

Prof. Dr. Wilh. Trabert

Die

Sonnenstrahlung u. ihre Wirkung.

1904.

Adelard M. M. M.

Die Sonnenstrahlung u. ihre Wirkung.

Es gibt zwei Arten, auf welche Weise zwei Himmelskörper auf einander einwirken können. Erstlich das eine Band der Gravitation; ein grösserer Himmelskörper wirkt so auf einen Kleinern, dass die Bahn des zweiten durch die ~~Gravitations~~^{Gravitations} Kraft beeinflusst ist. Das zweite Band, das Himmelskörper unter einander verbindet, ist das der Strahlung. Haben wir einen grossen Himmelskörper, welcher infolge seiner Strahlung auf den kleineren Planeten wirkt, dann sind die Veränderungen auf den kleinen Planeten fast vollständig bestimmt, durch den Energiestrom, welcher von grossen Himmelskörper auf den kleinen Planet übergeht. Stellen wir uns als den Planeten die Erde vor, welche von der Sonne ungeheure Mengen von Strahlungsenergie aufnimmt, so sehen wir dass die Temperaturveränderungen u. die Unterschiede in der Luftdruckverteilung nur von diesen Energieaustausch abhängen. Diese Temperatur u. Druckunterschiede rufen dann auch die allgemeine Circulation hervor, einen der grössten Veränderungsvorgänge auf unserer Erde. Es wird also das ganze Leben u. Treiben auf unserer Erde von der Sonnenenergie unterhalten u. betrieben. Manchmal scheint es als wir der Erde selbst Energie entziehen könnten. Allein wenn wir näher das alles betrachten, so werden wir leicht erkennen, dass es immer Sonnenenergie ist, die wir auf unserer Erde besitzen. (Kohlenlager, Wassermühle u. d. w.)

Dieser Vortrag über Sonnenstrahlung u. deren Wirkung auf die Vorgänge in unserer Atmosphäre werden wir zweckmäßig in 3 Teile teilen. Im ersten Teil werden wir die allgemeinen Grundbegriffe der Strahlungstheorie überhaupt erörtern. Im zweiten Teile werden wir uns im Speziellen mit der Sonnenstrahlung beschäftigen; wir werden die Geschichte eines einzelnen Sonnenstrahl vom Augenblick wo er die Sonne verlässt, bis wo er auf die Erdoberfläche trifft untersuchen. Im 3. Teil werden wir dann endlich auf die Wirkungen dieser Strahlen zuzusprechen kommen; wir werden die Veränderung welche von diesen Strahlen bewirkt werden näher untersuchen u. in dem allgemeinen die Fortstrahlung der Erde weiter verfolgen. Wir gehen nun gleich zum 1. Teil unseres Vortrags über.

I. Teil.

Es ist eine allgemeine Tatsache, dass, wenn zwei Körper von verschiedenen Temperaturen haben, im allgemeinen die Tendenz vorhanden ist, diese Temperaturen auszugleichen. Der physikalische Vorgang kann nun, in sehr verschiedenen sein. Dieser erwähnte Ausgleich der Temperaturdifferenzen kann nun in drei Arten geschehen. Der einfachste u. gewöhnlichste ist folgender: Wenn wir einen heißen Körper I. haben, so kann ein Körper II. welcher wesentlich kälter als I. ist, dadurch Wärme zugeführt werden, dass irgend

2.
ein Körper III. dazwischen geschaltet wird. Es folgt dann ein Übergang von Wärme von I auf II. durch einen dritten Körper, welcher zwischen beiden eingeschaltet worden ist. Die Wärme wird von I. auf II. so übergeben, dass sie den Körper III. durchsetzt. Es wird sich ein sogenanntes Temperaturgefälle einstellen, jede Schicht von III. nimmt eine Mitteltemperatur von I u. II. an. Diesen gewöhnlichen Vorgang nennt man die Übertragung von Wärme durch Leitung. Der zweite Fall von Wärmeübertragung ist folgender: Wir nehmen wieder einen Körper I. u. einen anderen II. an. I. u. II. sind von einem III. Medium getrennt, z. B. Wasser. In diesem Falle ist die Übertragung ganz anders. Es findet im Wasser Strömungen statt: wärmeres Wasser steigt auf, u. kälteres sinkt, wird durch Berührung mit dem I. warm u. steigt wieder hinauf. Es findet somit ein fortwährender Austausch von warmem u. kaltem Wasser statt. Die Wärmeübertragung geschieht in diesem Falle viel schneller. Eine solche Wärmeübertragung wird Konvektion genannt. Diesen Vorgang beachten wir nicht nur bei Wasser sondern spielt in der Natur auch eine große Rolle, nämlich wenn das 3. Medium Luft ist. Es treten dann die sogenannten Konvektionsströme auf, welche für die Lufttemperatur verschiedener Orte auf der Erdoberfläche von besonderer Bedeutung sind. In diesen beiden Fällen findet also die Übertragung

von Wärme durch ein Medium statt. Als 3. Art von Wärmeübertragung kommt nun endlich die Strahlung. Man kann sie wohl auch als Fernwirkung der Wärme bezeichnen. Dies können wir ja jeden Tag beobachten. Wenn die Sonne plötzlich aus einer Wolke herausbricht, so haben wir fast momentan eine Erwärmung u. wenn sie hinter eine Wolke tritt, so hört diese Erwärmung ebenso schnell auf. Das Medium wird hier augenscheinlich nicht tangiert. Den gleichen Vorgang sehen wir wenn wir in die Nähe eines erhitzten Ofen treten. Am schönsten kann diese Art von Wärmeübertragung durch Brennspiegel dargestellt werden. Das das Medium nicht tangiert wird sehen wir am schönsten, wenn wir aus eine Linse aus Eis machen. Wir bemerken dass die Strahlen hinter der Linse leicht anzündbare Stoffe zum Glühen bringen, während die Linse falls das Medium tangiert würde, ja schmelzen sollte. Wir beobachten auch dass unter dem Einflusse der Sonne der Erdboden bis auf 40 bis 50 Grad erwärmt wird, während die Luft nur 20 bis 30° Temperatur erreicht. Es besteht also zwischen strahlender u. geleiteter Wärme der grosse Unterschied dass im ersten Fall das Medium nicht tangiert wird, während es im zweiten ein leuchtender Bestandteil zur Überführung ist, dass das Medium tangiert wird. Bei Strahlung findet somit eine Fernwirkung der Wärme statt. 1790 hat Laplace einen sehr interessanten Versuch gemacht. Er hat zwei Brennspiegel benützt. Im Brennpunkte des einen stellte er einen heissen Körper, im Brenn-

3
punkte des andern ein Thermometer. u. nun beobachtete er zu seinem Erstaunen dass das Thermometer stieg. Anfangs konnte man sich den Vorgang nicht erklären bis Prevost den Versuch modificierte u. dann eine Erklärung des Vorganges gab. Er gab an Stelle des heissen Körpers einen kalten (Eis) u. beobachtete dass das Thermometer fiel. Nach diesem Versuch stellte er nun den Satz auf: Jeder dieser Körper, die wir angegeben haben, gleichgültig ob er mehr oder weniger warm ist, strahlt Wärme aus. Es handelt sich nun nur darum, wer dem andern mehr Wärme mittheilt, haben wir den heissen Körper so strahlt dieser mehr Wärme aus als das Thermometer; der kalte Körper wird Wärme verlieren u. das Thermometer Wärme in sich aufnehmen, muss also steigen. Nehmen wir einen kalten Körper, Eis oder Schnee, so ist jetzt das Thermometer vor wärmeren Körper, das Thermometer strahlt mehr Wärme aus, verliert also an Wärme, muss sinken. Die Wärme gibt er am kalten Körper ab, die Temperatur desselben muss somit steigen; wir sind nur nicht in der Lage diesen geringen Ausstieg zu messen. Es ist somit eigentlich ein beiden Versuchen das gleiche Vorgegangen, allein einmal haben wir die Temperatur des einen, das anderemal die Temperatur des anderen Körper gemessen. Nach diesen Ausstellungen, wollen wir uns in aller Kürze mit den wichtigsten Gesetzen welche Wärmestrahlen unterworfen sind, unterziehen. [Strahlungstheorie]

Strahlungstheorie.

Wir betrachten einen strahlenden Punkt. Als strahlender Punkt kann man sich einen kleinen strahlenden Körper vorstellen. Es ist nun eine Beobachtungstatsache dass 1.) sich die Wärmestrahlen nach allen Seiten hin gleichmäßig ausbreiten

2.) dass sie sich in gerader Linie fortpflanzen. Diese zweite Thatsache kann man leicht durch Schirmwirkung nachweisen u.

Folgt: 3.) dass die Intensität der Strahlung nach dem Quadrate der Entfernung abnimmt. (Vorausgesetzt ist dabei dass die Strahlen auf dem Wege, den sie durchlaufen, keine Schwächung erfahren; dies ist bei der Atmosphäre noch nicht beobachtet worden). Das 3. Gesetz folgt nämlich aus den beiden ersten. Bezeichnen wir die Wärme, die ein strahlender Punkt nach allen Seiten ausstrahlt mit W u. ziehen wir um diesen strahlenden Punkt eine Kugel mit dem Radius r so entfällt auf die Innenoberfläche der Kugel $4r^2\pi$ die Wärmemenge W ; auf die Flächeneinheit entfällt somit $\frac{W}{4r^2\pi}$. Es ist somit die Intensität dem Quadrate der Entfernung verkehrt proportional, dabei ist vorausgesetzt, dass auf dem Wege r die Strahlung keine Schwächung erfährt. Haben wir es mit einem strahlenden Punkt zu tun, welcher Wärmestrahlen auf einen andern Körper entsendet, so beobachten wir dass diese Wärmestrahlen reflektiert werden u. zwar gilt auch hier das Gesetz dass Einfallswinkel gleich dem Reflexionswinkel ist. Diese Eigenschaft besitzen somit nicht nur die Lichtstrahlen sondern

Reflexion, Brechungsgesetz, Spektrum.

auch die Wärmestrahlen. Wir beobachten ferner dass nicht der ganze Fächer reflektiert wird sondern dass ein Teil im Körper eindringt u. aufgenommen wird. Ausserdem beobachten wir folgende wichtige Thatsache. Wir nehmen ein Steinsalzprisma u. lassen es von Wärmestrahlen treffen. Da wird nun ein Teil reflektiert, ein Teil geht in das Steinsalz hinein, wird aber gebrochen tritt dann unter neuerlicher Brechung aus dem Steinsalzprisma heraus. Wir beobachten aber dass nicht nur ein einziger Wärmestrahle austritt, sondern wie die Lichtstrahlen in Farben zerlegt werden, wird dieser in Wärmestrahlen, in ein Bündel von Strahlen zerlegt. Wir sind daher gezwungen Wärmestrahlen verschiedener Brechbarkeit anzunehmen. Wenn wir die Temperatur des strahlenden Körpers weiter erhöhen, so kommen zu den gewöhnlichen noch brechbarere Strahlengattungen hinzu, u. zwar verbreitet sich der Wärmestrahlenbündel nach beiden Seiten hinaus. Wird der Körper rothglühend, so kommen solche dazu, welche in unserem Auge die Empfindung des Roth auslösen. Gehen wir immer weiter, so bekommen wir alle Farben des Regenbogens, bis der Körper weissglühend wird. Wir werden dann alle Farben von Roth bis Violett bekommen, wir beobachten dann noch wenn wir über Roth u. Violett hinausgehen, dass noch Wärmestrahlen vorhanden sind, welche auf unser Auge keine Lichtwirkung mehr auszulösen imstande sind.

Schwächung der Strahlen, durch einen Körper.

Abnahme der Intensität

Außerdem beobachten wir, dass beim Durchgang der Wärmestrahlen durch einen Körper eine Schwächung der Strahlen stattfindet. Es hat sich nun herausgestellt, dass bei Luft diese Schwächung so minimal ist, dass sie kaum merkbar ist, so dass sie praktisch vernachlässigt werden kann. Es kann sich nun zu untersuchen, nach welchem Gesetz die Intensität der Strahlung bei einem Durchgang ^{durch} einer Platte abnimmt. Nehmen wir eine Platte von der Dicke Δx , so nehmen wir an dass beim Austritt eine Schwächung $-\Delta J$ beobachtet werde. Außerdem hat man experimentell festgesetzt, dass wenn man die Intensität J verdoppelt, auch die Schwächung ^{sich} verdoppelt. Es ist also $-\Delta J = k J \Delta x$ wenn man mit Δx die Dicke der Platte bezeichnet. Wenn man 2 Platten hintereinander schaltet, so ist die Schwächung annähernd doppelt so gross; jedoch nicht ganz genau, es stimmt besser je kleiner das Δx ist; es wird also die

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta J}{\Delta x} = -k J \quad \text{oder} \quad \frac{dJ}{dx} = -k J \text{ sein.}$$

$\log J - \log J_0 = -kx$ Wenn wir mit J_0 die Intensität der Strahlung beim Eingange in die Platte bezeichnen. Schreiben wir die Formel in ^{einer} Potenzgleichung an so erhalten wir $\frac{J}{J_0} = e^{-kx}$ oder

$$J = J_0 e^{-kx}$$

Diese Formel, welche als Bouguer'sches Gesetz der Schwächung der Strahlung bezeichnet wird.

2 Arten der Intensitätschwächung: 1. Absorption. 2. diffuse Reflexion. 5

gibt uns die Strahlungsintensität beim Durchgange durch eine Platte beliebiger Dicke an. Wir sehen somit dass Wärmestrahlen eine Schwächung erfahren und zwar ist diese Schwächung aus 2 Teilen bestehen. Erstens ist die Schwächung sicher abhängig von der Absorption, d. h. diejenige Schwächung welche eintritt, dadurch dass das Medium sich erwärmt u. zweitens wird die Totalschwächung abhängen von der diffusen Reflexion. Es wird also in unserer Formel das k aus 2 Teile bestehen. $k = \alpha + \beta$ α beruht auf Absorption u. β auf diffuse Reflexion. Es wird also von $\alpha \Delta x$ absorbiert u. $\beta \Delta x$ diffus reflektiert, also ist $-\Delta J = \alpha J \Delta x + \beta J \Delta x$; $e^{-kx} = q$ wir als den Transmission coefficienten oder Durchlässigkeits coefficienten bezeichnet.

Außerdem beobachten wir, wie bei den Lichtstrahlen, die Erscheinungen der Beugung u. Interferenz. Diese donalionsstrahlen wie den Wärmestrahlen zukommenden Erscheinungen finken uns dazu die Strahlen als schwingende Bewegungen, als Energie in schwingender Form zu betrachten. Wir werden daher sowohl eine Amplitude als eine Wellenlänge zu unterscheiden haben! Durch die Amplitude wird die Intensität der Wärme bedingt, durch die Wellenlänge aber die Qualität der Strahlung. Es besteht nun eine einfache Beziehung zwischen Wellenlänge u. Brechbarkeit: Je grösser die Brechbarkeit um so grösser um so kleiner ist die Wellenlänge, es werden somit die kurzwelligen

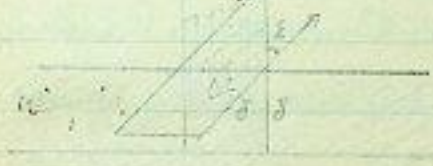
Lambert'sche Satz.

Strahlen am stärksten gebrochen worden. Im Wesen sind also alle Strahlungsrichtungen einander gleich.

Wir wollen jetzt um einen Schnitt weitergehen u nun einen strahlenden Körper betrachten. Wir kommen sodann zu einer neuen Eigenschaft der Wärmestrahlen. Wir nehmen einen heißen Körper u. grenzen auf ihm eine größere Fläche ab. In der Richtung zum Flächenelement wird nun vielmehr ausgestrahlt als in jeder anderen Richtung; u. zwar ist gefunden worden, dass je schiefere die Ausstrahlungsrichtung ist desto weniger ausgestrahlt wird.

Nachdem Lambert'schen Satz nimmt nun die Strahlung proportional dem $\cos \epsilon$ ab, wobei ϵ den Winkel bedeutet, welchen die Richtung mit der Normalen einschließt. Eine Erklärung dieses Gesetzes hat nun Fourier zu geben versucht. Er sagt das nicht allein die Punkte der Oberfläche eines Körpers strahlen, sondern auch die Punkte im Inneren, somit der ganze Körper u. zwar dürfen wir nicht zu tief in den Körper eindringen, weil sonst in einer gewissen Schichte die ganze Strahlung vom inneren Körper absorbiert wird. Wir können also sagen das es eine gewisse Oberflächenschichte von bestimmter Dicke gibt, welche wir beim Körper als strahlend betrachten müssen. Wir müssen nun diese Schichte in strahlende Punkte zerlegen; von den Punkten an der Oberfläche tritt gar keine

Schwächung ein. Bei den andern Punkten in dieser Oberflächenschichte müssen wir eine Schwächung der Strahlung annehmen, weil sie durch einen Teil der Schichte hindurchmüssen. Addieren wir dann über alle Strahlungen der einzelnen Punkte so erhalten wir die Strahlung des ganzen Körpers. Wir nehmen nun Einfachheit halber an wir hätten es mit einem Körper zutun der durch eine Ebene begrenzt ist. Δf sei ein Flächenelement deren Strahlung wir untersuchen wollen. Sei die Dicke jener Schichte, aus der gerade noch ein Strahl herausringen kann. Wäre δ liege als δ , das Strahl zwar auch, allein die ganze Strahlung wird von der Schichte δ absorbiert oder diffus reflektiert. Betrachten



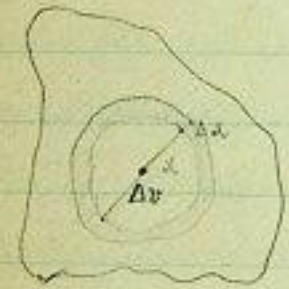
wir die senkrechte Strahlung so sehen wir das alle Punkte im Prisma $\Delta f \delta$ sind, als Strahlen ^{zu Punkten} zu betrachten sind.

Betrachten wir jetzt die schiefe Strahlung unter dem Winkel ϵ . Die senkrechte Strahlung verhält sich zur schiefen Strahlung wie die Anzahl der strahlenden Punkten in beiden Fällen oder was gleichbedeutend ist wie die Volumina der beiden strahlenden Prismen, also wie $\Delta f \delta : \Delta f \delta \cos \epsilon$ tritt also bei schiefen Bestrahlung ein Schwächung der Strahlung auf u. sie nimmt mit $\cos \epsilon$ ab. Die Erfahrung lehrt nun das das nicht immer

Fourier'sche Ableitung

richtig ist. Betrachten wir nämlich die ~~ausstrahlenden~~ Wärmestrahlen einer Glasplatte, so stimmt es nicht. Wir wollen daher die Fourier'sche Betrachtung etwas klarer durchführen.

Wir betrachten im strahlenden Körper ein Volumenelement Δv u. wollen von diesem die Strahlung untersuchen. Die Strahlung nennen wir $\Sigma \Delta v$, sei somit dem Δv proportional. Gehen wir um ein gewisses Stück Δx von Δv hinaus u.



schlagen um Δv nunmehr eine Kugel mit dem Radius x , so wie die Gesamtstrahlung insoweit sie nicht von der Kugel absorbiert worden ist, der ganzen Kugeloberfläche zuzugute kommen. Wir wollen die Strahlung welche auf der Kugeloberfläche ist mit Σ bezeichnen, außerdem wissen wir dass $\Sigma < \Sigma \Delta v$ ist. Gehen wir nun um ein Stück Δx weiter u. schlagen eine Kugel vom Radius $x + \Delta x$ so findet wie wir wissen auf der Strecke Δx eine Schwächung statt, auf der grossen Kugeloberfläche werden wir eine Strahlung $\Sigma - \Delta \Sigma$ haben. Auch wissen wir dass $-\Delta \Sigma = K \Sigma \Delta x$ ist, daher ist $\lim_{\Delta x} \frac{\Delta \Sigma}{\Delta x} = \frac{d\Sigma}{dx} = -K \Sigma$ oder $\Sigma = \Sigma \Delta v e^{-Kx}$.

Die Intensität auf der Kugel x ist somit $J = \frac{e^{-Kx}}{4x^2} \Sigma \Delta v$. Es fragt sich nun was kommt hinaus? Wie gross ist die Strahlung in irgend einem

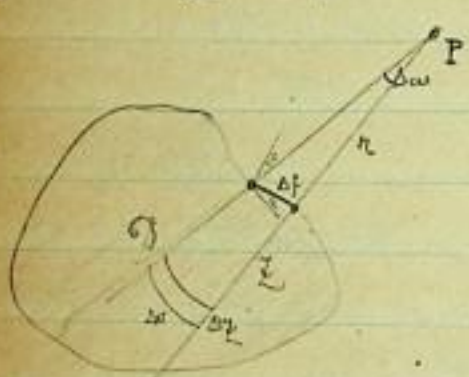
Punkte aussenhalb oder was geht durch ein Oberflächen element hindurch. Wir haben die Strahlung des Punktes A betrachtet, solange wir uns im



Körper selbst befanden. Wir haben dafür die obere Formel gefunden. Dieselbe Formel gilt auch richtig, wenn wir uns auf der Oberfläche des Körpers befinden, also im Punkte B. Nennen wir die Entfernung $AB = x_1$, so haben wir $J_1 = \frac{\Sigma \Delta v}{4x_1^2} e^{-Kx_1}$. Dieses gilt pro Flächeneinheit. Betrachten wir in B ein

Flächenelement u. nennen den Öffnungswinkel des Flächenelementes im Bezug auf A, $\Delta \omega$, so ist die Grösse des Flächenelementes $x_1^2 \Delta \omega$ oder es ist die Strahlung durch dieses Flächenelement $\frac{\Sigma \Delta v}{4\pi} e^{-Kx_1} \Delta \omega$. Setzen wir nun ausserhalb des Körpers kein Medium voraus, oder wenigstens ein Medium von ausserordentlich grosser Durchlässigkeit so bleibt die Strahlmenge gleich, da keine Schwächung eintritt. Die Strahlmenge des Flächenelementes $x_1^2 \Delta \omega$ fällt aber jetzt auf die Fläche $(x_1 + r)^2 \Delta \omega$. Die Strahlmenge pro Flächeneinheit im Punkte P oder die Strahlungsintensität in P ist nun nur $J = e^{-Kx_1} \frac{\Sigma \Delta v \Delta \omega}{4\pi} \frac{1}{(x_1 + r)^2 \Delta \omega}$ oder $J = \frac{\Sigma \Delta v}{4\pi} \frac{e^{-Kx_1}}{(x_1 + r)^2}$. So gross ist somit die Strahlung welche vom Volumenelement Δv herrührt.

Wir gehen jetzt zur eigentlichen Aufgabe über. Wir greifen ein Flächenelement Δf heraus u. betrachten einen aussenhalb des Körpers liegenden Punkt P. Es fragt sich wie gross die Strahlung ist, welche von Flächenelement Δf herrührt ist. Beschreiben wir mit P als Spitze und Δf als Basis einen Kegel u. setzen ihn im Körper fort u. bezeichnen ein Volumenelement im Abstände z von Δf mit Δv , so ist $\Delta v = (z+r)^2 \Delta \omega \Delta z$. Die Strahlung



lung welche von Δv herrührt ist nun $\frac{G(r+z)^2}{4\pi} \Delta \omega \Delta z \frac{e^{-Kz}}{(r+z)^2} = \frac{G \Delta \omega \Delta z}{4\pi} e^{-Kz}$

Das ist die Strahlungsintensität im Punkte P, welche von Δv herrührt. Betrachten wir jetzt die Gesamtstrahlung des Kegels auf P, so ist dieselbe gleich $\frac{G \Delta \omega}{4\pi} \int e^{-Kz} \Delta z$ wenn wir mit D die Dicke des ganzen Körpers bezeichnen. Das gibt

nur für $J = \frac{G \Delta \omega}{4\pi K} (1 - e^{-KD})$

Es ist nun die Projektion von Δf auf die Kugel mit dem Radius r , also $\Delta f \cos \epsilon = r^2 \Delta \omega$ also $\Delta \omega = \frac{\Delta f \cos \epsilon}{r^2}$. Wir erhalten somit für $J = \frac{G \Delta f \cos \epsilon}{4\pi r^2 K} (1 - e^{-KD})$. Wenn nun D sehr gross ist, das heisst der Körper sehr dick oder auch K sehr

gross so verkleinert nahezu $-e^{-KD}$ u. wir haben das früher durch Überlegung abgeleitete Lambert'sche Gesetz. Wenn aber D nicht gross ist, so haben wir eigentlich $-e^{-KD}$ nicht zu berücksichtigen u. deshalb stimmt es in Experimenten nicht immer, wenn man die Strahlungsintensität einer um $\cos \epsilon$ gegen den betrachteten Punkt geneigten Fläche als $J \cos \epsilon$ berechnet. Schreiben wir nun für $\frac{G}{4\pi K} (1 - e^{-KD}) = \mathcal{O}$ so ist unser entwickeltes Gesetz ausgedrückt durch die Formel

$$J_p = \mathcal{O} \frac{\Delta f}{r^2} \cos \epsilon$$

Das \mathcal{O} ist eigentlich, wenn wir seine ursprüngliche Bedeutung berücksichtigen, keine Konstante, sondern hängt von D d.h. von der Dicke des betrachteten Körpers ab. Berücksichtigen wir uns aber mit dicken Körpern so können wir sie als eine Konstante nehmen betrachten, da wir dadurch die Rechnung dadurch eine wesentlich einfachere Gestalt annehmen.
