

15. Wechselwirkung von Licht und Materie

In den bisherigen Vorlesungen haben wir die physikalische Welt in Licht und Materie unterteilt. Das mag etwas ungleich erscheinen: Denn auch wenn Licht in verschiedenen Formen vorkommt, z.B. in Form von Radiowellen, als sichtbares Licht oder in Form von Röntgenstrahlung, so handelt es sich doch immer um dasselbe Phänomen, nämlich um elektromagnetische Strahlung verschiedener Wellenlänge. Hingegen kommt die Materie in einer ungeheuren, fast unübersehbaren Fülle von Formen vor, insbesondere wenn man die vielfältigen Arten des Lebens betrachtet. Aber auch hier hat die Physik herausgefunden, dass die Materie unserer Welt nur aus ganz wenigen "elementaren" Bausteinen aufgebaut ist, nämlich aus zwei Quarks und einem Elektron. Lange Zeit hatte man geglaubt, dass die Teilchen der Materie sich fundamental von den Lichtwellen unterscheiden. Aus der Quantenphysik folgt jedoch, dass sowohl die Bausteine des Lichts als auch die der Materie gleichzeitig Wellen- und Teilchencharakter haben. Damit sind auch hier die Unterschiede kleiner geworden – jedenfalls aus der Sicht der modernen Physik.

Im unserem täglichen Leben haben Licht und Materie ganz verschiedene Rollen. Mit dem Licht finden wir uns in der materiellen Welt zurecht. Außerdem wird unser Leben auf der Erde erst dadurch ermöglicht, dass die Sonne ihre Energie in Form von Licht oder allgemeiner in Form von elektromagnetischer Strahlung zur Erde sendet.

In dieser letzten Vorlesung des Semesters wollen wir uns mit der Wechselwirkung von Licht und Materie beschäftigen. Dabei gehen wir von Alltagsphänomenen aus und versuchen, bis zu grundsätzlichen Effekten der Physik vorzudringen.

15.1 Streuung von Licht

Wir beginnen mit zwei Fragen:

- Warum erscheint uns die Sonne beim Aufgang bzw. Untergang rot und während des Tages gelblich-weiß?
- Warum erscheint uns der Himmel am Tag blau?

Diese beiden wohlbekannten Phänomene hängen eng miteinander zusammen. Sie werden durch die Wechselwirkung des Sonnenlichtes mit den Luftmolekülen der Erdatmosphäre erzeugt. Wir sprechen von Streuung des Lichtes an den Luftmolekülen, doch was heißt das?

Das Grundprinzip der Streuung lässt sich z.B. mit zwei Kugeln erklären Eine Kugel ruht, die andere läuft auf sie zu und stößt mit ihr zusammen. Nach dem Stoß bewegen sich beide Kugeln in verschiedene Richtungen, d.h. unter verschiedenen Winkeln und mit verschiedenen Geschwindigkeiten. Welche Winkel und Geschwindigkeiten nach dem Stoß auftreten, hängt davon ab, welche Massen die beiden Kugeln haben und an welcher Stelle die einlaufende Kugel die ruhende trifft.

Bei einem Stoß sind die Werte für die Winkel und die Energien der Ausgangsteilchen nicht willkürlich, sondern über die Sätze von der Erhaltung der Gesamtenergie und des Gesamtimpulses festgelegt. Was wir hier am Beispiel der Kugeln diskutiert haben, gilt auch für viele andere Objekte der makroskopischen und mikroskopischen Welt. So können sogar ganze Milchstrassen aneinander streuen, aber auch Atome an Atomen

und – was in der heutigen Vorlesung betrachtet werden soll - Licht an Elektronen, Atomen bzw. Molekülen: Ein Lichtquant oder Photon wird an einem Teilchen gestreut

und in seiner Richtung abgelenkt. Da die Photonen im Vergleich zu den Teilchen sehr

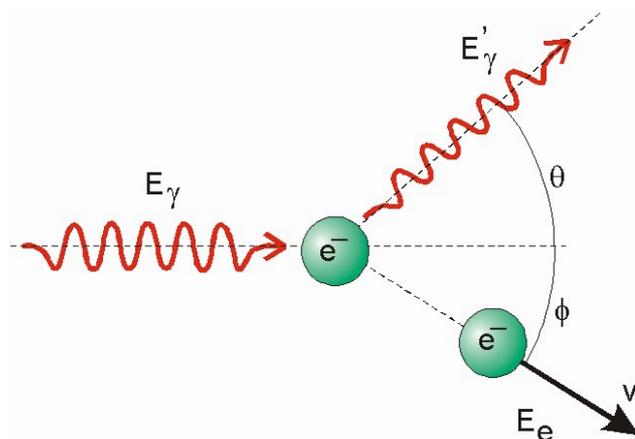


Abb. 15.1: Streuung eines Photons an einem Elektron (Comptoneffekt)

"leicht" sind, können wir uns deren Streuung wie die eines winzig kleinen Kugelchens an einer sehr großen Kugel vorstellen. Bei einem solchen Stoß wird sich die große Kugel kaum in Bewegung setzen. In Abbildung 15.1 ist die Streuung eines Photons an einem Materieteilchen dargestellt. Wenn es sich um ein Elektron handelt, nennt man diesen Prozess den Comptoneffekt, auf den wir jedoch hier nicht eingehen wollen. Es ist nicht einfach, die Streuung eines Photons an einem einzelnen Atom oder Molekül zu demonstrieren. Deshalb zeigen wir die Streuung von Licht an kleinen Milchtröpfchen, die in Wasser suspendiert sind.

Versuch: Streuung von Laserlicht

Einen Laserstrahl, der nicht auf unser Auge gerichtet ist, kann man in reiner Luft nicht sehen. Bringt man jedoch Kreidestaub oder Bärlappsamen in den Strahl, so wird das Laserlicht gestreut und gelangt so in unser Auge; der Strahl wird sichtbar.

In einer Küvette mit Wasser hinterlässt der Laserstrahl praktisch keine Spur. Bringt man jedoch ein wenig Milch in die Küvette, so wird der Strahl weithin sichtbar.

In der stark mit Wasser verdünnten Milch streuen die Milchtröpfchen einzelne Photonen des Laserstrahles aus der ursprünglichen Richtung in unsere Augen. In reinem Wasser hingegen sind die Moleküle zu klein, um eine merkliche Streuung zu verursachen.

Das Licht der Sonne besteht aus sehr vielen Photonen, deren Energie von der Farbe des Lichtes abhängt: "rote Photonen" haben weniger Energie als "blaue Photonen". Die Streugesetze sind nun so, dass blaue Photonen häufiger gestreut werden als rote. Dies soll im folgenden Experiment gezeigt werden:

Versuch: Abhängigkeit der Streuung des Lichtes von der Farbe

Ein Becherglas mit reinem Wasser und eins mit einer Milchemulsion werden auf einen Overhead-Projektor gestellt und vom weißen Licht durchstrahlt. Das Wasser sieht sowohl

von der Seite als auch im Durchlicht klar und durchsichtig aus, während die Milchemulsion von der Seite bläulich, im Durchlicht jedoch rötlich-braun erscheint.

Wenn also Licht, das aus verschiedenen Farben besteht, durch die Milchemulsion läuft, wird das blaue Licht stärker herausgestreut, während der Hauptanteil des roten Lichts ohne Streuung die Emulsion durchläuft. Man beachte: die Milchemulsion **ist** nicht einfach blau oder rot, sondern je nach den Bedingungen der Beobachtung **erscheint** sie rötlich oder bläulich.

Ganz ähnliches gilt für die Sonne: Bevor das Sonnenlicht unser Auge trifft, muss es die Lufthülle durchqueren und wird an den Luftmolekülen gestreut. Wie bei der Milchemulsion wird das blaue Licht stärker gestreut als das rote. Deshalb erscheint uns die Sonne umso rötler, je größer die vom Sonnenlicht durchquerte Luftschicht ist. Da beim Auf- und Untergang der Sonne die von ihrem Licht durchlaufene Luftschicht am größten ist, kann auf diese Weise die scheinbar rote Farbe der Morgen- oder Abendsonne erklärt werden. Und wo sieht man das gestreute blaue Licht? Wie bei dem Versuch mit der Milchemulsion darf man dazu nicht direkt in die Lichtquelle schauen. Wir schauen also an einen Ausschnitt des Himmels abseits der Sonne. Das Licht, das von dort kommt, ist Sonnenlicht, das an den Luftmolekülen in die Richtung unseres Auges gestreut wird. Dieses Streulicht ist bevorzugt blau, deshalb erscheint der Himmel blau.

Da der Mond keine Atmosphäre hat, sieht ein Astronaut auf dem Mond den Himmel schwarz und die Erde mit ihrer Lufthülle erscheint ihm bläulich.

15.2 Absorption von Licht

Eine Form der Absorption von Licht durch Materie haben wir bereits in der 6. Vorlesung kennen gelernt. Beim dort besprochenen Photoeffekt werden Photonen durch Metalle absorbiert und Elektronen emittiert. Wir sprechen von der Absorption eines Photons an einem Teilchen (Atom oder Molekül), wenn das Photon seine ganze Energie an das Teilchen abgibt, selbst verschwindet und das Teilchen in einem veränderten, energetisch angeregten Zustand zurücklässt. Wir wollen diesen Prozess an einem einfachen Beispiel, der Anregung eines Wasserstoffatoms durch die Absorption eines Photons veranschaulichen. Das Elektron, das an das Proton gebunden ist, bewegt sich im allgemeinen im energetisch niedrigsten Zustand. Aber es gibt auch noch andere angeregte Zustände, die eine höhere Energie besitzen. Die entscheidende Erkenntnis der Quantenmechanik besteht nun darin, dass nicht alle energetisch möglichen Zustände existieren, sondern nur einige diskrete. Wenn ein Photon auf ein Wasserstoffatom trifft, kann es das Elektron aus einem Zustand mit niedriger Energie in einen Zustand mit höherer Energie heben, allerdings nur dann, wenn das Photon genau die Energie besitzt, die der Energiedifferenz der beiden Zustände entspricht. Wenn wir also weißes Licht durch einen Behälter mit Wasserstoff schicken, werden genau die Photonen herausgepickt, die die "richtige" Energie besitzen, um vom Atom absorbiert zu werden, während die anderen Photonen das Gas einfach durchlaufen. Die Photonen mit der "richtigen" Energie werden also nach dem Durchgang im Lichtstrahl fehlen was in einem Experiment gezeigt wurde.

Versuch: Absorption von Licht durch Natriumdampf

Na-Dampf wird sowohl mit dem gelben Licht einer Na-Dampflampe als auch mit weißem Licht einer Glühlampe durchstrahlt. Den Na-Dampf erhalten wir durch Erwärmen eines evakuierten Glaskolbens, der metallisches Natrium enthält. Fällt das Na-Licht auf den Na-Dampf, so haben die Photonen genau die richtige Energie, um das äußerste Elektron der Na-Atome im Dampf in den nächst höheren Energiezustand zu heben. Da dieser Zustand jedoch nicht stabil ist und die angeregten Atome in einem Gas die Energie auch nicht auf andere Weise an ihre Nachbarn abgeben können, gehen sie in den Grundzustand durch Emission eines Photons über. Das dabei ausgesandte Licht hat die gleiche gelbe Farbe wie das ursprünglich eingestrahlt, nur wird es in alle Richtungen emittiert, so dass man einen leuchtenden Strahl innerhalb der Kugel sehen kann. Gleichzeitig nimmt die Helligkeit des austretenden Lichts ab, was mit einer Kamera aufgenommen wird. Bei höherer Temperatur und damit höherem Dampfdruck im Kolben leuchtet nur noch der vordere Teil des Strahls und die Intensität des durchgehenden Lichts nimmt weiter ab. Strahlt man hingegen weißes Licht ein, so wird innerhalb des Glaskolbens kein Strahl sichtbar, da der Anteil an "passendem" gelben Licht zu gering ist. Es wird also kein oder kaum Licht absorbiert, so dass sich die Intensität des durchgehenden Lichts nicht ändert. Würde man das durchgehende Licht spektral zerlegen, so bekäme man in dem kontinuierlichen Farbspektrum im gelben Bereich eine schmale dunkle Linie.

Dieses Phänomen ist die Erklärung für die sog. Fraunhoferlinien im Sonnenspektrum. Bevor das Licht die Oberfläche der Sonne in Richtung Weltraum verlässt, muss es eine Schicht aus Wasserstoff und einigen anderen Gasen durchlaufen. Dabei werden die Photonen mit den geeigneten Energien herausgepickt, so dass diese im Sonnenlicht, das wir auf der Erde sehen, fehlen. Im Sonnenspektrum treten daher an ganz bestimmten Stellen, d.h. bei ganz speziellen Photonenenergien schwarze Linien auf. (siehe Abb. 15.2). Diese wurden 1814 von Fraunhofer entdeckt bzw. wiederentdeckt und sind nach ihm benannt worden.

Die Absorption von Sonnenlicht ist auch die Grundlage der Photosynthese der Pflanzen mit Hilfe des Chlorophylls. Das ist ein sehr komplizierter Vorgang. Er beginnt mit Licht und mit Wasser- und Kohlendioxidmolekülen im Innern eines Blattes. Das Licht wird vom Wassermolekül H_2O absorbiert, das dabei in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten wird. Der Sauerstoff wird an die Atmosphäre abgegeben, während der Wasserstoff sich an das C_2O anlagert, wobei Glukose $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ entsteht. Dieser Prozess läuft allerdings nicht direkt ab, sondern über viele Zwischenschritte, bei denen das Chlorophyll eine wesentliche Rolle spielt. Die Absorption der Photonen geschieht nämlich im Chlorophyll, das dadurch energetisch angeregt wird. Die Anregungsenergie wird dann benutzt, um das Wasser zu spalten und den Weg zur Synthese der Glukose zu eröffnen.

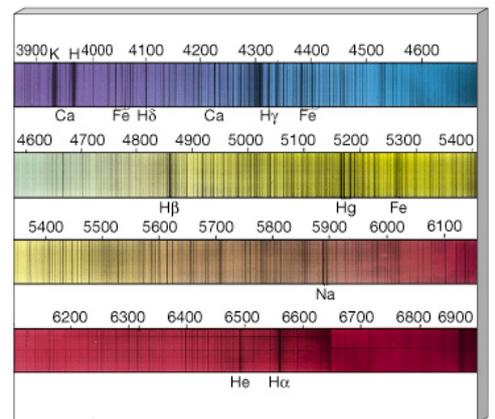


Abb. 15.2: Spektrum des Sonnenlichts mit den charakteristischen Fraunhoferlinien.

Die grüne Farbe des Chlorophylls kommt dadurch zustande, dass dieser Stoff aus dem Spektrum des Sonnenlichtes die Photonen mit den Farben rot und blau bevorzugt absorbiert. Damit bleiben im wesentlichen grüne Photonen übrig, die in unser Auge dringen und damit das Blatt mit seinem Chlorophyll grün erscheinen lassen.

Versuch: Demonstration des Absorptionsspektrums von Chlorophyll

Mit einem Geradsichtprisma wurde zunächst das kontinuierliche Spektrum einer Kohlebogenlampe auf einem Schirm dargestellt. Bringt man dann eine Küvette mit einer Chlorophyll-Lösung so in den Strahlengang, dass das Licht nur zum Teil durch die Lösung geht, so erscheinen auf dem Schirm sowohl das ursprüngliche Spektrum als auch das Absorptionsspektrum des Chlorophylls. Durch Vergleich der beiden erkennt man leicht, dass Chlorophyll nahezu den gesamten Anteil des blauen Lichts absorbiert und dass sich ferner auch im Roten eine breite schwarze Absorptionslinie befindet.

Die Chlorophyll-Lösung haben wir aus einem Rosenkohlblatt hergestellt. Das Blatt wurde kleingeschnitten, mit Seesand vermengt und in einem Mörser zerrieben. Anschließend kann man das Chlorophyll mit Aceton extrahieren. Um eine klare Lösung zu erhalten, muss die extrahierte Flüssigkeit noch filtriert werden.

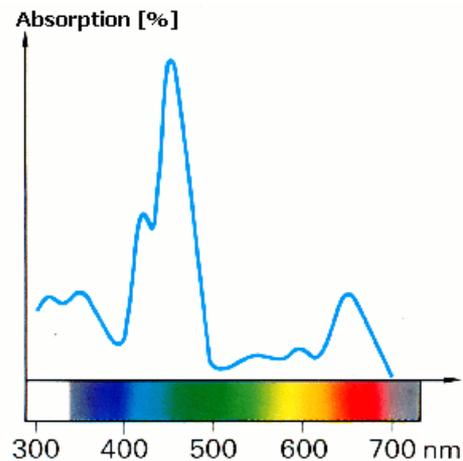


Abb. 15.3:
Absorption von Licht in Chlorophyll als Funktion der Wellenlänge

Die Beantwortung der Frage, warum wir gewisse Gegenstände farbig sehen, ist damit gegeben: Eine rote Hose ist z.B. mit einer chemischen Substanz eingefärbt, die aus dem Sonnenlicht alle Farben außer Rot absorbiert. Ein schwarzer Körper absorbiert auf seiner Oberfläche Licht aller Farben, während ein weißer Körper nichts bzw. fast nichts absorbiert und somit auch keine Vorliebe für bestimmte Wellenlängen zeigt.

15.3 Umwandlung von Licht in Materie und Antimaterie

Der letzte Prozess, den wir hier diskutieren wollen, nämlich die Umwandlung von Licht in Materie und Antimaterie, hat keine Bedeutung für unser tägliches Leben. Er hat aber am Anfang unseres Universums eine überragende Rolle gespielt und ist dafür verantwortlich, dass unser Universum so "leer" ist.

Schon bei der Absorption von Licht an Atomen haben wir gesehen, dass Photonen kleine Energiebündel sind. Bei der Absorption wird diese Energie benutzt, um den Elektronenzustand in einem Atom zu verändern. Nach Einstein wissen wir, dass auch Materie eigentlich aus sehr konzentrierten Energiebündeln besteht. Jedem Objekt mit der Masse m ist die Energie $E = m \cdot c^2$ zugeordnet. Glücklicherweise verhindern gewisse Naturgesetze (hier die Erhaltung der Baryonenzahl), dass diese Energie unmittelbar frei wird. Andererseits erlauben die Naturgesetze, dass ein Teilchen und sein Antiteilchen sich vernichten können und dabei ihre gesamte Energie von $2 \cdot m \cdot c^2$ frei wird. Diese Energie kann dann z.B. in Form von zwei oder mehr Photonen auftreten

In der Physik gilt nun ein ganz wichtiges Gesetz: Wenn ein Prozess $A + B \rightarrow C + D$ möglich ist, dann muss auch der umgekehrte Prozess $C + D \rightarrow A + B$ möglich sein,

vorausgesetzt, dass genügend Energie zur Verfügung steht. Also sollte es auch möglich sein, aus Photonen Materie und Antimaterie zu erzeugen. In der Tat war es dieser Prozess, mit dem Anderson 1932 das erste Antiteilchen in einer Nebelkammer entdeckt hatte.

Im täglichen Leben sind die Prozesse der Umwandlung von Photonen in Teilchen-Antiteilchen-Paare und umgekehrt nicht von Bedeutung. Denn die Quanten des Sonnenlichtes haben nicht genügend Energie, um selbst das leichteste Teilchen-Antiteilchen-Paar, das Elektron-Positron-Paar, zu erzeugen. Weiterhin gibt es auf der Erde keine Antiteilchen in nennenswerter Zahl, die vernichtet werden könnten. Doch das war nicht immer so. Es gab im Weltall ganz kurz nach dem Urknall (10^{-6} Sekunden) fast gleich viele Teilchen und Antiteilchen. Sie haben sich vernichtet und dabei sind Photonen entstanden, die heute noch den Weltraum durchfliegen. Allerdings ist ihre Energie durch die Expansion des Weltalls so klein geworden, dass man sie nur noch als Mikrowellenstrahlung nachweist. Die Vernichtung der Materie durch Antimaterie am Anfang des Weltalls war so gründlich, dass von jeweils einer Milliarde Teilchen nur eines überlebt hat. Hätte es diesen Prozess nicht gegeben, enthielte unser Universum heute eine Milliarde mal mehr Materie. Es wäre ein ganz anderes Universum.

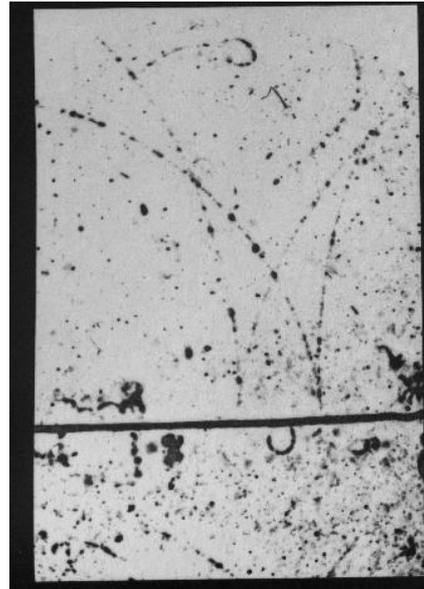


Abb. 15.4: Von unten einfallende γ -Quanten erzeugen in der Bleischicht Elektron-Positron-Paare, die im Magnetfeld V-förmig auseinanderlaufen und in einer Nebelkammer sichtbar gemacht werden.

15.4 Biographie: Joseph Fraunhofer (1787 – 1826)

Schlägt man in einem Lexikon nach, so findet man unter "Fraunhofer" z.B. folgenden Eintrag: "Fraunhofer, Joseph von, dt. Physiker, * 6.3.1787 Straubing, † 7.6.1826 München; vervollkommnete das Fernrohr, erfand das Beugungsgitter, mit dem er die Wellenlängen der Absorptionslinien im Sonnenspektrum maß, die nach ihm Fraunhofersche Linien heißen."

Aus diesen Zeilen könnte man entnehmen, dass Fraunhofer von adliger Herkunft war, genügend Geld zu einem Physikstudium besaß und später bedeutende Erfindungen und Entdeckungen gemacht hat. Dem war jedoch insgesamt nicht so.

Joseph Fraunhofer wurde in Straubing als jüngster Sohn eines Glasers geboren und wuchs in einer sehr großen Familie auf. Es wird berichtet, dass seine Eltern arm und wenig gebildet waren und dass Joseph bereits als Kind im väterlichen Betrieb gearbeitet hat. Die Eltern starben kurz



nacheinander, als Joseph erst 11 Jahre alt war, so dass er, ohne dauerhaft eine Schule besucht zu haben, als Waise zu einem Spiegelmacher nach München in die Lehre kam. Als er 14 Jahre alt war, stürzte das Gebäude, in dem er arbeitete, ein, doch er hatte Glück im Unglück: Er wurde nicht nur aus den Trümmern gerettet, sondern erhielt vom Kurfürsten Maximilian von Bayern, der von dem tragischen Ereignis gerührt war, ein Geldgeschenk. Damit war Fraunhofer in der Lage, die Lehre zu verlassen und eine Schule zu besuchen. Außerdem empfahl der Kurfürst ihn dem einflussreichen Industriellen und Politiker Joseph von Utzschneider, der u.a. einen optischen Betrieb im sog. "Mathematisch-mechanischen Institut von Utzschneider, Reichenbach und Liebherr" besaß.

Fraunhofer, der bis dahin praktisch keine Schulbildung besaß, zeigte eine regelrechte Leidenschaft für die Optik, so dass Utzschneider ihn 1806 in seinem Betrieb beschäftigte und bald den außerordentlichen Wert seines technisch hochbegabten Mitarbeiters erkannte. Bereits 3 Jahre später übertrug er dem 22-jährigen die Leitung der optischen Abteilung des inzwischen nach Benediktbeuren verlegten Instituts. Fraunhofer erkannte bald, dass die Leistungsfähigkeit der gefertigten optischen Geräte stark von der Qualität des verwendeten Glases abhing. Daher versuchte er, in der firmeneigenen Glasfabrik die Glasherstellung zu verbessern. Er war davon überzeugt, dass man das empirische Handwerk durch exakte wissenschaftliche Planung ergänzen müsse, und erzielte bereits 1811 ausgezeichnete Resultate.

Die Beschäftigung mit chromatischen und anderen Linsenfehlern veranlasste ihn, den Brechungsindex des verwendeten Glases für verschiedene Wellenlängen zu messen. Das führte zur Entdeckung bzw. Wiederentdeckung und Katalogisierung der schwarzen Absorptionslinien im Sonnenspektrum, die man als Eichmarken benutzen konnte und die heute als Fraunhoferlinien bekannt sind. Durch sein unermüdliches Engagement wurde Fraunhofer 1814 Teilhaber des optischen Instituts, das mehr als 50 Mitarbeiter beschäftigte und zum führenden Unternehmen in der Welt aufstieg. Die in dieser Firma gefertigten optischen Geräte erlangten Weltruhm, wobei auch die mechanischen Teile der Instrumente mit den optischen Komponenten mithalten konnten. Kein technisches Problem war Fraunhofer zu schwierig; als Beispiel für eines seiner Meisterstücke sei der sog. Dorpat-Refraktor mit einem Linsendurchmesser von 24 cm und einer Gesamtmasse von 1000 kg genannt. Die von Fraunhofer begonnene Verbindung von theoretischer optischer Arbeit, Glasfertigung und mechanischer Präzision wurde wegweisend für die optische Industrie in Deutschland.

In den Jahren 1821/22 gelang Fraunhofer die Herstellung von Beugungsgittern mit bis zu 300 Strichen pro Millimeter, wodurch ihm die absolute Wellenlängenmessung von Spektrallinien gelang.

Aufgrund seiner Verdienste wurde er ohne akademische Ausbildung im Jahre 1817 als korrespondierendes Mitglied in die Bayerische Akademie der Wissenschaften aufgenommen. Mit der Verlegung des optischen Instituts nach München im Jahre 1819 wurde er Professor und zwei Jahre später zum "besuchenden" Mitglied der Akademie ernannt. Wiederum zwei Jahre später durfte er sich 1823 besoldeter Professor und Konservator des physikalischen Kabinetts nennen. Im Jahre 1824 verlieh ihm der König von Bayern den Zivil-Verdienst-Orden, mit dem eine nicht vererbare Erhebung in den Adelsstand verbunden war.