

FASZINATIONLICHT

Eine Reise in die Welt
des Lichts



FASZINATIONLICHT



gefördert vom



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

VDI

VDI-Technologiezentrum



FASZINATION**LICHT**

Eine Reise in die Welt des Lichts

VDI-Technologiezentrum, Düsseldorf

Erläuterungen zum Titelbild

Vorderseite:

„FaszinationLicht“

Quelle: LOBO Laser- und Multimediasysteme, Aalen

Rückseite:

Die Kampagne zur Aus- und Weiterbildung in den Optischen Technologien

„FaszinationLicht“

- Partner & Mitwirkende -

ISBN 3-00-010987-0

Impressum

Autoren:

Erstellt nach Beiträgen der innen genannten Mitwirkenden

Idee & Redaktion:

Dr. Eckhard Heybrock, VDI-Technologiezentrum Düsseldorf

Gestaltung:

NO-Design Aachen

Herausgeber und verantwortlich für den Inhalt:

VDI-Technologiezentrum Düsseldorf

Februar 2003

Durchgeführt im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF)

Einleitung

Die Bedeutung der Optischen Technologien

Optische Technologien sind Schrittmachertechnologien für die moderne Wirtschaft und Gesellschaft. Sie bewirken wichtige Innovationen in Bereichen deutscher Kernkompetenz wie dem Maschinen-, Automobil-, Schiffs- oder Flugzeugbau, der Mikroelektronikindustrie, der Pharma- und Medizinprodukteindustrie sowie der Beleuchtungsindustrie.

Der Trend der Zukunft ist, so viele Aufgaben wie möglich mit Licht, also mit Photonen, zu erledigen. Das Photon verfügt über das technologische Potenzial zur Lösung vieler Herausforderungen unserer Zeit. Es wird, so wie es die Elektron für die vergangenen Jahrzehnte war, zunehmend zum entscheidenden Innovationsträger.

Deutschland hat sich zu einem Weltmarktführer auf vielen Gebieten der Optischen Technologien entwickelt. Entsprechend hoch ist das Arbeitsmarktpotenzial: Schon heute beeinflussen die Optischen Technologien in Deutschland ca. 16% der Arbeitsplätze im verarbeitenden Gewerbe. Dies entspricht etwa 1.000.000 Beschäftigten. Direkt beschäftigt im Bereich der Optischen Technologien sind etwa 110.000 Menschen. Optische Technologien stellen eine große, für den Wirtschaftsstandort Deutschland wichtige Branche dar.

Die Kampagne „FaszinationLicht“

Innovation beginnt in den Köpfen junger Menschen. Zukunftstechnologien brauchen Fachkräfte.

Um die Chancen in Wirtschaft und Wissenschaft auf dem noch jungen Gebiet der Optischen Technologien in vollem Umfang nutzen zu können, müssen Information und Wissen in Schule und Beruf verfügbar gemacht, Faszination vermittelt und Interesse in der breiten Öffentlichkeit geweckt werden. Derzeit fehlt es der Branche an Nachwuchs.

Vor diesem Hintergrund fördert das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) beginnend ab 2003 die bundesweite Kampagne „**FaszinationLicht - Licht für die Schulen**“ zur Aus- und Weiterbildung in den Optischen Technologien.

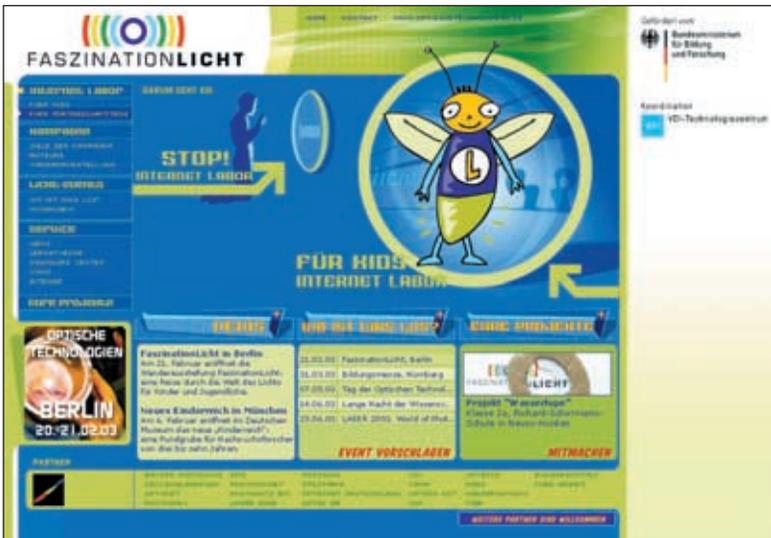
Unter dem Motto „FaszinationLicht“ werden Kinder, Schüler und Lehrer, Auszubildende und Ausbilder sowie die Öffentlichkeit durch **Tage der Optischen Technologien**, Veranstaltungen, Präsentationen, Ferienspiele, Schnupperkurse, Wissenschaftstage und Ausstellungen informiert und sensibilisiert: Die Faszination der Optischen Technologien wird erlebbar. Insbesondere eine schulgerechte **Wanderausstellung** zum Themenspektrum der Optischen Technologien steht auf Messen, in Museen und zu besonderen Anlässen der breiten Öffentlichkeit zur Verfügung. Fachgespräche und Workshops mit Lehrern und Verantwortlichen aller Bildungsebenen sowie Berufsforen für Schulabgänger runden das Angebot ab.

Damit wird ein Beitrag geleistet, Schülern frühzeitig ein interessantes Zukunftsfeld mit attraktiven Berufsaussichten näher zu bringen und ein Zusatzangebot für Schüler und Lehrer zu etablieren. Die „FaszinationLicht“ dient auch dem Aufbau langfristiger Beziehungen (Patenschaften, Schulsponsorring) zwischen den schulischen Bildungsstätten, Einrichtungen naturwissenschaftlicher Forschung und Industrieunternehmen.

Es gibt bereits zahlreiche Aktivitäten von Hochschulen, Firmen, Verbänden sowie vom Handwerk. Im Rahmen der Kampagne soll mit einem Veranstaltungskalender erstmals ein umfassender Überblick über das bestehende Angebot geschaffen werden.

Jeder kann mitmachen: Den Vorteil haben die Kinder, Schüler und Auszubildenden. Schulen, Betriebe und Hochschulen gewinnen an Attraktivität für Nachwuchs und für Lehrkräfte.

Die zentrale Internetseite www.faszinationlicht.de informiert über Veranstaltungen und aktuelle Neuigkeiten.



Die „FaszinationLicht“ ist eine **Gemeinschaftskampagne**. Zahlreiche Organisationen und Verbände wie die Bundesanstalt für Arbeit, die Deutsche Gesellschaft für angewandte Optik (DGaO), die Deutsche Physikalische Gesellschaft (DPG), OptecNet Deutschland e.V., der Industrieverband Spectaris, der Verein Deutscher Ingenieure (VDI), der Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA), die Wissenschaftliche Gesellschaft Lasertechnik (WLT), die Kompetenznetze Optische Technologien, die internationale Messe LASER, der Deutschlandfunk und die Fachzeitschrift Photonik unterstützen bereits als Partner die Kampagne. Weitere Partner sind willkommen.

Das VDI-Technologiezentrum in Düsseldorf koordiniert die Kampagne im Auftrag des BMBF.

Die Wanderausstellung „FaszinationLicht“

Junge Menschen sind neugierig. Sie möchten die Vorgänge in ihrer Welt verstehen. Nur eigene Erfahrung, Begreifen und Erleben begründen sicheres Wissen, aus dem Staunen entwickelt sich Forscherdrang.

Die Technologien um das Medium Licht sind faszinierend. Nahezu unbemerkt kommt jeder von uns über die innovativen Produkte des täglichen Lebens auch mit Optischen Technologien in Kontakt. Es lohnt sich, das Medium Licht zu verstehen und zu nutzen.

Die Ausstellung „FaszinationLicht“ zeigt erstmalig in Deutschland einen pädagogisch aufgebauten Erlebnispark rund um die Optischen Technologien.

Hands-on-Exponate, Funktionsmodelle, Anschauungsmaterialien, Multimediastationen, Poster und Vorführungen vermitteln Faszination (Ohs/Ahs) und Verständnis (Aha), liefern auch Ideen und Anstöße für den Unterricht.

Danksagung

Der Aufbau der Ausstellung „FaszinationLicht“ und die Erarbeitung dieses Begleitbandes sind nur möglich geworden durch die tatkräftige Unterstützung zahlreicher Mitwirkenden, Experten und Sponsoren. Hierfür möchten wir uns nachdrücklich bei allen herzlich bedanken.

Ausbildungszentrum Optische Technologien Göttingen Bartkowiak	H. Kiehne
BBZ Berufsbildungszentrum Fulda	
Bertha-von-Suttner-Gesamtschule Dormagen Bosch	R. Krause, M. Sander
	U. Brinkmann
Carl Zeiss DELPHI Eschenbach Optik FEE	L. Ackermann
Ferdinand-Braun-Institut Fachhochschule Südwestfalen in Iserlohn Fh-Institut für Angewandte Festkörperphysik Fh-Institut für Lasertechnik Fh-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik Fh-Institut für Produktionstechnologie FOBA	B. Neumann R. Poprawe, J. Giesekus, R. Noll W. Karthe D. Golla
Freiberger Compound Materials Fries Research and Technology Helmholtz-Gymnasium Bielefeld	A. Heybrock
Infineon Technologies Jenoptik Laserdiode Karl Storz Kugler Laserline Laseroptik Leica Camera Linos Photonics Laser Zentrum Hannover NO-Design	M. Leonhard A. Ostendorf, K. Samm, M. Auerbach
Norbert-Gymnasium Knechtsteden Osram	J. Ammon und die Klasse 13
Osram Opto-Semiconductors PhotonAix PhotonicNet	W. Späth F. Bitte H. Lentge
Richard-Schirrmann-Schule Neuss-Hoisten s+p Werbetechnik Schott Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt Rostock Trumpf	H. Sander und die Klasse 2a

Universität Berlin	T. Riesbeck
Universität Chemnitz	
Universität Clausthal-Zellerfeld	W. Schade
Universität Düsseldorf	H. Kempkens
Universität Jena	A. Tünnermann
Universität Kaiserslautern	R. Wallenstein
Universität Münster	S. Knoche, B. Kemper, D. Dirksen, F. Dreesen, G. von Bally
Universität Münster	H. J. Schlichting
Universität Potsdam	A. Heuer
Universität Stuttgart	A. Giesen
Universität Ulm	R. Steiner
VDI-Technologiezentrum Düsseldorf	
Wissenschaftliche Gesellschaft Lasertechnik	A. Otto

Besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr. R. Poprawe, Herrn Dr. R. Noll und Herrn Dipl.-Phys. J. Giesekus vom Fraunhofer-Institut für Lasertechnik in Aachen. Sie begleiteten die Initiative schon während der Konzeptionsphase und erstellten gleich eine ganze Reihe von hochwertigen Exponaten.

Besonderer Dank gilt auch Herrn Professor Dr. H. J. Schlichting vom Institut für Didaktik der Physik der Universität Münster für die pädagogische Unterstützung und das Ausgestalten der „Lichtspiele“.

Bei der Deutschen Physikalischen Gesellschaft bedanken wir uns für die Bereitstellung der CD „Physik 2000“.

Auch für das zur Verfügung gestellte Bildmaterial aus allen Bereichen der Optischen Technologien bedanken wir uns herzlich.

Dr. Holger Junge

Dr. Eckhard Heybrock

VDI-Technologiezentrum Düsseldorf

„Faszination Licht“ soll in die Schule ausstrahlen

Physiklehrer der Bertha-von-Suttner-Gesamtschule informierten sich über Lasertechnologie / Partnerschaft angestrebt

Das Thema „Licht“ im FZDT-Blatt „am Anfang des Jahres“ wurde in der Ausgabe „Licht“ der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, 1998, Nr. 1, S. 1-10, veröffentlicht. Die Informationen sind im FZDT-Blatt „am Anfang des Jahres“ 1998, Nr. 1, S. 1-10, veröffentlicht.

Inhaltsverzeichnis

Faszination Licht

1 WOHER KOMMT DAS LICHT?

Der Ursprung des Lichts	15
Woher kommen die Farben?	16
Licht - vielfältige Quellen	18

2 WAS IST LICHT?

Licht - Vielfalt einzigartiger Eigenschaften	21
Welle oder Teilchen	22
Auf den Punkt gebracht	24
Licht - flexibles Medium	26
Optikpräzision und der Zauber dünner Schichten	28

3 DER LASER – DAS BESONDERE LICHT

Faszination Laser	29
Grundsätzliches	32
Der Diodenlaser - vom Krümel zum Kraftpaket	36
Femto - Lasertechnik am unteren Ende der Zeitskala	38

4 WIE FUNKTIONIERT DAS? – LICHT IM TÄGLICHEN LEBEN

Licht - Eintrittskarte für die Zukunft	41
Übertragung, Speicherung und Visualisierung mit Licht	42
Makro, Mikro, Nano - Licht ist universelles Werkzeug	45
Nano-Elektronik - Im fernen UV geboren	48
Biophotonik - Hoffnungsträger für die Heilkunst	51
Endoskopie - Der Blick nach innen	54
Sanft heilen durch Licht	56
Holografie: Licht in der dritten Dimension	57
Kein Handy ohne Optische Technologien	58
Unsichtbare Dinge sehen: Materialprüfung durch Polarisation	59
Optische Technologien machen mobil	61
Messtechnik vom Feinsten	63

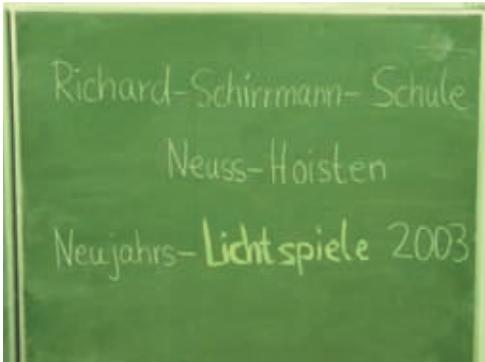
**5 LICHTSPIELE**

Lichtspiele - Spiele mit Licht	67
Ohne Licht keine Sicht	70
Wo viel Licht ist, ist auch viel Schatten	71
VorSPIEGELung falscher Tatsachen oder: Ich bin dort, wo ich nicht bin	72
Ein Knick in der Optik	74
Glas und Licht verbessern die Sicht	75
Bilder, die durch einen Punkt gegangen sind - oder: Wie eine Abbildung entsteht	77
Wenn das Licht in Farben bricht	79
Entdecken mit gekrümmten Spiegeln - Anamorphosen	80
Ein Regenbogen ohne Regen	81
Luka - das Glühwürmchen	82

ARBEITSBLÄTTER 1-14

Neujahrs-Lichtspiele 2003 in Klasse 2a der Richard-Schirrmann-Schule, Neuss-Hoisten

Ohne Licht läuft nichts. Täglich machen Kinder diese Erfahrung. Spontan verbinden die meisten Kinder mit Licht vielfältige Assoziationen: die Sonne als gewaltiges Wunder der Natur, den Regenbogen, das Feuer, Kerzen, aber auch technische Errungenschaften wie Flutlichter, Straßenlaternen, Ampeln, Autos, Leuchttürme, Spiegel oder das Vergrößerungsglas. Was ist also naheliegender, als Kinder für Experimente rund ums Licht zu begeistern, die ihnen die Phänomene und Erfindungen dieser Welt erhellen. Ein kleiner Versuch kann dabei manchmal Wunder bewirken. Die Wasserlupe aus zwei einfachen Kunststoffhälften aus dem Bastelgeschäft, mit Wasser aufgefüllt und los geht die Entdeckungsreise - ganz sicherlich kein trockener (Lehr-) Stoff.



LERNZIEL: ERLEBEN, ERFAHREN, STAUNEN.

LERNZIEL: ERLEBEN, ERFAHREN, STAUNEN.





LERNZIEL: ERLEBEN, ERFAHREN, STAUNEN.



LERNZIEL: ERLEBEN, ERFAHREN, STAUNEN.



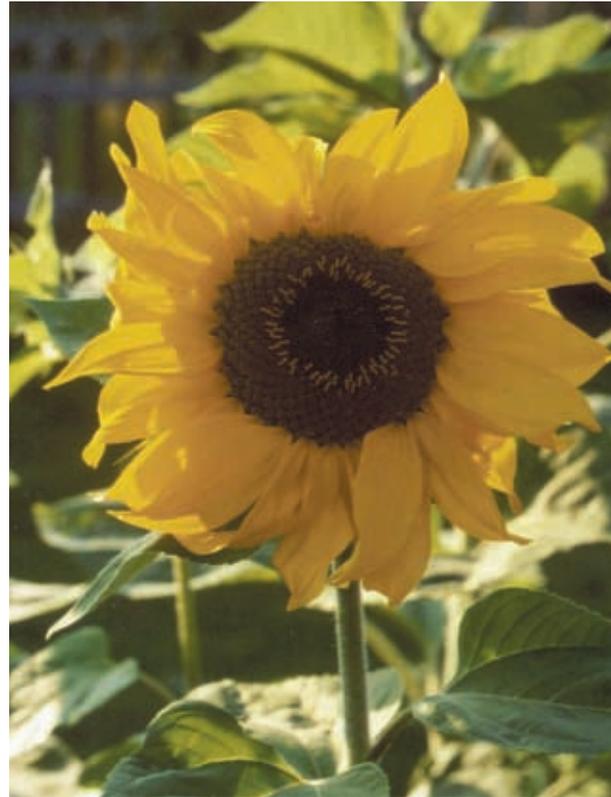
(Fotos: VDI-Technologiezentrum)

Faszination Licht

Licht, lebensnotwendig und allgegenwärtig, das Selbstverständlichste von der Welt, was ist es, woher kommt es? Man sieht es, man spürt es, doch kann man es nicht greifen und nicht lagern für lichtlose Zeit. Es wirft Schatten, aber nicht messerscharfe, es ist blitzschnell, aber nicht gleichzeitig überall, es kann in bunten Farben leuchten, die wir sehen, aber auch scheinbar dunkel sein, obgleich vorhanden. Wundersamer Stoff, der die Wissenschaftler über Jahrhunderte zu Versuchen anregte, herauszufinden, was es ist: Welle, Teilchen, kosmischer Äther?

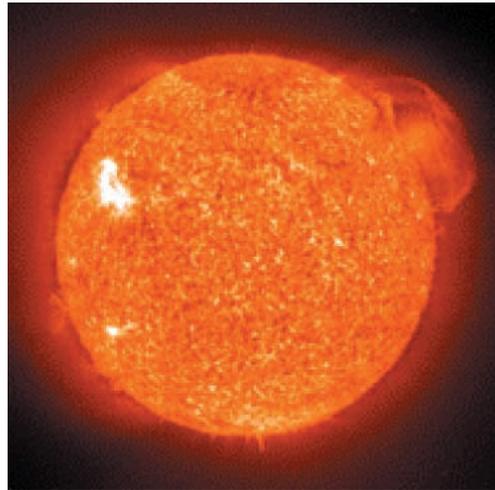


Mit dem Verständnis kam die Findigkeit, das Licht dem Menschen nutzbar zu machen über den bloßen Zweck des Leuchtens in dunkler Nacht hinaus. Mit optischen Instrumenten lernte man, Entferntes heranzuholen, hin bis zu den geheimnisvoll kalten Oberflächen des Mondes und der Planeten. Licht ermöglicht den Einblick in die wimmelnde Welt des Lebens im Kleinen. Licht lässt sich dosiert und portioniert für technische Aufgaben erzeugen, gesammelt wirkt es als geballte Energie. Zerteilt in Impulse trägt es



Informationen in Sprache, Bildern und Daten. Es lässt sich „in Schläuchen“ um die halbe Welt leiten. Ein Telefonat über Quarzglasfaser nach Japan wird auf diese Weise zu einem Stadtgespräch.

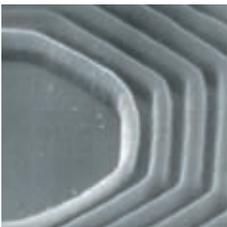
Die heilende Wirkung des Lichtes kannten schon die Pharaonen. Es hat schon seinen Grund, dass das Licht in den uralten Schriften der Menschheit eine besondere Rolle spielt. Ein Medium ganz offensichtlich mit einzigartigen Eigenschaften und spektakulären Gestaltungsmöglichkeiten. Wo sind seine Grenzen, wo die Grenzen der möglichen Anwendungen?



Licht fasziniert auf einmal mehr denn je Menschen in Wissenschaft und Technik. Doch erst in den letzten Jahrzehnten gelang es den Wissenschaftlern, mit Licht als Medium so zu arbeiten, wie es zuvor die Elektroniker mit Spannungen und Strömen taten und davor die Ingenieure des 19. Jahrhunderts mit den Kräften von Wasser und Dampf. Technologien, die jeweils die Welt

veränderten, folgen aufeinander. Was ist das Besondere an der Technologie des Lichtes, den Optischen Technologien?

Licht hat das Leben auf der Erde erst ermöglicht. Licht begleitet den Menschen seit vielen Jahrtausenden seiner Evolution und ist maßgeblich daran beteiligt. Entwicklungsstufen in der Nutzung des Lichtes spiegeln sich in Entwicklungsstufen des Menschen wider.



1. Woher kommt das Licht?



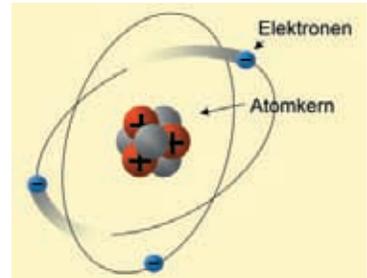
Unser Sonnensystem: Planeten umkreisen die Sonne.

springen. Fällt es kurze Zeit später wieder auf eine niedrigere Bahn, dann kann es ein Lichtteilchen, das sogenannte Photon, aussenden – und Licht blitzt auf. Eine andere Möglichkeit hierbei ist, dass die frei werdende Energie in Form von Wärme an andere Atome weitergegeben wird. Diese Energie ist für das Licht verloren.

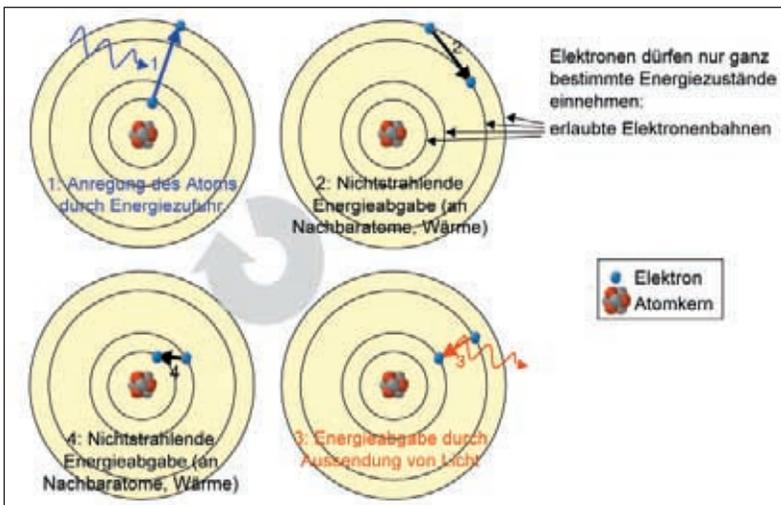
Photonen entstehen also aus bestimmten Energieübergängen von Elektronen in Atomen, Licht ist pure Energie.

Der Ursprung des Lichts

In den Atomen, den Einheiten, aus denen die Elemente unserer Welt aufgebaut sind, liegt der Ursprung des Lichts. Da die quantenmechanischen Einzelheiten des Aufbaus der Atome den Rahmen der Ausführungen in diesem Buch bei weitem übersteigen, wird hier ein vereinfachtes Bild bemüht, an dem wesentliche Zusammenhänge abgeleitet werden können. Niels Bohr hat in seinem Atommodell von 1913 angenommen, dass die Atome Mini-Planetensystemen gleichen: Um den Atomkern bewegen sich, wie Planeten um die Sonne, auf festgelegten Bahnen die Elektronen. Wird einem Elektron Energie zugefügt, dann kann es auf eine höhere Bahn



Modellvorstellung zum Atom: Elektronen umkreisen den Atomkern wie die Planeten die Sonne (Grafik: Wissenschaftliche Gesellschaft Lasertechnik).



Licht entsteht durch atomare Prozesse in der Materie: Anregung, Energieabgabe durch Licht oder Wärme, Rückkehr in den Grundzustand (Grafik: Wissenschaftliche Gesellschaft Lasertechnik).

In jeder Lichtquelle, ob Glühlampe, Leuchtstoffröhre oder Laser, ist es ganz wesentlich dieser Prozess, der für die Helligkeit sorgt. Die eigentliche Elementarlichtquelle, das Atom, ist dabei nur etwa 1/10 Nanometer groß, das entspricht 0,000.000.000.1 m. Selbst das kleinste Stückchen Materie besteht jedoch aus einer so unglaublich großen Anzahl von Atomen, in denen dieser Prozess immer wieder stattfindet, so dass insgesamt eine Flut von Photonen ausgelöst wird.

Beispiel: Aus einem handelsüblichen Laserpointer mit etwa 1 mW Leistung werden pro Sekunde etwa 10^{16} (!) Photonen ausgesandt, das sind etwa so viele wie Sandkörner an einem Strand. Sie zusammen bilden erst den kräftigen Lichtstrahl. Das einzelne Photon selbst trägt dabei nur kleinste Energiemengen.

Woher kommen die Farben?

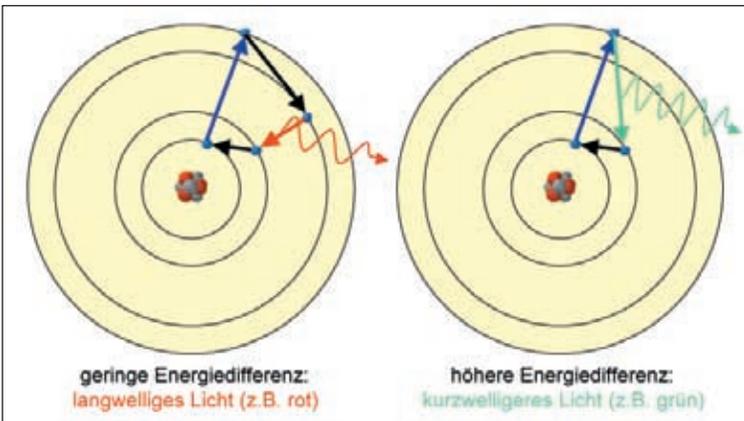


Die Farben des Regenbogens
(Bild: Richard-Schirrmann Schule)

Nur ein kleiner Teil des Lichts ist für unsere Augen sichtbar. Das sichtbare Spektrum, die Farben des Regenbogens, verläuft von Violett, Blau, Grün, Gelb, Orange bis zum Rot. Das Röntgenlicht im Krankenhaus beispielsweise bleibt jedoch für uns ebenso unsichtbar wie das uns bräunende UV-Licht der Sonne.

Diese Farbigkeit unserer Umgebung ist darauf zurückzuführen, dass in unserem Auge drei unterschiedliche Detektoren, die sogenannten Zäpfchen, jeweils nur für bestimmte Photonenenergien des sichtbaren Lichts empfindlich sind. Man unterscheidet zwischen Blau-, Grün-, und Rotrezeptoren.

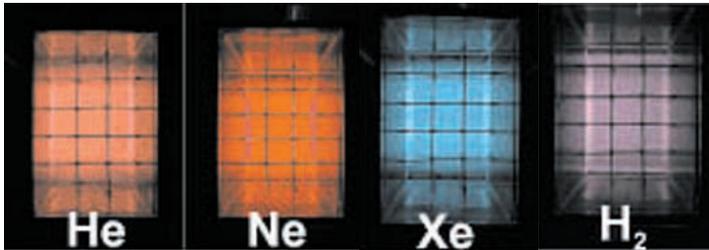
Die Farbe des Lichts, oder ob Licht überhaupt für uns sichtbar ist, hängt von dem Energie sprung des Elektrons bei der Erzeugung der Photonen ab.



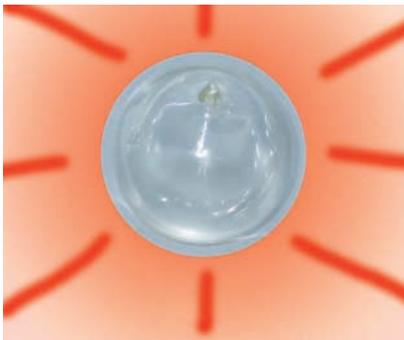
Je größer der Energieabstand ist, desto mehr Energie kann das einzelne Lichtteilchen aufnehmen. Und dabei gilt: Für blaues Licht ist ein größerer Energie sprung notwendig als für rotes Licht.

Die Energiedifferenz des strahlenden Übergangs entspricht der Energie des ausgesendeten Photons und bestimmt damit die Farbe des Lichts (Grafik: Wissenschaftliche Gesellschaft Lasertechnik).

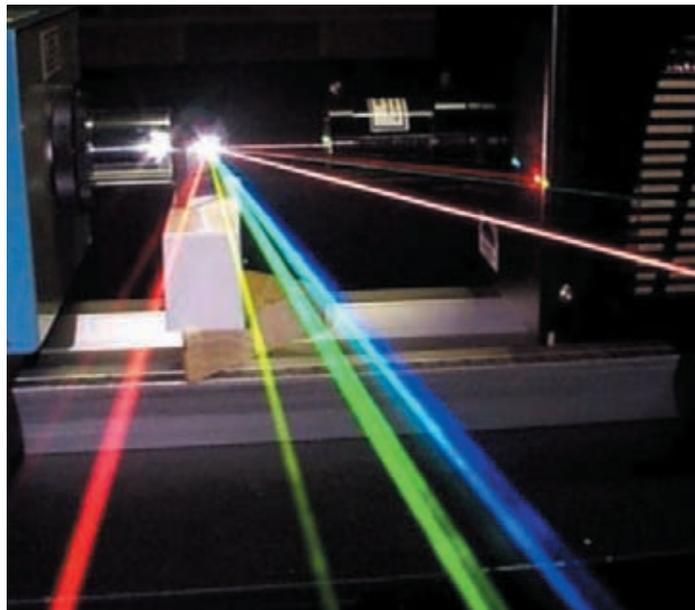
Licht ist dagegen weiß, wenn an der Lichtentstehung, wie beispielsweise im Fall der Glühlampe, viele unterschiedliche Energieübergänge beteiligt sind. Die Photonen haben dann auch unterschiedliche Energien und werden in Abhängigkeit ihrer jeweiligen Energie von einem der drei Rezeptoren im Auge erfasst.



Bunte Leuchtreklame: Unterschiedliche Gase leuchten bei Energiezufuhr durch Mikrowellen in unterschiedlichen Farben (v.l. Helium, Neon, Xenon, Wasserstoff). Der Grund: Die Elektronenbahnen ihrer Atome haben unterschiedliche Abstände (Fotos: Universität Düsseldorf).

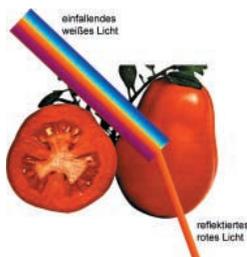


Zum Erröten: Die „Düsseldorfer Kugel“ enthält Neongas und erstrahlt im Mikrowellenherd leuchtend rot (Universität Düsseldorf).



In Gasmischen können viele Farben leuchten, wie die diskreten Farben aus einem weißen Lichtstrahl eines Argon-Krypton-Gasmisches zeigen (Foto: Fh-Institut für Lasertechnik (Fh-ILT)).

Mit den Farben ist es aber noch etwas komplizierter: Eine Tomate ist nicht deshalb rot, weil ihre Atome rotes Licht aussenden. Statt dessen wirkt sie wie ein Filter: Denn was uns umgibt, das weiße Licht, ist ein Gemisch aus allen Lichtfarben. Rot aber ist hieraus das einzige Licht, das die Tomate nicht schluckt, sondern zurückwirft - deshalb erscheinen Tomaten unter weißem Licht rot.



Wir sehen nur, was übrig bleibt: Aus dem Farbspektrum des weißen Lichts nimmt eine Tomate den Großteil auf, das rote Licht jedoch wird zurückgeworfen und ist sichtbar (Grafik: Wissenschaftliche Gesellschaft Lasertechnik).

Licht – vielfältige Quellen

Licht lässt sich zähmen.

Die heute verwendeten Lichtquellen nutzen die atomaren Prozesse auf verschiedene Weise in allen Aggregatzuständen (fest, flüssig, und gasförmig/plasmatisch). Elektrischer Strom, atomare Stöße, chemische Prozesse, aber auch das Licht selbst lassen sich zur Energieversorgung nutzen. Als Festkörperlichtquellen gibt es etwa Glühlampen, Leuchtdioden (LED - Light Emitting Diode) oder den Laser, als flüssige Lichtquellen z.B. Knicklichte und als gasförmige/plasmatische Lichtquellen Leuchtstoffröhren und Plasmalampen.

Sie alle basieren auf diesen Prozessen, unterscheiden sich jedoch deutlich in ihrem Aufbau, ihren Eigenschaften wie Lichtfarbe, Lichtmenge, Effizienz (wieviel Licht wird aus dem Strom gewonnen?), und damit auch in ihren Einsatzgebieten.



Neonstäbe: Knicklichte für den Discobesuch oder Tauchgang

Hier ist das Funktionsprinzip einiger Lichtquellen:

- Eine **Glühlampe** ist wie die Sonne eine thermische Lichtquelle. Ein dünner Wolframdraht wird durch elektrischen Strom geheizt und erzeugt dadurch breitbandige elektromagnetische Strahlung. Nur ein geringer Teil (5%) der Strahlung liegt im sichtbaren Spektralbereich, der Rest (95%) wird, wie der Name schon sagt, als Wärme frei.
- In einer **Leuchtstoffröhre** wird Quecksilber verdampft und angeregt, so dass es ultraviolettes, nicht sichtbares Licht freisetzt. Durch dieses Licht wird in einem zweiten Schritt ein Leuchtstoff (Phosphor) auf der Wandung der Röhre angeregt, der nun das sichtbare Licht aussendet. Solche Prozesse nennt man Konversionsprozesse.
- Bei einer **Leuchtdiode** findet die Anregung auf elektronischem Weg im Festkörper/Halbleiter statt. Hier entsteht Licht nur einer bestimmten Farbe, die sich durch den Aufbau der Leuchtdiode und die Auswahl der Materialien einstellen lässt. Um weißes Licht zu erhalten, enthält die Diode zusätzlich einen Leuchtstoff, der bei Anregung mit dem in der Diode erzeugten blauen Licht selbst gelbes Licht erzeugt. In Kombination ergibt sich für das menschliche Auge weißes Licht.

Aus den unterschiedlichen Wirkprozessen ergeben sich die spektralen und energetischen Unterschiede. Eine Glühlampe liefert ein warmes, dem Sonnenlicht ähnliches Licht, ist aber im Energieverbrauch ineffizient. Eine Entladungslampe dagegen hat einen hohen Wirkungsgrad, etwa 30%, strahlt aber ein Licht ab, das als weniger angenehm empfunden wird.

Innovative Beleuchtung ist ein intensives Forschungsgebiet. Die weiße LED könnte sich hierbei wohl zu einer der wichtigsten Lichtquellen der nächsten Jahrzehnte entwickeln. Ihr hoher Wirkungsgrad und die passend einstellbare Farbe sind schwer zu übertreffen. Solche Arbeiten sind dringend notwendig. In Deutschland werden 8 % der Gesamtmenge an Strom für die Erzeugung von Licht verwendet. Wenn die ineffizienten Glühbirnen in Zukunft komplett durch moderne Konzepte wie anorganische oder organische Leuchtdioden ersetzt würden, könnten 38 TWh Strom jährlich eingespart werden; das entspricht 12,5 Millionen Tonnen Steinkohle oder 68 Milliarden Autobatterien im Jahr. Diese Energieeinsparung ist dringend geboten.



(Fotos: Osram)



Aber nicht nur Energieeinsparung lässt sich mit neuen Lichtquellen erreichen. Sie ermöglichen auch einfachere Produktionsschritte im Automobilbau: Hier könnten aufklebbare, leuchtende Folien zukünftig als Rücklichter dienen. Der technisch aufwendige Einbau von Lichthaltern könnte entfallen. Und auch die Sicherheit würde hierdurch erhöht. Neue Lichtkonzepte versprechen deutlich schnellere Ansprechzeiten, so dass das Bremslicht schneller aufleuchtet und oftmals der entscheidende Meter gewonnen werden kann.



Lichtquellen für die Zukunft: LEDs in allen Farben und Plasmaquellen (Fotos: Fh-Institut für Angewandte Festkörperphysik (Fh-IAF), Osram)



Unsere Erde leuchtet bei Nacht durch künstliche Beleuchtung (Foto: NASA GSFC).

Eine kurze Geschichte des Lichts

Altes Testament		Licht: von Gott geschaffen
< 400 v.Chr.	Empedokles	Licht: „Augenstrahlen“, die einen Gegenstand „abtasten“
	Pythagoras	Licht: Teilchen, die von einem Gegenstand ausgesandt werden
1665	Grimaldi	Beobachtung von Beugungsphänomenen
1666/70	Newton	Korpuskulartheorie (Licht als Teilchen)
1678	Huygens	Wellentheorie
1801	Young	Beobachtung von Interferenzen
1816	Fresnel	Mathematische Beschreibung von Beugungs- und Interferenzerscheinungen
1871	Maxwell	Grundgleichungen der Elektrodynamik
1879	Edison	Die erste gebrauchsfähige Glühbirne (Kohlefadenlampe)
1888	Hertz	Experimenteller Nachweis elektromagnetischer Wellen
1895	Röntgen	Entdeckung der „x-rays“ (Röntgenstrahlen)
1900	Planck	Postulat von Energiequanten zur Ableitung der nach ihm benannten Strahlungsformel
1905	Einstein	Einführung von Lichtquanten (Nobelpreis 1907)
1917	Einstein	Theorie der stimulierten Emission
>1950		Aufhebung des vermeintlichen Dualismus (Licht: Welle oder Teilchen?) durch Ausbau der Quantenfeldtheorie
1960	Maiman	Erster Laser (Rubin-Laser)
1962	General Electric	Erste Produktion von Halbleiter-Lichtquellen (LED im sichtbaren Bereich)

2. Was ist Licht?

Licht – Vielfalt einzigartiger Eigenschaften

Das Medium Licht verfügt wie kein anderes derzeit nutzbares Medium gleich über eine Vielfalt einzigartiger Eigenschaften. Die Welt des Lichts umfasst eine kaum fassbare Spannweite von Größenordnungen, von winzig klein bis unvorstellbar groß.

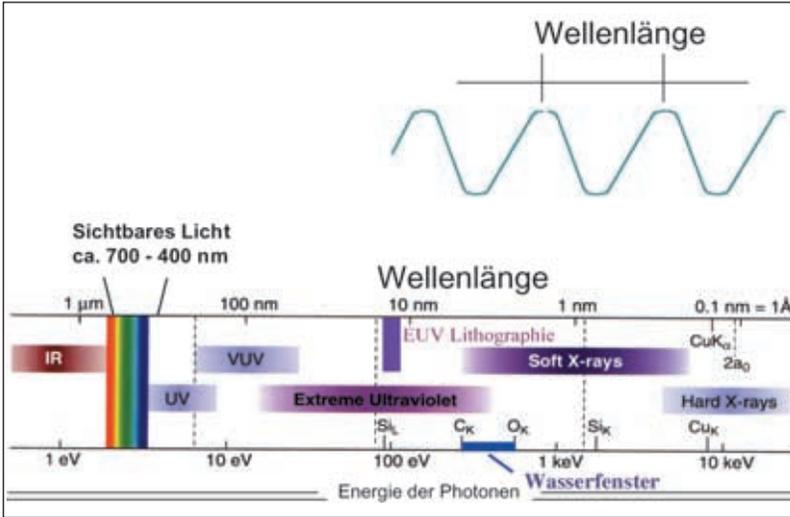
The Powers of Ten (Vorsilben der Zehnerpotenzen)	
1.000.000.000.000.000 = 10^{15}	peta - (P)
1.000.000.000.000 = 10^{12}	tera - (T)
1.000.000.000 = 10^9	giga - (G)
1.000.000 = 10^6	mega - (M)
1.000 = 10^3	kilo - (k)
100 = 10^2	hekto - (H)
10 = 10^1	deka - (D)
1 = 10^0	Basis - Einheit
dezi - (d)	$10^{-1} = 0,1$
centi - (c)	$10^{-2} = 0,01$
milli - (m)	$10^{-3} = 0,001$
mikro - (μ)	$10^{-6} = 0,000.001$
nano - (n)	$10^{-9} = 0,000.000.001$
pico - (p)	$10^{-12} = 0,000.000.000.001$
femto - (f)	$10^{-15} = 0,000.000.000.000.001$
atto - (a)	$10^{-18} = 0,000.000.000.000.000.001$

Licht: Vielfalt einzigartiger Eigenschaften

- Fokussierbarkeit:** bis auf den millionsten Teil eines Millimeters (Nanometer)
- Geschwindigkeit:** ca. 0,3 Milliarden m/s (Lichtgeschwindigkeit)
- kürzeste Pulse:** bis zu einem millionstel Teil einer milliardstel Sekunde (Femtosekunde)
- Puls-Leistungen:** bis zu Millionen von Megawatt (Terawatt)
- ungestörte Überlagerungsfähigkeit:** bis zu Millionen von Megabit pro Sekunde (Terabit/Sekunde)

... und das alles berührungslos!

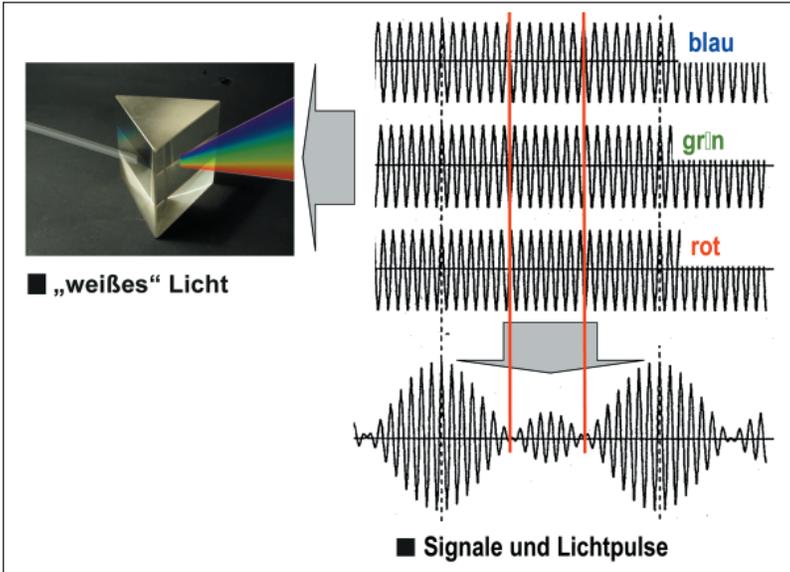
Welle oder Teilchen



Das elektromagnetische Spektrum: Infrarot, sichtbarer und kurzwelliger Bereich (Grafik: B. Wellegehausen, Hannover)

Licht ist eine Welle:

Unter der Wellenlänge des Lichts versteht man den Abstand zwischen jeweils zwei benachbarten Wellenbergen. Das gesamte Spektrum des Lichts ist in der Abbildung dargestellt: Es reicht vom langwelligen Bereich im tiefen Infrarot, über den sichtbaren Bereich, in den kurzwelligen UV-Bereich bis in den Röntgenbereich. Für den Menschen sichtbares Licht stellt dabei nur den kleinen Bereich mit typischen Wellenlängen von etwa 700 bis 400 nm dar.



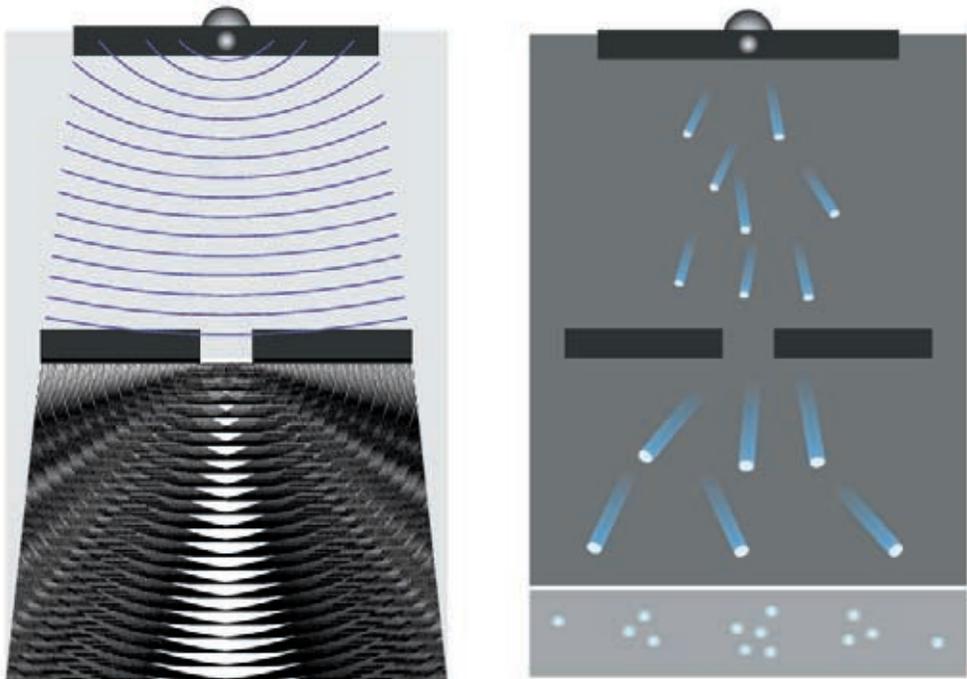
Durch eine einfache Überlagerung von rotem, grünem und blauem Licht entsteht „weißes Licht“. Weißes Licht ist dabei eigentlich nur ein physiologischer Effekt, auf der Wellenlängenskala erscheint es nicht. Diese oben beschriebene Überlagerung bildet die

Grundlage z.B. von Displaytechnologien. Geschieht die Überlagerung aber phasenstarr, d.h. bleiben die Positionen der Wellenberge starr zueinander, so verstärken oder verringern sich die Amplituden der Wellen: Man spricht von konstruktiver bzw. destruktiver Interferenz. Es entstehen Licht-Pulse. Dieses Bild zeigt schon: Je mehr Wellenlängen gezielt zur Interferenz gebracht werden können, um so komplexere Signale oder kürzere Pulse lassen sich erzeugen. Dies ist die technologische Basis der optischen Nachrichtenübertragung und der Femtosekunden-Lasertechnik (Grafik: Universität Bielefeld).

Licht ist maximal und absolut: Es breitet sich immer mit der maximalen, absoluten Geschwindigkeit aus. Dies sind im Vakuum 300.000 km pro Sekunde oder anders ausgedrückt: in 0,1 Sekunden um die Erde. Physikalisch gibt es keine höhere Geschwindigkeit als die Lichtgeschwindigkeit, es gibt kein anderes Medium oder physikalisches Objekt, das so schnell sein kann.

Licht ist ein Teilchen: Dies zeigt z.B. der beschriebene Lichtentstehungsprozess. Ein Widerspruch zu den Welleneigenschaften, wie es scheint, aber Lichtteilchen (Photonen) haben sowieso Eigenschaften zum Wundern: Sie sind punktförmig, ohne Ausdehnung und Volumen, ladungsfrei und masselos. Und doch sind es Teilchen!

Der alte Streit zwischen Christian Huygens und Isaac Newton, ob Licht aus Wellen oder Teilchen besteht, geht unentschieden aus. Welle oder Teilchen sind nur zwei verschiedene Ansichten ein und desselben Phänomens. Zu vergleichen mit einem leeren Zylinder: Von der Seite sieht er aus wie ein Rechteck, von vorne betrachtet wie ein Kreis. Beides zusammen beschreibt erst das vollständige Bild.

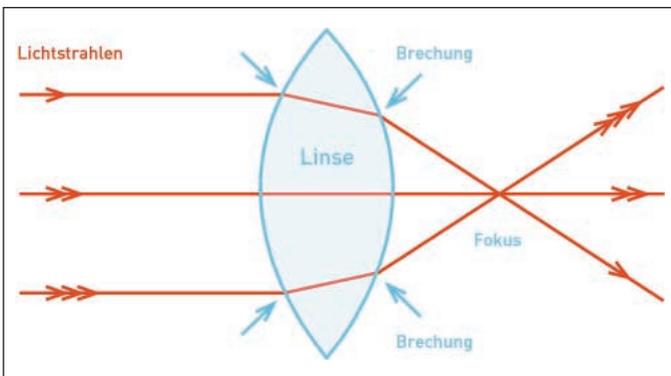


Das Spaltexperiment zeigt den Dualismus des Lichts. Das Licht einer Lichtquelle passiert einen schmalen Spalt und trifft auf einen Bildschirm. Links: Im Wellenbild können sich die Wellen hinter dem Spalt wieder in alle Richtungen ausbreiten: Licht fällt auch dorthin, wo eigentlich Schatten ist. Dieses Phänomen heißt Beugung. Rechts: Würde man die Lichtquelle so weit abschwächen, dass die Photonen sie einzeln verlassen, dann könnte man jedes einzelne Photon, das den Spalt durchläuft, einzeln auf dem Schirm durch einen kleinen Lichtblitz auftreffen sehen. Jedes Photon trifft also einzeln auf den Schirm. In der Summe vieler Photonen entsteht das gleiche Beugungsmuster wie im Wellenbild, beide Vorstellungen beschreiben also die gleichen Beugungsphänomene (Grafik: Fh-Institut für Lasertechnik (Fh-ILT)).

Auf den Punkt gebracht

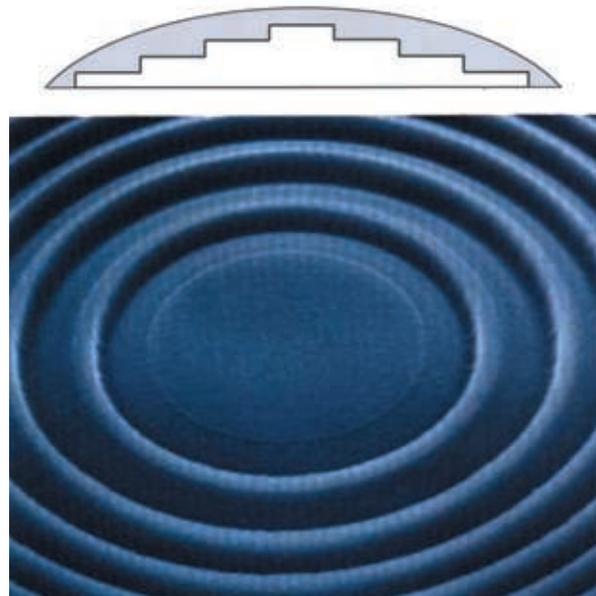
Jeder Wassertropfen im Sonnenlicht bringt es an den Tag. Es sieht aus, als ob jemand den Lichtstrahl knicken würde. Es passiert, wenn Licht in ein anderes Medium übertritt, etwa von Luft in Wasser. Das Phänomen heißt Lichtbrechung. Es beruht darauf, dass Licht sich in verschiedenen Medien unterschiedlich schnell bewegt. Dadurch wird die Lichtwelle an der Grenzfläche der beiden Medien abgebremst. Bei schrägem Einfall ändert sich daher die Richtung sprunghaft. Der Lichtstrahl verhält sich dabei ähnlich wie eine Planierraupe, die auf der einen Seite auf tiefen Sand stößt und auf der anderen Seite weiter über die Straße fährt: Da sie auf dem Asphalt schneller fahren kann, wird sie von der Straße abgelenkt.

Immer an der Grenzfläche zweier Medien verändert sich die Geschwindigkeit des Lichtstrahls. Im Falle einer Linse wird das Licht also zweimal gebrochen: beim Eintritt und beim Austritt. Die Form



der Linse bestimmt dann, ob das Licht auf einen Punkt gelenkt oder zerstreut wird. Allein mit dem einfachen Planierraupen-Modell lässt sich dies verstehen: Bei der abgebildeten Linsenform laufen die parallel einfallenden Lichtstrahlen hinter der Linse in einem Punkt zusammen. Dies ist der Brennpunkt oder Fokus (Grafik: VDI-Technologiezentrum).

Die flache Linse: Lichtbrechung geschieht nur an der Grenzschicht zweier Medien. Würde man eine gewöhnliche Linse aushöhlen, also nur die Randbereiche benutzen und auf eine Ebene bringen, wie in der Grafik dargestellt, so entsteht eine so genannte Fresnel-Linse. Die Lichtwege von Linse und Fresnel-Linse sind fast identisch. Die Anwendungsfelder dieser Ringstrukturen sind groß: Im kleinen Maßstab sind sie in Sensoranlagen, im mittleren in Overheadprojektoren und im ganz großen z.B. in den Lichtkuppeln von Leuchttürmen zu finden (Foto, Grafiken: VDI-Technologiezentrum).





Die Größe des Fokus hängt von der Wellenlänge (Farbe) des Lichtes und der Brennweite der Linse ab. Je kleiner die Wellenlänge ist, desto kleiner ist der Fokus. Bei Laserlicht kann der Fokus so klein werden, dass man in Haare Löcher bohren kann – oder Daten auf CDs brennen.

Warum aber lässt sich Licht auf so winzigen Punkten zu geballter Kraft bündeln? Wie kann es sein, dass Licht so viel Energie liefert, dass man damit Stahl und Diamanten schneiden kann? Der Grund liegt in den oben genannten wundersamen Eigenschaften der Photonen: Sie besitzen keine Masse, kein Volumen, keine Ladung. Gigantische Mengen von ihnen lassen sich deshalb auf kleinstem Raum unterbringen, ohne dass sie sich abstoßen oder den Platz wegnehmen – unmöglich z.B mit den negativ geladenen Elektronen.



Lichtkuppeln von Leuchttürmen: Eine große Fresnellinse formt den Lichtstrahl

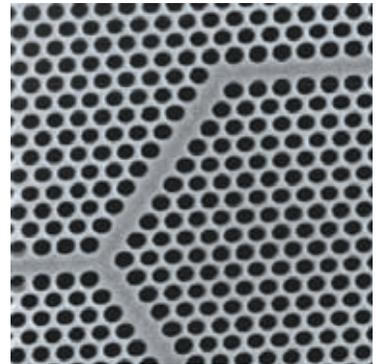
Licht – flexibles Medium

Licht ist ein Medium mit einzigartigen Eigenschaften. Trotzdem – oder vielleicht gerade deswegen – ist es sehr flexibel und nahezu universell einsetzbar.

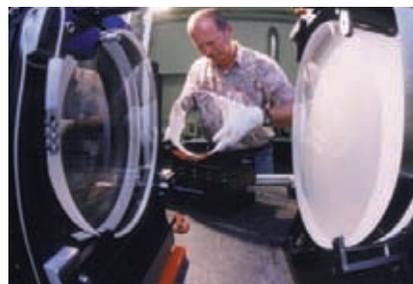
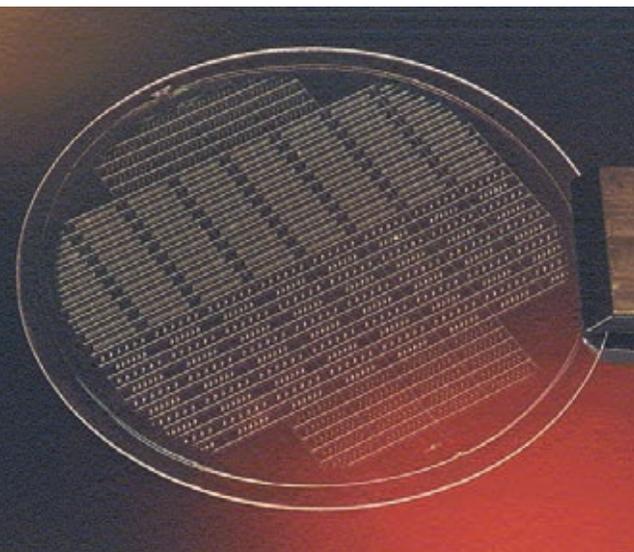
Unabhängig von der speziellen Anwendung geht es im Prinzip in den meisten Fällen darum, Licht mit ganz besonderen Eigenschaften (Frequenz, Energie, Polarisation) zu einer genau vorherbestimmten Zeit an einem ganz bestimmten Ort zur Verfügung zu stellen.

Zur Steuerung von Eigenschaft, Zeit und Ort des Lichteinsatzes haben die Techniker und Ingenieure in der Entwicklungsgeschichte der Optischen Technologien eine Vielzahl von Komponenten entwickelt.

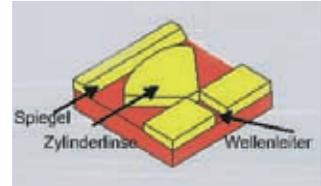
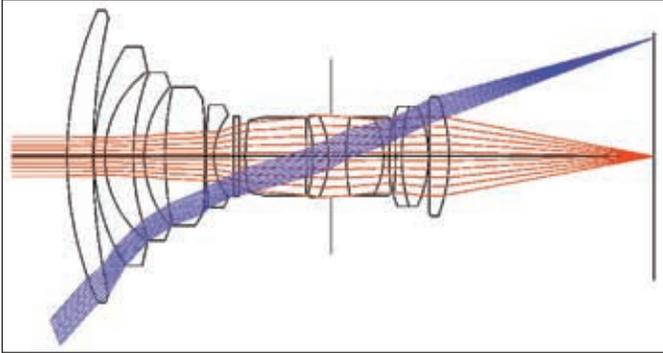
So kann Licht durch Spiegel oder ganze Spiegelfelder, so genannte Arrays, umgelenkt oder in speziellen Lichtleitern geführt werden.



Des Weiteren kann Licht durch Linsen gebündelt (fokussiert) oder aufgeweitet (defokussiert) werden. Die Dimensionen der Linsen reichen dabei von Bruchteilen eines Millimeters bis hin zu einigen Dezimetern.

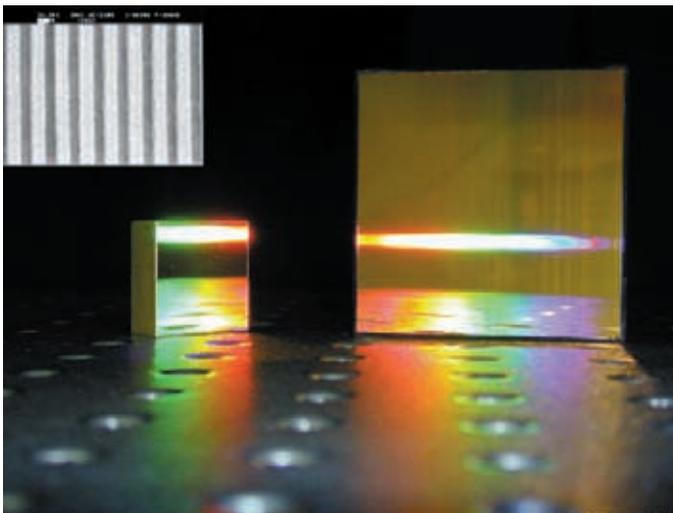
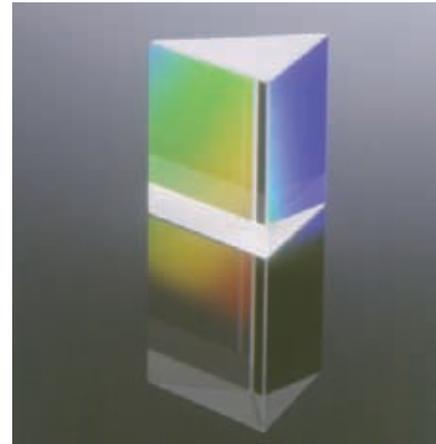


Zusammengesetzt aus vielen solchen Komponenten entstehen durch kluges Optik-Design komplexe, speziell angepasste Hochleistungssysteme für jede Art von Anwendung. Mit Optik-Design können auch ganze Optik-Systeme für Prägeverfahren zum Beispiel in Kunststoffen konzipiert werden: hochwertige Optik-Systeme für den Massenmarkt, z.B. für die optische Maus des Home-Computers.



Andere optische Bauteile vermögen Licht in seinen Eigenschaften zu verändern bzw. die in der jeweiligen Situation erwünschten Eigenschaften herauszufiltern. So zerlegen Prismen oder Gitter polychromatisches (mehrfarbiges) Licht in seine einzelnen Frequenzbestandteile. Mit Kristallen kann der Techniker Frequenzen verdoppeln, um so z.B. die Farbe des Lichtes zu verändern. Ebenso gelingt es ihm mit Hilfe von Kristallen, Licht hinsichtlich einer gewünschten Schwingungsrichtung zu polarisieren oder die Polarisationsrichtung zu drehen.

(Fotos: Linos Photonics, Carl Zeiss, Fh-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik (Fh-IOF), MPI für Mikrostrukturtechnik, Universität Jena, Leica, Institut für Mikrotechnik (IMM))

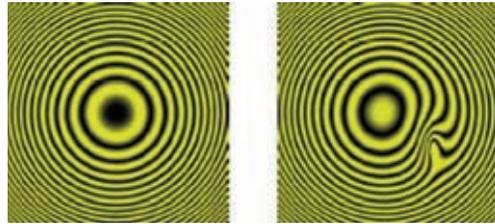


Optik-Präzision und der Zauber dünner Schichten

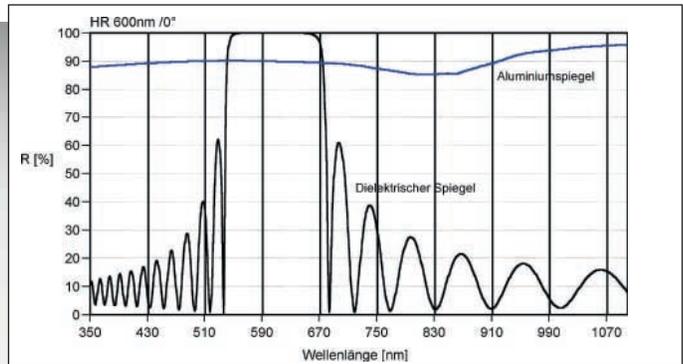
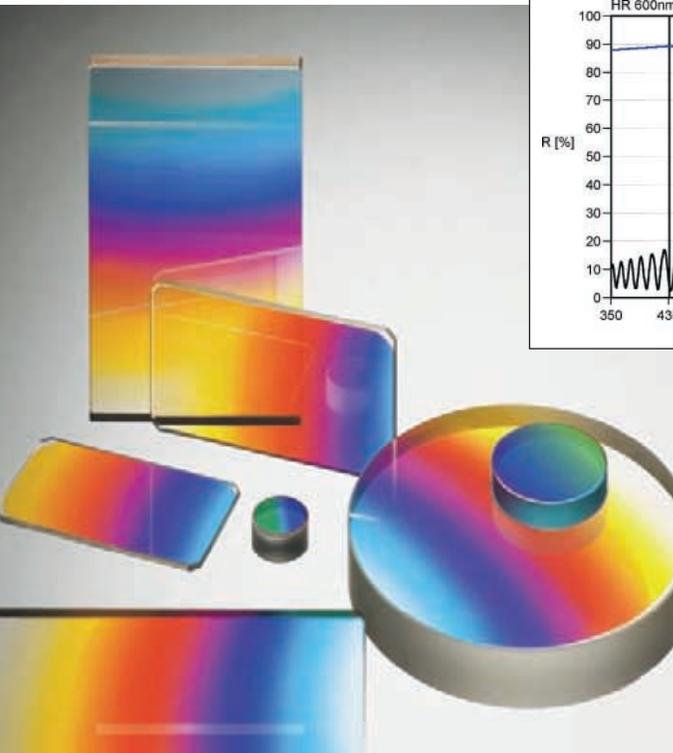
Optische Komponenten sind Präzisionsprodukte. Sie erfordern eine Formgenauigkeit in der Größenordnung der Wellenlänge des verwendeten Lichts – das ist nur ein Zehntausendstel eines Millimeters! Mit optischen Prüfverfahren lässt sich diese Formgenauigkeit schon während des Produktionsprozesses bis auf Nanometerniveau untersuchen. Das Prüfbild zeigt Linien, die analog zu Höhenlinien auf einer Landkarte eventuelle Oberflächenabweichungen in Form von Einbuchtungen darstellen.

Doch nicht nur die Oberfläche optischer Komponenten, auch ihre Beschichtung ist ein Werk höchster Präzision und schafft besondere optische Möglichkeiten. So kann das Aufdampfen von Vergütungsschichten für entspiegelte Brillengläser die Reflexion des einfallenden Lichts auf unter 0,1 % herabsetzen. Umgekehrt können durch Beschichtung einer geeigneten Oberfläche Spiegel erzeugt werden, die auch den hohen Anforderungen des Laserlichts genügen.

Diese so genannten dielektrischen Spiegel bestehen aus vielen übereinander liegenden hauchdünnen Schichten von nur 100 nm Dicke. Sie können jede noch so spezielle Anforderung an die Lichtformung erfüllen – etwa in einem festgelegten Spektralbereich mehr als 99,9 % des Lichts reflektieren. Zum Vergleich: Ein Aluminiumspiegel reflektiert nur rund 90 bis 95 % des einfallenden Lichts.

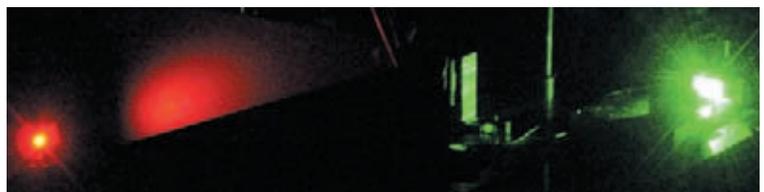
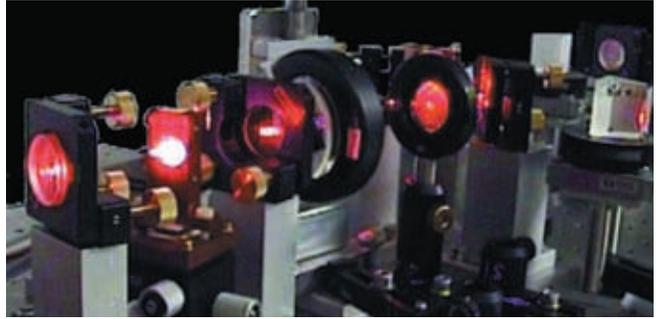


Tägliches Geschäft des Feinoptikers: Prüfbild einer Linsenoberfläche. Links einwandfrei, rechts mit Fertigungsfehler (Fotos: Ausbildungszentrum optische Technologien, Göttingen).

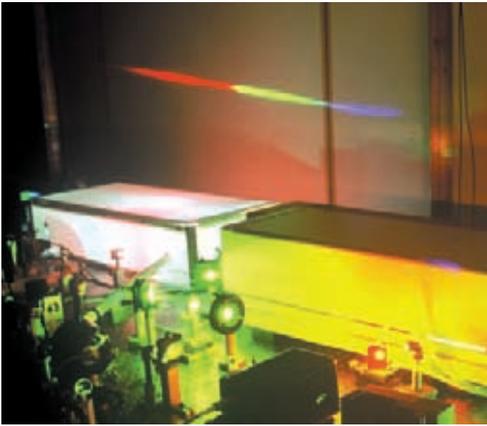
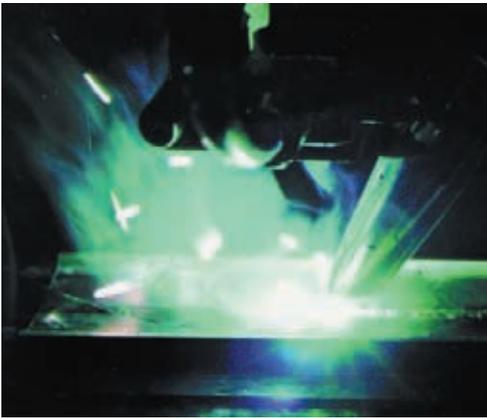
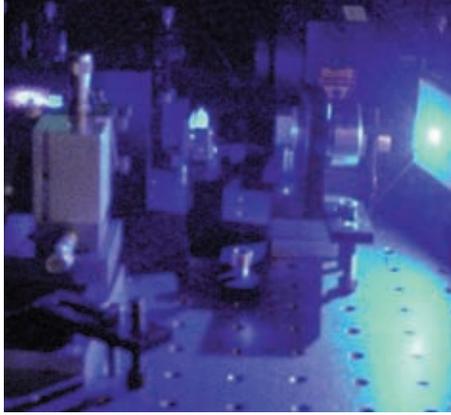
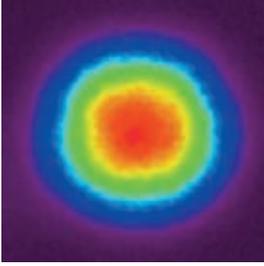


Höchste Reflexionsgrade oder spezielle Leistungsmerkmale für optische Komponenten durch dielektrische Beschichtung (Fotos: LINOS Photonics, Laseroptik; Diagramm: Laseroptik).

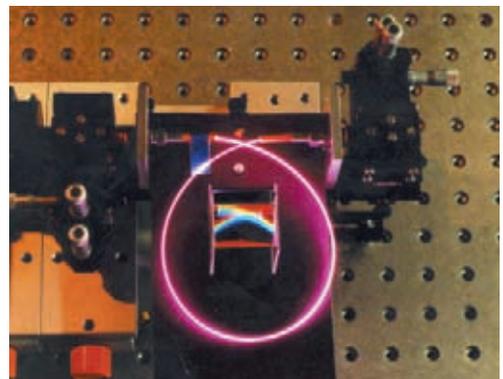
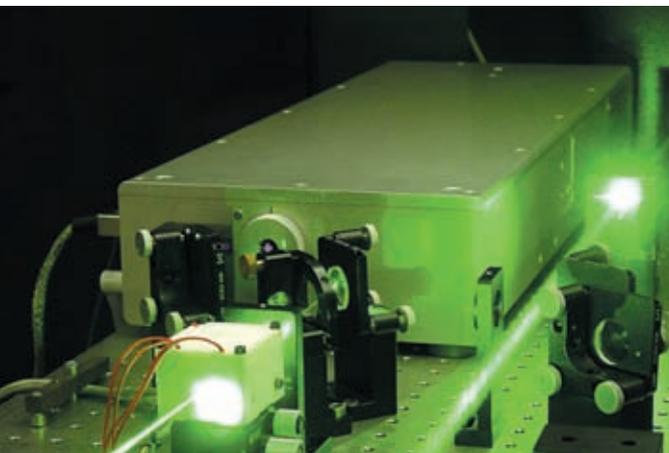
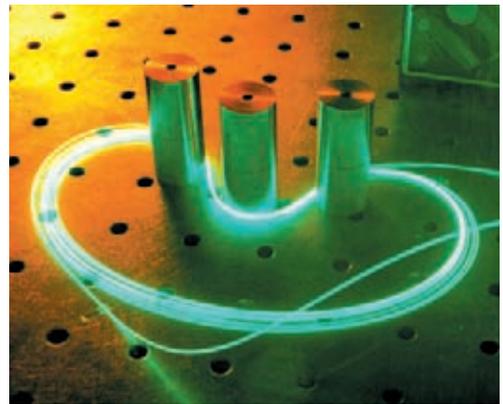
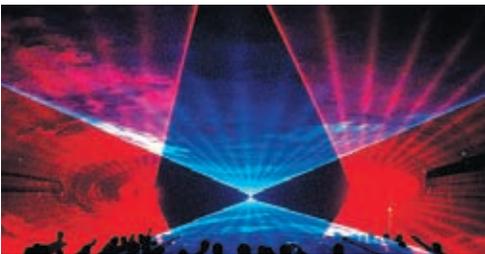
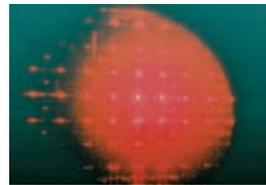
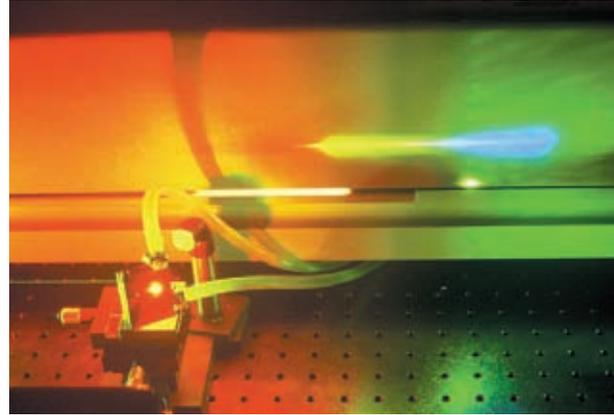
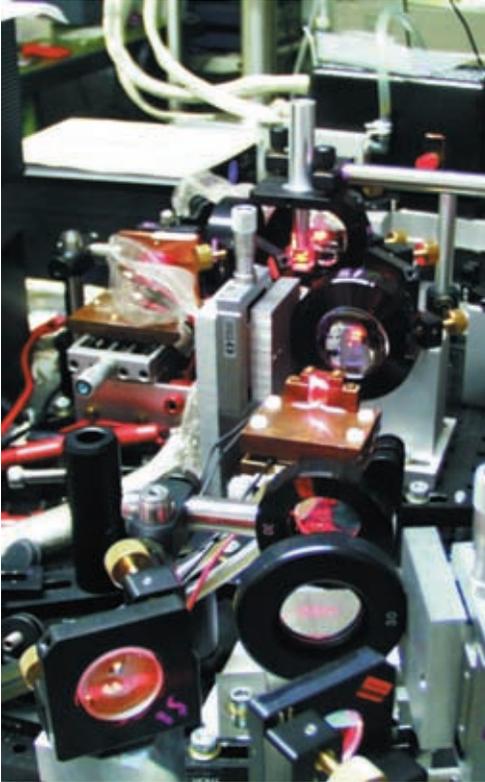
3. Der Laser - das besondere Licht



DAS WICHTIGSTE IST, BEGEISTERUNG ZU ERZEUGEN



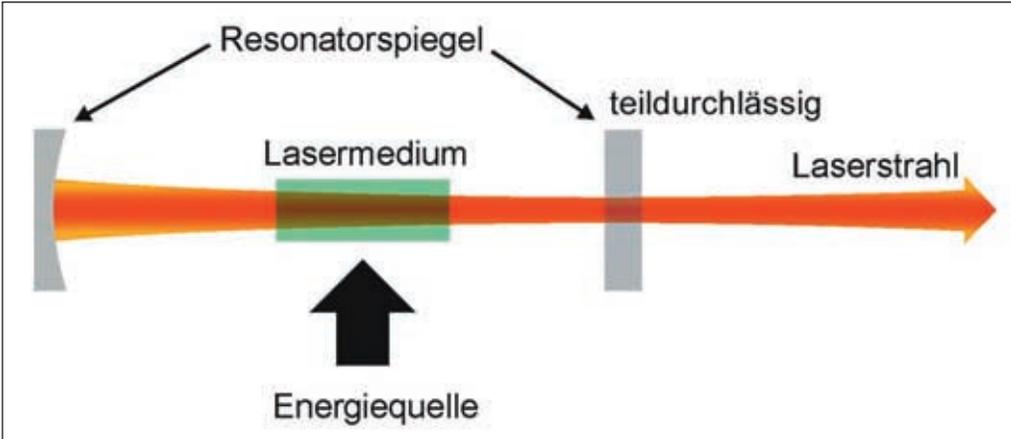
DAS WICHTIGSTE IST, BEGEISTERUNG ZU ERZEUGEN



(Fotos: Universitäten Kaiserslautern, Stuttgart, Jena, Bielefeld; Laser Zentrum Hannover; LOBO Laser- und Multimediasysteme, Aalen; Fh-Institut für Lasertechnik).

Grundsätzliches

Der Begriff LASER leitet sich aus den Anfangsbuchstaben der Beschreibung ab: **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation – zu deutsch „Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung“.



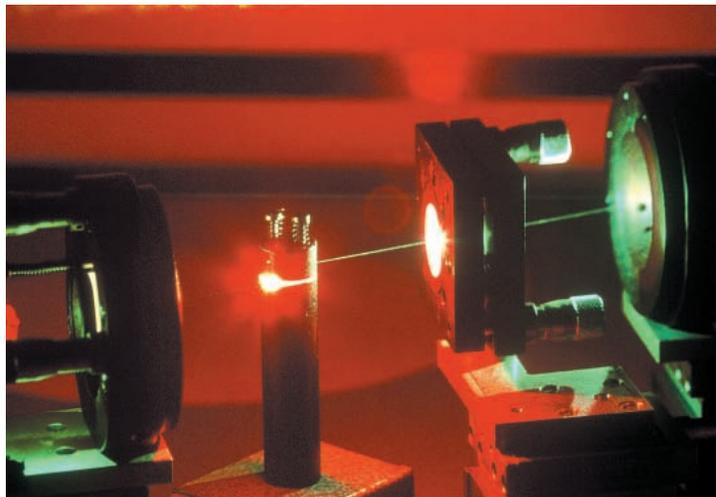
Ein Laser besteht aus drei Grundkomponenten:

1. **Lasermedium** (Gas, Flüssigkeit oder Festkörper)
2. **Energiequelle** (Pumpquelle z.B. Strom, Licht, atomare Stöße)
3. **Resonator** (Spiegelanordnung, in der das Laserlicht hin und her reflektiert werden kann)

(Grafik: Laser Zentrum Hannover)

Basis eines jeden Lasers ist zunächst das Lasermedium. Führt man dem **Lasermedium** mit einer **Energiequelle** Energie zu (in der Lasertechnik spricht man dabei vom Pumpen), kann es spontan Licht einer bestimmten Farbe aussenden, kann aber auch Licht dieser Farbe verstärken (wie es am Anfang beschrieben wurde). Im Falle der spontanen Emission werden alle Lichtteilchen (Photonen)

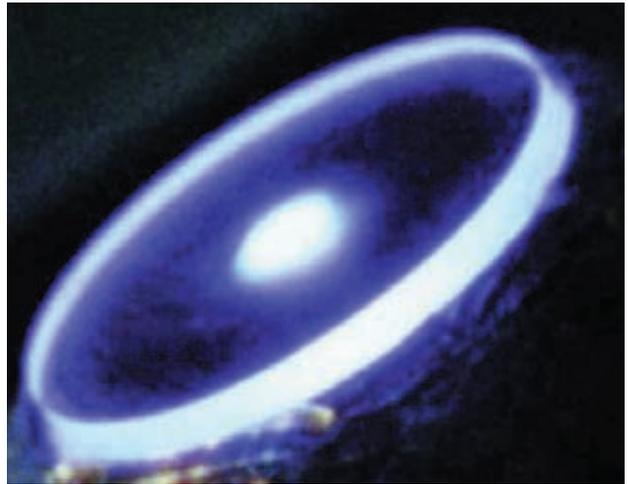
LASER: LASERMEDIUM, ENERGIEQUELLE, RESONATOR



Ein komplexer wissenschaftlicher Laseraufbau und ein einfacher Demonstrationslaser (Fotos: Laser Zentrum Hannover, Universität Bielefeld).

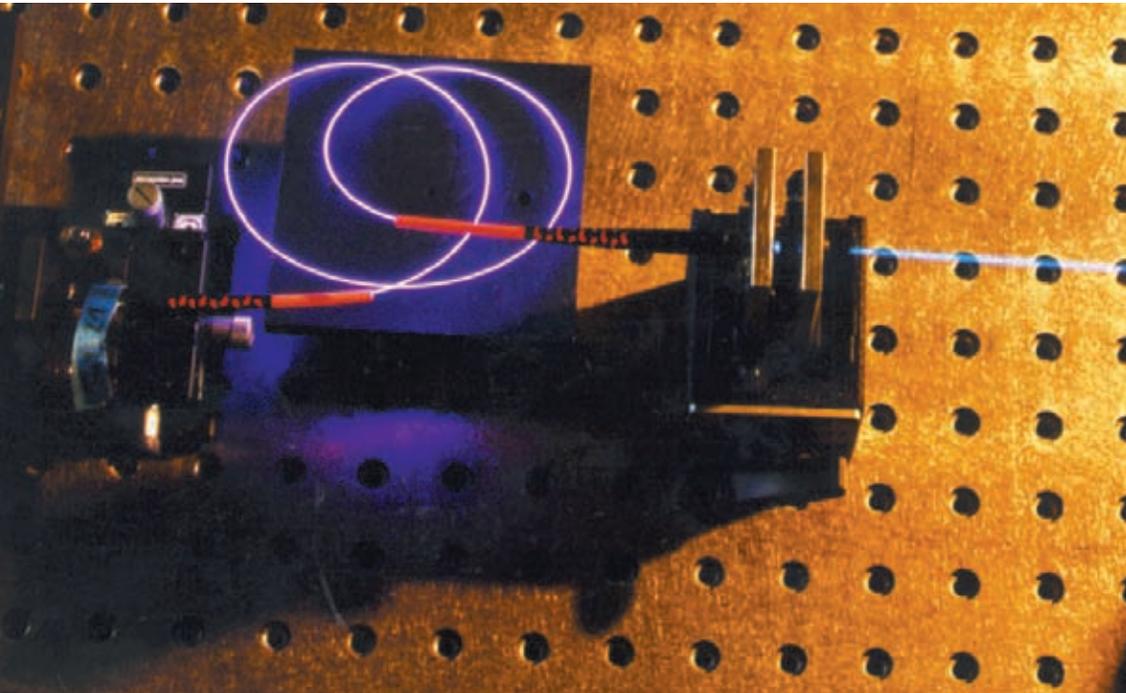
in beliebige Richtungen ausgestrahlt. Durch eine Spiegelanordnung um das Lasermedium, den so genannten **Laserresonator**, wird ein Teil des Lichtes wieder in das Medium zurückreflektiert. Dieser Vorgang wiederholt sich ständig. Dadurch wird das Licht verstärkt und exakt reproduziert: Die neu erzeugten Photonen haben genau die gleiche Farbe wie die alten und schwingen im gleichen Takt mit diesen. Dieser Vorgang heißt stimulierte Emission: Durch bereits vorhandene Photonen wird die Emission von identischen Photonen stimuliert. So entsteht ein Lichtstrahl, bei dem alle Photonen die gleiche Farbe haben und synchron schwingen (kohärentes Licht). Den eigentlichen Laserstrahl gewinnt man dadurch, dass einer der Spiegel das Licht nicht vollständig reflektiert, sondern einen kleinen Teil des auftreffenden Lichts durchlässt – gerade so viel, wie die Pumpquelle und das Lasermedium in einem Durchlauf nachliefern können.

Dieser Lichterzeugungs- und Verstärkungsprozess macht das besondere Licht des Lasers aus: Spektrale Reinheit, Wellenlängenvielfalt, kurze Pulse, Kohärenz, auch die Tatsache, dass es sich um einen scharf gebündelten Strahl handelt, sowie ein Leistungsvermögen in vorher noch nicht einmal denkbaren Qualität und Quantität.



Der CO₂-Laser als derzeit wichtigster Industrielaser hat den Weg bereitet. Immer wichtiger werden Festkörperlaser. Das Lasermedium sind hier speziell gezüchtete Kristalle. Aus solchen Boules (Rohformen) werden Laserstäbe oder dünne Laserscheiben geschnitten: Kaum vorstellbar, aber aus einer nur 140 µm dicken Scheibe lässt sich heute bereits mehr als 1 kW Laserleistung erzeugen. Die Scheibe ist das Lasermedium der Zukunft (Fotos: FEE, Universität Stuttgart).

Der erste Laser blitzte am 15. Mai 1960 in einem Labor der Hughes Aircraft Corporation auf. Theodore Maiman hatte ihn konstruiert: Er nahm einen Rubinstab (Lasermedium), umgab ihn mit einer gewendelten Blitzröhre (Pumpquelle), versah die Enden des Rubinstabs mit Spiegeln, einer davon halbdurchlässig (Resonator). Heute ist die Laserforschung so weit, dass eine Vielzahl von Lasertypen mit den unterschiedlichsten Eigenschaften und Fähigkeiten für eine Vielzahl von Anwendungen zur Verfügung steht.

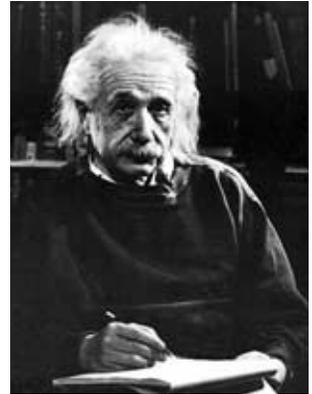


Das geführte Licht: Das aktive Lasermedium kann auch ein lange, aufwickelbare optische Faser sein, die mit laseraktiven Atomen versetzt wurde. Die Resonatorspiegel werden dabei oftmals einfach auf die Faserendflächen aufgedampft. Es entsteht eine äußerst leistungsfähige, flexible Laserquelle (Foto: Universität Jena).

Meilensteine der Laserforschung

- 1917 Theoretische Grundlagen der stimulierten Emission
- 1928 Experimenteller Nachweis der stimulierten Emission
- 1960 Erster Festkörperlaser (Rubin-Laser)
- 1962 Erste Beobachtung von Lasertätigkeit bei Halbleitern
- 1964 CO₂-Laser (mittleres Infrarot)
- 1964 Neodym-YAG-Laser (nahes Infrarot)
- 1966 Farbstofflaser
- 1970 Halbleiterlaser: kontinuierlicher Betrieb bei Raumtemperatur

- 1975 Edelgashalogen-Excimerlaser
- 1985 Röntgenlaser (soft „x-ray“-Amplifier bei 15 nm)
- 1985 Verstärkerkonzept für Femtosekunden-Pulse in Festkörpermaterialeien (CPA - chirped pulse amplification)
- 1991 Halbleiterlaser mit blauer Emission
- 1991 Direkte Erzeugung von Femtosekunden-Pulsen in Festkörpermaterialeien
- 1994 Scheibenlaserkonzept
- 1997 Table top terawatt Laser



Albert Einstein legte schon 1917 die theoretischen Grundlagen zur stimulierten Emission.

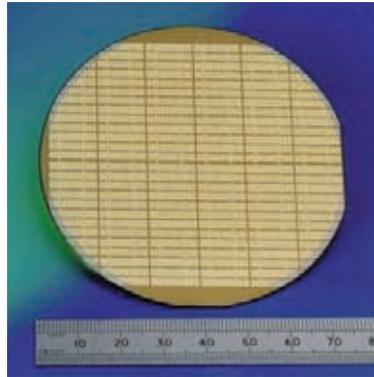


Lichtschwert, Typ III (bekannt aus „The Return of the Jedi“): Fiktion oder technische Möglichkeit?

Der Diodenlaser – vom Krümel zum Kraftpaket

Diodenlaser sind das Herzstück vieler Geräte, die wir aus dem Alltag kennen: CD-Spieler, Scannerkassen, Pointer oder Laserdrucker, besonders wichtig auch als Pumpquelle moderner Festkörperlaser. Ihre Vorteile sind ihre geringe Größe und die Tatsache, dass sie direkt mit Strom pumpbar sind. Der Laser hat dabei mikroskopische Abmessungen. In einem roten Pointer oder CD-Spieler hat der eigentliche Laser Abmessungen von 0,1 mm Länge bei einem Querschnitt von ca. 0,002 mm x 0,001 mm. Aus diesem Volumen können schon Leistungen von ca. 1 mW gewonnen werden. Mehr wird für diesen Zweck auch nicht benötigt. Fällt 1 mW Laserlicht jedoch direkt in das Auge, so entspricht dies einem direkten Blick in die Sonne bei freiem Himmel. Dies ist bereits augenschädigend. Daher ist der Laser im CD-Spieler fest eingebaut und nicht von außen sichtbar.

In der Industrie werden Diodenlaser mit viel höheren Leistungen beispielsweise zum Schweißen von Kunststoffen oder Metallen eingesetzt. Bereits bei einer Leistung von 1 W spricht man von Hochleistungslasern. Diese und höhere Leistungen erreicht man, indem das Volumen des Diodenlasers vergrößert wird (Länge: 1 mm, Querschnitt: 0,2 mm x 0,001 mm). Ordnet man ganz viele (ca. 20-50) dieser Laser auf einem sog. Barren nebeneinander an, so können bereits Leistungen von 50 W spielend erreicht werden. Für das Kunststoffschweißen wäre diese Leistung bereits ausreichend. Noch höhere Leistungen erzielt man, indem eine Vielzahl dieser Barren in einem Gehäuse zu einem Stapel (engl. stack) zusammengefasst werden. Typische Leistungen liegen zwischen 500–2000 W und damit ca. 2 Millionen mal höher als bei dem Diodenlaser, der im CD-Spieler eingebaut ist.



Herstellungsgeschichte eines Diodenlasers: Vom Krümel zum Kraftpaket.

Als Ausgangsmaterial wird GaAs (Galliumarsenid) als Kristall-Boule gezüchtet. Der Kristall wird in dünne Scheiben (Wafer) zersägt. Auf diese werden die Laserstrukturen geätzt bzw. epitaktisch aufgewachsen. Die Laserbauelemente werden durch Zersägen des Wafers zu Laserbarren vereinzelt. Jeder Barren wird dann mit Stromanschlüssen sowie einer Wärmesenke versehen bzw. konfektioniert. Zuletzt werden die Barren mit mikrooptischen Elementen kombiniert und mehrere Barren zu einem Stack zusammengesetzt.

Die gesamte Herstellungskette findet im Reinraum statt, da die kleinste Verunreinigung zum Ausfall der Laserbauelemente führt (Fotos: Freiburger Compound Materials, Fh-Institut für Angewandte Festkörperphysik (Fh-IAP), Fh-Institut für Lasertechnik (Fh-ILT), Jenoptik Laserdiode, Universität Würzburg).



Femto – Lasertechnik am unteren Ende der Zeitskala

Eine der besonderen Eigenschaften des Laserlichts ist die Tatsache, dass mit dem Laser ultrakurze Lichtpulse erzeugt werden können. Pulsdauern im Femtosekunden- (fs), ja bis sogar in den Attosekunden-Bereich (as) sind heute möglich.

Um hiervon überhaupt eine Vorstellung zu ermöglichen, zunächst einmal ein Vergleich: Licht, mit 300.000 km pro Sekunde das ultimative Tempolimit des Universums, reist in einer Sekunde von der Erde bis fast zum Mond, in einer Femtosekunde schafft es jedoch nur 0,3 Mikrometer, dem Durchmesser eines Bakteriums oder weniger als das Hundertstel eines Haares. Eine Femtosekunde ist also eine unvorstellbar kurze Zeitspanne:

$$\begin{aligned}
 1\text{fs} &= 10^{-15} \text{ s} \\
 &= 0,000.000.000.000.001 \text{ s} \\
 &= \text{der millionste Teil einer milliardstel Sekunde}
 \end{aligned}$$

Die Femtosekunde ist die Größenordnung der Zeit, die ein Atom braucht, um in einem Kristallgitter einmal hin- und zurückzuschwingen. Auch das Aufbrechen oder Entstehen einer chemischen Bindung wird in Femtosekunden gemessen. Die Femtosekunde ist mithin der Takt, nach dem der Nanokosmos – genauer: die Elektronenverteilung der Atome, Moleküle und Kristalle – tanzt: Femto - der Zeittakt der Atome.

Mit optischer Messtechnik im Femtosekunden-Bereich lassen sich so Abläufe atomarer oder biologischer Vorgänge wie in Zeitlupe verfolgen.

In dieser kurzen Zeit ist jedoch die gesamte Energie eines Lasers nutzbar. Es werden unvorstellbare Leistungen und Intensitäten möglich und nutzbar. Um dies zu glauben, muss man selber nachrechnen. Mit typischen Daten eines nur tischgroßen Lasers gilt:

$$\text{Pulsenergie} = 1 \text{ mJ} = 10^{-3} \text{ J}$$

$$\text{Pulsdauer} = 10 \text{ fs} = 10^{-14} \text{ s}$$

$$\text{Fokussdurchmesser} = 10 \text{ }\mu\text{m} = 10^{-3} \text{ cm}$$

$$\text{Fokusfläche} = \frac{\pi}{4} \cdot (10^{-3} \text{ cm})^2 \approx 10^{-6} \text{ cm}^2$$

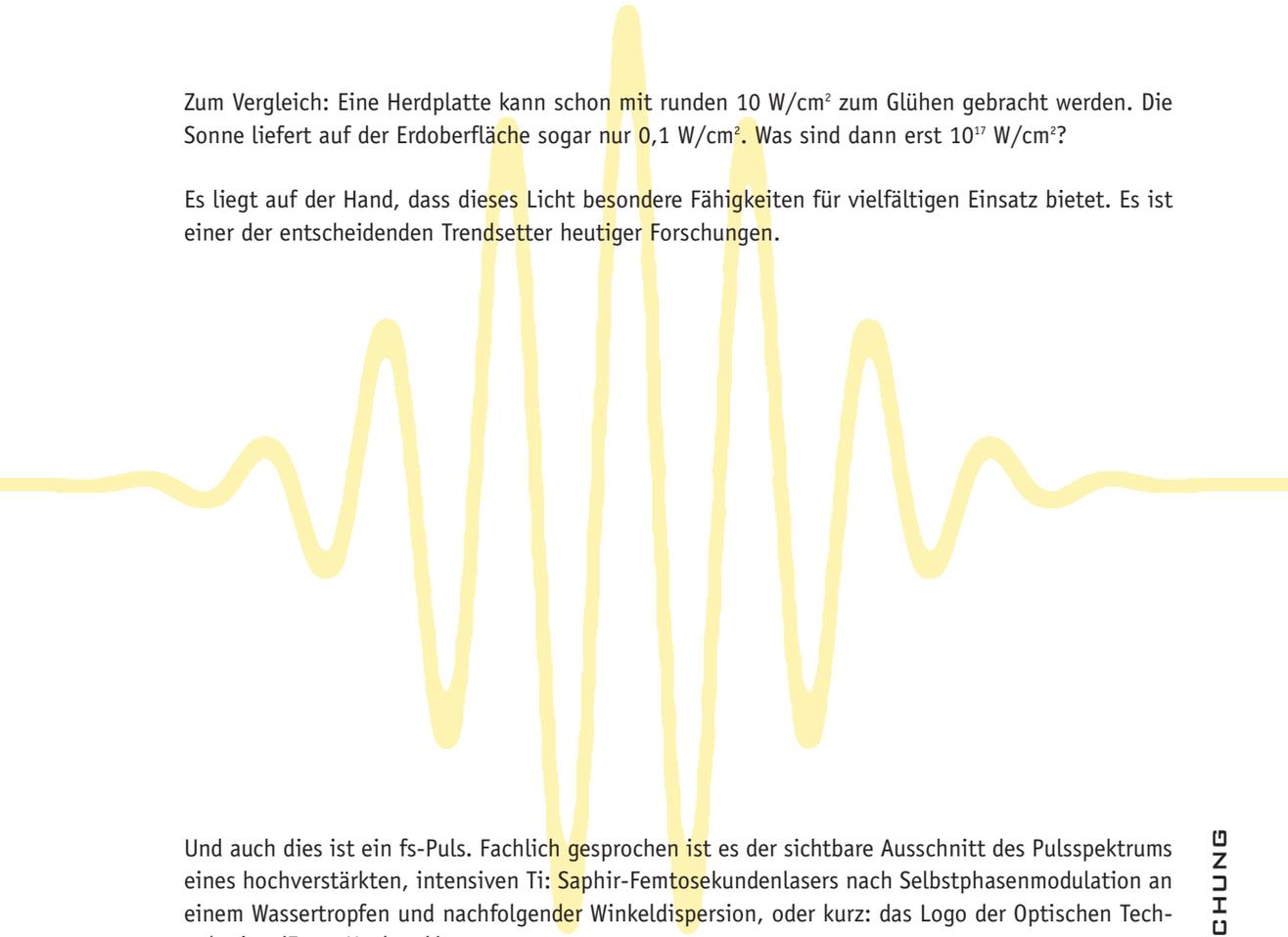
$$\text{Pulsleistung} = \frac{\text{Pulsenergie}}{\text{Pulsdauer}} = 1 \cdot 10^{11} \text{ W} = \underline{\underline{0,1 \text{ TW}}}$$

$$\text{Intensität (im Fokus)} = \frac{\text{Pulsleistung}}{\text{Fokusfläche}} = 1 \cdot 10^{17} \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$$

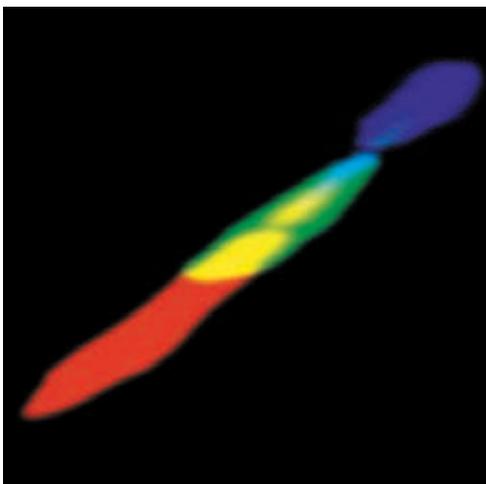


Zum Vergleich: Eine Herdplatte kann schon mit runden 10 W/cm^2 zum Glühen gebracht werden. Die Sonne liefert auf der Erdoberfläche sogar nur $0,1 \text{ W/cm}^2$. Was sind dann erst 10^{17} W/cm^2 ?

Es liegt auf der Hand, dass dieses Licht besondere Fähigkeiten für vielfältigen Einsatz bietet. Es ist einer der entscheidenden Trendsetter heutiger Forschungen.



Und auch dies ist ein fs-Puls. Fachlich gesprochen ist es der sichtbare Ausschnitt des Pulsspektrums eines hochverstärkten, intensiven Ti: Saphir-Femtosekundenlasers nach Selbstphasenmodulation an einem Wassertropfen und nachfolgender Winkeldispersion, oder kurz: das Logo der Optischen Technologien (Foto: Heybrock).

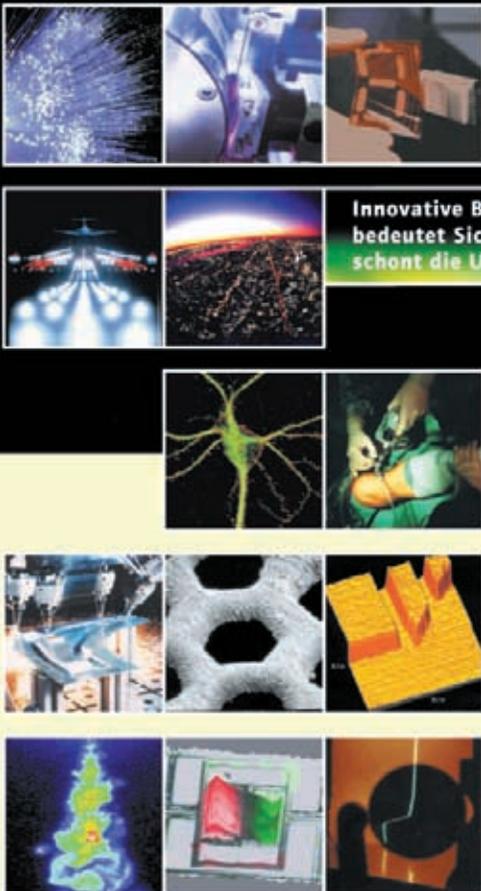


4. Wie funktioniert das? - Licht im täglichen Leben

Licht - Eintrittskarte für die Zukunft

Die Optischen Technologien machen die Vielfalt einzigartiger Eigenschaften des Lichts für alle wichtigen Bereiche der modernen Gesellschaft nutzbar. Licht wird zu unserer Eintrittskarte für die Zukunft.

Licht: Eintrittskarte für die Zukunft



Information & Kommunikation
Licht transportiert, speichert und visualisiert Daten

Innovative Beleuchtung
bedeutet Sicherheit und schont die Umwelt

Licht im Gesundheitswesen
für neue Wirkstoffe und sanfte Operation

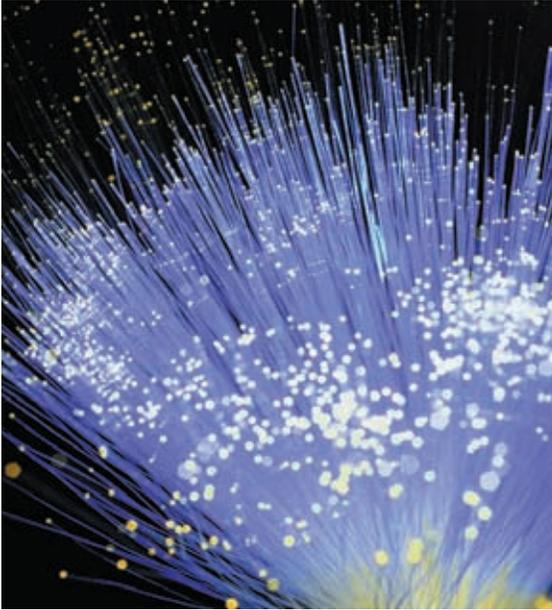
Makro-, Mikro-, Nanofertigung mit Licht

Messtechnik und Sensorik mit Licht: berührungslos, hochgenau und ultraschnell

LICHT STECKT VOLLER MÖGLICHKEITEN

Übertragung, Speicherung und Visualisierung mit Licht

Die Vorboten der Multimedia-Gesellschaft sind klar zu sehen: Etwa die Hälfte der Bundesbürger verfügt heute schon über einen Internetanschluss, Handys mit Bildübertragung werden gerade zum Standard. Optische Technologien haben an der Übertragung, Speicherung und Visualisierung jeglicher Daten nicht nur maßgeblichen Anteil, sie allein ermöglichen die Bewältigung der enormen Datenmengen.



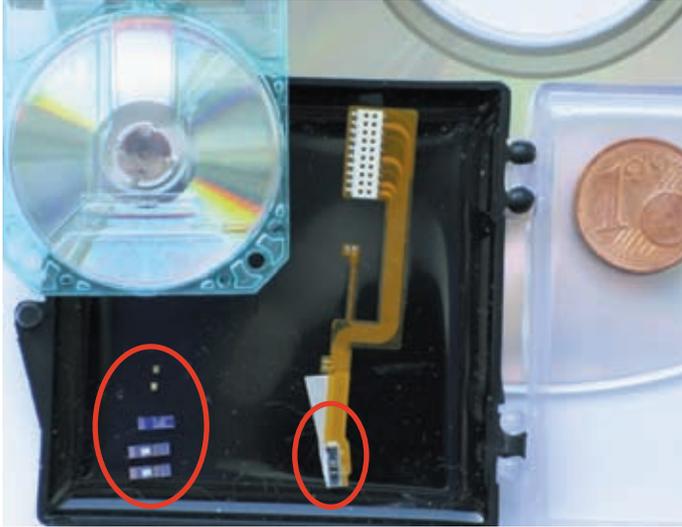
Übertragung: Derzeit wächst das optische Glasfasernetz auf der Erde in jeder Sekunde um 1000 Meter. Dies entspricht dreifacher Schallgeschwindigkeit (Mach3!). Diese Veränderungen durch die Optischen Technologien bieten allen Menschen weitreichende Möglichkeiten: Wissen und Information sind überall fast gleichzeitig für Jedermann verfügbar.

Licht transportiert heute schon mehr als 90 % der Datenmengen über das Glasfasernetz der Bundesrepublik Deutschland. Diese Datenmengen werden in den nächsten Jahren allein durch den Internetdatenverkehr exponentiell ansteigen. Der Telefonverkehr wird in 10 Jahren noch 5 % des gesamten Datenverkehrs ausmachen. Künftig können über eine einzige Glasfaser einige Terabit / Sekunde übertragen werden. Dies entspricht vielen Millionen Telefonkanälen.

Zur Verdeutlichung: Mit einer Übertragungsrate von einem Terabit / Sekunde lässt sich beispielsweise in einer Sekunde der Inhalt von 25 DVDs (Digital Versatile Disc) übertragen, dies entspricht ca. 75 Stunden Spielfilm in Fernsehqualität.

Ein alltägliches Beispiel: Auch die TV-Fernbedienung ist ein optisches Signalübertragungsgerät. Ein einfacher Versuch zeigt dies: Da das Licht der pulsierenden LED nahe dem sichtbaren Bereich liegt, ist die Funktionsweise einer Fernbedienung mit einer Digitalkamera zu sehen.

Speicherung: Die optische Informationsspeicherung ist Jedermann von der CD vertraut. Der weitere Fortschritt in den Optischen Technologien ermöglichte die DVD mit mehrfachem Speichervolumen. Sie verdrängen – wie einst die CD die Schallplatte – die Magnetband-Rekorder im Heimkino. Diese Entwicklung wird mit blauen Diodenlasern fortgesetzt und wohl erst durch holografische Speicher abgelöst werden.



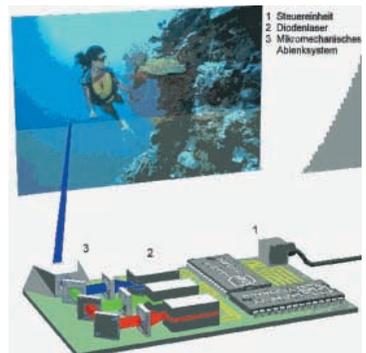
Lese-Schreibkopf eines Minidisk-Players: Laser: 650 nm / Disk: ca. 640 MByte. Herzstück sind die miniaturisierten optischen Komponenten, kaum noch mit bloßem Auge zu erkennen: Laserdiode, Linsen, Strahlteiler, Polarisator und Detektor (s. Kreis). Als Größenvergleich dienen das 1 Cent Stück sowie die heutige CD im Hintergrund.



Mit blauen Diodenlasern können zukünftig viel größere Datenmengen auf einer CD oder DVD gespeichert werden als mit den heutigen roten Diodenlasern (Foto: Fh-Institut für Lasertechnik (Fh-ILT)).

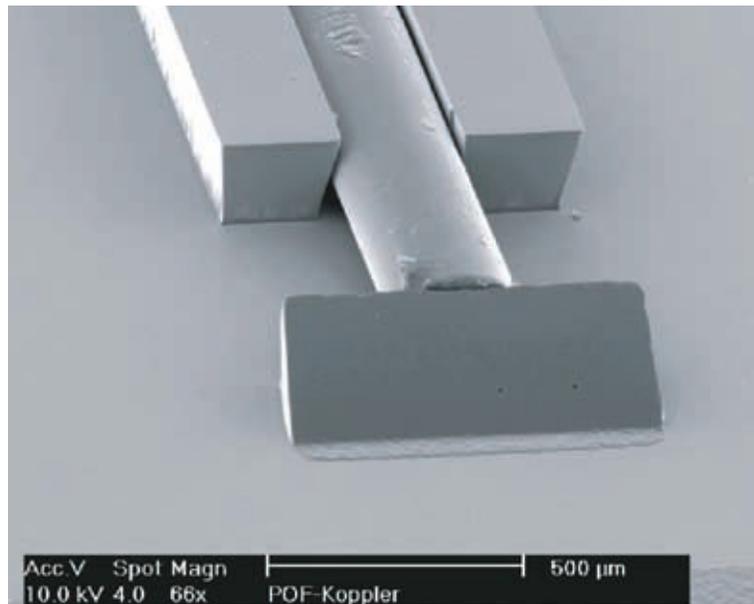
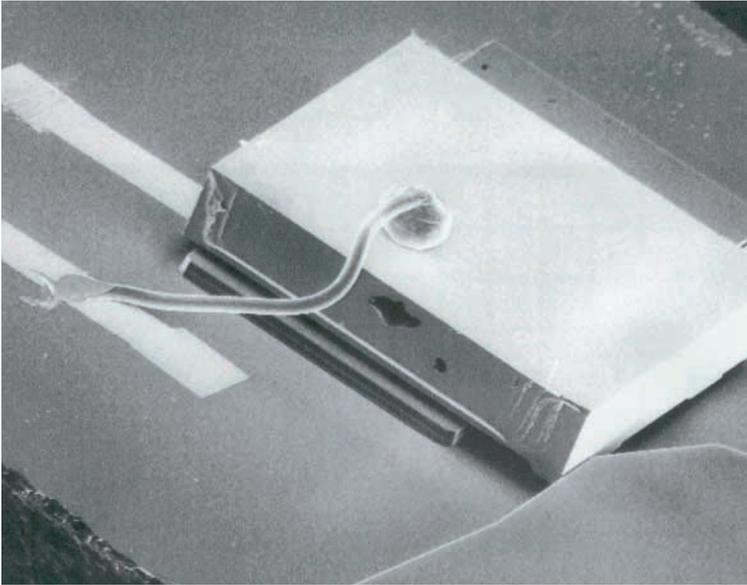
Visualisierung: Die Schnittstelle zum Nutzer, dem Menschen, ist schließlich der Bildschirm, das Display oder die Anzeige. Hier läuft eine stürmische Entwicklung vom kleinen Flachbildschirm bis hin zur brillanten Projektion in Hauswandgröße. Head-Up-Displays in der Frontscheibe von Autos informieren den Fahrer ohne zu stören. Pulsierende Bilder liefert das Laser-TV, das sind rote, grüne und blaue Laserstrahlquellen kombiniert mit einer schnellen Ablenkeinheit, mittlerweile Dank optischer Systemtechnik in Zigarrenkistengröße. Solche Technologien sind auch verantwortlich für die Digitalisierung der Druck- und Fototechnik. Lichtquellen der Zukunft, selbstleuchtende organische LED (OLED) sind Grundlagen für die programmierbare Zeitung von morgen.

Das einfache LCD-Display vieler Geräte basiert auf optischer Polarisation. LCD sind Flüssigkristalle (Liquid Crystal Display) zwischen 2 Polarisatoren: Die Molekülketten dieser Kristalle wirken ebenso wie Polarisatoren. Sie lassen sich durch eine angelegte Spannung ausrichten und können so Licht sperren. Hierdurch entsteht ein dunkles Pixel. Durch Drehen eines einfachen Folienpolarisators über dem Display lässt sich dieser Effekt schnell zeigen (Fotos: VDI-Technologiezentrum).



Laser Display Technologie der Zukunft: Bilderzeugung durch RGB-Lasereinheit (Grafik: Universität Kaiserslautern).

Optische Technologien in der Information und Kommunikationstechnik umfassen integrierte Laserquellen, Glasfasertechnik, optische Verstärker, Empfänger, Weichen und Knoten; dies alles integriert mit optischer Mikrosystemtechnik. Oben: Hybridaufbau einer Laserdiode; unten: Glasfaser mit Umlenkprisma (Fotos: CRC Optical Systems, Fh-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik (Fh-IOF)).





Makro, Mikro, Nano - Licht ist universelles Werkzeug

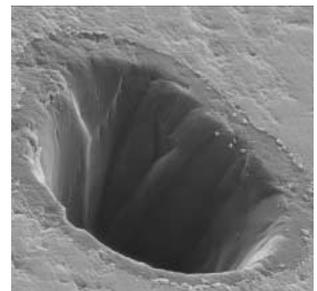
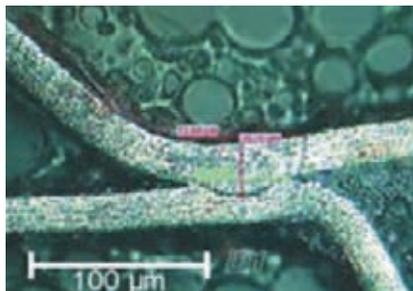
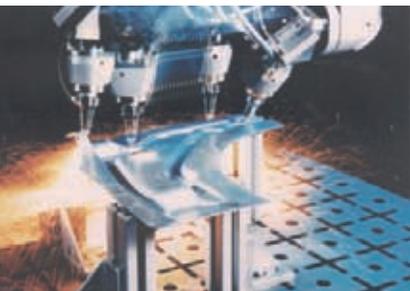
Optische Technologien haben die Fabrikhallen erobert.

Grund ist ihre Hebelwirkung: Sie sorgen für technische Verbesserungen, die sich auf andere Industriebereiche auswirken. So reduziert das Laserschweißen im Flugzeugbau das Gewicht des Flugzeugrumpfes bis zu 10%, die Herstellungskosten bestimmter Flugzeugteile sogar bis zu 20%.

Jedes Produkt des täglichen Lebens könnte potenziell an einer Stufe seiner Herstellung mit einem Laser zu tun haben. Vom Handwerk bis zur Großindustrie, von der Kleinserie bis zur Massenfertigung – die intensive Nutzung photonischer Technologien führt zu neuen, technisch und wirtschaftlich vorteilhaften Fertigungsverfahren.

Materialbearbeitung mit Lasern – das ist Schweißen, Schneiden, Bohren und Oberflächenbearbeiten mit unvorstellbarer Genauigkeit und Leistungsfähigkeit:

- 100 Schweißstellen pro Minute, z.B. bei Autotüren (s. Bild links)
- kleinste Schweißnaht der Welt: 30 μm (s. Bild mitte)
- Flachblechschneiden bis 100 m/min
- 1000 Feinstbohrungen pro Sekunde in Leiterplatten
- die präziseste Stahlbohrung der Welt: 20 mm tief, Durchmesser 100 μm
- Laser bohren selbst das härteste Material der Welt: den Diamanten (s. Bild rechts)
- Strukturieren von Zylinderlaufflächen: kompletter Motorblock in weniger als 50 s
- Aufbau beliebiger Formen aus Metallpulver



(Fotos: Trumpf, Universität Chemnitz, TU Berlin)

Diese Rekordpräzision ist möglich, weil sich die gesamte Energie des Laserlichts auf kleinsten Flächen fokussieren lässt und jeder Bearbeitungsprozess speziell optimiert werden kann (Wellenlänge, Pulsdauer, Energie). Der Laserstrahl arbeitet flexibel und berührungslos. Damit wird der Verzug und Verschleiß der Bauteile, wie er etwa bei einer Säge auftritt, vermieden. Daher ist z.B. in der Automobilindustrie das Laserschweißen die zeitgemäße Methode, um Leichtbau-Karosserien und viele andere Bauteile zu bearbeiten.

Mikromaterialbearbeitung: Mit hochbrillianten oder kurzen Laserpulsen lassen sich winzige Bauelemente für Medizin oder Nachrichtentechnik erstellen, deren Oberflächendetails bis zu tausendmal feiner sind als ein menschliches Haar. Bei der extrem kurzen Einwirkzeit von wenigen Femtosekunden ist die Wärmeeinwirkung auf den umliegenden Bereich sehr gering: mit Licht kalt verdampfen.



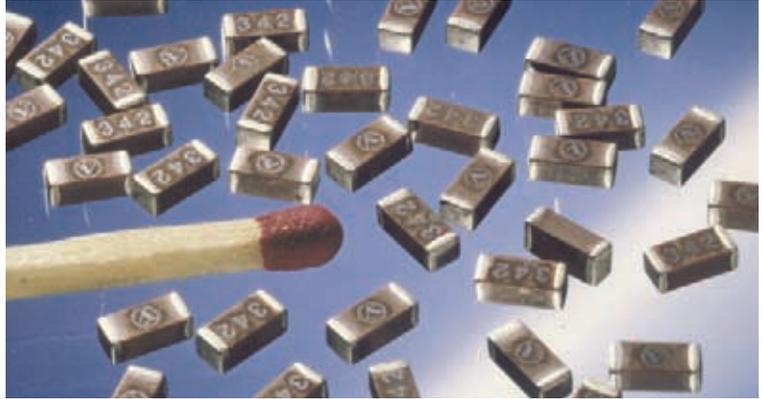
FaszinationLicht, von Licht geschrieben auf ein Haar (Foto: Laser Zentrum Hannover).

WER DAS BESSERE WERKZEUG HAT, BAUT DIE BESSEREN PRODUKTE.

Der direkte Vergleich zeigt: Bei der Mikromaterialbearbeitung mit langen Laserpulsen entstehen Aufschmelzungen (links). Diese stören im Makrobereich nicht, im Mikrobereich jedoch liegen sie in der Größenordnung der gewünschten Strukturen. Es entsteht ein unbrauchbares Produkt. Teure Nachbearbeitung oder hoher Ausschuss sind die Folgen. Bei Verwendung von Femtosekundenpulsen entsteht ein direkt bearbeitetes, hochwertiges Produkt (rechts), z.B. Einspritzdüsen moderner Motoren (Fotos: Laser Zentrum Hannover).



Per Laserschnitt aus der Urzeit auferstanden: Dinosaurier aus Stahl (Foto: BBZ Berufsbildungszentrum Fulda).



Doch Licht kann auch schreiben: Scheckkarten, fälschungssichere Dokumente, nicht abreibbare Tastaturen, das Etikett der Mineralwasserflasche – sie alle sind mit dem Laser beschriftet. Auch nahezu jedes Bauteil, vom Elektronikabel bis zum Mikrochip trägt die mikroskopische Signatur eines Lasers (Foto: Lambda Physik).



Mikro-Venus (ca. 3 mm hoch), per Laser aus Glas geschnitzt, Laserinnengravur (Fotos: Laser Zentrum Hannover, Fh-Institut für Lasertechnik (Fh-ILT)).

Nano-Elektronik – Im fernen UV geboren

Immer anspruchsvollere Computer- und Mobilfunk-Anwendungen erfordern immer leistungsfähigere Chips. Dafür müssen die Strukturen auf den Chips immer kleiner werden, so dass mehr Komponenten darauf Platz finden. Derzeit verdoppelt sich die Komplexität der Computer-Chips alle 18 Monate (Moore'sches Gesetz). Dieser Fortschritt von der Mikro- zur Nano-Elektronik beruht wesentlich auf dem Fortschritt in den Optischen Technologien.

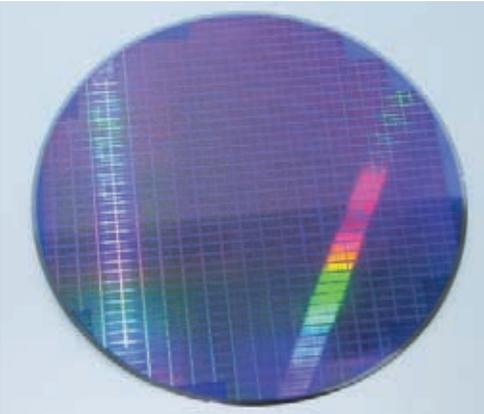
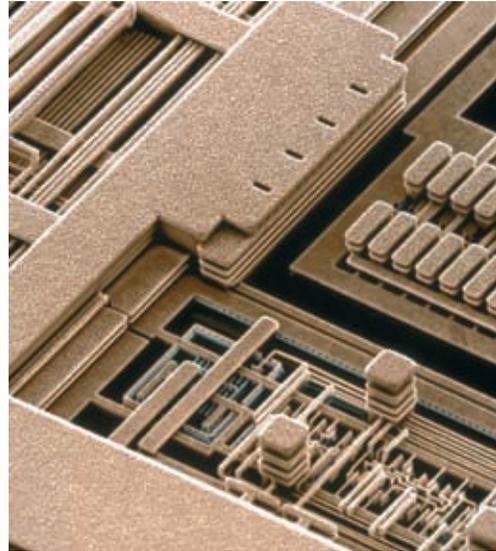


Abbildung: Jede Siliziumscheibe (Wafer) trägt Hunderte von Chips mit winzigen Elektronikbausteinen (Fotos: Infineon, IBM Deutschland).



Elektronik-Chips werden mit dem Verfahren der optischen Lithografie hergestellt. Dabei werden auf einer Siliziumscheibe (Wafer) Strukturen in einem strahlungsempfindlichen Lack (Resist) erzeugt. Die Bestrahlung mit Laserlicht durch eine Maske überträgt die gewünschte Struktur auf das Resist, denn das Licht verändert die Löslichkeit des Resists in einer Entwicklerlösung. Nach Entfernen der belichteten Bereiche scheiden sich auf dem verbleibenden Relief die Leiterbahnen des Chips ab. Der verbleibende Resist in den Zwischenräumen wird abgelöst.

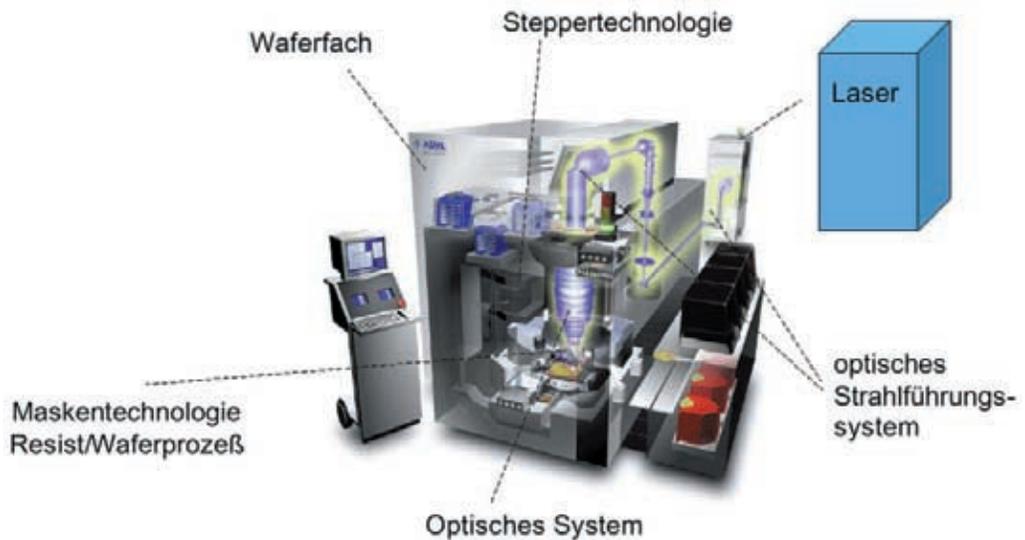


Der Fahrplan zur Nano-Elektronik: Die Optischen Technologien bestimmen das Tempo (Grafik: The International Technology Roadmap for Semiconductors 1999).

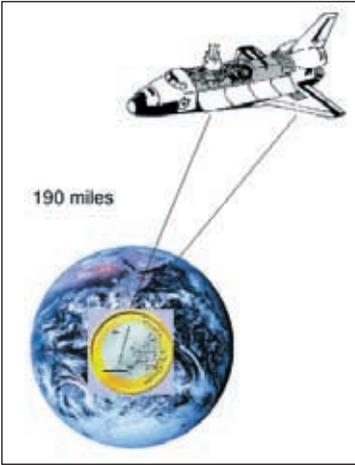
Je kürzer die Wellenlänge des eingesetzten Laserlichts ist, desto kleinere Strukturen lassen sich auf die Siliziumscheibe übertragen. Heute arbeitet man mit der so genannten 193 nm-Excimerlaserquelle. Hiermit lassen sich Strukturgrößen zwischen 100 und 70 nm erzielen. Der nächste Schritt, der bis

zum Jahre 2006 vorhalten wird, ist die 157 nm-Excimerstrahlung; sie ermöglicht Strukturgrößen unter 70 nm – das ist fast 1000 mal weniger als die Breite eines Haares! Wenn die Strukturen der Transistoren und Speicher auf dem Chip diese Größe erreichen, schrumpfen sie auf etwa ein Drittel ihrer heutigen Abmessungen. Die Leistungsfähigkeit eines Chips wird sich mit diesem Schritt gut verzehnfachen. Der nächste Schritt, der Generationswechsel zur EUV-Lithografie wird dann allerdings bis an die physikalischen Grenzen der Elektronik führen.

Für die Abbildung solch feiner Strukturen sind hochpräzise optische Systeme und Materialien notwendig, die das kurzwellige Laserlicht auf den Wafer übertragen. Diesen Anforderungen genügen derzeit nur Optiken aus reinstem Calciumfluorid. In den durchsichtigen Kristallscheiben kommt auf eine Milliarde Atome gerade mal ein Fremdatom – kein Wunder, dass sie teurer sind als Gold. Reinheit und Präzision aber sind kostbar: So wie bei einer Diaprojektion jedes Staubkorn sichtbar ist, würde sich jeder Abbildungsfehler auf dem Chip wiederfinden – und ihn unbenutzbar machen.



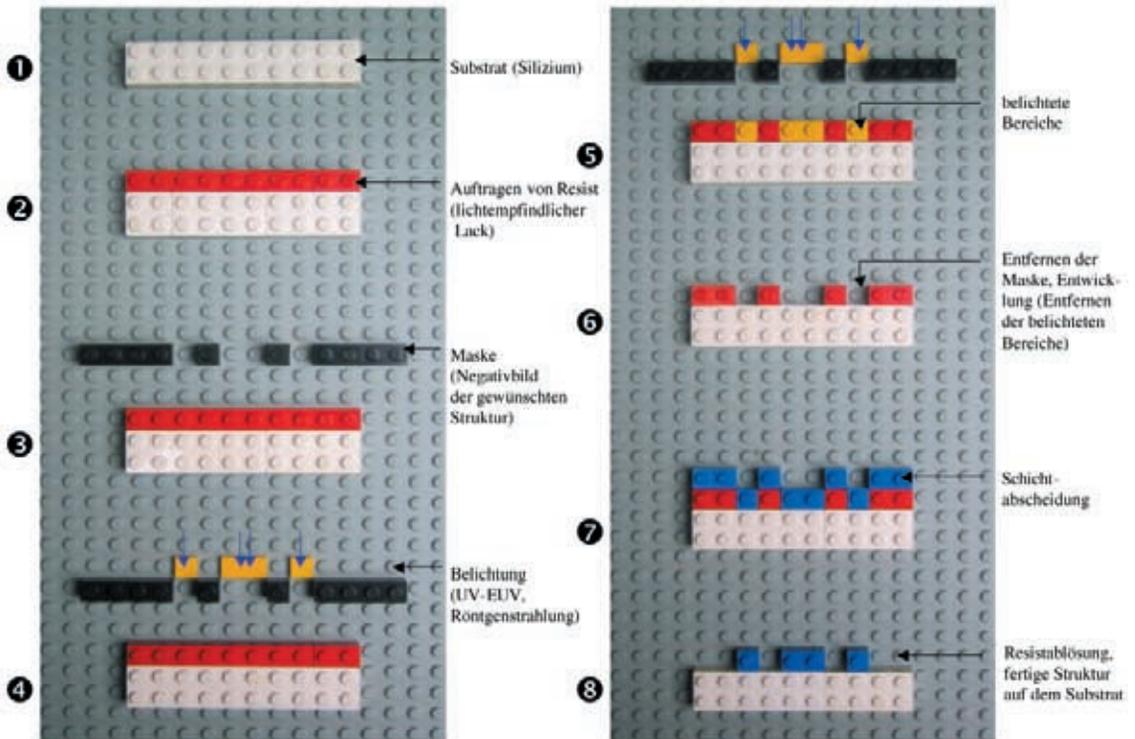
Jeder Chip wird mittels optischer Lithografie hergestellt. In einer solchen Lithografiemaschine findet der Belichtungsprozess der Wafer statt.



Strukturen im Nano-Bereich herzustellen kommt der Aufgabe gleich, eine Münze auf der Erdoberfläche vom Weltall aus nachzuzeichnen, und zwar präzise immer wieder auf denselben Fleck.



Techniker setzen die Komponenten zu einem leistungsstarken Abbildungssystem zusammen (Fotos: Carl Zeiss).



Grundprinzip der optischen Lithografie: Elektronik-Chips werden mit dem Verfahren der optischen Lithografie hergestellt. Dabei werden auf einer Siliziumscheibe (Wafer) Strukturen in einem strahlungsempfindlichen Lack (Resist) erzeugt. Die Bestrahlung mit Laserlicht durch eine Maske überträgt die gewünschte Struktur auf das Resist, denn das Licht verändert die Löslichkeit des Resists in einer Entwicklerlösung. Nach Entfernen der belichteten Bereiche scheiden sich auf dem verbleibenden Relief die Leiterbahnen des Chips ab. Der verbleibende Resist in den Zwischenräumen wird abgelöst (Darstellung: VDI-Technologiezentrum).



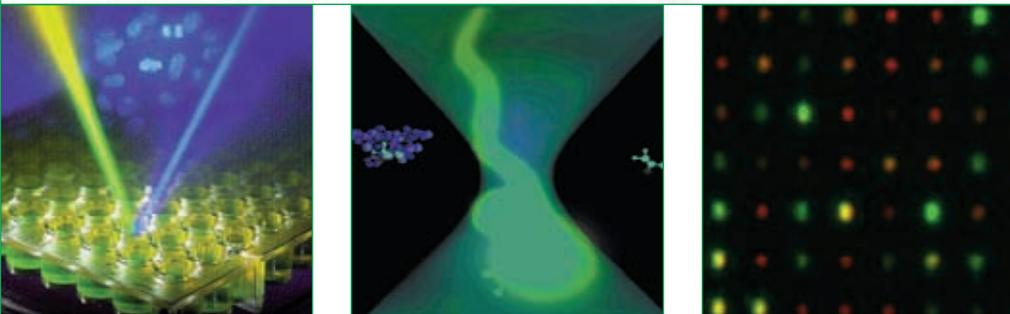
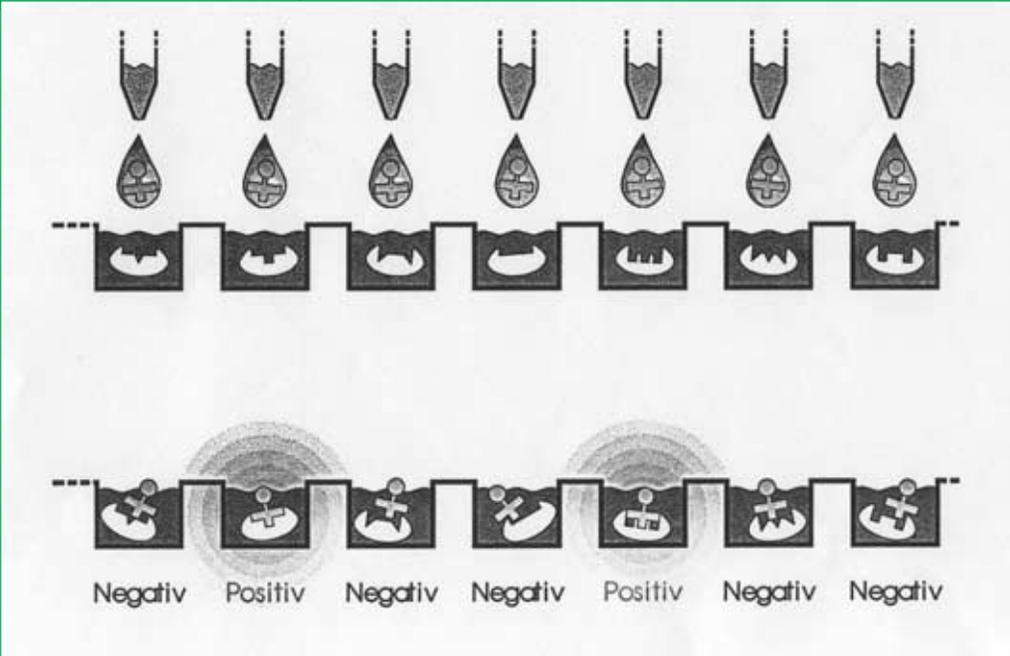
Biophotonik – Hoffnungsträger für die Heilkunst

Trotz aller Fortschritte der modernen Medizin sind auch heute noch zwei Drittel aller Krankheiten nicht ursächlich heilbar. Die Behandlung beschränkt sich oftmals auf eine Therapie der Symptome, und das mit Medikamenten, die mit Risiken und Nebenwirkungen behaftet sind. Jüngste Forschungsergebnisse zeigen heute, dass der Schlüssel zu den 100 wichtigsten Krankheiten in etwa 5000 bis 10000 Genen liegt. Daraus entsteht der Wunsch, den biologischen Ursachen von Krankheiten auf die Spur zu kommen und sie an der Wurzel, am besten schon vorbeugend, zu bekämpfen. Biophotonik heißt das neue Zauberwort. Sie eröffnet die Möglichkeit, Lebensprozesse mit Hilfe optischer Verfahren zu untersuchen und sichtbar zu machen.

Besonders vielversprechend ist der so genannte Biochip. Biochips können z. B. helfen, die genaue Form einer Krebserkrankung zu erkennen. Das ist wichtig, da oft individuelle genetische Faktoren darüber entscheiden, ob eine Therapie wirkt oder nicht. Die Analyse von genetischem Material via Biochip kann dann ermöglichen, für jeden Patienten das individuell passende Medikament und die richtige Dosierung zu finden. Das funktioniert, weil auf einem Biochip von Fingernagelgröße sehr viele mikroskopische Reaktionsfelder angebracht sind; so sind mit einer Probe in kurzer Zeit zahlreiche Untersuchungen möglich. An der Stelle des Biochips, an der eine biochemische Reaktion stattgefunden hat, verrät z. B. ein Fluoreszenzleuchten, welche Genmutation etwa für den Krebs mitverantwortlich ist: Rasterfahndung nach den Ursachen der Krankheiten.

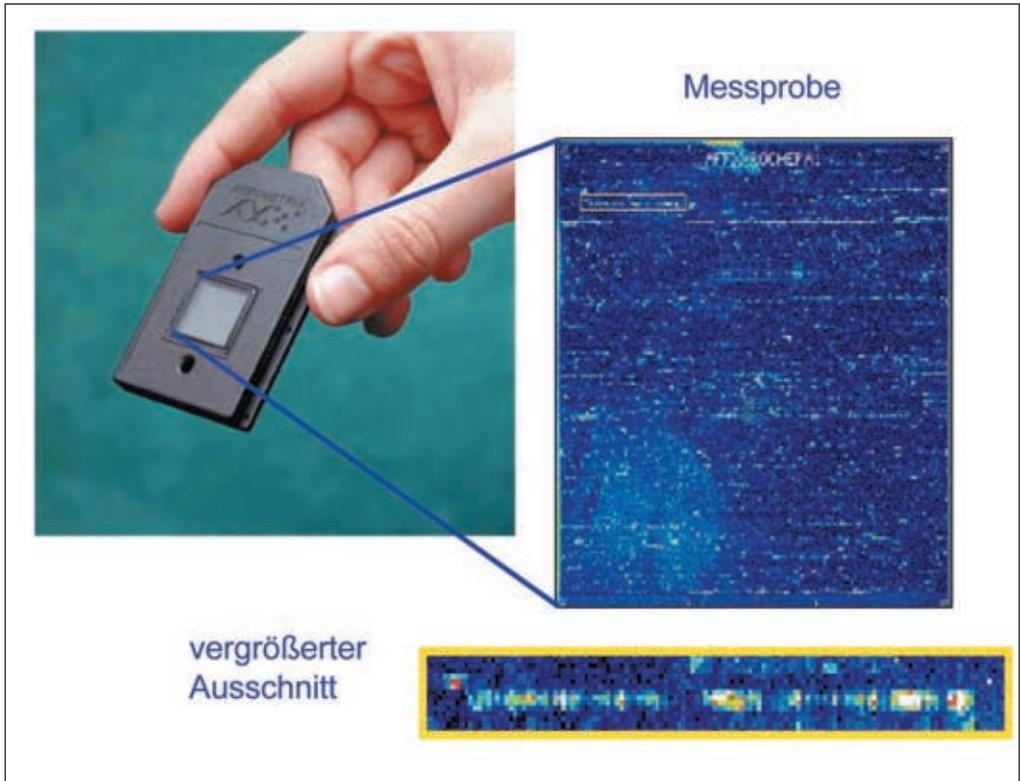
Andere Biochips können dazu beitragen, mögliche Wirkstoffkandidaten für ein neues Medikament aus einer Menge von Substanzen herauszufiltern. Die Anwendungsgebiete der Biochips erstrecken sich jedoch weit über Medizin und Pharmazie hinaus. In der Lebensmittelindustrie beispielsweise können sie zur Identifizierung gentechnisch veränderter Lebensmittel eingesetzt werden. Auch Verunreinigungen wie Salmonellen sind schon in kleinen Mengen leicht aufzuspüren. Im Umweltschutz können Biochips bei der Analyse von Bakterien im Klärschlamm helfen.





Das Prinzip: Auf dem Biochip sind Substanzen aus den Probenbibliotheken der Pharmafirmen aufgebracht. Hierüber wird nun genetisches Material gespült, in dem man die Ursache einer Krankheit vermutet. Der Laserstrahl scannt die Proben auf dem Biochip. Nur wenn die gesuchten Moleküle wie Schlüssel und Schloss in einen Steckkasten passen, hat eine biochemische Wechselwirkung stattgefunden. Dann erzeugt der Laser ein charakteristisches Leuchten. Dieses gibt dem Forscher Hinweise auf mögliche neue Wirkstoffe: Licht statt Mäuse (Fotos: Hoffmann-La Roche, Tecan, Evotec, LMTB).

Miniaturisierte Biochips mit Probengrößen im Pikoliter- oder gar Femtoliterbereich (!) bieten mittlerweile Platz für bis zu 400.000 Proben. Die entstehenden unterschiedlichen Lichtsignale werden mit einer Kamera aufgenommen und per Computer ausgewertet: Jedes Photon erzählt seine Geschichte (Foto: Affymetrix, Roche).



Endoskopie: Die Sicht nach innen

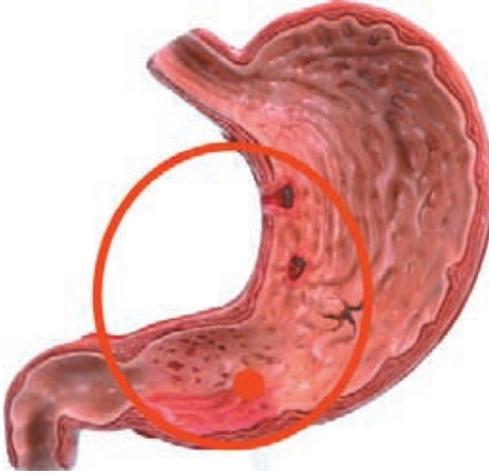
„Endoskopie“ hat einen griechischen Wortursprung und bedeutet „nach innen schauen“. Die Endoskopie ist ein „sanftes“ Diagnose-Verfahren zur Untersuchung von Hohlorganen im Inneren des Körpers, wie z.B. der Luftröhre, der Bronchien oder des Magens. Der Vorteil: Der Arzt kann mit Hilfe eines Endoskops das zu untersuchende Organ ohne großen Eingriff direkt betrachten. Auch Körperregionen, die keinen natürlichen Zugangsweg haben wie Bauchhöhle, Brusthöhle, Gelenke und Gefäße, kann der Arzt nach einem nur geringen Einschnitt (minimalinvasiv) per Endoskop untersuchen.



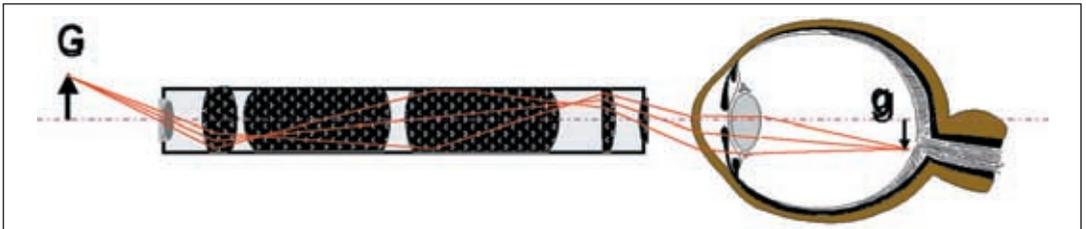
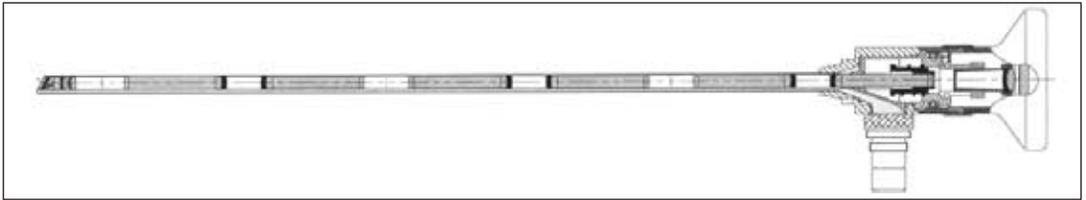
Das Endoskop liefert brillante und detailgetreue Bilder der körperinneren Oberflächen. Dadurch kann es helfen, krankhafte Veränderungen an Oberflächen zu erkennen, wie etwa Karzinome, das sind bösartige Veränderungen von Oberflächengewebe (im Bild rot gekennzeichnet). Jedoch kann der Arzt das Organ bei endoskopischen Untersuchungen nicht abtasten. Daher versuchen Forscher, dem Arzt mit einem holografischen Verfahren sogar ein „Endoskopisches Fühlen“ zu ermöglichen.



Endoskopische Untersuchung von Knie und Blase
(Fotos: Osram, Ludwig-Maximilian-Universität München, Karl Storz, Universität Münster).



Die wesentlichen Bestandteile eines Endoskops sind eine Beleuchtungseinrichtung und ein optisches Abbildungssystem, mit dem das Licht aus dem Körper des Patienten zum Auge des untersuchenden Arztes oder zu einer Videokamera geleitet wird. Der Trick für die guten Bilder: Die dicken Linsen im Endoskop können mehr Licht übertragen als Systeme aus dünnen Linsen.



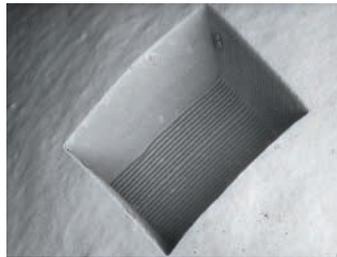
Querschnitt und Strahlengang durch ein Endoskop (Grafik: Karl Storz).

Sanft heilen durch Licht

In Augenheilkunde, Chirurgie, Zahnmedizin und anderen medizinischen Disziplinen sind Optische Technologien zukünftig nicht mehr wegzudenken. Sie versprechen ein sanftes, minimalinvasives Behandlungsverfahren, das ohne große Eingriffe und Nebenwirkungen beste Erfolge erzielt. Denn Licht wirkt berührungsfrei und höchst präzise. In der Orthopädie könnten z.B. zukünftig ultrakurze Laserpulse eingesetzt werden, um Bandscheibenvorfälle zu behandeln. Die Hoffnung: Lichtpulse im Femtosekundenbereich entfernen Bandscheibengewebe, ohne umliegendes Gewebe zu schädigen. So wird der Druck auf das Nervengewebe reduziert, während die Funktion der Bandscheibe erhalten bleibt.



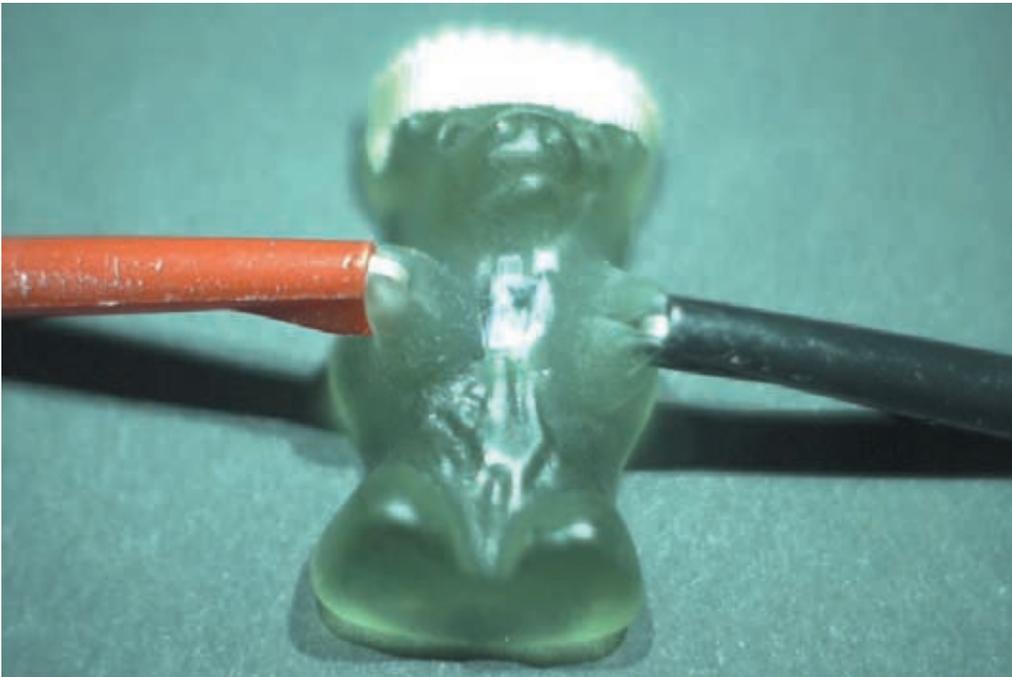
Freie Bahn fürs Blut: Der mit einem Kurzpuls-Laser strukturierte Stent hilft, verengte Blutgefäße auszudehnen (Foto: Laser Zentrum Hannover).



Schmerzfreies Bohren beim Zahnarzt: Der Laser zeigt der Karies die Zähne (Foto: Laser Zentrum Hannover).



Klare Sicht: Linsenkorrektur per Laser (Foto: Medizinisches Laserzentrum Lübeck).



Testlauf für zukünftige chirurgische Behandlungen: Operation am Gummibärchen mit ultrakurzen Laserpulsen. Das Gelatinematerial ist ein guter Modellwerkstoff für das menschliche Bandscheibengewebe (Foto: Universität Jena).



Holografie: Licht in der dritten Dimension

Hologramme kennt jeder: Auf Bankkarten oder Geldnoten etwa sind die bunt schimmernden, plastisch wirkenden Bilder weit verbreitet. Bei der Holografie (gr.: hólos = vollständig, gráphein = schreiben) wird mit Hilfe von Laserlicht ein Gegenstand auf einer speziellen Fotoplatte als dreidimensionale Rekonstruktion aufgezeichnet – sogar in Farbe. Das Faszinierende: Jedes Bruchstück eines Hologramms zeigt wieder das gesamte Bild.

Lesbar mit Holografie: Die Keilschrift der Sumerer

Diese Technik ist auch für die kulturhistorische Forschung nützlich: Mit einer mobilen holografischen Kamera können in aller Welt Objekte dreidimensional dokumentiert werden – wie etwa die Keilschrifttafeln der Sumerer. Viele dieser frühen Schriftdokumente sind noch nicht entziffert. Der Vorteil des holografischen Verfahrens: Die Farben und die plastische Form der Tafeln sind in den Hologrammen gespeichert und lassen ein Betrachten aus verschiedenen Blickwinkeln zu. Damit ist es erstmals möglich, die Schrift wie beim Original zu entziffern, indem man das Hologramm dreht und wendet, um auch kleinste Vertiefungen und andere Strukturen zu erkennen. Auf diese Weise können Archäologen weit verstreute oder schwer zugängliche Fundstücke detailgetreu untersuchen. Durch Überlagerung der holografischen Rekonstruktionen lassen sich zudem entfernt aufbewahrte Fragmente, die seit 5000 Jahren getrennt waren, wieder „vereinen“. Bei bestimmten Hologrammtypen sind sogar Kopien möglich, die Forscher aus aller Welt nutzen können.



Farbhologramm einer Keilschrifttafel, bekannt aus der ZDF-Fernsehsendung SPHINX: Geheimnisse der Geschichte: Mythos Babylon (Universität Münster).



Die mobile holografische Kamera im Einsatz (Foto: Universität Münster).

Der „holografische Zollstock“

Licht zeichnet Zahlen aus Lichtpunkten in den Raum, wenn man es durch speziell angeordnete Hologramme lenkt (Foto: Fh-Institut für Produktionstechnik (Fh-IPT)).



Kein Handy ohne Optische Technologien

Allein am Trendbeispiel Handy lassen sich eine Vielfalt von Anwendungen der Optischen Technologien aufzeigen:

Elektronik:

- Layout der Schaltung durch UV-Licht auf die Platine aufgebracht
- Durchkontaktierungen der Leiterplatten mit dem Laser gebohrt (ca. 1000 Bohrungen/s, Durchmesser 20 μm)
- Drähte/Kontakte vor dem Bonden an die Chips mit Licht gereinigt (miniaturisiert, betriebssicher)
- Chips durch optische Lithografie produziert (höhere Leistungsfähigkeit: Schnellere Informationsverarbeitung, größere Informationsmengen (längere Texte oder auch Bilder versendbar))

Gehäuse:

- Unverwischbare Beschriftung der Tastatur mit dem Laser (anstelle Lackierung)
- Verschweißen anstelle von Kleben der Kunststoffe mit dem Laser (stabilerer Aufbau, wirtschaftlichere Produktion, keine Trockenzeiten, umweltfreundlich)



Display:

- LCD's oder Leuchtdioden als Hintergrundbeleuchtung

Zukünftig: Farb-Foliendisplays aus organischen Leuchtdioden geplant (geringerer Energieverbrauch, d. h. der Akku hält länger)

Bedienung:

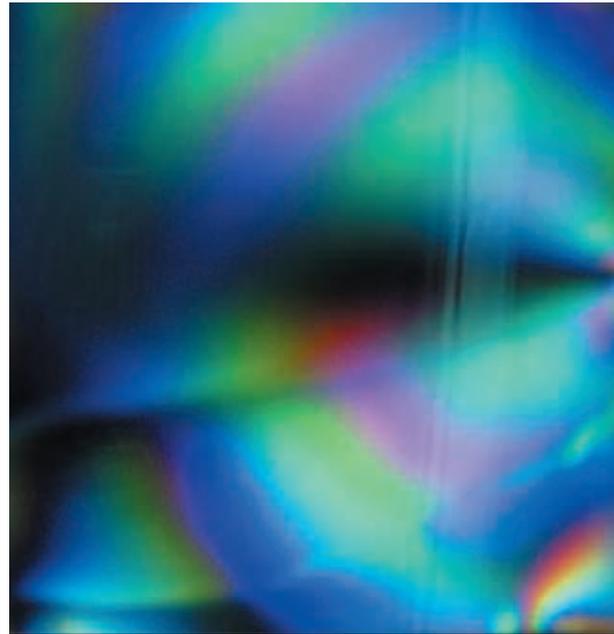
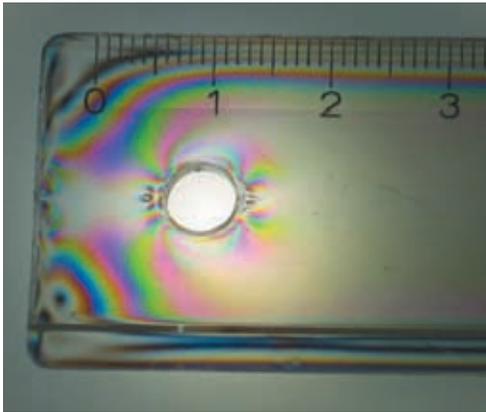
- Optische Infrarot-Schnittstelle zum PC zur Datenübertragung
- Eingebaute Miniaturkamera zur Bildübertragung
- Nutzung des Glasfaserfestnetzes, dem Datenhighway der Multimediagesellschaft



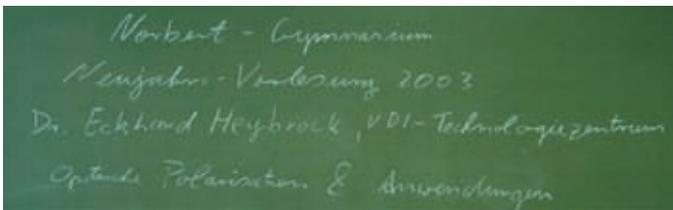
Unsichtbare Dinge sehen: Materialprüfung durch Polarisisation

Alltagsgegenstände, die gewöhnlich klar erscheinen, können bei genauerer Betrachtung sehr ungleichmäßig sein: Ein Lineal oder eine CD-Hülle etwa zeigen unter Polarisationsfiltern die Spannungen, die schon durch den Herstellungsprozess in ihnen enthalten sind.

Dieser Effekt, der sich auch gut z. B. zur Demonstration in einer Schulklasse eignet, wird professionell zur Prüfung von Werkstoffen oder Bauteilen genutzt. Er beruht auf der so genannten Doppelbrechung: Hierbei zerlegt das Material einen einfallenden Lichtstrahl in zwei senkrecht zueinander polarisierte Lichtstrahlen mit unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten.



Befindet sich solch ein doppelbrechendes Material zwischen zwei gekreuzten Polarisationsfiltern, dann zeigen sich bei Bestrahlung mit weißem Licht charakteristische schillernde Farben. Der Grund für das Farbenspiel: Das doppelbrechende Material dreht die Polarisationsrichtung für die Wellenlängen im weißen Licht unterschiedlich.



Auch unter mechanischen Spannungen können Materialien doppelbrechend werden. Durch Polarisationsfilter lassen sich daher die Belastungen von Werkstücken visuell darstellen – so wie bei einem

Lineal, dessen Kunststoff unter Spannung steht. Wer einen vertrauten Gegenstand einmal auf diese Weise gesehen hat, wird den Begriff Polarisisation sicher nie wieder vergessen.

Schüler der 13. Klasse des Norbert-Gymnasiums in Knechtsteden untersuchen während der Neujahrs-Vorlesung 2003 mit Polarisationsfiltern Gegenstände ihrer Alltagswelt (CD-Hülle, Lineal, Brille, Feuerzeug, usw.). Mit bloßem Auge unsichtbare Materialeigenschaften treten in schillernden Farben zu Tage (Fotos: VDI-Technologiezentrum).



LERNZIEL: FASZINATIONLICHT



Optische Technologien machen mobil

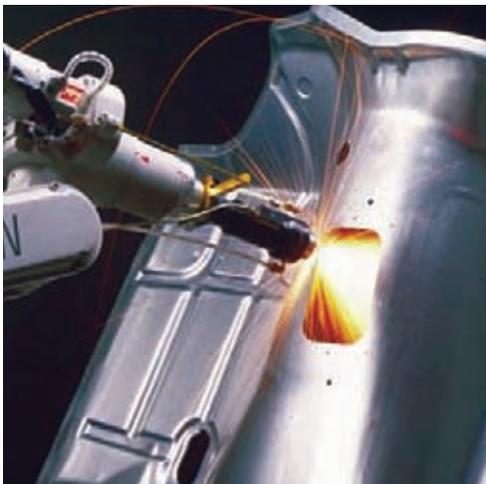
Die Anwendungen Optischer Technologien sind wohl in keinem Bereich vielfältiger als im Automobilbereich. Ihr Einsatz beginnt schon bei der Fahrzeugentwicklung und reicht über die Fertigungstechnik bis hin zum direkten Einsatz im Fahrzeug zur Unterstützung des Fahrers.



Lasergestützte Verbrennungsdiagnostik für Benzin/Dieselmotoren (Foto: DLR).



Head-Up-Display für die Informationsdarstellung (Foto: Temic).



Laser-Schneiden der Karosserie (Foto: Rofin-Sinar Laser):



Optische Fahrspurbestimmung (Foto: Bertha-von-Suttner-Gesamtschule).

<p>Formvermessung mit Laser-Streifenprojektion</p> <p>Schwingungsmessung durch Laser-Vibrometrie</p> <p>Lasergestützte Verbrennungsdiagnostik für Benzin/Dieselmotoren</p> <p>Laser-Kunststoffschweißen von Autenschlüsseln</p> <p>Laser-Schneiden und Besäumen der Innenausstattung</p> <p>Laser-Härten von Nockenwellen, Ventilen und Türfeststellern</p> <p>Laser-Schneiden von Karosseriedurchbrüchen/IHU-Bauteilen</p> <p>Laser-Löten von Kontakten</p> <p>Laser-Schweißen der Karosserie/Dachnaht/Tailored Blanks/Tank/Abgasrohre/Türkonstruktion</p> <p>Laser-Schweißen von Kleinteilen: Automatik-Getriebeteile/Bremsen und Stößfänger/Kupplung</p>		<p>Leuchtdioden für die Aussenbeleuchtung (Blinker, Bremsleuchten, Rückleuchten)</p> <p>Armaturenbeleuchtung/Innenraumbeleuchtung mit Leuchtdioden</p> <p>Head-Up-Display für die Informationsdarstellung</p> <p>Datenübertragung mit Kunststofffasern</p> <p>Infrarot-Nachtsichtgerät</p> <p>Infrarot-Regensensor</p> <p>Infrarot-Abstandssensoren/Pre-Crash-Sensoren</p> <p>Fahrspurbestimmung</p> <p>Laser-Bohren von Löchern für Kraftstofffilter</p> <p>Lasergestützte Beschichtung von Ventilsitzen</p> <p>Laser-Bearbeitung von Zylinderlaufflächen zur Verschleißminimierung</p>
---	--	--

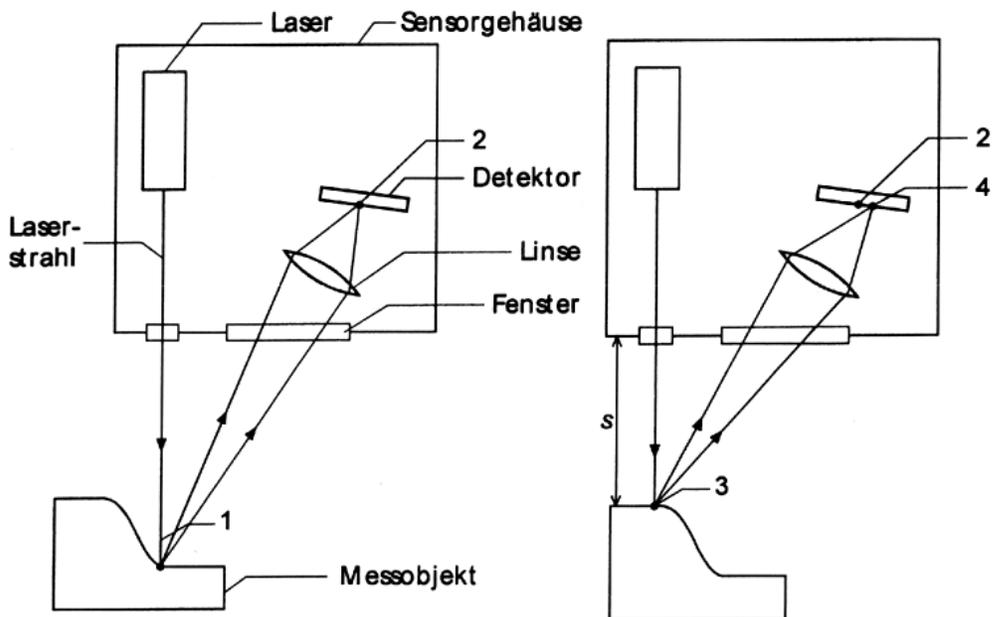
Messtechnik vom Feinsten

Die Einsatzmöglichkeiten optischer Messtechnik kennen keine Grenzen. Nahezu jeder Produktionsschritt kann mit Licht vermessen werden. Das Ergebnis sind effizientere Produktionsschritte und höhere Qualitätsstandards, oder anders ausgedrückt: bessere und wettbewerbsfähige Produkte.

Wie mit Licht in der Technik gemessen wird, zeigen die beiden ausgewählten Beispiele „Laser-Triangulation“ und „Lichtschnitte“.

Laser-Triangulation

Das Prinzip der Messung eines Abstands mit Laserlicht ist in der Abbildung dargestellt. Im linken Bild sieht man den Aufbau eines Messgerätes, mit dem der Abstand zu einem Gegenstand gemessen werden kann. So ein Gerät wird auch als Sensor bezeichnet. Im Sensorgehäuse befinden sich eine Laserstrahlquelle, eine Linse und ein Detektor. Die Laserstrahlquelle erzeugt einen feinen Lichtstrahl, der durch ein Fenster im Sensorgehäuse austritt und auf ein Messobjekt trifft. Am Auftreffort entsteht ein kleiner Lichtfleck (Position 1). Man sieht diesen Lichtfleck, weil das Licht an der Oberfläche des Messobjekts in alle Richtungen gestreut wird. Ein Teil dieses Lichtes wird benutzt, um den Lichtfleck mit einer Linse auf den Detektor abzubilden. Dies ist eine Abbildung ganz ähnlich wie sie in einem Fotoapparat verwendet wird. Durch die Abbildung entsteht auf dem Detektor das Bild des Leuchtflecks an der Position 2. Der Detektor ist ein elektronisches Bauelement mit dem Licht in elektrische Signale umgewandelt wird. Auf dem Detektor sind viele einzelne Lichtempfänger nebeneinander angeordnet, wie die Perlen auf einer Schnur. Am Ort des abgebildeten Leuchtflecks 2 spricht eine bestimmte „Perle“ an und es entsteht ein elektrisches Signal, das die Information über den Ort der beleuchteten „Perle“ enthält.



Aufbau und Prinzip eines Lasersensors zur Abstandsmessung mit dem Triangulationsverfahren (Grafik: Fh-Institut für Lasertechnik (Fh-ILT)).

Im rechten Bild sieht man die gleiche Situation nochmals, jedoch wurde jetzt das Messobjekt nach rechts verschoben. Der Laserstrahl trifft jetzt an einer anderen Stelle auf das Messobjekt. Der Abstand zwischen Leuchtfleck 3 und Sensor ist geringer geworden. Damit verändert sich auch die Lage des Bildes des Leuchtflecks auf dem Detektor. Der abgebildete Leuchtfleck liegt jetzt nicht mehr an der Position 2 wie zuvor, sondern an der Position 4. Die Veränderung des Abstandes zwischen Sensor und Messobjekt hat also zu einer Veränderung der Lage des abgebildeten Leuchtflecks auf dem Detektor geführt.

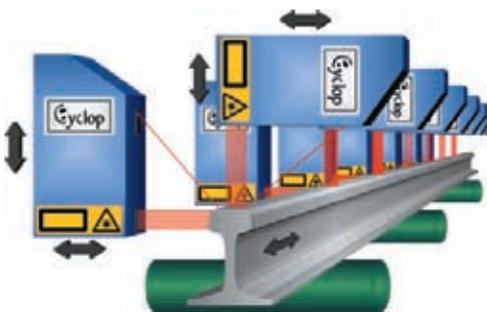
Mit den Gesetzen der Geometrie läßt sich nun aus den Dreiecken, gebildet durch den Ort der Laserstrahlquelle, den Leuchtfleck auf dem Messobjekt und die Lage des abgebildeten Leuchtflecks auf dem Detektor, der Abstand berechnen. Das beschriebene Messprinzip wird daher auch als „Triangulation“ bezeichnet, der auf das lateinische Wort für Dreieck „Trianguli“ zurückzuführen ist.

Mit modernen Laserabstandssensoren können nach dem beschriebenen Prinzip Abstände im Bereich von wenigen Millimetern bis zu mehreren Metern mit hoher Genauigkeit gemessen werden. Die Geschwindigkeiten, die erreicht werden, sind enorm. Bis zu 20.000 Messungen pro Sekunde können ausgeführt werden, das ist mit einem Zollstock nicht zu schaffen.



Ansicht eines Laser-Triangulationssensors, rechts: Sensor-kopf, links: Steuereinheit.
(Foto: Fh-Institut für Lasertechnik (Fh-ILT)).

Anwendungsbeispiele der Laser-Triangulation:



Prüfung der Geradheit von Eisenbahnschienen für den Hochgeschwindigkeitszug ICE in einer Fertigungslinie mit mehreren Laser-Triangulationssensoren. Die optischen Sensoren sichern die notwendige Spezifikation solcher Schienen: Abweichungen von weniger als 80 µm (!) auf 5 m Länge sind gefordert für sicheres, ruckelfreies Fahren.

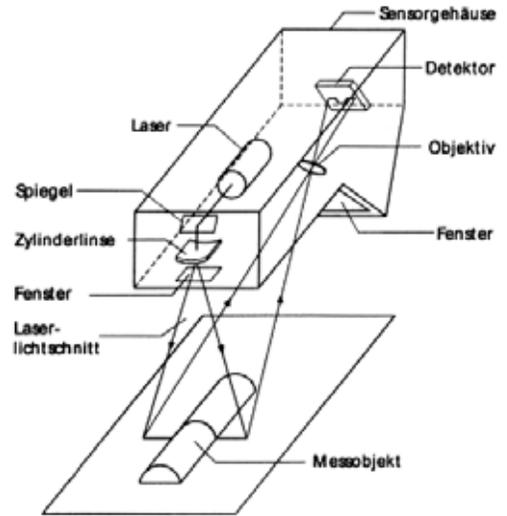


Prüfung der Ebenheit von glühenden Walzblechen in einem Walzwerk. Deutlich sind die Lichtpunkte auf dem glühenden Blech zu sehen (Fotos: NoKra Optische Prüftechnik und Automation, AG der Dillinger Hüttenwerke).



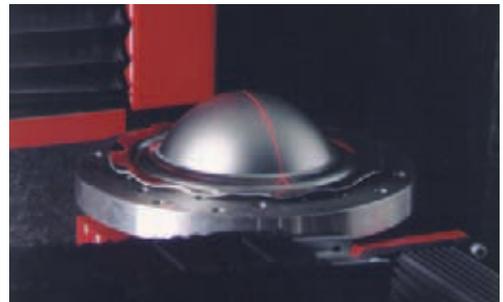
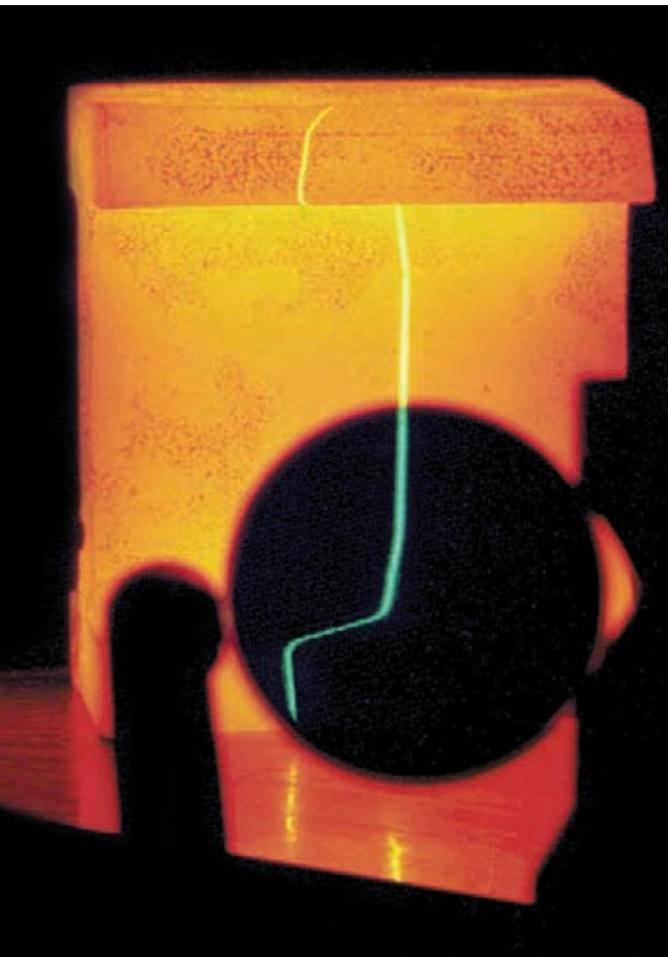
Laser-Lichtschnitt

Hier wird der Laserstrahl mit einer Zylinderlinse wie ein Fächer aufgeweitet. Dieser Fächer beleuchtet das Messobjekt. Im Bild ist als Messobjekt ein Halbzylinder dargestellt. Das Laserlicht erzeugt jetzt auf dem Objekt keinen Lichtpunkt mehr, sondern eine Lichtlinie. Diese Lichtlinie zeigt das Profil des Messobjekts. Dieser so genannte Lichtschnitt wird wieder mit einem Objektiv auf einen Detektor abgebildet. Die Auswertung erfolgt in analoger Weise wie bei der oben beschriebenen Abstandsmessung. Beim Laser-Lichtschnitt ist das Ergebnis die Kontur des Messobjekts, die vom Laser-Fächer beleuchtet wurde.



Aufbau eines Lasersensors zur Profilmessung nach dem Laser-Lichtschnittverfahren
(Grafik: Fh-Institut für Lasertechnik (Fh-ILT)).

Anwendungsbeispiele der Laser-Lichtschnitte:



Laser-Lichtschnitt an einem verformten Blechteil
(Foto: Fh-Institut für Lasertechnik (Fh-ILT)).

Laser-Lichtschnitt an einem glühenden Stahlprofil. Die Laserlinie wird durch ein kreisförmiges Filter beobachtet, das nur die Laserstrahlung passieren lässt. Dadurch wird die störende Strahlung des glühenden Stahlprofils nahezu vollständig unterdrückt
(Foto: Fh-Institut für Lasertechnik (Fh-ILT)).



5. Lichtspiele

Prof. Dr. H. J. Schlichting, Universität Münster

Lichtspiele - Spiele mit Licht

Spielen heißt handeln, aktiv sein, Gegebenes manipulieren, dem Gegebenen die äußersten Möglichkeiten entlocken. Das erfordert und fördert zugleich Kreativität und den Wunsch, hinter die Dinge zu kommen, zu verstehen, zu verändern, Neues hervorzubringen.

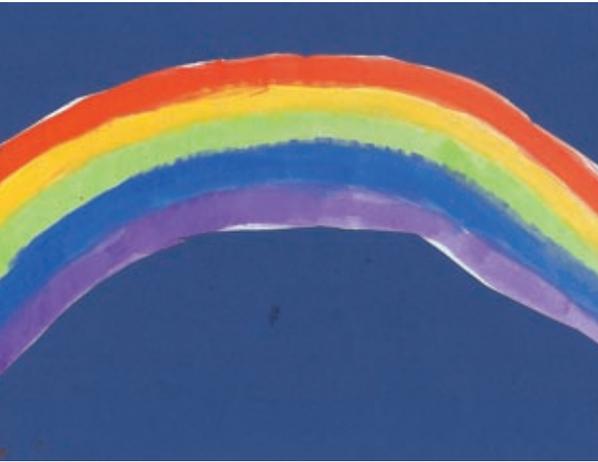
Geht man davon aus, dass Spielen eine Vorform der Forschung ist, das auch in der „ernsthaften“ Forschung stets präsent ist, so wird die Bedeutung des Spiels auch lerntheoretisch untermauert. Zunächst sollen die Spiele mit Licht aber der nicht von Hintergedanken beschwerte Umgang mit Licht und Dingen sein, die mit dem Licht wechselwirken und dabei oft überraschende, ästhetisch ansprechende Phänomene hervorbringen.



„Lichtspiele“ am Himmel

Malwettbewerb FaszinationLicht

(Bilder der Klasse 2a der Richard-Schirrmann-Schule, Neuss-Hoisten)





Ohne Licht keine Sicht

Sokrates: *Wenn auch in den Augen Gesicht ist und, wer sie hat, versucht es zu gebrauchen...: so weißt du wohl, wenn nicht ein drittes Wesen hinzukommt, welches eigens hierzu da ist seiner Natur nach, dass dann das Gesicht doch nichts sehen wird....*

Glaukon: *Welches ist denn dieses, was du meinst?*

Sokrates: *Was du das Licht nennst*

Der helle Schein der Sonne, das sanfte Blau des Himmels, der warme Schimmer einer Kerze, das grelle Licht eines Scheinwerfers, der scharfe Strahl aus einem Laser, aber auch das sichtbare und unsichtbare Sternenlicht, das uns aus den fernsten Regionen des Weltalls kündigt, sind informationsgeladene Energieströme, die in ihrer Wechselwirkung mit der Materie lebenswichtige Prozesse unterhalten und bedeutungsvolle Strukturen entstehen lassen.

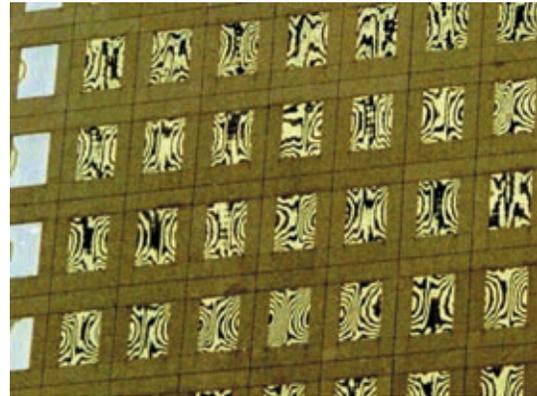


Lichtspiele der Natur in einem Hafenbecken

Zu solchen Strukturen zählen die Pflanzen, die sich mit Hilfe des grünen Farbstoffs das Sonnenlicht einverleiben und damit Biomaterie produzieren, die als Existenzgrundlage der Lebewesen anzusehen ist. Aber auch die visuellen Strukturen, die wir mit unseren Augen wahrnehmen, werden durch das Licht vermittelt. So wie die Energie in der Wärme fühlbar, im Schall hörbar wird, wird sie im Licht sichtbar.



Lichtspiele auf der Fensterfront eines Hochhauses.



Ausschnitt

Wie macht es das Licht, Bilder von Gegenständen der Außenwelt auf Netzhäuten oder anderen Projektionswänden hervorzurufen? Bei der Beantwortung dieser für die Entwicklung der Optik wesentlichen Frage, kommt einer Beobachtung besondere Bedeutung zu: Licht schießt wie Wasser in Form eines Strahls durch eine kleine Öffnung in der Wand.

Es mag das zufällige Loch in einem geschlossenen Fensterladen gewesen sein, an dem lange vor unserer Zeitrechnung erstmalig beobachtet wurde, wie das gleißende Licht der tiefstehenden Sonne hindurch-



Lichtstrahlen



dringt und den dunklen Raum auf dem Weg einer geraden Linie durchleuchtet. Vielleicht haben kleine Staubteilchen dafür gesorgt, dass die Spur des Lichtes als funkelnder Strahl sichtbar wurde.

Diesem Lichtstrahl sollte eine außerordentlichen Karriere für das Verständnis des Lichtes und dessen wissenschaftliche Erfassung beschieden sein. Die heiligkeitsstiftende Erscheinung des Lichtes, der auf den ersten Blick weder Strahlförmigkeit noch Geradlinigkeit anhaftet, wird auf diese Weise mit Konzepten in Verbindung gebracht, die im Bereich der Geometrie die Grundlagen einer der ersten formalen Theorien in der Geschichte der Wissenschaften darstellen.

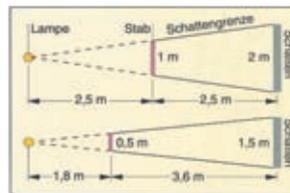
Um Missverständnissen vorzubeugen: Licht besteht nicht aus Punkten und Strahlen.

Aber es verhält sich in zahlreichen Situationen so, dass es mit Hilfe von Punkten und Strahlen beschrieben werden kann.

Von der Mächtigkeit der geometrischen Beschreibung des Lichtes überzeugt man sich, wenn es darum geht, das Verhalten des Lichtes in gegebenen Situationen vorherzusagen und zu erklären. Um die spielerische Schaffung möglichst vieler solcher Situationen geht es im Folgenden.

Wo viel Licht ist, ist auch viel Schatten

Alle Schatten erzählen vom Licht. Schatten sind von lichtundurchdringlichen Gegenständen ins Licht gerisene Löcher, durch die „die Körper ihre Form offenbaren.“ (Leonardo da Vinci). Von einem Bettlaken bliebe eine einheitlich gefärbte Fläche, wenn es keinen Schatten aufwiese. Maler haben schon früh verstanden, die Räumlichkeit ihrer Gegenstände durch geeignete Schattierungen zu gestalten. Mehr noch: Indem Schatten den Umriss von Gegenständen auf einer Wand abzubilden vermögen, wird dem Schatten sogar die Rolle des Ursprungs der Malerei zugeschrieben. Der Schatten eines rechteckigen Gegenstandes sieht aus wie ein Rechteck, der Schatten eines menschlichen Kopfes sieht aus wie der Umriss z. B. das Profil des Kopfes.



Der Schatten offenbart die Struktur einer Oberfläche



Geworfene und aufgefangene Schatten

Die Entfernung zwischen Lichtquelle, Schattengeber und Wand, die Größe des Schattengebers und des Schattens werden zu geometrischen Größen, mit denen man die jeweils fehlenden Größen auf der Grundlage der Gesetze der Geometrie konstruieren oder berechnen kann. Zieht man Geraden von der Lichtquelle ausgehend über die Ränder des Schattengebers bis zur Wand, so begrenzt das durch die Schnittpunkte mit der Wand umrissene Gebiet den dazu gehörigen Schatten.

Hat man mehrere Lichtquellen, so entstehen mehrere Schatten auf der Wand.

Aber diese Schatten sind „heller“ als die Schatten nur einer einzigen Lichtquelle, weil der Schattenbereich im Allgemeinen von den jeweils anderen Lichtquellen erleuchtet wird. Nur der Bereich, in dem sich alle Schatten überlagern, ist ohne Licht. Auf der Grundlage dieser Überlegungen kann man sich eine ausgedehnte Lichtquelle, z. B. den Leuchstab im Bild, als eine Aneinanderreihung sehr vieler einzelner Punktlichtquellen vorstellen. Nur in den so genannten Kernschattenbereich dieser Lichtquelle kommt überhaupt kein Licht.

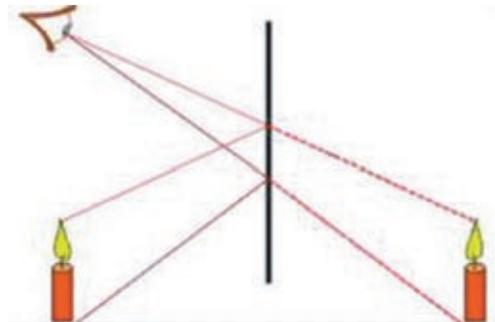


Das Spiel von Licht und Schatten in der Natur

Bei ausgedehnten Lichtquellen werden die Schattengrenzen unscharf. Es gibt Übergangsschatten, die von einem Teil der Lichtquelle beleuchtet werden. Weil wir es im Alltag nur selten mit Lichtquellen zu tun haben, die als punktförmig angesehen werden können, sind scharfe Schatten eher selten anzutreffen.

VorSPIEGELung falscher Tatsachen, oder: Ich bin dort, wo ich nicht bin

Dass uns ein Spiegel oder eine andere Licht unverändert zurückwerfende Fläche etwas „vorspiegelt“, lernen Kinder bereits in frühem Alter. Auch Tiere lassen sich vom Spiegelbild nicht lange irritieren. Dies ist insofern erstaunlich, als Spiegelbilder größtmögliche Ähnlichkeit mit dem Original aufweisen. Diese Ähnlichkeit ist in Literatur, Kunst und anderen kulturellen Kontexten immer wieder zum Thema gemacht worden. Man denke nur an „Alice hinter den Spiegeln“.



Spiegelbild hinter dem Spiegel

Die Ursache für die frappierende Übereinstimmung von Gegenstand und Spiegelbild (Spiegelsymmetrie) lässt sich am besten im Bild der Lichtstrahlen, die von einem Gegenstand ausgehen, beschreiben. Demnach besitzt die spiegelnde Schicht die charakteristische Eigenschaft, die in einem bestimmten Einfallswinkel auftreffenden Lichtstrahlen in einem Ausfallswinkel wieder auszustrahlen, der betragsmäßig dem Einfallswinkel entspricht¹. Der Vorgang erinnert anschaulich an einen gegen eine Wand geworfenen Ball, der auf entsprechende Weise



Das Spiegelbild eines Schattens ist wieder ein Schatten.



Vor lauter Spiegelungen ist das Original kaum zu erkennen.



Bilderrätsel: Was ist das?

wieder von der Wand reflektiert wird. Entscheidend ist, dass die Lichtstrahlen so „abgeknickt“ werden, dass die ursprüngliche Ordnung zwischen den von den einzelnen Punkten des Gegenstandes ausgehenden Lichtstrahlen erhalten bleibt. Da bei der Spiegelung unmerklich wenig Licht verloren geht und auch die Farben weitgehend unverändert bleiben, sieht das Spiegelbild seinem Original zum Verwechseln ähnlich. Die Abbildungstreue geht so weit, dass selbst der Schatten eines Gegenstandes gespiegelt wird (siehe Bild).

Da unsere Augen von einer Ablenkung eines Lichtstrahles nichts „wissen“ können und davon ausgehen, dass er aus der rückwärtigen Verlängerung der Einfallrichtung kommt, muss es uns so erscheinen, dass das Licht von hinter dem Spiegel stammt. Wenn man also von der Existenz eines Spiegels nichts weiß, wird man gründlich getäuscht. Man sieht die gespiegelten Gegenstände so weit hinter dem Spiegel, wie sie sich in Wirklichkeit vor dem Spiegel befinden. In den meisten Fällen wird diese Sehweise allerdings durch das Wissen um den Spiegel und dessen Undurchdringbarkeit gestört.

Spiegelbilder werden nicht nur durch Spiegel entworfen. Auch durchsichtige Medien wie Glas- und Wasserflächen können unter Umständen zu Spiegeln werden. Wer hätte nicht schon einmal sein eigenes Spiegelbild in einer Fensterscheibe begutachtet oder sich von der Sonne, die aus den Tiefen eines Sees mit unbewegter Wasserfläche herausstrahlt, geblendet gefühlt. Die natürliche und wissenschaftlich-technische Welt sind erfüllt von Spiegelungen dieser Art. Wenn man in der Hektik des Alltags überhaupt einen Blick dafür zu entwickeln imstande ist, werden sie zu veritablen Bildrätseln oder zu einem fantastischen Spiel mit der Spiegelsymmetrie.

Dabei kann es zuweilen zu Irritationen aufgrund der Unvollkommenheit der Spiegelung kommen. Durchsicht und Reflexion „vermischen“ Gegenstände miteinander, die nichts miteinander zu tun haben. Wenn dabei auch noch Spiegelungen von Spiegelungen im Spiel sind, wird die Komplexität der Bilder oft bis zur Undurchschaubarkeit im doppelten Wortsinn gesteigert.

Eine weitere Variante der Spiegelwelt sind Reflexionen auf unebenen Oberflächen. Der Blick auf die wellenbewegte Wasserfläche in



Wenn sich verschiedene Wirklichkeitsebenen durchdringen, wird die Sicht schwierig.

¹ Trifft ein Lichtstrahl unter dem Winkel α ein, so wird es unter dem Winkel $(180^\circ - 2\alpha)$ wieder ausgestrahlt.

einem Boothafen vermag Bilder hervorzubringen, die an nichtgegenständliche Kunst erinnern. Neben der Krümmung der „Spiegeloberfläche“, die zu Verzerrungen der ursprünglichen Ansicht führt, kommt es durch die Wellenbewegungen zu ständigen Wechseln der Ansichten.

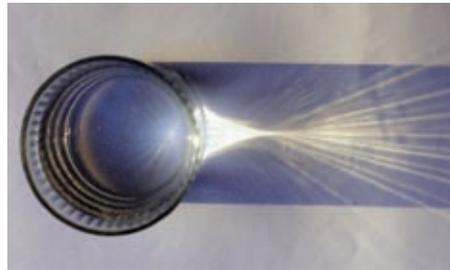


Wechselnde Formen und Farben im gewellten Wasser.

Ein Knick in der Optik

Wasser oder Glas sind lichtdurchlässig, transparent. Nahezu. Und dieser kleinen Einschränkung verdanken wir die wohl interessantesten Erscheinungen der geometrischen Optik. Man denke beispielsweise an die bis zur Verwirrung führenden Überlagerungen von Spiegelbildern und direkt gesehenen Gegenständen in Gegenwart von Fensterscheiben und Glasfassaden.

Noch interessanter als dieses sind die Veränderungen, die das Licht beim Durchgang durch transparente Medien erfährt. Schaut man sich ein durchsichtiges Glas mit Wasser an, das von einer Lichtquelle, etwa der Sonne, bestrahlt wird, so wirft das Glas einen Schatten. Es verhält sich also wie ein undurchsichtiger Gegenstand. Im Schattenbereich hinter dem Glas nimmt man jedoch eine deutliche Aufhellung wahr. Das Licht sammelt sich in einem mehr oder weniger punktförmigen Bereich. Der Schattenbereich kommt also dadurch zustande, dass das Licht, das in diesem Brennpunkt konzentriert wird, an den übrigen Stellen hinter dem Glas fehlt.



Im Schattenbereich des transparenten Wasserglases wird das Licht gesammelt. Im vorliegenden Fall zerfällt das Licht aufgrund einer vertikalen Riffelung des Glases sogar in einzelne Strahlen, die zeigen, dass sich die Lichtstrahlen im Brennpunkt überschneiden.



Auch kleine Wassertröpfchen brechen das Licht so, dass es sich in einem Brennpunkt sammelt und daher im übrigen einen Schatten hinterlässt.

Die aus der Rückwand der Glaswand austretenden Lichtstrahlen werden offenbar um so stärker nach innen abgelenkt, je kleiner der Winkel ist, unter dem es die Glaswand verlässt (siehe Bild). Wenn -



Eine in einem leeren Becher gerade nicht mehr zu sehende Münze wird sichtbar, wenn man Wasser einfüllt. Die von der Münze ausgehenden Lichtstrahlen werden gebrochen, so dass das Licht aus einem kleineren Winkel zu kommen scheint.

wie im vorliegenden Fall - das Licht aufgrund der vertikalen Riffelung des Glases sogar in einzelne Strahlen zerfällt, kann man außerdem unmittelbar erkennen, dass sich die Lichtstrahlen von der linken und rechten Seite des Glases im Brennpunkt des Glases überschneiden.

Diese ungestörte Überlagerung ist neben der geradlinigen Ausbreitung eine wesentliche Eigenschaft des Lichtes. Darin unterscheidet es sich grundsätzlich von materiellen Stoffen. So könnten sich beispielsweise Wasserstrahlen nicht ungestört durchdringen.

Die Ablenkung des Lichts vom einmal eingeschlagenen Weg tritt immer dann auf, wenn Licht von einem transparenten Medium (etwa der Luft) in ein anderes (etwa Wasser oder Glas) übergeht. Je nach der Art der beteiligten Medien ist die Ablenkung mehr oder weniger ausgeprägt. Grundsätzlich kann man feststellen, dass Lichtstrahlen, die in einem bestimmten Winkel auf eine Grenzfläche treffen zum Einfallslot hin gebrochen werden, wenn sie von einem (optisch) dichteren in ein optisch dünneres Medium über gehen. Umgekehrt werden sie vom Einfallslot weggebrochen, wenn sie die Grenze von einem dichteren in ein dünneres Medium passieren. Die Auswirkungen einer solchen Grenzfläche kann man sich am Beispiel einer Münze in einem Becher veranschaulichen, auf die man so blickt, dass sie gerade durch die Becherwand verdeckt wird. Füllt man bei ungeänderter Blickrichtung Wasser ein, scheint die Münze mit steigendem Wasserspiegel so vorzurücken, dass sie schließlich vollständig sichtbar ist. Der Boden des Bechers scheint entsprechend gehoben zu werden.

Glas und Licht verbessern die Sicht

*„Die Welt jenseits der geschliffenen Gläser ist wichtiger,
als die jenseits der Meere,
und wird vielleicht nur von der jenseits des Grabes übertroffen“.*

Dass diese Worte des Physikers und Aufklärers Georg Christoph Lichtenberg nicht übertrieben waren, zeigten die Entdeckungen mit Fernrohr, Mikroskop und Spektrometer, um nur einige der optischen Geräte zu nennen, die mit geschliffenen Gläsern, Linsen, ausgestattet dem Menschen im wahrsten Sinne neue Welten erschließen sollten. Neben dem Kosmos und Mikrokosmos gehört auch die heutige Alltagswelt dazu, die nicht zuletzt durch optische Techniken so revolutioniert wurde, dass sie mit der Alltagswelt Lichtenbergs nicht zu vergleichen ist.

Die dieser Entwicklung zugrunde liegende Entdeckung, dass transparente Medien wie Wasser und Glas Licht brechen, war lange bekannt, bevor man feststellte, dass sie auch zu etwas nütze ist.

Zur Geschichte der Linse

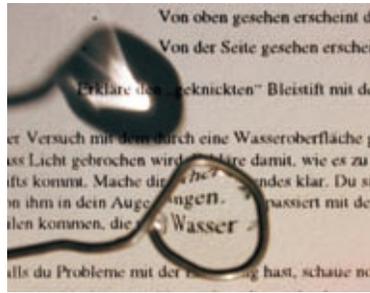
Im Altertum gab es bei Ägyptern, Griechen und Römern geschliffene Linsen aus Quarz und Glas. Sie wurden als Brenngläser, nicht aber als Sehhilfen verwandt. Als Brille tauchte die Linse in der Mitte des 13. Jahrhunderts auf.

Die Qualität der Linse hängt von der Qualität des Glases und der Schleiftechnik ab. Gutes Glas wird aus weißem Sand, sorgfältig gereinigtem Kalk und Sodaasche hergestellt. Die Kunst der Glasherstellung beherrschte man schon vor 1200 auf der Insel Murano bei Venedig.

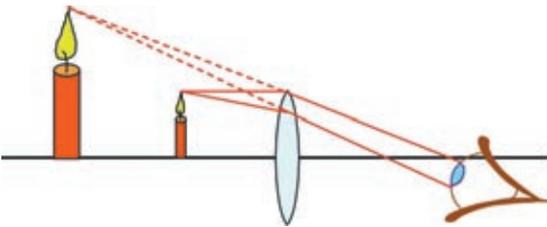
Seit dem 13. Jahrhundert wurde Glas zur Herstellung von Linsen in norditalienischen Städten verwendet. Auch zum Schleifen der Gläser wurde Sand verschiedener Körnungen verwendet. Das matt geschliffene Glas wird mit einer Form aus weichem Pech und einer weichen Schmirgelmasse poliert bis die Oberfläche spiegelnd glatt ist.



Ein Wassertropfen auf einem Blatt lässt die Blattadern vergrößert hervortreten.



Ein in einer Drahtschleife fixierter Wassertropfen kann als einfache Lupe benutzt werden.



Durch Brechung der Lichtstrahlen - wie hier am Beispiel zweier Strahlen von der Spitze der Kerzenflamme gezeigt - erscheint dem Auge der Gegenstand vergrößert. Die Strahlen scheinen aus der rückwärtigen Verlängerung der Richtung der eintreffenden Strahlen zu kommen.

ausgehender Strahlen gezeigt. Sie werden beim Durchgang durch die Linse abgelenkt, bevor sie das Auge erreichen. Dem Auge scheinen die Strahlen aus der rückwärtigen Verlängerung der Richtung, in der sie eintreffen, zu kommen, also von einem Punkt, der einer größeren Kerze entspricht. Diese Argumentation gilt für jeden der Punkte der Kerze.

Wie stark das Licht durch eine Linse gebrochen wird, hängt von der Krümmung ab. Linsen werden Sammellinsen genannt, wenn sie parallel einfallendes Licht in einem Brennpunkt sammeln. Mit einer Linse, die eine umgekehrte Krümmung hat, kann man auch Verkleinerungen erreichen. Durch Kombination verschiedener Linsen können die verschiedensten optischen Aufgaben erfüllt werden.

Entscheidend für die Bedeutung der Linse ist ihre vergrößernde Wirkung. Bereits ein Wassertropfen zeigt einen Vergrößereffekt. Wie kommt es zu der Vergrößerung?

Die Frage lässt sich leicht im Modell der Lichtstrahlen erklären. Demnach werden die Strahlen, die von jedem Punkt des Gegenstandes in alle Raumrichtungen gestrahlt werden, in der Linse gebrochen. In der Abbildung wird dies am Beispiel zweier von der Spitze der Kerzenflamme



Bilder, die durch einen Punkt gegangen sind – oder: Wie eine Abbildung entsteht

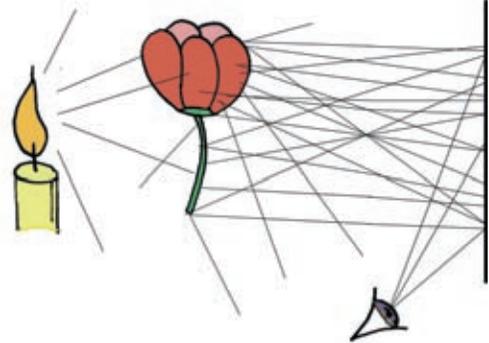
Wenn das Licht eines Gegenstandes auf eine spiegelnde Fläche trifft oder durch eine Linse geht, können mit dem Original zum Verwechseln ähnliche Abbilder hervorgerufen werden. Dem von einem Gegenstand ausgehenden Licht ist dessen Aussehen gewissermaßen einbeschrieben. Man kann sich daher fragen, warum das Licht eines Gegenstandes nicht auch auf einer (ideal) weißen Wand (die alles Licht, dass sie empfängt auch wieder ausstrahlt) das eigene Abbild aufzeichnet.

Versucht man diese Frage im Rahmen des Strahlenmodells zu beantworten, so kann die Oberfläche des Gegenstandes als ausgedehnte (indirekte) Lichtquelle angesehen werden. Sie ist aus zahlreichen Punktlichtquellen zusammengesetzt. Jeder dieser Punkte strahlt Licht in alle Richtungen, insbesondere zu jedem Punkt der dem Gegenstand zugewandten Wand.

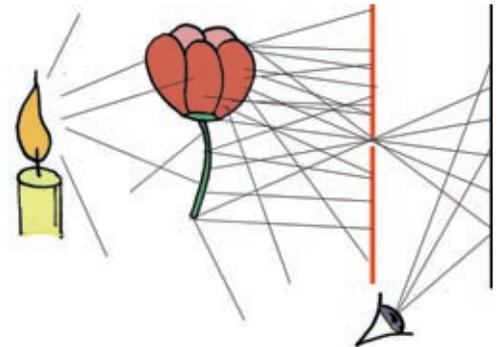
In jedem Punkt der Wand überlagert sich das Licht aller der Wand zugewandten Gegenstandspunkte. (Dabei gehen wir vereinfachend davon aus, dass ansonsten kein Licht weiterer Gegenstände störend in Erscheinung tritt). Auf diese Weise kommt es auf der Wand zu einer Mischung aus allen Farben und Intensitäten des Lichtes der verschiedenen Gegenstandspunkte. An der Wand erscheint daher nicht ein Abbild des Gegenstandes, sondern unzählbar viele, die sich alle überlagern und in der Komplexität dieses Zuviel versinken. Die auf der Wand zu sehende Mischfarbe lässt keine Rückschlüsse auf das Aussehen des hier vieltausendfach abgebildeten Gegenstandes zu.

Abbilden durch Komplexitätsreduktion

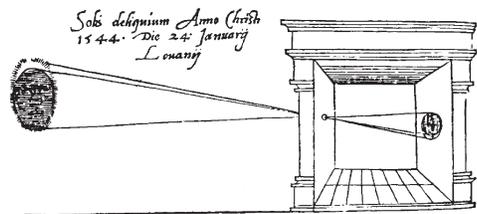
Wie lässt sich die Komplexität so reduzieren, dass man ein getreues Abbild des Gegenstandes zu sehen bekommt? Indem man die Vielfachüberlagerung möglichst vermeidet und dafür sorgt, dass ein Punkt auf der Wand möglichst nur das Licht von einem Punkt des Gegenstandes erhält.



Das von der Rose zur Wand gestrahlte Licht überlagert sich zu einem für unser Auge unentwirrbaren Gemisch.



Durch eine Lochblende wird erreicht, dass von jedem Punkt der Rose genau ein Punkt der Wand belichtet wird, so dass wegen der Kreuzung der Lichtstrahlen im Loch zwar ein kopfstehendes aber abstands- und winkelgetreues Abbild der Rose entsteht.



Alte Darstellung einer Abbildung durch eine „dunkle Kammer“.

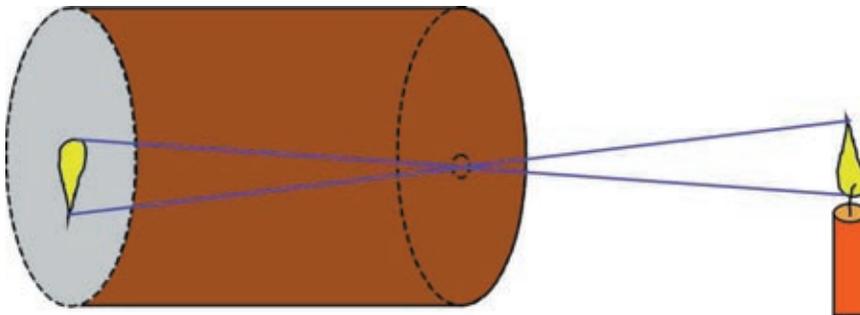
Das klingt komplizierter als es ist. Die ebenso einfache wie frappierende Lösung des Problems besteht darin, dass man das Licht des Gegenstandes durch ein kleines Loch einer Blende passieren lässt, die zwischen Gegenstand und Wand aufgestellt wird. In diesem Fall gelangt – anschaulich gesprochen – von jedem Lichtpunkt des Gegenstandes nur ein Strahl auf die Wand und zwar in eindeutiger Weise, nämlich in der geraden Verbindung zwischen beiden Punkten.

„Das sind die Wunder...nämlich dass schon verlorene, in einem so kleinen Raum verschmolzene Formen bei seiner Erweiterung wieder hervorgebracht und neu gebildet werden können. Wie ist es möglich, dass aus verschwommenen Ursachen so deutliche und klare Wirkungen hervorgehen können wie diese Bilder, die durch den ... natürlichen Punkt gegangen sind?“ (Leonardo da Vinci).

Leonardo da Vinci wundert sich darüber, dass das vom Licht transportierte Abbild eines Gegenstandes offenbar in keiner Weise beeinträchtigt wird, wenn es durch einen Punkt geht. Die ungestörte Überlagerung von Lichtstrahlen auf dem engen Gebiet eines Loches ist eine wesentliche Eigenschaft des Lichtes im Rahmen der geometrischen Optik.

Die dunkle Kammer - Camera Obscura

Dass ein Loch ausreicht, um ein Abbild der (hellen) Gegenstände auf einer dahinter befindlichen Wand zu entwerfen, weiß man seit Aristoteles. Seit der Renaissance wurde mit der Camera Obscura im Bereich der Malerei und Wissenschaften experimentiert. Sie kann als Keimzelle des Fotoapparats und der Filmkamera angesehen werden.

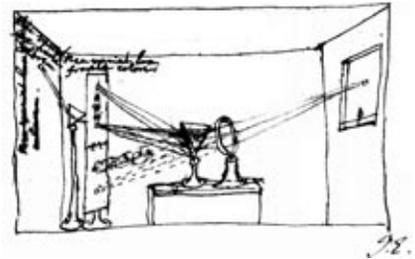


Wenn das Licht in Farben bricht

Blickt man an einem sonnigen Tag durch ein Glas mit Wasser, so kann man neben zahlreichen Spiegelungen und Verzerrungen auch Regenbogenfarben erkennen, die durch die Begegnung von Licht und Wasser bzw. Licht und Glas entstehen. Wie können aus weißem Licht Farberscheinungen hervorgehen?

Diese Frage stellte sich bereits Isaac Newton, als er einen Strahl des Sonnenlichtes durch ein Prisma gehen ließ und dadurch diese Farberscheinungen hervorrief. Newton gab die für die damalige Zeit revolutionäre Antwort, dass das weiße Licht aus einer Mischung farbigen Lichts besteht. Demnach wird beim Durchgang durch das Glasprisma das Licht gebrochen und zwar für jede Farbe unterschiedlich stark. Dadurch kommt es zu einer Zerlegung des weißen Lichtes in ein ganzes Farbspektrum. Newton zeigte, dass sich das farblich zerlegte Licht wieder zu weißem Licht zusammensetzen ließ, wenn er es mit Hilfe einer Linse bündelte.

Wir merken auch heute noch etwas von der Zumutung, die die Zeitgenossen Newton angesichts dieser Deutung der Farben empfanden: Es fällt nach wie vor schwer, das als einfach und rein empfundene weiße Licht als ein Mischung aller Farben zu begreifen.

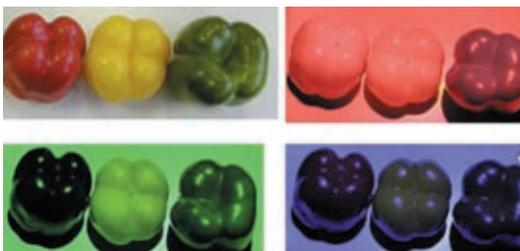


Skizze Newtons des Experiments zur spektralen Zerlegung des Sonnenlichtes

Johann Wolfgang von Goethe sollte zu einem der größten und produktivsten Kritiker Newtons werden. Er entwarf eine alternative Farbenlehre, die allerdings nicht in Einklang mit der neuzeitlichen Physik gebracht werden kann.



Schematische Darstellung der spektralen Zerlegung eines weißen Lichtbündels mit Hilfe eines Prismas.



Im einfarbigen Licht verlieren die Paprikaschoten ihre Farbe (aus: Soostmeyer)

in die „Regenbogenfarben“ werden sollte, kommt durch unterschiedlich starke Brechung des Sonnenlichtes in kleinen Regentröpfchen zustande.

Mit Hilfe der Newtonschen Erkenntnis lassen sich zahlreiche Alltags- und Naturphänomene erklären. Die Farben der uns umgebenden Gegenstände entstehen demnach dadurch, dass das weiße Licht der Sonne oder einer anderen Lichtquelle absorbiert und teilweise wieder ausgestrahlt wird. Die wieder ausgestrahlten Anteile des Lichtes bestimmen den Farbeindruck des Gegenstandes: Ein Rose erscheint rot, weil von allen Farben des weißen Lichts hauptsächlich der Rotanteil wieder abgegeben wird. Bei weißen Gegenständen werden alle Farben, bei schwarzen Gegenständen so gut wie überhaupt kein Licht wieder ausgestrahlt.

Auch der Regenbogen, der zum Namensgeber für die spektrale Zerlegung von weißem Licht durch unterschiedlich starke Brechung des

Entdecken mit gekrümmten Spiegeln – Anamorphosen

Als es noch keine Fotografie und kein Fernsehen gab, haben die Menschen auch schon ihren Spaß mit Bildern gehabt. Wenn man in einen Spiegel mit gekrümmter Oberfläche schaut, sieht man sich der Krümmung entsprechend verzerrt.

Die Idee, umgekehrt ein verzerrtes Bild von einem dazu passenden Spiegel entzerren zu lassen, liegt gewissermaßen auf der Hand und ist schon sehr früh in der Malerei aufgekommen. Wenn man von einfachen geometrischen Krümmungen wie Zylinder, Kegel, Kugel usw. des Spiegels ausgeht, ist es nicht schwer, ein Bild zeichnerisch auf einen solchen Spiegel bezogen zu verzerren und dieses Bild, dessen Ursprung sich oft nur erahnen lässt, im Spiegel in unverzerrter Vollkommenheit anzuschauen.



Die aus quadratischen Mustern bestehende Decke eines Kaufhauses in einer spiegelnden Edelstahlsäule betrachtet.

Auch heute noch üben die Verzerrungen und Entzerrungen insbesondere von zylindrisch geformten Spiegeln einen großen Reiz auf den Betrachter aus. So gibt es beispielsweise verspiegelte Tassen, die verzerrte Bilder (hier ein Bild von Gauguin), in unverzerrter Vertrautheit widerspiegeln.



Betrachtet man ein kariertes Blatt Papier in einem verzerrenden Spiegel, z.B. einem Zylinderspiegel, dann sieht man, was der Spiegel anrichtet und erkennt, wie man die Karos als Raster benutzen kann, um ein verzerrtes Bild zu zeichnen, das im Spiegel entzerrt erscheinen sollte.

Man kann sehr viel einfacher die Verzerrungsarbeit von beliebigen Vorlagen mit Hilfe eines Computerprogramms von einem Computer vornehmen lassen. Dazu muss man dem Programm nur die Größe des Zylinderspiegels mitteilen, in dem das Bild wieder in ursprünglicher Perfektion erscheinen soll. Wir haben ein solches Computerprogramm auf das Abbild von Luka angewandt und uns auf einen Edelstahlbecher als Zylinderspiegel bezogen. Von dem Ergebnis kann man sich auf den Bildern oder direkt auf dem Experimentiertisch überzeugen.



Ein Regenbogen ohne Regen

Diese Installation kann als Poster (mit einer Beleuchtung durch eine lichtstarke aber kleine Lichtquelle aus einiger Entfernung) aber auch als Exponat realisiert werden.

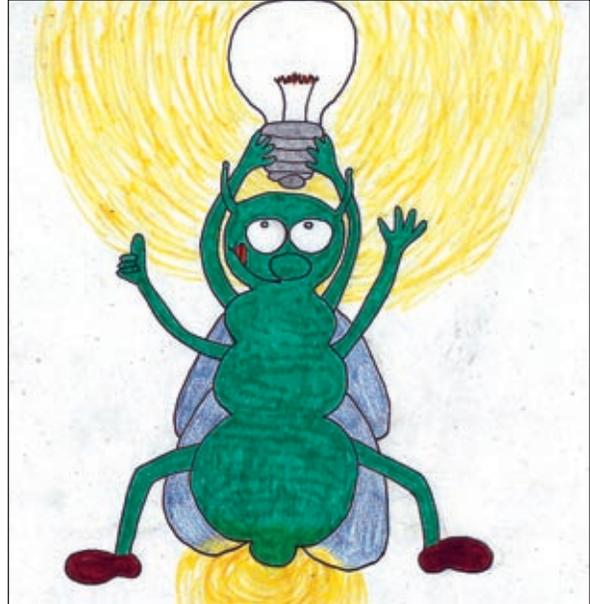


(Das Poster besteht aus einem speziell präparierten Foto eines Regengebietes (z.B. wie oben), auf das kleine Glaskügelchen aufgebracht werden. Mit Hilfe einer kleinen (z.B. fest installierten oder einer an einer Kette daneben hängenden Taschenlampe) Lampe beleuchtet entfaltet sich ein vor dem Betrachter gewissermaßen im Raum vor dem Bild schwebender Regenbogen)

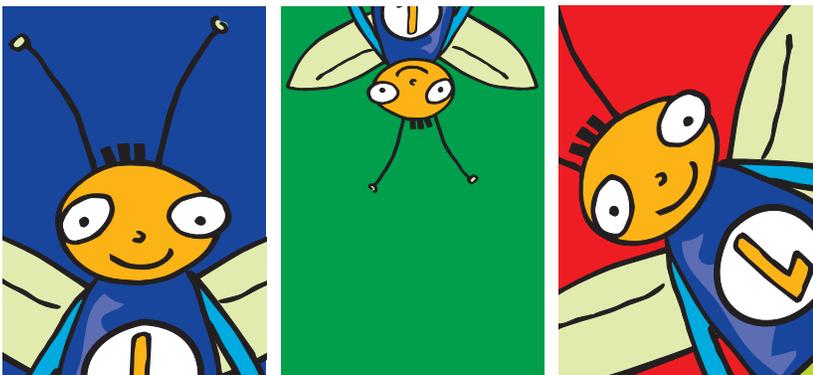
Luka - das Glühwürmchen

Luka - das Glühwürmchen begleitet die Kampagne als Maskottchen und erzählt den jüngeren Kindern über die Wunderwelt des Lichts, u. a. auf der Internetseite www.faszinationlicht.de.

Der erste Entwurf (Bild: Arndt Heybrock, Helmholtz-Gymnasium Bielefeld)



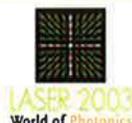
Aus dem „Luka-Shop“:



**Bayern
Photonics**

 **Bundesanstalt für Arbeit**

Deutschlandfunk



OptecNet Deutschland

