emission, density operator and the optical Bloch equations, basic energy level spectra of quantum dots (excitons, trions, biexcitons), quantum optical phenomena in quantum dots (photon antibunching, cavity-QED).

Lasersysteme und Anwendungen (Prof. M. Sigrist)
Grundlagen und Charakteristiken der wichtigsten Lasertypen und Lasersysteme aus der Klasse der: Gaslaser, Farbstofflaser, Halbleiterlaser, Festkörperlaser, chemischen Laser und Röntgenlaser. Verschiedene Laseranwendungen wie Spektroskopie, Umweltanalytik, Medizin, Materialbearbeitung und Laserfusion.

Festkörperoptik (Prof. L. Degiorgi)
Einführung in die experimentellen optischen Methoden (fern-infrarot (FIR) Spektrometer, Ellipsometry, resonante Kavitäten und Detektoren), Kramers-Kronig Transformationen, klassische Lorentz- und Drude-Dispersion-Theorie und Anwendungen (Phononen und elektronische Interband Uebergänge etc.), optische Eigenschaften von Festkörpern (Supraleiter, schwere Fermionen, quasi-eindimensionale Metalle, Fermi-Fluessigkeiten, Luttinger-Fluessigkeiten etc.).

Semesterarbeiten -> Gute Möglichkeit "Herumzuschnuppern"

Eine Semesterarbeit ist eine gute Gelegenheit, die verschiedenen Forschungsgruppen an der ETH kennenzulernen. Zusätzlich ist sie auch für viele die erste Möglichkeit, einen ersten Eindruck der wissenschaftlichen Arbeit zu erhalten, die sich ja stark von diesem Studium unterscheidet. Ich kann Ihnen eine solche Semesterarbeit nur empfehlen. Sie wird Ihnen schlussendlich die Entscheidung für eine Spezialisierung erleichtern.

Ganz allgemein gilt, dass Sie willkommen sind, sich die Forschungslabors anzuschauen. An den Türen steht "Eingang nur für Berechtigte". Sie sind berechtigt, und die Türen sind während den normalen Arbeitszeiten offen. Es ist fast immer jemand da, den man fragen kann. Wenn man gerade in einem ungünstigen Moment kommt (z.B. in der Mitte einer kritischen Messung oder Besprechung), kann man immer einen anderen Zeitpunkt vereinbaren. Dieses "Herumschnuppern" wird umso wichtiger, je näher Sie an die Diplomarbeit kommen. Erste Anknüpfungspunkte sind auch Ihre ÜbungsassistentInnen in den entsprechenden Vorlesungen

oder die Webpage: http://www.iqe.ethz.ch/ oder für das Physikdepartment http://www.phys.ethz.ch/.

- **Prof. Dr. Andreas Hierlemann**, Physical Electronics Laboratory (HPT-Gebäude) http://www.pel.ethz.ch/ nur noch bis Ende 2007
- **Prof. Dr. Tilman Esslinger**, Quantum Optics Laboratory (HPF-Gebäude) http://www.quantumoptics.ethz.ch/
- **Prof. Dr. P. Günter**, Nonlinear Optics Laboratory (HPF- and HPT-Gebäude) http://www.nlo.ethz.ch/
- **Prof. Dr. A. Imamoglu**, Quantum Photonics Laboratory (HPT-Gebäude) http://www.iqe.ethz.ch/quantumphotonics/Welcome.html
- **Prof. Dr. U. Keller**, Ultrafast Laser Physics Laboratory (HPT-Gebäude) http://www.ulp.ethz.ch/
- **Prof. Dr. J. Faist**, starting Oct. 2007

Abschliessender Kommentar zur Einleitung

Sie haben mehr Möglichkeiten, als Sie innerhalb Ihres Studiums abdecken können. Versuchen Sie, so viel als möglich davon zu profitieren, aber ohne deshalb Ihre Studiendauer zu verlängern. Sie haben nie ausgelernt. Das ist das Interessante an der wissenschaftlichen Arbeit: Sobald man etwas versteht, wendet man sich einer anderen ungelösten Fragestellung zu. Viele WissenschaftlerInnen wechseln innerhalb ihrer Karriere die Forschungsrichtungen. Was man durch wissenschaftliche Arbeit lernt ist, wie man zu einer offenen, zum Teil unpräzisen oder vielleicht sogar falschen Frage eine Problemstellung formuliert, einen Lösungsvorschlag ausarbeitet und dann versucht, diesen zu bestätigen oder zu widerlegen. Aufgrund der Resultate kann man die Problemstellung entsprechend verbessern. Das ist ein langer, iterativer Prozess, der schlussendlich hoffentlich die erwarteten Lösungen oder neue unerwartete Erkenntnisse erbringt. Die Arbeit ist interessant, braucht aber auch eine gute Portion Ausdauer. Sehr oft misslingt ein erster Versuch ... Erfolgreiche Wissenschaft ist nicht nur ein Job, sondern eine Leidenschaft..... und es macht sehr viel Spass!