

# Karl Schwarzschild (1873–1916)

Ein Pionier und Wegbereiter  
der Astrophysik

Herausgegeben von Klaus Reinsch  
und Axel D. Wittmann



Universitätsverlag Göttingen



Klaus Reinsch und Axel D. Wittmann (Hg.)  
Karl Schwarzschild (1873-1916)

Dieses Werk ist lizenziert unter einer  
[Creative Commons  
Namensnennung - Weitergabe unter gleichen Bedingungen  
4.0 International Lizenz.](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)



erschienen im Universitätsverlag Göttingen 2017

---

Klaus Reinsch und  
Axel D. Wittmann (Hg.)

Karl Schwarzschild  
(1873-1916)

Ein Pionier und Wegbereiter  
der Astrophysik



Universitätsverlag Göttingen  
2017

## Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

### *Anschrift der Herausgeber*

Dr. Klaus Reinsch  
Dr. Axel D. Wittmann  
Georg-August-Universität Göttingen  
Institut für Astrophysik  
Friedrich-Hund-Platz 1  
D-37077 Göttingen  
E-Mail: [reinsch@astro.physik.uni-goettingen.de](mailto:reinsch@astro.physik.uni-goettingen.de)

Dieses Buch ist auch als freie Onlineversion über die Homepage des Verlags sowie über den Göttinger Universitätskatalog (GUK) bei der Niedersächsischen Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen (<http://www.sub.uni-goettingen.de>) erreichbar. Es gelten die Lizenzbestimmungen der Onlineversion.

Satz und Layout: Klaus Reinsch

Umschlaggestaltung: Jutta Pabst

Titelabbildungen, vorne:

„Schwarzschild im Talar“ von Robert Bein, Fotosammlung Institut für Astrophysik Göttingen  
Schwarzschild mit Mitarbeitern und Studenten 1903, vgl. Abb. 15 S. 16  
Sternhaufen der Plejaden, Ausschnitt aus Abb. 2 S. 34

Titelabbildung hinten:

Flashspektrum der Sonne, aus Schwarzschild 1906, Abhandlungen der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Neue Folge, 5(2), S. 3-73

© 2017 Universitätsverlag Göttingen

<http://univerlag.uni-goettingen.de>

ISBN: 978-3-86395-295-2

## Vorwort

Karl Schwarzschild war einer der herausragenden und prägenden Astronomen in Deutschland. Geboren am 9. Oktober 1873 als Sohn einer angesehenen jüdischen Familie in Frankfurt am Main, studierte er in Straßburg und in München, wo er sich 1899 habilitierte. Im Jahre 1901 erhielt er den Ruf auf die Stelle des Direktors der Göttinger Sternwarte.

Durch Karl Schwarzschild, dessen mathematische und physikalische Begabung schon in jungen Jahren hervorgetreten war, wandelten sich die Arbeitsgebiete der Göttinger Sternwarte von der bisher eher klassischen Astronomie zur Astrophysik. Insbesondere wurde durch Schwarzschild auch die Sonnenphysik in Göttingen als neues Forschungsgebiet begründet. Im Spätherbst 1909 wechselte Karl Schwarzschild unter Mitnahme seines Assistenten Ejnar Hertzsprung an das 1874 gegründete Astrophysikalische Observatorium nach Potsdam. Als dessen Direktor lieferte er von 1910 bis zu seinem Tode am 11. Mai 1916 viele weitere entscheidende Beiträge zur Astrophysik. Er gilt daher weltweit als einer der bedeutendsten Mitbegründer der Astrophysik.

In den rund 150 wissenschaftlichen Publikationen seines allzu kurzen Lebens hat Karl Schwarzschild wesentliche Beiträge zur photographischen Photometrie, zur Physik der Sternatmosphären, zur Physik der Sonne, zur Himmelsmechanik, zur Stellarstatistik, zur astronomischen Optik und nicht zuletzt zur Kosmologie und zur Relativitätstheorie geliefert.

Karl Schwarzschild wurde, seinem letzten Willen entsprechend, am 16. Mai 1916 auf dem Stadtfriedhof in Göttingen beigesetzt. Sein 1912 geborener Sohn Martin Schwarzschild trat später in seine Fußstapfen und wurde einer der berühmtesten Astrophysiker der USA. Ihm verdankt die Göttinger Universität den größten Teil des Nachlasses von Karl Schwarzschild in ihrem Bestand.

Aus Anlass und zum Gedenken seines 100. Todestages fand am 19. Mai 2016 in seiner früheren Wirkungsstätte, der heutigen Historischen Sternwarte, in Göttingen das Fachkolloquium „Karl Schwarzschild (1873–1916) – ein Wegbereiter der Astrophysik“ statt, das vom Institut für Astrophysik der Universität Göttingen (IAG) veranstaltet wurde und an dem 35 geladene Gäste teilnahmen. Nach der Begrüßung durch Prof. Dr. Stefan Dreizler (IAG) beleuchteten Dr. Adriaan Raap (Stuttgart), Dr. Axel Wittmann (Göttingen), Prof. Dr. Dieter B. Herrmann (Berlin), Dr. Else Starkenburg (Potsdam) und Prof. Dr. Jens Niemeyer (Göttingen) biografische und wissenschaftliche Facetten aus dem Leben und vielseitigem Wirken von Karl Schwarzschild. Das Kolloquium wurde von Dr. Sonja Schuh (Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung Göttingen) moderiert.

Vom 8. bis zum 29. September 2016 fand im Foyer der Fakultät für Physik eine Ausstellung zu Ehren von Karl Schwarzschild unter dem gleichen Titel wie das Kolloquium statt. In der Ausstellung wurden auf 16 Postern die Biografie und der wissenschaftliche Werdegang von Schwarzschild dargestellt. Diese wurden ergänzt durch Urkunden und Dokumente aus seinem in der Niedersächsischen Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen verwahrten

Nachlass sowie durch wissenschaftliche Geräte aus der Sammlung historischer Gegenstände am Institut für Astrophysik Göttingen. Die Ausstellung wurde mit einem Grußwort von Prof. Dr. Wolfram Kollatschny (geschäftsführender Direktor des IAG) und einem Fachvortrag von Dr. Harald Nicklas (Göttingen) eröffnet.

Die in schriftlicher Form ausgearbeiteten und zum Teil erweiterten Vorträge des Kolloquiums sowie der Beiträge zur Ausstellung sind in diesem Band, ergänzt durch ein Verzeichnis der Teilnehmer des Kolloquiums, ein Verzeichnis der Schriften Karl Schwarzschilds und einen Tafelanhang mit Fotos und Beschreibungen der in der Ausstellung gezeigten Instrumente, abgedruckt.

Unser besonderer Dank gebührt Turan Lackschewitz, Dr. Johannes Mangei, Dr. Ignatius Adriaan Raap und Jan C. Watzlawik für die angenehme Zusammenarbeit und tatkräftige Unterstützung bei der Vorbereitung und Organisation des Fachkolloquiums sowie der Ausstellung. Die Teilnahme der auswärtigen Sprecher des Kolloquiums wurde durch die finanzielle Unterstützung der Astronomischen Gesellschaft, der Gauß-Gesellschaft sowie des IAG ermöglicht, wofür wir uns auch an dieser Stelle herzlich bedanken. Den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Universitätsverlags Göttingen danken wir für die stets sehr gute und zielgerichtete Zusammenarbeit bei der Veröffentlichung dieses Bandes.

Schließlich danken wir der Sparkasse Göttingen ganz besonders herzlich, die im Juli 2016 durch eine Karl Schwarzschild gewidmete Spende die Herstellung und die Druckkosten dieses Tagungsbandes wesentlich unterstützt hat.

Göttingen, im Dezember 2016  
Die Herausgeber



## **Inhaltsverzeichnis**

Karl Schwarzschild: Leben, Familie und Forschung – eine Übersicht von A. Raap .....	1
Karl Schwarzschild und die Anfänge der Sonnenphysik in Göttingen von A. D. Wittmann .....	29
Karl Schwarzschild als Entdecker und Förderer von Ejnar Hertzsprung von D. B. Herrmann .....	51
Galaktische Dynamik und Stellarstatistik von Karl Schwarzschild bis heute von E. Starkenburg und M. Steinmetz .....	65
Schwarze Löcher, von Schwarzschilds „Massenpunkt“ bis GW150914 von J. C. Niemeyer .....	73
Karl Schwarzschild – Wegbereiter moderner Teleskopoptik von H. E. Nicklas .....	81
Schriftenverzeichnis von Karl Schwarzschild .....	95
Bildtafeln „Schwarzschild Objekte“ .....	107



## Liste der Teilnehmer

Regina von Berlepsch (Potsdam)  
Erich Bettwieser (Göttingen)  
Klaus Beuermann (Göttingen)  
Luz-Marina Cairós-Barreto (Göttingen)  
Stefan Dreizler (Göttingen)  
Benjamin Giesers (Göttingen)  
Gerrit Grenzebach (Göttingen)  
Dieter B. Herrmann (Berlin)  
Frederic V. Hessman (Göttingen)  
Annemarie Hohl-Müller (Binningen, Schweiz)  
Tim-Oliver Husser (Göttingen)  
Sebastian Kamann (Göttingen)  
Franz Kneer (Göttingen)  
Natalie Krivova (Göttingen)  
Turan Lackschewitz (Göttingen)  
Dirk Lorenzen (Hamburg)  
Andreas Müller (Garching)  
Wolfgang Müller (Göttingen)  
Hans Müller-Fröhner (Benglen, Schweiz)  
Harald Nicklas (Göttingen)  
Jens C. Niemeyer (Göttingen)  
Jutta Pabst (Göttingen)  
Adam Pluta (Göttingen)  
Arnulf Quadt (Göttingen)  
Ignatius Adriaan Raap (Stuttgart)  
Uwe Reichert (Heidelberg)  
Klaus Reinsch (Göttingen)  
Günter Schmahl (Göttingen)  
Ulrich Schmitt (Göttingen)  
Sonja Schuh (Göttingen)  
Else Starkenburg (Potsdam)  
Jan C. Watzlawik (Göttingen)  
Klaus Wilhelm (Northeim)  
Axel D. Wittmann (Göttingen)  
Gudrun Wolfschmidt (Hamburg)



**Abb. 1.** Teilnehmer des Fachkolloquiums „Karl Schwarzschild (1873–1916) – ein Wegbereiter der Astrophysik“ am 19. Mai 2016 vor der Historischen Sternwarte der Georg-August-Universität Göttingen (Foto: G. Wolfschmidt/ K. Reinsch).

Karl Schwarzschild (1873–1916):  
Ein Pionier und Wegbereiter der Astrophysik, 1–28  
Klaus Reinsch und Axel D. Wittmann (Hrsg.)  
© Universitätsverlag Göttingen 2017

## Karl Schwarzschild: Leben, Familie und Forschung – eine Übersicht

Adriaan Raap<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Stuttgart

*E-Mail:* dr.araap@gmail.com

**Zusammenfassung.** Leben und Werk von Karl Schwarzschild werden im Rahmen einer kurzen Biographie beschrieben. Karl Schwarzschild war einer der weltweit bedeutendsten Astronomen und einer der Mitbegründer der Astrophysik. Nach seinem Studium in Straßburg und München habilitierte er sich 1899 in München und wurde 1901 als Professor für Astronomie und Direktor der Sternwarte nach Göttingen berufen. Gegen Ende 1909 wechselte er als Direktor des Astrophysikalischen Observatoriums nach Potsdam. Bei Beginn des ersten Weltkrieges meldete sich Schwarzschild wegen seiner jüdischen Abstammung und aus einer patriotischen Gesinnung heraus freiwillig zum Wehrdienst und diente als Leutnant im Generalstab der Fußartillerie. In dieser Zeit im Felde schrieb er bedeutende Arbeiten zur Relativitätstheorie und zur theoretischen Physik. Dort brach aber auch eine schon lange latent bestehende Autoimmunkrankheit heftig aus, der er am 11. Mai 1916 in Potsdam erlag. Seinem letzten Wunsch entsprechend wurde Karl Schwarzschild in Göttingen beigesetzt.

**Summary.** Life and work of Karl Schwarzschild are described in the form of a short biography. Schwarzschild was one of the famous astronomers and a co-founder of astrophysics worldwide. After studying at Strassburg and Munich he received his 'habilitation' diploma in Munich. In 1901 he was appointed professor of astronomy and director of the University Observatory at Göttingen. In late 1909 he moved to Potsdam where he had been appointed director of the Astrophysical Observatory. At the outbreak of the First World War he voluntarily registered for military service in the German Army. While on serve in Belgium and later in Russia, Schwarzschild wrote some of his most important scientific papers about general relativity. During this time an already latent auto-immune disease broke out, as a consequence of which he died on May 11, 1916 in Potsdam. According to his last will Karl Schwarzschild was buried in Göttingen.

### 1 Die Schwarzschild-Dynastie in Frankfurt am Main

Karl Schwarzschild war das älteste von sieben Kindern<sup>1</sup> einer sehr wohlhabenden jüdischen Familie aus Frankfurt am Main. Der Vater Moses Martin Schwarzschild (1837–1916) war ein beeidigter „Wechselsensal“ (d.h. Börsenmakler) an der Alten Frankfurter Börse in der Gründerzeit, zunächst zusammen mit seinem älteren Halbbruder Emanuel Schwarzschild (1825–1896) am Frankfurter Rossmarkt, später als selbständiger Treuhändler mit einem Sitz

---

<sup>1</sup>Meist wird nur von sechs Kindern berichtet. Dabei wird dann der dritte Sohn Paul, der im Kindesalter an einer Blinddarmentzündung verstarb, übersehen.

am Goetheplatz. Dadurch, dass der Vater „M.M.“, wie er damals in Börsenkreisen genannt wurde, in die Vermögensverhältnissen vieler Frankfurter Familien Einsicht hatte, genoss er besonders in der israelitischen Gemeinde ein hohes Ansehen und wurde oft um Rat gefragt, wenn es beispielsweise bei einer Heirat um die Höhe der Mitgift der Töchter ging.

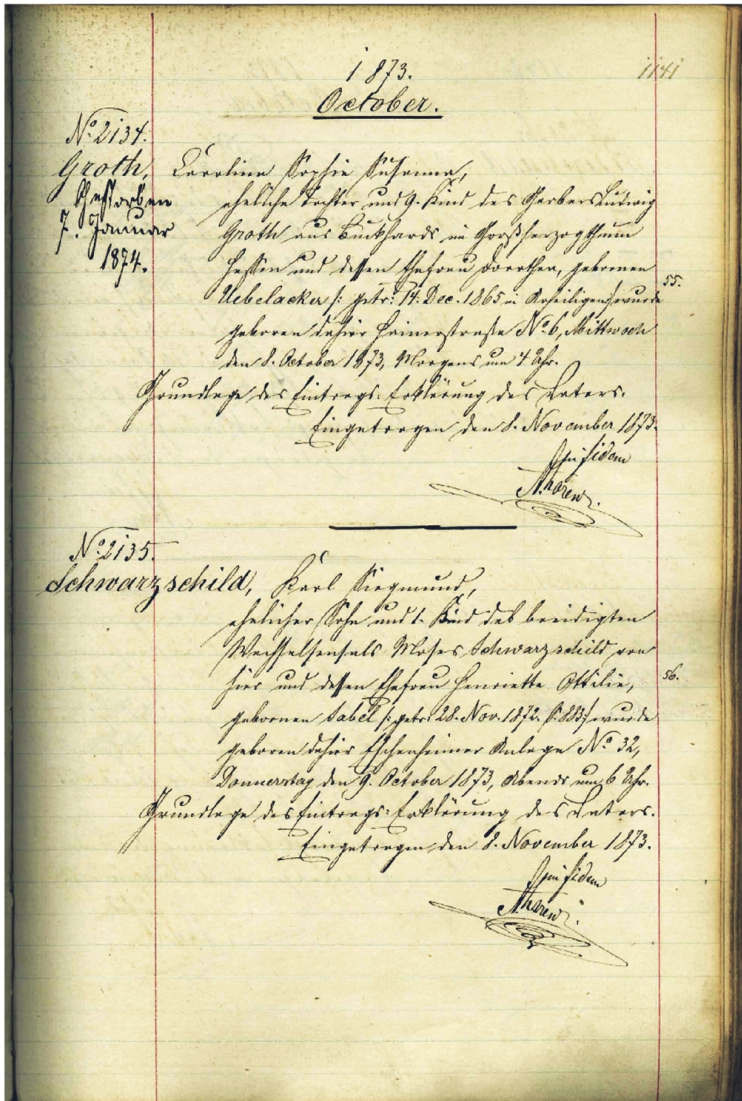
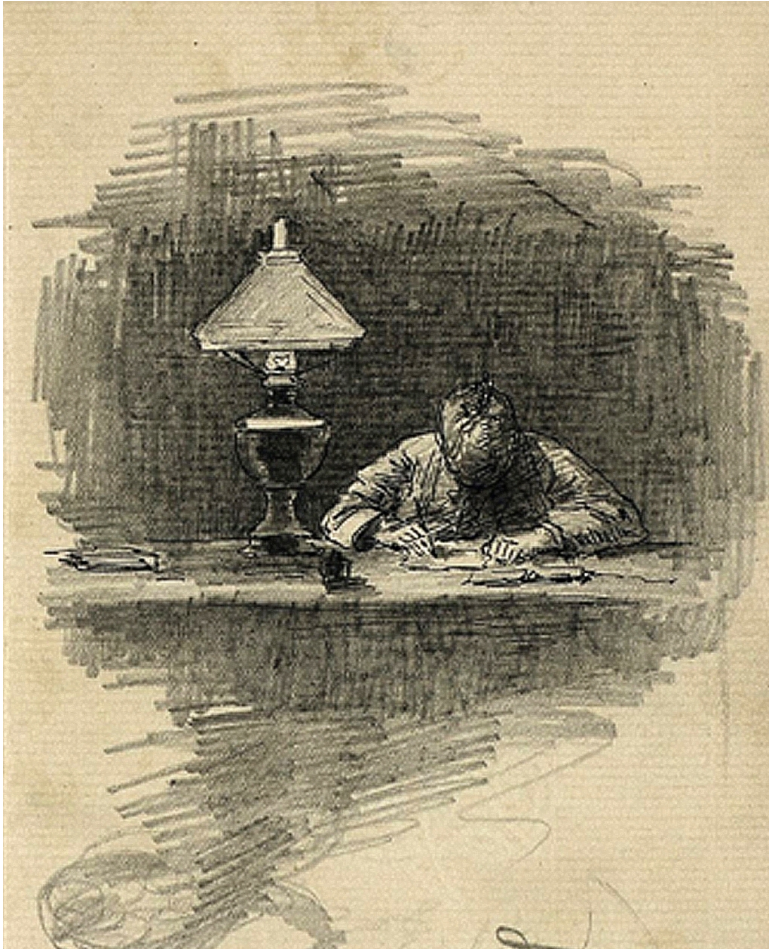


Abb. 1. Blatt aus dem Geburtsregister der Stadt Frankfurt am Main (1873) – No. 2135: „Schwarzschild, Karl Siegmund, ehelicher Sohn und erstes Kind des beeidigten Wechselsensals Moses Schwarzschild von hier und dessen Ehefrau Henriette Ottilie geborene Sabel [:getr. 28 Nov. 1872. S. 883:] wurde geboren dahier Eschenheimer Anlage No. 32, Donnerstag den 9. October 1873, abends um 6 Uhr. Grundlage des Eintrags: Erklärung des Vaters. Eingetragen den 8. November 1873.“

Selber hatte Moses Martin Schwarzschild 1872 eine musikalisch und künstlerisch begabte höhere Tochter Henriette Francisca Sabel-Bechhold (1852–1922) geheiratet. Im darauf folgenden Jahr kam am 9. Oktober 1873 ihr erster Sohn, mit vollständigem Namen Karl Siegmund geheißen, in Frankfurt am Main zur Welt (Abb. 1). Auf ihn folgten zunächst fünf weitere Söhne (Alfred, Paul, Otto, Hermann, Robert), bevor als siebentes und letztes Kind eine Tochter Clara („Clärchen“) geboren wurde. Der dritte Sohn Paul verstarb im Alter von etwa 7 Jahren an einer Blinddarmentzündung, was dazu führte, dass Karl und Alfred einander als Spielkameraden verbunden und von den jüngeren Geschwistern altersmäßig deutlich getrennt waren. Der Zusammenhalt zwischen den beiden ältesten Brüdern hat etwa bis zum Ruf von Karl als Extraordinarius nach Göttingen standgehalten.



**Abb. 2.** Zeichnung von Alfred Schwarzschild vom „Haus an der Leerbachstrasse 10“, einem typischen Haus aus der Gründerzeit. Das Haus wurde im zweiten Weltkrieg infolge der Angriffe alliierter Bomber auf das Zentrum von Frankfurt am Main völlig zerstört.



**Abb. 3.** Karl als Schüler bei der Arbeit. Zeichnung seines Bruders Alfred. (SUB Göttingen, Cod. Ms. K. Schwarzschild, Briefe von und an die Eltern – 907, 1904).

Durch die Aufzeichnungen in den Lebenserinnerungen von Alfred Schwarzschild<sup>2</sup> wissen wir, dass Karl direkt nach seiner Geburt beinahe durch Unterernährung ums Leben gekommen wäre:

*„Karl war, als er zur Welt kam, ein gesundes, aber schwächliches Kind. Die Mutter war in der Säuglingspflege nicht erfahren und es gab allerlei Sorgen und Malheur, bis er selbständig war. Nach der damaligen Sitte durfte Mutter ihre Kinder nicht selbst stillen und wir wurden alle mit Ammen großgezogen. Karls Amme hatte schon lange viel zu wenig Milch, aber, um ihre Stelle nicht zu verlieren, verheimlichte sie es der unerfahrenen Mutter. Karl kam ganz herunter, so dass die Eltern in größter Besorgnis waren, und erst als der Schwindel aufgedeckt war, wurde er unter großen Schwierigkeiten wieder in die Höhe gepöppelt.“*

<sup>2</sup>Schwarzschild, Alfred: *Lebenserinnerungen*, etwa bis 1905 (SUB Göttingen, Cod. Ms. K. Schwarzschild, 24: 1–2).





**Abb. 4.** Frankfurter Rossmarkt um 1900 mit dem Seidenhaus „Schwarzschild-Ochs“ und rechts daneben den Bankgeschäftshäusern der Schwarzschilds, in denen Karls Großmutter Clara Schwarzschild, geb. Bass, bis zu ihrem Tode 1884 wohnte. (Photographie von Max Junghändel, Historisches Museum Frankfurt am Main, Inv.-Nr. C21925, mit freundlicher Genehmigung).

Die Familie Schwarzschild besaß ein Haus mit einem großen Garten und Stallungen für zwei Pferdekutschen und drei Pferde ganz in der Nähe der Alten Frankfurter Oper. Von diesem Gründerzeithaus existiert nur noch eine Zeichnung (Abb. 2) von Karls Bruder Alfred (1874–1948), der später ein ausgezeichneter Portrait- und Genremaler in München wurde. Neben dem damals üblichen Hauspersonal, bestehend aus mehreren Dienstmädchen, welche besonders am Sabbat, wenn die fromme Verwandtschaft zu Besuch kam, für die koschere Küche zu sorgen hatten, gab es für die kinderreiche Familie immer wieder Bedarf an Ammen und Kindermädchen. Die Familie wohnte Parterre und in der Belle Étage. Die oberen Etagen waren vermietet, unter anderem an einen Arzt, und für die Bediensteten.

Die Familie soll ursprünglich vom Niederrhein (Köln) stammen und um 1450 nach Frankfurt am Main übergesiedelt sein. Als Stammvater der Familie Schwarzschild gilt ein gewisser Liebmann Wohl zum Schwarzen Schild, welcher erstmals 1555 in den Frankfurter Steuerregistern vorkommt und 1594 in Frankfurt starb (S. Schwarzschild 1929). Vom 16. Jahrhundert bis zur Französischen Revolution am Ende des 18. Jahrhunderts wohnte die israelitische Gemeinde in Frankfurt am Main in der Judengasse. Die Häuser in der Judengasse besaßen damals keine Hausnummern und wurden durch (farbige) Schilder und andere Symbole unterschieden. Im Laufe des 19. Jahrhunderts haben die kaufmännischen Schwarzschilds die Judengasse der Freien Reichsstadt Frankfurt verlassen und sich unter anderem in der Stadtmitte am Rossmarkt niedergelassen (Abb. 4).

Karls Großvater Seligmann Schwarzschild (1789–1864) gehörte zu den Gründern der orthodoxen israelitischen Religionsgesellschaft. Er war zweimal verheiratet: ab 1822 mit Pessle Bass (1789–1827) und ab 1831 mit ihrer um 18 Jahre jüngeren Schwester Clara Bass



**Abb. 5.** Jugendbild von Karl Schwarzschild im Alter von etwa 12 Jahren (SUB Göttingen, Cod. Ms. K. Schwarzschild 23: 1,1).

(1807–1884). Aus erster Ehe hatte der Großvater zwei und aus zweiter Ehe vier Nachkommen. Karls Vater Moses Martin war das jüngste Kind und hat die orthodoxe Familientradition bald verlassen. Als Börsenmakler bevorzugte er eine liberalere Auffassung des Judentums.

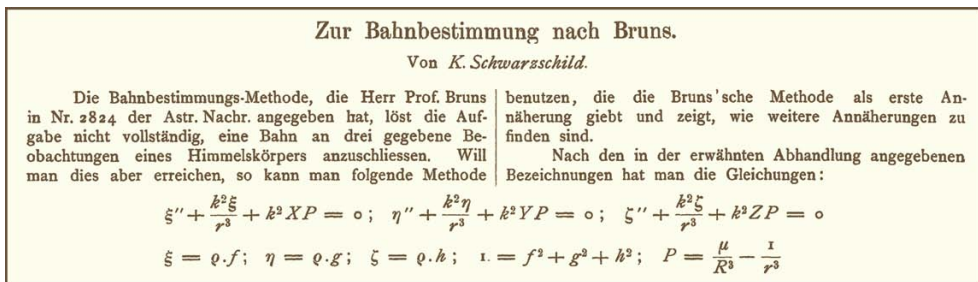
## **2 Jugendzeit in Frankfurt am Main**

Im April 1880 trat Karl auf Wunsch der Großmutter Clara in die IX. Klasse der Realschule der israelitischen Gemeinde, das „Philantropin“, ein. Diese Schule war 1803 von Amschel Rothschild für arme jüdische Kinder in der Judengasse gegründet worden. Karl blieb zusammen mit seinem Bruder Alfred bis zur V. Klasse am Philantropin. Nach der Vorschule (die Großmutter war inzwischen verstorben) kam Karl ins Städtische Gymnasium (damals in der Junghofstraße, heute das Lessing-Gymnasium) und Alfred ins Realgymnasium, die Wöhlerschule. Die Eltern hatten nämlich eine vorgefasste Meinung, dass Karl studieren und Alfred

Kaufmann werden sollte. Am Gymnasium zeigte sich rasch Karls mathematisches Talent, weshalb er von seinen Lehrern bald „der kleine Gauß“ genannt wurde (Abb. 5).

Der begabte Schüler wurde von seinem Vater mit dem damals stadtbekanntem Mathematiker und Astronomen Prof. Theobald Epstein, Dozent am Philantropin, bekannt gemacht, was sich für die Entwicklung dieses „Wunderkindes“ als richtungweisend erwiesen hat. Zusammen mit dessen zwei Jahre älterem Sohn Paul Epstein (1871–1939) meisterte Karl nicht nur Euklids „Elemente“ sondern auch die Differential- und Integralrechnung. Am Ende seiner Gymnasialzeit entwickelte Karl neben seinen Vorbereitungen zum Abitur eine sehr lebhaftige Tätigkeit im Schreiben mathematischer Arbeiten (Abb. 6). Sein Bruder Alfred berichtete darüber in seinen Lebenserinnerungen:

*„Er vertraute mir im Geheimen, dass er eine von diesen Arbeiten den Astronomischen Nachrichten zur Veröffentlichung einschicken wolle. Er tat es, und wir warteten neugierig auf das Resultat. Die Arbeit wurde angenommen und ich war sehr stolz auf meinen Bruder. Wir hielten die Sache unter uns bis zu Vaters Geburtstag. Da legte Karl die gedruckte Arbeit auf den Geburtstagstisch. Erst war Vater böse, dass Karl ihn gar nicht um Rat gefragt hatte. Aber dann war er auch sehr stolz und die ganze Familie betrachtete die Arbeit und las sie des Öfteren durch, obwohl keiner ein Wort davon verstand.“*



**Abb. 6.** Karl Schwarzschilds erste Veröffentlichung (Schwarzschild 1890a, Ausschnitt aus der Titelseite).

### 3 Student an der Kaiser-Wilhelm-Universität Straßburg (1891–1893)

Die Straßburger Universität war am 1. Mai 1872, nachdem das Elsaß durch den Frieden vom 10. Mai 1871 an das Deutsche Kaiserreich abgetreten worden war, neu gegründet worden und sollte als deutliches Wahrzeichen wilhelminischer Kultur und Wissenschaften gelten. Den Namen „Kaiser-Wilhelm-Universität“ bekam sie allerdings erst 1877. Die offizielle Einweihung der Straßburger Sternwarte fand im September 1881 anlässlich der Jahrestagung der Astronomischen Gesellschaft unter Leitung ihres Sekretärs und Direktors der Sternwarte August Winnecke (1835–1897) statt. Zuvor stellvertretender Direktor an der Sternwarte Pulkovo in St. Petersburg hatte Winnecke 1872 den Auftrag für die Konstruktion einer neuen Sternwarte und deren Ausstattung mit Instrumenten bekommen. Dass es dabei zu einer großen Ähnlichkeit mit Pulkovo gekommen ist, braucht nicht zu wundern (Abb. 7).

Am 28. Oktober 1891 immatrikulierte Karl Schwarzschild sich als Student der Astronomie an der Straßburger Universität. Er mietete sich irgendwo ein, aber schon in der ersten



**Abb. 7.** Blick auf die neuen wissenschaftlichen Institute der Universität Straßburg, 1880 (aus: „Die Gartenlaube“, 1884).

Nacht wurde er von Wanzen geplagt und zog am nächsten Morgen gleich wieder aus. Nachdem er ein „Reugeld“ bezahlt hatte, das ein großes Loch in seinen Geldbeutel riss, fand er eine bessere Bude am Fischleutstaaden, wo er lange wohnen blieb. Bald fand er angenehme Gesellschaft in früheren Frankfurter Gymnasiasten, mit denen er oft die Abende verbrachte. Von den Burschenschaften hielt er jedoch gebührenden Abstand. In seinem ersten Wintersemester 1891/92 führte Schwarzschild in Straßburg bei dem Astronomen Ernst Becker (1843–1912) (Abb. 8) eine Reihe von astronomischen Beobachtungen an Veränderlichen Sternen und an der 1892 entdeckten Nova Aurigae nach der Argelanderschen Stufenmethode mit Hilfe eines Opernglases durch. Er beklagte sich darüber, dass er seine Beobachtungen bei den in der Rheinebene herrschenden schlechten Sichtbedingungen dauernd unterbrechen musste. Die Ergebnisse publizierte er in Schwarzschild (1892).

Eine weitere Aufgabe, die er von Becker bekam, war eine langwierige Überarbeitung der Bahn des Kometen 1842 II, der von Laugier in Paris entdeckt worden war. Seine Berechnungen, die neben Paris auf Beobachtungen an den Sternwarten von Altona, Berlin, Bonn, Göttingen, Cambridge, Greenwich und Marseille beruhten, wurden 1895 in den Astronomischen Nachrichten veröffentlicht (Schwarzschild 1895), als er Straßburg bereits verlassen hatte.

Bei dem Mathematiker Elwin Bruno Christoffel (1829–1900) hörte Schwarzschild die höhere Mathematik, obwohl dieser ihm gegenüber äußerte, das Fach sei noch zu schwer für ihn, das solle er sich für spätere Semester aufbewahren. Hier hat Schwarzschild sicherlich schon die Anfänge der Differentialgeometrie und die der nicht-euklidischen Geometrie kennengelernt. Beide waren ihm später bei seiner Formulierung für die heute nach ihm benannten „Schwarzschild-Metrik“ für die Raumzeit von Sternen nach der Einsteinschen Allgemeinen Relativitätstheorie unentbehrlich.



Abb. 8. Die Straßburger Professoren Ernst Becker (links) und Elwin Bruno Christoffel (rechts).

#### 4 Studium an der Ludwig-Maximilians-Universität und ein „Einjähriges“ in München (1893–1896)

Kurz vor seinem 20. Geburtstag trat Karl Schwarzschild sein sogenanntes „Einjähriges Freiwilliges“ bei der zehnten Batterie des dritten königlich bayrischen Feldartillerie Regiments in München an. Die Kosten für seine militärische Unteroffiziersausrüstung und den Lebensunterhalt wurden vom Vater übernommen. Bevor Schwarzschild zur Artillerie kam, hatte er bereits mit viel Begeisterung die dafür notwendigen Reitstunden in Straßburg absolviert. Es bedeutete auch, dass er nach vier Semestern in Straßburg die Universität wechseln musste. Nun studierten die beiden Brüder in München: Alfred an der Kunstakademie in der Dietz-Schule und Karl parallel zu seinem Dienst in der Armee Astronomie bei Prof. Hugo von Seeliger (1843–1924) (Abb. 9) sowie Mathematik bei Prof. Ferdinand Lindemann (1852–1939).

Bei seiner Entlassung war Karl Schwarzschild nicht über den Unteroffiziersrang hinausgekommen, da Juden in der preußischen Armee für einen Offiziersrang nicht in Betracht kamen. Außerdem war er noch ungeschickt:

*„Das Manöver war eine Kette von Unglücksfällen für ihn. Erst vergaß er den Geschützzeimer und musste ihn auf geheimen Wegen nachkommen lassen. Dann ritt er seinen Gaul lahm und zum Schluss feuerte er seine Kanone ab, ohne den Verschlussdeckel abzunehmen, und der war unwiederbringlich davon geschleudert. Er muss froh sein, dass kein größeres Malheur gab.“*, so sein Bruder Alfred.

Karl Schwarzschild promovierte am 20. Juli 1896 *cum laude* bei Prof. von Seeliger mit der Inaugural-Dissertation: *„Die Poincaré’sche Theorie des Gleichgewichts einer homogenen rotierenden Flüssigkeitsmasse“*. Diese behandelt die Entstehung von ellipsoidalen Gleichgewichtsfiguren (Rotationsellipsoiden) als Funktion der Rotationsgeschwindigkeit, welche im 19. Jahrhundert auch durch Poincaré, Dirichlet und andere untersucht und klassifiziert worden sind. Aber allein schon durch seine Promotionsarbeit und seine spätere Habilitationsschrift gilt Karl Schwarzschild als Seeligers bedeutendster Schüler (Abb. 10).

Weitere Veröffentlichungen von Schwarzschild aus seiner Zeit an der Münchner Sternwarte sind: *„Über Messung von Doppelsternen durch Interferenzen“*, *„Über die Stabilität*



**Abb. 9.** Der Münchner Astronom Prof. Hugo von Seeliger.

*der Bewegung eines durch Jupiter gefangenen Cometen*“, sowie ein populär-astronomischer Aufsatz „*Fixsternbetrachtungen*“ (Schwarzschild 1896a,b,c).

### **5 Assistent an der Kuffner-Sternwarte in Wien-Ottakring (1896–1899)**

Auf Vorschlag seines Doktorvaters nahm Karl Schwarzschild im September 1896 eine Stelle beim Direktor der Kuffnerschen Sternwarte in Wien-Ottakring Leo de Ball (1853–1916) für seine Habilitationsschrift an. Sein Vater war allerdings wenig davon begeistert, dass sein Sohn sich ausgerechnet für längere Zeit im als katholische „Anti-Semitenstadt“ der kaiserlich-königlichen Monarchie geltenden Wien niederlassen wollte.

Diese private Sternwarte (Abb. 11) wurde von dem Wiener Großindustriellen und Mäzen jüdischer Abstammung, Moritz Edler von Kuffner (1854–1939), Eigentümer der Ottakringer Bierbrauerei, gestiftet. Die 1884 gegründete Sternwarte war, als Karl Schwarzschild im Oktober 1896 nach Wien kam, gerade mit vier neuen Instrumenten ausgestattet worden: einem 8-zölligen Heliometer von Steinheil, einem 10-zölligen photographischen Refraktor von Repsold, einem 8-zölligen Meridiankreis von Repsold mit Optik von Steinheil, sowie einem Vertikalkreis und Präzisionsuhren. Mit letzteren Instrumenten führte Schwarzschild Hilfsmessungen für Leo de Ball durch im sogenannten Internationalen Zonenunternehmen für südliche Deklinationen, einer Initiative der Astronomischen Gesellschaft.

Am photographischen Refraktor begann Schwarzschild mit leicht unscharfen (extrafokalen) Sternaufnahmen zu experimentieren, wobei er an der Schwärzung der Beugungsscheibchen auf den Photoplaten feststellen konnte, dass bei den in der Astrophotographie üblichen langen Belichtungszeiten das Reziprozitätsgesetz von Bunsen und Roscoe nicht mehr gültig war. Durch weitere Versuche im Labor der K. K. Lehr- und Versuchsanstalt und die Unterstützung deren Direktors Josef Maria Eder (1855–1944) kam er zu der folgenden Formel für die Schwärzung  $S$  als Funktion der Belichtungszeit  $t$  und der Beleuchtungsstärke  $I$ :  $S = It^p$ , worin  $p$ , der sogenannte Schwarzschild-Exponent, abhängig von dem verwen-



**Abb. 10.** Promotionsurkunde von Karl Schwarzschild (SUB Göttingen, Cod. Ms. K. Schwarzschild 21: 10).

deten Photomaterial ist. Dadurch wurde es möglich, auch quantitative Bestimmungen der Helligkeit der Sterne zu bekommen. Für das später nach ihm benannte Schwärzungsgesetz von Photoplaten bekam Schwarzschild in Österreich gerade noch vor seiner Rückkehr nach München eine Medaille der Photographischen Gesellschaft in Wien überreicht, welche sich in seinem Nachlass befindet (Abb. 12).

Zur Anwendung kamen seine photographischen Methoden u.a. bei Aufnahmen von Sternhaufen wie den Plejaden und der Praesepe, deren Ergebnisse er in den Publikationen der von Kuffner'schen Sternwarte Wien veröffentlichte (Schwarzschild 1900b). Weiter führte er sowohl visuelle als photographische Helligkeitsmessungen an den beiden veränderlichen Sternen  $\eta$  Aquilae und  $\beta$  Lyrae durch. Für  $\eta$  Aquilae fand er auf den Photoplaten eine fast



**Abb. 11.** Die Kuffnersche Sternwarte im Jahre 1892. Links das Hauptgebäude mit der großen Kuppel, rechts die Kuppel des Heliometers (Archiv des Verfassers).



**Abb. 12.** Medaille der Photographischen Gesellschaft in Wien 1899 (SUB Göttingen, Cod. Ms. K. Schwarzschild 23: 2).

doppelt so große Helligkeitsschwankung wie dies bei den visuellen Beobachtungen der Fall war, was ihn vermuten ließ, dass es sich bei diesem Stern um Temperaturschwankungen an der Sternoberfläche handelt und nicht wie bei  $\beta$  Lyrae um ein Doppelsternsystem. Weiter interessierte sich Schwarzschild noch immer für himmelsmechanische Probleme, insbesondere für das „Dreikörperproblem“, und veröffentlichte darüber zwei Arbeiten (Schwarzschild 1898a,b).

Durch ein Empfehlungsschreiben seines Vaters kam Schwarzschild in Wien in Kontakt mit dem jüdischen Verleger Isidor Singer (1857–1927) der Zeitschrift „Die Zeit“, für die er mehrere populärwissenschaftliche Artikel schrieb: „Eine Sterngeburt“ (Schwarzschild 1897a), „Was in der Welt ruht“ (Schwarzschild 1897b) und „Der Saturnring“ (Schwarzschild 1898c). Ausgehend von dem Veränderlichen  $\beta$  Lyrae beschrieb er im erstgenannten Aufsatz, dass dieses Doppelsternsystem durch Abspaltung eines neuen Sterns – die Stern-



geburt – aus einem größeren Vorläuferstern entstanden ist, wobei eine Art gasiger Verbindungsstrang zurückgeblieben sein soll.<sup>3</sup> Im zweiten Aufsatz versuchte er, den einzigen Punkt im Universum zu bestimmen, der sich in Ruhe befindet. Das Gravitationszentrum aller Massen im Universum soll im Prinzip diese Forderung erfüllen, lässt sich in der Praxis aber nicht bestimmen. Den Äther als eine ruhende Grundsubstanz lehnte er ab. Interessant ist zum Schluss seine ausführliche Beschreibung einer Reise über den Saturnring, wobei er von physikalischen Erkenntnissen Gebrauch machte, um die empfindliche Stabilität des Ringes zu erklären.

## 6 Privatdozent an der Ludwig-Maximilians-Universität (1899–1901)

Karl Schwarzschild kehrte im Juli 1899 aus Wien nach München zurück und habilitierte sich dort mit der Monographie: *Beiträge zur Photographischen Photometrie der Gestirne*. Die Habilitationsschrift mit einem Zusatz von Leo de Ball erschien 1900 vollständig in den Publikationen der von Kuffner'schen Sternwarte (Abb. 13). Sie enthält auf über 135 Seiten eine Arbeit über die von Schwarzschild entwickelte Methode zur photographischen Helligkeitsbestimmung von Sternen in Sternhaufen.

In der nun folgenden Privatdozentenzeit an der Ludwig-Maximilians-Universität in München publizierte Karl Schwarzschild zwei wichtige mathematisch-physikalische Arbeiten: „*Der Druck des Lichts auf kleine Kugeln und die Arrhenius'sche Theorie der Cometschweifé*“ (Schwarzschild 1901) und „*Die Beugung und Polarisation des Lichtes durch einen Spalt*“ (Schwarzschild 1902). Im erstgenannten Aufsatz beweist er, dass der Druck des Lichtes auf die Partikel im Schweif eines Kometen – anders als von Arrhenius behauptet – zu gering ist, um dessen Ablenkung im Kosmos erklären zu können. Bei dem zweiten Aufsatz handelt es sich um eine Erweiterung der Sommerfeldschen Lösung für die Beugung an einer Halbebene mit Hilfe der Spiegelmethode in der komplexen Riemannschen Ebene.

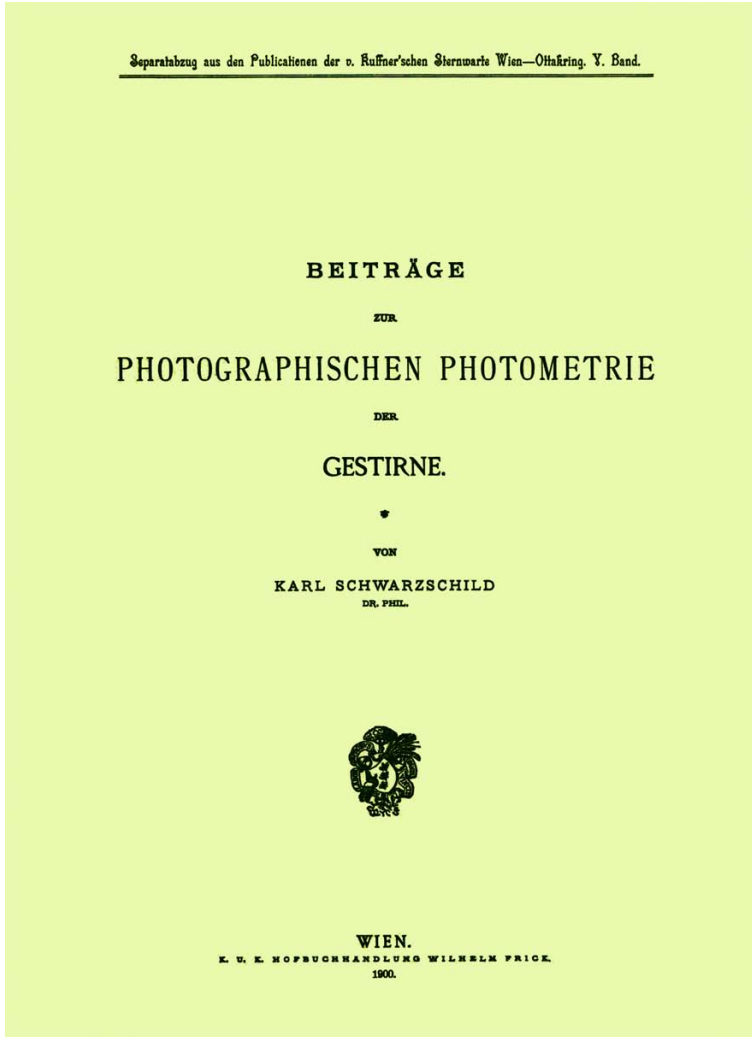
Auf Vorschlag des Vorsitzenden der Astronomische Gesellschaft Hugo von Seeliger hielt Karl Schwarzschild 1900 in Heidelberg einen Vortrag „*Ueber das zulässige Krümmungsmaass des Raumes*“ (Schwarzschild 1900a). Er betrachtete darin die Möglichkeit, dass der Kosmos eine nicht-euklidische Struktur besitzt:

„*Es ist Ihnen bekannt, dass sich neben der euklidischen Geometrie im Laufe dieses Jahrhunderts<sup>4</sup> andere – nicht-euklidische – Geometrien entwickelt haben, an deren Spitze die Geometrie des sog. sphärischen und des sog. pseudosphärischen Raums stehen, [ . . . ] Man findet sich da – wenn man will – in einem geometrischen Märchenland, aber das Schöne an diesem Märchen ist, dass man nicht weiss, ob es am Ende doch Wirklichkeit ist.*“

Einerseits geschahen diese Überlegungen schon 15 Jahre bevor die Einsteinsche Allgemeine Relativitätstheorie veröffentlicht wurde, andererseits hatte Schwarzschild noch 1899 in den Thesen zu seiner Habilitation behauptet: „*Die Hypothese einer Krümmung unseres Raumes ist zu verwerfen*“. Aus Messungen der Parallaxe von Fixsternen ermittelte Schwarzschild für den Krümmungsradius im pseudosphärischen Raum einen Mindestwert von 60 Lichtjahren. Unter der Annahme, dass die Raumkrümmung in einem sphärischen Raum groß genug wäre, um die Anzahl der im Kosmos wahrgenommenen Sterne zu enthalten, erhielt

<sup>3</sup>Diese Interpretation ist heute überholt, es handelt sich von Anfang an um einen engen Doppelstern mit Massenaustausch. (Anm. d. Hrsg.)

<sup>4</sup>Gemeint ist hier natürlich das 19. Jahrhundert.



**Abb. 13.** Titelseite der Habilitationsschrift von Karl Schwarzschild (Wien 1900. Archiv Universitäts-Sternwarte Göttingen/H.-H. Voigt, Repro A. D. Wittmann).

er einen Krümmungsradius von mindestens 2000 Lichtjahren. Heute liegt die Grenze für den Krümmungsradius des Raumes immerhin bei  $10^{10}$  Lichtjahren (vgl. F. Hund in Voigt (1992)).

Im Wintersemester 1900 gab Karl Schwarzschild einen Volkshochschulkurs über das Sonnensystem. Es haben sich fast 200 Zuhörer angemeldet und der Kurs war ein großer Erfolg. Am Ende des Kurses traf sich abends eine Gruppe von mehrheitlich Teilnehmerinnen im Atelier von Alfred Schwarzschild (der Bruder, mittlerweile ein gefragter Portrait- und Genre-Maler, war nämlich unterwegs in Paris) wobei es wohl etwas zu ausgelassen zugegangen sein

muss, da dem Bruder anschließend das Atelier gekündigt wurde. Jedenfalls spielte die Gesellschaft bei den beiden Brüdern in München eine große Rolle, und zwar umso mehr, je ausgelassener die „Redouten“ (so nannte man die Veranstaltungen damals) waren. Fasching wurde bevorzugt in der Münchner Kunstakademie begangen und die Oktoberfeste wurden nie ausgelassen. Es kam auch zur Freundschaft mit der Englischlehrerin Liesl Baur, der Tochter des Rektors Magnifikus Franciscus von Baur der Ludwig-Maximilians-Universität, wodurch Karl Schwarzschild öfters zum Klavierspielen bei der Familie von Wilhelm Conrad Röntgen (1845–1923) zu Besuch kam.<sup>5</sup> Zu ernsthaften wissenschaftlichen Gesprächen mit diesem ersten Empfänger des Nobelpreises für Physik von 1901 kam es jedoch nicht.

## 7 Professor in Göttingen und Direktor der Königl. Sternwarte (1901–1909)

Im Sommer 1901 starb überraschend der damalige Direktor der Göttinger Sternwarte, Wilhelm Schur (1846–1901). Als Nachfolger wurde ein Astronom gesucht mit eindeutiger Begabung für die angewandte Mathematik. Hugo von Seeliger empfahl daraufhin in einem Schreiben an Felix Klein (1849–1925) seinen begabten Schüler Karl Schwarzschild. Die Göttinger Fakultät unterbreitete dem Ministerium in Berlin folgende Liste als Berufungsvorschlag: 1) Hugo von Seeliger (München); 2) Max Wolf (Heidelberg) und 3) Karl Schwarzschild (München). Nachdem die beiden an erster und zweiter Stelle stehenden älteren Kandidaten abgesagt hatten, wurde Karl Schwarzschild auf den Direktorenposten der Königl. Sternwarte (Abb. 14) berufen, wegen seines jungen Alters zunächst als Extraordinarius. Aber bereits im Frühjahr 1902 wurde er schließlich zum Ordinarius ernannt.



**Abb. 14.** Sternwarte Göttingen um 1919 (Archiv Institut für Astrophysik Göttingen).

<sup>5</sup>Liesl Baur war mit der Tochter der Röntgens befreundet.



**Abb. 15.** Schwarzschild mit Mitarbeitern und Studenten 1903. Von links nach rechts: O. Birck, H. Kistler, H. Blasius, J. M. Knapp, W. Dziewulski, A. von Brunn, K. Schwarzschild, B. L. Newkirk, L. Ambronn, B. Meyermann, M. Linnemann (SUB Göttingen, Cod. Ms. K. Schwarzschild 23: 1,14).

Als Direktor wurde Schwarzschild unterstützt durch den Observator Leopold Ambronn (1854–1930) und den Assistenten Bruno Meyermann (1876–1963), ferner durch einen Wärter, einen Rechner und mehrere Studenten (Abb. 15).

Instrumentell war die Sternwarte eher rückständig, mit nur einem alten Meridiankreis und einem Heliometer (Repsold). Als Geschenk bekam die Sternwarte 1904 von Anton Schobloch einen Refraktor mit 19 cm Öffnung, für den ein neues Kuppelgebäude erstellt wurde. Der Schobloch-Refraktor wurde 1906 von Schwarzschild mit einer von ihm erdachten „Schraffierkassette“ nachgerüstet. Mit diesem Instrument (von seinen Mitarbeitern auch scherzhaft als „Wackelkamera“ bezeichnet) wurden von ihm, seinem Assistenten Meyermann und seinen beiden Schülern Arnold Kohlschütter (1883–1969) und Otto Birck (1879–1951) die photographischen Helligkeitsbestimmungen von helleren Sternen durchgeführt. Die Beobachtungen führten zu einem ausführlichen Katalogwerk, der „*Göttinger Aktinometrie*“ (Schwarzschild et al. 1912). Dabei hatte sich bei dem großen abgebildeten Gesichtsfeld des Sternenhimmels ( $20^\circ \times 20^\circ$ ) herausgestellt, dass die Abbildungsfehler des Objektivs eine Vermessung der Sternscheibchen auf den Photoplaten mit dem sogenannten Hartmannschen Mikrophotometer unmöglich machten. Auch seine Wiener Methode versagte hier, weil die extrafokalen Sternbilder von Fraunhoferschen Beugungsringen (einer rotationssymmetrischen Helligkeitsverteilung gemäß der Airyfunktion) durchsetzt waren und keine gleichförmig geschwärzten Flächen bildeten. Die Lösung des Problems bestand darin, das punktförmige fokale Sternbildchen sich mit Hilfe der Schraffierkassette so über die Photoplatte bewegen zu lassen, dass eine kleine rechteckige Fläche gleichförmig überstrichen wurde (Abb. 16).

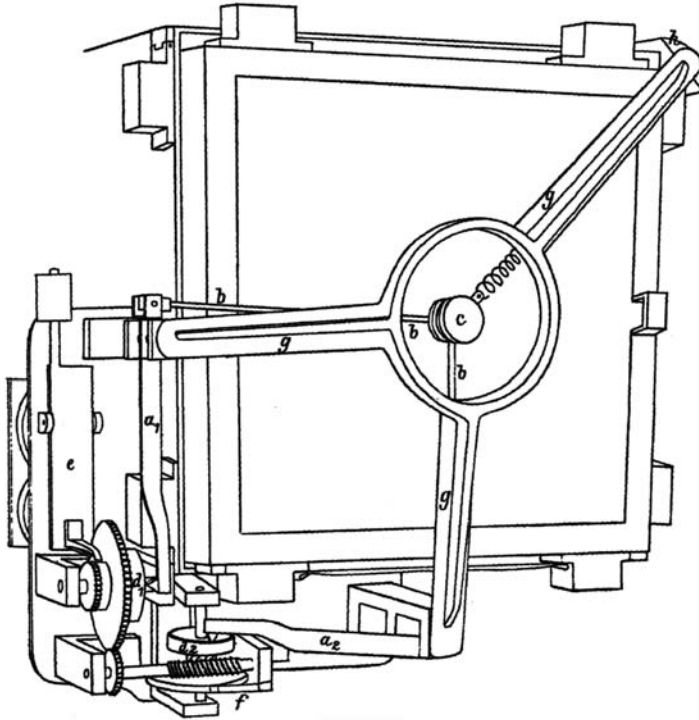


Fig. 1.

Abb. 16. Schraffierkassette (Meyermann &amp; Schwarzschild 1905).

Seine wissenschaftlich fruchtbarste Periode verbrachte Karl Schwarzschild in Göttingen. Er wurde rasch in der dortigen Professorenschaft aufgenommen. Zu seinen engeren Freunden und Kollegen zählten die Mathematiker Klein, Hilbert, Minkowski, Runge, Herglotz und Blumenthal sowie die Physiker Prandtl, W. Voigt und Wiechert. Unter Schwarzschild wandelte sich die klassische Astronomie in Göttingen schnell in eine moderne Astrophysik als Teil der Naturwissenschaften. Im April 1905 fassten Carl Runge (1856–1927), Professor für angewandte Mathematik, und Karl Schwarzschild den Plan einer Reise nach Algerien, um dort die totale Sonnenfinsternis vom 30. August 1905 zu beobachten. In aller Eile wandten sie sich an das Ministerium um finanzielle Unterstützung. Ergänzt wurde das Team durch Robert Emden (1862–1940), Physiker an der Königlich Bayerischen Technischen Hochschule (der heutigen TU München) und späterer Schwager Schwarzschilds. Als Beobachtungsort wurde ihnen durch die französische Verwaltung in Algerien die Bühne in einer Ruine des römischen Amphitheatrs in Guelma angewiesen, welche in 290 m Höhe gelegen ist. Weiter stellte die Firma Carl Zeiss Jena ihnen durch ihren Astronomen Walter Villiger (1872–1938) für die erstmalige Beobachtung der UV-Strahlung der Sonnenkorona eine Prismenkamera aus einem UV-durchlässigem Glas zur Verfügung. Vor Ort wurde das Sonnenfinsternis-Team ergänzt durch den Photographen und Schreiner Mr. Henry, einen Gymnasiasten für den Kas-  
 settenwechsel und einen Beamten, der das Sekundenzählen mit einem Metronom übernahm.

Geschützt von einem Zelt, wurden die Instrumente auf der Bühne des Theaters bei einer Hitze von 42° C im Schatten aufgestellt. Die astronomische Ausrüstung bestand aus drei Instrumenten, welche sich alle an einem Stativ mit einer Repsoldschen parallaktischen Montierung befanden:

1. Auf der einen Seite des Stativs die Zeissche UV-Prismenkamera und auf der anderen Seite ein lichtstarkes Petzval-Objektiv quasi als Gegengewicht. Das Objektiv der Prismenkamera, ein Achromat, hatte eine Öffnung von 110 mm und eine Brennweite von 1100 mm. Davor befand sich, nahe auf das Minimum der Ablenkung eingestellt, ein Prisma von 200 mm Seitenlänge und 45° brechendem Winkel, ebenfalls aus UV-Glas. Bei der hieraus resultierenden großen Lichtstärke wurden Momentaufnahmen des Flash-Spektrums vorgesehen (Beobachter: Schwarzschild).
2. Mit dem Petzval-Objektiv, Öffnung 156 mm und Brennweite 700 mm. Über dem Objektiv war als Kamera ein einfaches Blechrohr geschoben, an dessen unterem Ende eine Holzfassung zum Einschieben der Kassette für die Korona-Aufnahmen angebracht war (Beobachter: Henry).
3. Weitere Korona-Aufnahmen wurden mit der Handkamera von Robert Emden erstellt, welche mit einem Rietschel-Anastigmat von 25 mm Öffnung und 120 mm Brennweite und mit einer Gelbscheibe ausgerüstet war (Beobachter: Emden).

Carl Runge übernahm für die Göttinger Gesellschaft der Wissenschaften luftelektrische Messungen der Atmosphäre sowohl auf der Fahrt von Hamburg nach Algier mit dem Dampfer „Byzanz“ als auch während der totalen Sonnenfinsternis.

Zusammen mit Villiger veröffentlichte Karl Schwarzschild zwei Arbeiten über die UV-Strahlung der Sonne mit den Titeln: „*On the Distribution of Brightness of the Ultra-violet Light on the Sun's Disk*“ und „*Note on the Ultra-violet Radiation of Sun Spots and Faculae*“ (Schwarzschild & Villiger 1906a,b). Diese Arbeiten bilden den Anfang einer Periode (1905–1906), in der Schwarzschild sich intensiv mit der Physik von Sternatmosphären beschäftigt hat.

Die „Mathematische Gesellschaft“ in Göttingen (Abb. 17) war von Felix Klein gegründet worden und war ein Treffpunkt für neue abstrakte und angewandte Mathematik. Ein wichtiges und zeitraubendes Unterfangen von Klein war die Erstellung seiner „*Enzyklopädie der mathematischen Wissenschaften*“. Karl Schwarzschild bekam von ihm die Redaktion von Band 6 übertragen. Schwarzschild hat von 1905 bis zu seinem Tode im Mai 1916 daran redigiert. Fast 30 Jahre, von 1905–1934, hat schließlich die Vollendung dieser Teile in Anspruch genommen.

Im Jahre 1905 wurde Karl Schwarzschild ordentliches Mitglied der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften (der späteren Akademie der Wissenschaften) zu Göttingen in der Mathematisch-Physikalischen Klasse. Schon seit 1903 hatte er regelmäßig in den Abhandlungen (6×), den Nachrichten (8×) und den Mitteilungen (1×) der Gesellschaft der Wissenschaften publiziert. Besonders hervorzuheben sind seine Arbeiten „*Zur Elektrodynamik I, II, III*“ von 1903 (Schwarzschild 1903a,b,c) und die „*Untersuchungen zur geometrischen Optik I, II, III*“ von 1905 (Schwarzschild 1905a,b,c). Besonders zu erwähnen ist auch Schwarzschilds Veröffentlichung „*Ueber das Gleichgewicht der Sonnenatmosphäre*“ von 1906.

Im Jahre 1889 war es Felix Klein gelungen, einen aus mehreren Großindustriellen und Göttinger Professoren bestehenden Förderverein zu schaffen und als dessen Vorsitzenden



**Abb. 17.** Die Mathematische Gesellschaft in Göttingen. Vordere Reihe: Abraham, Schilling, Hilbert, Klein, Schwarzschild, Young, Diestel, Zermelo. Mittlere Reihe: Fanla, Hansen, C. Müller, Dawnwey, Schmidt, Yoshiya, Epstein, Fleischer, Bernstein. Hintere Reihe: Blumenthal, Hamel, H. Müller (SUB Göttingen, Cod. Ms. K. Schwarzschild 23: 1,16).

den damaligen Leiter der Eberfelder Farbwerke Bayer & Co., Henry Th. von Böttinger, zu gewinnen. Der Förderverein verschweißte die Universität mit industriellen und vor allem militärischen Interessen. Karl Schwarzschild berichtete im Mai 1904 seinen Eltern von einem Fördervereinsbesuch in der Kruppschen Villa Hügel in Essen:

*„Wir sind am Donnerstag Nachmittag nach Essen gefahren. Im Spitzenkoupé saßen der Curator [Ernst Höpfner], Klein, Wallach, Nernst, Riecke, Voigt, bei mir Hilbert, Minkowski, Schilling, Tammann, v. Seelhorst, und wir beschäftigten uns anhaltend mit Kannengiesern. [...] Die Spitzen waren wieder für sich in Krupp's Privathotel, einem höchst geschmackvollen Bau, untergebracht. Die industrielle Vertretung war glänzend, außer einigen Direktoren von Krupp waren noch Dr. Boedicker von Siemens und Halske, Rathenau von der A.E.G., Wacker von Schuckert, Riepe von der Nürnberger Maschinenfabrik, von Linde der flüssige Luftmann, Schilling vom Norddeutschen Lloyd. Aber der Freitag begann mit Enttäuschungen. Der Minister kam nicht. Frau Krupp war abwesend. Und in der geschäftlichen Sitzung stellte sich heraus, daß die Finanzen äußerst schlecht standen und wenig Neigung zu großen Extrabewilligungen der Industrie vorhanden war. [...] Dann ging's immer wechselnd von wenig Schlaf unterbrochen zwischen Sektfrühstücken und Dinern und Kanonen, Hämmern, Walzen und Stahlöfen hin und her. Die Geschütze sind so schmeidig, dass ich direkt Lust zu Artillerie bekam. Vor Dimensionen verliert man dort sofort allen Respekt, weil 5 Mill. Kilogrammblöcke in der Selbstverständlichkeit wie ein Kilo gehandhabt werden. Malerisch war überall. Die Bessemer Birnen sind das schönste Feuerwerk. Schließlichschließlich war es doch ein großer Eindruck und man weiß jetzt, was Stahl ist.“<sup>6</sup>*

<sup>6</sup>SUB Cod. Ms. K. Schwarzschild, Briefe/907, Mai 1904.

## 8 Direktor des Astrophysikalischen Observatoriums Potsdam (1909–1916)

Im August 1909 wurde Karl Schwarzschild zum Nachfolger des 1907 verstorbenen ersten Direktors des Astrophysikalischen Observatoriums in Potsdam, Hermann Carl Vogel (1842–1907), ernannt. Der Berliner Astronom Arthur von Auwers (1838–1915) war zwar dagegen, weil er in Schwarzschild einen theoretischen Physiker sah, aber dann hat sich Max Planck (1858–1947) in einer Sitzung der Akademie für Schwarzschild durchgesetzt.



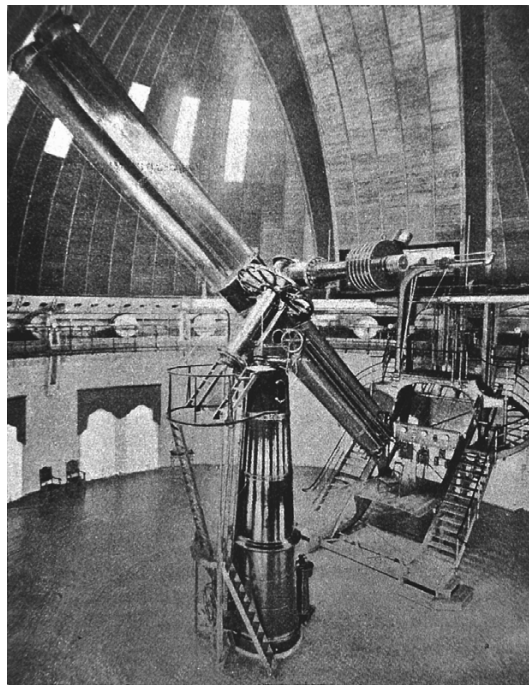
**Abb. 18.** Das Hauptgebäude des Astrophysikalischen Observatoriums (heute Leibniz-Institut für Astrophysik) auf dem Telegrafenberg bei Potsdam (Photo: Rainer Arlt/Potsdam (2004), mit freundlicher Genehmigung).

Aber auch Karl Schwarzschild hat, nachdem er gerade die Göttingerin Else Rosenbach (1879–1950) geheiratet hatte, sich schweren Herzens von seinen Freunden und Kollegen in Göttingen verabschiedet. Dafür bekam er jetzt die Leitung über die am besten mit Instrumenten ausgerüstete Sternwarte Deutschlands. Obwohl ihn die Leitung dieses außerordentlichen Institut mit allerhand nicht-wissenschaftlichen Tätigkeiten sehr viel Zeit kostete, arbeitete er unermüdlich an eigenen Forschungen und denen seiner Mitarbeiter weiter. Eine Voraussetzung für die Annahme seines Postens in Potsdam hatte Schwarzschild, nämlich die Mitnahme seines neuen Assistenten in Göttingen, Ejnar Hertzsprung (1873–1967). Der Däne hatte sich in der Astrophotographie spezialisiert und mit Schwarzschild über die Übereinstimmung seiner Ergebnisse für die Helligkeit von Sternen in den Plejaden und den Hyaden korrespondiert. Durch den Weggang des Mathematikers Gustav Herglotz (1881–1953) nach Wien war in Göttingen gerade ein Extraordinariat frei geworden und Schwarzschild hatte diese Position mit Hilfe von Carl Runge an Hertzsprung weitergeben können. Nun aber brauchte er eine freie Stelle in Potsdam für Hertzsprung und bot deshalb Johannes Hartmann



(1865–1936) seine eigene Professur in Göttingen an. Nach vielen Verhandlungen in Berlin sagte Hartmann tatsächlich zu. Daraufhin schrieb Schwarzschild am 24. September 1909 freudig an Hertzprung: „*Hartmann hat den Ruf nach Göttingen angenommen. Hurrah!*“

Hauptinstrument in Potsdam war der Große Doppelrefraktor (Abb. 19). Dieser wurde am 26. August 1899 in Anwesenheit des Kaisers Wilhelm II. in Betrieb genommen und war von den Firmen Repsold (Doppelrefraktor) und Steinheil (Montierung) hergestellt worden. Der Doppelrefraktor war für visuelle und photographische Beobachtungen mit einer äquatorialen Montierung ausgelegt und wurde in einem eigens dafür errichtetem Gebäude aufgestellt. Die Linsen des optischen bzw. des photographischen Teleskops haben einen Durchmesser von 50 cm und eine Brennweite von 12,59 m bzw. von 80 cm und 12,14 m Brennweite. Bereits bald nach ihrer Ankunft in Potsdam führten Schwarzschild und Hertzprung gemeinsam ihre ersten Beobachtungen am Großen Refraktor durch.



**Abb. 19.** Der Potsdamer Doppelrefraktor um 1900 (aus: Brenner 1903).

Angeblich erblickten am 12. Januar 1910 in der Morgendämmerung die Arbeiter einer Diamantmine in Transvaal als erste einen hellen Kometen. Fünf Tage später wurde der Direktor des Transvaal-Observatoriums, Robert Innes, darauf aufmerksam gemacht und konnte den Kometen bereits tagsüber 4,5 Grad neben der Sonne beobachten. Zunächst wurde dieser Komet von vielen Astronomen fälschlicherweise für den Halleyschen Kometen gehalten. Er erreichte am 17. Januar 1910 eine maximale Helligkeit von  $-4$  mag und war somit tagsüber sichtbar. Der Halleysche Komet erschien am 20. April 1910 in maximaler Helligkeit. Seine Umlaufzeit von etwa 75 Jahren variiert durch Bahnstörungen im Sonnensystem zwischen 74 und 79 Jahren.



**Abb. 20.** Der Halleysche Komet nahe der Venus (oben rechts), aufgenommen am 13.5.1910 am Lowell-Observatorium in den USA (aus: Newcomb-Engelmann, „Populäre Astronomie“, 6. Auflage, 1921).

Im Frühjahr 1910 fand unter Leitung von Gustav Müller (1851–1925) eine kleinere Expedition zur Photographie des Halleyschen Kometen durch das Astrophysikalische Observatorium Potsdam nach Teneriffa (Kanarische Inseln) statt. Das Team war nur mit einer Stereoskopkamera mit verschiedenen Objektiven und mit einem parallaktischen Stativ ausgerüstet, Die Aufnahmen waren aber detailliert genug, um Rückschlüsse auf die Helligkeitsverhältnisse im Schweif des Kometen zu ziehen. Die Ergebnisse wurden unter dem Titel „Über die Helligkeitsverteilung im Schweif des Halley’schen Kometen“ in Göttingen publiziert (Schwarzschild und Kron 1911). Am 19. Mai 1910 sollte die Erde den Schweif des Kometen durchqueren, in dem man eine Cyanverbindung wahrgenommen hatte, zwar in einer Konzentration, die völlig ungefährlich war. Dennoch machte sich überall eine Weltuntergangsstimmung breit, in der sich mit der Angst allerhand Geschäfte mit Gasmasken und Kometen-Pillen machen ließen. Schwarzschild bestimmte für den Massenverlust des Kometen einen Wert von 13 bzw. 13.000 Tonnen/Tag, je nachdem ob das Licht an Molekülen bzw. Staubteilchen gestreut worden ist. Die gesamte von der Erde abgefangene Masse beträgt dann nur (im Vergleich zur Gesamtmasse der Erde winzige) 250 Tonnen! Schwarzschild bekam wegen des Kometenfiebers auch Besuch von den Damen der kaiserlichen Familie auf der Sternwarte in Potsdam. Er berichtete darüber an seine Eltern:

*„Der allerhöchste Besuch kam plötzlich. Ich habe sicher viele Gräßlichkeiten begangen und die königlichen Hoheiten mit Sie angeredet. Die Kronprinzessin ist klug und liebenswürdig und kapierte, was man zeigte, die anderen zappelten mehr herum und thaten so als ob. Die Kaiserin<sup>7</sup> setzte sich ohne Umstände auf die Knie, um ins Fernrohr zu sehen, was mir von der alten Frau wunderte. Sie machte den Eindruck, als ob Sie überall nicht ganz mit käme. Zum Schluß gab mir jeder von der kaiserlichen Familie die Hand und sagte Dankeschön – davor merkte ich erst wer dazu gehörte (. . .). Es huschte wie ein Spuk vorüber.“<sup>8</sup>*

<sup>7</sup> Victoria Luise (1858–1921) war die Ehefrau von Wilhelm II.

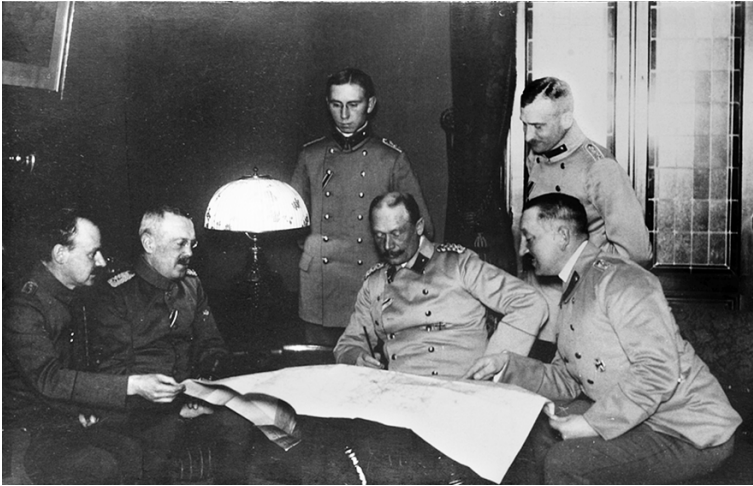
<sup>8</sup> SUB Cod. Ms. K. Schwarzschild, Briefe 907: 27, 103–104.

Im Herbst 1910 unternahm Schwarzschild eine Reise in die Vereinigten Staaten, auf der er alle größeren Sternwarten besuchte. An der Ostküste die Sternwarten des US Naval Observatory, des Harvard College und des Yerkes Observatory. Nach der Besichtigung der Niagarafälle ging es über den Grand Canyon weiter an die Westküste zum Lick Observatory und an das Solar Observatory auf Mount Wilson zur Teilnahme an der vierten Versammlung der Solar Union. Die Begegnung mit Pickering und Russell am Harvard College führte zur Entstehung des Hertzsprung-Russell-Diagramms.

Eine weitere wichtige Begegnung von Schwarzschild fand während der Versammlung der International Solar Union auf Mount Wilson statt, und zwar mit Jacobus Kapteyn (1851–1922), Astronom an der Universität in Groningen (Abb. 21). Diese Universität besaß keine eigene Sternwarte, deshalb verbrachten die Kapteyns ihre Sommerferien zum Beobachten von „selected areas“ der Milchstraße auf Mt. Wilson. Kapteyn hat dabei festgestellt, dass eine Gruppe von Heliumsternen in der Milchstraße eine gemeinsame Strömungsrichtung besitzt. Auf der Schiffsreise zurück nach Europa beschlossen Kapteyn und Schwarzschild, zusammen speziell die Eigenbewegungen der Sterne in der Milchstraße zu untersuchen. Schwarzschild entwickelte dabei im Dezember 1911 als Alternative seine „Stellarstatistik“ für Milchstraßensysteme, welche jedoch der „Zweistromhypothese“ von Kapteyn widerspricht (Schwarzschild 1912. 1914 erhielt Schwarzschild den Ehrendoktor für Astronomie und Mathematik der Universität Groningen.



**Abb. 21.** Jacobus Kapteyn (Archiv des Verfassers).



**Abb. 22.** Besprechung des Artilleriestabes (ganz links Karl Schwarzschild). Laut seinem Schwager Robert Emden ist dies die letzte Aufnahme von Karl Schwarzschild vor seinem Tod (SUB Göttingen, Cod. Ms. K. Schwarzschild 23: 1,5).

## 9 Teilnahme am Ersten Weltkrieg und Arbeiten zur Relativitätstheorie (1914–1916)

Bei Ausbruch des Ersten Weltkrieges meldete sich Karl Schwarzschild freiwillig zur Armee, weil er als deutscher Jude und Beamter zeigen wollte, ein echter Patriot zu sein. Er wurde als Feldwebel mit drei Freiwilligen nach Namur in den Ardennen geschickt, um dort eine Feldwetterstation zu installieren. In seinem Tagebuch notierte er am Donnerstag, dem 10. September 1914:

*„Wir sind vergnügt von Berlin 8h bis Cöln 6h30m gefahren. [. . .] In Cöln werden wir von drei baumlangen Offizieren empfangen, die den Übergang vom Feldwebel zum Geheimrat mit Mühe vollzogen. Unsere Leute bekamen schlechtes Quartier in der Luftschiffhalle. Süring<sup>9</sup> und ich waren im Hotel mit den Offizieren zusammen. Sie warteten alle auf die Führung zukünftiger Zeppeline und betrachteten es als eine angenehme Abwechslung, uns im Auto zu befördern.“*

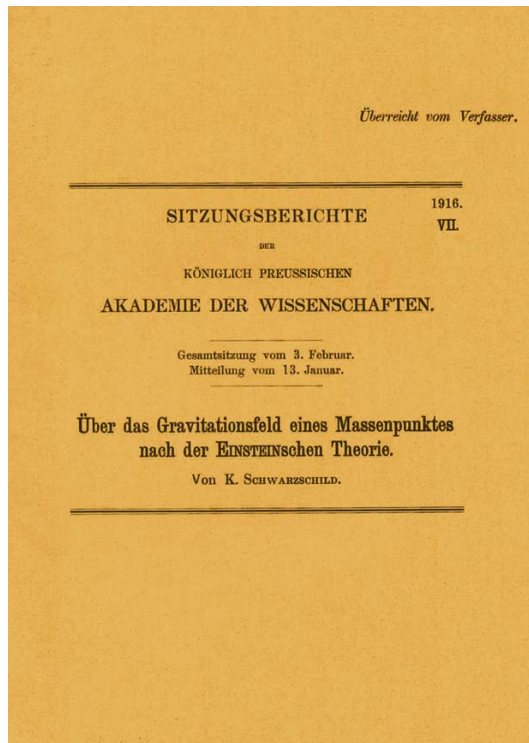
Am 15. September, in Namur angekommen „. . . ging's gleich nochmal auf die Stationssuche hinauf zur Citadelle, wo 50 m über der Stadt unmittelbar über den Häusern liegt. [. . .] Am äußersten Punkt steht ein achteckiges Häuschen mit Glasfenstern ringsherum, einigen Matratzen, einem Tisch, Tinte und Löschblatt darin, für uns wie geschaffen. Herrliche Aussicht über Stadt, Maas und Sambre. Direkt am Fuß der Citadelle in einer guten Vorstadt fanden wir auch bestes Quartier.“

Karl Schwarzschild blieb bis fast Ende 1915 in Namur. Dann bat er um Versetzung in die Artillerie und wurde dort zum Leutnant der Feldartillerie befördert. Erst kam er nach Frankreich (Argonne) und dann nach Russland. Als Mitglied des Artilleriestabes (Abb. 22) verfasste er eine Arbeit „Über den Einfluß von Wind und Luftdichte auf die Flugbahn eines

<sup>9</sup>Reinhard Joachim Süring (1866–1950) war der Begründer des Meteorologischen Observatoriums in Potsdam auf dem Telegrafenberg.

*Geschosses*“ für die Carl Crantz-Gesellschaft. Kriegsbedingt konnte diese Studie erst 1920 nach Beendigung des Ersten Weltkrieges veröffentlicht werden (Schwarzschild 1920).

Bemerkenswerterweise schrieb Schwarzschild einige seiner bedeutendsten astrophysikalischen Arbeiten während er 1915 „im Felde“ ist. Anfänglich wollte er die von Albert Einstein in seiner Allgemeinen Relativitätstheorie vorhergesagte Rotverschiebung der Spektrallinien durch die Gravitation an einer bestimmten Bande bei 3883 Å im Sonnenspektrum widerlegen, was jedoch nicht gelang. Dann erschien Ende 1915 Einsteins „endgültige“ Version der Allgemeinen Relativitätstheorie, in der dieser eine Erklärung für die zusätzliche Periheldrehung von Merkur von 43'' pro Jahrhundert geben konnte. Allerdings arbeitete Einstein mit einem Näherungsverfahren, auf dessen Problematik ihn Schwarzschild in einem Schreiben hinwies und darin seine Lösung mit der sogenannten „Schwarzschild-Metrik“ vorstellte. Die beiden Arbeiten, die er der Berliner Akademie der Wissenschaften vorlegte (Schwarzschild 1916a,b) waren wegweisend für die Weiterentwicklung der Allgemeinen Relativitätstheorie im 20. Jahrhundert.



**Abb. 23.** Titelseite der Arbeit über das Gravitationsfeld eines Massenpunktes (Schwarzschild 1916a).

Trotz schwerer Krankheit – im Felde war eine seit langem bestehende Autoimmunkrankheit (Pemphigus), die damals noch unheilbar war, ausgebrochen – schrieb Schwarzschild in März 1916 eine letzte wissenschaftliche Arbeit „Zur Quantenhypothese“ (Schwarzschild 1916c) und legte diese der Akademie in Berlin noch vor, bevor er sich ins Potsdamer Krankenhaus begeben musste, wo er wenige Wochen später am 11. Mai 1916 verstarb. Die Arbeit gibt eine

Berechnung für die Aufspaltung von Spektrallinien bei Atomen in einem elektrischen Feld, dem sogenannten Stark-Effekt<sup>10</sup>. Über die Theorie der Spektrallinien stand Karl Schwarzschild in ständiger Korrespondenz mit Arnold Sommerfeld (1868–1951). Schwarzschild betrachtete seinen Münchner Kollegen an der Ludwig-Maximilians-Universität als den „Kepler“ auf diesem Spezialgebiet der Atomphysik. Seinem Testament entsprechend wurde Karl Schwarzschilds Urne nach Göttingen überführt und am 16. Mai 1916 auf dem Hauptfriedhof der Stadt, in der er sich am wohlsten gefühlt hatte, beigesetzt (Abb. 24). Sein Nachlass, der um 1950 (anlässlich des Todes seiner Mutter) von seinem Sohn Martin Schwarzschild (1912–1997) der Universität Göttingen übergeben wurde, wird seitdem in der SUB Göttingen verwahrt.



**Abb. 24.** Das Familiengrab von Karl Schwarzschild 1973, geschmückt aus Anlass der Gedächtnisfeier zu seinem 100. Geburtstag (Archiv Universitäts-Sternwarte Göttingen/H.-H. Voigt 1973).

<sup>10</sup>Dessen Entdecker, der Physiker Johannes Stark, mutierte später zu einem der wortführendsten Einstein-Gegner der sogenannten „Deutschen Physik“ (Anmerkung der Herausgeber).

## Literatur

- Brenner, L. 1903, *Neue Spaziergänge durch das Himmelszelt. Astronomische Plaudereien mit besonderer Berücksichtigung der Entwicklungen der letzten Jahre*, Hermann Paetel, Berlin.
- Runge, C. 1907, *Ueber die Radioaktivität der Luft auf dem offenen Meere*, Nachrichten von der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse, Nr. 5, 211–229.
- Schwarzschild, K. 1890a, *Zur Bahnbestimmung nach Bruns*, Astronomische Nachrichten 124, S. 211–216.
- Schwarzschild, K. 1890b, *Methode zur Bahnbestimmung der Doppelsterne*, Astronomische Nachrichten 124, S. 215–218.
- Schwarzschild, K. 1892, *Beobachtungen von Veränderlichen Sternen und der Nova Aurigae auf der K. Universitäts-Sternwarte in Straßburg*, Astronomische Nachrichten 129, S. 399–404.
- Schwarzschild, K. 1895, *Definitive Bahnbestimmung des Cometen 1842 II*, Astronomische Nachrichten 137, S. 177–190.
- Schwarzschild, K. 1896a, *Ueber Messung von Doppelsternen durch Interferenzen*, Astronomische Nachrichten 139, S. 353–360.
- Schwarzschild, K. 1896b, *Ueber die Stabilität der Bewegung eines durch Jupiter gefangenen Cometen*, Astronomische Nachrichten 141, S. 1–8.
- Schwarzschild, K. 1896c, *Fixstern-Betrachtungen*, Beilage zur Allgemeinen Zeitung, München, Nr. 40, S. 4–6.
- Schwarzschild, K. 1897a, *Eine Sterngeburt*, Die Zeit, Wien, Band X, Nr. 122, S. 69–71.
- Schwarzschild, K. 1897b, *Was in der Welt ruht*, Die Zeit, Wien, Band XI, Nr. 142, S. 181–183.
- Schwarzschild, K. 1898a, *Ueber eine Classe periodischer Lösungen des Dreikörperproblems*, Astronomische Nachrichten 147, S. 17–24.
- Schwarzschild, K. 1898b, *Ueber weitere Classen periodischer Lösungen des Dreikörperproblems*, Astronomische Nachrichten 147, S. 289–298.
- Schwarzschild, K. 1898c, *Der Saturnring*, Die Zeit, Wien, Band XIV, Nr. 180, S. 165–168.
- Schwarzschild, K. 1900a, *Ueber das zulässige Krümmungsmaass des Raumes*, Vierteljahresschrift der Astronomischen Gesellschaft 35, S. 337–347.
- Schwarzschild, K. 1900b *Die Bestimmung von Sternhelligkeiten aus extrafocalen photographischen Aufnahmen*, Publikationen der von Kuffner'schen Sternwarte Wien, Band V, S. B1–B23.
- Schwarzschild, K. 1900c, *Beiträge zur photographischen Photometrie der Gestirne*, Publikationen der von Kuffner'schen Sternwarte Wien, Band V, S. C1–C135.
- Schwarzschild, K. 1901, *Der Druck des Lichts auf kleine Kugeln und die Arrhenius'sche Theorie der Cometschweife*, Sitzungsbericht der mathematisch-physikalischen Classe der Königlich bayerischen Akademie der Wissenschaften, Band 31, S. 293–338.
- Schwarzschild, K. 1902, *Die Beugung und Polarisation des Lichts durch einen Spalt. I*, Mathematische Annalen 55, S. 177–247.
- Schwarzschild, K. 1903a, *Zur Elektrodynamik. I.*, Nachrichten von der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse, Nr. 3, S. 126–131.
- Schwarzschild, K. 1903b, *Zur Elektrodynamik. II.*, *ibid.*, S. 132–141.
- Schwarzschild, K. 1903c, *Zur Elektrodynamik. III.*, *ibid.*, Nr. 5, S. 245–278.
- Schwarzschild, K. 1905a, *Untersuchungen zur geometrischen Optik. I.*, Astronomische Mitteilungen der Königlichen zu Sternwarte Göttingen 9, S. 1–31.
- Schwarzschild, K. 1905b, *Untersuchungen zur geometrischen Optik. II.*, *ibid.* 10. S. 1–28.
- Schwarzschild, K. 1905c, *Untersuchungen zur geometrischen Optik. III.*, *ibid.* 11, S. 1–54.
- Schwarzschild, K., Villiger, W. 1906a, *On the Distribution of Brightness of the Ultra-Violet Light on the Sun's Disk*, Astrophysical Journal 23, S. 284–305

- Schwarzschild, K., Villiger, W. 1906b, *Note on the Ultra-Violet Radiation of Sun-Spots and Faculae*, *ibid.*, S. 345–346.
- Schwarzschild, K., Kron, E. 1911, *Über die Helligkeitsverteilung im Schweif des Halley'schen Kometen*, Nachrichten von der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse, Nr. 3, 197–208
- Schwarzschild, K. 1912, *Zur Stellarstatistik*, *Astronomische Nachrichten* 190, S. 361–376.
- Schwarzschild, K., Meyermann, Br., Kohlschütter, A., Birck, O., Dziewulski, W. 1912, *Aktinometrie der Sterne der B.D. bis zur Grösse 7.5 in der Zone 0° bis +20° Deklination. B.*, Abhandlungen der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse, Neue Folge Band 8(4), S. 31–81.
- Schwarzschild, K. 1916a, *Über das Gravitationsfeld eines Massenpunktes nach der Einsteinschen Theorie*, Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, S. 189–196.
- Schwarzschild, K. 1916b, *Über das Gravitationsfeld einer Kugel aus inkompressibler Flüssigkeit nach der Einsteinschen Theorie*, Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, S. 424–434.
- Schwarzschild, K. 1916c, *Zur Quantenhypothese*, Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, S. 548–568.
- Schwarzschild, K. 1920, *Über den Einfluß von Wind und Luftdichte auf die Flugbahn der Geschosse*, Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, S. 37–63.
- Schwarzschild, S. 1929, *Die Familie Schwarzschild in Frankfurt a.M.*, in: *Jüdische Familienforschung*, Jahrgang V, Nr. 2 (Heft 18), Juni 1929.
- Voigt, H.-H. 1992, *Karl Schwarzschild: Gesammelte Werke/Collected Works*, Band 3, Abschn. 9, S. 252, Springer-Verlag.



Karl Schwarzschild (1873–1916):  
Ein Pionier und Wegbereiter der Astrophysik, 29–49  
Klaus Reinsch und Axel D. Wittmann (Hrsg.)  
© Universitätsverlag Göttingen 2017

# Karl Schwarzschild und die Anfänge der Sonnenphysik in Göttingen

Axel D. Wittmann<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Georg-August-Universität Göttingen, Institut für Astrophysik (i. R.)  
E-Mail: wittmann@astro.physik.uni-goettingen.de

**Zusammenfassung.** Es wird eine kurze Darstellung der Entwicklung der Astrophysik unter besonderer Betonung der Sonnenphysik gegeben, und es werden die Beiträge von Karl Schwarzschild beschrieben, durch die er schon in Wien, insbesondere aber als Direktor der Göttinger Universitäts-Sternwarte in den Jahren 1901–1909 und danach in Potsdam zum Mitbegründer der Astrophysik weltweit und zum Begründer der Astrophysik in Göttingen geworden ist. Es wird sodann kurz über die Entwicklung der Sonnenphysik in Göttingen in der Zeit von Schwarzschilds Weggang nach Potsdam bis etwa dem Jahre 1985 eingegangen, die wesentlich auch auf den Vorarbeiten und Ideen von Karl Schwarzschild aufgebaut hat.

**Summary.** A short account of the development of astrophysics with special emphasis on solar physics is given, and the contributions by Karl Schwarzschild are described by which he already in Vienna, but in particular as director of the University Observatory at Göttingen during the years 1901–1909 and after that at Potsdam became a co-founder of astrophysics worldwide, and the founder of astrophysics at Göttingen. This is followed by a brief report about the development of solar physics at Göttingen during the time between Schwarzschild's move to Potsdam and the time around 1985, which was also greatly influenced by the previous work and by the ideas of Karl Schwarzschild.

## 1 Einleitung

Karl Schwarzschild (1873–1916), über dessen Tätigkeit als Direktor der Göttinger Sternwarte und die Anfänge der Sonnenphysik in Göttingen ich hier hauptsächlich berichten möchte, war ein umgänglicher und kollegialer Mensch, der einmal sagte, er könne mit Leuten, die untertänig zu ihm aufschauten, nichts anfangen. „Seine Persönlichkeit besaß einen Zauber, dem sich niemand entziehen konnte und der wohl in erster Linie in der Vereinigung genialer Klugheit mit echter Herzengüte und einem zuweilen hervorleuchtenden jugendlichen Frohsinn begründet war“, schrieb Hans Ludendorff in seinem Nachruf über Karl Schwarzschild (Ludendorff 1916). „Er vereinigte die Meisterschaft der mathematischen Analyse mit dem tiefen Verständnis physikalischer Vorgänge und mit experimentellem und technischem Geschick“, so Carl Runge in seinem Nachruf (Runge 1916). „Ein durch und durch vornehmer Charakter, stets bereit zu raten und zu helfen“, sagte Gustav Müller in seiner Trauerrede in Potsdam am 13. Mai 1916 (Müller 1916), und kein Geringerer als Albert Einstein drückte es in seiner Gedächtnisrede auf Karl Schwarzschild am 29. Juni 1916 wie folgt aus: „Sel-

*ten ist ein so bedeutendes mathematisches Können mit so viel Wirklichkeitssinn und solcher Anpassungsfähigkeit des Denkens vorhanden gewesen wie bei ihm.“* (Einstein 1916b). Im Folgenden möchte ich mich weitgehend auf den Bereich der Sonnenphysik konzentrieren und dementsprechend die Literaturangaben auf eine Auswahl hierzu historisch bedeutsamer Arbeiten beschränken. Zu den historischen Quellen ist hier insbesondere auch die von Hans-Heinrich Voigt herausgegebene Gesamtausgabe der Werke Karl Schwarzschilds (Voigt 1992) zu nennen.

## 2 Anfänge der Sonnenbeobachtung in Göttingen

Die erste einigermaßen dokumentierte astronomische Beobachtung der Sonne in Göttingen war die Beobachtung der partiellen Sonnenfinsternis am Mittag des 25. Juli 1748. Aber zu dieser Zeit gab es noch keine Sternwarte in Göttingen, und die Astronomie war bis dahin noch kein akademisches Lehrfach. Die erste (*alte*) Göttinger Sternwarte wurde 1851 auf einem Turm der südlichen Stadtmauer errichtet und besaß keine zur Sonnenbeobachtung besonders geeigneten Teleskope. So war die Beobachtung der Sonnenfinsternis vom 19. November 1816 durch Carl Friedrich Gauß (1777–1855) an jener Sternwarte nicht zuletzt wegen des traditionell schlechten Wetters in Göttingen – die Sonne war ständig durch Schneewolken verdeckt – eine Enttäuschung. Auch an der 1816 in Betrieb gegangenen neuen Göttinger Sternwarte hat vor allem Gauß gelegentlich die Sonne beobachtet, aber fast immer nur deren Position in Stundenwinkel und Deklination mit dem Ziel der Bestimmung der Schiefe der Ekliptik, der wahren Sonnenzeit und der Bahn der Sonne als Widerspiegelung der Erdbahn und deren Parameter. Auch kann man die Exzentrizität der Erdbahnellipse aus dem scheinbaren Winkeldurchmesser der Sonne, wie ihn beispielsweise auch Gauß durch Transitmessungen 1819–1820 bestimmt hat (Wittmann 1998), und dessen jährlicher Variation bestimmen, und natürlich die Umlaufzeit bzw. Jahreslänge aus deren Wiederkehr. Aber das waren alles Beobachtungen im Rahmen der klassischen Astronomie und der Himmelsmechanik, nicht aber der Astrophysik: Gauß war zwar astronomisch und physikalisch auf der Höhe der Zeit, aber in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts gab es eben noch nicht die Voraussetzungen – wie zum Beispiel die Photographie – um Gauß zum Begründer der Astrophysik in Göttingen machen zu können.

## 3 Die Anfänge der Astrophysik

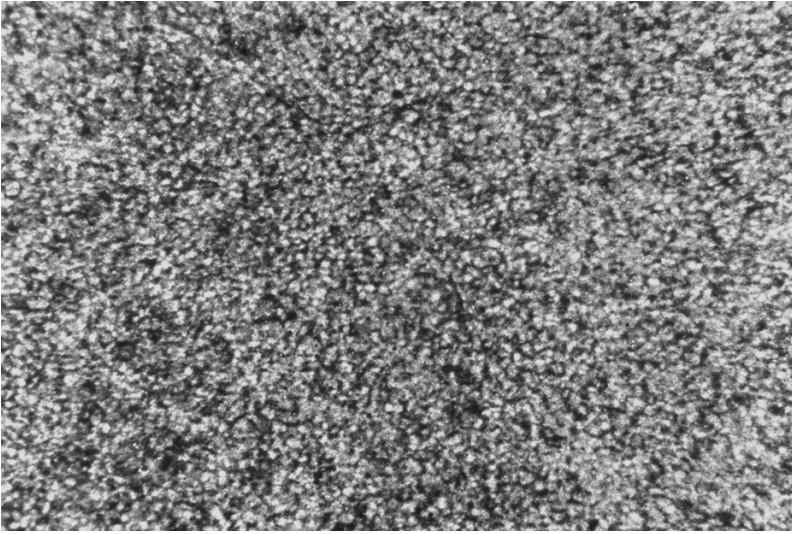
Spätestens wenn man an einem heißen Sommertag an einem südlichen Strand in der Sonne liegt, muss einem – angesichts von deren riesiger und seit langem bekannter Entfernung und angesichts des quadratischen Abstandsgesetzes für die Bestrahlungsstärke – klar werden, dass die Sonne an ihrer Oberfläche ganz außerordentlich heiß sein muss, so dass zum Beispiel eine Bewohnbarkeit der Sonne, wie sie William Herschel (1738–1822) und andere noch um 1800 für möglich hielten (von der immensen Schwerkraft, auf die Gauß in diesem Zusammenhang hingewiesen hat, ganz abgesehen), völlig ausgeschlossen ist. Oder dass Sonnenflecken in einer Flüssigkeit herumschwimmende, sich im Sinne der 1859 von Richard Christopher Carrington (1826–1875) entdeckten differentiellen Rotation bewegende, kühle schwarze Schlacken seien, wie es noch bis 1870 vereinzelt vertreten wurde, z.B. Zöllner (1870), S. 232. Vielmehr ist die Sonne eine heiße, elektrisch insgesamt neutrale Gaskugel,

die im Wesentlichen aus teilionisiertem Wasserstoff und Helium besteht und daher mit Hilfe der Gesetze der Gas- und Plasmaphysik modelliert werden kann. Beispielsweise muss in der Sonnenatmosphäre, wie auch in der Erdatmosphäre, der Druck in jeder gegebenen Höhe durch das Gewicht der darüber liegenden Schichten aufgebaut und erzeugt werden. Während jedoch die Erdatmosphäre einigermaßen gut als isotherm behandelt werden kann, muss im Falle der Sonnenatmosphäre eine stark nach innen hin anwachsende Temperatur – also eine „Temperaturschichtung“ – berücksichtigt werden.

Sonnenfinsternisse wurden schon seit Urzeiten beobachtet, aber das war natürlich noch keine Astrophysik: Um Astrophysik machen zu können, braucht man zumindest die Photographie und die (analytische) Spektroskopie, und beides stand vor Mitte des 19. Jahrhunderts noch nicht zur Verfügung. Immerhin hat Gauß auch Sonnenflecken und deren Positionen beobachtet, aber recht bald die Lust dazu verloren, weil die Sonnenflecken ihm zu unregelmäßig und nicht gesetzmäßig genug auftraten. Hätte er diese Beobachtungen länger durchgehalten, hätte er möglicherweise statt des Dessauer Apothekers Samuel Heinrich Schwabe (1789–1875) im Dezember 1843 (Schwabe 1844) zum Entdecker der 11-jährigen (eigentlich 22-jährigen magnetischen) Periodizität der Sonnenflecken werden können. Zur Zeit von Gauß' Nachfolgern Wilhelm Klinkerfues (1827–1884) und Wilhelm Schur (1846–1901), also in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts, wurden in Göttingen kaum Beobachtungen der Sonne angestellt, ausgenommen Messungen des Sonnendurchmessers durch Wilhelm Schur und Leopold Ambronn (1854–1930), die Ambronn nach Schurs Tod ausgewertet und veröffentlicht hat. Aber auch dies war noch Astrometrie und keine Astrophysik.

Die Entstehung der Astrophysik als eigenständiger Wissenschaft verdanken wir einer Vielzahl von Wissenschaftlern, angefangen im Jahre 1814 mit der ersten genauen Vermessung der – später nach ihm benannten – Absorptionslinien im Sonnenspektrum durch Josef von Fraunhofer (1787–1826) und dessen Erfindung des Gitterspektrographen. 1838 erfolgten die ersten quantitativen Messungen der Solarkonstante ( $1,23 \text{ kW/m}^2$ , heutiger Wert:  $1,36 \text{ kW/m}^2$ ) durch Claude Pouillet (1790–1868). Am 2. April 1845 gelang Armand Hippolyte Fizeau (1819–1896) und Léon Foucault (1819–1868) die erste gute Daguerreotypie der Sonne, und am 28. Juli 1851 konnte Julius Berkowski (ca. 1810–ca. 1892) in Königsberg (dem heutigen Kaliningrad) die erste korrekt belichtete Daguerreotypie der Korona aufnehmen (vgl. Schielicke und Wittmann 2016). Um 1860 gelangen Lewis Morris Rutherfurd (1816–1892) in New York die ersten einwandfreien Photographien des Mondes und insbesondere der Sonne (vgl. Secchi 1872, Titelbild), und 1868 wandte William Huggins (1824–1910) den 1842 von Christian Doppler (1803–1853) gefundenen Dopplereffekt erstmals – wenn auch noch mit unsicheren Resultaten – zur Messung der Radialgeschwindigkeit von Sternen an (Huggins 1868). Um 1859 hatten Gustav Kirchhoff (1824–1887) und Robert Bunsen (1811–1899) die Spektralanalyse entwickelt, welche die Identifikation der strahlenden oder absorbierenden Atome bzw. Moleküle auch in sehr weit entfernten Sternen gestattet, und um 1870 entwickelten Pierre Jules Janssen (1824–1907), Norman Lockyer (1836–1920), Karl Friedrich Zöllner (1834–1882) und andere spektroskopische Methoden zur Beobachtung von Protuberanzen außerhalb totaler Sonnenfinsternisse (zu Details vgl. Secchi (1872), S. 441–472). Am 2. September 1883 gelang Jules Janssen die erste großräumige und gut aufgelöste Aufnahme der Sonnengranulation (Abb. 1).

1882 äußerte Charles Augustus Young (1834–1908) eine erste, geradezu prophetische Vermutung in Bezug auf den Sonnenwind; ich zitiere aus Young (1883): *„Der Einfluss der Sonnenstürme auf den Erdmagnetismus ist wahrscheinlich ein mehr unmittelbarer, vielleicht*



**Abb. 1.** Photographie der Sonnengranulation, aufgenommen von Pierre Jules Janssen am 9. September 1883 am Observatoire de Meudon (aus: Janssen (1896), Planche I).

*in irgendeiner Weise mit der Ursache verwandt, welche die Materie der Kometenschweife fortreibt, und die beweist, daß im Weltraum außer der Gravitation noch andere Kräfte wirksam sind.*“ Im Magnetfeld der Erde hatte man schon seit den frühen Messungen von Gauß und Weber (um 1836) Störungen („Stürme“) beobachtet, bei denen sich im Laufe der Jahre die Evidenz für einen Zusammenhang mit dem Auftreten von Sonnenflecken und Eruptionen („Flares“ bzw. „koronalen Massenauswürfen“), vgl. Maunder (1905a,b), sowie in offensichtlicher Weise mit der Rotationsperiode der Sonne immer mehr verdichtete. Aber erst Ludwig Biermann (1907–1986) gelang es, einen Nachweis der Beobachtungsbefunde auf mathematisch-plasmatheoretischer Grundlage zu erarbeiten (Biermann 1951). Und 1958 publizierte Eugene Newman Parker (geb. 1927) das erste selbstkonsistente MHD-Modell des Sonnenwindes (Parker 1958).

Ab dem Jahre 1902 maß Charles Greeley Abbott (1872–1973) langzeitlich die Solarkonstante, 1908 konnte George Ellery Hale (1868–1938) den – zuvor als Dopplereffekt gedeuteten – Zeeman-Effekt im Magnetfeld der Sonnenflecken anhand der Aufspaltung und Polarisation von Spektrallinien nachweisen (vgl. Schwarzschild 1914a), und um 1916 vermuteten Arthur Stanley Eddington (1882–1944), Henry Norris Russell (1877–1957), Karl Schwarzschild und andere „subatomare Prozesse“ als Quelle der Sonnenenergie nach der von Albert Einstein entdeckten Beziehung  $E = mc^2$  (Einstein 1905): In seinem „Rechenbuch“ (Cod. Ms. K. Schwarzschild 3:2) hat Schwarzschild auf Blatt 161/v für  $m$  den Wert  $M(\text{Sonne})$  eingesetzt und unter Zugrundelegung des damaligen Wertes der Leuchtkraft der Sonne eine Lebensdauer der Sonne von  $10^{21}$  Sekunden (versehentlich steht dort „Jahre“) oder etwa  $10^{13}$  Jahren errechnet. Allerdings kannte er den Massendefekt der beiden Kernfusionsreaktionen in der Sonne (pp-Zyklus und Bethe-Weizsäcker-Zyklus) von etwa 0,07% noch nicht, vgl.

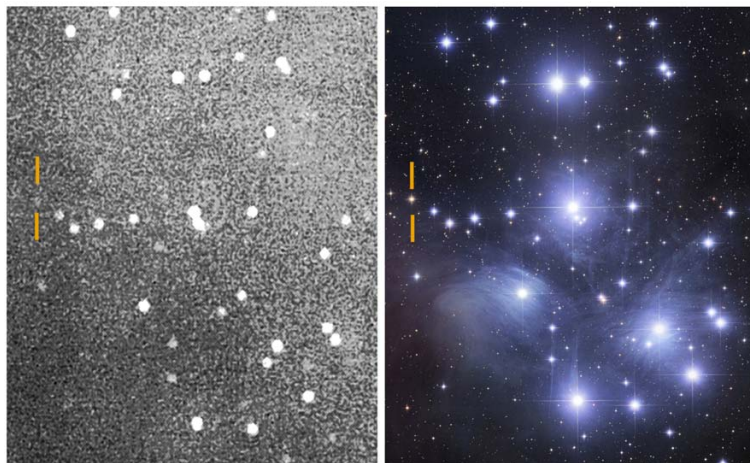
u.a. von Weizsäcker (1937/38)<sup>1</sup>, Gamow (1939), Bethe (1939). Daneben gab es die Weiterentwicklungen von Messgeräten, Messmethoden und Theorien in der Physik: Es war also eine große Zahl engagierter Wissenschaftler, denen wir die Entstehung der Astrophysik verdanken.

#### 4 Anfänge der Astrophysik in Göttingen

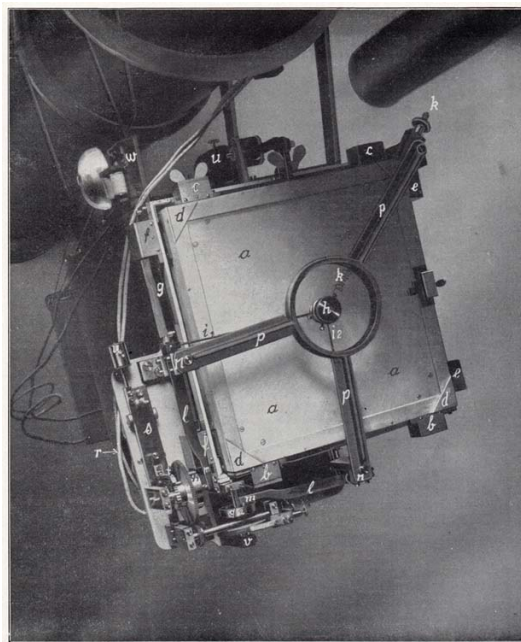
Vor Schwarzschild gab es keine Astrophysik in Göttingen. Sein Amtsvorgänger Wilhelm Schur war ein klassischer Astronom par excellence, und erst Karl Schwarzschilds Verdienst war es, dass er die Bedeutung der in Abschnitt 3 geschilderten Entwicklungen erkannte und zudem über die mathematischen und physikalischen Fähigkeiten verfügte, die Grundlagen der Astrophysik einschließlich der Physik der Sonne weiter zu entwickeln. Da zu dieser Zeit einwandfrei arbeitende photoelektrische bzw. elektronische Detektoren noch nicht zur Verfügung standen, waren Schwarzschild und dessen Zeitgenossen auf die Anwendung der photographischen Photometrie angewiesen, deren Grundlagen Karl Schwarzschild schon zu seiner Wiener Zeit ganz wesentlich erweitert und verbessert hatte (Schwarzschild 1887, 1900). Die um 1840 von Louis Mandé Daguerre (1887–1851) entwickelte Daguerreotypie benötigte so lange Belichtungszeiten, dass sie auf den nächtlichen Sternhimmel noch nicht anwendbar war, und erst in den 1880er Jahren wurden Photoplatten verfügbar, die Himmelsaufnahmen an Teleskopen gestatteten. So war Schwarzschild während seiner Zeit an der Kuffner-Sternwarte in Wien der erste, der die Wirkung des Sternlichts auf photographische Schichten quantitativ mit dem Ziel untersuchte, Sternhelligkeiten photographisch zu messen. Er fand dabei heraus, dass die von einer bestimmten Intensität  $I$  während der Belichtungszeit  $t$  auf der Photoplatte erzeugte Schwärzung bei den in der Astronomie erforderlichen längeren Belichtungszeiten nicht – wie zunächst von Bunsen und Roscoe (Bunsen & Roscoe 1862) angenommen – proportional zur „Belichtung“  $I \cdot t$  ist, sondern proportional zu  $I \cdot t^p$ , mit  $p$  etwa 0,84 (der Schwarzschild-Exponent  $p$  ist je nach Emulsion und Wellenlänge etwas verschieden). Dies ist das „Schwarzschildsche Schwärzungsgesetz“. Es bedeutet, dass z.B. die doppelte Intensität mit der halben Belichtungszeit eine größere Schwärzung erzeugt als die halbe Intensität mit der doppelten Belichtungszeit. Schwarzschild fand auch, dass das Gesetz ab einer bestimmten Maximalintensität bzw. Belichtung nicht mehr gilt, und dass bei noch höheren Intensitäten die Schwärzungen sogar wieder abnehmen („Schwarzschild-Effekt“). Um die Schwärzungen der nahezu punktförmigen Abbildungen der Sterne auf der Photoplatte genauer messen zu können, erprobte Schwarzschild verschiedene Methoden (Defokussierung in Wien, Abb. 2 links; eine Schraffierkassette in Göttingen, Abb. 3), um diese zu vergrößern und sogar als kleine Rechtecke abbilden zu können (Abb. 2, man beachte die schwache Abbildung der roten Sterne – ein Beispiel ist markiert – auf der blauempfindlichen Platte im linken Bild), vgl. auch (Habison 1999)).

Im Rahmen seiner noch in Wien erarbeiteten Doktorarbeit wandte Schwarzschild dieses Verfahren auf Sternhaufen und auf Veränderliche Sterne an und bestimmte so als erster genaue Lichtkurven der Sterne  $\beta$  Lyrae und  $\eta$  Aquilae (Abb. 4). Der erstgenannte ist ein spektroskopischer Bedeckungsveränderlicher mit einer Periode von etwa 12,91 Tagen, der zweitgenannte ist ein Überriese vom Typ  $\delta$  Cephei und hat eine konstanten Periode von 7,177 Tagen. Nachdem Karl Schwarzschild sich 1899 in München habilitiert hatte, wurde er (nach-

<sup>1</sup>worüber von Weizsäcker am 8. Januar 1938 in der Göttinger Sternwarte vorgetragen hat.

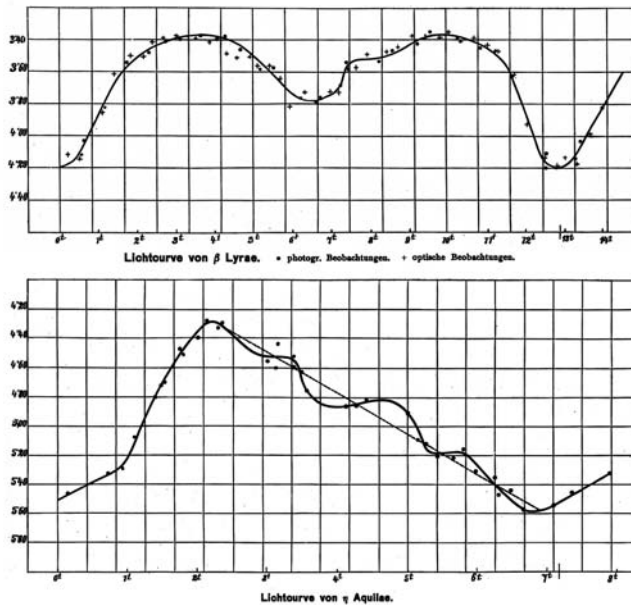


**Abb. 2.** Sternhaufen der Plejaden. Links: Schwarzschild 1898 (Archiv der Kuffner-Sternwarte Wien, aus: Hentschel und Wittmann 2000, S. 111). Rechts: Aufnahme von Robert Gendler/USA vom 3. September 2012 (mit freundlicher Genehmigung).



**Abb. 3.** Die in Göttingen verwendete Schraffierkassette (aus: Schwarzschild et al. 1910, Tafel I).

dem zwei andere Kandidaten abgesagt hatten) im Jahre 1901 als außerordentlicher Professor für Astronomie und Direktor der Sternwarte nach Göttingen berufen und 1902 zum Ordina-



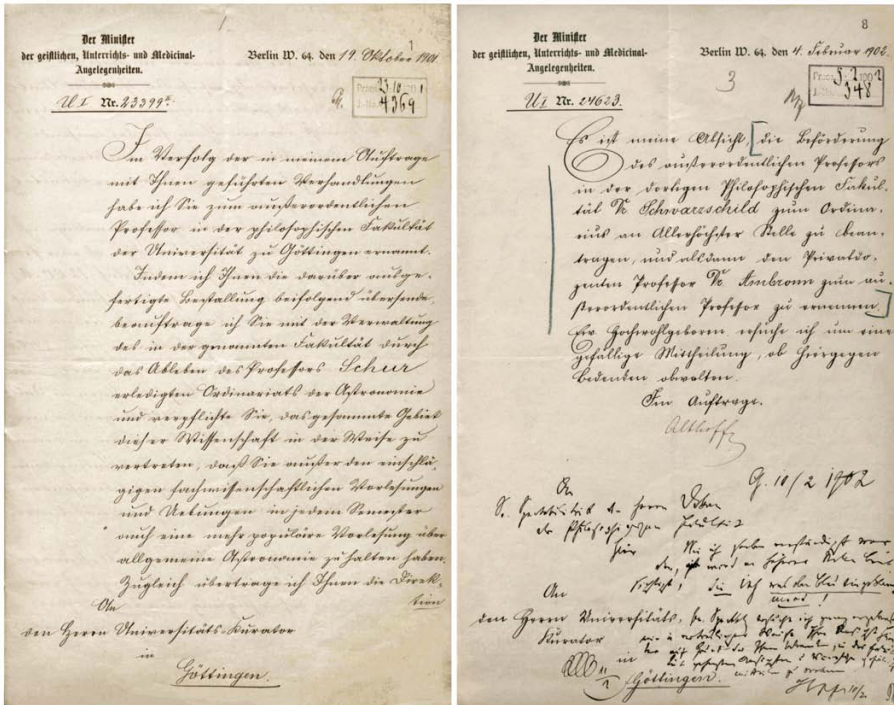
**Abb. 4.** Lichtkurven der Sterne  $\beta$  Lyrae (oben) und  $\eta$  Aquilae (unten) (Schwarzschild 1900, S. 123, Repro: Verfasser).

rius ernannt (Abb. 5). Vom 4. bis 7. August 1902 leitete er die Tagung der Astronomischen Gesellschaft in Göttingen, an der insgesamt 108 Personen, darunter 63 Fachastronomen, teilgenommen haben (Abb. 6).

## 5 Beobachtung der totalen Sonnenfinsternis von 1905

Schwarzschilds erste nähere Beschäftigung mit der Sonne erfolgte anlässlich der totalen Sonnenfinsternis vom 30. August 1905 in Algerien (Abb. 7), zu der er eine Expedition ausrüstete, die von Hamburg aus nach Algier in See stach, und die er im römischen Amphitheater der Stadt Guelma zusammen mit Robert Emden (1862–1940)<sup>2</sup>, dem Mathematiker Carl Runge (1856–1927) und lokalen Helfern – darunter einem geschickten örtlichen Photographen namens Henry – beobachtete. In einem Zelt in der Nordwestecke des Amphitheaters (Abb. 8) hatten sie auf einer Repsoldschen Nachführmontierung mehrere Kameras installiert: Eine davon mit UV-Objektiv und einem Prisma zur Aufnahme des Flash-Spektrums der Chromosphäre auf Photoplatten, eine weitere ohne Prisma für Aufnahmen im Weißlicht auf Photoplatten, und eine dritte mit Rollfilm. Die Totalität dauerte 3 Minuten und 38 Sekunden. Die Platten und Filme wurden in der Dunkelkammer des örtlichen Photographen entwickelt (Abb. 10) und in Göttingen mit einem Hartmannschen Mikrodensitometer registriert. Die Eichung der Schwärzungen  $\log(1/T)$  und deren Umwandlung in Intensitäten  $I$  erfolgte mit einem photometrischen Keil und mittels Helligkeitsvergleich der abgeblende-

<sup>2</sup>Verfasser der berühmten Monographie „Gaskugeln“ (Emden 1907), vgl. auch Emden (1901).



**Abb. 5.** Links: Blatt 1 des 3 Seiten umfassenden Berufungsschreibens zum Direktor der Sternwarte vom 19.10.1901. Rechts: Erennungsschreiben zum Ordinarius vom 04.02.1902. (Universitätsarchiv Göttingen, Repro: U. Hunger).

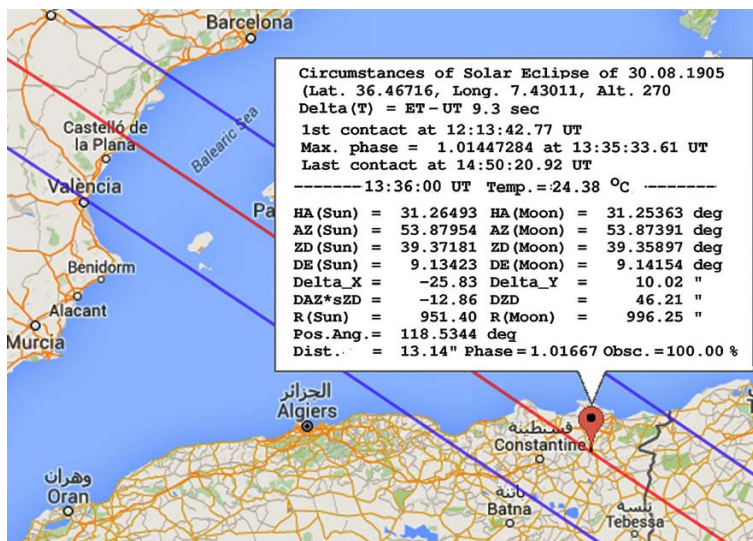
ten Sonne mit dem Mond. Die Ergebnisse publizierte Schwarzschild in einer fundamentalen Arbeit (Schwarzschild (1906b)); hier seien nur die wichtigsten angegeben:

- Messung des Helligkeitsverlaufs der äußeren Korona bis zu einem Abstand von 3,2 Sonnenradien.
- Messung des Intensitätsverhältnisses Sonne/Mond bei 455 nm = 14,4 mag = Faktor 575400.
- Gesamthelligkeit der Korona (Abb. 9): -16,3 mag = 0,302 Millionstel der Sonne bzw. -1,9 mag = 0,174 des Mondes.
- Intensität des Sonnenrandes bei 455 nm = 0,17 (= 17% der Scheibenmitte).
- Spektren der Photosphäre, Chromosphäre (Abb. 9) und Korona im UV, daraus ein Verzeichnis von 274 Linien im Wellenlängenbereich zwischen ca. 320 und ca. 460 nm.
- Messung der „Helligkeit“ der Balmerlinien  $H\beta$  (486,130 nm) und  $H\gamma$  (434,046 nm) in vier Protuberanzen, sowie in den CaII-Resonanzlinien K (393,365 nm) und H (396,847 nm).
- Photographische Vermessung des Mondrandprofils, d.h. der „Berge und Täler“ am Mondrand.



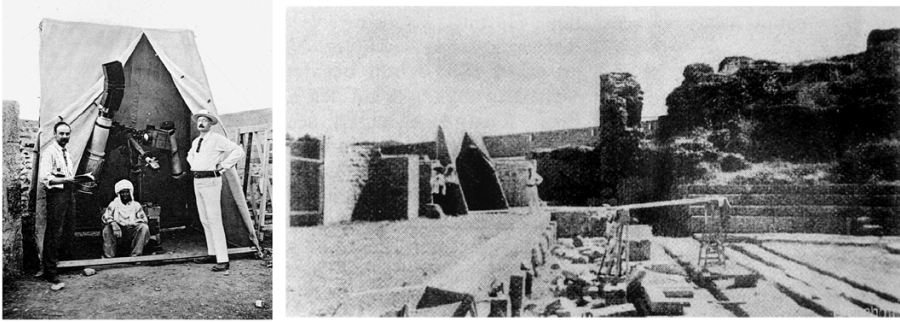


**Abb. 6.** Die Teilnehmer und Teilnehmerinnen der Tagung der Astronomischen Gesellschaft in Göttingen 1902 (Archiv Institut für Astrophysik Göttingen, Repr: Verfasser).

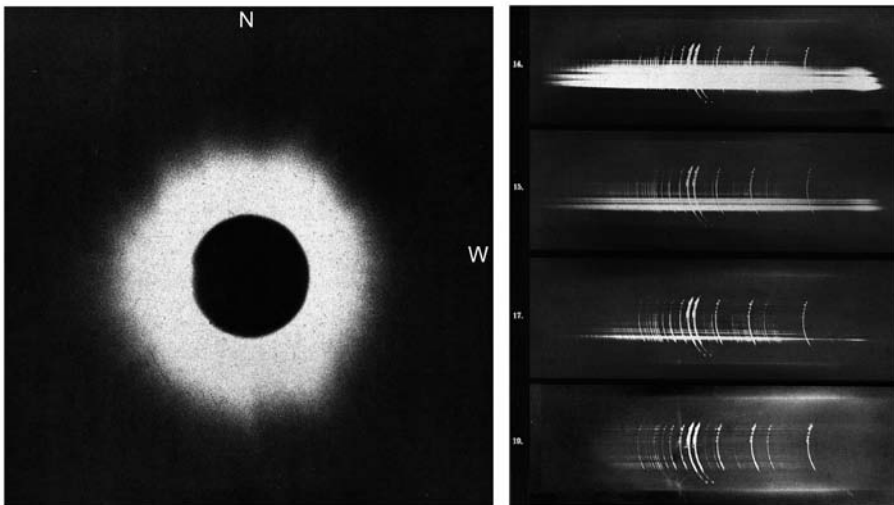


**Abb. 7.** Die Totalitätszone vom 30. August 1905. In die Karte der Totalitätszone sind die vom Verfasser berechneten Daten des topozentrischen Finsternisverlaufes für den Ort des Amphitheatrs in Guelma eingefügt. Der Verlauf der Totalitätszone in der untergelegten Karte (Grafik: NASA/GSFC) wurde von Fred Espenak, NASA Goddard Space Flight Center, berechnet (Grafik: Verfasser).

Die letztgenannten Daten sind von Bedeutung für die Berechnung von Kontaktzeiten, für das Perlschnurphänomen, usw. Schwarzschild traf auch die wichtige Feststellung, dass Zeich-



**Abb. 8.** Das Beobachtungszelt im alten römischen Theater von Guelma (Photo: R. Emden). Links: Schwarzschild, ein Helfer und Runge am Zelt. Rechts: Hinten links von der Mitte das Zelt im Amphitheater (aus: Schwarzschild 1906b, Tafel I (links); Schwarzschild 1905, Fig. 1 (rechts)).

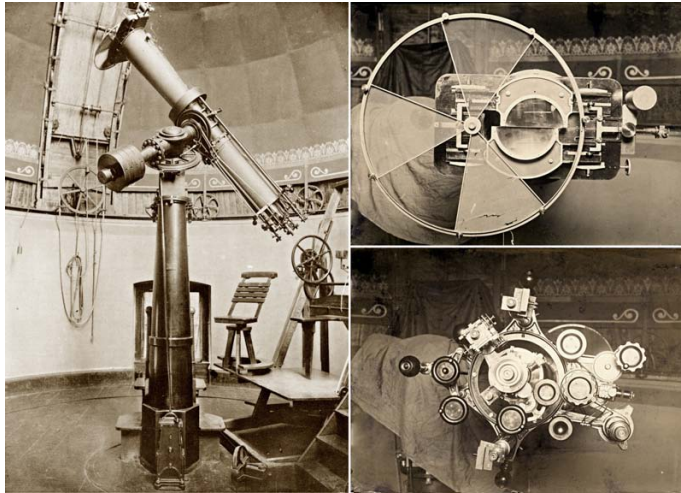


**Abb. 9.** Links: Die Korona am 30. August 1905. Photographie von Schwarzschild und Mitarbeitern. Rechts: Flashspektrum der Chromosphäre im Wellenlängenbereich von 330 nm (links) bis 490 nm (rechts) (aus: Schwarzschild 1906b, Tafel I, Tafel III, Repro und Positivtransformation: Verfasser).

nungen der Korona im allgemeinen wenig aussagekräftig sind, weil kaum jemand deren Struktur in den zwei oder drei Minuten der totalen Phase naturgetreu und exakt zeichnen kann. Ein Vergleich der (im Vortrag gezeigten) Korona-Zeichnungen verschiedener Beobachter vom 30. August 1905 belegt diese Aussage sehr deutlich.

Das 1888 in der Kuppel der Göttinger Sternwarte aufgestellte und bis 1926 betriebene, in erster Linie für nachtastronomische und astrometrische Zwecke eingesetzte Repsoldsche Heliometer mit einer Öffnung von 16,2 cm (Abb. 10) benutzte unter anderem Schwarzschilds Mitarbeiter Leopold Ambrohn zur Messung des Winkeldurchmessers der Sonne als Funktion

der Zeit. Den mittleren Winkelradius der Sonne bestimmte Ambronn (1905) zu  $(959,985 \pm 0,019)''$ , die Abplattung zu  $(-0,0195 \pm 0,014)''$ , also leicht aber nicht signifikant prolat.<sup>3</sup>



**Abb. 10.** Das große Heliometer von Repsold in der Kuppel der Göttinger Sternwarte um 1900 (Photos: H. Berger, Archiv Institut für Astrophysik Göttingen).

## 6 Die Außenschichten (die „Atmosphäre“) der Sonne

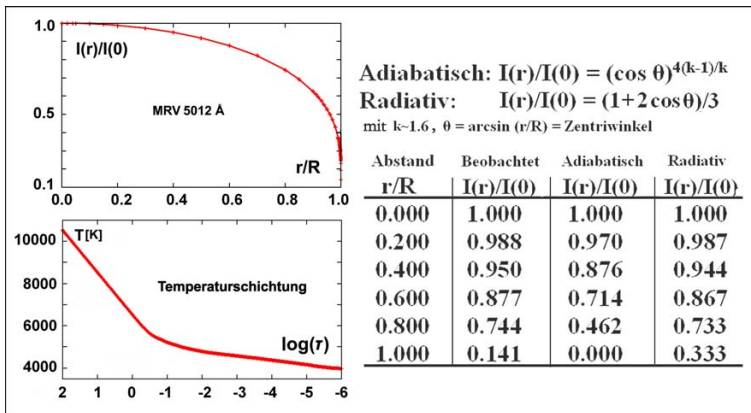
Die weltweit erste fundamentale Untersuchung über den Aufbau der Außenschichten der Sonne veröffentlichte Karl Schwarzschild im Jahre 1906 in den Mitteilungen der Königlichen Sternwarte Göttingen (Schwarzschild 1906a). Darin führte er das „Strahlungsgleichgewicht“ zusätzlich zum „isothermen Gleichgewicht“ und zum „adiabatischen Gleichgewicht“ ein, wobei „Gleichgewicht“ sich auf die im Mittel offensichtlich stabile hydrostatische Schichtung der Sonnenatmosphäre, also insbesondere der sichtbaren Schicht der Photosphäre, bezieht, die bekanntlich weder schrumpft noch nach außen abströmt. Bei der Definition des Gleichgewichts ist noch zwischen dem mechanischen „Kraftgleichgewicht“ (dem hydrostatischen Gleichgewicht) und dem „energetischen Gleichgewicht“ hinsichtlich der Energiebilanz (dem Strahlungsgleichgewicht) zu unterscheiden: „Isothermes“ und „adiabatisches“ Gleichgewicht beziehen sich auf ein hydrostatisches Gleichgewicht unter der Annahme einer isothermen oder adiabatischen Temperaturschichtung. „Strahlungsgleichgewicht“ bezieht sich auf eine ausgeglichene Bilanz zwischen emittierter, gestreuter und absorbierter Strahlung. Das hydrostatische Gleichgewicht wird für jedes Atmosphärenmodell immer angenommen, auch bei Konvektion.

Schwarzschild legte in dieser Arbeit dar, dass man aus der beobachteten Randverdunkelung der Sonne, der sogenannten „Mitte-Rand-Variation“, auf die Temperaturverteilung mit der Tiefe schließen kann: Außen am Sonnenrand blickt man in Bezug auf die „optische Tiefe“ in höhere Schichten, und da dieser Bereich stetig abnehmend dunkler als die Scheibenmitte

<sup>3</sup>heutiger Wert:  $(+0,0107 \pm 0,0004)''$ .

ist, nimmt die Temperatur (aber auch die Dichte) mit der Höhe ab. Die genaue Durchrechnung ergibt, dass in den tiefen Schichten (einige hundert km unter der „Oberfläche“ der Photosphäre) konvektives Gleichgewicht herrscht (die Energie also durch turbulente Durchmischung brodelnder und aufsteigender Strömungszellen transportiert wird), während in den höheren Schichten (in Höhen oberhalb der optischen Tiefe 1,0 bei der Wellenlänge 500 nm) Strahlungsgleichgewicht herrscht: Dort wird die Energie ganz überwiegend nicht durch Materiebewegung, sondern durch elektromagnetische Strahlung transportiert, und zwar sowohl im Kontinuum zwischen den Linien als auch in den Spektrallinien (den „Fraunhoferlinien“).

Setzt man die für diese beiden Fälle von Schwarzschild angegebenen Formeln ein, so ergibt sich – etwas abhängig davon, ob man das Gas als einatomig oder mehratomig annimmt – die in Abb. 11 rechts gezeigte Tabelle für die Mitte-Rand-Variation der Intensität im sichtbaren Spektralbereich. Die äußersten Schichten der Sonne (die Schichten der Photosphäre) sind also, wie Schwarzschild als erster erkannt und nachgewiesen hat, im Strahlungsgleichgewicht. Für den Übergang vom Strahlungsgleichgewicht zum konvektiven Gleichgewicht, also das Einsetzen der Turbulenz in den tieferen Schichten, die sich nach außen durch die Granulation der Photosphäre zu erkennen gibt, leitete Schwarzschild eine mathematische Bedingung ab, die als „Schwarzschild-Kriterium“ bezeichnet wird.

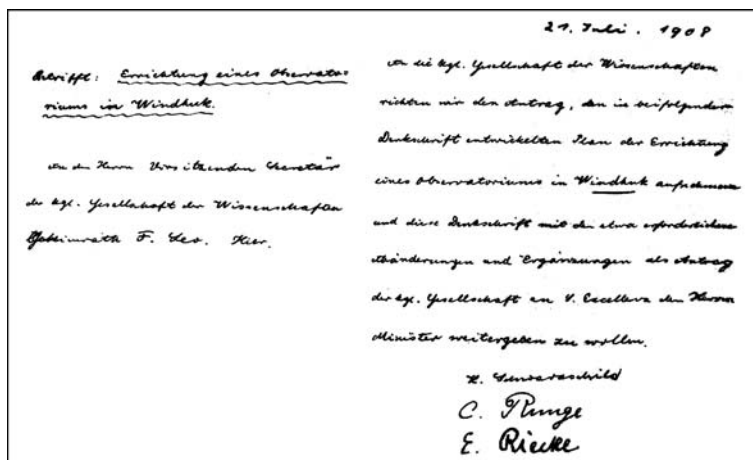


**Abb. 11.** Mitte-Rand-Variation (MRV) und Temperaturschichtung der Photosphäre. Links oben: Die gemessene MRV im Kontinuum bei einer Wellenlänge von 5012 Å. Links unten: Die Temperaturschichtung der Photosphäre (Temperatur  $T$ [K] als Funktion der optischen Tiefe  $\tau(5000 \text{ Å})$  nach der Modellatmosphäre von Holweger (1967)). Rechts: Formeln und Tabelle nach Schwarzschild (1906a). Erläuterung siehe Text (Grafik: Verfasser).

Diese wird aus dem sogenannten „Blasenmodell“ abgeleitet: Ist die Abnahme der Temperatur (und damit die Zunahme der Dichte) innerhalb einer aufsteigenden Gasblase, die im Druckgleichgewicht mit ihrer Umgebung angenommen wird, ohne Wärmeaustausch mit der Umgebung (der sogenannte „adiabatische Temperaturgradient“) größer als die Abnahme der Temperatur in der Umgebung (mathematisch also:  $\nabla_{\text{ad}} > \nabla$  mit  $\nabla = (d \ln T / d \ln p)$ ), so kühlt die anfangs „zu heiße“, aufsteigende Gasblase entsprechend ab und fällt wieder ein Stückchen zurück. Diese Oszillation ist aber sozusagen infinitesimal, d.h. es herrscht „Ruhe“ und damit Strahlungsgleichgewicht (zu Details vgl. z.B. Vitense 1953). Entsprechend

ist die Atmosphäre konvektiv-instabil, wenn  $\nabla_{\text{ad}} < \nabla$ . Die Rückströmung der voll ausgebildeten Konvektion ist in diesem einfachen Modell nicht enthalten: Beim Schwarzschild-Kriterium geht es nur um die grundsätzliche Instabilität, die die Konvektion antreibt. Heute wissen wir, dass die konvektive Außenschicht der Sonne, die sogenannte „Wasserstoff-Konvektionszone“, in wenigen hundert km Tiefe unter der Photosphäre beginnt und sich bis in eine Tiefe von etwa 200000 km (also über etwas mehr als das äußere Viertel des Sonnenradius) erstreckt.

Am 21. Juli 1908 stellte Karl Schwarzschild zusammen mit Carl Runge und Eduard Riecke (1845–1915) einen Antrag auf Errichtung einer Außenstation auf der Südhalbkugel in Windhuk/Südwestafrika (heute Windhoek/Namibia) über die Göttinger Akademie (damals: Kgl. Gesellschaft) der Wissenschaften nach Berlin. Dem Antrag (Abb. 12) konnte „aus Mangel an Mitteln im Staatshaushalt“ nicht stattgegeben werden.



**Abb. 12.** Ausschnitt aus Blatt 1 des 25 Seiten umfassenden Antrages auf eine Außenstation in Windhuk. Archiv der Akademie der Wissenschaften zu Göttingen (Repro und kompaktere Abbildung der Textflächen: Verfasser).

Im Jahre 1906 hat Walter Villiger (1872–1938), der seit 1902 Leiter der Astro-Abteilung bei der Firma Carl Zeiss in Jena war, mit einer auf die Wellenlänge 322 nm eingestellten UV-Kamera eine größere Zahl von Sonnenaufnahmen angefertigt, die Karl Schwarzschild und Mitarbeiter in Göttingen in Zusammenarbeit mit Villiger photometriert und ausgewertet haben. Dabei ergab sich eine Abflachung bzw. Wiederzunahme der zum Blauen hin zunächst immer steiler werdenden Mitte-Rand-Variation nahe dem Rand im UV, die man damals natürlich noch nicht erklären oder nachrechnen konnte, da der Verlauf des dafür maßgeblichen kontinuierlichen Absorptionskoeffizienten als Funktion der optischen Tiefe noch nicht bekannt war.

Schwarzschild und Villiger (1905, 1906a,b) haben wohl auch als erste recht genaue Streulicht-korrigierte relative (d.h. auf die Photosphäre der Umgebung skalierte) Intensitäten der Umbren von Sonnenflecken (11–14 %) und von Sonnenfackeln (120–130 %) auf diesen Platten gemessen, was deshalb bemerkenswert ist, weil man noch bis in die 1960er Jahre dem Streulichteinfluss zu wenig Beachtung schenkte und damals – zu meinen Studienzeiten

– Umbraintensitäten von 30 bis 40 % durchaus noch handelsüblich waren. Allerdings konnte man erst später mit Kurzzeitbelichtungen an großen Sonnenteleskopen die Feinstrukturen der Umbra („umbral dots“) und der Fackelgebiete („filigree“) auflösen, die zu einer erheblichen Variation der Intensitäten innerhalb dieser Gebiete führen. Und für die Photosphäre wurden später immer genauere Modelle entwickelt, wie etwa das von Hans-Heinrich Voigt (geb. 1921) 1956 und in den Folgejahren in Göttingen entwickelte Dreistrom-Modell, das als eines der ersten den inhomogenen Aufbau der Granulation im Spektrum berücksichtigte (Voigt 1956).

Schwarzschild war Mitglied der „International Union for Cooperation in Solar Research“, einer Vorläufer-Organisation der International Astronomical Union (IAU). 1910 und 1913 besuchte er deren Tagungen (Schwarzschild 1911, 1913). Zum Besuch der Tagung 1910 in Pasadena hatte er noch in Göttingen einen Dienstreiseantrag für eine Studienreise in die USA gestellt, die er dann aber erst von Potsdam aus angetreten hat. Ebenfalls im Jahre 1910 unterstützte er als Chef die Teilnahme seiner Mitarbeiter Karl Hermann Gustav Müller (1851–1921) und Erich Kron (1881–1917) an der „Pannwitz-Expedition“ nach Teneriffa. An dieser nahmen Wissenschaftler verschiedener Disziplinen (meist Physiologen und Mediziner) teil, aber neben Müller und Kron auch der französische Astronom Jean Mascart (1872–1935). Mascart auf dem Gipfel der Montaña La Guajara (2715 m) sowie Müller und Kron u.a. auf der Station Altavista (3260 m) am Hang des Vulkans Pico del Teide beobachteten und photographierten den Halleyschen Kometen unter den günstigen Bedingungen des kanarischen Hochgebirges (Mascart 1912; Müller 1912).

Schwarzschild war auch als Mitglied der Gauß-Kommission der Göttinger Gesellschaft der Wissenschaften (der heutigen Akademie) zusammen mit Felix Klein (1849–1925), Woldegar Voigt (1850–1919) und anderen an der Bearbeitung der Gaußschen Werke und an den Planungen zum Gaußturm am Hohen Hagen bei Dransfeld beteiligt, vgl. (Gieseke et. al. 1909).

In Potsdam, wohin er im Spätsommer 1909 berufen wurde (Abb. 13) hat Schwarzschild auch seine Arbeiten zur Sonnenphysik wieder aufgenommen. Unter anderem untersuchte er den in Sonnenflecken besonders wichtigen Zeeman-Effekt (Schwarzschild 1914a) und stellte, aufbauend auf eine Arbeit von Arthur Schuster (1851–1934, Schuster 1905) eine Strahlungstransportgleichung (die Schwarzschildsche Integralgleichung) für das Schuster-Schwarzschild-Modell auf, einer planparallelen Sternatmosphäre, die aus einer nach Kirchhoff-Planck emittierenden Kontinuumschicht und einer darüber liegenden, selektiv absorbierenden und streuenden Schicht besteht (Schwarzschild 1914b). Ebenfalls 1914 versuchte er, die Einsteinsche Gravitations-Rotverschiebung der Sonne (Einstein 1911) in den Linien der Cyan-Bande bei 388 nm (die nur 8,2 mÅ beträgt) zu messen: Dies gelang zwar nicht, aber Schwarzschild entdeckte dabei den sogenannten „Limb-Effekt“ der konvektiven Strömungszellen in der Granulation (Schwarzschild 1914c). Und in seinem letzten Lebensjahr beschäftigte er sich intensiv mit der Einsteinschen allgemeinen Relativitätstheorie (Einstein 1914, 1915 u.a.) und berechnete u.a. als erster exakt den relativistischen Anteil der Periheldrehung des Planeten Merkur (Schwarzschild (1916), vgl. Einstein (1916a), S. 822).

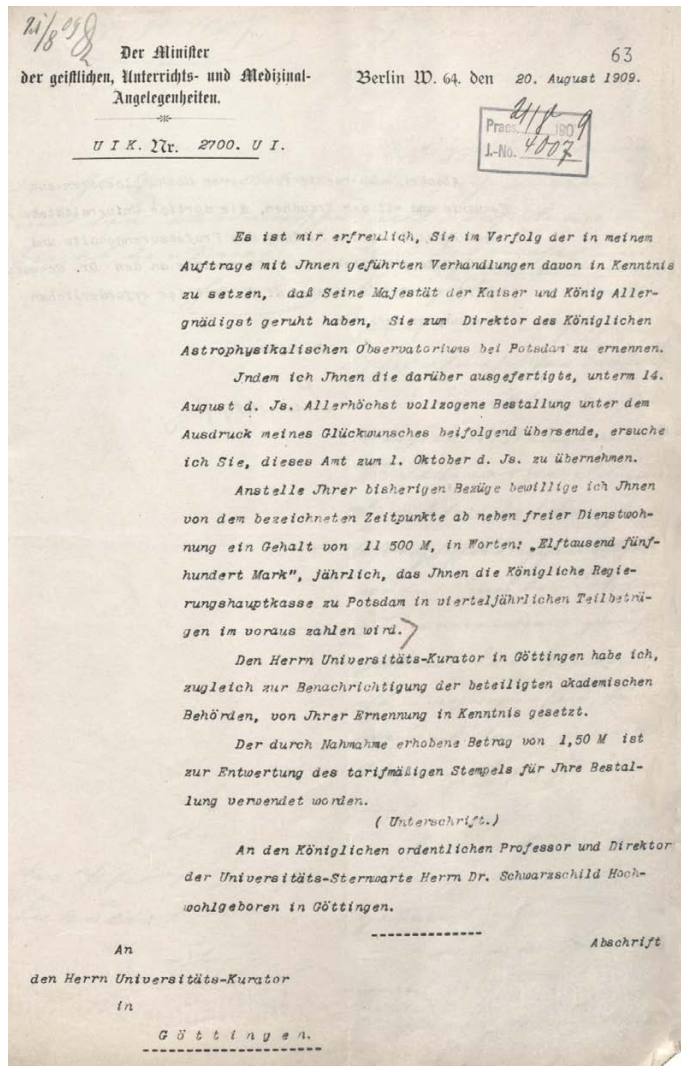
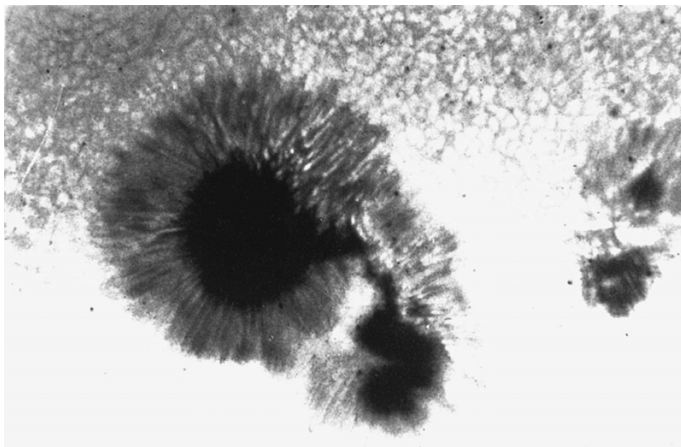


Abb. 13. Berufungsschreiben nach Potsdam (Universitätsarchiv Göttingen).

## 7 Nach Schwarzschilds Weggang

Im Gegenzug zu Schwarzschilds Berufung und Weggang nach Potsdam – unter Mitnahme seines Assistenten, des apl. Professors Ejnar Hertzsprung (1873–1967) – im Spätherbst 1909 wurde Johannes Hartmann (1865–1936) aus Potsdam berufen, eine wohl nicht sehr günstige Entscheidung für die Entwicklung der Sternwarte, die wegen der Ausgliederung einer ihrer beiden Hälften (nämlich der Abteilung B für Theoretische Astronomie) in das neugegründete Institut für Geophysik – auch hinsichtlich ihrer Ausstattung mit Instrumenten – bereits dramatisch geschwächt war. Hartmann war an der Fortsetzung der Schwarzschildschen Arbeiten

nicht interessiert und brachte auch von seinem Werdegang her ganz andere Voraussetzungen mit; er war ein anerkannter Experte für optische und spektroskopische Geräte, ließ sich aber von 1921 bis zu seinem Ruhestand 1926 nach La Plata/Argentinien beurlauben. So lag die Sonnenphysik in Göttingen bis Ende der 1920er Jahre weitgehendst brach.



**Abb. 14.** Die wohl beste Aufnahme eines Sonnenflecks aus der ungefähren Zeit von Schwarzschild, aufgenommen am 15. Juni 1917 von Bernhard Voldemar Schmidt (1879–1935), dem späteren Erfinder des Schmidtspiegels, mit dem Schwarzschild in optischen Angelegenheiten zusammengearbeitet hat, so z.B. bei der Prüfung des 50cm-Objektivs des Potsdamer Doppelrefraktors 1912. (Zeitschrift für Astrophysik 5, S. 38).

Johann („Hans“) Kienle (1895–1975) war seit 1927 Direktor der Göttinger Sternwarte und ein wichtiger Förderer von Karl Schwarzschilds Sohn Martin Schwarzschild (1912–1997) insbesondere auch während der Nazizeit. Dies erforderte wegen der Abstammung Martins als sogenannter Halbjude erheblichen Mut und Zivilcourage. Als Hans Kienle im Jahre 1939 – wie zuvor schon Karl Schwarzschild – nach Potsdam berufen wurde, leitete sein Assistent Otto Heckmann (1901–1983) vertretungsweise die Sternwarte. Bei Heckmann hatte Martin Schwarzschild trotz deren offiziellen Verbots und deren Ächtung die Relativitätstheorie Einsteins gelernt (der spätere Kosmologe Heckmann hatte als Student u.a. die Arbeiten Einstein (1914) und Einstein (1915) durchgearbeitet). Heckmann baute 1940 einen von Karl Otto Kiepenheuer (1910–1975) in seiner Assistentenzeit an der Sternwarte begonnenen Spektroheliographen zu Ende. Dieser wurde durch einen Coelostaten auf dem südöstlichen Dach der Sternwarte mit Sonnenlicht versorgt (vgl. Jahresbericht des Instituts in den Mitteilungen der Astronomischen Gesellschaft 1940) und diente einige Jahre zur Überwachung der Sonne. Aber die Zahl der Sonnenscheinstunden und die Reinheit, die Transparenz und die Ruhe der Luft sind in Göttingen (und allgemein in Mitteleuropa) für moderne, international konkurrenzfähige Forschung nicht ausreichend.

1959 entsandte daher Hans Kienle – inzwischen Direktor der Landessternwarte Heidelberg und Kuratoriumsmitglied des im Aufbau begriffenen „Karl-Schwarzschild-Observatoriums“ in Tautenburg – die Astronomen Dietrich Labs (1921–2008) und Heinz Neckel (geb. 1930) nach Izaña/Teneriffa, um dort in etwa 2400 m Höhe spektralphotometrische



Messungen der Sonnenstrahlung auszuführen (Abb. 15 oben). Diese haben zusammen mit Fourier-Transform-Spektren, die Brault und Neckel am Kitt Peak National Observatorium aufnahmen, zu einer Reihe bedeutender Publikationen über die spektrale Verteilung der Sonnenstrahlung geführt (Neckel und Labs 1984).



**Abb. 15.** Oben: Izaña 1959. Links: Hans Kienle (ganz rechts) und Mitarbeiter. Rechts: Die Station zur Messung der spektralen Verteilung der Sonnenstrahlung. Unten: Die Göttinger Außenstation „Istituto per Ricerche Solari“ in Locarno-Monti. Links: 1959 im Bau, Rechts: In Betrieb 1976 (Photos oben: H. Neckel; Photos unten links: P. ten Bruggencate, unten rechts: A. Wittmann).

Der Nachfolger Kienles, Paul ten Bruggencate (1901–1961), der 1941 aus Potsdam nach Göttingen berufen worden war, war sowohl Nachtastronom als auch Sonnenphysiker und beförderte beide Arbeitsgebiete nach Kräften. Noch während des 2. Weltkrieges wurde 1942 auf Initiative von Kiepenheuer und unter militärischer Geheimhaltung am Göttinger Hainberg der 1945 in Betrieb gegangene „Sonnenturm“ mit einem Turmteleskop errichtet. 1959 gründete Paul ten Bruggencate in seinem Geburtsland Schweiz auf der Südseite der Alpen am Lago Maggiore eine Göttinger Außenstation, die mit einem evakuierten Gregory-Coudé-Sonnenteleskop von 45 cm Öffnung und 25 m effektiver Brennweite ausgestattet wurde (Abb. 15 unten). Dort entstanden unter der Leitung von Hans-Heinrich Voigt und Egon-Horst Schröter (1928–2002) zahlreiche bedeutende sonnenphysikalische Publikationen. Das ursprüngliche Ziel Schwarzschilds einer „Südstation“ für die Göttinger Sonnenphysik in günstigem (südlichem) Klima konnte erst 1985 verwirklicht werden, als ein Umzug des (für die neue geographische Breite von  $28.3^\circ$  wesentlich umgebauten) Gregory-Coudé-Teleskops aus Locarno nach Izaña im Hochgebirge von Teneriffa (2413 m Höhe der Teleskopöffnung) erfolgte, wo sehr viel bessere Bedingungen als in Locarno oder gar in Göttingen gegeben sind.

## 8 Ausklang

Nach eigenem Bekunden verbrachte Karl Schwarzschild, der in Göttingen auch seine Ehefrau Else kennengelernt und 1909 geheiratet hatte, als Direktor der Sternwarte in Göttingen die glücklichste Zeit seines Lebens. Schwarzschild war in der Lage, sowohl mit den älteren als auch den jüngeren Mitarbeitern der Sternwarte menschlich problemlos zurecht zu kommen und diese zu motivieren. Lange Zeit lebte er als Junggeselle in Göttingen und gewann neben seinen astronomischen Kollegen und Mitarbeitern, wie z.B. Leopold Ambronn, Martin Brendel (1862–1939), Ejnar Hertzsprung und Bruno Meyermann (1876–1963), auch unter anderen Wissenschaftlern, wie z.B. den Physikern Ludwig Prandtl (1875–1953) und Woldemar Voigt sowie den Mathematikern David Hilbert (1862–1943), Felix Klein (1849–1925) und Carl Runge zahlreiche Freunde. Mit diesen verbanden ihn in der Göttinger „Mathematiker-Gesellschaft“, in der Gauß-Kommission der Akademie und auch in der Freizeit enge freundschaftliche Kontakte. Karl Schwarzschild verstarb am 11. Mai 1916 in Potsdam an den Folgen einer im Felde ausgebrochenen, latent schon bestehenden Autoimmunkrankheit und wurde, seinem letzten Willen entsprechend, am 16. Mai 1916 auf dem Hauptfriedhof in Göttingen (dem heutigen Familiengrab auf dem Stadtfriedhof) beigesetzt. In der amtlichen Verlustliste des Ersten Weltkrieges ist er auf Seite 26823 wie folgt eingetragen (Abb. 16):

Ein. d. L. Prof. Dr. Karl Schwarzschild v. Ebn. Bz. Potsdam,  
früher d. Fußart Regt. Nr. 8 — Frankfurt a. M.  
— † infolge Krankheit.

**Abb. 16.** Eintrag im der Verlustliste des ersten Weltkrieges.

Schwarzschilds 1912 geborener Sohn Martin führte die Tradition fort, promovierte 1935 in Göttingen und wurde zu einem der bedeutendsten Astrophysiker der USA. Nach dem Krieg nahm er freundschaftliche Kontakte nach Göttingen auf und übereignete der Universität Göttingen zahlreiche Dokumente und Geräte aus dem Nachlass seines Vaters. Karl Schwarzschild wurde posthum vielfach geehrt, so u.a. am 12.05.1972 durch die feierliche Anbringung einer Gedenktafel an der Sternwarte (Abb. 17), durch die Benennung der Straße „Karl-Schwarzschild-Weg“ in Göttingen-Weende durch Beschluss des Kulturausschusses vom 15.11.1973 und des Rates der Stadt Göttingen vom 12.06.1974, sowie durch eine gemeinsame Gedenkfeier der Sternwarte und der Akademie der Wissenschaften aus Anlass des 100. Geburtstages am 14.12.1973.



**Abb. 17.** Gedenktafel an der Sternwarte, angebracht am 12. Mai 1972 auf Anregung der Sternwartendirektoren Hans-Heinrich Voigt und Rudolf Kippenhahn (Ratsbeschluss vom 2. April 1971) (Photo: Verfasser).

**Danksagungen.** Ich danke Herrn Dr. Ulrich Hunger vom Universitätsarchiv Göttingen für verschiedene Scans aus der Personalakte Schwarzschilds. Frau Dr. Angelika Schade und Frau Christiane Wegener von der Akademie der Wissenschaften danke ich für die Genehmigung, eine Kopie des Windhuk-Antrags aus dem Akademiearchiv anfertigen zu dürfen. Herrn Prof. Dr. Manfred Schüssler (MPS Göttingen) danke ich für nützliche Hinweise zu den verschiedenen Mechanismen des Gleichgewichts in Sternatmosphären. Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. Johannes Mangei (SUB Göttingen) für die Bereitstellung zahlreicher Abbildungen von Archivmaterialien zu Schwarzschild, sowie Herrn Prof. Dr. Dieter B. Herrmann (Berlin) für Hinweise auf die Beiträge Friedrich Zöllners zur Astrophysik.

## Literatur

- Ambromn, Leopold 1905, *Die Messungen des Sonnendurchmessers an dem Repsold'schen 6-zoelligen Heliometer der Sternwarte zu Göttingen ausgeführt von W. Schur und L. Ambromn. Bearbeitet von L. Ambromn*, Abhandlungen der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse, Neue Folge, Bd. 3, Nr. 3 (= Astronomische Mitteilungen der Königlichen Sternwarte zu Göttingen, Teil 7, S. 1–126).
- Bethe, Hans Albrecht 1939, *Energy production in stars*, Physical Reviews 55, S. 434–456.
- Biermann, Ludwig 1951, *Kometenschweife und solare Korpuskularstrahlung*, Zeitschrift für Astrophysik 29, S. 274–286.
- Bunsen, Robert und Roscoe, Henry 1862, *Photochemische Untersuchungen*, Annalen der Physik und Chemie (Poggendorffs Annalen), Band CXVII, Nr. 12, S. 529–562 (vgl. S. 558).
- Einstein, Albert 1905, *Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energiegehalt abhängig?*, Annalen der Physik 18, S. 639–641.
- Einstein, Albert 1911, *Über den Einfluß der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes*, Annalen der Physik 35, S. 898–908.
- Einstein, Albert 1914, *Die formale Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie*, Sitzungsberichte der Königlich-Preußischen Akademie der Wissenschaften XLI, S. 1030–1085.
- Einstein, Albert 1915, *Die Feldgleichungen der Gravitation*, Sitzungsberichte der Königlich-Preußischen Akademie der Wissenschaften XLVIII, S. 844–847.

- Einstein, Albert 1916, *I. Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie*, Annalen der Physik, Vierte Folge, Band 49, Nr. 7, S. 729–822.
- Einstein, Albert 1916, *Gedächtnisrede des Hrn. Einstein auf Karl Schwarzschild*, Sitzungsberichte der Preußischen Akademie der Wissenschaften 1916, S. 768–770, Berlin.
- Emden, Robert 1901, *Beiträge zur Sonnentheorie*, Sitzungsberichte der mathem.-phys. Classe der Kgl. bayer. Akademie der Wissenschaften Bd. XXXI, Heft III, S. 339–363.
- Emden, Robert 1907, *Gaskugeln: Anwendungen der mechanischen Wärmetheorie auf kosmologische und meteorologische Probleme*, B. Teubner, Leipzig.
- Gamow, George 1939, *Zusammenfassender Bericht. Kernumwandlungen als Energiequellen der Sterne*, Zeitschrift für Astrophysik 16, S. 113–160.
- Gieseke, August, Klein, Felix, Schwarzschild, Karl 1909, *Über die Errichtung eines Gaußturmes bei Göttingen*, Astronomische Nachrichten 179, Nr. 4284, S. 195–196.
- Habison, P. 1999, *Karl Schwarzschild und sein fotografischer Effekt*, Plus Lucis 1, S. 18–21.
- Hentschel, Klaus und Wittmann, Axel D. (ed.) 2000, *The Role of Visual Representations in Astronomy: History and Research Practice* (= Acta Historica Astronomiae, Band 9), Harri Deutsch, Thun u.a.
- Holweger, Hartmut 1967, *Ein empirisches Modell der Sonnenatmosphäre mit lokalem thermodynamischem Gleichgewicht*, Zeitschrift für Astrophysik 65, S. 365–417.
- Huggins, William 1868, *Further Observations on the Spectra of some of the Stars and Nebulae, with an Attempt to determine therefrom whether these Bodies are moving towards or from the Earth, also Observations on the Spectra of the Sun and of Comet II., 1858*, Philosophical Transactions of the Royal Society London 158, S. 529–564.
- Janssen, Pierre Jules 1896, *Mémoire sur la photographie solaire*, in: Annales Obs. Paris Meudon I, S. 89–102; *tude de la surface solaire par la photographie*, ibid. S. 103–122 (vgl. Planches I–XII), Gauthier-Villars et fils, Paris.
- Ludendorff, Hans 1916, *Karl Schwarzschild*, Deutsche Mechaniker-Zeitung Heft 12, 15. Juni 1916, S. 107–108.
- Mascart, Jean 1912, *Impressions et Observations dans un voyage à Tenerife*, Ernest Flammarion, Paris.
- Maunder, Edward Walter 1905a, *The solar origin of the disturbances of terrestrial magnetism*, Astronomische Nachrichten 167, Nr. 3995, S. 177–182.
- Maunder, Edward Walter 1905b, *L'origine solaire des perturbations du magnétisme terrestre*, Ciel et Terre 26, S. 51–56 (1905).
- Müller, Gustav 1910, *Beobachtungen des Halleyschen Kometen von Seiten des Astrophysikalischen Observatoriums bei Potsdam*, Astronomische Nachrichten 185, S. 135–137.
- Müller, Gustav 1916, *Trauerrede am Grab* (Potsdam, 13.05.1916), abgedruckt in: Sirius, Band XLIX, Heft 7, Juli/August 1916, S. 130–132.
- Neckel, Heinz, Labs, Dietrich 1984, *The solar radiation between 3000 Å and 12500 Å*, Solar Physics 90, S. 205–258.
- Parker, Eugene Newman 1958, *Dynamics of the interplanetary gas and magnetic fields*, Astrophysical Journal 128, S. 664–676.
- Runge Carl 1916, *Karl Schwarzschild*, Physikalische Zeitschrift 17, Nr. 22, 15. November 1916, S. 545–547.
- Schuster Arthur 1905, *Radiation through a foggy atmosphere*, Astrophysical Journal 21, S. 1–22.
- Schielicke, Reinhard E., Wittmann, Axel D. 2016, *Julius Berkowski und die „Aelteste coelestische Aufnahme von wissenschaftlichem Werthe“*, Mitteilungen der Gauß-Gesellschaft 53, S. 33–43.
- Secchi, Angelo 1872, *Die Sonne*, George Westermann, Braunschweig.
- Schwabe, Samuel Heinrich 1844, *Sonnen-Beobachtungen im Jahre 1843*, Astronomische Nachrichten 21, Nr. 495, S. 233–236.
- Schwarzschild, Karl 1887, *Die Bestimmung von Sternhelligkeiten aus extrafocalen photographischen Aufnahmen*, Publikationen der von Kuffner'schen Sternwarte Wien V, Band 3, S. 1–23 (1887).

- Schwarzschild, Karl 1900, *Beiträge zur photographischen Photometrie der Gestirne*, Publikationen der von Kuffnerschen Sternwarte Wien, Band V, S. 1–135.
- Schwarzschild, Karl, Villiger, Walter 1905, *Über die Helligkeitsverteilung des ultravioletten Lichtes auf der Sonnenscheibe*, *Physikalische Zeitschrift* 6, Nr. 22, S. 737–744.
- Schwarzschild, Karl 1905, *Zur Sonnenfinsternis vom 29. August in Nordafrika*, *Die Umschau* 9 (11.11.1905), S. 901–907. [29. ist Druckfehler]
- Schwarzschild, Karl, Villiger, Walter 1906a, *On the Distribution of Brightness of the Ultra-Violet Light on the Sun's Disk*, *Astrophysical Journal* 23, S. 284–305.
- Schwarzschild, Karl, Villiger, Walter 1906b, *Note on the Ultra-Violet Radiation of Sun-Spots and Faculae*, *Astrophysical Journal* 23, S. 345–346.
- Schwarzschild, Karl 1906a, *Ueber das Gleichgewicht der Sonnenatmosphäre*, *Nachrichten der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse*, 1906, Heft 1, S 41–53.
- Schwarzschild, Karl 1906b, *Ueber die totale Sonnenfinsternis vom 30. August 1905*, *Abhandlungen der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Neue Folge*, 5(2), S. 3–73. (= Astronomische Mitteilungen der Königlichen Sternwarte zu Göttingen, 13. Teil).
- Schwarzschild, Karl (Hrsg.) 1910, unter Mitwirkung von Bruno Meyermann, Arnold Kohlschütter und Otto Birck, *Aktinometrie der Sterne der B.D. bis zur Größe 7.5 in der Zone 0° bis +20° Declination, Teil A*, *Abhandlungen der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse, Neue Folge*, Band VI, Nr. 6, S. 1–115.
- Schwarzschild, Karl 1911, *Vierte Versammlung der Internationalen Vereinigung für kooperative Sonnenforschung 1910*, *Astronomische Nachrichten* 186, Nr. 4443, S. 37–40.
- Schwarzschild, Karl 1913, *Versammlung der Solar-Union zu Bonn. 31. Juli bis 5. August 1913*, *Astronomische Nachrichten* 195, Nr. 4676, S. 411–414.
- Schwarzschild, Karl 1914a, *Über die maximale Aufspaltung beim ZEEMAN-Effekt*, *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft* 16, Nr. 1, S. 24–40.
- Schwarzschild, Karl 1914b, *Über Diffusion und Absorption in der Sonnenatmosphäre*, *Sitzungsberichte der Königlich-Preußischen Akademie der Wissenschaften* 47, Berlin, S. 1183–1200.
- Schwarzschild, Karl 1914c, *Über die Verschiebungen der Bande bei 3883 Å im Sonnenspektrum*, *Sitzungsberichte der Königlich-Preußischen Akademie der Wissenschaften* 47, Berlin, S. 1201–1213.
- Schwarzschild, Karl 1916, *Über das Gravitationsfeld eines Massenpunktes nach der EINSTEINSchen Theorie*, *Sitzungsberichte der Königlich-Preußischen Akademie der Wissenschaften* 7, Berlin 1916, S. 189–196.
- Vitense, Erika 1953, *Die Wasserstoffkonvektionszone der Sonne*, *Zeitschrift für Astrophysik* 32, S. 135–164.
- Voigt, Hans-Heinrich 1956, *Drei-Strom-Modell der Sonnenatmosphäre und Asymmetrien der Linien des infraroten Sauerstoff-Triplets*, *Zeitschrift für Astrophysik* 40, S. 367–400.
- Voigt, Hans-Heinrich 1992, *Karl Schwarzschild: Gesammelte Werke (Collected Works)*, Vols. 1–3, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg.
- von Weizsäcker, Carl Friedrich 1937, *Über Elementumwandlungen im Inneren der Sterne*, *Physikalische Zeitschrift* 38, S. 176–191; *ibid.* 39, S. 636–646.
- Wittmann, Axel D., Débarbat, Suzanne V. 1990, *Der Sonnendurchmesser und seine Variabilität*, *Sterne und Weltraum* 29, S. 420–426, Fig. 6.
- Wittmann, Axel 1998, *Tobias Mayers Transitmessungen der Sonne (1756–1761): Eine Neudiskussion und ein Vergleich mit Transitmessungen von Gauß (1819–1820)*, *Mitteilungen der Gauß-Gesellschaft* 35, S. 53–63.
- Young, Charles A. 1883, *Die Sonne*, Brockhaus, Leipzig.
- Zöllner, Friedrich 1870, *Über die Temperatur und physische Beschaffenheit der Sonne*, *Astronomische Nachrichten* 76, Nr. 1815, S. 225–242.



Karl Schwarzschild (1873–1916):  
Ein Pionier und Wegbereiter der Astrophysik, 51–64  
Klaus Reinsch und Axel D. Wittmann (Hrsg.)  
© Universitätsverlag Göttingen 2017

# Karl Schwarzschild als Entdecker und Förderer von Ejnar Hertzsprung

Dieter B. Herrmann<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Archenhold-Sternwarte Berlin–Treptow (i. R.)  
*E-Mail:* post@dbherrmann.de

**Zusammenfassung.** Der geniale Astrophysiker Karl Schwarzschild hatte auch eine Fülle von positiven menschlichen Eigenschaften, die ihn als Leiter wissenschaftlicher Forschungsinstitutionen besonders geeignet machten. Ein historisch interessantes Beispiel seiner psychologischen Feinfühligkeit und Urteilskraft stellt sein enges wissenschaftliches und freundschaftliches Verhältnis zu Ejnar Hertzsprung dar. Dieser war zur Zeit seines ersten Kontaktes mit Schwarzschild als ausgebildeter dänischer Chemieingenieur auf dem Gebiet der Astronomie lediglich ein motivierter Amateur. Schwarzschild erkannte aber dessen Fähigkeiten ebenso sicher wie auch dessen Grenzen und entdeckte ihn für die astronomische Forschung. Die Förderung Hertzsprungs durch Karl Schwarzschild ließ ihn schließlich binnen kurzer Zeit zu einem der erfolgreichsten Astronomen des 20. Jahrhunderts heranreifen.

**Summary.** Karl Schwarzschild was not only an outstanding astrophysicist, but he also possessed a wide range of positive qualifications in the humanities, which especially qualified him as leader of a scientific institute. A historically interesting example of his psychological sensitivity and judgement capability is given by his close scientific relation and cooperation with Ejnar Hertzsprung, who initially was an astronomical amateur. Schwarzschild clearly recognized Hertzsprung's talents and discovered him for astronomy. The education and guiding by Schwarzschild soon made Hertzsprung develop into one of the most successful astronomers of the 20th century.

## 1 Einleitung

Im Zentrum unseres Kolloquiums steht die geniale Figur von Karl Schwarzschild, der in seinem kurzen Leben eine so großartige Fülle bahnbrechender astronomischer und astrophysikalischer Erkenntnisse gewonnen hat und deshalb heute zu Recht als einer der bedeutendsten Astrophysiker des 20. Jahrhunderts gilt. Meine Absicht ist es, aufzuzeigen, dass Schwarzschild eine weitere, bislang weniger beachtete Leistung vorzuweisen hat, die für die Entwicklung der Astronomie ebenfalls überaus fruchtbar geworden ist (vgl. Wempe 1974). Diese Leistung bezieht sich aber auf kein astronomisches Objekt und keine astrophysikalische Theorie, sondern auf einen Menschen, dessen Namen ohne Schwarzschilds feinen Spürsinn und sein entschlossenes und emphatisches Handeln heute vielleicht niemand kennen würde: Schwarzschild kann nämlich durchaus als der eigentliche Entdecker und tatkräftige Förderer von Ejnar Hertzsprung bezeichnet werden, dessen Lebensbahn durch ihn nachhaltig beeinflusst und gelenkt worden ist. Um das zu verstehen, müssen wir zunächst die Lebensgeschichte von Hertzsprung bis zu dessen schicksalhafter Begegnung mit Karl Schwarzschild kurz skizzieren.

## 2 Hertzsprungs Biographie – kurz skizziert

Ejnar Hertzprung (Abb. 1) wurde am 8. Oktober 1873 (übrigens einen Tag früher als Karl Schwarzschild) in der damaligen Kopenhagener Vorstadt Frederiksberg als erstes Kind der Eheleute Severin Carl Ludvig Hertzprung (1839–1893) und Henriette Hertzprung, geb. Frost (1839–1915) geboren (Herrmann 1994).



**Abb. 1.** Ejnar Hertzprung im Alter von 30 Jahren. Selbstporträt vom 26. März 1904 (Archiv des Verfassers, mit freundlicher Genehmigung von Leif Ditlefsen).

Hertzsprungs Vater hatte in Kopenhagen Astronomie studiert und sein Studium mit einer preisgekrönten Dissertation zur klassischen Astronomie 1861 abgeschlossen. Dennoch gelang es ihm nicht, eine Anstellung als Astronom zu finden, weshalb er eine Tätigkeit in einer Dänischen Versicherungsanstalt annahm. Hier stieg er rasch zum Geschäftsführer auf und übernahm später noch die Dänische Witwenkasse als Direktor. Seinem Sohn gab Severin die Empfehlung, keineswegs Astronomie zu studieren, sondern sich einem einträglicheren „Brotberuf“ zuzuwenden. So begann Ejnar nach seinem Abitur an der traditionsreichen Metropolitan-Schule mit einem Studium der Chemie an der Kopenhagener Polytechnischen Lehranstalt. Das Staatsexamen entsprach in seiner Wertigkeit etwa dem heutigen „Chemie-Ingenieur“. Nach Abschluß seiner Ausbildung arbeitete Hertzprung mehrere Jahre in einer



dänischen Chemiefabrik in St. Petersburg. Im Jahre 1901 ging er nach Leipzig, um sich bei dem berühmten Chemiker Wilhelm Ostwald (1852–1932) auf eine Promotion in Chemie vorzubereiten. Doch die Pläne zerschlugen sich rasch, als 1902 Hertzsprungs Bruder Ivar (1876–1902) unverhofft starb. Nachdem die Familie schon kurz nach Hertzsprungs Abitur den Vater verloren hatte, wollte der Sohn nun zunächst zur Mutter nach Kopenhagen zurückkehren.

In den folgenden Jahren widmete er sich dank der guten finanziellen Situation der Familie einer freien wissenschaftlichen Tätigkeit ohne fest umrissene Zielsetzung. Dabei knüpfte er zunächst an sein schon längere Zeit gepflegtes Hobby an, die Photographie. In kurzer Folge brachte er mehrere Publikationen heraus, in denen originelle Fragestellungen mit scharfsinniger Analyse und gewissenhafter Fehlerkritik verbunden wurden. Eine dieser Arbeiten trägt den Titel „*Zur Bestimmung der photographischen Sterngrößen*“ und gilt der spektralen Veränderlichkeit der Gradation sowie der spektralen Empfindlichkeit von Photoplaten (Hertzsprung 1905a) – Themen, die auch für die Anwendung der Photographie in der Astrophysik von großem Interesse waren. Doch von den Sternen war bei Hertzsprung ansonsten noch keine Rede.

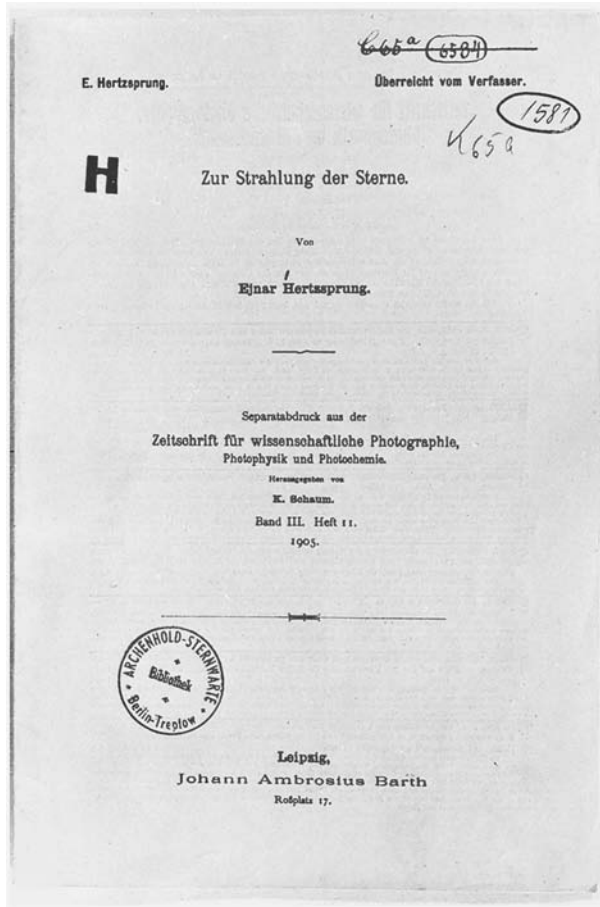
Eines Tages begab er sich aber zur Urania-Sternwarte, einem bekannten Privatobservatorium der dänischen Hauptstadt, das über einen leistungsfähigen Refraktor (246/4090 mm) verfügte und ließ sich von dem dort tätigen um sechs Jahre jüngeren Studenten Hans Emil Lau (1879–1918) in die Probleme der Astronomie einführen. Der Aufsatz „*Berechnungen zur Sonnenstrahlung*“ (Hertzsprung 1905b) war das erste Ergebnis dieses neuen Tätigkeitsfeldes.

Zweifellos ist Hertzsprung hier – möglicherweise aber auch schon bei seiner Studie über die Sonnenstrahlung – auf jene Probleme geführt worden, die seine beiden bis heute klassischen Abhandlungen „*Zur Strahlung der Sterne*“ veranlassten. Etwa vom Frühjahr 1905 bis zum Jahresende arbeitete er intensiv an der Fragestellung eines möglichen Zusammenhanges zwischen den wirklichen (absoluten) Helligkeiten der Sterne und ihren Farben (Spektralklassen) und publizierte die Ergebnisse in zwei Teilen 1905 und 1907 wieder in der „*Zeitschrift für wissenschaftliche Photographie*“ (Hertzsprung 1905c, 1907), wo auch schon seine früheren Arbeiten erschienen waren (Abb. 2). Die auf diese Weise gelungene Entdeckung der Existenz von Riesen- und Zwergsternen gründete sich bei ihm auf die Kunst, bereits vorhandene verschlüsselte Informationen durch geschickte Denkansätze aus den von anderen gewonnenen Daten herauszuschälen.

### 3 Erster Kontakt mit Schwarzschild

Bekanntlich hatte sich Schwarzschild schon einige Jahre früher intensiv mit Problemen der photographischen Photometrie befasst, ohne dass Hertzsprung diese Arbeiten beim Beginn seiner eigenen Untersuchungen bekannt gewesen wären. Als er nun eine Arbeit von Schwarzschild in den Sitzungsberichten der Wiener Akademie der Wissenschaften entdeckte (Schwarzschild 1900), in der Schwarzschild photographische Vergleiche der Helligkeit verschiedenfarbiger Sterne untersucht hatte, drängte es ihn, sich brieflich an ihn zu wenden. In diesem Schreiben an Schwarzschild vom 16. Oktober 1907<sup>1</sup> brachte er seine „*besondere Befriedigung*“ über die gute Übereinstimmung seiner eigenen Ergebnisse mit denen

<sup>1</sup>SUB Göttingen, Cod. Ms. K. Schwarzschild/Briefe.



**Abb. 2.** Titelblatt eines Sonderdrucks von Hertzsprungs Arbeit „Zur Strahlung der Sterne“ (1905, Bibliothek der Archenhold-Sternwarte Berlin-Treptow).

von Schwarzschild zum Ausdruck, die ja völlig unabhängig voneinander entstanden waren. Das war der Beginn eines Briefwechsels, der schließlich bis zu Schwarzschilds Tod auf 95 bislang noch weitgehend unausgewertete Dokumente anwachsen sollte. Aber mehr noch: Schwarzschild befasste sich nun auch mit Hertzsprungs beiden Arbeiten zur Strahlung der Sterne und erkannte offenbar deren mögliche Bedeutung sehr schnell. Schon in seinem Bericht über die Göttinger Arbeiten des Jahres 1907 deutete er an, dass der Vergleich der eigenen Ergebnisse von Farbmessungen der Sterne mit den statistischen Resultaten von Jacobus Kapteyn (1851–1922), Ejnar Hertzsprung und Anton Pannekoek (1873–1960) interessant wäre. Im folgenden Jahr bestätigte er, dass die heute so genannten F-Sterne eine geringere absolute Helligkeit besitzen als die früheren (O-, B-, A-Sterne) wie auch die späteren Typen (G-, K-, M-Sterne), das Minimum der absoluten Helligkeit also nicht wie erwartet bei den roten Sternen liegt, sondern „wunderbarerweise bei Sternen einer gewissen mittleren Färbung.“ (Schwarzschild 1908). Eine weitere Gemeinsamkeit der Arbeiten von Schwarz-

schild und Hertzsprung bestand in der Verwendung von Objektivgittern zur Bestimmung von Farbenäquivalenten. Schwarzschild hatte schon in den 1890er Jahren mit der Erprobung dieser Methode begonnen (Schwarzschild 1896), und Hertzsprung ließ sich 1907 durch die „Dansk Telegrafonfabrik“ ein solches Gitter nach eigenen Angaben herstellen (Herrmann 1994, S. 36).

Im Mai 1908 lud Schwarzschild nun Hertzsprung zu einem Besuch nach Göttingen ein, und am 14. Juni reiste Hertzsprung zu Schwarzschild. Die Begegnung verlief in jeder Hinsicht außerordentlich erfreulich. Hertzsprung berichtete seiner Mutter noch aus Göttingen, dass Schwarzschild „ein reizender Mensch“ sei, sie beide sich auf Anhieb perfekt verstanden hätten und er seinen Aufenthalt um einige Tage verlängere. Die ansonsten in dänischer Sprache geschriebene Karte enthält nur den einen deutschsprachigen Passus zur Charakterisierung Schwarzschilds (Abb 3).

Göttingen 1908 juni 17

Kær Moder,

Alt vel. Du må indskyde, at jeg ikke for  
 has skært igen, men hedde har det været  
 sammelt stærkt, så jeg har haft nok at gøre  
 med de lange og interessante samtaler med  
 Prof. S., der virkelig er „ein reizender Mensch“.  
 Vi forstår hinanden så indmættet. - Jeg tænkte  
 at blive hos enden et par dage og tage  
 så til Heidelberg og videre til Gießen hvortil  
 du kan skrive poste restante. - I aften har  
 jeg set en meget lysvillig lysvillig hvilket er  
 særdeles præffekt. De fløj omkring mellem  
 træerne som lyse grønne stjerner.  
 Mange lykønskninger til dine  
 \*) i dag er der endelig kommet en forfærdende vordendryg,

Abb. 3. Postkarte von Ejnar Hertzsprung aus Göttingen vom 17. Juni 1908 an seine Mutter (Privatarchiv Leif Ditlefsen).

Bereits während dieses Aufenthaltes unterbreitete Schwarzschild seinem Gast das Angebot, mindestens ein Jahr nach Göttingen zu kommen.<sup>2</sup> Dass Hertzsprung trotz eines – allerdings noch unsicheren – Angebots von Svante Elis Strömgen (1870–1947) in Kopenhagen letztlich darauf einging, war für ihn persönlich und für die Astronomie ein Glücksfall. Zunächst reiste er im Herbst 1908 zur Tagung der Astronomischen Gesellschaft nach Wien, wurde dort auch deren Mitglied und konnte am Rande der Tagung die Einzelheiten seiner Übersiedlung nach Göttingen mit Schwarzschild besprechen. Schwarzschilds Plan bestand darin, Hertzsprung das frei gewordene „Nichtetatmäßige Extraordinariat“ des Mathematikers Gustav Herglotz (1881–1953) zu verschaffen, der nach Wien gegangen war. Im Dezember 1908 unterbreitete dann der Dekan der philosophischen Fakultät der Georg-August-Universität, Prof. Carl Runge (1856–1927), diesen Vorschlag dem Minister für die geistlichen, Unterrichts-

<sup>2</sup>E.H. an K.S. vom 20.06.1908 (SUB Göttingen, Cod. Ms. K. Schwarzschild/Briefe).

und Medicinalangelegenheiten in Berlin. Das betreffende Schreiben<sup>3</sup> dürfte – wie in solchen Fällen bis heute üblich – zweifellos von Schwarzschild selbst verfasst worden sein. Hertzsprungs Persönlichkeit und Fähigkeiten werden darin derart treffend charakterisiert, dass es sich zugleich um ein Dokument handelt, das Schwarzschilds Treffsicherheit in der Menschenbeurteilung auf geradezu brillante Weise zum Ausdruck bringt: „*Man würde zuviel sagen*“, heißt es in dem Brief, „*wenn man ihm tiefste wissenschaftliche Durchbildung und Geisteskraft nachrühmen wollte. Was ihn aber auszeichnet, ist die Vielseitigkeit des durch mancherlei Wissensgebiete Hindurchgewanderten, die freie Anschauung des Outsiders und die Liebe und Gründlichkeit, mit der er sich in den Gegenstand versenkt, der ihn einmal erfasst hat.*“ Sodann schildert der Brief einige der wichtigsten bisherigen wissenschaftlichen Resultate Hertzsprungs, vor allem seine Erkenntnisse über die Spektren und Eigenbewegungen der Sterne als Indiz für deren absolute Helligkeiten sowie die von ihm weiter ausgebildete Methode der Bestimmung effektiver Wellenlängen. Auch seine sonstigen Aufsätze über Photographie, Stereoskopie, Farbenempfindung und Photometrie seien „*immer klar und orientierend*“. Unumwunden spricht der Brief auch an, dass es anfänglich Schwierigkeiten bei der Durchführung von Vorlesungen geben würde, denn Hertzsprung selbst hatte darum gebeten, Vorlesungen „*auf das erlaubte Mindestmaß einzuschränken*“.<sup>4</sup> Doch sein „*reiner Sinn, der stets auf den Fortschritt der Erkenntnis und nicht auf den Vorteil der Person gerichtet ist, würde ihm gewiss die Sympathie der Studenten zuführen.*“, so Schwarzschild.

Bereits am 11. März 1909 erhielt Hertzsprung die offizielle Anfrage zur Übernahme der Professur, der er bedingungslos zustimmte. So war Hertzsprung dank des Einsatzes von Schwarzschild, ohne je eine einzige astronomische Vorlesung gehört zu haben, binnen 16 Wochen vom „*Hilfsarbeiter der Sternwarte Kopenhagen*“ zum außerordentlichen Professor der Universität Göttingen aufgestiegen (Abb. 4).

#### 4 Hertzsprung in Göttingen und Potsdam

Anfang April siedelte Hertzsprung nach Göttingen um und fand wunschgemäß ganz in der Nähe der Sternwarte eine vollmöblierte Zweizimmerwohnung. Sogar die in Kopenhagen aufgenommenen photographischen Platten hatte er mit Strömngrens Erlaubnis nach Göttingen zur weiteren Auswertung mitnehmen dürfen. Mit Hertzsprungs Berufung an die Universität Göttingen war sein Lebensweg besiegelt: er war nun Astronom für den Rest seines Lebens.

Die beiden Arbeiten Hertzsprungs zum heute so genannten Hertzsprung-Russell-Diagramm waren von der wissenschaftlichen Öffentlichkeit zunächst kaum zur Kenntnis genommen worden, was sicher auch an dem Publikationsorgan gelegen hat, in dem sie erschienen waren. Da Hertzsprung mehrere Arbeiten über Photographie verfasst hatte, war die „*Wissenschaftliche Zeitschrift für Photographie, Photophysik und Photochemie*“ gleichermaßen sein Leib- und Magenblatt. Doch Astronomen lasen diese Zeitschrift wohl kaum. Wieder war es Schwarzschild, der Hertzsprung dringend ersuchte, die wichtigsten seiner Erkenntnisse zur Strahlung der Sterne unbedingt noch einmal in den „*Astronomischen Nachrichten*“ zu publizieren, was Hertzsprung dann auch getan hat (Hertzsprung 1909). Doch das war nicht alles.

<sup>3</sup>Brief vom 4.12.1908, Acta betreffend die Anstellung etc. (Geheimes Staatsarchiv Preußischer Kulturbesitz, Dienststelle Merseburg, Rep. 76 Va, Tit. IV).

<sup>4</sup>Brief an Karl Schwarzschild vom 26.11.1908 (SUB Göttingen, Cod. Ms. K. Schwarzschild/Briefe).



**Abb. 4.** Schwarzschild (links) und Hertzsprung im Professorentalar vor der Göttinger Sternwarte 1909. (Archiv Institut für Astrophysik Göttingen).

Schwarzschild hat auch viel dafür getan, die Entdeckung der Riesen- und Zwergsterne durch Hertzsprung bekannt zu machen. Da Schwarzschild gern und mit großem Talent gelegentlich auch populärwissenschaftliche Artikel schrieb, gelangte Hertzsprungs Entdeckung 1909 in die Spalten der Zeitschrift „Himmel und Erde“, einer illustrierten naturwissenschaftlichen Monatsschrift, die von der Gesellschaft Urania in Berlin herausgegeben wurde. In einem längeren Aufsatz mit dem Titel „Über das System der Fixsterne“ kam Schwarzschild auch (mit exaktem Literaturverweis) auf Hertzsprungs Entdeckungen zu sprechen und machte zugleich deutlich, welches Erkenntnispotenzial in der Auffindung der Riesensterne noch liege: *“Es ist an sich höchst merkwürdig“,* schrieb er, *„und durch keine Theorie über die Entwicklung der Sterne vorausszusehen, dass so zerstreut zwischen den gewöhnlichen Sternen diese Giganten liegen.“* (Schwarzschild 1909).

Hertzsprungs Wirken in Göttingen dauerte nicht lange, denn schon kurz nach der Übersiedlung in die niedersächsische Universitätsstadt kam für Schwarzschild die Berufung als Direktor an das Astrophysikalische Observatorium Potsdam als Nachfolger des 1907 verstorbenen Hermann Carl Vogel (1841–1907). Natürlich wollte er Hertzsprung auch dort als Mitarbeiter haben und machte deshalb die Annahme seines Direktorenpostens davon abhängig, dass auch für Hertzsprung eine Stelle zur Verfügung stünde. So kam Hertzsprung noch im Jahre 1909 an das damals weltberühmte Forschungsinstitut für Astrophysik, wo er die Position eines Observators bekleidete. Schon zuvor hatte Schwarzschild ihm mit leicht ironi-

schem Unterton geschrieben: „*Es scheint mir schon jetzt zweifelsfrei, dass Sie sich auf kein Colleg mehr präparieren müssen, was mir im Interesse Ihrer 'wissenschaftlichen Erziehung' natürlich sehr leid tut.*“<sup>5</sup>

In Potsdam verbrachte Hertzprung bis zum Tod Schwarzschilds glückliche Jahre ungebundenen, intensiven und freien erfolgreichen Forschens. Seine Farben-Helligkeitsdiagramme der Plejaden und Hyaden (1911), die Entdeckung der Veränderlichkeit von Polaris (1911), besonders aber die Entfernungsbestimmung der Kleinen Magellanschen Wolke (Hertzprung 1913) dank seiner neuen Eichung der Perioden-Leuchtkraft-Beziehung von Cepheiden seien hier beispielhaft erwähnt. Bei der zuletzt genannten Arbeit handelte es sich immerhin um die erste, wenn auch quantitativ sehr fehlerhafte Distanzbestimmung eines extragalaktischen Objektes. Kurioserweise beruht Hertzsprungs quantitatives Resultat auf einem simplen Rechenfehler: Er ermittelte nämlich für die Parallaxe der Kleinen Magellanschen Wolke einen Wert von 0,0001". Daraus folgt eine Entfernung von 10.000 pc. Diesen Wert muss man mit 3,26 multiplizieren, um die Entfernung in Lichtjahren (Lj) zu erhalten. Hertzprung hat ihn aber offenbar versehentlich durch 3,26 dividiert, denn er gibt für den Wert der Entfernung 3.000 Lj statt 32.600 Lj an (der moderne Wert beträgt etwa 200.000 Lj oder 60 kpc). Nur dadurch, dass man damals völlig falsche (zu kleine) Vorstellungen von den Dimensionen des Milchstraßensystems hatte, konnte Hertzprung zu dem (wiederum auch aus heutiger Sicht richtigen) Schluss kommen, dass sich die Kleine Magellansche Wolke außerhalb unseres Sternsystems befindet.

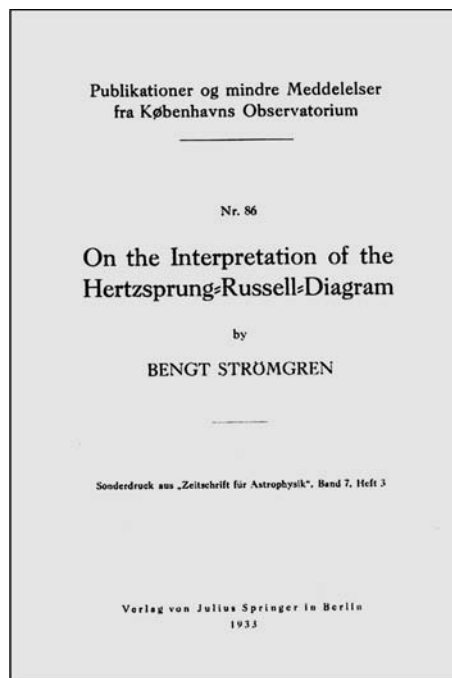
Dass Hertzprung und Schwarzschild zwei sehr unterschiedliche Persönlichkeiten gewesen sind, ist oft thematisiert worden. Hier der weltgewandte Schwarzschild, der sich auch für Tennis, Bergsteigen, Skifahren und Kunst interessierte, dort der meist in sich zurückgezogene Hertzprung, für den es außer seiner wissenschaftlichen Arbeit eigentlich nichts von Interesse gab. Immerhin gelang es Schwarzschild, ihn zu den damals sensationellen Flugvorführungen der Aviatiker in Johannesthal bei Berlin zu entführen, aber die Teilnahme an der AG-Tagung 1910 in Breslau sagte Hertzprung wegen einer Schönwetterperiode ab, die er lieber zu Beobachtungen nutzen wollte. Auch auf eine Silvesterfeier in Berlin 1911/12 verzichtete er wegen des gerade sehr guten Beobachtungswetters. Schwarzschild akzeptierte diesen gleichermaßen sympathischen wie auch weltabgewandten Charakterzug und kommentierte ihn mit den Worten „*Ich denke manchmal, Hertzprung denkt immer.*“ (Wempe 1974, S. 51).

Als Schwarzschild im Jahre 1910 anlässlich einer Tagung am Harvard-Observatorium in den USA weilte, hörte er dort auch den Vortrag von Henry Norris Russell (1877–1957): „*Some hints on the order of stellar evolution*“ (Russell 1912), in dem dieser seine Entdeckung der Riesen- und Zwergsterne bekannt gab. Selbstverständlich machte Schwarzschild den Amerikaner bei dieser Gelegenheit auf die Priorität von Hertzprung aufmerksam, dessen Arbeiten Russell unbekannt waren. Daraufhin entspann sich ein lebhafter kurzer Briefwechsel zwischen Russell und Hertzprung, in dem Russell neidlos die viel frühere und vollständig ebenbürtige Entdeckung seines deutschen (dänischen) Kollegen anerkannte (Herrmann 1978). Da allerdings Russell – anders als Hertzprung – den Zusammenhang der beiden Zustandsgrößen „Absolute Helligkeit“ und „Spektraltyp“ graphisch dargestellt hatte, wurde zunächst stets die Bezeichnung „Russell-Diagramm“ dafür verwendet.

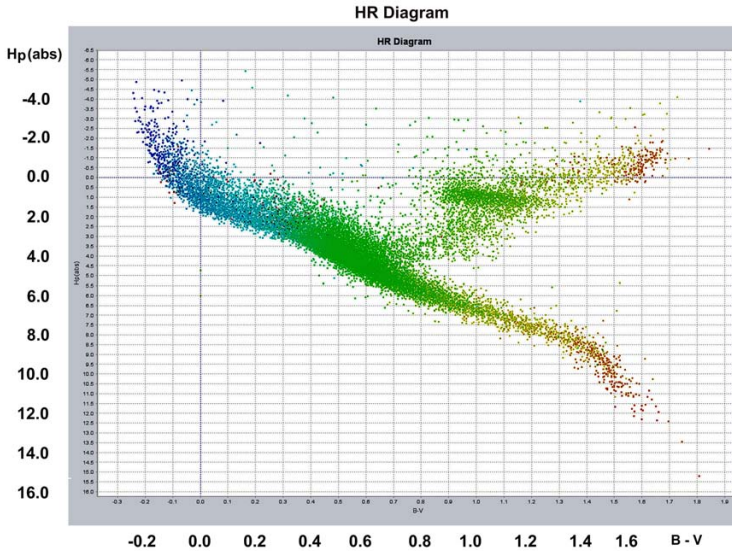
<sup>5</sup>Brief an Ejnar Hertzprung vom 24.09.1909 (Ejnar-Hertzprung-Archiv, Institut für Geschichte der exakten Wissenschaften Aarhus, Dänemark).

Erst Hertzsprungs Landsmann Bengt Strömgren hat 1933 in einer Publikation (Strömgren 1933) kurzerhand und beherzt die historisch gerechtere Bezeichnung „Hertzsprung-Russell-Diagramm“ verwendet, der sich danach auch international eingebürgert hat (Abb. 5).

Schwarzschild hatte übrigens in der klaren Erkenntnis der Bedeutung von Hertzsprungs Arbeiten bereits 1907 veranlasst, dass sein Mitarbeiter Hans Rosenberg (1879–1940) genaue Bestimmungen der Spektraltypen der Plejadensterne vornahm. Rosenberg hat seine Ergebnisse 1910 veröffentlicht (Rosenberg 1910) und dabei auch ein Farben-Helligkeits-Diagramm (FHD) der Plejaden entworfen: Dies dürfte das erste FHD für die Objekte eines offenen Sternhaufens gewesen sein. Ein HRD war es allerdings noch nicht, ebensowenig wie die FHD's der Hyaden und der Plejaden, die Hertzsprung 1911 veröffentlichte. In beiden Fällen handelte es sich lediglich um die Untersuchung von speziellen Objektgruppen und nicht von Sternen allgemein. Die Bedeutung der FHD's von offenen Sternhaufen – wie auch des HRD – für die Theorie der Sternentwicklung wurde ohnehin erst viel später klar. Ein modernes, aus Parallaxen und Eigenbewegungen des Satelliten HIPPARCOS abgeleitetes HRD ist in Abb. 6 wiedergegeben. Inzwischen sind die ersten Daten des astrometrischen Satelliten GAIA veröffentlicht worden, darunter auch die bisher detailreichsten Hertzsprung–Russell-Diagramme mit bis zu knapp einer Million Sternen (Brown et al. 2016).



**Abb. 5.** Titelblatt von Strömgrens Abhandlung aus dem Jahre 1933, mit der er den Namen „Hertzsprung-Russell-Diagramm“ in der Literatur etablierte (Archenhold-Sternwarte, Repro: Verfasser).



**Abb. 6.** Modernes HRD aus den Daten des Hipparcos-Satelliten von 30000 Sternen. Abszisse: Farbenindex  $B-V$  als Maß für die Sterntemperatur (nach links zunehmend). Ordinate: Absolute Helligkeit (Entfernung 10 pc) im Hipparcos Photometry System, nach oben zunehmend (mit freundlicher Genehmigung von Floor van Leeuwen, Institute of Astronomy, Cambridge/UK).

## 5 Hertzsprungs Arbeiten am Mt. Wilson-Observatorium

Hertzprung bedauerte, dass er für seine Untersuchungen über die Zusammenhänge zwischen Farben und Leuchtkräften der Sterne zu wenige Farbäquivalente lichtschwächerer Objekte zur Verfügung hatte. So reifte bei ihm der Plan eines längeren Beobachtungsaufenthaltes am Mt. Wilson-Observatorium, wo seit 1908 das damals lichtstärkste Spiegelteleskop der Welt mit 1,5 m Öffnung (60 inch) zu Verfügung stand. Schwarzschild war mit Hertzsprungs Idee sofort einverstanden und ließ ihr tatkräftige Unterstützung angedeihen. Auch George Ellery Hale (1868–1938) vom Mt. Wilson erklärte sich bereit, das Teleskop für 5 bis 6 Nächte je Monat zur Verfügung zu stellen und bot sogar eine finanzielle Unterstützung des Vorhabens an (Abb. 6).

Die gegenüber Hertzprung von der Königlich-Preußischen Akademie der Wissenschaften zugesagte Summe von 1500 Mark reichte aber nicht aus, so dass eine Unterstützung durch die Amerikaner durchaus wünschenswert erschien. Doch Schwarzschild sah das anders und wandte sich nochmals selbst an die Akademie: „Wenn das Unternehmen eines Beamten eines preußischen Observatoriums von der Kgl. Akademie der Wissenschaften unterstützt wird und so gewiss als ein deutsches Unternehmen erscheint, so wird es sich wohl empfehlen, auch den relativ kleinen noch fehlenden Restbetrag von deutscher Seite aufzubringen.“<sup>6</sup> Da-

<sup>6</sup>Brief vom 2. Mai 1912 an die Königliche Akademie der Wissenschaften zu Berlin (In: Acta betreffend das Astrophysikalische Observatorium Potsdam Vol. VII, Januar 1910–Juni 1916, Rep. 76Vc, Sect. 1, Titel 11, Geheimnes Staatsarchiv Preußischer Kulturbesitz, Dienststelle Merseburg, Bl. 129 f).





Abb. 7. Die Kuppel des 60-inch-Teleskops auf dem Mt. Wilson am 23. Juli 2013 (Foto: Verfasser).

raufhin wurden nochmals 1500 Mark aus dem Fonds des Amerika-Instituts zur Verfügung gestellt, und die Reise konnte beginnen. Sie dauerte vom 6. Juni bis zum 7. November 1912 und war in jeder Hinsicht ein voller Erfolg. Neben unzähligen persönlichen Kontakten und dem Kennenlernen der größten amerikanischen Observatorien brachte Hertzsprung 337 belichtete photographische Platten mit, die er in insgesamt 22 Beobachtungsnächten mit einer Gesamtexpositionszeit von etwa 100 Stunden gewonnen hatte. Eine dichte Folge von Briefen an seinen Chef in Potsdam, den er jetzt mit „*Lieber Schwarzschild*“ anredet, stellt eine fast lückenlose Dokumentation der Reise dar, der dann aber noch ein offizieller Reisebericht folgte (Herrmann 1990).

## 6 Probleme während des Ersten Weltkrieges

Seit dem Beginn des ersten Weltkrieges war Hertzsprung am Potsdamer Institut in eine schwierige Lage geraten, zumal Schwarzschild sich gleich zu Beginn des Krieges freiwillig zum Kriegseinsatz gemeldet hatte und somit im Institut nicht mehr präsent war. Ohne es zu wissen, war Hertzsprung mit der Annahme seiner Professur in Göttingen im Ergebnis eines reinen Verwaltungsaktes preußischer Staatsbürger geworden. Als solcher sollte er nun – wie bereits neun andere Mitarbeiter des Observatoriums – zu den Waffen gerufen werden, um auf deutscher Seite zu kämpfen. Hertzsprung fühlte sich aber als Däne und sah seine Aufgabe darin, die dänische Neutralitätspolitik im Krieg durch seine ausschließliche Konzentration auf die wissenschaftliche Arbeit zu unterstützen. Deshalb bat er Schwarzschild, ihm eine Unabkömmlichkeitserklärung zu verschaffen. Schwarzschild, der sich als Offiziersstellvertreter und Leiter einer Feldwetterstation in Belgien aufhielt, ließ Hertzsprung darauf-

hin freistellen. Als 1915 auch die „Unabkömmlichen“ einberufen werden sollten, versuchte Hertzprung, seine dänische Staatsangehörigkeit zurück zu erlangen.<sup>7</sup>

Gegenüber Schwarzschild erklärte er, er würde lieber auf seine Stellung in Potsdam als auf die dänische Staatsbürgerschaft verzichten. Wieder unterstützte ihn Schwarzschild gegenüber dem Ministerium, indem er geltend machte, dass es unter den jüngeren deutschen Astronomen für Hertzprung keinen Ersatz gäbe. Doch die Antwort lautete: in Kriegszeiten sei ein Wechsel der Staatsangehörigkeit grundsätzlich nicht möglich. Allerdings unterblieb auch eine Einberufung. Die strikt neutrale Haltung von Hertzprung führte jedoch zu scharfen Kontroversen mit dem späteren Direktor des Astrophysikalischen Observatoriums Potsdam Hans Ludendorff (1873–1941), worüber Hertzprung Schwarzschild brieflich sein Herz ausschüttete. Auch Ludendorff wurde einberufen und erklärte gegenüber Hertzprung, er wolle sich nicht durch eine Unabkömmlichkeitserklärung drücken, was zu einer heftigen Diskussion zwischen beiden führte. In seinem Brief an Schwarzschild machte Hertzprung noch einmal seine Haltung klar: *„Die krieglerisch-nationalen Fragen sind mir ebenso fremd, wie etwa die Unfehlbarkeit des Papstes es mir bei einer Anstellung an der vatikanischen Sternwarte sein würde. Ich habe in diesen Beziehungen nur des freien Denkers Aversion gegen jede Unterdrückung, von welcher Seite auch.“*<sup>8</sup> Schwarzschilds Ehefrau Else Schwarzschild, geb. Rosenbach, hat sich in dieser Zeit oft und mitunter auch erfolgreich bemüht, die Konflikte zwischen Ludendorff und Hertzprung einzudämmen. Hertzsprungs zahlreiche Publikationen in jener Zeit – allein 1914 und 1915 waren es mehr als 20 – bildeten damals fast den einzigen Output des Observatoriums.

Im März 1916 kehrte Schwarzschild aus dem Feld zurück, – doch schwerkrank. Hertzprung verbrachte viel Zeit mit ihm und bewunderte das nach wie vor leidenschaftliche Interesse an seiner Wissenschaft. Auch für Schwarzschild bedeuteten die wissenschaftlichen Diskussionen mit Hertzprung bis zuletzt viel. Nach einem seiner Besuche erklärte er gegenüber Ehefrau Else: *„Hertzprung strengt mich gar nicht an.“*<sup>9</sup>

Am 11. Mai 1916 starb Schwarzschild. Hertzprung war erschüttert. Ohne Schwarzschild fühlte er sich einsam. Ohnehin ein „unsozialer Mensch“, der nur schwer Kontakte oder gar Freundschaften schloss, vermisste er Schwarzschild ebenso als Freund wie als wissenschaftlichen Gesprächspartner. Wohltuend empfand Hertzprung in dieser Situation eine längere wissenschaftliche Diskussion mit Albert Einstein über Möglichkeiten eines spektroskopischen Tests der Allgemeinen Relativitätstheorie.<sup>10</sup>

## 7 Nach Schwarzschilds Tod

Sowohl Einstein als auch Hertzprung haben für Schwarzschild einen Nachruf geschrieben. Bei Hertzprung war dies ein singulärer Vorgang. Unter seinen hunderten von Publikationen findet sich nicht eine einzige, die nichts direkt mit seinen wissenschaftlichen Forschungen

<sup>7</sup>Brief vom 25.11.1915 an den Minister der geistlichen und Unterrichts-Angelegenheiten (Geheimes Staatsarchiv Preußischer Kulturbesitz, Dienststelle Merseburg, Acta betreffend die Beamten des Astrophys. Observatoriums Potsdam, Vol VII, Jan. 1910 – Juni 1916, Rep.76 Vc, Sect.1, Titel 11, Generalia, Wiss. u. Kunst-Sachen. Teil II, Nr. 6b, VII).

<sup>8</sup>Brief an Karl Schwarzschild vom 25.05.1915 (Ejnar-Hertzprung-Archiv Aarhus).

<sup>9</sup>Hertzprung an seine Schwester Ellen, 15.05.1916 (Privatarchiv Leif Ditlefsen).

<sup>10</sup>Hertzprung an seine Schwester Ellen, 7.12.1916 (Privatarchiv Leif Ditlevsen).

zu tun hat – mit Ausnahme des Schwarzschild-Nachrufes. Hertzsprung betonte in seinem Gedenkbeitrag, dass Schwarzschild es neben der Fülle seiner wissenschaftlichen Leistungen und den Belastungen mit „non scientific matter“ als Direktor in Potsdam verstanden habe, seinen wissenschaftlichen Geist und seine Interessen auf seine Mitarbeiter zu übertragen. Hertzsprung meinte über Schwarzschild: *„Er starb stehend. Wenn er im voraus gewusst hätte, dass sein Leben so kurz sein würde, er hätte es zu keinem besseren Zweck verwenden können.“* (Hertzsprung 1917). Noch ein Jahr später schrieb Hertzsprung an Hale über Schwarzschild: *„Mit niemandem anderen hier hatte ich intimeren wissenschaftlichen Kontakt als mit ihm. Fast täglich diskutierten wir hier am Observatorium oder während unserer Spaziergänge im Forst astronomische Probleme. Der Nutzen, den mir sein reicher Geist gewährte ist unschätzbar für mich.“*<sup>11</sup> Ohne Schwarzschild und in der politisch vergifteten Situation wollte Hertzsprung nicht länger in Potsdam bleiben. Er ging schließlich unter dem Direktorat von de Sitter an die Sternwarte Leiden (Niederlande), wo er von 1935 bis 1944 selbst die Leitung übernahm.

Auch nach dem Tod von Schwarzschild hielt der in persönlichen Dingen sonst so zurückhaltende Hertzsprung die Verbindung zur Familie Schwarzschild aufrecht. Davon zeugen 37 Briefe von ihm an Else Schwarzschild aus den Jahren 1916 bis 1946, also bis wenige Jahre vor ihrem Tod 1950. Ein besonders berührender Beleg für die enge prägende Gemeinschaft mit Schwarzschild ist die Tatsache, dass Hertzsprung Schwarzschilds Sohn Martin nach dem Abschluss von dessen Promotion 1935 für zwei Wochen als Gast zu sich nach Leiden einlud. Martin Schwarzschild (1912–1997) konnte sich an seinen Vater nicht direkt erinnern, denn er war bei seinem Tode erst vier Jahre alt gewesen. So wusste er alles über ihn und auch über die Freundschaft zu Hertzsprung nur aus den Erzählungen seiner Mutter. In einem längeren Brief aus dem Jahre 1988<sup>12</sup> berichtete Martin Schwarzschild dem Verfasser über seine Begegnung mit Hertzsprung 1935: *„Jedenfalls schien mir Hertzsprungs Verhalten [...] anzuzeigen, dass unter seinem sehr strengen Gesicht [...] immer noch ein warm glühendes Feuer für meinen Vater brannte.“*

Hertzsprungs Leben und seine erstaunliche Karriere waren geprägt von Karl Schwarzschild. Ohne ihn, seine vielfältigen geistigen Anregungen und seine freundschaftliche Sympathie für die von unermüdlichem Fleiß besessene, aber so ganz andersartige Forscherpersönlichkeit, wäre das Leben von Hertzsprung gewiss anders verlaufen und hätte sehr wahrscheinlich nicht jene Erfüllung gefunden, die für Hertzsprung selbst, aber auch für die Astronomie des 20. Jahrhunderts so fruchtbar gewesen ist.

**Danksagung.** Ich danke Herrn Leif Ditlevsen (Roskilde, Dänemark) für die vor 27 Jahren erfolgte Überlassung von Kopien aus seinem umfangreichen Ejnar-Hertzsprung-Archiv: Leif Ditlevsen ist der Neffe Hertzsprungs, er hat eine Fülle von Dokumenten aus dem Privatleben Hertzsprungs sorgfältig aufbewahrt und mir bei meinem Besuch im Jahre 1989 etliche Kopien davon zugänglich gemacht. Wo die Originalsammlung des damals schon recht betagten Herrn sich heute befindet, vermag ich leider nicht zu sagen.

---

<sup>11</sup>Abschrift von E. Hertzsprung seines Briefes an G.E. Hale vom 30.05.1917 (Ejnar-Hertzsprung-Archiv Aarhus).

<sup>12</sup>Brief an Dieter B. Herrmann vom 17.09.1988 (Privatarchiv Dieter B. Herrmann).

## Literatur

- Brown, A. G. A., Vallenari, A., Prusti, T. et al. 2016, *Gaia Data Release 1. Summary of the astrometric, photometric and survey properties*, Astronomy & Astrophysics manuscript no. aa29512-16 c ESO 2016, September 9, 2016, <http://www.aanda.org/articles/aa/pdf/forth/aa29512-16.pdf>.
- Herrmann, Dieter B. 1978, *Der Briefwechsel zwischen Hertzsprung und Russell über das HRD*, in: Vorträge und Schriften der Archenhold-Sternwarte 6, Nr. 56, S. 17–24.
- Herrmann, Dieter B. 1990, *Astrophysik im Vergleich. Bericht über eine USA-Reise von Ejnar Hertzsprung im Jahre 1912*. in: Die Sterne 66, S. 67–80.
- Herrmann, Dieter B. 1994, *Ejnar Hertzsprung. Pionier der Sternforschung.*, Springer-Verlag Verlag, Berlin, Heidelberg, New York u.a., 241 S.
- Hertzsprung, Ejnar 1905a, *Zur Bestimmung der photographischen Sterngrößen*, Zeitschrift für wissenschaftliche Photographie, Photochemie und Photophysik 2, S. 419–422; *ibid* 3, S. 15–27.
- Hertzsprung, Ejnar 1905b, *Berechnungen zur Sonnenstrahlung*, Zeitschrift für wissenschaftliche Photographie, Photochemie und Photophysik 3, S. 173–181.
- Hertzsprung, Ejnar 1905c, *Zur Strahlung der Sterne*, Teil 1, Zeitschrift für wissenschaftliche Photographie, Photochemie und Photophysik 3, S. 429–442.
- Hertzsprung, Ejnar 1907, *Zur Strahlung der Sterne*, Teil 2, Zeitschrift für wissenschaftliche Photographie, Photochemie und Photophysik 5, S. 86–107 – Vgl. auch: Dieter B. Herrmann (Hrsg.), *Einführung und Kommentare*, in: Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften, Band. 255, Leipzig 1976.
- Hertzsprung, Ejnar 1909, *Über die Sterne der Unterabteilungen c und ac nach der Spektralklassifikation von Antonia C. Maury*, Astronomische Nachrichten 179, S. 373–380.
- Hertzsprung, Ejnar 1913, *Über die räumliche Verteilung der Veränderlichen vom Delta-Cephei-Typus*, Astronomische Nachrichten 196, S. 201–210.
- Hertzsprung, Ejnar 1917, *Karl Schwarzschild*, Astrophysical Journal 45, S. 285.
- Rosenberg, Hans 1910, *Über den Zusammenhang von Helligkeit und Spektraltypus in den Plejaden*, Astronomische Nachrichten 186, S. 71–78.
- Russell, Henry Norris (1912): *Some hints on the order of stellar evolution*, Publications of the Astronomical and Astrophysical Society of America 2, S. 33–34.
- Schwarzschild, Karl 1896, *Über Messung von Doppelsternen durch Interferenzen*, Astronomische Nachrichten 139, S. 353–360.
- Schwarzschild, Karl 1900, *Über die photographischen Vergleiche der Helligkeit verschiedenfarbiger Sterne*, Sitzungs-Berichte der Königlichen Akademie der Wissenschaften Wien, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Klasse, Band 109, Abt. IIA.
- Schwarzschild, Karl 1908, *Jahresberichte der Sternwarten für 1907*. Göttingen, Vierteljahrsschrift der Astronomischen Gesellschaft 43, S. 186–189.
- Schwarzschild, Karl 1909, *Über das System der Fixsterne*, Himmel und Erde 21, S. 433–452.
- Strömrgren, Bengt 1933, *On the Interpretation of the Hertzsprung-Russell-Diagram*, Zeitschrift für Astrophysik 7, Heft 3, S. 222 ff.
- Wempe, Johann 1974, *Die Beziehungen zwischen Ejnar Hertzsprung und Karl Schwarzschild*, in: Dieter B. Herrmann (Hrsg.), *Geschichte und Popularisierung der Wissenschaften, Veröffentlichungen der Archenhold-Sternwarte Berlin-Treptow Nr. 6, Berlin-Treptow, S. 45–54.*

Karl Schwarzschild (1873–1916):  
Ein Pionier und Wegbereiter der Astrophysik, 65–71  
Klaus Reinsch und Axel D. Wittmann (Hrsg.)  
© Universitätsverlag Göttingen 2017

*„Gibt es im Universum ein Irgendetwas,  
das ruht, worum oder worin sich die  
übrige Welt aufbaut, oder gibt es  
nirgends einen Halt in der unendlichen  
Kette von Bewegungen, in denen alles  
begriffen scheint?“*

– Schwarzschild (1897) –

---

## Galaktische Dynamik und Stellarstatistik von Karl Schwarzschild bis heute

Else Starkenburg<sup>1,2</sup> und Matthias Steinmetz<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Leibniz-Institut für Astrophysik, Potsdam (AIP), Potsdam, Germany

<sup>2</sup>Schwarzschild-Fellow

*E-Mail:* estarkenburg@aip.de, msteinmetz@aip.de

**Zusammenfassung.** Die Arbeiten von Karl Schwarzschild haben einen großen Einfluß auf die Untersuchung von Sternen in unserer eigenen Galaxie, der Milchstraße, gehabt. Insbesondere erzielte Schwarzschild wichtige Fortschritte für unser Verständnis der galaktischen Dynamik und der Stellarstatistik. In diesem Beitrag geben wir einen Überblick über den Stand dieser Forschungsthemen zu Lebzeiten von Karl Schwarzschild und heben seine Errungenschaften hervor. Darüberhinaus beschreiben wir, wie sich dieser Bereich bis in die heutige Zeit weiter entwickelt hat und welche Erwartungen wir für dessen vielversprechende Zukunft haben.

**Summary.** The work of Karl Schwarzschild has been very influential in the study of the stars in our own Galaxy, the Milky Way. In particular, Schwarzschild made important progress in our understanding of Galactic dynamics and stellar statistics. In this contribution we review the state of these research topics in the lifetime of Karl Schwarzschild and highlight his achievements. Additionally, we describe how this area of research has developed into the present and our expectations for its bright future.

### 1 Astrophysik in der Zeit von Karl Schwarzschild

Um die Jahrhundertwende zum 20. Jahrhundert war die Astrophysik – also die Anwendung physikalischer Gesetze auf die Objekte des gestirnten Himmels – noch sehr jung. Neue fotografische Techniken erlaubten, ungleich verlässlicher als zuvor, Qualitätsmessungen über große Bereiche des Himmels, und zum ersten Mal vermaß man auch den südlichen Himmel. Kirchhoff und Bunsen hatten 1859 die Methode der Spektralanalyse entwickelt und zeigten, dass die Fraunhoferlinien in einem Spektrum durch die chemischen Elemente erzeugt werden und dass jedes chemische Element ein charakteristisches Linienspektrum besitzt.

Einige Jahre später wies William Huggins nach, dass die Sterne aus denselben chemischen Materialien bestehen wie die Erde. Ein wirklich spektakuläres Resultat!

Aus dem Spektrum eines Sterns kann man nicht nur die Häufigkeit der Elemente sondern auch seine Radialgeschwindigkeit bestimmen. Pionierarbeit für diese Technik wurde geleistet von William Huggins und auch von Hermann Carl Vogel, der wenig später Gründungsdirektor des Astrophysikalischen Observatoriums Potsdam wurde. Um 1890 waren schon über 10.000 stellare Spektren analysiert und klassifiziert worden, ohne jedoch wirklich zu verstehen, was die physikalischen Ursachen für die verschiedenen Klassen waren – dies sollte noch einige Jahrzehnte ein Rätsel bleiben. Pionierarbeit wurde von Edward Pickering in Harvard und seinem exzellenten Team von Analytischen, darunter Wilhelmina Fleming, Antonia Maury, und Annie Jump Cannon, geleistet. Diesem stimulierenden und schnell wachsenden Gebiet trat Ende der 1890-er Jahre Karl Schwarzschild bei.

## 2 Das Erbe Karl Schwarzschilds

Karl Schwarzschild hinterließ einen beeindruckenden Nachlass in vielen Gebieten der Astrophysik. Wir sprechen heute von Schwarzschildradius, Schwarzschild-Exponent, Schwarzschild-Kriterium, Schwarzschild(-Milne)-Formel, Schwarzschild-Verteilung, Schwarzschild-Ellipsoid und Schwarzschild-Lösung. In diesem Beitrag werden wir uns nur auf seine Beiträge im Bereich der galaktischen Dynamik und Stellarstatistik konzentrieren. Damit meinen wir das Teilgebiet der Astronomie, das die Bewegung astronomischer Objekte aufgrund physikalischer Theorien beziehungsweise mathematischer Modellierung studiert. Im dreidimensionalen Raum besteht eine Bewegung immer aus drei Komponenten, die senkrecht zueinander stehen. Für die Sterne sind diese als eine radiale Komponente und zwei Eigenbewegungen wahrzunehmen. Eigenbewegungen werden gemessen, indem Aufnahmen zu zwei verschiedenen Zeitpunkten miteinander verglichen werden. Radialgeschwindigkeiten werden mit Hilfe des Doppler-Effekts aus den Linienverschiebungen in Spektren gemessen.

Karl Schwarzschilds erste wissenschaftliche Arbeiten befassten sich mit der Himmelsmechanik von sogenannten Doppelsternen. Schon im Gymnasium, im Alter von 16 Jahren, publizierte er zwei Werke über dieses Thema: „*Zur Bahnbestimmung nach Bruns*“ und „*Methode zur Bahnbestimmung der Doppelsterne*“ (Schwarzschild 1890a,b). Dabei beherrschte er in vorzüglicher Weise sein mathematisches Handwerkszeug. Dieser geradezu spielerische Umgang mit verschiedensten fortgeschrittenen mathematischen Methoden ist ein Charakteristikum aller seiner Arbeiten. Heutzutage werden diese Berechnungen meistens durch Computer übernommen, aber das Gebiet ist noch immer sehr aktuell. Wir stellen uns noch immer Fragen wie: Wie viele Sterne leben in Doppel- und Mehrfachsystemen? Was sind ihre Eigenschaften? Wie oft kann Materie von einem zu einem anderen Sterne transferiert werden?

Karl Schwarzschild leistete auch wichtige Beiträge zur Stellarstatistik, insbesondere über die Art und Weise, wie man unter der Annahme der Verteilungsfunktion von Sternen in Abhängigkeit ihrer absoluten Helligkeit die Dichteverteilung aus der gemessenen Verteilungsfunktion der scheinbaren Helligkeiten bestimmen kann (Schwarzschild 1910, 1912). Auch diese Arbeiten zeigten seine außergewöhnlichen mathematischen Fähigkeiten – und manchmal auch „sein realistisches Misstrauen“ bezüglich der Beobachtungsdaten seiner Kollegen (R. Wielen in Voigt 1992).

### 3 Die Vermessung der Milchstraße

Einen besonderen Schwerpunkt wollen wir hier auf seine wichtige Rolle beim Verständnis des Aufbaus und der Struktur unserer Milchstraße legen. Heutzutage wissen wir, dass unsere eigene Galaxis aus etwa 100 bis 300 Milliarden Sternen besteht. Ihre Ausdehnung in der galaktischen Ebene beträgt etwa 100.000 Lichtjahre, die Dicke der Scheibe etwa 3.000 Lichtjahre und die der zentralen Ausbauchung (der sogenannte „Bulge“) etwa 16.000 Lichtjahre. Umgeben ist die Galaxis von einem sphäroidalem galaktischen Halo, einer Art von galaktischer „Atmosphäre“. In ihm befinden sich neben den etwa 150 bekannten Kugelsternhaufen weitere alte Sterne.

Schwarzschild und seinen Zeitgenossen war all dies nicht bekannt, selbst die Größe der Milchstraße und die Position der Sonne in ihr war Anfang des 20. Jahrhundert noch unbekannt. Auch war unklar, ob es neben der Milchstraße noch weitere Galaxien geben würde; viele Astronomen dachten, dass Nebel wie der Andromedanebel (in Wirklichkeit unsere Nachbargalaxie) sich innerhalb unserer Galaxie befänden. In dieser Zeit stützte man das Verständnis der Milchstraße – und damit des Universums – auf Sternzählungen. Ein wichtiger Wissenschaftler in diesem Gebiet war Karl Schwarzschilds Zeitgenosse Jacobus Kapteyn<sup>1</sup> in Groningen (Niederlande), Abb. 1. Kapteyn nutzte Messungen der Sterne von Fotoplaten des Südsternhimmels um zu untersuchen, wie viele Sterne einer gewissen Größenklasse es gibt und wie sie sich bewegen. Er stellte dabei fest, dass in einer gewissen Richtung die Eigenbewegungen viel größer waren als in allen anderen. Seine Erklärung: es gibt in der Milchstraße zwei Sternströme, die sich durcheinander bewegen. In England fand Arthur Edington in seinen Daten dasselbe Phänomen und bestätigte somit Kapteyns Resultate.

Karl Schwarzschild stand diesem Ergebnis skeptisch gegenüber. Er hatte zwar kein Problem mit den Messungen per se, aber er kritisierte, dass man durch dieses Modell der zwei sich durchdringenden Sternströme die Einheit des Fixsternsystems aufgeben würde. Und dies voreilig, denn er zeigte, dass man basierend auf einer anderen Annahme dasselbe Resultat genauso gut beschreiben konnte, nämlich mit der unitarischen Hypothese einer anisotropen (ellipsoidalen) Geschwindigkeitsverteilung (Schwarzschild 1907, 1908). Wir nennen diese heute die „Schwarzschild-Verteilung“ und sie wird nach wie vor gebraucht, um die Geschwindigkeitsverteilung von Sternsystemen zu beschreiben. In moderner Form sieht die Formel wie folgt aus:

$$f(U, V, W) = \frac{1}{(2\pi)^{3/2} \sigma_U \sigma_V \sigma_W} \exp\left\{ -\frac{(U - U_m)^2}{2\sigma_U^2} - \frac{(V - V_m)^2}{2\sigma_V^2} - \frac{(W - W_m)^2}{2\sigma_W^2} \right\}$$

$U$ ,  $V$  und  $W$  repräsentieren dabei die drei Hauptrichtungen der Bewegung, mit ihren unterschiedlichen Werten und den Durchschnitten ( $U_m$ ,  $V_m$ ,  $W_m$ ). Die drei Geschwindigkeitsdispersionwerte ( $\sigma_U$ ,  $\sigma_V$ ,  $\sigma_W$ ) bilden das Geschwindigkeitsellipsoid, auch „Schwarzschild-Ellipsoid“ genannt.

Die Schwarzschildsche Verteilung gab nicht nur eine mathematisch bessere Erklärung des Phänomens als die Zweistrom-Hypothese ab, sie war auch konzeptionell einfacher. Karl Schwarzschild fand es widersinnig anzunehmen, dass zwei Sternströme mit fast gleicher

<sup>1</sup>Für diejenigen, die an Kapteyn oder seiner Arbeit interessiert sind, können wir van der Kruit (2015) sehr empfehlen.



**Abb. 1.** Jacobus Kapteyn (dritter von links) und Karl Schwarzschild (zweiter von rechts) während der Tagung der International Solar Union auf Mount Wilson im Jahr 1910 (mit freundlicher Genehmigung durch/ Image courtesy of the Observatories of the Carnegie Institution for Science Collection at the Huntington Library, San Marino, CA).

Dichte entstehen, er bevorzugte eine Lösung die von einem System ausging. Man kann sagen, dass es zunächst eher eine Kritik aus einem philosophischen Grund war. In seiner Einleitung zu Schwarzschilds Arbeit nennt Chandrasekhar diese Lösung ein exzellentes Beispiel für Schwarzschilds Charakter und Persönlichkeit. Er sagte:<sup>2</sup>

*„Was für mich bemerkenswert ist, ist jedoch sein Argument: Eine Beschreibung der Natur muss natürlich sein, sie kann nicht ad hoc entstehen.“* (S. Chandrasekhar in Voigt 1992)

#### 4 Die Rolle des Staubs

Am Ende beschrieben aber weder Schwarzschild noch Kapteyn die Milchstraße, wie wir sie heute kennen. Wieso nicht? Was fehlte? Eine sehr wichtige Antwort auf diese Frage ist, dass die Absorption durch interstellaren Staub ignoriert wurde. Erst wenige Jahre zuvor, 1904, hatte Johannes Hartmann<sup>3</sup> am Astrophysikalischen Observatorium in Potsdam gezeigt, dass der Raum zwischen den Sternen nicht leer ist (Hartmann 1904). Staub absorbiert die Strahlung von Sternen im blauen Licht stärker als im roten. Sterne, die weit von uns entfernt sind, erscheinen dadurch rötter und schwächer. Nicht überall in der Galaxie gibt es die gleiche Menge Staub. In der Zeit von Kapteyn und Schwarzschild zeigte Shapley überzeugend, dass

<sup>2</sup>Von den Autoren übersetzt.

<sup>3</sup>Hartmann wurde 1909 Nachfolger von Schwarzschild als Direktor der Sternwarte in Göttingen.



die Rötung in Richtung der Kugelhaufen nur sehr gering sein konnte (Shapley 1916, siehe auch die Diskussion in van der Kruit 2015). Dieses Resultat brachte viele Astrophysiker dazu, die ganze Rolle des Staubs zu vernachlässigen. Aber – wie wir heute wissen – sammelt sich der Staub vor allem in der dünnen Scheibe unserer Milchstraße. Die Vernachlässigung von Staub und seiner Wirkung führte dazu, dass Schwarzschild, Kapteyn und viele ihrer Zeitgenossen die Sonne nahe am galaktischen Zentrum sahen. Auch ging Schwarzschild bei seiner Lösung davon aus, dass die Milchstraße eine Scheibe sei mit ungefähr der gleichen Menge von Sternen in jeder Richtung. Ein interessantes Problem war jedoch, dass das relativ kleine und auf die Sonne zentrierte Universum Kapteyns nicht mit den Beobachtungen von Kugelhaufen durch Shapley übereinstimmte. Das Zentrum der Kugelhaufen lag weit entfernt vom Zentrum der Sterne. Wie man diese beiden Systeme in Übereinstimmung bringen könnte, wusste keiner!

Kapteyn schrieb 1915 über die Rolle des Staubs an George Hale:<sup>4</sup>

*„Eine der irgendwie erstaunlichen Konsequenzen ist, dass wir zugeben müssen, dass unser Sonnensystem im Zentrum oder in der Nähe des Zentrums des Universums, oder wenigstens in einem lokalen Zentrum steht. Vor 20 Jahren hätte mich dies sehr skeptisch gemacht. (...) Nun nicht mehr. Seelinger, Schwarzschild, Eddington und ich haben alle herausgefunden, dass die Anzahl der Sterne in der Nähe der Sonne größer ist. Ich habe mich wegen dieses Resultats manchmal unwohl gefühlt, denn in seiner Ableitung ist die Betrachtung des Streulichtes im Raum vernachlässigt worden. Andererseits scheint es mehr und mehr klar zu werden, dass die Streuung zu klein sein muss und auch von einem anderen Charakter ist, als was die Änderung der scheinbaren Dichte erklären würde. Die Änderung ist daher ziemlich sicher real.“* (van der Kruit 2015, siehe auch Paul 1985)

Robert Trumpler zeigte aber 1930, dass die Lichtabsorption durch interstellaren Staub sehr wichtig ist, und hat damit unser Verständnis der Galaxie für immer verändert (Trumpler 1930).

## 5 Große Himmeldurchmusterungen

Nach den ersten Ergebnissen von Kapteyn und Schwarzschild gab es große Pläne für sehr ehrgeizige Durchmusterungen. Kapteyn schlug vor, spezielle Gebiete in der Milchstraße (die sogenannten „selected areas“) zu beobachten und dabei tiefer – das heißt zu schwächeren Sternen – zu gehen. Daneben gab es Pläne für eine große Durchmusterung, „Carte du Ciel“ genannt (Jones 2000) – ein niemals fertiggestelltes internationales Projekt. Achtzehn Sternwarten hatten jeweils einen Teil des Himmels für Beobachtungen zugeteilt bekommen, Potsdam war eine davon unter der Leitung von Karl Schwarzschild. Das Ziel war die Vermessung der Positionen von etwa einer Million Sterne bis zur 11. Größenklasse und die Erstellung einer fotografischen Himmelskarte bis zur 14. Größenklasse.

Heutzutage gibt es viele systematische Durchmusterungen, die mit den heutigen Techniken viel einfacher durchzuführen sind. Im Fachbereich der Studien der Milchstraße warten wir heutzutage besonders auf die Ergebnisse der Gaia-Mission. Gaia ist ein Satellit der

<sup>4</sup>Von den Autoren übersetzt.

Europäischen Weltraumagentur ESA, der Ende 2013 gestartet wurde. Gaia wird über eine Milliarde Sterne vermessen, bis zu G (Gaias Größenklasse) von 20,7. Wir werden Eigenbewegungen und Parallaxen mit einer Genauigkeit von etwa  $30 \mu\text{arcsec}$  (30 Millionstel Bogensekunden) bei  $G \approx 15$  erhalten und  $600 \mu\text{arcsec}$  bei  $G \approx 20$ . Dazu misst Gaia auch noch Radialgeschwindigkeiten bis  $G \approx 15$ –16. Gaia wird den ganzen Himmel mehrfach abtasten, im Mittel wird jeder Stern über die nächsten fünf Jahre 70 Mal beobachtet werden (Gaia Collaboration 2016).

Mit dem Gaia-Katalog werden wir die Milchstraße viel besser verstehen, ihre Geschichte, ihren Aufbau und ihre Zukunft. Wir werden viel weiter sehen, als wir je gesehen haben. Und alles wird sich bewegen!

Was noch fehlt, gerade auch nach Gaia, sind Messungen der Radialgeschwindigkeiten für schwächere Sterne. Wir brauchen Spektroskopie, um unsere Milchstraße völlig zu verstehen und die Herkunft und Verteilung der chemischen Elemente zu kartieren. Es ist eine Ironie der Geschichte, dass wir uns in einer gleichen Situation befinden wie einst Karl Schwarzschild und seine Zeitgenossen, die auch nur für einen kleinen Teil der Sterne Spektren, und somit Radialgeschwindigkeiten, zur Verfügung hatten. Zwei wichtige spektroskopische Durchmusterungen, RAVE und 4MOST (Kunder et al. 2016; de Jong et al. 2014) werden heutzutage vom Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam (AIP) geleitet.

## 6 Abschluss

Alles zusammen, haben wir in den kommenden Jahrzehnten eine ganze Menge an Daten zu bearbeiten. Es wäre wohl leichter für uns, wenn wir dafür Ausnahmewissenschaftler vom Kaliber Schwarzschilds hätten. Am Ende dieses Beitrags fragen wir uns: Was können wir von seiner Arbeit und insbesondere von seiner Vorgehensweise auch heute noch lernen? Zwei sehr inspirierende Schlussfolgerungen ergeben sich: Erstens, dass man die einfache Form nicht aus den Augen verlieren darf, auch wenn man mit einer ganzen Menge Daten arbeitet. Und zweitens, wie wichtig es ist, immer das Ganze im Blick zu behalten.

## 7 Karl Schwarzschild in Potsdam

Karl Schwarzschild war acht Jahre bis zu seinem Tod Direktor des Astrophysikalischen Observatoriums Potsdam. Das 1874 gegründete Institut war weltweit das erste, das den Begriff „Astrophysik“ im Namen trug. Der Nachfolger dieser Einrichtung (und ebenso der 1700 gegründeten Berliner Sternwarte) ist das heutige Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam (AIP). Dieses lobt seit 2011 einen Preis verbunden mit einem Fellowship zu Ehren von Karl Schwarzschild aus. Dieser wird in einem internationalen Wettbewerb für ein eigenständiges Forschungsprogramm abwechselnd in den Bereichen extragalaktische Astrophysik und Sternphysik vergeben.

**Danksagungen.** E.S. dankt Katja Weingrill und Maïke Lisinski herzlich für ihre Hilfe bei der deutschen Übersetzung des Festvortrags und dieses Beitrags.

## Literatur

- Gaia Collaboration. 2016, *The Gaia mission*, Astronomy & Astrophysics im Druck, arXiv:1609.04153v1 [astro-ph.IM].
- de Jong, R. S., Barden, S., Bellido-Tirado, O., et al. 2014, *4MOST: 4-metre MultiObject Spectroscopic Telescope*, in: *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy V*, Proceedings SPIE 9147, 91470M.
- Hartmann, J. 1904, *Investigation on the spectrum and orbit of  $\delta$  Orionis*, Astrophysical Journal 19, 268.
- Jones, D. 2000, *The scientific value of the Carte du Ciel*, Astronomy & Geophysics 41, 5.16.
- Kunder, A., Kordopatis, G., Steinmetz, M., et al. 2016, *The Radial Velocity Experiment (RAVE): Fifth Data Release*, arXiv:1609.03210v2 [astro-ph.SR].
- Paul, E. R. 1985, *Kapteyn and Statistical Astronomy*, in: *The Milky Way Galaxy*, H. van Woerden, R. J. Allen, & W. B. Burton (Hrsg.), IAU Symposium 106, 25.
- Schwarzschild, K. 1890a, *Zur Bahnbestimmung nach Bruns*, Astronomische Nachrichten 124, 211.
- Schwarzschild, K. 1890b, *Methode zur Bahnbestimmung der Doppelsterne*, Astronomische Nachrichten 124, 215.
- Schwarzschild, K. 1897, *Was in der Welt ruht*, Die Zeit, Wien, 11, Nr. 142, 181.
- Schwarzschild, K. 1907, *Ueber die Eigenbewegungen der Fixsterne*, Nachrichten von der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse, Nr. 5, 614.
- Schwarzschild, K. 1908, *Ueber die Bestimmung von Vertex und Apex nach der Ellipsoidhypothese aus einer geringen Anzahl beobachteter Eigenbewegungen*, Nachrichten von der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse, Nr. 2, 191.
- Schwarzschild, K. 1910, *Über die Integralgleichungen der Stellarstatistik*, Astronomische Nachrichten 185, 81.
- Schwarzschild, K. 1912, *Zur Stellarstatistik*, Astronomische Nachrichten 190, 361.
- Shapley, H. 1916, *Studies of Magnitudes in Star Clusters. I. On the Absorption of Light in Space*, Proceedings of the National Academy of Science 2, 12.
- Trumpler, R. J. 1930, *Absorption of Light in the Galactic System*, Publications of the Astronomical Society of the Pacific 42, 214.
- van der Kruit, P. C. 2015, *Jacobus Cornelius Kapteyn: Born Investigator of the Heavens*, Astrophysics and Space Science Library 416, Springer International Publishing Schweiz.
- Voigt, H.-H. 1992, *Karl Schwarzschild: Gesammelte Werke / Collected Works*, Band 1, 31, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.



Karl Schwarzschild (1873–1916):  
Ein Pionier und Wegbereiter der Astrophysik, 73–80  
Klaus Reinsch und Axel D. Wittmann (Hrsg.)  
© Universitätsverlag Göttingen 2017

## Schwarze Löcher, von Schwarzschild's „Massenpunkt“ bis GW150914

Jens C. Niemeyer<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Georg-August-Universität Göttingen, Institut für Astrophysik  
*E-Mail:* jens.niemeyer@phys.uni-goettingen.de

**Zusammenfassung.** 100 Jahre nachdem Karl Schwarzschild mit seinem „Massenpunkt“-Aufsatz die Grundlage zur Erforschung schwarzer Löcher legte, wurde mit dem Gravitationswelleneignis GW150914 erstmals direkt die Verschmelzung zweier schwarzer Löcher nachgewiesen. Schwarze Löcher haben die Wissenschaft im vergangenen Jahrhundert in vielerlei Hinsicht an den Rand der Erkenntnis gebracht. Nach ihrer theoretischen Entdeckung und, wesentlich späteren, breiten Akzeptanz als physikalische Realität haben schwarze Löcher inzwischen eine ständige und noch immer hochaktuelle Rolle in der Astrophysik und fundamentalen Physik eingenommen.

### Black Holes, from Schwarzschild's „Massenpunkt“ to GW150914

**Summary.** 100 years after Karl Schwarzschild's article on the solution of Einstein's field equations for a point mass („Massenpunkt“) established the basis for the exploration of black holes, the gravitational wave event GW150914 allowed the observation of two merging black holes for the first time in history. In the past century, black holes literally brought science to the edge of knowledge in many respects. Following their theoretical discovery and, much later, broad acceptance as a physical reality, black holes have meanwhile taken a permanent and still highly topical role in astrophysics and fundamental physics.

## 1 Schwarzschild's Raumzeit und der lange Weg zum schwarzen Loch

Die Geschichte der schwarzen Löcher begann schon im 18. Jahrhundert, deren Physik von den Newtonschen Gesetzen der Gravitation und einer Teilchenvorstellung des Lichts, das sich mit der bereits bekannten universellen Lichtgeschwindigkeit ausbreitet, geprägt war. Kombiniert man diese beiden Konzepte so gelangt man, so wie es der britische Naturphilosoph John Michell (Michell 1784) und, wahrscheinlich unabhängig von Michell, Pierre-Simon Laplace (Laplace 1796) taten, zur Vorstellung der „dunklen Sterne“: Objekte, deren Masse innerhalb eines so geringen Radius konzentriert ist, dass ihre Entweichgeschwindigkeit diejenige der Lichtteilchen übersteigt. Diese fallen wieder auf den Stern zurück, anstatt zu entkommen. Da keine Gesetze der Physik bekannt waren, die der Existenz dunkler Sterne widersprachen, wurden sie schnell als mögliche Realität anerkannt. Erst die Entdeckung von Interferenzerscheinungen, die ein Wellenbild des Lichts nahelegten, ließ Zweifel an der alten Interpretation aufkommen. Doch niemand ahnte wahrscheinlich, wie radikal sich die

Vorstellungen von Raum und Zeit ändern sollten, um Licht und Gravitation gemeinsam in einer physikalisch konsistenten Theorie beschreiben zu können.

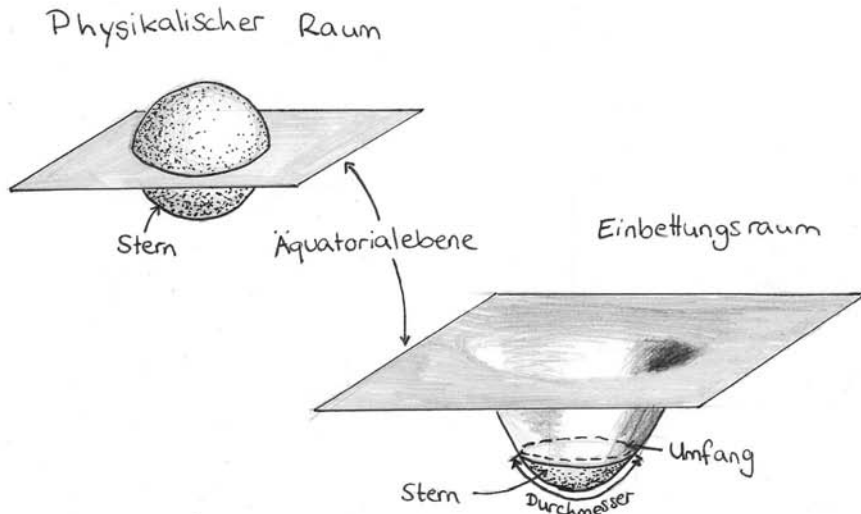
Zu Beginn des 20. Jahrhunderts war die klassische Theorie des Lichts, beschrieben durch elektromagnetische Wellen, die den Maxwell'schen Gleichungen gehorchen, gut verstanden. Nur die konstante Geschwindigkeit des Lichts unabhängig vom Bewegungszustand seiner Quelle relativ zu Newtons „absoluten Raum“ widersetzte sich penetrant allen Versuchen einer experimentellen Widerlegung. Albert Einstein war der Erste, der die Schuld hierfür nicht auf der Seite des Lichts, sondern in der Newton'schen Vorstellung von Raum und Zeit suchte, welches schließlich in seiner Speziellen Relativitätstheorie (SRT) mündete (Einstein 1905). Wie schon 1907 von Hermann Minkowski erkannt (und 1909 veröffentlicht) wurde (Minkowski 1909), sind Raum und Zeit in der SRT in einem untrennbaren Kontinuum, der *Raumzeit*, verwoben.

Einstein erkannte schnell, dass auch Newtons Gravitationstheorie nicht mit der SRT, und damit der Theorie des Lichts, vereinbar ist. Sein langer Weg zur Verallgemeinerung der SRT um das Phänomen der Schwerkraft brachte ihn schließlich zu einer Erkenntnis, für die Minkowskis Konzept der Raumzeit eine zentrale Rolle spielt: die Gravitation ist keine Kraft wie alle anderen, die von Feldern durch Raum und Zeit kommuniziert wird, sondern die *Krümmung* der Raumzeit selbst, die durch die Verteilung von Masse und Energie verursacht wird. Ebenso wie unbeschleunigte massive Körper bewegt sich Licht auf den verallgemeinerten geraden Linien der gekrümmten Raumzeit, den sogenannten *Geodäten*.

Die endgültige Umsetzung dieser Idee gelang Einstein erst im Oktober 1915 mit seiner Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) nach einer Reihe unvollständiger Anläufe (Einstein 1916). Sie gilt bis heute als die konzeptionell einfachste und vielleicht ästhetischste Theorie der modernen Physik, doch ihre mathematische Formulierung ist alles andere als einfach. Und so ging auch Einstein nicht davon aus, dass schon bald eine erste exakte Lösung gefunden werden könnte. Seine Berechnung der beobachteten Periheldrehung des Merkur, die ihn schließlich selbst von der Korrektheit seiner Theorie überzeugte, beruhte noch auf einer näherungsweise Lösung der Feldgleichungen (Einstein 1915).

Karl Schwarzschild beschäftigte sich schon im Dezember 1915 an der russischen Front mit der im November erschienenen Theorie Einsteins und stand mit ihm in engem Austausch (siehe z.B. Abbildung 2). Dort brach eine Autoimmunkrankheit aus, an der er ein halbes Jahr später sterben sollte. Noch während seines Krankenhausaufenthalts fand er innerhalb weniger Tage die erste exakte Lösung der Feldgleichungen der ART: die Geometrie der Raumzeit außerhalb einer statischen, sphärisch symmetrischen Massenverteilung. Schwarzschild schickte seinen Aufsatz „*Über das Gravitationsfeld eines Massenpunktes nach der Einsteinschen Theorie*“ an Einstein, der ihn am 13. Januar 1916 der Deutschen Akademie der Wissenschaften präsentierte (Schwarzschild 1916a). Einige Wochen später schickte Schwarzschild ein zweites Manuskript nach, in dem er das Gravitationsfeld innerhalb eines sphärisch symmetrischen Sterns mit gleichförmiger Dichte berechnete (Schwarzschild 1916b).

Es ist die erste Arbeit über den „Massenpunkt“, mit der die moderne Geschichte der schwarzen Löcher beginnt. Doch davon ahnte Schwarzschild noch nichts. Er betrachtete seine Raumzeit primär als eine nützliche, weil exakte, Lösung zur Berechnung der Bahnen von Himmelskörpern im Gravitationsfeld massiver Objekte wie der Sonne. In Bezug auf Einsteins Näherungslösung der Bewegung des Merkurperihels schrieb er (Schwarzschild 1916a):



**Abb. 1.** Einbettungsdiagramm, das die Raumkrümmung innerhalb eines Sterns veranschaulicht (Bild: M. Niemeyer, nach einer Vorlage von K. Thorne/ Thorne 1994).

*Die folgende Rechnung liefert die strenge Lösung des Problems. Es ist immer angenehm, über strenge Lösungen einfacher Form zu verfügen. Wichtiger ist, daß die Rechnung zugleich die eindeutige Bestimmtheit der Lösung ergibt, über die Hrn. Einsteins Behandlung noch Zweifel ließ, und die nach der Art, wie sie sich unten einstellt, wohl auch nur schwer durch ein solches Annäherungsverfahren erwiesen werden könnte. Die folgenden Zeilen führen also dazu, Hrn. Einsteins Resultat in vermehrter Reinheit erstrahlen zu lassen.*

Die Koordinaten, in denen Schwarzschild seine Lösung darstellte, stimmen nicht mit denjenigen überein, die heute als „Schwarzschild-Koordinaten“ bekannt sind. Dies ist eine Folge dessen, dass Schwarzschild mit einer vorläufigen Version der ART arbeitete, in der Einstein noch eine Einschränkung der Koordinatenwahl forderte, die er in der endgültigen Fassung als überflüssig erkannte<sup>1</sup>. Aus Regularitätsgründen wählte Schwarzschild den Ursprung seines Koordinatensystems an jenem Ort, an dem sich wie wir heute wissen der Horizont des schwarzen Lochs befindet. Diese Wahl führte zum Begriff der „Schwarzschild-Singularität“ und war die Quelle vielfältiger Verwirrungen bis in die 1960er Jahre.

Die von Schwarzschild vorhergesagte Krümmung des Raums in der Umgebung eines Sterns lässt sich durch ein sogenanntes *Einbettungsdiagramm* veranschaulichen (Abb. 1). Darin wird eine zweidimensionale Schnittebene durch den Stern in einen fiktiven, ungekrümmten, dreidimensionalen Raum eingebettet, so dass ihre innere Krümmung sichtbar wird. Der Einbettungsraum ist ein reines Hilfsmittel und sollte nicht mit dem realen Raum oder gar der Raumzeit verwechselt werden. Man erkennt schön, dass das Verhältnis von

<sup>1</sup>Die Wahl erlaubter Koordinatensysteme wurde von Einstein ursprünglich auf jene eingeschränkt, in denen die Metrik  $g_{\mu\nu}$  die Eigenschaft  $g = \det(g_{\mu\nu}) = -1$  erfüllt.

Kochl. Schwarzschild R 29 III. 15.

Zwei geliebten dem Kollegen!

Ihre Rechnung, die den Einleitungs-  
 kritischen Beweis für das Problem liefert,  
 ist höchst interessant. Hoffentlich  
 veröffentlichen Sie dieselbe bald!  
 Ich hätte nicht gedacht, dass die  
 strenge Behandlung des Rand-  
 problems so einfache wäre.

Für Ihre partielle Lösung, z. B. Ordnung  
 ist, erkenne man zugleich, wie dimension  
 gründen. Es ist nämlich  $\frac{K_{000}}{r}$  <sup>(dimensionslos)</sup>  
 Zahl. Durch  $\beta$  von  $n$  abhängen muss,  
 so verlangt Ihr Ausdruck

$$g_{20} = -\beta \frac{2K_0}{r^2} + \delta_{20} \frac{K_0}{3r^2}$$

in welchem  $\frac{K_0}{r^2}$  eine Zahl (dimensionslos)  
 ist, dass  $\beta$  bis auf einen Zahlenfaktor  
 gleich  $\left(\frac{K_{000}}{r}\right)^2$  sein muss.


Die Theorie befreit mich sehr.  
 Schon dass sie die Newton'sche  
 Näherung ergibt, ist nicht selbstver-  
 ständlich, dass schöner ist es, dass

sie auch noch die Perihel-  
 bewegung und die anomale  
 auch nicht genügend genaue  
 Linierverschiebung liefert.  
 Am wichtigsten ist nun  
 die Frage der Lichtstrahlen  
 Krümmung.

Ich besten grüssen  
 und Wünschen für  
 das neue Jahr Ihr  
 Einstein.

Postkarte

Herrn



Prof. Dr. K. Schwarzschild

Lt. d. L. beim Stabe des  
 Generals d. Artillerie 10  
 7. Landwehrdivision

Armeesabteilung Guedl.

Abb. 2. Postkarte von Einstein an Schwarzschild (SUB: Cod. Ms. K. Schwarzschild/ Briefe-193).



Umfang und Durchmesser des Raumbereichs, in dem sich der Stern befindet, weniger als  $\pi$  beträgt. Dies ist eines der Merkmale der Krümmung des Raums in der Schwarzschild-Raumzeit.

Nicht nur der Raum, sondern auch die Zeitrichtung wird durch die Anwesenheit der Masse gekrümmt. In schwachen Gravitationsfeldern wie demjenigen der Erde macht sich dieser Effekt dadurch bemerkbar, dass Uhren in größeren Höhen, beispielsweise den Umlaufbahnen der GPS-Satelliten, schneller laufen als auf der Erdoberfläche. Seinen extremsten Ausdruck bekommt er, wie nicht anders zu erwarten, im Falle eines schwarzen Loches: ein weit entfernter Beobachter, der sich in Bezug auf das schwarze Loch in Ruhe befindet, sieht die Zeit auf einer Uhr, die gerade in das schwarze Loch hineinfällt, völlig zum Stillstand kommen, sobald sie den Horizont überquert. Alle physikalischen Prozesse frieren aus Sicht dieser entfernten Perspektive ein, sobald sie in die Nähe des Horizonts kommen! Hingegen passiert für einen Beobachter, der in das schwarze Loch fällt, am Horizont nichts Besonderes. Die Zeit auf seiner Uhr läuft unverändert weiter.

Die Folgen der Raum- und Zeitkrümmung, die Schwarzschilds Lösung für die Umlaufbahnen und die Lichtablenkung in der Nähe von Sternen voraussagt, wurden bald nach deren Veröffentlichung von den Physikern dieser Zeit akzeptiert. Ganz anders verhielt es sich mit der ebenso zwingenden Vorhersage für den Fall, dass die Masse des Stern so stark komprimiert wird, dass sie sich vollständig innerhalb des „Schwarzschild-Radius“ befindet. Dies ist der Ort, an dem Schwarzschilds Koordinatensystem singulär wird und der, wie man heute versteht, den Horizont eines schwarzen Lochs markiert. Dann verlaufen alle Bahnen, für Licht wie für massereiche Teilchen, innerhalb des Horizonts in Richtung des Zentrums des schwarzen Lochs. Die Folge ist, dass weder Licht noch Materie, die einmal den Horizont nach innen überquert haben, jemals wieder aus diesem austreten können, sondern unweigerlich in eine Region mit unbeschränkt wachsender Raumzeit-Krümmung im Zentrum stürzen. Oberflächlich betrachtet ähnelt dieses Resultat den „dunklen Sternen“ von Michell und Laplace, doch die zugrundeliegende Physik ist völlig verschieden<sup>2</sup>.

Insbesondere zwei der einflussreichsten Physiker der damaligen Zeit leisteten vehementen Widerstand gegen die Vorstellung, dass Materie jemals derart stark komprimiert werden könnte: Albert Einstein und Sir Arthur Eddington, der wahrscheinlich wichtigste Astrophysiker des frühen 20. Jahrhunderts. Einstein veröffentlichte noch 1939 eine Rechnung in der er nachwies, dass Materie innerhalb des Schwarzschild-Radius nicht durch ihre Eigenbewegung stabil gehalten werden kann und interpretierte dies fälschlicherweise so, dass dieser Zustand erst gar nicht eintreten könne (Einstein 1939). Eddingtons Weigerung, die Theorie des jungen indischen Physikers Subrahmanyan Chandrasekhar anzuerkennen, derzufolge Weiße Zwergsterne oberhalb einer gewissen kritischen Masse instabil werden und zwangsweise kollabieren müssen, beendete praktisch dessen Karriere in Großbritannien und führte zu seiner Auswanderung in die USA. Selbst John Wheeler, später einer der herausragendsten Experten in der Theorie schwarzer Löcher und Erfinder ihres Namens<sup>3</sup>, versuchte anfäng-

---

<sup>2</sup>Auch die Konsequenzen für die Materie innerhalb des Horizonts ist wesentlich katastrophaler: es gibt für sie keinen stabilen Zustand, der sie von ihrem Schicksal unendlicher Kompression bewahren könnte. Im Gegensatz dazu lebten die dunklen Sterne des 18. Jahrhunderts ein friedliches, wenn auch unsichtbares, Leben.

<sup>3</sup>Sowie der Doktorvater oder -großvater eines großen Teils der heute aktiven relativistischen Physiker in den USA, ebenso wie Dennis Sciama in Großbritannien und Yakov Zel'dovich in Russland.

lich mit großem Einsatz, deren mögliche Existenz zu widerlegen. Es bedurfte vielfältiger theoretischer Erkenntnisse über die Eigenschaften von kollabierender Materie über ihren Schwarzschild-Radius hinaus, verbunden mit Namen wie Oppenheimer, Snyder, Finkelstein, Landau, Zel'dovich und vielen anderen, bis die Existenz dieser extremen Form der Raumzeit, die jeglicher Alltagsintuition widerspricht, als physikalische Realität anerkannt wurde.

Letztlich waren es astronomische Beobachtungen, die die letzten seriösen Zweifler überzeugten. Anfang der 1960er Jahre fanden Astronomen starke galaktische Röntgenquellen, die durch akkretierende Neutronensterne und schwarze Löcher erklärt wurden. Zur etwa gleichen Zeit konnten Quasare, die zuvor als unerklärliche starke Radioquellen entdeckt worden waren, mit supermassiven schwarzen Löchern von vielen Millionen Sonnenmassen in weit entfernten Galaxien identifiziert werden. Diese Bestätigung der Existenz schwarzer Löcher wurde von einem „goldenen Zeitalter“ ihrer theoretischen Erforschung begleitet, das wesentliche Erkenntnisse über die fundamentalen Eigenschaften geladener und rotierender schwarzer Löcher hervorbrachte. Schwarzschilds Raumzeit war im Mittelpunkt des Interesses der modernen Physik angelangt.

## 2 Ein Jahrhundert später

Am 11. Februar 2016, einhundert Jahre nach dem Erscheinen von Schwarzschilds „Massenpunkt“-Artikel, verkündete die LIGO-Kollaboration den ersten direkten Nachweis von Gravitationswellen, gemessen mit Hilfe zweier kilometerlanger Laserinterferometer in den USA (Abbott et al. 2016). Eine Milliarde Jahre zuvor waren zwei schwarze Löcher mit Massen von ungefähr 30 Sonnenmassen in einer entfernten Galaxie miteinander verschmolzen und hatten in den Sekundenbruchteilen zuvor ihre umgebende Raumzeit derart stark verformt, dass sich ein kurzer Puls aus Gravitationswellen bis zu uns ausbreitete, ähnlich der konzentrischen Wasserwellen in einem See, in den ein Stein geworfen wurde. Während der Wellenpuls durch die Erde hindurchlief, änderte er die Längen der Interferometerarme um Bruchteile eines Atomkerndurchmessers und hinterließ dabei einen Fingerabdruck, der eine detaillierte Rekonstruktion der katastrophalen Begegnung sowie der Massen und Drehimpulse der beteiligten schwarzen Löcher erlaubte. Es war der erste Nachweis von schwarzen Löchern in diesem Massenbereich, die erste Beobachtung des Verschmelzens von schwarzen Löchern, die erste Bestätigung der ART für sehr starke Gravitationsfelder und der voraussichtliche Beginn einer neuen Ära der Gravitationsphysik und -astronomie.

Schwarze Löcher gehören heute zum unstrittigen Inventar astrophysikalischer Phänomene. Man vermutet, dass sich im Zentrum fast aller ausreichend großer Galaxien, einschließlich unserer Milchstraße, mindestens ein supermassives schwarzes Loch von mehreren Millionen bis Milliarden Sonnenmassen befindet. Sie machen sich entweder als aktive Galaxienkerne durch Akkretion großer Gasmassen und gewaltige, energiereiche Ausströmungen mit Geschwindigkeiten nahe der Lichtgeschwindigkeit bemerkbar, oder lassen sich passiv durch die elliptischen Umlaufbahnen und hohen Geschwindigkeiten der Sterne in ihrer Umgebung nachweisen. Über ihre Entstehung weiß man bisher nur, dass sie schon innerhalb der ersten Millionen Jahre nach dem Urknall begonnen haben muss, um die Beobachtung leuchtkräftiger Quasare bei hohen Rotverschiebungen erklären zu können. Das geplante *James-Webb Space Observatory* der NASA verspricht große Fortschritte bei der Beobachtung der frühen Entwicklungsphasen und, möglicherweise, der Entstehung dieser faszinierenden Objekte.

Auch für theoretische Physiker haben schwarze Löcher nichts von ihrer Faszination verloren. Erst seit einigen Jahren erlauben stabile numerische Methoden Simulationen von verschmelzenden schwarzen Löchern über mehrere Umlaufzeiten und damit die präzise Interpretation von zukünftigen Gravitationswellenbeobachtungen. Weitere Fortschritte, z.B. beim Verständnis der Wechselwirkung rotierender schwarzer Löcher mit fundamentalen Skalarfeldern, werden erwartet.

Auf noch fundamentalerer Ebene sorgt weiterhin Stephen Hawking's Entdeckung (Hawking 1974), dass schwarze Löcher durch Quantenfluktuationen verdampfen können, für großes Kopfzerbrechen bei theoretischen Physikern. In der semiklassischen Beschreibung dieses Prozesses scheint es so, dass reine Quantenzustände in gemischte umgewandelt werden können, was im Widerspruch zu den vermuteten Eigenschaften einer vereinheitlichten Quantentheorie aller Wechselwirkungen einschließlich der Gravitation steht. Dieses Problem hat maßgeblich zur Entwicklung sogenannter holographischer Theorien beigetragen, in denen die Quantengravitationstheorie einer Raumzeit mathematisch auf eine Theorie ohne Gravitation auf dem Rand dieser Raumzeit abgebildet werden kann. Schwarze Löcher in diesen Theorien haben nur wenig mit ihren astrophysikalischen Verwandten gemeinsam, dienen aber als wichtige theoretische Hilfsmittel bei der Suche nach der Theorie der Quantengravitation.

Diese vereinheitlichte Theorie wird schließlich auch nötig sein, um das Geheimnis der Singularität im Zentrum aller schwarzer Löcher zu lüften, an der unser bisheriges Verständnis von Raum und Zeit zusammenbricht. Die Entdeckungsreise, die mit Schwarzschilds Lösung der Einsteingleichungen begann, ist noch lange nicht am Ziel.

## Literatur

- Abbott, B. P., Abbott, R., Abbott, T. D., et al. 2016, *Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger*, Physical Review Letters, 116, 061102
- Einstein, A. 1905, *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*, Annalen der Physik, 322, 891–921
- Einstein, A. 1915, *Erklärung der Perihelbewegung des Merkur aus der allgemeinen Relativitätstheorie*, Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, 831–839
- Einstein, A. 1916, *Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie*, Annalen der Physik, 354, 769–822
- Einstein, A. 1939, *On a Stationary System with Spherical Symmetry Consisting of Many Gravitating Masses*, Annals of Mathematics, 40, 922
- Hawking, S. W. 1974, *Black hole explosions?*, Nature, 248, 30–31
- Laplace, P. 1796, *Exposition du Système du Monde*. Part 11
- Michell, J. 1784, *On the Means of Discovering the Distance, Magnitude, &c. of the Fixed Stars, in Consequence of the Diminution of the Velocity of Their Light, in Case Such a Diminution Should be Found to Take Place in any of Them, and Such Other Data Should be Procured from Observations, as Would be Farther Necessary for That Purpose. By the Rev. John Michell, B. D. F. R. S. In a Letter to Henry Cavendish, Esq. F. R. S. and A. S.*, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series I, 74, 35–57
- Minkowski, H. 1909, *Raum und Zeit*, Jahresbericht der deutschen Mathematiker-Vereinigung, 18, 75–88
- Schwarzschild, K. 1916a, *Über das Gravitationsfeld eines Massenpunktes nach der Einsteinschen Theorie*, Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, 189–196

Schwarzschild, K. 1916b, *Über das Gravitationsfeld einer Kugel aus inkompressibler Flüssigkeit nach der Einsteinschen Theorie*, Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, 424–434

Thorne, K. S. 1994, *Black holes and time warps: Einstein's outrageous legacy*, Commonwealth Fund Book Program, New York, NY: W.W. Norton and London: Picador

Karl Schwarzschild (1873–1916):  
Ein Pionier und Wegbereiter der Astrophysik, 81–93  
Klaus Reinsch und Axel D. Wittmann (Hrsg.)  
© Universitätsverlag Göttingen 2017

# Karl Schwarzschild – Wegbereiter moderner Teleskopoptik

Harald E. Nicklas<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Georg-August-Universität Göttingen, Institut für Astrophysik  
*E-Mail:* harald.nicklas@uni-goettingen.de

**Zusammenfassung.** Die Arbeiten Karl Schwarzschilds zur Optik, und hier insbesondere zur Teleskopoptik, sind fundamental, wie so viele seiner astrophysikalischen Arbeiten. Sie bilden bis heute die Grundlage für das Design, das Verständnis und die Optimierung des optischen Strahlengangs großer und bedeutender Teleskope. Selbst die optischen Entwürfe heutiger Teleskopgiganten bis 40 Meter Öffnung fußen mit ihren Drei-Spiegel-Anastigmaten auf seinen Arbeiten. Diese in ihrer Bedeutung und Tragweite oft unterschätzten und außerhalb von Fachkreisen wenig bekannten Beiträge erneut ins Bewusstsein zu rufen, ist das Ziel der nachfolgenden Schrift.

**Summary.** Karl Schwarzschild's papers on geometrical optics, and here especially on telescope optics, are fundamental, like so many of his astrophysical articles. These papers build the foundation for the design, the comprehension, and thus the optimization of optical designs for the largest telescopes until today. Even optical designs of three-mirror anastigmats for the next generation's gigantic telescopes, with apertures of up to 40 meter, are based on his fundamental work. Therefore, the aim of the following article is to shed light on to this work in optics and to emphasize its impact.

## 1 Einleitung

Dieser Artikel beleuchtet die Entwicklung der Teleskopoptik mit Einführung der ersten Reflektoren (Refraktoren spielen in der Großteleskopentwicklung heute keine Rolle mehr), bevor auf den Einfluss und die Verdienste von Karl Schwarzschild auf diese Entwicklung näher eingegangen wird. Hierbei spielt seine dreibändige Veröffentlichung zur geometrischen Optik die zentrale Rolle. Mit ihr wurde der Grundstein für das Design der Spiegeloptik von Großteleskopen gelegt, deren Gleichungen und Lösungen bis zum heutigen Tag Anwendung finden. Wegen Schwierigkeiten in der Herstellung und vor allem der Prüfung der hochsphärischen Korrekturoptiken vergingen sechs Jahrzehnte, bis sie allgemeine Verbreitung im Teleskopbau fanden. Wer sich näher mit dem Thema Optik im Teleskopbau, deren historischer Entwicklung und heutiger Leistungsfähigkeit beschäftigen möchte, dem seien zwei umfassende Veröffentlichungen empfohlen; die kompakte und manches Vorwissen voraussetzende Zusammenstellung im Handbuch für Physik von Bahner (1967) und die allumfassenden zwei Bände zum Thema Spiegelteleskopoptik von Wilson (1996). Eine Würdigung des Wirkens von Karl Schwarzschild als einem herausragenden Mathematiker und Praktiker auf dem Gebiet der Optik geschah im Rahmen des Eröffnungsvortrages zur Jahrestagung der Astronomischen Gesellschaft und Verleihung der Karl Schwarzschild Medaille an Raymond Wilson, verantwortlich für einige der größten und erfolgreichsten Teleskope der Europäischen Südsternwarte ESO (siehe Wilson 1994).

## 2 Die Theorien optischer Aberration

Der Beginn der optischen Aberrationstheorie wird zweifellos durch die Arbeit von William Rowan Hamilton markiert. Dieser veröffentlicht 1833 in Dublin seine „Charakteristische Funktion“ und gründet mit dieser den Zweig der geometrischen Optik, die er mit nur drei Parametern (Öffnungs- und Bildfeldradius sowie Azimutwinkel des Hauptstrahls) erfassen und beschreiben kann. Nur acht Jahre später tritt kein Geringerer als Carl Friedrich Gauß auf den Plan und veröffentlicht 1841 seine Theorie erster Ordnung zur geometrischen Optik. Seine Theorie gibt alle charakteristischen Größen an die Hand, die ein optisches System grundsätzlich beschreiben, wie Systembrennweite und Hauptebenen sowie Position und Größe des idealen Bildes. Denn er betrachtet den Verlauf von Lichtstrahlen im paraxialen Gebiet, also bei kleinen Winkeln, die bei gekrümmten Linsen- und Spiegelflächen nur sehr nahe der optischen Achse auftreten. Nur hier darf er den Sinus eines Winkels durch sein Argument ersetzen, wodurch das Brechungsgesetz zur Lineargleichung  $ni = n'i'$  wird. Mit dieser Theorie erster Ordnung erfasst Gauß (1841) zwar nicht die Qualität der optischen Abbildung, die aufgrund der Aberrationen weitgeöffneter Systeme (also auch achsferner Lichtstrahlen) zu Bildunschärfen und zu Kontrastminderung führt, jedoch stellt er damit die Grundlage bereit für weitergehende Theorien, die die Größe von Linsen und Spiegeln miteinbeziehen.

Der nächste Schritt zur Erfassung dieser Aberrationen wird von Ludwig Seidel (1856) in München mit dessen Theorie dritter Ordnung vollzogen, die die Winkelapproximation im Brechungsgesetz mit der dritten Potenz, also dem zweiten Glied der Reihenentwicklung der Sinus Winkelfunktion abbricht. Beide Entwicklungen, die eines zentrischen optischen Systems (Kugelflächen entlang einer horizontalen Geraden) und die des Sinus im Brechungsgesetz, in eine unendliche Potenzreihe lauten:

$$z = \frac{c}{2}y^2 + \frac{c^3}{8}y^4 + \frac{c^5}{16}y^6 + \dots \quad (1)$$

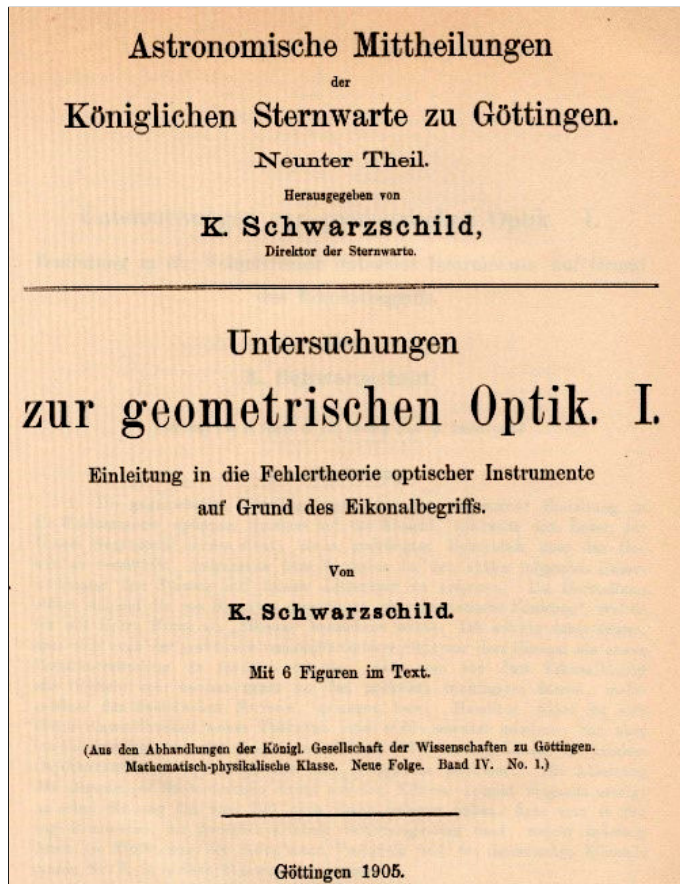
mit Krümmung  $c = \frac{1}{r}$

$$\sin i = i - \frac{i^3}{3!} + \frac{i^5}{5!} + \dots \quad (2)$$

Die erste Ordnung (Gauß) bricht nach dem ersten Glied, die dritte Ordnung (Seidel) nach einem weiteren Glied ab.

Hier formuliert Seidel erstmals die bis heute gebräuchlichen Begriffe für die fünf monochromatischen Hauptfehler der optischen Abbildung: Öffnungsfehler bzw. sphärische Aberration, Koma, Astigmatismus, Bildkrümmung und Verzeichnung. Seine Theorie bildet in Verbindung mit der fortschreitenden Technik der Durchrechnung ausgewählter Lichtstrahlen durch ein optisches System die Grundlage für die volle Erfassung und Kontrolle der Abbildungsgüte aller Arten optischer Systeme, die durch die Entwicklung der Photographie eine enorme Nachfrage erfahren.

An Seidels Theorie anknüpfend beschreitet Schwarzschild allerdings einen gänzlich anderen Weg, den der Störungsrechnung. Sein fundamentales Werk zur aberrationsbehafteten optischen Abbildung (vgl. Abbildung 1) gliedert sich in drei Abhandlungen: „I. Einleitung in die Fehlertheorie optischer Instrumente auf Grund des Eikonalbegriffs“, „II. Theorie der Spiegelteleskope“, „III. Über die astrophotographischen Objektive“. Alle drei sind 1905 in den Astronomischen Mitteilungen der Königlichen Sternwarte zu Göttingen, Teil 9, 10, und



**Abb. 1.** Deckblatt des ersten Teils von Schwarzschilds dreibändiger Veröffentlichung zur Optik.

11 erschienen und sind in den Abhandlungen der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Band IV enthalten.

Im ersten Teil stützt Schwarzschild seine Theorie auf die von Hamilton 1833 eingeführte „Charakteristische Funktion“ und bezeichnet diese in Anlehnung an den Mathematiker und Astronomen Ernst Heinrich Bruns als „Eikonal“. Dieser Begriff beruht auf dem Fermatschen Prinzip, wonach Lichtstrahlen den kürzesten Weg durchlaufen und bei unterschiedlichen Medien dem Brechungsgesetz folgen. Man kann sich die Fläche, auf der das Eikonal im dreidimensionalen Raum einen konstanten Wert annimmt, als die Wellenfront vorstellen, die immer senkrecht zu den jeweiligen Lichtstrahlen steht. Schwarzschild beschränkt sich hierbei rein auf die geometrische Optik und betrachtet keine Beugungseffekte.

Schwarzschilds Formulierung der Reihenentwicklung eines zentrischen Systems, allerdings mit einer kleinen Störung  $\epsilon$ , der Abweichung von der Kugelform, behaftet:

$$z = \frac{c}{2}y^2 + \frac{c^3}{8}(1 - \epsilon^2)y^4 + \frac{c^5}{16}(1 - \epsilon^2)y^6 + \dots \quad (3)$$

Mit dieser Betrachtung der Wellenfront – in Analogie zur Störungsrechnung der Himmelsmechanik – leitet er Ausdrücke und Berechnungen sowohl der Gaußschen als auch der Seidelschen Dioptrik erneut her, bevor er das Eikonal und seinen Formalismus zu einer Theorie der fünften Ordnung erweitert, aus der er neun optische Aberrationen, zusätzlich zu den bekannten fünf Hauptabbildungsfehlern der Seidelschen Theorie, ableitet. Auch Born und Wolf (1987, § 5.2, S. 207) greifen in ihrem Standardwerk zur Optik die Störungsrechnung von Schwarzschild auf und leiten mit ihrer Hilfe die bekannten fünf Seidelschen Hauptabbildungsfehler her. Die Anwendung eines „Störungsterms“ ist bei Teleskopspiegeln durchaus zulässig, da diese lediglich einen kleinen Raumwinkel abbilden und dabei nur einen kleinen Teil der Kugeloberfläche tatsächlich nutzen.

Im zweiten Teil seiner Abhandlung wendet er sich nun den Spiegelsystemen zu, da ihm diese vielversprechender erscheinen und im Begriff sind, die Linsen in großen Teleskopoptiken zu ersetzen. Er hat dies klar erkannt und daher bereits in der Einleitung zum zweiten Teil seiner Veröffentlichung folgendes vermerkt: *„In dem Wettkampf zwischen Refraktoren und Reflektoren gewinnen zur Zeit die Reflektoren wieder an Boden. Mannigfache frühere Bedenken in Bezug auf Exaktheit und Stabilität grosser Spiegel sind durch technische Fortschritte neueren Datums beseitigt.“* Unter Anwendung des Eikonalbegriffs auf einen Spiegel leitet er hier dessen Abbildungsfehler und die Bedingungen zum Verschwinden dieser Aberrationen in kombinierten Spiegelsystemen her. Hierzu lässt er geschickt eine bereits weiter oben erwähnte Deformation  $\epsilon$ , d.h. eine Abweichung von der Kugelgestalt, für jeden einzelnen Spiegel zu und entwickelt den Formalismus, um die Aberrationen für Zwei-Spiegel-Systeme zu minimieren.

Im dritten Teil werden die photographischen Objektive angesprochen. Diese sind ihm offenbar ein wichtiges Anliegen, da er sich bereits Jahre zuvor intensiv mit der photographischen Anwendung in der beobachtenden Astronomie beschäftigt hat. In seiner dreiteiligen Veröffentlichung ist den Herleitungen und Formeln eine mathematische Eleganz zuzusprechen. Einfache und elegante mathematische Ausdrücke sind unverkennbar auch ein Ziel seiner Veröffentlichungen.

### 3 Schwarzschilds Lösung für zentrierte optische Systeme

#### 3.1 Ein- und Zwei-Spiegel-Systeme

Das bekannteste Teleskopsystem, das nur einen abbildenden Spiegel verwendet, ist das Newton-Teleskop. Diese 1668 von Newton eingeführte Teleskopoptik verwendet einen parabolischen Hauptspiegel mit der bekannten Eigenschaft, alle parallel entlang der optischen Achse einfallenden Strahlen – die eine aus dem Unendlichen einfallende ebene Wellenfront repräsentieren – in einem Brennpunkt fehlerfrei zu vereinen und so den Hauptfehler der sphärischen Aberration zu beseitigen. Sobald man jedoch die optische Achse verlässt und Objekte im Bildfeld betrachtet, tritt Koma als eine Art Öffnungsfehler für schief zur optischen Achse einfallende Strahlen auf. Für mäßige Bildwinkel von weit weniger als einem Grad bleibt die Koma nahezu unmerklich klein und wird von den Unschärfen des atmosphärischen Seeing-Scheibchens überdeckt. Einen Ausweg für extrem große Felder von vielen Grad hat Bernhard Schmidt (1931) gewiesen, indem er die Symmetrie des optischen Systems für alle Bildwinkel einhält und den Restfehler der sphärischen Aberration durch eine asphärische Korrekturlinse behebt. Da dessen Brennpunktlage innerhalb des Systems für das Auge nicht zugänglich und



8

K. SCHWARZSCHILD,

Setzt man diese Ausdrücke in  $S^4$  (Gleichung (9)) ein, so erhält man die gesuchte Eikonalentwicklung:

$$\begin{aligned}
 4S^4 = & -R^2 H^4 \left\{ \frac{b}{r^3} + L \left( \frac{3L-2K}{r} \right) + (K-L)^2 \left( \frac{s}{l^3} - \frac{s'}{l'^3} \right) \right\} \\
 & - Q_1^2 h^4 \left\{ \frac{b}{r^3} + \frac{K^2}{r} \right\} \\
 & - 4\alpha_{01}^2 H^2 h^2 \left\{ \frac{b}{r^3} + \frac{L^2}{r} \right\} \\
 14) & - 2R_0 Q_1 H^2 h^2 \left\{ \frac{b}{r^3} + \frac{K(2L-K)}{r} \right\} \\
 & + 4R_0 \alpha_{01} H^2 h^2 \left\{ \frac{b}{r^3} + \frac{L(2L-K)}{r} \right\} \\
 & + 4Q_1 \alpha_{01} H h^3 \left\{ \frac{b}{r^3} + \frac{KL}{r} \right\}.
 \end{aligned}$$

Wir gehen sofort weiter und bilden:

4. Die Fehler eines beliebigen Spiegelsystems. Nach dem in I. § 5 abgeleiteten Satze ergeben sich dieselben durch Superposition der Fehler der Einzelsysteme, welche durch die Entwicklungskoeffizienten des eben gefundenen Eikonals dargestellt werden. Unterscheidet man die verschiedenen hintereinander gesetzten Spiegel durch Indices  $i = 1$  bis  $i = k$ , so findet man in völliger Analogie zu I. § 6 (54):

$$\begin{aligned}
 B &= \sum_{i=1}^k h_i^4 \left\{ \frac{b_i}{r_i^3} + \frac{K_i^2}{r_i} \right\} \\
 C &= \sum_{i=1}^k h_i^2 H_i^2 \left\{ \frac{b_i}{r_i^3} + \frac{L_i^2}{r_i} \right\} \\
 15) & D = \sum_{i=1}^k h_i^2 H_i^2 \left\{ \frac{b_i}{r_i^3} + \frac{K_i(2L_i - K_i)}{r_i} \right\} \\
 & E = \sum_{i=1}^k h_i H_i^3 \left\{ \frac{b_i}{r_i^3} + \frac{L_i(2L_i - K_i)}{r_i} \right\} \\
 & F = \sum_{i=1}^k h_i^3 H_i \left\{ \frac{b_i}{r_i^3} + \frac{K_i L_i}{r_i} \right\}.
 \end{aligned}$$

**Abb. 2.** Schwarzschilds Formulierung aller fünf Seidel-Aberrationen  $B-F$  für beliebig viele Spiegel im optischen System (aus Schwarzschild 1905).

die Brennebene zudem gekrümmt ist, finden diese Systeme als Schmidt-Kameras mit auf eine Kugelkalotte gezogenen Photoplaten oder einer Ebnungslinse für sehr große Bildfelder ihren Einsatzbereich. Karl Schwarzschild und Bernhard Schmidt haben nachweislich mitein-

ander korrespondiert und an der Verbesserung des Linsenobjektivs eines Potsdamer Refraktors zusammengearbeitet (Wittmann 2016). Inwieweit Schwarzschild auf die Entwicklung des bekannten Schmidt-Systems eingewirkt und Anteil hat, ist nicht bekannt. Sicherlich hat Schwarzschild durch sein tiefes Verständnis optischer Abbildungsvorgänge in der beiderseitigen Diskussion Einfluss auf dessen Entwicklung ausgeübt.

Während Newton den Brennpunkt durch einen ebenen  $45^\circ$ -Fangspiegel seitlich für das Auge zugänglich macht, entstehen etwa zeitgleich zwei Ansätze, die den Brennpunkt von der Vorderseite des Paraboloids auf dessen Rückseite verlagern, um die visuelle Beobachtung (nahezu) abschattungsfrei zu ermöglichen. Fünf Jahre zuvor hat James Gregory in Edinburgh 1663 vorgeschlagen, ein Rotationsellipsoid als Sekundärspiegel *hinter* dem primären Brennpunkt einzusetzen. Sobald die Brennpunkte beider Spiegel, Paraboloid und Ellipsoid, zur Deckung gelangen, werden alle Strahlen des primären Brennpunktes fehlerfrei im zweiten Brennpunkt der Ellipse wiedervereinigt. Streng gilt dies wieder nur für achsenparallele einfallende Strahlen, also Objekte in der Bildmitte. Die Koma des Primärspiegels für schief einfallende Strahlen im Bildfeld bleibt hierbei erhalten, kann sich sogar noch deutlich verstärken durch die Möglichkeit zweier nicht perfekt aufeinander ausgerichteter Spiegel bezüglich Abstand, Zentrierung und Verkippung. Eine ähnliche Vorgehensweise beschreibt zehn Jahre später der Franzose Laurent Cassegrain 1672, indem er einen Sekundärspiegel hyperbolischer Form *vor* dem primären Brennpunkt des Paraboloids einsetzt. Mit Überlagerung der Brennpunkte beider Rotationsflächen, von Parabel und Hyperbel, werden alle achsparallel einfallenden Strahlen ebenfalls wieder fehlerfrei im sekundären Brennpunkt der Hyperbel vereinigt, allerdings (wie beim Gregory-Typ) unter Beibehaltung von außeraxialer Koma und der Möglichkeit zur Fehlaustrichtung beider Spiegel zueinander. Das Cassegrain ist dem Gregory-System – letzteres findet wegen der Zugänglichkeit des realen Primärbildes meist in der Sonnenbeobachtung noch Verwendung – deutlich überlegen, da ersteres eine wesentlich kürzere Bauform bei gleichzeitig großer Brennweite des Teleskops ermöglicht. Daher kann sich der Cassegrain-Typ durchsetzen und die dominante Bauform moderner Großteleskope, so auch des Hubble-Weltraumteleskops, werden. Realisieren lassen sich die beiden Designvarianten allerdings erst viele Jahrzehnte später, da geeignete Verfahren zur Herstellung und zur optischen Prüfung der zusätzlich benötigten Asphären – insbesondere des erhabenen Cassegrain-Sekundärspiegels mit virtuellem, nicht zugänglichem Brennpunkt – fehlen. Die Prüfung asphärischer Spiegel, vor allem wenn diese hyperbolisch und dabei noch erhaben sind, stellen selbst heute eine Herausforderung dar, wie sich nach dem Start des Hubble-Weltraumteleskops leidvoll herausgestellt hat. Glücklicherweise befindet sich dieses Weltraumteleskop in einer Erdumlaufbahn und nicht in einem der erdfernen Lagrange-Punkte, so dass ein Zugang und damit die Behebung der fälschlicherweise in den Primärspiegel eingeschliffenen sphärischen Aberration noch möglich war.

Schwarzschild hat nun die genannten Zwei-Spiegel-Systeme einer Untersuchung unterzogen, inwieweit diese eine Verbesserung in Bildschärfe und Bilddefinition zulassen, wenn man die beiden ersten Hauptfehler der optischen Abbildung, sphärische und komatische Aberration behebt, indem man *beide* Spiegelflächen zu deren Korrektur beitragen lässt. Das Verfahren, das er in seinen Untersuchungen zur geometrischen Optik entwickelt hat, erlaubt ihm, die optimale Figur für beide Spiegelflächen zu bestimmen und deren Abweichung von der sphärischen Form zu berechnen. Aus seinem theoretischen Ansatz folgen zwanglos die beiden Deformationskonstanten  $b_1$  und  $b_2$  für den Primär- und den Sekundärspiegel (Abbildung 3).

$$b_1 = -1 - \frac{r_1^3}{4df^2} \left(1 - \frac{2d}{r_1}\right),$$

$$b_2 = \frac{1}{d} \cdot \frac{2fr_1^3}{(r_1 - 2f)^3} - \left(\frac{r_1 + 2f}{r_1 - 2f}\right)^2$$

**Abb. 3.** Schwarzschilds Formel zur Berechnung der Deformationskonstanten beider Flächen im Zwei-Spiegel-System (aus Schwarzschild 1905).

Sie beschreiben den Kegelschnitt, der die Oberfläche des zugehörigen Rotationskörpers bildet, bei der zwischen Deformationskonstante  $b$  und der numerischen Exzentrizität  $\epsilon$  des Kegelschnitts folgende Beziehung herrscht:

$$b = -\epsilon^2 \quad (4)$$

$b = 0$	$\epsilon = 0$	Kreis (Sphäre)
$b = -1$	$\epsilon = 1$	Parabel
$-1 < b < 0$	$0 < \epsilon < 1$	Ellipse
$b < -1$	$\epsilon > 1$	Hyperbel

Eine moderne, heute gebräuchliche Formulierung mit Hilfe der Nachvergrößerung in einem Zwei-Spiegel-System, die zur Verlängerung der Primärbrennweite durch den Sekundärspiegel führt, gibt Bahner (1967) an.

$$b_{1,RC} = b_{1,Cass} - \frac{2a}{em^3} = -1 - \frac{2(f - em)}{em^3} \quad (5)$$

$$b_{2,RC} = b_{2,Cass} - \frac{2f}{e(m-1)^3} = -\left(\frac{m+1}{m-1}\right)^2 - \frac{2f}{e(m-1)^3} \quad (6)$$

Neben dem Vergrößerungsfaktor  $m$  gehen lediglich die gewünschte Brennweite des Gesamtsystems  $f$  und der Spiegelabstand  $e$  bzw. die Brennpunktlage  $a$  ein. Beide Ausdrücke für  $b_{1,RC}$  und  $b_{2,RC}$  lassen sich aus der Schwarzschild'schen Formel (Abbildung 3) ableiten und gestatten eine schnelle und einfache Bestimmung der Abweichung von der Kugelform über wenige Systemparameter.

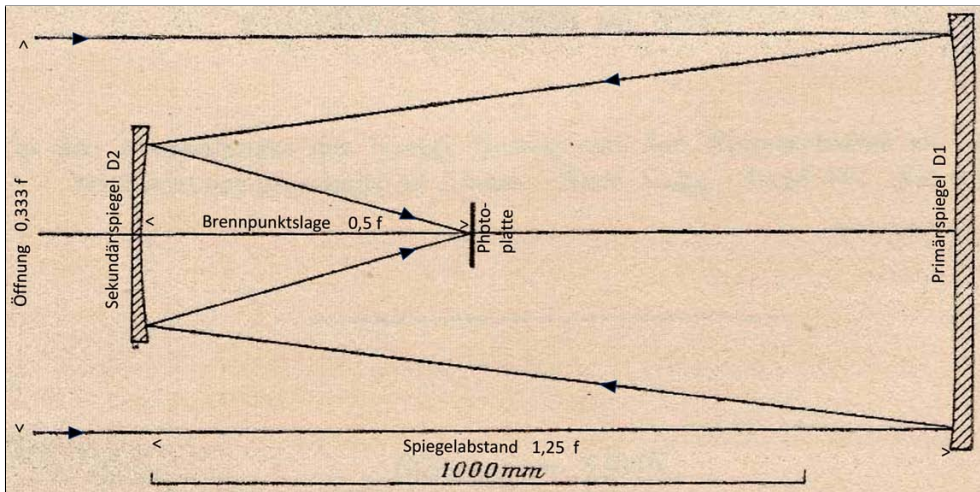
Hierbei stellt sich schnell heraus, dass es sich in aller Regel um Hyperbelflächen handelt. Dabei weist der große Hauptspiegel meist nur schwache Abweichungen von der Parabelform auf, während der kleinere Sekundärspiegel einen recht hohen Grad an Asphärisierung erreicht. Genau diese Eigenschaft macht eine optische Prüfung und damit Kontrolle des Herstellungsprozesses überaus schwierig, so dass sich diese hyperbolischen Flächen erst in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts wirklich durchsetzen können.

### 3.2 Zwei-Spiegel-System nach Schwarzschild ( $m < 1$ )

Schwarzschild leitet aus seinen Gleichungen zur geometrischen Optik zunächst das *perfekte* Abbildungssystem her. Hierunter versteht er ein System, das mit Ausnahme der Verzeichnung alle anderen vier Hauptabbildungsfehler vermeidet. Die nicht korrigierte Verzeichnung

beeinträchtigt jedoch weder den Kontrast noch die Schärfe des Bildes, sondern führt nur zu symmetrischen Verzerrungen in der Bildgeometrie. Allerdings ist dieses perfekt abbildende System rein theoretischer Natur, da es sich mit einem zerstreuenden Hauptspiegel, nicht handhabbarer Baulänge und enormen Abschattungen innerhalb des Systems als nicht praktikabel erweist.

In der selben Abhandlung leitet er dann auf obiger Grundlage ein Teleskopsystem her, das praktisch einsetzbar und dabei aplanatisch ist, also die ersten beiden Hauptfehler, sphärische und komatische Aberration, vermeidet. Dabei gilt seine Aufmerksamkeit einem kurzbrennweitigen Teleskop mit großer relativer Öffnung zur photographischen Beobachtung. Man muss dieses von ihm selbst vorgeschlagene Teleskopsystem als Produkt seiner Zeit verstehen, denn zur Jahrhundertwende existiert keine Alternative zu den Möglichkeiten der photographischen Beobachtung. Diese erfordert jedoch kurze Brennweiten und sehr lichtstarke Optiken, auch „schnelle“ Systeme genannt, um möglichst große Himmelsfelder und um die schwachen kosmischen Nebel in endlicher Belichtungszeit auf die Photoplatte zu bannen. Hierauf gründen auch seine Arbeiten in früheren Jahren bis hin zur Entdeckung des sogenannten Schwarzschild-Exponenten in der Photographie.



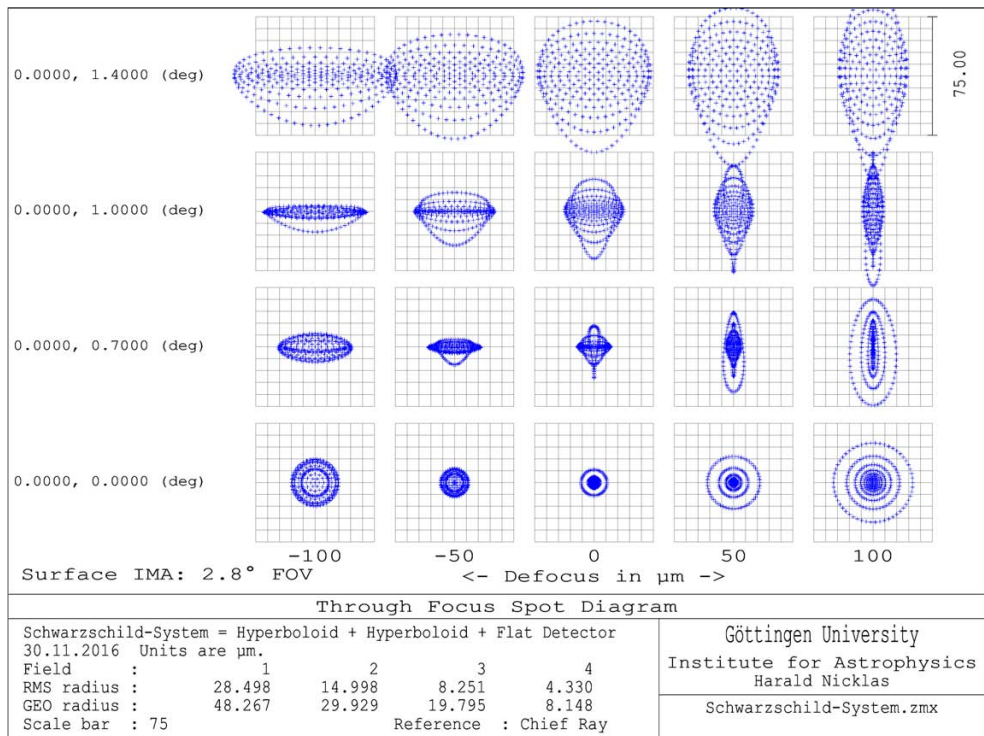
**Abb. 4.** Aplanatisches Teleskopsystem nach Schwarzschild (aus seiner Originalarbeit 1905).

Es gelingt ihm, mit nur zwei Spiegeln solch ein aplanatisches Teleskopsystem zu entwerfen. Um diesen Effekt zu erzielen, wendet er eine Brennweitenverkürzung an ( $m < 1$ , siehe Abbildung 4) statt der heute üblichen Nachvergrößerung durch den Sekundärspiegel. Die kurze Brennweite führt zu deutlich höheren Werten der beiden Deformationskonstanten  $b_1$  und  $b_2$  von  $-13,5$  und  $+1,9$  gegenüber heutigen Teleskopauslegungen (vgl. Tabelle 3.3). Dies ist jedoch dem Versuch geschuldet, mit diesem System einen reinen Astrographen zu schaffen und mit nur zwei Flächen zwei der fünf Seidel-Koeffizienten zum Verschwinden zu bringen und zugleich die resultierende Bildfeldkrümmung so gering wie möglich zu gestalten, um das Bildfeld der ebenen Photoplatte anzupassen. So vergleicht er den Nutzen seines Systems mit den Refraktoren, also Linsenteleskopen, die zu seiner Zeit aufgrund ihrer schlechten Bild- und Farbkorrektur ein Öffnungsverhältnis von lediglich 1:10 aufweisen (was der

Blendenstufe 10 eines Photoapparates entspricht), während sein Spiegelsystem bis hinunter zur Blendenzahl 3 vergleichbare oder bessere Bildqualitäten vorweist und sich mit dieser Lichtstärke als „schnelles“ System für photographische Aufnahmen mit kurzer Belichtungszeit bestens eignet.

Gibt man die von Schwarzschild selbst angegebenen Systemparameter in ein Optik-Berechnungsprogramm ein, gewinnt man einen Eindruck von dessen Bildqualität (Abbildung 5). Die mittlere Spalte gibt die Zunahme des Zerstreuungskreises im optimalen Fokus bis hin zum Bildrand von fast 3° Felddurchmesser (immerhin sechs Vollmondscheiben) wieder. Die Reihen für die verschiedenen Ebenen entlang unterschiedlicher Hauptachsen zeigen deutlich den verbliebenen Astigmatismus bei weitgehend ebenem Bildfeld. Die Qualität von 15 Bogensekunden Zerstreuungskreis am Bildrand ist für damals gebräuchliche Emulsionen auf Photoplatten vollkommen ausreichend, wenn es auch heutigen Ansprüchen nicht mehr genügen würde.

Sobald man von Schwarzschilds Wunsch nach Brennweitenverkürzung ablässt und eine Brennweitenverlängerung ( $m > 1$ ) bei gleichzeitig kurzer Baulänge des Teleskoptubus fordert, gelangt man im Schwarzschild'schen System zu einem erhabenen Sekundärspiegel



**Abb. 5.** Durchstoßdiagramm für Lichtstrahlen im Schwarzschild-System mittels der Berechnung des Durchgangs vieler einzelner Lichtstrahlen durch das gesamte optische System. Es verdeutlicht die Bündelung der Lichtstrahlen in der Brennebene (Mitte) und in Ebenen, jeweils um 0.05 mm hierzu versetzt.

hyperbolischer Form mit Brennpunktlage hinter dem Hauptspiegel, das unmittelbar dem Typus eines Ritchey-Chrétien-Systems entspricht, der heute die führende Rolle spielt. Dieses so bedeutende RC-System ist also bereits im Schwarzschild-System angelegt und in der Formulierung der Deformationskonstanten vollständig enthalten.

Das von Schwarzschild entworfene Teleskopsystem, das zugleich seinen Namen trägt, findet keine weitere Anwendung oder Verbreitung. Sein Verdienst liegt vielmehr darin, dass er die theoretischen Grundlagen zur Aberrationstheorie gelegt hat, auf denen alle Lösungen moderner Teleskopentwürfe basieren. Denn das Design einer Teleskopoptik und dessen Fähigkeit zur Korrektur optischer Abbildungsfehler bildet immer noch den Grundpfeiler für die Leistungsfähigkeit und damit zum Erfolg eines Teleskopneubaus, da sich Unzulänglichkeiten in beiden Bereichen im Nachhinein nicht korrigieren lassen. Zum Erfolg eines Teleskopes tragen ferner noch zahlreiche andere Systemkomponenten bei, wie etwa:

- Spiegelträger: Material, mechanische und thermische Eigenschaften
- Optische Fertigung: Schleifen, Polieren und optische Prüfverfahren
- Strukturmechanik: genaues Justieren und Ausrichten am Himmel
- Steuerung: elektronische Kontrolle aller opto-mechanischen Komponenten inklusive Softwaresteuerung
- Thermisches Verhalten: Tag-Nacht-Rhythmus und Jahreszeiten bedingt
- Kuppel einflüsse: Witterungsschutz, keine Abschattung im Betrieb etc.

### 3.3 Zwei-Spiegel-System nach Ritchey-Chrétien ( $m > 1$ )

Eine Weiterentwicklung des aplanatischen Teleskops von Schwarzschild, insbesondere für längere Brennweiten, stellt das bereits erwähnte Ritchey-Chrétien-System dar. Es nutzt eine hohe Nachvergrößerung der Primärbrennweite, um die Baulänge der Teleskopstruktur kurz und die Schutzkuppel kostengünstig zu halten. Auch wenn Schwarzschild diese Lösung seiner Gleichungen nicht selbst zur vollständigen Reife entwickelt hat, so basiert sie dennoch auf seiner Theorie. Erst 22 Jahre nach der grundlegenden Theorie von 1905 wird im Jahr 1927 mit der Realisierung des ersten Ritchey-Chrétien-Systems (einem 60 cm Teleskop) erfolgreich demonstriert, dass solche stark von der Kugelfläche abweichende Hyperboloide optisch herstellbar und prüfbar sind. Ausgehend von einem Cassegrain Zwei-Spiegel-System nennt Henri Chrétien (1922) – ähnlich wie Schwarzschild vor ihm – die Bedingung für Aplanasie, nämlich sphärische und komatische Aberrationsfreiheit beiden Spiegeln aufzulasten, statt sie einzeln zu beheben. George Willis Ritchey wiederum greift auf diese Technik zurück, als er 1930 den Auftrag zum Bau des US Naval 1-Meter-Teleskops erhält. Damit ist ein neuer Teleskoptyp, das Ritchey-Chrétien oder kurz RC-Teleskop, geboren.

Dennoch dauert es mehrere Jahrzehnte, bis die auf der Schwarzschild'schen Theorie basierenden Korrekturoptiken größeren Einsatz in Teleskopen finden. Nicht einmal die beiden über viele Jahrzehnte führenden Teleskope, der Mount Wilson 2.5-Meter-Hooker- (100 Inch) und der Mt. Palomar 5-Meter-Hale- (200 Inch) Reflektor, die beide mit der Entdeckung und Erforschung der kosmischen Rotverschiebung der Galaxien durch Edwin Hubble berühmt wurden, wenden diese Korrekturen an. Das Verfahren zur Herstellung der Optiken erscheint den Verantwortlichen, allen voran George Ellery Hale, zu riskant, um es bei den großen Teleskopbauten in Kalifornien damals einzusetzen. Dadurch ist das berühmte 5-Meter-Teleskop auf dem Mount Palomar das letzte große Teleskop seiner Zeit, das nicht diesen hervorragen-

**Tabelle 1.** Entwicklung der Deformationskonstanten  $b_1$ ,  $b_2$  und anderer Teleskopparameter für Zwei-Spiegel-Systeme, gegliedert nach Baujahr.

Teleskop Bezeichnung	Schwarzschild	ESO 3.6	Calar Alto 3.5	NTT	DGT	VLT	IAG
Teleskopgröße	Anastigmat	3.6m	3.5m	3.5m	12m	8m Nasmyth	50cm RC
Baujahr	1905	1979	1985	1988	---	1998	2004
Primärspiegeldurchmesser D1 [m]	0,333	3,600	3,500	3,500	12,000	8,200	0,500
Primär Öffnungsverhältnis N1	7,500	3,014	9,000	2,200	1,500	1,756	3,300
Vergößerungs Faktor m	0,400	2,653	3,000	5,000	5,000	7,639	3,030
Brennpunktslage (hinter M1) [m]	-0,750	1,447	3,000	3,000	3,000	4,550	0,150
Eintrittspupillenlage [m]	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Bildfeldradius [arcmin]	1	0,500	0,500	0,500	15	15	15
Schwarzschild Deformationsk.b1	-13,499989	-1,127831	-1,083789	-1,024111	-1,019310	-1,006159	-1,080833
Schwarzschild Deformationsk.b2	1,962960	-6,587503	-5,032787	-2,453295	-2,443966	-1,754861	-4,933439
Primärspiegel Brennweite [m]	2,500	10,850	31,500	7,700	18,000	14,400	1,650
RC-System Brennweite [m]	1,000	28,784	94,500	38,501	90,000	110,000	5,000
RC-System Öffnungsverhältnis N	3,0	8,0	27,0	11,0	7,5	13,4	10,0
Spiegelabstand [m]	1,250	7,484	22,875	5,917	14,500	12,206	1,203
Brennpunktslage (hinter M2) [m]	0,500	8,931	25,875	8,917	17,500	16,756	1,353
Sekundärspiegeldurchm. D2 [m]	0,167	1,119	0,965	0,812	2,460	1,356	0,146

den Korrekturzustand, sondern aufwendige und lichtschluckende Korrekturlinsen vor dem Brennpunkt aufweist. Inzwischen hat sich der RC-Teleskoptyp weltweit durchgesetzt. Nahezu alle Teleskope, die nach Palomar entstehen, bis hin zu den heutigen 10-Meter-Teleskopen und dem Hubble-Weltraumteleskop (mit dessen gestochen scharfen und öffentlichkeitswirksamen Himmelsaufnahmen), weisen ein RC-System im optischen Strahlengang auf.

Wenn auch Karl Schwarzschild das RC-System 1905 nicht explizit abgeleitet hat, so ist es dennoch in seinen Formeln implizit enthalten. Er hat den Formalismus geschaffen, mit dessen Hilfe man diese optischen Systeme und deren Wirkungsweise versteht und auf diese Weise optimieren kann. Seine Arbeit von 1905 hat somit nicht unerheblichen Anteil an den Entwicklungen der heute im Einsatz befindlichen Großteleskope, ja sogar der zukünftigen Teleskopgeneration, die im Anschluss noch zu behandeln ist.

#### 4 Realisierung moderner Zwei-Spiegel-Systeme

Genau achtzig Jahre nach Schwarzschilds Veröffentlichung wird 1985 in Deutschland unter Federführung der Göttinger Sternwarte, an der Schwarzschild seine Fundamentalarbeit zur Optik verfasste, ein Großteleskop projiziert, bei dem ein Ritchey-Chrétien-Design zum Einsatz kommen soll. Geplant ist dieses Teleskop für deutsche Forschungseinrichtungen und soll einen 12-Meter großen segmentierten Primärspiegel erhalten und unter der Bezeichnung Karl-Schwarzschild-Teleskop firmieren. Dessen Verwirklichung scheidet letztendlich an zwei Umständen; zum einen an der Umsetzung einer europäischen Lösung, dem heutigen „Very Large Telescope“, zum anderen an der deutschen Wiedervereinigung, die eine gleichzeitige Finanzierung zweier (in der wissenschaftlichen Ausrichtung sich ergänzender) Großteleskope von deutscher Seite unmöglich macht. Dennoch werden im Rahmen dieses Projektes Grundprinzipien entwickelt, die sich heute in der Entwicklung der 30-Meter-Teleskopklasse widerspiegeln.

Einer der bekanntesten Teleskopbauten mit der bis dahin optimalen RC-Korrektur ist das europäische vierfach 8-Meter große „Very Large Telescope“. Dessen Leistungsfähigkeit in Abbildungsqualität und hoher Lichtkonzentration zur spektroskopischen Lichtanalyse steht stellvertretend für eine ganze Klasse von 10-Meter-Teleskopen, die derzeit weltweit als RC-Systeme operieren.

Inzwischen ist eine neue Generation weitaus größerer Teleskope im Bau, die den heutigen Stand der Technik in der mechanischen, vor allem aber in der opto-elektronischen Teleskopentwicklung weiter ausnutzen. Die hierzu verwendeten optischen Systeme stehen in der Nachfolge der von Schwarzschild formulierten und von Ritchey und Chrétien realisierten Zwei-Spiegel-Systeme. Diese sogenannten Drei-Spiegel-Anastigmaten (TMA) sind als Weiterentwicklung und modernste Form des RC-Systems anzusehen, indem sie einen dritten asphärischen Spiegel nutzen, um den noch verbliebenen Astigmatismus des RC-Systems sowie dessen Verzeichnung zu überwinden. Lediglich das kalifornische 30-Meter-Teleskop TMT, das optisch und mechanisch als eine größere Variante des 10-m-Keck-Teleskops anzusehen ist, hält an der Zwei-Spiegel-Korrektur des RC-Systems fest.

Die bedeutendsten Vertreter der neuen Kategorie sind das 39-m European Extremely Large Telescope E-ELT und der Hubble-Nachfolger, das James Webb Space Telescope JWST, sowie das Large Synoptic Survey Telescope LSST. Diese Teleskope bedienen sich eines TMA-Designs und setzen neben drei hoch-asphärischen Spiegeln weitere Planspiegel zur Faltung des Strahlengangs ein. Im Falle des erdgebundenen E-ELT bilden diese Planspiegel den adaptiven Teil der aktiven Optik des Teleskopes, indem sie mit einem vierten hochflexiblen und einem fünften starren Kippspiegel die durch die Erdatmosphäre verursachten Bildunschärfen reduzieren. Diese TMA-Designs sind erst mit dem Einsatz von Computertechnik möglich geworden, da sie in der Regel nicht mehr nur konische Konstanten eines Kegelschnitts, sondern höhere Terme der asphärischen Krümmung nutzen, die den Schnitt durch eine Meridianebene des Rotationskörpers des jeweiligen Spiegels beschreiben. Mit ihnen lassen sich nun alle die Bildschärfe betreffenden Aberrationen (bis auf unbedeutende Restfehler) unterdrücken und alle Lichtstrahlen bis zu Bildfeldern von Vollmondgröße praktisch in der physikalisch vorgegebenen Beugungsgrenze innerhalb des sogenannten Airy-Scheibchens konzentrieren. Das Auflösungsvermögen und damit die räumliche Trennung der Beobachtungsobjekte in den Tiefen des Weltraums wird nun nicht mehr von der Qualität des optischen Designs, sondern von der Qualität der Herstellung und Positionskontrolle der optischen Komponenten sowie letztendlich von der Güte der Kompensation der atmosphärisch bedingten Unschärfen bestimmt. Letztere hat sich über drei Jahrzehnte hinweg auf einen technischen Stand entwickelt, der sie zu einem integralen Bestandteil der neuen Teleskope macht und so die erdgebundene Beobachtung quasi in den „ungestörten“ Erdorbit katapultiert und damit der neuen Teleskopgeneration ein ungeahntes Potenzial zu neuen Entdeckungen im Kosmos verleiht.

## 5 Ausblick

Die Ära der reinen Zwei-Spiegel-Systeme neigt sich im professionellen Teleskopbau ihrem Ende zu, zumal neue Spiegelbeläge mit sehr hoher Reflektivität verfügbar geworden sind. Ebenso heben die heutigen Möglichkeiten numerischer Berechnungsmethoden die Beschränkung auf Theorien dritter und fünfter Ordnung auf. Eine moderne Beschreibung er-



folgt heute meist in Form von Zernike-Polynomen, deren Begriffsbildung auf den Bezeichnungen von Seidel und Schwarzschild fußen, die aber um höhere Terme erweitert wurden. Wegen ihres grundlegenden Charakters lassen sich daher auch in modernen „Ray-Tracing“, also Berechnungsprogrammen optischer Strahlen, sowohl die Seidel-Koeffizienten wie auch die Zernike-Koeffizienten ausgeben und zur qualitativen Beurteilung und Verbesserung des optischen Systems heranziehen.

Ihre Berechtigung haben die Zwei-Spiegel-Systeme immer noch im Bereich der Amateurteleskope, die das atmosphärische Seeing nicht korrigieren und daher nicht an die Beugungsgrenze vorstoßen müssen. In diesem Fall geben Zwei-Spiegel-Teleskope kostengünstige Optiken mit ausreichend guten Korrektureigenschaften und Bildschärfen an die Hand.

Die Verbindung schneller elektronischer Steuerung mit enormer Rechenleistung macht heute den Einsatz von aktiver und adaptiver Optik in der astronomischen Beobachtung möglich. Mit ihnen eröffnen sich nun Möglichkeiten, alle Spiegelflächen und deren Freiheitsgrade sowohl örtlich als auch zeitlich variabel zu nutzen und somit ungeahnte Korrekturen in der Bildschärfe und der Bildstabilität selbst in der erdgebundenen Beobachtung zu erzielen.

**Danksagung.** An dieser Stelle möchte ich meinem Kollegen und Freund Lothar Noethe vielmals für die strenge Durchsicht des Manuskripts und dessen Anregungen danken.

## Literatur

- Bahner, K. 1967, *Teleskope*, Handbuch der Physik, Band XXIX, Springer  
Born, M. und Wolf, E. 1987, *Principles of Optics*, 6th Edition, Pergamon Press  
Chrétien, H. 1922, *Le télescope de Newton and le télescope aplanétique*, Revue d'Optique, 1  
Gauß, C. F. 1841, *Dioptrische Untersuchungen*, Göttinger Abhandlungen 1  
Schmidt, B. 1931, *Ein lichtstarkes komafreies Spiegelsystem*, Central-Zeitung für Optik und Mechanik 52 (und in den Mitteilungen der Hamburger Sternwarte in Bergedorf, Band 7, Nr. 36, 1932)  
Schwarzschild, K. 1905, *Untersuchungen zur geometrischen Optik I, II und III*, Astronomischen Mitteilungen der Königlichen Sternwarte zu Göttingen, Teil 9, 10 und 11, in Abhandlungen der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Band IV  
Seidel, L. 1856, *Zur Dioptrik. Über die Entwicklung der Glieder 3ter Ordnung, welche den Weg eines ausserhalb der Axe gelegenen Lichtstrahls durch ein System brechender Medien bestimmen*, Astronomische Nachrichten 43  
Wilson, R. 1994, *Karl Schwarzschild Lecture*, Reviews in Modern Astronomy 7  
Wilson, R. 1996, *Reflecting Telescope Optics I und II*, Springer  
Wittmann, A. 2016, private Mitteilung



Karl Schwarzschild (1873–1916):  
Ein Pionier und Wegbereiter der Astrophysik, 95–105  
Klaus Reinsch und Axel D. Wittmann (Hrsg.)  
© Universitätsverlag Göttingen 2017

## Schriftenverzeichnis von Karl Schwarzschild

### 1890:

Karl Schwarzschild: *Zur Bahnbestimmung nach Bruns*, *Astronomische Nachrichten* 124, Nr. 2965, S. 211–216 (8. Januar).

K. Schwarzschild: *Methode zur Bahnbestimmung der Doppelsterne*, *Astronomische Nachrichten* 124, Nr. 2965, S. 215–218 (3. Februar).

### 1892:

Karl Schwarzschild: *Beobachtungen von Veränderlichen Sternen und der Nova Aurigae auf der K. Universitäts-Sternwarte in Straßburg*, *Astronomische Nachrichten* 129, Nr. 3096, S. 399–404 (4. März).

### 1894:

Karl Schwarzschild: *Ueber den Einfluss der saecularen Aberration auf die Fixsternörter*, *Astronomische Nachrichten* 136, Nr. 3246, S. 81–84 (28. März).

### 1895:

Karl Schwarzschild: *Definitive Bahnbestimmung des Cometen 1842 II*, *Astronomische Nachrichten* 137, Nr. 3276, S. 177–190 (29. Oktober).

### 1896:

Karl Schwarzschild: *Ueber Messung von Doppelsternen durch Interferenzen*, *Astronomische Nachrichten* 139, Nr. 3335, S. 353–360 (17. November).

Karl Schwarzschild: *Ueber die Stabilität der Bewegung eines durch Jupiter gefangenen Cometen*, *Astronomische Nachrichten* 141, Nr. 3361, S. 1–8 (27. April).

K. Schwarzschild: *Die Poincarésche Theorie des Gleichgewichts einer homogenen rotierenden Flüssigkeitsmasse*, Inaugural-Dissertation, 69 Seiten, Ludwig-Maximilians-Universität München [= *Neue Annalen der Königlichen Sternwarte München*, Band III, S. 231–299 (1898)].

„S.“ [= K. Schwarzschild]: *Fixstern-Betrachtungen*, Beilage zur Allgemeinen Zeitung, München, Nr. 40, Dienstag 18. Februar, S. 4–6 (in quarto).

### 1897:

K. Schwarzschild: *Zur Bestimmung der Theilungsfehler von Maassstäben*, *Astronomische Nachrichten* 143, Nr. 3409, S. 1–12 (12. Dezember).

K. Schwarzschild: *Eine Sterngeburt*, Die Zeit, Wien, Band X, Nr. 122, 30. Jänner, S. 69–71. (in quarto).

K. Schwarzschild: *Was in der Welt ruht*, Die Zeit, Wien, Band XI, Nr. 142, 19. Juni, S. 181–183. (in quarto).

„K.S.“ [= K. Schwarzschild]: Buchbesprechung von: K. W. Zenger, *Die Meteorologie der Sonne und das Wetter im Jahre 1887, zugleich Wetterprognose für das Jahr 1897* (Prag, 1897), Beilage zur Allgemeinen Zeitung, München (1 1/2 Seiten in quarto).

### 1898:

Karl Schwarzschild: *Ueber eine Classe periodischer Lösungen des Dreikörperproblems*, Astronomische Nachrichten 147, Nr. 3506, S. 17–24 (9. Mai).

Karl Schwarzschild: *Ueber weitere Classen periodischer Lösungen des Dreikörperproblems*, Astronomische Nachrichten 147, Nr. 3522, S. 289–298 (5. Juli).

K. Schwarzschild: *Die Beugungsfigur im Fernrohr weit ausserhalb des Focus*, Sitzungsberichte mathematisch-physikalische Classe der Königlich-bayerischen Akademie der Wissenschaften 28, S. 271–294.

„K.S.“ (K. Schwarzschild): Buchbesprechung von: Kurd Laßwitz, „Auf zwei Planeten“ (Weimar 1898), Beilage zur Allgemeinen Zeitung, München (2 1/2 Seiten in quarto).

K. Schwarzschild: *Der Saturnring*, Die Zeit, Wien, Band XII, Nr. 180, 12. März, S. 165–168 (in quarto).

### 1899:

K. Schwarzschild: *Ueber Abweichungen vom Reciprocitätsgesetz für Bromsilbergelatine*, Photographische Correspondenz (Organ der Photographischen Gesellschaft in Wien, etc.), Band 36, S. 109–112.

Karl Schwarzschild: *Ueber die Wirkung intermittirender Belichtung auf Bromsilbergelatine*, Photographische Correspondenz (Organ der Photographischen Gesellschaft in Wien, etc.), Band 36, S. 171–178.

K. Schwarzschild: *Bemerkungen zur Sensitometrie*, Photographische Correspondenz (Organ der Photographischen Gesellschaft in Wien, etc.), Band 36, S. 398–401.

### 1900:

K. Schwarzschild: *On the Deviations from the Law of Reciprocity for Bromide of Silver Gelatine*, Astrophysical Journal 11, S. 89–91.

K. Schwarzschild: *On the Effect of intermittent Exposure on Bromide of Silver Gelatine*, Astrophysical Journal 11, S. 92–99.

K. Schwarzschild: *Ein Verfahren der Bahnbestimmung bei spectrokopischen Doppelsternen*, Astronomische Nachrichten 152, Nr. 3629, S. 65–74 (14. Januar).

K. Schwarzschild: *Die Bestimmung von Sternhelligkeiten aus extrafocalen photographischen Aufnahmen*, Publikationen der von Kuffner'schen Sternwarte Wien V, Band 3, S. 1–23.

- K. Schwarzschild: *Beiträge zur photographischen Photometrie der Gestirne*, Habilitationsschrift (135 Seiten, mit einem Zusatz von L. de Ball) = Publikationen der von Kuffnerschen Sternwarte Wien, Band V, S. 1–135 (Ursprünglich nur Kapitel 1–4 mit einer anderen Einleitung als Manuskript gedruckt).
- K. Schwarzschild: *Über sensitometrische Regeln und ihre astronomische Anwendung*, Jahrbuch für Photographie und Reproduktionstechnik für das Jahr 1900 (Eder's Jahrbuch) 14, S. 161–176.
- K. Schwarzschild: *Ueber das zulässige Krümmungsmaass des Raumes*. Vortrag gehalten bei der Tagung der Astronomischen Gesellschaft in Heidelberg, Vierteljahresschrift der Astronomischen Gesellschaft 35, S. 337–347.
- K. Schwarzschild: *Über die photographische Vergleichung der Helligkeit verschiedenfarbiger Sterne*, Sitzungsberichte Mathematisch-Naturwissenschaftliche Klasse der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften in Wien, Band 109, Abteilung IIa, S. 1127–1134.

**1901:**

- K. Schwarzschild: *Der Druck des Lichts auf kleine Kugeln und die Arrhenius'sche Theorie der Cometschweife*, Sitzungsberichte Mathematisch-Physikalische Klasse der Königlich Bayerischen Akademie der Wissenschaften 31, S. 293–338.

„K.S.“ [= K. Schwarzschild]: Buchbesprechung von: Wilhelm Foerster, *Himmelskunde und Weissagung*, Dr. J. Edelheims Verlag, Berlin 1901, Beilage zur Allgemeinen Zeitung, München (1 S. in quarto).

**1902:**

- K. Schwarzschild: *Die Beugung und Polarisation des Lichts durch einen Spalt. I.*, Mathematische Annalen 55, S. 177–247 (Teil II wurde nicht veröffentlicht).

**1903:**

- K. Schwarzschild: *Bemerkung zur Elektrodynamik*, Physikalische Zeitschrift 4, Nr. 15, S. 431–432.
- K. Schwarzschild: *Zur Elektrodynamik. I. Zwei Formen des Princips der kleinsten Action in der Elektronentheorie*, Nachrichten der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse, Nr. 3, S. 126–131 (16. Mai).
- K. Schwarzschild: *Zur Elektrodynamik. II. Die elementare elektrodynamische Kraft*, Nachrichten der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse, Nr. 3, S. 132–141 (16. Mai).
- K. Schwarzschild: *Zur Elektrodynamik. III. Ueber die Bewegung des Elektrons*, Nachrichten der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse, Nr. 5, S. 245–278.
- K. Schwarzschild: *Über die periodischen Bahnen vom Hecubatypus*, Astronomische Nachrichten 160, Nr. 3839, S. 385–400 (9. November).
- Felix Klein, K. Schwarzschild: *Über das in der Festschrift zur Feier des hundertfünfzigjährigen Bestehens der K. Gesellschaft der Wissenschaften, mit dem Gauß'schen Tagebuche*,

*reproducierte Porträt des 26-jährigen Gauß*, Königliche Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Geschäftliche Mitteilungen, Heft 2, S. 118–124.

K. Schwarzschild: *Professor G. Jägers Theorie des photographischen Prozesses*, Jahrbuch für Photographie und Reproduktionstechnik für das Jahr 1903 (Hrsg. J. M. Eder) 17, S. 108–110.

K. Schwarzschild: *Über photographische Ortsbestimmung*, Jahrbuch für Photographie und Reproduktionstechnik für das Jahr 1903 (Eder's Jahrbuch) 17, S. 207–217.

K. Schwarzschild: *Über Himmelsmechanik*, Die naturwissenschaftlichen Ergebnisse und Ziele der neueren Mechanik. Bericht, erstattet in der gemeinschaftlichen Sitzung der naturwissenschaftlichen Hauptgruppe der Naturforscher-Versammlung zu Kassel am 24. September 1903. Verhandlungen der Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte zu Kassel 1903, Allgemeiner Teil, S. 1–14.

Auch abgedruckt in

K. Schwarzschild: *Über Himmelsmechanik*. Vortrag, gehalten auf der 75. Vollversammlung deutscher Naturforscher und Ärzte zu Kassel am 24. September 1903, Die Umschau, 7. Jahrgang, Nr. 44, S. 861–866.

K. Schwarzschild: *Über Himmelsmechanik*, Physikalische Zeitschrift 4, S. 765–773.

K. Schwarzschild: *Über Himmelsmechanik*, Naturwissenschaftliche Rundschau 18, S. 637–639 und S. 649–651.

K. Schwarzschild: *Über Himmelsmechanik*, Jahresbericht der Deutschen Mathematiker-Vereinigung 13, Heft 3/4, 1904, S. 145–156.

#### 1904:

K. Schwarzschild: *Über photographische Breitenbestimmung mit Hilfe eines hängenden Zenitkollimators*, Astronomische Nachrichten 164, Nr. 3913, S. 1–6 (14. August 1903).

K. Schwarzschild: *Notiz Über das bei Gelegenheit der Göttinger Astronomenversammlung verteilte angebliche Gaußbild*, Astronomische Nachrichten 164, Nr. 3917, S. 77–78 (18. November 1903).

K. Schwarzschild: *Über Breitenbestimmung mit Hilfe einer hängenden Zenitkamera*, Astronomische Nachrichten 164, Nr. 3924, S. 177–182.

K. Schwarzschild: *Astronomische Beobachtungen mit elementaren Hilfsmitteln*, Beiträge zur Frage des Unterrichts in der Mathematik, Physik und Astronomie an den höheren Schulen, herausgegeben von F. Klein und E. Riecke. B. G. Teubner, Leipzig und Berlin, S. 157–190.

H. Hahn, Gustav Herglotz, Karl Schwarzschild, *Über das Strömen des Wassers in Röhren und Kanälen*, Zeitschrift für Mathematik und Physik 51, 4. Heft, S. 411–426.

K. Schwarzschild: *Plan zur Durchführung einer photographisch-photometrischen Durchmusterung des nördlichen Himmels*. Vorgetragen auf der 3. Sitzung der Versammlung der Astronomischen Gesellschaft in Lund (5.–8. September 1904), Vierteljahrsschrift der Astronomischen Gesellschaft 39, S. 171–173.

#### 1905:

K. Schwarzschild: *Untersuchungen zur geometrischen Optik. I. Einleitung in die Fehlertheorie optischer Instrumente auf Grund des Eikonalbegriffs*, Astronomische Mitteilungen der

Königlichen Sternwarte zu Göttingen 9. Teil, S. 1–31 [= Abhandlungen der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse, Neue Folge, Band 4, Nr. 1, S. 1–31]

- K. Schwarzschild: *Untersuchungen zur geometrischen Optik. II. Theorie der Spiegelteleskope*, Astronomische Mitteilungen der Königlichen Sternwarte zu Göttingen 10. Teil, S. 1–28 [= Abhandlungen der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse, Neue Folge, Band 4, Nr. 2, S. 1–28]
- K. Schwarzschild: *Untersuchungen zur geometrischen Optik. III. Ueber die astrophotographischen Objective*, Astronomische Mitteilungen der Königlichen Sternwarte zu Göttingen 11, S. 1–54 [= Abhandlungen der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse, Neue Folge, Band 4, Nr. 3, S. 1–54]
- K. Schwarzschild, W. Villiger: *Über die Helligkeitsverteilung des ultravioletten Lichtes auf der Sonnenscheibe*, Physikalische Zeitschrift 6, Nr. 22, S. 737–744.
- K. Schwarzschild: *Zur Sonnenfinsternis vom 29. August in Nordafrika*, Die Umschau 9, S. 901–907 (11. November) [„29“ ist Druckfehler].

#### 1906:

- K. Schwarzschild: *Über die totale Sonnenfinsternis vom 30. August 1905*, Astronomische Mitteilungen der Königlichen Sternwarte zu Göttingen 13. Teil, S. 1–73, sowie Tafeln I–III.
- Br. Meyermann und Karl Schwarzschild: *Über eine Schraffierkassette zur Aktinometrie der Sterne*, Astronomische Nachrichten 170, Nr. 4074, S. 277–282 (1. November).
- K. Schwarzschild: *Über eine Interpolationsaufgabe der Aktinometrie*, Astronomische Nachrichten 172, Nr. 4109, S. 65–76 (20. April).
- K. Schwarzschild and W. Villiger: *On the Distribution of Brightness of the Ultra-Violet Light on the Sun's Disk*, Astrophysical Journal 23, S. 284–305.
- K. Schwarzschild and W. Villiger: *Note on the Ultra-Violet Radiation of Sun-Spots and Faculae*, Astrophysical Journal 23, S. 345–346.
- K. Schwarzschild: *Ueber das Gleichgewicht der Sonnenatmosphäre*, Nachrichten von der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse, 1906, Heft 1, S 41–53 (13. Januar).

#### 1907:

- K. Schwarzschild und W. Villiger: *Aufnahmen des Sternhaufens  $\eta$  Persei mit Spiegeln von sehr großem Öffnungsverhältnis*, Astronomische Nachrichten 174, Nr. 4161, S. 133–138 (21. Januar).
- Br. Meyermann und K. Schwarzschild: *Über eine neue Schraffierkassette*, Astronomische Nachrichten 174, Nr. 4161, S. 137–140 (25. Januar).
- K. Schwarzschild: *Über Differenzenformeln zur Durchrechnung optischer Systeme*, Nachrichten der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse, Nr. 5, S. 551–570 (20. Juli).

K. Schwarzschild: *Ueber die Eigenbewegungen der Fixsterne*, Nachrichten der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse, Nr. 5, S. 614–632 (7. Dezember).

K. Schwarzschild: *Ueber die totale Sonnenfinsternis vom 30. August 1905*, Abhandlungen der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Neue Folge, 5(2), S. 3–73 [= Astronomische Mitteilungen der Königlichen Sternwarte zu Göttingen 13 (1906), S. 3–73].

K. Schwarzschild: *Über die astronomische Ausbildung der Lehramtskandidaten*, Jahresbericht der deutschen Mathematiker-Vereinigung, Band XVI, Nr. 9/10, S. 519–522.

### 1908:

Karl Schwarzschild: *Über die Fixsterne*, Jahrbuch des Freien Deutschen Hochstifts zu Frankfurt am Main, S. 69–80.

K. Schwarzschild: *Über die Bestimmung von Vertex und Apex nach der Ellipsoidhypothese aus einer geringen Anzahl beobachteter Eigenbewegungen*, Nachrichten der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse, Nr. 2, S. 191–200.

K. Schwarzschild: Buchbesprechung von: Robert Emden, *Gaskugeln* (Teubner, Leipzig 1907), Vierteljahrsschrift der Astronomischen Gesellschaft 43, S. 26–55.

K. Schwarzschild: *Über die Farbentönung der Fixsterne*, Archiv für Optik, Band 1, Heft 12, S. 435–436.

### 1909:

A. Gieseke, F. Klein, K. Schwarzschild: *Über die Errichtung eines Gaußturmes bei Göttingen*, Astronomische Nachrichten 179, Nr. 4284, S. 195–196.

K. Schwarzschild: *Über das System der Fixsterne*. Vortrag, gehalten im „Wissenschaftlichen Verein“ zu Berlin am 16.12.1908. Abgedruckt in: *Himmel und Erde* 21, Nr. 10/11, S. 433–452.

K. Schwarzschild, Beiträge in: *Naturwissenschaftliche Vorträge und Schriften zu H. von Seeligers 60. Geburtstag*, 1. Auflage, herausgegeben durch die Berliner Urania (Teubner, Leipzig); darin:

I. *Vom Fernrohr*, S. 5–8.

II. *Über Lamberts kosmologische Briefe*, S. 8–19.

III. *Über das System der Fixsterne*, S. 20–38.

IV. *Vom Universum*, S. 39–43.

2. unveränderte Auflage: 1916; [Aufsätze I und IV mit verschiedenen Einleitungen zuerst abgedruckt in: *Jahrbuch des Freien Deutschen Hochstifts zu Frankfurt am Main* (1908), S. 69–80. Aufsatz II zuerst abgedruckt in: *Nachrichten der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, geschäftliche Mitteilungen* (1907), S. 88–102; Auszug daraus in: *Geographische Anzeigen* 9 (1908) 155, 179. Eine leicht verschiedene Version auch in: *New Ideas in Astronomy*, St. Petersburg 1913, auf Russisch].

Karl Schwarzschild, Otto Birck (Hrsg.): *Tafeln zur astronomischen Ortsbestimmung im Luftballon bei Nacht, sowie zur leichten Bestimmung der mitteleuropäischen Zeit an jedem*



*Orte Deutschlands*, Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen, 11 Seiten. 16 Doppeltafeln und 2 Karten.

K. Schwarzschild: *Über Astronomie auf den höheren Schulen*, Monatschrift für höhere Schulen 8, S. 69–71.

### 1910:

K. Schwarzschild: *Über die Bestimmung absoluter photographischer Helligkeiten*, Astronomische Nachrichten 183, Nr. 4387, S. 297–300 (16. November 1909).

K. Schwarzschild: *Über die Integralgleichungen der Stellarstatistik*, Astronomische Nachrichten 185, Nr. 4422, S. 81–88 (9. April).

K. Schwarzschild: *Ein neuer Veränderlicher (41.1910 Tauri) in den Hyaden*, Astronomische Nachrichten 185, Nr. 4425, S. 133–136 (20. Juni).

K. Schwarzschild: *Bemerkung zur Bedeckung des Sterns AG Lpz II 4615 durch den Halley'schen Kometen*, Notiz im Anschluss an den Artikel von van der Pahlen: Beobachtungen des Halleyschen Kometen von Seiten des Astrophysikalischen Observatoriums bei Potsdam, Astronomische Nachrichten 185, Nr. 4425, S. 135–140.

Karl Schwarzschild (Hrsg.), unter Mitwirkung von Bruno Meyermann, Arnold Kohlschütter und Otto Birck: *Aktinometrie der Sterne der B.D. bis zur Größe 7.5 in der Zone 0° bis +20° Deklination, Teil A*, Abhandlungen der Königlich-Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse, Neue Folge, Band VI, Nr. 6, S. 1–115 (dazu 1 Tafel).

K. Schwarzschild: *Über einen Transformator zur Auflösung sphärischer Dreiecke, besonders für Zwecke der Ortsbestimmung im Luftballon*, Zeitschrift für Instrumentenkunde 30, S. 75–80. Siehe auch: *Notiz betreffend den in Nr. 78 behandelten Transformator*, ibid. S. 204.

K. Schwarzschild: *Künstlicher Horizont und Ballonsextant*, Zeitschrift für Instrumentenkunde 30, S. 357–359.

K. Schwarzschild: *Die großen Sternwarten der Vereinigten Staaten*, Internationale Wochenschrift für Wissenschaft, Kunst und Technik, herausgegeben von Prof. Dr. Paul Hinneberg, Berlin, S. 1531–1544 (4. Dezember).

K. Schwarzschild: *Remarque sur la détermination des grandeurs photographiques absolues*, in: Réunion du comité intern, permanent pour l'exécution de la carte photographique du ciel; tenue à l'Observatoire de Paris en 1909, S. B101–B102.

K. Schwarzschild: *Durchlässigkeit der Erd-Atmosphäre für Strahlen verschiedener Wellenlänge in Alta Vista (3260 m, Teneriffa) nach MUELLER und KRON*, Transactions of the International Union for Co-operation in Solar-Research, Vol. III (4th conference), S. 53, 110–111, etc. (1911).

K. Schwarzschild: *Vierte Versammlung der Internationalen Vereinigung für kooperative Sonnenforschung 1910*, Astronomische Nachrichten 186, Nr. 4443, S. 37–40.

### 1911:

K. Schwarzschild: *Über den Lichtwechsel des Veränderlichen 41.1910 Tauri*, Astronomische Nachrichten 189, Nr. 4532, S. 345–356 (3. August).

K. Schwarzschild, E. Kron: *Über die Helligkeitsverteilung im Schweif des Halley'schen Kometen*, Nachrichten der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse, Nr. 3, S. 197–208 (4. April).

K. Schwarzschild, E. Kron: *On the Distribution of Brightness in the Tail of Halley's Comet*, Astrophysical Journal 34, Nr. 5, S. 342–352.

Karl Schwarzschild, Wladislaw Dziewulski: *Bestimmung der Polhöhe von Göttingen u. der Deklinationen von 375 Zenithsternen mit der hängenden Zenithkamera*, Abhandlungen der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse, Neue Folge, 8 (1911/12), S. 1–34.

K. Schwarzschild: Contribution in German in: *Minor Contributions and Notes. Correspondence concerning the Classification of Stellar Spectra*, Astrophysical Journal 33, S. 260–300 (siehe S. 297–299).

### 1912:

Karl Schwarzschild, Bruno Meyermann, Arnold Kohlschütter, Otto Birck, Wladislaw Dziewulski: *Aktinometrie der Sterne der B.D. bis zur Grösse 7.5 in der Zone 0° bis +20° Deklination. Teil B.*, Abhandlungen der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Neue Folge, 8(4), S. 1–81.

K. Schwarzschild: *Notiz zur Aktinometrie Zone 0° bis +20°*, Astronomische Nachrichten 191, Nr. 4567, S. 135–136 (7. April).

K. Schwarzschild: *Zur Stellarstatistik*, Astronomische Nachrichten 190, Nr. 4557, S. 361–376 (18. Dezember 1911).

K. Schwarzschild: *Ein Theorem zur Verteilung der Sternengeschwindigkeiten*, Astronomische Nachrichten 191, Nr. 4561, S. 1–6 (14. Januar).

K. Schwarzschild: *Der neue Stern in den Zwillingen*, Die Umschau 16, S. 637–638.

K. Schwarzschild: *Bemerkung zum Spektrum der Eneboschen Nova*, Astronomische Nachrichten 191, Nr. 4563, S. 50 [im Rahmen einer redaktionellen Zusammenstellung mehrerer Berichte über die Nova 18.1912 Geminorum auf S. 45–50] (22. März).

K. Schwarzschild: Buchbesprechung *Yerkes Actinometry Zone +73 to +90* by J. A. Parkhurst, Astrophysical Journal 36, Nr. 3, S. 169–227, in: Vierteljahrsschrift der Astronomischen Gesellschaft 47, S. 356–368.

K. Schwarzschild: *Über Spektrographen-Objektive*, Sitzungsberichte der Königlich-Preussischen Akademie der Wissenschaften 53, Berlin, S. 1220–1239.

K. Schwarzschild: *Über die Schleierkorrektion bei der Halbgittermethode zur Bestimmung photographischer Sterngrößen*, Astronomische Nachrichten 193, Nr. 4614, S. 81–84.

### 1913:

Karl Schwarzschild und Otto Birck: *Tafeln zur astronomischen Ortsbestimmung im Luftballon bei Nacht, sowie zur leichten Bestimmung der mitteleuropäischen Zeit an jedem Orte Deutschlands*, Zeitschrift für Mathematik und Physik 61.

- K. Schwarzschild: *Beitrag zur Bestimmung von Radialgeschwindigkeiten mit dem Objektivprisma*, Publikationen des Astrophysikalischen Observatoriums Potsdam Nr. 69, 23. Band, I. Stück (56 Seiten).
- K. Schwarzschild: *Einige Beobachtungen der Radialgeschwindigkeit von  $\alpha$  Coronae borealis mit dem Objektivprisma*, *Astronomische Nachrichten* 194, Nr. 4646, S. 241–244 (11. Januar).
- K. Schwarzschild: *Tagung der Solar Union zu Bonn. 31. Juli – 5. August 1913*, *Die Naturwissenschaften*, Band 1, Heft 36, S. 865–866.
- K. Schwarzschild: *Versammlung der Solar Union zu Bonn. 31. Juli bis 5. August 1913*, *Astronomische Nachrichten* 195, Nr. 4676, S. 411–414 (14. August).
- K. Schwarzschild: *Über die räumliche Bewegung der Praesepe*, *Astronomische Nachrichten* 196, Nr. 4681, S. 9–10 (28. Juni).
- K. Schwarzschild: *Libellenhorizont und Libellensextant*, *Zeitschrift für Flugtechnik und Motorluftschiffahrt*, Band 4, Heft 13, S. 177–180 (1–4).
- K. Schwarzschild: *Bemerkung zur Berechnung des Strahlungsgleichgewichtes der Atmosphäre*, *Meteorologische Zeitschrift* 30, S. 454–456.
- K. Schwarzschild: Book Reviews: *Leçons sur les hypothèses cosmogoniques* by H. Poincaré (Paris 1911) and *Researches on the Evolution of the Stellar Systems*, Vol. II, by T. J. J. See (Lynn., Mass. 1910), *Astrophysical Journal* 37, Nr. 4, S. 294–298.
- Karl Schwarzschild/Max Planck: *Antrittsrede des Hrn. Schwarzschild und Erwiderung des Sekretärs Hrn. Planck vom 25. Juni 1913*, *Sitzungsberichte der Königlich-Preußischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, physikalisch-mathematische Klasse* 32, S. 596–602 [Auch in: *Physiker über Physiker II, Antrittsreden, Erwiderungen bei der Aufnahme von Physikern in die Berliner Akademie, Gedächtnisreden, 1870 bis 1929*, Akademie-Verlag, Berlin, 1979, S. 238–242].
- K. Schwarzschild: *Astronomie*, in: *Das Jahr 1913, ein Gesamtbild der Kulturentwicklung*, B. G. Teubner, Leipzig und Berlin, S. 302–307 [auch teilweise in: *Weltall* 14, S. 60–62].
- K. Schwarzschild: *Über die Radialgeschwindigkeit des Sterns 63 Tauri*, *Sitzungsberichte der Königlich-Preußischen Akademie der Wissenschaften Berlin*, S. 306–307.
- K. Schwarzschild: *On the Radial Velocity of 63 Tau*, *Astrophysical Journal* 38, S. 295–297.
- G. Eberhard, K. Schwarzschild: *Über Umkehrungen der Calciumlinien H und K in Sternspektren*, *Sitzungsberichte der Königlich-Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin*, S. 308–310.
- G. Eberhard, K. Schwarzschild: *On the Reversal of the Calcium Lines H and K in stellar Spectra*, *Astrophysical Journal* 38, Nr. 3, S. 292–295.
- K. Schwarzschild: *Beitrag zur Bestimmung von Radialgeschwindigkeiten mit dem Objektivprisma*, Publikationen des Astrophysikalischen Observatoriums Potsdam, Band 23, Nr. 69, S. 1–56.

**1914:**

- K. Schwarzschild: *Bahnbestimmung*, in: Newcomb-Engelmann's Populäre Astronomie, 5. Auflage, hrsg. von P. Kempf (Leipzig) S. 89–93 [Fast identische Version in: 4. Auflage, Leipzig 1911].
- K. Schwarzschild: *Der Bau des Universums*, in: Newcomb-Engelmann's Populäre Astronomie, 5. Auflage, hrsg. von P. Kempf (Leipzig) S. 684–710 [ähnliche Version (mit Hugo von Seeliger) in: 4. Auflage (Leipzig 1911)].
- K. Schwarzschild: *Kosmogonie*, in: Newcomb-Engelmann's Populäre Astronomie, 5. Auflage, hrsg. von P. Kempf (Leipzig) S. 711–738 [ähnliche Version (mit Hugo von Seeliger) in: 4. Auflage (Leipzig 1911)].
- K. Schwarzschild: *Vorbemerkung* zu: Wladislaw Dziewulski, *Photographische Größen von Sternen in der Nähe des Nordpols*, Astronomische Nachrichten 198, Nr. 4733, S. 65–84 (16. Februar).
- K. Schwarzschild: *Über das Verhältnis der mittleren Eigenbewegung zur mittleren Parallaxe der Sterne*, Astronomische Nachrichten 198, Nr. 4740, S. 217–224 (6. März).
- K. Schwarzschild: *Über die Häufigkeit und Leuchtkraft der Sterne von verschiedenem Spektraltypus*, Sitzungsberichte der Königlich-Preußischen Akademie der Wissenschaften 43, Berlin, S. 489–510.
- Heinrich Rubens, K. Schwarzschild: *Sind im Sonnenspektrum Wärmestrahlen von großer Wellenlänge vorhanden?*, Sitzungsberichte der Königlich-Preußischen Akademie der Wissenschaften, physikalisch-mathematische Klasse, Berlin, S. 702–708.
- K. Schwarzschild, *Über Diffusion und Absorption in der Sonnenatmosphäre*, Sitzungsberichte der Königlich-Preußischen Akademie der Wissenschaften 47, Berlin, S. 1183–1200
- K. Schwarzschild: *Über die Verschiebungen der Bande bei 3883 Å im Sonnenspektrum*, Sitzungsberichte der Königlich-Preußischen Akademie der Wissenschaften 47, Berlin, S. 1201–1213.
- K. Schwarzschild: *Präzisionstechnik und wissenschaftliche Forschung*, Vortrag, gehalten am 25. Juni 1914 auf der Hauptversammlung der Deutschen Gesellschaft für Mechanik und Optik zu Berlin. Abgedruckt in: Deutsche Mechaniker-Zeitung (Vereinsblatt der Deutschen Gesellschaft für Mechanik und Optik! Beiblatt zur Zeitschrift für Instrumentenkunde) Heft 14, S. 149–153 und Heft 15, S. 162–165.
- K. Schwarzschild: *Bemerkung zur Aufspaltung der Spektrallinien im elektrischen Feld*, Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft 16, Nr. 1, S. 20–24.
- K. Schwarzschild: *Über die maximale Aufspaltung beim ZEEMAN-Effekt*, Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft 16, Nr. 1, S. 24–40.
- K. Schwarzschild: Buchbesprechung zu: Arnold Kohlschütter, *Tafeln zur astronomischen Ortsbestimmung*, Deutsche Luftfahrer Zeitschrift 18, S. 16.

**1915:**

- K. Schwarzschild: *Bemerkung über das Taylorobjektiv für astronomische Zwecke*, Zeitschrift für Instrumentenkunde 35, S. 120 [Bemerkungen zu einem Aufsatz mit dem gleichen Titel von A. Kerber in: Zeitschrift für Instrumentenkunde 35, S. 23].

**1916:**

- K. Schwarzschild: *Über das Gravitationsfeld eines Massenpunktes nach der EINSTEINschen Theorie*, Sitzungsberichte der Königlich-Preußischen Akademie der Wissenschaften 7, Berlin, S. 189–196 [englische Übersetzung in: Kenneth R. Lang and Owen Gingerich (ed.), *A Source Book in Astronomy and Astrophysics, 1900–1971*, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts (1979), S. 451–455].
- K. Schwarzschild: *Über das Gravitationsfeld einer Kugel aus inkompressibler Flüssigkeit nach der EINSTEINschen Theorie*, Sitzungsberichte der Königlich-Preußischen Akademie der Wissenschaften 18, Berlin, S. 424–434.
- K. Schwarzschild: *Zur Quantenhypothese*, Sitzungsberichte der Königlich-Preußischen Akademie der Wissenschaften 25, Berlin, S. 548–568.

**1920:**

- K. Schwarzschild: *Über den Einfluß von Wind und Luftdichte auf die Flugbahn der Geschosse*, Sitzungsberichte der Preußischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, S. 37–63 [Vorgelegt am 18. November 1915; aus militärischen Gründen wurde die Abhandlung erst später gedruckt].

**1924:**

- K. Schwarzschild: *Stationäre Geschwindigkeitsverteilung im Sternsystem*, [Fragment] in: Festschrift für Hugo von Seeliger (zum 75. Geburtstag), Springer, Berlin, S. 94–105.

**Sonstiges:**

- K. Schwarzschild: *Jahresberichte der Königlichen Sternwarte zu Göttingen 1902–1909*.
- K. Schwarzschild: *Jahresberichte des Königlichen Astrophysikalischen Observatoriums Potsdam 1909–1914*.
- K. Schwarzschild: Redaktion der *Encyclopädie der Mathematischen Wissenschaften mit Einschluss ihrer Anwendungen*, Band 6, Teil 2, insbesondere *Astronomie*, B. G. Teubner, Leipzig 1905–1923.



Karl Schwarzschild (1873–1916):  
Ein Pionier und Wegbereiter der Astrophysik, 107–118  
Klaus Reinsch und Axel D. Wittmann (Hrsg.)  
© Universitätsverlag Göttingen 2017

## **Bildtafeln „Schwarzschild Objekte“**

**Klaus Reinsch<sup>1</sup> und Axel D. Wittmann<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Georg-August-Universität Göttingen, Institut für Astrophysik

<sup>2</sup>Georg-August-Universität Göttingen, Institut für Astrophysik (i. R.)

*E-Mail:* reinsch@astro.physik.uni-goettingen.de,

wittmann@astro.physik.uni-goettingen.de

Die Sammlung historischer Gegenstände am Institut für Astrophysik der Georg-August-Universität Göttingen umfasst einen Bestand von ca. 400 Gegenständen und Instrumenten aus dem 17. bis 20. Jahrhundert, die für astronomische und geodätische Messungen sowie für andere wissenschaftliche Untersuchungen an der Göttinger Universitäts-Sternwarte verwendet wurden. Mit dem Umzug des Instituts aus der Sternwarte in ein neues gemeinsames Gebäude der Fakultät für Physik im Jahre 2005 wurde auch die Sammlung auf den Nord-campus der Göttinger Universität verlagert.

Aus der Zeit, während der Karl Schwarzschild an der Göttinger Sternwarte tätig war, sind leider nur einige wenige Objekte in der Sammlung erhalten geblieben. Die Gründe hierfür sind vielschichtig. Viele von Schwarzschild ersonnene Geräte waren zunächst eher experimentelle Aufbauten, die im Laufe der Zeit weiterentwickelt wurden und vielfache Veränderungen erfahren haben. Nur die Instrumente, die sich bewährt hatten, wurden in dauerhafterer Ausführung und zum Teil in industrieller Fertigung weitergebaut. Auch mit dem Wechsel von Schwarzschild nach Potsdam und späteren „Entrümpelungsaktionen“ ist vermutlich das eine oder andere Gerät in der Göttinger Sternwarte verloren gegangen.

Die auf den nachfolgenden Bildtafeln wiedergegebene Auswahl von Instrumenten und Gegenständen, die unmittelbar auf Karl Schwarzschild zurückgehen oder zu seiner Zeit in der Göttinger Sternwarte verwendet wurden, wurde in der Ausstellung „Karl Schwarzschild (1873–1916) – ein Wegbereiter der Astrophysik“ vom 8. bis 29. September 2016 im Großen Foyer der Fakultät für Physik der Universität Göttingen gezeigt. Sie geben auch Zeugnis über die vielseitigen Arbeitsgebiete, in denen Karl Schwarzschild wissenschaftlich tätig war.



**Abb. 1.** Ballonsextant nach Karl Schwarzschild, hergestellt von Spindler & Hoyer Göttingen. Beim Flug mit einem Ballon oder auch einem Zeppelin ist der Horizont nicht nur um die sog. „Kimmtiefe“ abgesenkt, sondern nachts der Dunkelheit wegen auch unsichtbar. Schwarzschild hat daher 1910 einen mit einem künstlichen Libellenhorizont, der durch elektrische Glühlämpchen beleuchtet wurde, versehenen Sextanten erfunden, um vom Ballon aus sowohl tagsüber als auch zur Nachtzeit astronomische Ortsbestimmungen zu ermöglichen. Das hier gezeigte Exemplar wurde 1950 der Göttinger Sternwarte durch dessen Sohn Martin Schwarzschild geschenkt (Sammlung historischer Gegenstände am Institut für Astrophysik der Georg-August-Universität Göttingen, Objekt Nummer A066, Foto: K. Reinsch).





**Abb. 2.** Ballonkompass von Karl Schwarzschild, 1909. Bei einem Ballonflug ist nachts oder bei Dunst der Erdboden nicht sichtbar. Um in diesen Fällen trotzdem die Geschwindigkeit des Ballons über Grund und die Flugrichtung bestimmen zu können, wird das Magnetfeld der Erde benutzt, das mit einem speziellen Kompass an Bord gemessen wird. Ein von Karl Schwarzschild entwickelter Ballonkompass wurde auf der 1. Internationalen Luftfahrt-Ausstellung („Ila“) in Frankfurt 1909 ausgestellt. Die mittels Kompass erreichbare Ortsgenauigkeit beträgt etwa  $\pm 10$  km (Sammlung historischer Gegenstände am Institut für Astrophysik der Georg-August-Universität Göttingen, Objekt Nummer A184, Foto: K. Reinsch).



**Abb. 3.** 6-linsiges photographisches Objektiv der Firma Carl Zeiss („Zeiss Planar“). Das 1897 von der Firma Carl Zeiss zum Patent angemeldete „Planar“ ist ein hochwertiges photographisches Objektiv, das ursprünglich auf eine von Carl Friedrich Gauß erfundene 4-linsige Konstruktion zurückgeht, die bei Zeiss auf ein 6-linsiges Objektiv erweitert wurde. Es ist mit einer verstellbaren Ringblende ausgestattet und liefert nahezu fehlerfreie und unverzerrte Abbildungen (daher „Planar“). Hier gezeigt ist eine Objektivlinse mit Metall-Diaphragma (verstellbare Ringblende) in Messingfassung, Öffnung ca. 12 cm, Brennweite 61 cm, Prägung: „Carl Zeiß, Planar 1:5, F=610 mm, D.R.P. [Deutsches Reichspatent] 92313, Serie Ia, No. 18; No. 22351“ (Sammlung historischer Gegenstände am Institut für Astrophysik der Georg-August-Universität Göttingen, Objektnummer A205, Foto: K. Reinsch).



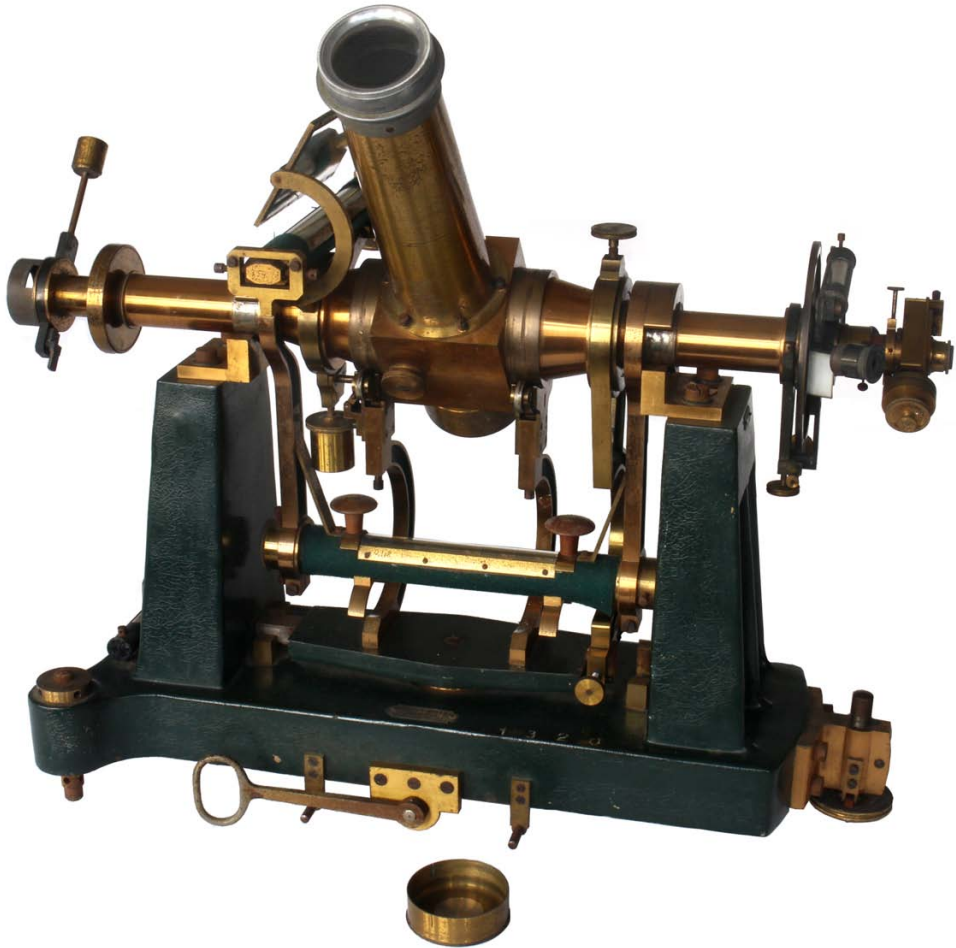
**Abb. 4.** Heliometerobjektiv von Reinfelder & Hertel München, ca. 1888. Mit einem Heliometer (genauer: Objektivheliometer) können kleine Winkelabstände am Himmel präzise gemessen werden. Dazu ist seine Objektivlinse in zwei Hälften geteilt, die jede für sich ein vollständiges Bild der Objekte im Gesichtsfeld liefert. Durch messbares Verschieben der beiden Hälften werden die Bilder zweier eng benachbarter Sterne (oder auch zweier gegenüberliegender Ränder der Sonnenscheibe) aufeinander geschoben und durch Ablesung der Mikrometerschrauben deren Winkelabstand gemessen. Hierbei handelt es sich um das Objektiv des von 1888 bis 1926 in der Kuppel der Göttinger Sternwarte aufgestellten Repsold'schen Heliometers mit einer Öffnung von 16,2 cm und einer Brennweite von 262 cm (Sammlung historischer Gegenstände am Institut für Astrophysik der Georg-August-Universität Göttingen, Objekt Nummer A325, Foto: K. Reinsch).



**Abb. 5.** Trockenplatten. Das um 1870 entwickelte „trockene Gelatineverfahren“ ersetzte in vielen Bereichen der photographischen Astronomie das bisherige „nasse Kollodiumverfahren“, denn es ermöglichte um einen Faktor 10 kürzere Belichtungszeiten und damit die Aufnahme lichtschwacher Sterne. Zudem waren die Platten von gleichbleibender Qualität, gut transportabel und lange lagerfähig. Das Bild zeigt eine belichtete Originalplatte nebst Kartondeckelfragmenten mit Aufkleber: „Spezialplatten für Sternaufnahmen TH. MATTER MANNHEIM. . .“ der Firma August und Theodor Matter in Mannheim. August Matter unterstützte um 1920 die Astronomen in Heidelberg kostenlos mit Trockenplatten. Nach ihm ist der Kleinplanet „883 Matteriana“ benannt (Sammlung historischer Gegenstände am Institut für Astrophysik der Georg-August-Universität Göttingen, Objekt Nummer A377, Foto: K. Reinsch).



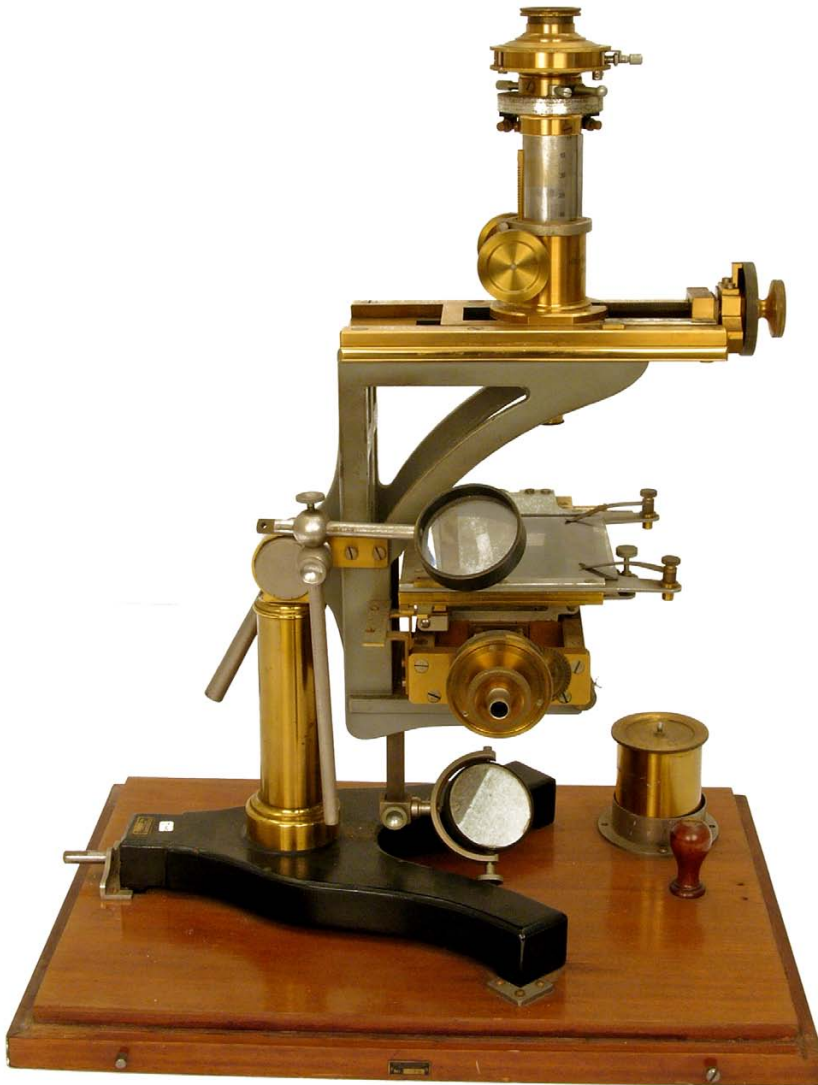
**Abb. 6.** Photographische Originalplatten „Bogenspektrum des Eisens“, 1903. Mit der Einführung der Spektralanalyse und der photographischen Spektroskopie in die Astronomie in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts wurde es erstmals möglich, physikalische Eigenschaften entfernter astronomischer Objekte zu untersuchen. Dabei werden zur Wellenlängenkalibrierung mit derselben Messapparatur aufgenommene Spektren aus dem Labor bekannter Lichtquellen, wie z.B. Bogenlampen, benötigt. Die hier gezeigten Originalglasplatten entstammen einem wahrscheinlich von Schwarzschild beschrifteten Pappkasten „Bogenspektrum des Eisens. Rowlands Concav-Gitter. Juni 1903“ (Sammlung historischer Gegenstände am Institut für Astrophysik der Georg-August-Universität Göttingen, Objekt Nummer A248, Foto: K. Reinsch).



**Abb. 7.** Passageinstrument von Gustav Heyde Dresden, 1902. Passageinstrumente dienen zur Messung des Zeitpunktes des Durchgangs eines Sterns durch einen bestimmten Stundenkreis, insbesondere den lokalen Meridian (im Falle der Sonne also zur Bestimmung des Zeitpunktes des wahren Mittags). Im Gegensatz zum Meridiankreis wird dabei die Höhe über dem Horizont nicht gemessen. Das hier gezeigte, transportable Instrument wurde 1902 in der Dresdner Werkstatt von Gustav Heyde (1846–1930) hergestellt. Der Strahlengang des Fernrohrs wird in die hohle Achse umgelenkt, so dass ein ortsfester seitlicher Einblick beim Anvisieren der Sterne möglich ist. Öffnung 4,6 cm, Brennweite ca. 50 cm (Sammlung historischer Gegenstände am Institut für Astrophysik der Georg-August-Universität Göttingen, Objekt Nummer A292, Foto: K. Reinsch).



**Abb. 8.** Mikrophotometer nach Hartmann von Otto Toepfer Potsdam, um 1905. Mikrophotometer sind Kombinationen von Mikroskop und Photometer, mit denen die Schwärzung  $S = \log(1/T)$  einer Photoplatte quantitativ gemessen werden kann, wobei  $T$  die Transparenz der photographischen Schicht bezeichnet ( $T = 0$ : „völlig schwarz“,  $T = 1$ : „klarer Film“). Das Mikrophotometer gestattet die genaue Bewegung und Positionierung der Photoplatte sowie die Messung der Transparenz mit Hilfe einer elektrisch regelbaren Vergleichslichtquelle. Die gemessenen Schwärzungen werden mit Hilfe der Schwärzungskurve der betreffenden Platte in Intensitäten bzw. Sternhelligkeiten umgerechnet. Das hier gezeigte Mikrophotometer wurde um 1905 von Otto Toepfer in Potsdam hergestellt. Es beruht auf einer Konstruktion von Johannes Hartmann (1865–1936) und wird deshalb auch „Hartmann-Photometer“ genannt. Es gelangte 1909 mit dem Wechsel von Hartmann vom Astrophysikalischen Observatorium in Potsdam nach Göttingen (Sammlung historischer Gegenstände am Institut für Astrophysik der Georg-August-Universität Göttingen, Objektnummer A208, Foto: K. Reinsch).



**Abb. 9.** Messmikroskop von Otto Toepfer & Sohn Potsdam, 1910. Das Messmikroskop ist mit einer von unten beleuchteten Objektträgerplatte ausgestattet, die mikrometrisch messbar in zwei senkrecht zueinander befindlichen Richtungen verschiebbar ist. Damit können z. B. für astronomische Zwecke die Positionen von Sternen oder die Lage von Linien in einer Spektralaufnahme auf einer Fotoplatte ausgemessen werden. Das hier gezeigte Gerät wurde 1911 durch Johannes Hartmann, dem Nachfolger von Karl Schwarzschild in Göttingen beschafft (Sammlung historischer Gegenstände am Institut für Astrophysik der Georg-August-Universität Göttingen, Objektnummer A241, Foto: G. Schröder-Kirschmann).





**Abb. 10.** Zenitkamera aus dem Bestand des ehemaligen Reichs-Kolonialamtes. Eine Zenitkamera registriert auf einer Fotoplatte den Durchgang von Sternen in einem engen Bereich um den Zenit (d.h. genau senkrecht über dem Beobachter) in Form von parallelen Strichspuren. Daraus kann bei Kenntnis der Brennweite der Kamera und der Deklination der Sterne die geographische bzw. astronomische Breite und die Polhöhe am Beobachtungsort bestimmt werden. Die hier gezeigte Zenitkamera aus Messing mit einer Plattengröße 15 cm x 15 cm und dreibeinigem Stativ gelangte aus dem Bestand des ehemaligen Reichs-Kolonialamtes in den Besitz der Göttinger Sternwarte. Der von Karl Schwarzschild entwickelte Aufbau einer hängenden Zenitkamera ist nicht erhalten (Sammlung historischer Gegenstände am Institut für Astrophysik der Georg-August-Universität Göttingen, Objekt Nummer A264, Foto: K. Reinsch).

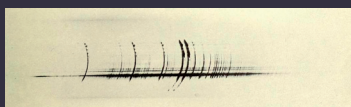


**Abb. 11.** Kometensucher von Georg Merz München, Mitte 19. Jahrhundert. Kometensucher sind besonders lichtstarke Fernrohre mit großer Öffnung aber relativ kurzer Brennweite, die zur Beobachtung lichtschwacher, flächenhafter Objekte wie Nebel, Galaxien oder Kometen verwendet werden. Der ca. Mitte des 19. Jahrhunderts von der Firma Georg Merz (1793–1867) in München hergestellte Kometensucher auf einer parallaktischen Montierung war mit einer Objektivöffnung von 16 cm und einer Brennweite von 136 cm noch zur Zeit von Schwarzschild eines der größten Fernrohre der Göttinger Sternwarte. Das ursprüngliche eiserne Stativ wurde vermutlich bereits Ende des 19. Jahrhunderts durch das jetzige Holzstativ ersetzt (Sammlung historischer Gegenstände am Institut für Astrophysik der Georg-August-Universität Göttingen, Objekt Nummer A102, Foto: K. Reinsch).

Karl Schwarzschild (1873–1916) gilt weltweit als einer der begabtesten und bedeutendsten Astronomen aller Zeiten und als Mitbegründer der Astrophysik. Geboren in Frankfurt am Main, wirkte er von 1901 bis 1909 als Professor für Astronomie und Direktor der Sternwarte in Göttingen und von 1909 bis 1916 als Direktor des Astrophysikalischen Observatoriums in Potsdam.

Im Laufe seines allzu kurzen Lebens veröffentlichte Schwarzschild etwa 150 wissenschaftliche Arbeiten, viele davon von fundamentaler Bedeutung für die Entwicklung der Astronomie und Astrophysik.

Aus Anlass seines 100. Todestages fand am 19. Mai 2016 in einer seiner früheren Wirkungsstätten, der heutigen Historischen Sternwarte in Göttingen, ein Gedenk-Kolloquium statt. Die schriftlichen Fassungen der dabei gehaltenen Vorträge sind, ergänzt um einen am 8. September 2016 anlässlich der Eröffnung der Schwarzschild-Ausstellung in der Fakultät für Physik gehaltenen Vortrag, im vorliegenden Band abgedruckt.



GEORG-AUGUST-UNIVERSITÄT  
GÖTTINGEN

ISBN: 978-3-86395-295-2

Universitätsverlag Göttingen