

Summary for scientists

In this thesis I investigate the propagation of light in disordered media. The final goal of this investigation is the observation of the phenomenon of Anderson localization. Localization as introduced by P.W. Anderson refers to a dramatic change in the propagation of an electron when it is subject to a spatially random potential. Normally the electron is scattered diffusively, resulting in a finite conductivity. In this multiple scattering process, interference can be neglected. At localization, where the diffusion constant vanishes, the interference of (multiple) scattered waves cannot be neglected any more, but indeed its influence becomes essential. Because it is just the interference of *waves* that is important, diffusive behavior of multiple scattered light may as well show a transition to localized states. This phase transition is expected to occur when the mean free path λ_{tr} becomes smaller than the wavelength in the medium λ_{med} , and is known as the Ioffe-Regel criterion. In Chapter 1 this is explained in detail.

In Chapter 2 a global strategy for observation of Anderson localization is discussed. The scattering efficiency of the single particles in the random medium should be as high as possible in order to obtain the smallest possible mean free path. As usual for phase transitions, the occurrence of Anderson localization is strongly dependent on the dimensionality of the random medium. It is believed that in an infinite lossless two-dimensional random medium there is always localization. Therefore observation of localization in a (quasi) two-dimensional medium may be possible.

In Chapter 3 and 4 theory for scattering of waves from a single particle, and a multiple scattering theory for isotropic point scatterers are given respectively. Some attention is paid to the mapping of scalar and vector waves in Sect. 4.1. Both a rigorous theory and a diffusion theory of multiple scattering by a slab are given, and their results are compared. Further, a time-resolved diffusion theory and a diffusion theory for a two-dimensional system are presented.

Chapter 5 reports of various experiments which have been performed. These experiments are compared to the theory as presented in Chapter 4. Experiments in which the backscattered intensity of light from a random slab is recorded, show an enhancement of almost a factor of two at precisely backscattering. This phenomenon is known as “coherent backscattering” and is the result of interference in multiple scattering. Coherent backscattering is seen as a precursor to Anderson localization, and is therefore often referred to as weak localization. A very interesting experiment is described in Sect. 5.4.2. In this time-resolved experiment the transmission of a slab of TiO_2 particles in air for 5 ps input pulses at $\lambda_{vac} = 600$ nm is recorded. From this experiment the diffusion constant is determined to be $7.4 \text{ m}^2/\text{s}$. Comparison to the Ioffe-Regel criterion, with the average re-

fractive index of the medium $n_{med} = 1.55$, leads to $2\pi\lambda_{tr}/\lambda_{med} = 0.775n_{med}^2 \simeq 1.86$ which is remarkably close to the critical value of 1. Moreover, the mean free path as determined from the coherent backscattering of the same sample is significantly larger than the value as obtained from the time-resolved transmission experiment. These results give strong evidence that we indeed are very close to Anderson localization.

In Chapter 6 some possibilities of constructing a two-dimensional random medium are discussed. In Sect. 6.2 experimental results are given of some measurements on a translation-invariant type of two-dimensional medium, consisting of many parallel glass fibers with a diameter of $5\text{ }\mu\text{m}$. These results show that it is indeed possible to construct high-quality quasi-two-dimensional random systems. Observation of Anderson localization in such a medium will however only be possible if the mean free path is shortened. This may be done by either drawing much thinner fibers or by using fibers of the same size but which are transparent in the infrared. In order to make the mean free path as short as possible, media having a high density of scatterers are usually studied. This may result in complications in the form of particle-particle correlations or dependent scattering. Some considerations about these phenomena are given in Chapter 7.

A very important conclusion is that the determination of the diffusion constant or mean free path should be done with different techniques on the same sample. In the diffusive regime those techniques will all lead to the same answer for the diffusion constant, where in the critical or localization regime significantly different answers are expected if the measurements are interpreted in terms of a theory which assumes diffusive behavior of the scattered light.

Samenvatting voor iedereen

Dit proefschrift gaat over voortplanting van licht in sterk verstrooiende wanordelijke systemen. Voorbeelden van deze wanordelijke systemen zijn bijvoorbeeld het papier waarop deze tekst is gedrukt, een glas melk, de wolken aan de hemel, kortom alles wat wit is. In zekere zin gaat dit proefschrift dus over wat er gebeurt als licht op een wit voorwerp valt. Waarom witte voorwerpen nu eigenlijk wit zijn is al sinds jaar en dag bekend. Ze zijn opgebouwd uit een mengsel van (minstens) twee volledig transparante materialen. Zo bestaan wolken (mist) uit vele miljarden piepkleine waterdruppeltjes met daar tussen gewoon lucht. Lucht en water zijn elk afzonderlijk transparant. Blijkbaar gaat bij een zeer fijne verdeling van water in lucht deze doorzichtigheid verloren. Dit komt doordat het licht bij ieder waterdruppeltje wordt weerkaatst of afgebogen in een willekeurige richting. Daardoor verdwaalt het licht in de wolk; het weet niet meer waar het oorspronkelijk vandaan kwam, noch waar het heen ging. Na op deze manier een heleboel keer van het kastje naar de muur gestuurd te zijn, zal het licht uiteindelijk toch de rand van de wolk bereiken en daar in een willekeurige richting (diffuus) naar buiten komen. De wolk straalt het oorspronkelijk ingekomen licht weer uit in de vorm van diffuus licht, anders gezegd, de wolk is wit. In het onderzoek zoals beschreven in dit proefschrift gaat het er om, om het licht dat in een wanordelijk systeem zoals een wolk zit, zo snel mogelijk te doen verdwalen. Hiervoor is behalve de afmeting van de waterdruppeltjes ook hun onderlinge afstand van belang.

Al aan het eind van de jaren '50 heeft de natuurkundige P.W. Anderson voorspeld dat golven (zoals licht) die in een of ander medium zeer sterk worden verstrooid (verdwalen), ten gevolge daarvan opgesloten kunnen worden in dat medium. Dit verschijnsel staat nu bekend als Anderson-lokalisatie. Essentieel hierbij is het optreden van interferentie. Interferentie is het effect dat twee golven die elkaar tegenkomen, elkaar zowel kunnen versterken als uitdoven. Versterking treedt op als de golfbewegingen van beide samenkomende golven gelijktijdig maximaal zijn. Uitdoving ontstaat als een maximum en een minimum samen komen; de tegengestelde bewegingen van beide golven heffen elkaar op. Het opmerkelijke is nu dat er in het verstrooiings proces van een golf in een wanordelijk medium altijd versterking optreedt op de plaats waar de golf oorspronkelijk vandaan kwam. Het gevolg hiervan is dat de golf steeds een iets grotere kans heeft om terug te komen op een eerder bezochte plek. Hierdoor kan de golf in de buurt van zo'n plek blijven ronddolen, de nachtmerrie voor een ieder die verdwaald is. Ik moet u dan ook terstond gerust stellen: hoewel mensen op andere wijze wel degelijk kunnen interfereren, treedt dit effect alleen maar op voor golven en domme detectives in de woestijn.*⁾ Het voorgaande wordt in o.a. hoofdstuk 1 besproken.

In hoofdstuk 2 wordt ingegaan op het doel van het onderzoek en op de te gebruiken experimentele methoden. Zo kan men bijvoorbeeld een bundel laser licht op een wanordelijk medium doen schijnen en vervolgens meten hoeveel licht er in verschillende richtingen door dat medium weer wordt uitgestraald. Hierbij kan men dan ook nog de grootte van het medium of de concentratie van het aantal verstrooiende deeltjes (bijvoorbeeld waterdruppeltjes) veranderen. Het gebruik van laser licht is van belang, omdat het gemakkelijk gebundeld kan worden, maar één golflengte bevat en bovendien een hoge intensiteit bezit. Om inderdaad het uiteindelijke doel, het waarnemen van Anderson-lokalisatie van lichtgolven, te kunnen bereiken is het op de eerste plaats noodzakelijk een medium te construeren dat het licht nog veel sterker verstrooit dan de hierboven beschreven waterwolk. Het blijkt dat titaandioxide deeltjes met een diameter van 0,0002 mm gemengd met lucht het licht veel sterker kunnen verstrooien dan een waterwolk.

Om een nauwkeurig inzicht te verkrijgen in de verstrooiings-eigenschappen van een wanordelijk systeem waarin nog geen Anderson-lokalisatie optreedt en het licht zich derhalve nog gewoon diffuus voortplant, wordt in de hoofdstukken 3 en 4 een hoeveelheid theorie gepresenteerd.

Hoofdstuk 5 bevat een verslag van een aantal uitgevoerde experimenten, waarvan de resultaten worden vergeleken met de theorie van hoofdstuk 4. Deze experimenten laten bijvoorbeeld zien dat interferentie-effecten inderdaad van belang zijn bij voortplanting van licht in wanordelijke media. Een bewijs hiervoor is het optreden van de zogenaamde „coherente terugverstrooiing”, die vanwege de verwantschap met Anderson-lokalisatie ook wel wordt aangeduid met „zwakke lokalisatie”. Coherente terugverstrooiing is het effect dat, ten gevolge van interferentie, de intensiteit van het diffuus verstrooid licht in de richting precies terugwaarts naar de bron altijd bijna tweemaal zo hoog is als in alle andere bijna terugwaartse richtingen.

Een belangrijk experiment wordt beschreven in paragraaf 5.4.2. In dit experiment worden met behulp van een laser lichtpulsen met een tijdsduur van 0,000.000.000.005 seconde geschoten op een wanordelijk medium bestaande uit titaandioxide deeltjes en lucht. Aan de andere kant van het medium word gemeten hoe lang het licht er over doet om door het medium heen te komen. Vergeleken met andere experimenten en de theorie van hoofdstuk 4 blijkt het licht aanzienlijk langer binnen het medium te blijven dan op grond van normaal diffuus gedrag zou worden verwacht. Dit is een sterke aanwijzing dat we in dit geval dichtbij het optreden van Anderson-lokalisatie zijn gekomen. Het optreden van Anderson-lokalisatie zelf hebben we echter (nog) niet kunnen waarnemen.

In de wereld waarin we leven kunnen we ruimtelijke gezien drie onafhankelijke richtingen onderscheiden, te weten hoogte, breedte en diepte. Zo'n wereld noemen we driedimensionaal. In deze wereld blijken mogelijkheden voor het experimenteel waarnemen van Anderson-lokalisatie uitermate onzeker. Op theoretische gronden weten we echter dat

in een *tweedimensionale* wereld, een platte wereld waarin alleen maar lengte en breedte bestaat, Anderson-lokalisatie veel gemakkelijker zal kunnen optreden. In hoofdstuk 6 worden verschillende technieken besproken om een wanordelijk medium te construeren dat zich effectief als een tweedimensionaal medium gedraagt. Hierbij wordt op verschillende wijze de verstrooiing van licht naar de derde dimensie belet. Het prepareren van een tweedimensionaal medium blijkt zo gecompliceerd, dat het alleen met zeer geavanceerde technieken mogelijk moet zijn om een medium te maken waarin Anderson-lokalisatie ook inderdaad experimenteel kan worden waargenomen. Niettemin wordt verslag gegeven van een aantal uitgevoerde experimenten aan een zogenaamd translatie-invariant tweedimensionaal medium, bestaande uit vele duizenden parallelle glasvezels, waarbij aannemelijk wordt gemaakt dat het medium tot op zekere hoogte voldoet aan de criteria voor lokalisatie. Het zijn hier met name de afmetingen van het medium en de absorptie in de glasvezels die een succesvolle observatie van Anderson-lokalisatie in de weg staan.

Tot slot wil ik benadrukken dat het belang van deze studie naar de voortplanting van licht in wanordelijke systemen veel verder strekt dan men op het eerste gezicht zou vermoeden. Resultaten uit dit onderzoek met lichtgolven hebben in principe ook consequenties voor het gedrag van andere soorten van golven in de natuur zoals geluidsgolven of quantummechanische golven. Omdat het juist deze quantummechanische golven zijn die de materie in het universum beschrijven, en we derhalve kunnen zeggen dat in feite de hele wereld om ons heen uit golven is opgebouwd, wordt het wetenschappelijk belang van de mogelijke ontdekking van een nieuw effect zoals Anderson-lokalisatie van licht duidelijk.

^{*})Hergé, „Kuifje en het zwarte goud” (Casterman, 1950).