

## 8. *Der elektrisch geglühte „schwarze“ Körper; von O. Lummer und F. Kurlbaum.*

(Mitteilung aus der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt.)

Wir haben seinerzeit in den Verhandlungen der Physikalischen Gesellschaft zu Berlin eine kurze Beschreibung des von uns construirten *elektrisch geglühten* absolut schwarzen Körpers gegeben.<sup>1)</sup> Nachdem sich diese Construction jahrelang bewährt hat und die mit diesem Körper erhaltenen Resultate als die der *schwarzen* Strahlung anerkannt worden sind, möchten wir, um den mancherlei Anfragen gerecht zu werden, eine ausführliche Beschreibung dieses „schwarzen“ Körpers geben.

Nach einer Folgerung Kirchhoff's aus seinem berühmten Gesetze von der Absorption und Emission des Lichtes ist im Innern eines Hohlraumes von gleichtemperirten Wänden die Strahlungsdichtigkeit dieselbe, als ob die Wände absolut schwarz im Sinne Kirchhoff's wären.

Um daher die schwarze Strahlung dem Experimente zugänglich zu machen, braucht man nur einen Hohlraum aus undurchlässiger Masse auf überall gleiche Temperatur zu bringen und seine Strahlung durch eine kleine Oeffnung nach aussen gelangen zu lassen.<sup>2)</sup> Auf diese Weise gelang es nachzuweisen, dass die Gesamtstrahlung des absolut schwarzen Körpers thatsächlich proportional der *vierten* Potenz der absoluten Temperatur fortschreitet.<sup>3)</sup>

Für niedere Temperaturen ist die Verwirklichung des schwarzen Körpers relativ einfach, da man leicht doppelwandige Gefäße construiren kann, bei denen das innere, in Gestalt einer Hohlkugel, durch ein Rohr mit der äusseren Luft com-

1) O. Lummer u. F. Kurlbaum, Verhandl. d. Physik. Gesellsch. zu Berlin 17. p. 106—111. 1898.

2) W. Wien u. O. Lummer, Wied. Ann. 56. p. 451—456. 1895.

3) O. Lummer u. E. Pringsheim, Wied. Ann. 63. p. 395—410. 1897 und Ann. d. Phys. 3. p. 159—160. 1900.

municirt und deren Zwischenraum durch den Dampf siedenden Wassers, durch Eis, feste Kohlensäure, flüssige Luft etc. auf überall gleichmässiger Temperatur erhalten werden kann. Natürlich wird man das Innere des strahlenden Gefässes künstlich mittels Lampenrusses oder Platinchlorids schwärzen, um der schwarzen Strahlung trotz der notwendigen Oeffnung so nahe als möglich zu kommen.

Zur Erreichung höherer Temperaturen war man auf Salpeterbäder angewiesen, welche bestenfalls noch bei  $700^{\circ}\text{C}$ . anwendbar sind. Darüber hinaus musste man zum Chamotteofen greifen, der vermittelt Kohle- oder Gasfeuerung geheizt wird. Abgesehen davon, dass man über eine Temperatur von  $1400^{\circ}\text{C}$ . kaum hinauskommt, stellen sich bei dieser Art der Feuerung zwei wesentliche Schwierigkeiten ein.

Einmal ist es selbst mit Hülfe eines doppelwandigen Chamotteofens unmöglich, im strahlenden Hohlkörper eine vollkommen gleichmässige Temperaturverteilung zu erreichen; ferner verursacht die intensive Gasfeuerung mancherlei Uebelstände und bringt starke Temperaturschwankungen mit sich, die störend auf die empfindlichen bolometrischen wie galvanometrischen Messapparate einwirken.

Deshalb stellten wir uns die Aufgabe, einen schwarzen Körper zu construiren, bei dem der elektrische Strom als Heizquelle dient und der als fertiger Apparat in handlicher Form jederzeit gebrauchsfähig ist. Nach verschiedenen Vorversuchen haben wir diesem „*elektrisch geglühten*“ schwarzen Körper die aus den Figuren ersichtliche Form gegeben. Seine Herstellung ist folgende:

Ein etwa 0,01 mm dickes Platinblech wird zu einem Cylindermantel von 40 cm Länge und 4 cm Durchmesser geformt, indem die Ränder des Bleches im Knallgasgebläse auf einer Breite von 1 mm zusammengeschweisst werden. Man bedient sich hierzu eines passenden Messingrohres als Unterlage. Um den Strom gleichmässig zu verteilen, sodass die Stromlinien parallel der Cylinderaxe verlaufen, sind die beiden Enden des Platinrohres ringsum durch angeschweisste dickere Platinbleche verstärkt. An diese dickeren Ringe werden diametral gegenüber die Zuleitungsbleche *b* (Fig. 3) geschweisst, welche zwischen die Klemmböcken des Statives geklemmt

werden, denen der elektrische Strom durch dicke Kabel zugeführt wird.

In diesen Heizmantel aus dünnem Platinblech passt eng anschliessend das innere der beiden in Fig. 1 gezeichneten Rohre aus schwer schmelzbarer Masse, welches die schwarze Strahlung liefern soll.

Dieses von der Kgl. Porzellanmanufactur in Charlottenburg hergestellte Rohr von 2 mm Wandstärke trägt fest eingebrennt in seiner Mitte eine Querwand 7 und eine Reihe von Diaphragmen 1—6, von denen das letzte 6 nahe der Querwand sitzt. In diesem von 6 und 7 gebildeten Hohlraum befindet sich kurz vor der Querwand die Lötstelle des Thermoelementes nach Le Chatelier. Die Drähte des Elementes

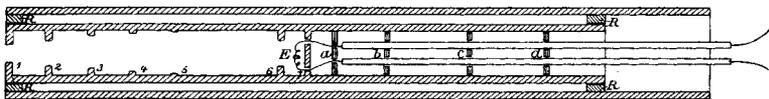


Fig. 1.

gehen zunächst durch enge Oeffnungen der festen Querwand und unmittelbar dahinter durch zwei Oeffnungen einer beweglichen Wand, welche einen solchen Abstand voneinander haben oder so orientirt sind, dass jedenfalls eine directe Durchsicht vermieden ist. Von dieser beweglichen Wand an werden die Drähte durch enge Röhren getragen, welche ebenfalls aus schwer schmelzbarer Masse gefertigt sind und auf welche eine Reihe von losen Querwänden *a*, *b*, *c*, *d* geschoben werden.

Damit diese Wände sich nicht gegeneinander verschieben, wird hinter jeder über das Porcellanröhren ein Platinröhren von geeigneter Länge geschoben.

Das Innere des Strahlungsrohres ist mittels einer Mischung aus Chrom-Nickel- und Kobaltoxyd geschwärzt, welche Schwärzung selbst Temperaturen über 1500° C. Stand hält.

Der Platinheizmantel ist so viel länger als das Strahlungsrohr, dass das hintere Ende flach zusammengedrückt, das vordere Ende aber conisch verjüngt werden kann, um noch gerade der aus dem vordersten engsten Diaphragma 1 austretenden Strahlung freien Durchgang zu gestatten (vgl. Fig. 1).

Zum Schutz gegen den Wärmeverlust durch Ausstrahlung ist über das Platinrohr an beiden Enden eng anliegend je ein Ring *R* (Fig. 1) geschoben und über diese Ringe wiederum ein passendes Rohr aus feuerfester Masse, sodass zwischen beiden Rohren ein Hohlraum entsteht. Zum weiteren Schutz ist entweder dieses Ueberstülprohr mit Asbestpappe umgeben oder noch mit einem zweiten Ueberstülprohr und Ringen aus feuerfester Masse versehen, sodass ein zweiter Luftraum entsteht.

Diese doppelte Lufthülle ist erforderlich, will man den Körper mit einem Strom von weniger als 100 Amp. Stärke auf die höchste zulässige Temperatur von  $1520^{\circ}$  C. bringen. Oberhalb dieser Temperatur beginnt auch die von der Kgl. Porzellanmanufactur eigens zu diesem Zwecke verwandte Masse weich zu werden. Auch fängt diese Masse dann an leitend zu werden, sodass das Thermoelement beim Wenden des Heizstromes einen Unterschied zeigt, der bei  $1500^{\circ}$  kaum merklich ist, bei  $1550^{\circ}$  etwa  $25^{\circ}$  erreicht.

Aus Figg. 2 und 3 ist die Montirung und Stromzuführung dieses schwarzen Körpers (*K*) ersichtlich. Die mit Stell-schrauben versehene Schieferplatte trägt zwei Paar Klemmbacken aus Messing und zwei den schwarzen Körper haltende Schieferstützen. Die Einrichtung der Klemmbacken ist aus der Fig. 2 genügend zu erkennen. Fig. 3 zeigt den montirten schwarzen Körper noch einmal, von vorn gesehen, sodass man in die strahlende Oeffnung blickt. Ausser den Klemmvorrichtungen (*a*) für das Platinheizrohr und denjenigen (*c*) für die Stromzuführungen hat jedes Paar von Klemmbacken noch eine Klemme *s* (Figg. 2 und 3), um die Spannung an den Enden des Heizrohres messen und constant halten zu können.

Die Enden des Thermoelementes gehen mit den ange-löteten Kupferdrähten in das mit Filz umkleidete doppelwandige Eisgefäss *G*, aus dem die Kupferdrähte zum Pyrometer *P* führen.

Die grosse Länge ist dem schwarzen Körper gegeben worden, weil infolge der starken Wärmeableitung an den Enden des Körpers doch nur das mittlere Stück auf gleichmässiger Temperatur gehalten werden kann. Dies mittlere Stück wird allein als Strahlungsquelle benutzt und demgemäss sind die Blenden angeordnet und ihre Oeffnungen gewählt. Der Durchmesser der strahlenden Blende 1 (Fig. 1) beträgt nur 1 cm.

Ausserdem wird vor diese Oeffnung ein wassergespültes Diaphragma (die Messblende) mit noch engerer Oeffnung gestellt. Bei richtiger Justirung unseres in etwa 30 cm Entfernung befindlichen Flächenbolometers gelangen zu ihm nur Strahlen von dem hinter der Blende 5 (Fig. 1) liegenden Hohlraum, während die Blenden 1—5 vom Bolometer aus nicht gesehen werden können.

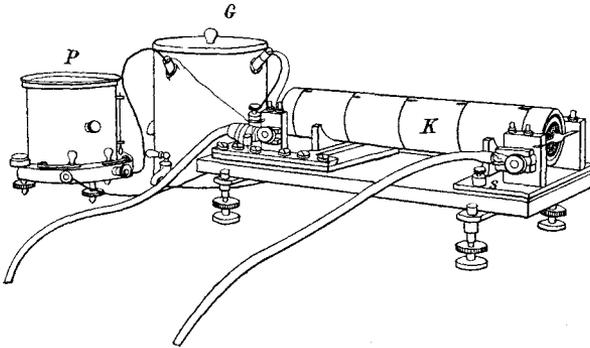


Fig. 2.

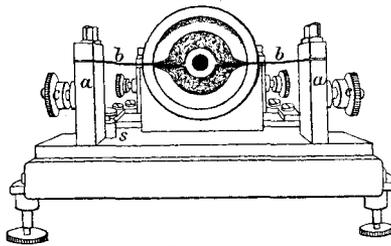


Fig. 3.

Die Diaphragmenreihe 1—5 schützt die wirksamen Teile des schwarzen Körpers sowohl vor den heftigen Luftcirculationen an der Oeffnung, wie vor der Ausstrahlung zu den kälteren Teilen. Noch besser ist die strahlende Querwand 7 gegen beide Uebelstände durch die dahinter befindlichen Querwände *a*, *b*, *c* etc. geschützt.

Die erreichte Temperaturgleichheit des allein zur Strahlung beitragenden Hohlraumes ist eine überraschende. Zur Beurteilung der Temperaturverteilung bedient man sich mit Vor-

teil der *Helligkeitsverteilung* im Innern des strahlenden Hohlraumes.

Ehe wir zu diesem in seiner Anordnung immerhin complicirten Körper übergangen, benutzten wir einfach den Heizcylinder aus blankem Platin direct als strahlenden Körper, indem wir eine Querwand aus Porzellan einschoben und die Enden des Platincylinders, wie oben beschrieben, vorn zu einer engen Oeffnung und hinten ganz schlossen. Erhält man auch hier eine der schwarzen ähnliche Strahlung, so nimmt man, durch die Messöffnung in den Hohlcyliner sehend, doch noch grosse Helligkeitsdifferenzen wahr, weil das Platin stark reflectirt. Sobald man aber das Platinrohr innen mit einer Lösung von Eisensulfat bestreicht, welches sich beim Erhitzen in Eisenoxyduloxyd verwandelt, verschwinden auch hier die Helligkeitsdifferenzen fast vollkommen, und man glaubt in einen mit Nebel angefüllten Raum zu blicken.

Das Auge vermag eben Gegenstände nur mit Hülfe von Helligkeits- oder Färbungsdifferenzen wahrzunehmen; wo beide fehlen, hört für das Auge das Trennungsvermögen auf.

Um dieses photometrische Kriterium zur Beurteilung der Temperaturgleichheit im wirksamen Hohlraum unseres schwarzen Körpers voll und ganz auszunützen, haben wir kurz vor der strahlenden Querwand 7 noch die Blende 6 angebracht, gleichzeitig dadurch *einen Hohlraum im Hohlraum* bildend. Hebt sich im stationären Zustande die Blende 6 weder von der Rückwand 7 noch vom cylindrischen Teile des Rohres zwischen 5 und 6 ab, so darf die Temperaturgleichheit als eine vollkommene angesehen werden, da die photometrische Helligkeit mit einer sehr hohen Potenz der absoluten Temperatur fortschreitet.

Sind  $H_1$  und  $H_2$  die photometrischen Helligkeiten eines blanken Platinbleches bei den zugehörigen absoluten Temperaturen  $T_1$  und  $T_2$ , wobei stets  $T_2 - T_1$  relativ klein sei, so kann

$$\frac{H_1}{H_2} = \left( \frac{T_1}{T_2} \right)^x$$

gesetzt werden, sodass  $x$  die gesuchte Potenz für das kleine benutzte Temperaturintervall ist. Wir haben so, bei verschiedenen Temperaturen  $T$  beginnend, auf photometrischem Wege die zu benachbarten Temperaturen gehörigen Hellig-

keiten bestimmt und die in der folgenden Tabelle angegebenen Werte der Potenz  $x$  gefunden.<sup>1)</sup>

$T$ abs.	900	1000	1100	1200	1400	1600	1900
$x$	30	25	21	19	18	15	14

Aus diesem rapiden Anwachsen der photometrischen Helligkeit mit der Temperatur geht hervor, dass die Beurteilung mit dem blossen Auge genügt, um aus der Helligkeitsauf die Temperaturverteilung im strahlenden Hohlraum zu schliessen.

Thatsächlich verläuft die Erscheinung wie folgt. Wird der Körper elektrisch angeheizt, so sieht man bei beginnender Rotglut anfangs sowohl das Thermoelement wie auch das „kritische“ Diaphragma 6 scharf und deutlich sich vom Hintergrund der Cylinderwand abheben. Je näher man aber dem stationären Zustand kommt, um so kleiner werden die Helligkeitsdifferenzen, und im stationären Zustand verschwinden sie *vollkommen*.

Hand in Hand damit geht folgende Erscheinung. Anfangs hat man ein ganz richtiges Urteil über die Tiefe des Rohres von 1—7 und alle einzelnen Teile heben sich perspectivisch und plastisch vom Hintergrund los. Sobald aber der stationäre Zustand und damit die Helligkeitsgleichheit erreicht ist, scheinen die vorderen Diaphragmen 1—5 an Tiefenabstand zugenommen zu haben, und die Hinterwand 7 scheint bis nach 5 vorgerückt zu sein. Bei manchen Temperaturen, denn nicht für alle ist das optische Phänomen gleich gut, kann man auch das Diaphragma 5 gerade nur eben noch vom diffus leuchtenden Hintergrund unterscheiden.

Es ist somit erwiesen, dass der strahlende Hohlraum dieses elektrischen schwarzen Körpers gleichmässige Temperatur hat, also auch die wahre schwarze Strahlung liefert. Ferner aber kann man sicher sein, dass das Thermoelement die Temperatur seiner Umgebung und damit die der schwarzen Strahlung anzeigt, welche man bei der Untersuchung benutzt.

<sup>1)</sup> O. Lummer und F. Kurlbaum, Verhandl. d. Deutsch. Physik. Gesellsch. 2. Nr. 8. p. 89—92. 1900.

Trotz der grossen Sicherheit, mit welcher man aus der Helligkeitsgleichheit auf die Temperaturgleichheit und aus dieser wiederum auf die Schwärze der strahlenden Teile schliessen kann, wurde doch noch direct die Strahlung dieses cylindrischen Hohlraumes mit derjenigen eines kugelförmigen Hohlraumes verglichen, der in einem Salpeterbade bis zu nahe  $900^{\circ}$  abs. gleichmässig erhitzt werden konnte. Der Versuch ergab, dass nicht nur die Gesamtstrahlung beider Körper identisch ist, sondern dass auch die Teilstrahlungen im Spectralgebiet bis zu Wellen von  $18\mu$  und darüber<sup>1)</sup> miteinander übereinstimmten.

Wir müssen daher die von Hrn. Paschen<sup>2)</sup> und namentlich von Hrn. H. Wanner<sup>3)</sup> gegen den von uns construirten elektrischen schwarzen Körper erhobenen Einwände als unbegründet zurückweisen. Paschen und Wanner haben ihrem schwarzen Körper ganz andere Dimensionen gegeben und ausserdem die als Kriterium der gleichmässigen Temperatur und Schwärzung so wichtige Blende 6 (Fig. 1) fortgelassen. Ihre Erfahrungen beziehen sich also nicht auf unseren Körper und wir können ihre Versuche nicht als Prüfung unseres schwarzen Körpers anerkennen. Mindestens sehen wir keinen Widerspruch in der jetzt als richtig erwiesenen Annahme, dass der beschriebene Körper die schwarze Strahlung vollkommener liefert als der von ihnen nachgebildete.

Charlottenburg, 11. Juni 1901.

---

1) Vgl. O. Lummer u. E. Pringsheim, Verhandl. d. Deutsch. Physik. Gesellsch. 2. p. 170. 1900.

2) F. Paschen, Sitzungsber. d. k. Akad. d. Wissensch. zu Berlin p. 4 ff. 1899.

3) H. Wanner, Ann. d. Phys. 2. p. 149. 1900.

(Eingegangen 13. Juni 1901.)

---