

Kosmologie mit Kaninchendraht und Wasser

Ist es möglich, mit einfachen Mitteln kosmologische Beobachtungen durchzuführen? Um diese Frage zu beantworten, machten sich zwei Amateurastronomen auf, das Echo des Urknalls einzufangen. Für ihr »Berlin Cosmic Microwave Experiment« (BECOME) entwickelten sie mit einfachen Mitteln ein kostengünstiges Radioteleskop.

Von Timo Stein und Christopher Förster

Kurze Zeit nach dem Urknall war das Universum mit einem nahezu gleichmäßig verteilten, extrem heißen Plasma erfüllt. Das Charakteristische an diesem Zustand stellte die enge Kopplung zwischen Licht und Materie dar. So konnten sich Lichtquanten, die Photonen, nicht frei ausbreiten, sondern wurden permanent an den umherirrenden elektrisch geladenen Elektronen und Atomkernen gestreut oder von ihnen absorbiert.

Der Raum expandierte, und das Plasma kühlte sich ab. Rund 380 000 Jahre nach dem Urknall sank die Temperatur unter 3000 Kelvin, so dass sich die im Plasma

vorhandenen Elektronen und Protonen zu elektrisch neutralen Wasserstoffatomen vereinen konnten. Ab jenem Zeitpunkt breiteten sich die Photonen frei aus, das Universum wurde für Licht durchsichtig.

Im expandierenden Raum vergrößerte sich die Wellenlänge des Lichts. Deshalb sind die einst im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums freigesetzten Photonen heute, 13,7 Milliarden Jahre nach dem Urknall, bei einer tausendfach größeren Wellenlänge zu beobachten, nämlich im Mikrowellenbereich. Ein Nachweis des primordialen Feuerballs erfordert somit eine Radioantenne und einen empfindlichen Empfänger.

Der erste Nachweis dieser Strahlung gelang im Jahr 1964 den Physikern Arno Penzias und Robert Wilson mit einer Hornantenne der Bell-Laboratorien im US-Bundesstaat New Jersey. Sie stießen auf eine zunächst unerklärliche, von allen Seiten gleich stark einfallende Störstrahlung. Schon bald stellte sich heraus, dass sie den bereits in den 1940er Jahren von den Physikern George Gamow, Ralph Alpher und Robert Herman theoretisch vorhergesagten Mikrowellenhintergrund entdeckt hatten. Hierfür erhielten Penzias und Wilson 1978 den Nobelpreis für Physik. Der Nachweis des kosmischen Mikrowellenhintergrunds (englisch: Cosmic Microwave Background, CMB) gilt heute als einer der stärksten Belege für das Urknallmodell.

Genau hierum geht es bei unserem Berlin Cosmic Microwave Experiment (BECOME). Mit möglichst einfachen Mitteln versuchten wir, den CMB nachzuweisen und die der Strahlung entsprechende Temperatur auf wenige Grad genau zu bestimmen. Im Gegensatz zu modernen Experimenten, wie sie beispielsweise mit den Satelliten COBE und WMAP realisiert wurden, wollten wir mit wenig Geld auskommen. Somit hofften wir, auch Schülern



wissenschaft in die schulen!

aber dennoch erkenntnisreichen Beobachtungen im Bereich der Radiowellen. Die Zusatzmaterialien thematisieren auch die Natur des kosmischen Mikrowellenhintergrunds und seinen Nachweis mit einfachen Mitteln. Unser Projekt »Wissenschaft in die Schulen!« führen wir in Zusammenarbeit mit der Landesakademie für Lehrerfortbildung in Bad Wildbad durch. Es wird von der Klaus Tschira Stiftung gGmbH großzügig gefördert.

Didaktisches Material zu diesem Beitrag steht Ihnen kostenlos auf der Website www.wissenschaft-schulen.de zur Verfügung. Hier geht es um die praktische Auseinandersetzung mit einfachen,

Mit einer 1-Meter-TV-Satellitenschüssel auf einer parallaktischen Montierung durchmusterter die Autoren den Himmel. Die Antenne befindet sich am Grund eines Zylinders aus Metallfolie und Kaninchen-draht, der sie vor Störstrahlungen aus der Umgebung abschirmt.



Alle Fotos: Timo Stein und Christopher Förster

und Studenten die attraktive Möglichkeit zu eröffnen, sich aktiv mit der heutigen Forschung auseinanderzusetzen.

Um uns auf Penzias' und Wilsons Weg zu begeben, müssen wir zunächst ihre Methodik verstehen. Dazu ist es wichtig zu wissen, dass es sich beim CMB um den besten bekannten Schwarzkörper handelt. Er lässt sich präzise durch das plancksche Strahlungsgesetz charakterisieren (siehe Kasten »Die Strahlung eines Schwarzen Körpers« rechts). Das Strahlungsgesetz ermöglicht es, durch die Messung der Intensität in einem wohl definierten Frequenzband sehr genaue Aussagen über die Temperatur des Strahlers zu treffen.

Doch wie ist dies konkret zu realisieren? Es gibt zwei Möglichkeiten, die Temperatur eines Schwarzen Strahlers zu bestimmen:

■ **Messung des Intensitätsmaximums:** Diese Methode ist sehr weit verbreitet und wird in der optischen Astronomie dazu genutzt, die Temperatur von Sternen aus ihren Spektren abzuleiten. Hierbei sucht der Beobachter nach dem Intensitätsmaximum der Strahlungskurve. Dessen Wellenlänge λ_{\max} ist umso kleiner, je höher die in Kelvin ausgedrückte Temperatur T des Strahlers ist. Diesen Sachverhalt beschreibt

Die Strahlung eines Schwarzen Körpers

Der durch Gustav Kirchhoff eingeführte und von Max Planck zu Beginn des letzten Jahrhunderts theoretisch beschriebene Schwarze Körper ist ein physikalisches Objekt, das auftreffende Strahlung aller Wellenlängen vollständig absorbiert. Ein derart guter Absorber ist jedoch auch ein guter Strahler. Allgemein führt die Absorption von Strahlung zur Aufheizung, die Abstrahlung zur Kühlung eines Körpers. Bei einem Schwarzen Körper ist die pro Zeiteinheit aus dem Strahlungsfeld absorbierte Energie genauso groß wie die pro Zeiteinheit abgestrahlte Energie.

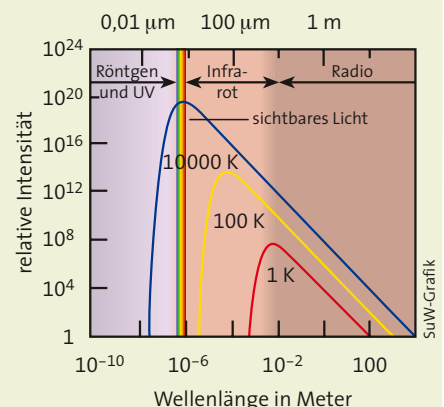
Diesem Energiegleichgewicht entspricht eine charakteristische Temperatur T . Planck zeigte, dass das Spektrum der ausgesandten Strahlung allein durch diese Temperatur bestimmt ist. Die nach ihm benannte plancksche Strahlungsformel beschreibt den Intensitätsverlauf in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ :

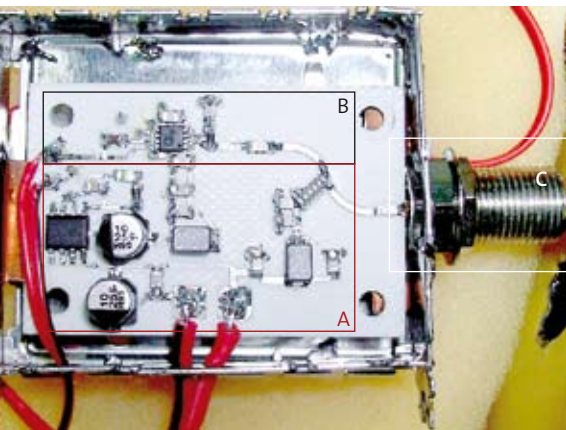
$$I_{\lambda} = \frac{2 \pi h c^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp \frac{hc}{\lambda k T} - 1}$$

Hierbei ist I_{λ} die pro Sekunde, Frequenzeinheit und Einheit der Oberfläche ausgestrahlte Energie, $h = 6,6 \times 10^{-34}$ J s das plancksche Wirkungsquantum, c die Lichtgeschwindigkeit, $k = 1,38 \times 10^{-23}$ J/K die Boltzmann-Konstante und T die absolute Temperatur in Kelvin.

Die Grafik zeigt Beispiele von planckschen Strahlungskurven für unterschiedliche Temperaturen. Jede Kurve weist ein Maximum auf, dessen zugehörige Wellenlänge λ_{\max} umso größer ist, je niedriger T ist. Diesen Zusammenhang beschreibt das wiensche Verschiebungsgesetz: $\lambda_{\max} = 2897,8 \mu\text{m} \text{ K}/T$. Für den Mikrowellenhintergrund mit einer Temperatur von drei Kelvin ergibt sich für λ_{\max} rund ein Millimeter.

Bei Radiobeobachtungen thermischer Quellen sind die Wellenlängen häufig groß im Vergleich zur Wellenlänge des Strahlungsmaximums. Für diesen Fall lässt sich die plancksche Strahlungsformel vereinfachen. Die Näherungsformel ist das Rayleigh-Jeans-Gesetz: $I_{\lambda} = 2 \pi c k T / \lambda^4$. Bei hinreichend großen Wellenlängen sind somit die Strahlungsintensitäten direkt proportional zur Temperatur.





Der für BECOME entwickelte Detektor gibt die vom LNB über die F-Buchse (C) kommenden Signale als Spannungen aus. Zu erkennen sind die SMD-Kondensatoren und -widerstände sowie der Spannungswandler (unten links) und der logarithmische Detektorchip AD 8313 (oben links), der das Herz der eigentlichen Detektoreinheit (B) darstellt. Eine Untereinheit (A) versorgt auch den LNB mit Strom und wirkt zusätzlich als Entstörer für mögliche externe Wechsellspannungen.

das nach dem deutschen Physiker Wilhelm Wien (1864–1928) benannte Verschiebungsgesetz (siehe Kasten »Die Strahlung eines Schwarzen Körpers« auf Seite 85). Die Methode ist sehr präzise, sie hat jedoch den Nachteil, dass die temperaturbedingte Strahlung der Erdatmosphäre die Beobachtung mit erdgebundenen »Thermometern« beeinflusst. Dadurch ist es häufig schwer, eine genaue Temperatur zu ermitteln. Weiterhin ist es stets ratsam, einen möglichst großen spektralen Bereich abzudecken.

■ **Integrales Thermoprinzip:** Hierbei nutzt man die innerhalb eines gewählten Frequenzbands abgestrahlte Intensität als direktes Maß für die Temperatur der Strahlungsquelle. Diese einfache, aber wirkungsvolle Methode erfordert jedoch eine Kalibrierungsquelle mit den Eigenschaften eines Schwarzen Körpers. Eine weitere Vereinfachung liegt darin, dass sich für Beobachtungen im Mikrowellenbereich das plancksche Strahlungsgesetz durch die Rayleigh-Jeans-Formel approximieren lässt. In dieser nach den englischen Physikern John William Strutt, 3. Baron Rayleigh (1842–1919), und James Jeans (1877–1946) benannten Näherungsformel ist die im gewählten Frequenzband gemessene Intensität der Strahlungsquelle proportional zu ihrer Temperatur.

Der Aufbau von BECOME

Das von uns gebaute Radioteleskop besteht aus einer speziell modifizierten und abgeschirmten Satellitenschüssel, die in Verbindung mit einem handelsüblichen Low Noise Block Converter (LNB) arbeitet, sowie einem selbst konstruierten Detektor. Die Satellitenantenne fokussiert das im Frequenzbereich von 10,7 bis 12,75 GHz empfangene Signal auf den LNB. Dieser setzt die hochfrequenten Eingangssignale mit Hilfe eines Lokaloszillators auf den

niedrigeren Frequenzbereich von 950 bis 2150 MHz um. Das so erhaltene Signal lässt sich dann mit einem Koaxialkabel zu einem Mikrowellendetektor übertragen, der es weiterverarbeitet.

Für den Aufbau nutzten wir eine einfache Offset-Satellitenschüssel der Firma Gilbertini. Ihr Durchmesser beträgt rund einen Meter. Im Brennpunkt der Antenne befindet sich ein LNB der Marke Invacom mit der Produktbezeichnung SNH-031. Zur Übertragung des Signals diente ein sieben Meter langes Kabel mit einer Abschirmung von mehr als 90 Dezibel (dB).

Die 100-Zentimeter-Schüssel stellt hierbei einen Kompromiss aus Verstärkungs-

leistung und Mobilität dar. Eine größere Antenne wäre nicht mehr zu transportieren gewesen. Außerdem hätte eine Satellitenschüssel ab 120 Zentimeter Durchmesser eine Baugenehmigung erfordert.

Die Auswahl des LNB erfolgte nach den Kriterien der Verstärkung und des Rauschmaßes (siehe Glossar). Wir wählten den LNB von Invacom aus, weil dieser lediglich ein durchschnittliches Rauschen von 0,3 dB, jedoch eine Leistungsverstärkung von 50 bis 60 dB ermöglicht. Die LNBs werden bereits im Werk individuell vermessen, und der Kunde erhält beim Kauf die Messprotokolle.

Nachdem wir entschieden hatten, welche Komponenten zum Einsatz kommen sollten, stellte sich die Frage, wie sich dieses Instrumentarium bestmöglich vor Störstrahlungen abschirmen lässt. Dabei griffen wir auf das aus der optischen Astronomie vertraute Prinzip des Teleskop-tubus zurück. Dieser Tubus sollte später auf einer parallaktischen EQ-6-Montierung befestigt werden. Aus Kosten- und Gewichtsgründen entschieden wir uns für einen Gitterrohrtubus, wobei uns die Teleskopmanufaktur Berlin, die uns auch Räumlichkeiten zur Herstellung überließ, bei der Konstruktion beriet.

Glossar

Antennentemperatur: Ein Maß für die Leistung der von einer Antenne aufgenommenen Strahlung. Sie hängt von der Winkelausdehnung der Radioquelle sowie vom Strahlungsmechanismus ab und weicht im Allgemeinen von der tatsächlichen Temperatur der Quelle ab. Im Spezialfall einer aus allen Richtungen gleich stark empfangenen Schwarzkörperstrahlung ist die Antennentemperatur gleich der Temperatur des schwarzen Strahlers.

Nebenkeulen (englisch: Side loops): Bedingt durch die Beugung empfängt die Antenne neben dem direkt zum Himmel gerichteten Blickfeld in geringerem Maße auch Strahlung, die unter anderen Winkeln einfällt. Die entsprechenden Empfindlichkeitsmaxima werden als Nebenkeulen bezeichnet.

Rauschmaß: Der LNB einer Satellitenantenne erzeugt ein störendes Rauschen, das dem zu messenden Nutzsignal überlagert ist. Das Rauschmaß gibt an, wie stark das intern erzeugte Rauschen zur Störung des Nutzsignals beiträgt, und wird in Dezibel (dB) angegeben. Je kleiner der Wert des Rauschmaßes ist, desto empfindlicher ist der LNB. Durchschnittliche LNB für den Fernsehempfang erreichen Werte von 0,6 bis 0,8 dB, im günstigsten Fall etwa 0,3 dB.

Spillover: Blickt der im Brennpunkt einer Parabolantenne befindliche LNB ein wenig über den Rand des Reflektors hinweg, so empfängt er nicht nur die vom Reflektor gebündelte Strahlung, sondern auch störende Signale aus der Umgebung. Dieser als Spillover bezeichnete Effekt kann beispielsweise durch eine leichte Fehlstellung des LNB hervorgerufen werden.

Strahlungstemperatur: Diejenige Temperatur, die ein Schwarzer Körper aufweisen müsste, um bei einer gegebenen Beobachtungsfrequenz die gleiche Strahlungintensität auszusenden, wie die tatsächlich beobachtete Quelle.

Die Verkleidung und Abschirmung sollte mittels Rettungsfolie erfolgen, jedoch war nicht sicher, ob dies zur Abschirmung ausreichen würde. Um die Mobilität des Geräts zu gewährleisten, konstruierten wir einen aus zwei Teilen bestehenden Tubus. So bauten wir nicht nur einen Tubus, sondern – in Anlehnung an das Prinzip einer Taukappe bei optischen Teleskopen – eine zusätzliche Gitterkonstruktion. Die Taukappe verlängert das Teleskop um rund 50 Zentimeter, wobei allein der Tubuskörper mit der Satellitenschüssel eine Länge von 110 Zentimetern aufweist. Die Gesamtkonstruktion hat somit eine Länge von 160 Zentimetern, und der Durchmesser beträgt 120 Zentimeter.

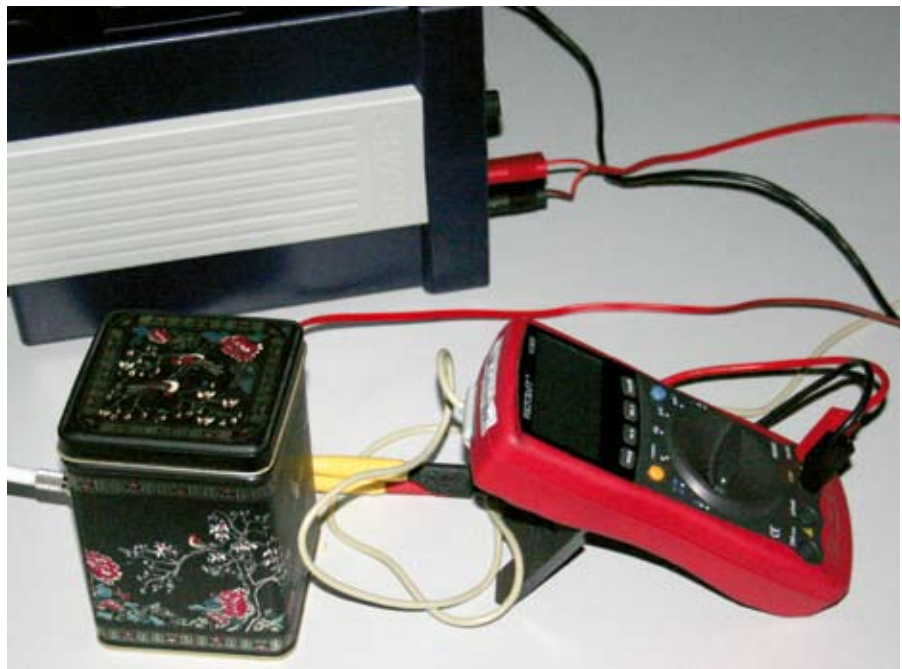
Nachdem die Rahmenkonstruktion fertig war, stellte sich erneut die Frage nach der besten Abschirmung. Quasi über Nacht kam die Idee auf, den Tubus als Faraday-Käfig zu konstruieren, indem man ihn mit Drahtgeflecht umwickelt. Nach einer kurzen Suche im Baumarkt stießen wir auf Kaninchendrahtzaun. Dieser besaß mit 13 Millimeter Durchmesser hinreichend kleine Maschen, um jede mögliche Störstrahlungen deutlich zu absorbieren. Aus diesem Grund umwickelten wir das Konstrukt mit Drahtgeflecht, welches wir wiederum mit Kabelbindern befestigten.

Um bei der Abschirmung ganz sicher zu sein, verkleideten wir den Tubus zusätzlich mit Rettungsfolie. Zuletzt verschraubten wir eine Prismenschiene mit dem Hauptträger, damit der Tubus auf der parallaktischen Montierung befestigt werden konnte.

Signalverarbeitung mit BECOME

Um das vom LNB bereitgestellte Signal zu untersuchen, entschlossen wir uns, einen eigenen Mikrowellendetektor zu entwickeln. Dieser musste mehreren Anforderungen gleichzeitig genügen: Er sollte den LNB mit Strom versorgen und auch – ohne systemeigene Schwingungen – das Eingangssignal verarbeiten. Dabei konnten wir einiges vom Aufbau handelsüblicher Satellitenempfänger lernen. Doch reichte uns das so erworbene Wissen schon bald nicht mehr aus, und da man bei der Entwicklung von Hochfrequenztechnik auf viele tückische Besonderheiten achten muss, wandten wir uns an das Ferdinand-Braun-Institut in Berlin-Adlershof.

Dort lernten wir einiges über Herstellungsverfahren und Möglichkeiten für die



Die gesamte Detektoreinheit besteht aus einem Multimeter mit integrierter RS-232-Schnittstelle für die PC-Anbindung sowie einer Detektorplatine die sich in einer modifizierten Teedose befindet. Im Hintergrund befindet sich ein Netzgerät, das den Detektor und den LNB mit Strom versorgt.

technische Realisierung. Der Detektor ist auf eine beim Satellitenempfang typische Impedanz von 75 Ohm ausgelegt und basiert auf SMD-Technologie, um die Größe des Gerätes minimal zu halten, was in diesem Frequenzbereich sehr wichtig ist, da es ansonsten zu Eigeninterferenzen kommen kann. Der Detektor besitzt mehrere Untereinheiten, um die oben genannten Aufgaben erfüllen zu können.

Jegliche Restwechselspannungen sollen durch die mehr als zehn integrierten Kondensatoren und durch Ferritbausteine im Gesamtaufbau abgeleitet werden. Das Herzstück stellt jedoch der hochempfindliche logarithmische Detektor AD 8313 von Analog Devices dar. Dieses Bauteil wandelt das Eingangssignal in eine logarithmisch skalierte Ausgangsspannung um, welche sich wiederum messen lässt.

Dieses Verfahren bietet den Vorteil eines großen dynamischen Messbereichs, welcher sich von -60 dBm bis zu -20 dBm erstreckt und eine hohe Linearität aufweist. Unser Eingangssignal liegt im Bereich von etwa -40 dBm. Dabei bezeichnet die Angabe »dBm« den Logarithmus des auf eine Leistung von einem Milliwatt (1 mW) bezogenen Signalpegels. Für eine in Milliwatt ausgedrückte Signalleistung P gilt: $P_{\text{dBm}} = 10 \lg (P/1 \text{ mW})$. Unserem Eingangssignal von -40 dBm entspricht

somit eine Leistung von $P = 10^{(-40/10)} \text{ mW} = 10^{-7} \text{ W}$.

Zur Spannungsversorgung des AD 8313 nutzten wir einen 5-Volt-Spannungswandler vom Typ 7805. Die eigentliche mit einem Labornetzteil eingespeiste Spannung von rund zwölf Volt wird über eine kleine Spule zum Koaxialkabel geführt. Der Stromverbrauch des gesamten Geräts beträgt nur 100 Milliampere.

Die Platine löteten wir in das Gehäuse eines alten Satellitenempfängers ein, um der F-Steckerbuchse einen ausreichenden Halt zu bieten und den Detektor vor äußeren Störquellen abzuschirmen. Zur sicheren Aufbewahrung nutzten wir eine alte Teedose, die wir von innen mit Schaumstoff auslegten. Die Dose dient nun als Transportschutz und zur weiteren Isolierung, unter anderem auch gegen Temperaturschwankungen. Aus dem fertigen Empfänger schauen nur noch das LNB-Kabel sowie die mit Bananensteckern realisierten Ein- und Ausgangskabel gut erkennbar hinaus.

Im Hahn-Meitner-Institut Berlin bestand die Möglichkeit, den fertigen Detektor zu vermessen, indem wir Signale mit bekannter Signalstärke einspeisten und die auszugebende Spannung maßen. Es ergab sich eine hohe Linearität bei Signalen zwischen -60 dBm und -20 dBm.



Der mit einer beheizten Wasserschicht arbeitende »Calibration Tower« ermöglichte die Kalibrierung von BECOME. Die am Grund des Zylinders befindliche Satellitenantenne empfing die thermische Strahlung der Wasserschicht. Der Strahlungsintensität entspricht eine vom Detektor ausgegebene Spannung. Diese wurde gleichzeitig mit der Temperatur gemessen und daraus eine Kalibrierungsfunktion errechnet.

Kalibration und »First light«

Während der Messung gibt der Detektor ständig neue Messwerte in Form von Spannungen aus. Die Kunst besteht nun darin, diesen Werten Temperaturen zuzuordnen. Der gesuchte Zusammenhang lässt sich durch Messen bestimmter Referenzquellen mit genau bekannten Temperaturen herstellen. Nach einigen Fehlversuchen, die einzig darauf basierten, den LNB ohne Antenne zu vermessen, erwies sich, dass die Kalibrierung mindestens ebenso wichtig ist wie die Konstruktion und der Bau von BECOME. Die Kalibrierung ist definitiv als Schlüssel für den gesamten weiteren Verlauf zu verstehen.

Ein weiteres Problem bestand nun darin, einen guten Mikrowellenabsorber für präzise Messungen zu finden. Absorber sind aber bei den genutzten Frequenzen nur sehr schwer erhältlich und äußerst kostspielig. Bei der Suche nach einer praktikablen Lösung für das Problem ließen wir uns wiederum durch Dinge des Alltags inspirieren. So nutzten wir Wasser

als Absorber. Seine Eigenschaften werden besonders deutlich, wenn man sich das Verhalten in einem Mikrowellenofen näher betrachtet. Die Flüssigkeit erhitzt sich stark, somit handelt es sich um einen guten Mikrowellenabsorber. Genau dies ist jedoch auch eine wichtige Charakteristik von Schwarzen Körpern.

Davon ausgehend bauten wir aus dem »Item«-Material einen 1,6 Meter hohen »Calibration Tower«, der einen schichtartigen Aufbau trug. Dieser bestand aus einer tragenden und im Radiobereich durchsichtigen Plexiglasplatte, bedeckt von zwei zusammengenähten Badezimmerteppichen, in die wir zwei Thermofühler einbrachten. Die später mit Wasser getränkten Matten wurden mit Hilfe von drei ansteuerbaren Heizfolien gleichmäßig erwärmt. Zum Abschluss legten wir noch vier alte Holzplatten zur Wärmedämmung auf.

Die Kalibrationsmessung bestand darin, die vom Detektor ausgegebene Spannung gleichzeitig mit den Wassertemperaturen zu bestimmen und die Messwerte auf

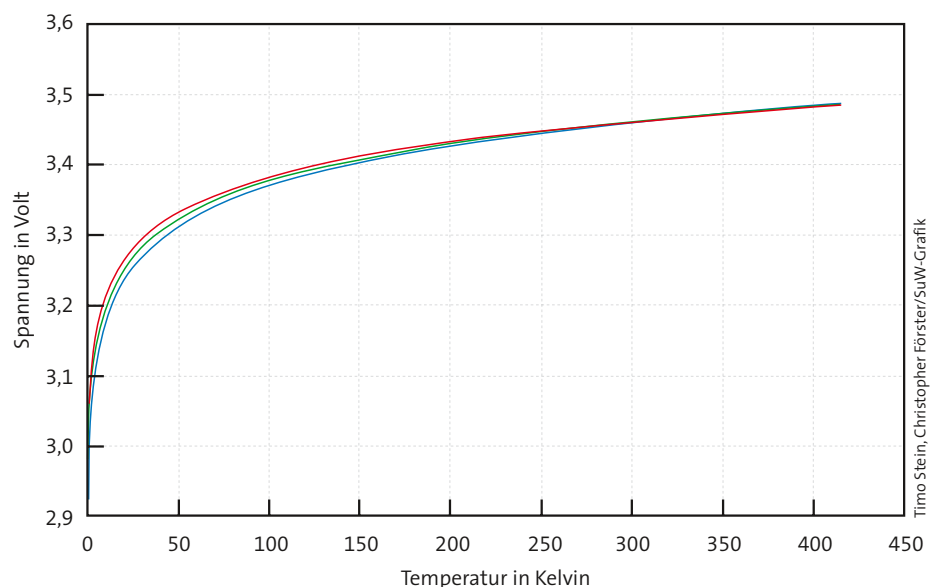
einem PC abzuspeichern. Diesen Weg wählten wir, da er das Gesamtsystem mit berücksichtigt, beispielsweise auch das Eigenrauschen des LNB. Mit Hilfe der Rayleigh-Jeans-Näherung lässt sich ein linearer Zusammenhang der Messwerte mit der Temperatur vorhersagen, jedoch logarithmiert der Detektor diesen. Stellt man nun die gemessene Spannung in Abhängigkeit von der Temperatur dar, so erkennt man deutlich die logarithmische Ausgleichskurve, die für unseren Detektor zu erwarten war.

Nachdem es nun möglich war, den Messwerten feste Temperaturen zuzuordnen, entschlossen wir uns, erste Messungen am Himmel zu wagen. Dazu wurde die Antenne samt Taukappe und Montierung auf die Wiese vor dem Schülerlabor des Hahn-Meitner-Instituts gebracht. Nach dem Aufsatteln auf die Montierung stellte sich ein weiteres Problem ein: Der Hebelarm war zu lang, so dass es erst einmal unschöne Geräusche durch die Induktionsmotoren zu hören gab. Doch konnten wir auch dieses Problem durch Gewichtsverlagerungen größtenteils lösen.

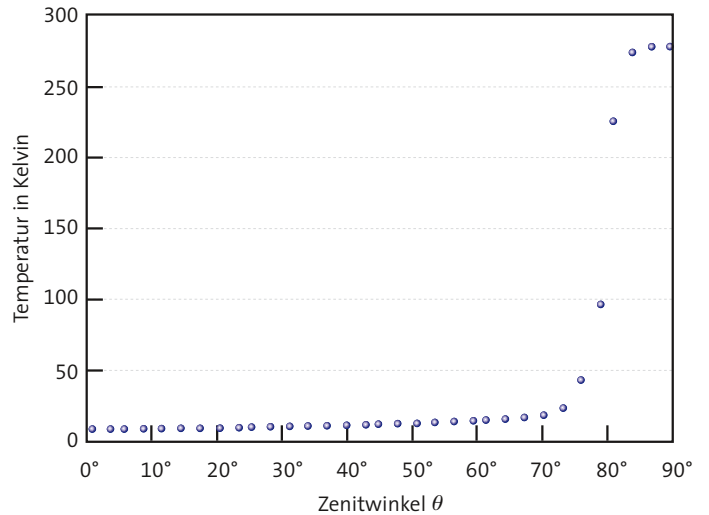
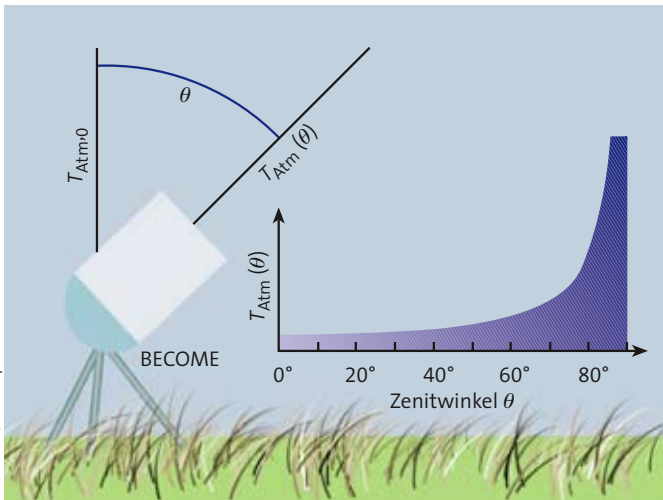
Versuche, die thermische Radiostrahlung des Mondes oder auch einer entfernten Baumgruppe nachzuweisen, ergaben deutliche Ausschläge in unserer Messkurve. Jedoch schien die temperaturbedingte Radiostrahlung warmer Körper neben dem Teleskop, beispielsweise eines Menschen, das Signal nicht zu beeinträchtigen. Dies spricht für den hohen Wirkungsgrad der Abschirmung.

Nach diesen Tests begannen wir mit ersten Messungen zum Nachweis des kosmischen Mikrowellenhintergrunds, indem wir mit der Antenne streifenförmige Be-

Die Kalibrationskurven zeigen die vom Mikrowellendetektor ausgegebenen Spannungen in Abhängigkeit von der Temperatur der Wasserschicht des Calibration tower. Zugrundegelegt wurde ein logarithmischer Zusammenhang zwischen den beiden Messgrößen. Die rote und blaue Kurve basieren auf zwei unabhängigen Messreihen im Temperaturbereich von 295 bis 315 Kelvin, die grüne Kurve gibt ihre Mittelwerte wieder.



Timo Stein, Christopher Förster/SuW-Grafik



Zur Strahlungsmessung wird das Teleskop vertikal geschwenkt. Abhängig von der Zenitdistanz θ ergibt sich dabei die links qualitativ dargestellte Signalkurve. Im Zenit ist der Rauschanteil der Atmosphäre am geringsten ($T_{\text{Atm},0}$), zu größeren Zenitwinkeln nimmt er zu, hier ist ($T_{\text{Atm}}(\theta) > T_{\text{Atm},0}$), bis bei rund 90 Grad die Umgebungstemperatur erreicht ist. Die Grafik rechts zeigt eine typische Messung.

reiche des Himmels beobachteten. Dabei schwenkte das Teleskop mit einer Winkelgeschwindigkeit von etwa 2,8 Grad pro Sekunde gleichmäßig über den Himmel. Der Detektor wandelte die aufgenommene Strahlung jede Sekunde in einen Spannungswert mit einer Genauigkeit von rund einem Millivolt um, der über ein digitales Multimeter (Voltcraft VC 820) mit USB auf dem PC abgespeichert wurde.

Von der Messung zum Ergebnis

Wie lässt sich nun aus den erhaltenen Temperaturverläufen die kosmische Hintergrundstrahlung nachweisen und gar ihre Temperatur bestimmen? Bei den Messungen entlang des Himmels wurde bei unterschiedlichen Zenitwinkeln θ die

jeweilige Antennentemperatur T_A ermittelt. Die entsprechenden Werte sind im Diagramm unten blau dargestellt.

T_A setzt sich aus den Temperaturen T_{Atm} der Atmosphäre, T_{CMB} des Mikrowellenhintergrunds sowie der Temperatur T_{Rest} restlicher Strahlung von Störquellen zusammen:

$$T_A = T_{\text{Atm}}(\theta) + T_{\text{CMB}} + T_{\text{Rest}}$$

Dabei verläuft T_{Atm} proportional zum Sekans des Zenitwinkels θ :

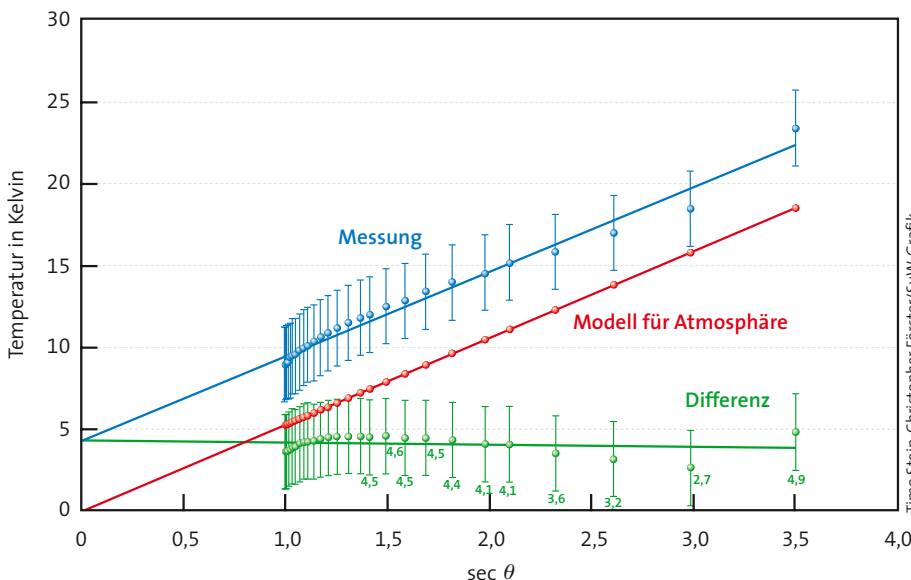
$$T_{\text{Atm}}(\theta) = T_{\text{Atm},0} \sec \theta$$

Hierbei ist $T_{\text{Atm},0}$ die Atmosphärentemperatur im Zenit, und der Sekans ist als Kehrwert

des Kosinus definiert: $\sec \theta = 1/\cos \theta$. Insgesamt ergibt sich

$$T_A = T_{\text{Atm},0} \sec \theta + T_{\text{CMB}} + T_{\text{Rest}}$$

Zwischen T_A und $\sec \theta$ besteht also ein linearer Zusammenhang: T_A lässt sich durch eine Gerade darstellen, deren Steigung $T_{\text{Atm},0}$ ist. Die Steigung ermittelten wir, indem wir an die Messpunkte von T_A eine Ausgleichsgerade anpassten. Wir erhielten $T_{\text{Atm},0} = 5,2$ Kelvin. Dieser Wert deckt sich sehr gut mit Literaturwerten. Der Verlauf von $T_{\text{Atm}}(\theta)$ ist im Diagramm unten rot dargestellt. Hierbei handelt es sich nicht um eine tatsächliche Atmosphärentemperatur, sondern um diejenige Temperatur, die ein hypothetischer Schwarzer Körper



Die blauen Punkte stellen die gemessenen Temperaturen in Abhängigkeit vom Sekans des Zenitwinkels dar. Aus der Steigung der daran angepassten Geraden lässt sich eine »Grundatmosphärentemperatur« von 5,2 Kelvin errechnen. Hieraus folgt das rot dargestellte Modell für den Signalbeitrag der Atmosphäre. Die Modellwerte werden von den Messwerten abgezogen. Eigentlich sollte diese Differenz zu einer Auslöschung führen, jedoch ist eine gleichmäßig über den Himmel verteilte Temperatur von rund vier Kelvin zu erkennen (grüne Linie).

aufweisen müsste, um die gemessene Strahlungsintensität zu erzeugen. Die Atmosphäre verhält sich jedoch keineswegs wie ein Schwarzer Körper, sondern ist im Unterschied zu diesem für ihre eigene Strahlung durchlässig. Deshalb weicht die ermittelte Strahlungstemperatur deutlich von jener Temperatur ab, die ein Thermometer anzeigen würde.

In der gemessenen Antennentemperatur T_A verbirgt sich zusätzlich zu T_{Atm} noch der konstante richtungsunabhängige Anteil T_{CMB} der kosmischen Hintergrundstrahlung sowie der Anteil T_{Rest} unbekannter Störquellen. Wir nehmen an, dass BECOME die Störquellen sehr wirksam abschirmt und dass ihr Einfluss somit für eine grobe Schätzung von T_{CMB} zu vernachlässigen ist. Dies gilt auch für weitere sehr schwache astronomische Quellen.

Unter diesen Voraussetzungen und mit dem berechneten Wert von $T_{Atm,0}$ lässt sich für jede unter dem Zenitwinkel θ gemessene Antennentemperatur T_A ein Wert von T_{CMB} ermitteln:

$$T_{CMB} = T_A(\theta) - 5,2 \text{ K} \times \sec \theta$$

Auf diese Weise ergeben sich die im Diagramm auf Seite 89 grün dargestellten Werte von 3,6 bis 4,5 Kelvin. Betrachtet man nur die Werte nahe dem Zenit, also in der Nähe von $\sec \theta = 1$, so ergibt sich durchweg eine Temperatur von etwa 3,8 Kelvin. Dies entspricht auch unserer Erwartung, da in diesem Bereich das Modell für die Atmosphärentemperatur am besten passt. Unsere Schätzung für die Temperatur des Mikrowellenhintergrunds lautet also $T_{CMB,BECOME} \approx 3,8$ Kelvin.

Wie genau ist unser Ergebnis?

Um die Genauigkeit unserer Ergebnisse besser einschätzen zu können, sind zwei Fehlerquellen zu berücksichtigen, nämlich die Kalibrierungs- und die Messfehler.


Zur Kalibrierung ist zu sagen, dass der Temperaturgradient über der beheizten

Fläche maximal zwei Kelvin betrug. Diesen Wert bestimmten wir mit Hilfe von Infrarotthermometern während der Kalibrierung. Geringe Messfehler im Millivoltbereich tragen zu einer Temperaturänderung von maximal 0,3 Kelvin bei. Dieser Fehler minimiert sich jedoch erheblich, da die Messwerte für jede Sekunde gemittelt werden. Der durch die Nebenkeulen der Antenne entstehende Fehler lässt sich auf etwa 0,5 Kelvin abschätzen, und die Messgenauigkeit durch das so genannte Spillover auf 0,3 Kelvin.

Da es sich um unabhängige Fehlerquellen handelt, müssen diese geometrisch zu einem Gesamtfehler kombiniert werden (siehe Tabelle unten links). Somit ergibt sich für $T_{CMB,BECOME}$ eine Unsicherheit von etwa $\pm 2,1$ Kelvin, welche kleiner ist als der in der Literatur angegebene Wert für die CMB-Temperatur von etwa 2,7 Kelvin und den von uns bestimmten Werten zwischen 3,6 und 4,5 Kelvin. Daher ist anzunehmen, dass es sich mit einer großen Wahrscheinlichkeit um ein reales Rauschen handelt, ähnlich wie es Penzias und Wilson im Jahr 1964 bemerkt hatten. Irdische Störquellen lassen sich ausschließen, da sich die Ergebnisse an mehreren Tagen zu unterschiedlichsten Uhrzeiten reproduzieren ließen.

Der Urknall ist greifbar

Zu Beginn unseres Projekts waren wir skeptisch, ob es wirklich möglich sei, mit einfachen Mitteln und geringen Kosten die kosmische Hintergrundstrahlung nachzuweisen. Es gelang uns jedoch, mit einem selbst konstruierten Versuchsaufbau die Frage nach der Messbarkeit der durch den Urknall verursachten kosmischen Hintergrundstrahlung positiv zu beantworten!

Mittlerweile haben wir unser einfaches Verfahren auch für Schulen und Universitäten optimiert. So wird das Echo des Urknalls für alle greifbar. 

Danksagung. Wir möchten allen danken, die uns bei der Umsetzung von BECOME geholfen haben, besonders bei Dr. Martina von Lucke-Petsch vom Schülerlabor des Hahn-Meitner-Instituts Berlin und Dr. Wolfgang Hasse von der Wilhelm-Foerster-Sternwarte Berlin. Für einen regen Austausch danken wir John Mather vom Goddard Space Flight Center und David Spergel der Princeton University. Weiter danken wir folgenden Institutionen und Firmen: Ferdinand-Braun-Institut für Hochfrequenzforschung, University of Chicago, SASCO Holz AG, Analog Devices und Teleskopmanufaktur Berlin. Ein ganz besonderer Dank geht auch an unsere großartigen Familien!



TIMO STEIN (17) ist Gymnasiast, Hobbyfotograf und leidenschaftlicher Amateurastronom. Er beschäftigt sich mit Physik und arbeitet neben der Schule im Hahn-Meitner-Institut Berlin. Seit 2005 ist er Mitglied der Arbeitsgruppe »Astrometrie« der Wilhelm-Foerster-Sternwarte Berlin.



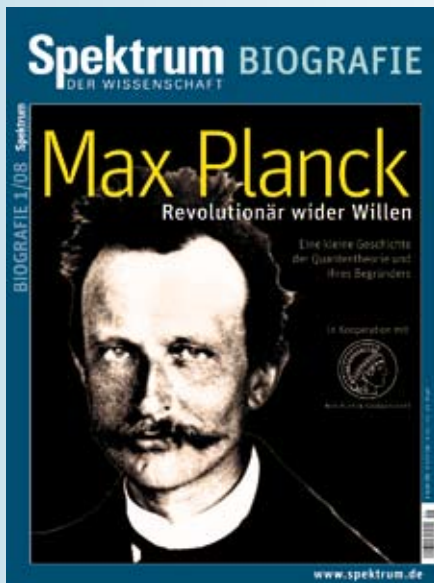
CHRISTOPHER FÖRSTER (20) ist Abiturient und beschäftigt sich mit Luft- und Raumfahrttechnik. Ferner wirkt er seit 2005 an der Wilhelm-Foerster-Sternwarte Berlin in der Arbeitsgruppe Astrometrie mit.

Literaturhinweise

- Bartelmann, M.:** Das Standardmodell der Kosmologie, Teil 2: Der kosmische Hintergrund. In: *Sterne und Weltraum* 9/2007, S. 36–46.
- Dicke, R. H. et al.:** Cosmic Black-Body Radiation. In: *Astrophysical Journal* 142, S. 414, 1965.
- Fritzsche, B. et al.:** Ein kompaktes Radioteleskop. In: *Sterne und Weltraum* 12/2006, S. 74–77.
- Kraus, J. D.:** *Radio Astronomy*. Cygnus-Quasar Books, Powell 1986.
- Neumann, M. J., Wright, P.:** Signale aus dem Kosmos. *Radioastronomie für Einsteiger*. SuW-Basics 1 »Astronomie für Alle«, Spektrum der Wissenschaft, Heidelberg 2002.
- Penzias A. A., Wilson, R. W.:** A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s. In: *Astrophysical Journal* 142, S. 419–421, 1965.
- Tauber, J. et al.:** Die Planck-Mission. In: *Sterne und Weltraum* 2/2008, S. 38–48.

Weblinks zum Thema finden Sie unter www.astronomie-heute.de/artikel/95680

Fehlerbetrachtung	
Fehlerquelle	Geschätzter Fehler
Kalibrierungsfehler	2 Kelvin
Messfehler	0,3 Kelvin
Nebenkeulen	0,5 Kelvin
Spillover	0,3 Kelvin
Gesamtfehler:	$[(2 \text{ K})^2 + (0,3 \text{ K})^2 + (0,5 \text{ K})^2 + (0,3 \text{ K})^2]^{1/2} = 2,1 \text{ K}$



« BIOGRAFIE »MAX PLANCK«

Max Planck löste eine Revolution aus, die das Weltbild der klassischen Physik umstürzte. Er prägte die deutsche Forschungslandschaft wie kein anderer. Als Privatmann musste er harte Schicksalsschläge hinnehmen. Anlässlich des 150. Geburtstags des Begründers der Quantenphysik erscheint im Verlag **Spektrum der Wissenschaft** eine reich bebilderte Biografie, deren Herausgeber das Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte ist. Entstanden ist sie auf Grundlage der diesjährigen Berliner Ausstellung »Max Planck – Revolutionär wider Willen«. Erscheinungstermin: 20.06.08; € 8,90.



- > Die 200 schönsten Galaxien in Bildern der besten Astrofotografen
- > Wie Amateurastronomen mit einem 20cm-Teleskop die Entdeckungen von Hubble nachvollziehen können

€ 7,90



- > Die schönsten Bilder von Amateurastronomen aus dem reichhaltigen Archiv von Thorsten Neckel. Einführung mit Erläuterung der vorgestellten Objekte

€ 7,90



- > Vom Kometenring zur Welteninsel
- > Scheibe, Staub und Schwarzes Loch
- > Die Nische, in der wir leben
- > Supernovae und »lokale Blase«

€ 8,90



- > Licht in der Astronomie
- > Adaptive Optik
- > Licht und Kosmologie
- > Supernovae
- > Goethes Farbenlehre
- > Quantenoptik und einzelne Atome

€ 8,90



- > Sternaufnahmen mit Fotoapparat
- > Planetenjagd mit Webcams
- > Filme selbst entwickeln
- > Tipps für den Astrourlaub
- > Die Kamera am Fernrohr

€ 8,90



- > Grundlagen der Kosmologie
- > Der Querdenker Fred Hoyle
- > Quasare und Schwarze Löcher
- > Mit Supernovae das Universum vermessen

€ 8,90



- > Die Bausteine der Planeten
- > Was ist ein Planet?
- > Aufbruch zu fremden Erden
- > Wie sucht man Planeten?

€ 8,90



- > Magische Quadrate
- > Pflasterungen der Ebene
- > Ausflüge in höhere Dimensionen
- > Spiele auf Quadrat- und Sechseckgittern

€ 8,90



- > Prägen und Gießen von Molekülen
- > Neue künstliche Schadstoffkiller
- > Der heiße Ursprung des Lebens
- > Umweltgifte aus der Natur

€ 8,90



- > Nebel: der geschmiedete Himmel
- > Jungsteinzeitliches Sonnenobservatorium
- > Die Weltkarte des Ptolemäus
- > Muslimische Astronomie

€ 8,90



- > Zwillingwelten
- > Dunkle Materie
- > Quantentheorien der Gravitation
- > Vor dem Urknall

€ 8,90

»» Alle Hefte sind im Handel erhältlich oder unter:

www.spektrum.com/sonderhefte