

„CMB on TV“

- der erste Augenblick des Universums

*Jugend forscht 2008
Bundeswettbewerb*

v o n T i m o S t e i n u n d C h r i s t o p h e r F ö r s t e r

INHALTSVERZEICHNIS

KURZFASSUNG	2
EINLEITUNG	3
HINTERGRUND ZUM KOSMISCHEN HINTERGRUND	
Entstehung	4
Schwarzkörperstrahler	5
CMB im Radiobereich	6
Andere Quellen im Radiobereich	6
BECOME	
Konstruktion und Bau	7
BECOME.Sat	7
Einfaches Satellitenequipment	7
Faraday und Kaninchendraht	7
BECOME.Dec	9
TEMPERATURMESSUNG AM HIMMEL	
Kalibrierung	10
Messung am Nachthimmel	11
Bestimmung der CMB-Temperatur	12
Fehlereinschätzung	13
FAZIT	13
AUSBLICK	14
DANKSAGUNG	14
LITERATURVERZEICHNIS	15
ANHANG	
Verwendete Konstanten	16
Detektorplanung	16

KURZFASSUNG

Kurze Zeit nach dem Urknall vor etwa 13.7 Milliarden Jahren war der Raum extrem heiß, so heiß, dass sich Elektronen und Atomkerne nicht miteinander kombinieren konnten. Dieser Umstand führte zu einem trüben, gar undurchsichtigen Zustand, da Lichtquanten sofort durch dieses Plasma absorbiert wurden. Jedoch 380.000 Jahre später hatte sich der Kosmos weiter ausgedehnt und die Temperatur war soweit herabgesunken, dass es zur Bildung neutraler Atome kommen konnte und in Folge dessen das Licht „entkoppelt“ wurde – der Vorhang fiel gewissermaßen und das Universum wurde durchsichtig.

Der dabei für uns sichtbare kosmische Feuerball stellt eine Grenze dar – die Grenze des Sichtbaren. Bis zum heutigen Tage bleibt uns diese mächtige Feuerwand in Form eines leichten Rauschens zwischen zwei Fernsehkanälen erhalten. Nun starteten wir den Versuch, mit möglichst einfachen Mitteln diese Mikrowellenstrahlung aufzufangen und zu untersuchen.

Mit einfachem Satellitenequipment, Kaninchendraht und Wasser gelang es uns, erfolgreich die Temperatur der kosmischen Hintergrundstrahlung abzuschätzen. Wir taufte das Experiment BECOME für „Berlin Cosmic Microwave Experiment“. Besonders interessant ist unser Projekt auch für den Einsatz an Schulen und Universitäten, weil damit aktuelle Forschung aktiv betrieben werden kann und dies mit geringem Kostenaufwand.

EINLEITUNG

Dieses Projekt beschäftigt sich mit dem Versuch, die kosmische Hintergrundstrahlung (Englisch: Cosmic Microwave Background, CMB) zu messen. Die Hintergrundstrahlung stellt den ersten Augenblick des Urknalls dar. Allerdings ist diese nach so langer Zeit – bedingt durch die Expansion des Universums – derart stark rotverschoben, dass die CMB heute nur noch im Mikrowellenbereich gemessen werden kann.

Unser Versuch konzentriert sich darauf, mit möglichst einfachen Mitteln die Hintergrundstrahlung zu messen, wobei sich hierbei auch neue Möglichkeiten für die radioastronomische Amateurszene ergeben. Außerdem haben wir auch darauf geachtet, dass die Komponenten des Equipments so kostengünstig wie möglich sind. Dadurch können die Technik und die Ergebnisse des Projekts ebenfalls für Schulen und Universitäten zugänglich gemacht werden.

Die Idee zu diesem Projekt entstand nach einem Schülerkolloquium an der Technischen Universität Berlin, das die kosmische Hintergrundstrahlung zum Inhalt hatte. Im Laufe der Zeit kam uns der Gedanke, die Hintergrundstrahlung selbst zu messen. Nach einigen Vorüberlegungen und einigen Monaten, in denen wir die Theorie des Projekts entwickelten, erschien es uns die Möglichkeit, die Hintergrundstrahlung mit kostengünstiger Technik zu detektieren, immer realistischer. So entwickelten wir die Idee, ein System herzustellen, das später für Jedermann die Hintergrundstrahlung zugänglich machen sollte.

In den folgenden Kapiteln wird eingehend über die Entwicklung der Theorie und deren Umsetzung in die Praxis durch den Bau eines Radioteleskops berichtet.

Dabei gliedert sich die Arbeit in drei große Teile. Das erste Kapitel beschreibt die Geschichte der CMB, beginnend mit Ihrer Entdeckung durch Arno Penzias und Robert Wilson. Des Weiteren werden nachfolgend die theoretischen Hintergründe zur CMB, sowie deren heutiges physikalisches Verständnis näher erläutert. Im anschließenden zweiten Kapitel wird auf die Entwicklung, die Konstruktion und den Bau des Radioteleskops eingegangen. Das abschließende dritte Kapitel umfasst die Kalibrierung sowie die Auswertung unserer Messungen mit dem Radioteleskop und die Interpretation der Ergebnisse.

HINTERGRUND ZUM KOSMISCHEN HINTERGRUND

“Tune your television to any channel it doesn't receive, and about 1 percent of the dancing static you see is accounted for by this ancient remnant of the Big Bang.

The next time you complain that there is nothing on, remember that you can always watch the birth of the universe.”

Bill Bryson

Entstehung

Kurz nach dem Urknall – in der Frühphase des Universums – war dieses so von Energie erfüllt, dass nach dem Auskondensieren der Materie noch lange keine Bildung von neutralen Atomen möglich war. Der Raum war mit einem fast gleichmäßig verteilten, extrem heißen Plasma erfüllt. Das Besondere an diesem Zustand stellte die enge Kopplung zwischen Licht und Materie dar. So konnten sich Lichtquanten, die sogenannten Photonen, nicht frei bewegen, sondern wurden ständig an den herumirrenden Elektronen gestreut oder gar ganz absorbiert. Daher können wir heutzutage auch diese Zeit nicht direkt mit Instrumenten untersuchen, welche mit elektromagnetischer Strahlung arbeiten.

Während Sie nun diesen Abschnitt gelesen haben, entstanden seit dem Urknall bereits die ersten Heliumkerne. Leider müsste man diesen Teil noch etwa zehnbillionen Mal lesen ($12 \times 10^{12} \text{s} \approx 380.000$ Jahre) bis die Temperatur auf etwa 3000 K gesunken wäre. Erst unterhalb dieser Temperatur kommt es zur Rekombination des heißen Plasmas zu einem neutralen Gas, in welchem Licht und Materie voneinander getrennt oder auch „entkoppelt“ sind – das Universum ist von diesem Zeitpunkt an für Licht durchsichtig. Dieses lässt sich einfach veranschaulichen, indem Sie in einer unbewölkten Nacht den Himmel schauen und Sterne erkennen können.

Zu jener Zeit entstand der Anblick einer Feuerwand, der bis zum heutigen Tage anhält. Da 380.000 Jahre im Vergleich zum heute angenommenen Weltalter von etwa 13,7 Milliarden Jahren gering sind, und der Raum sich seitdem ungemein vergrößert hat, wurden die Lichtwellen des primordialen Feuerballs um etwa das 1000fache gestreckt. Deshalb können wir diesen nicht direkt im optischen Bereich beobachten, sondern müssen im Mikrowellen- und Radiobereich auf die Suche gehen.

Mitte der 60er Jahre des letzten Jahrhunderts machten zwei Mitarbeiter der Bell Labs in New Jersey, Arno Penzias und Robert Wilson, die Entdeckung einer unerklärlichen, von allen Seiten gleichmäßig einwirkenden Rauschquelle von etwa $3,5 \pm 1 \text{K}$ [1]. Dazu benutzten sie eine Hornantenne mit einer Öffnung von etwa 20 feet (6 m) und mit einem hochempfindlichen Detektor bei einer Frequenz von 4080 MHz.

Doch war bereits seit Ende der 40er Jahre die kosmische Hintergrundstrahlung theoretisch vorausgesagt worden. Für ihre Entdeckung erhielten die beiden Physiker den Nobelpreis 1978 [W01]. Seit der Entdeckung der CMB gab es intensive Bemühungen, nicht nur den Feuerball selbst, sondern auch Schwankungen in dessen Struktur zu beobachten. Dazu war es nötig, immer empfindlichere Instrumente zu entwickeln und sich auch von terrestrischen Störquellen weiter zu entfernen. Dies führte schließlich dazu, dass man in den 70er Jahren viele Raketen- und auch Ballonexperimente durchführte; später startete man gar spezielle Satelliten wie COBE oder WMAP und bald wird hoffentlich auch PLANCK gestartet werden. Dies geschieht unter großem Aufwand und unter wahrhaft astronomischen Kosten.

So erhielt man im Lauf der Jahre ein enormes Wissen über unser Universum und seine besonderen Eigenschaften, welche durch gut ein Dutzend Parameter ausgedrückt werden können. 2006 wurde der Physik-Nobelpreis an die beiden COBE-Wissenschaftler John Mather und George Smoot verliehen, die u.a. zeigen konnten, dass es sich bei der CMB um einen schwarzen Körper mit einer Temperatur von 2,725 K handelt [W02]. Dieses ist in Anbetracht der Ausgangstemperatur von etwa 3000 K sehr wenig. Hier zeigt sich auch deutlich die extreme Rotverschiebung (z) von etwa 1100 (3000 K/2,7 K ≈ 1100). Im Normalfall beobachtet man Objekte bis zu einer Rotverschiebung von maximal 6. Somit betrachtet man mit Hilfe der CMB quasi die Kindheit des Universums.

Schwarzkörperstrahler

Dieses durch Gustav Kirchhoff eingeführte und von Max Planck zu Beginn des letzten Jahrhunderts theoretisch erklärte physikalische Objekt, absorbiert jegliche eintreffende Strahlung ganz ohne Transmission oder Reflektion. Dabei stellt es gleichzeitig einen idealen thermischen Strahler dar, dessen Abstrahlung einzig von seiner Temperatur T abhängt. Das Plancksche Strahlungsgesetz stellt außerdem die Geburtsstunde der Quantenphysik dar, da man mit dem klassischen Ansatz keine passende Beschreibung formulieren konnte und sogar in einer „Ultraviolett Katastrophe“ zu enden schien. Ein Planckstrahler wird durch die untenstehende Gleichung (1) beschrieben.

$$I(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \tag{1}$$

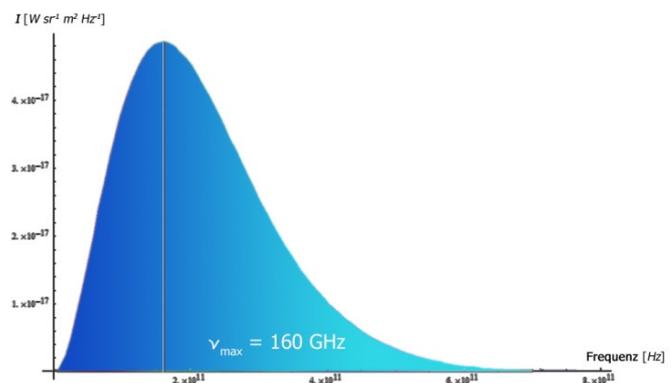
Dabei ist h das Plancksche Wirkungsquantum, c die Lichtgeschwindigkeit, k die Boltzmannkonstante und ν die Frequenz. Das resultierende Ergebnis I stellt die Strahlungsleistung pro Quadratmeter und Frequenz dar.

Die Strahlung des kosmischen Hintergrundes stellt die Emission eines fast perfekten schwarzen Körpers von ursprünglich ~ 3000 K dar. Beim Spektrum der CMB treten keine Emissions- oder Absorptionslinien bzw. auch keine Charakteristika von Synchrotron- oder auch Bremsstrahlung auf. Außerdem erscheint nur eine extrem kleine Polarisationskomponente. Das Maximum bei etwa 160 GHz entspricht Licht mit gut 1,9 mm Wellenlänge. Nach dem (umgestellten) Wienschen Verschiebungsgesetz (Gleichung (2)) erhält man eine Temperatur T_{CMB} von 2,725 K.

$$T = \frac{\nu_{max} h}{\alpha k} \tag{2}$$

Hier stellt ν_{max} die Frequenz mit der höchsten Strahlungsdichte und α die Proportionalitätskonstante dar, welche einen numerischen Wert von 2.821439 hat.

Betrachtet man nun das Spektrum der CMB (Figur I.1), so stellt man eine maximale Strahlungsleistung von etwa 5×10^{-17} Watt pro m^2 und Hz fest. Dieses scheint zwar auf den ersten Blick eine sehr schwache Strahlung zu sein, jedoch ist die kosmische Hintergrundstrahlung für gut 1% des Rauschens, welches zwischen zwei Fernsehkanälen auftritt, verantwortlich. Das liegt daran, dass die Erde eine Strahlung mit einer Temperatur von ca. 300 K abgibt, und diese durch den kosmischen Hintergrund von etwa 3 K um ein Hundertstel erhöht wird.



Figur I.1: Planckspektrum bei 2,7 K

CMB im Radiobereich

Der Radiobereich deckt elektromagnetische Strahlung ab einer Wellenlänge von wenigen Zentimetern bis zu vielen Kilometern mit entsprechend kleinen Frequenzen ab. Auch in diesem Frequenzband erscheint uns die CMB noch als gleichmäßiger Hintergrund, jedoch unter einer weitaus geringeren Strahlungsintensität als in ihrem Maximum bei Wellenlängen von wenigen Millimetern. Schon die Entdeckung durch Penzias und Wilson erfolgte bei 4 GHz im Radiobereich. Auch unser Experiment BECOME arbeitet im Radiobereich mit Frequenzen von 10,7 bis 12,75 GHz. Bei einer Bandbreite von etwa 1 GHz pro Kanal und der relativ rauscharmen, aber extrem hohen Verstärkung der Instrumente kommt man auf detektierbare Intensitäten.

Die unten stehende Gleichung (3) gibt die integrale Intensität eines idealen schwarzen Strahlers wieder, die zwischen den Frequenzen ν_1 und ν_2 auf das Experiment pro Flächeneinheit trifft.

$$\int_{\nu_1}^{\nu_2} I(\nu, T) d\nu \approx \frac{2k}{3c^2} T(\nu_2^3 - \nu_1^3) \quad (3)$$

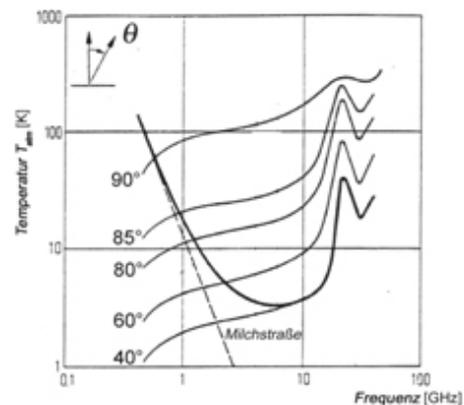
Hierfür wurde zur Vereinfachung des in (1) stehenden exponentiellen Terms mit Hilfe einer Taylorreihe approximiert. Dabei erhält man bereits mit wenigen Kettengliedern sehr präzise Ergebnisse, solange die Bandbreite B klein gegenüber der Frequenz ν ist, und sich diese deutlich zum niederenergetischen Ende vom Maximum des Planckspektrums befindet. Ferner kann man aus der obigen Gleichung direkt einen linearen Zusammenhang zwischen Temperatur und abgegebener Strahlung erkennen. Zur Sicherheit verglichen wir die Auswirkungen von weiteren Gliedern der Taylorreihe, jedoch zeigt sich einzig ein vernachlässigbarer Unterschied. Diese auch als Rayleigh-Jeans-Näherung bezeichnete Gleichung lässt sich im Rahmen ihres Konvergenzradiuses bis etwa 0,5 K sehr verlässlich als Temperaturindikator anwenden.

Zu allen oben genannten Teilaspekten haben wir Modellrechnungen mit Hilfe der Software Mathematica 6.0 durchgeführt.

Andere Quellen im Radiobereich

Hier muss man zwischen zwei verschiedenen Teilaspekten unterscheiden: Zum Einen entsteht durch atmosphärische, terrestrische als auch menschliche Störquellen, zum Anderen aber auch durch extraterrestrische Störquellen wie die Objekte des Radiohimmels, ein sich überlagernder Signalwald, der die Untersuchung der CMB vom Erdboden aus wesentlich erschwert.

Zunächst verändert sich das Transmissionsverhalten der Atmosphäre von wenigen GHz deutlich zu einigen hundert GHz. So treten bei etwa 60 GHz erste Absorptionen durch Wasserdampf auf (Figur 1.2). Aber vor allem Satelliten, welche genau in unserem Radioband abstrahlen, stellen eine zusätzliche Belastung dar. Diese Strahlung ist zum Glück – im Gegensatz zur CMB – recht stark lokal fokussiert. Auch Mobiltelefone oder W-LAN-Netzwerke können Störungen am Detektor hervorrufen. Jedoch gibt es auch weit entfernt von unserem Planeten Radioemitter wie die Milchstraße, die Sonne oder auch andere helle Radioquellen wie Taurus A (Krebsnebel).



Figur 1.2: T_{Atm} vs. Beobachtungswinkel θ

Doch befindet sich der von uns genutzte Frequenzbereich optimalerweise gerade an einer Stelle, an welcher sowohl terrestrische als auch extraterrestrische Störungen minimal werden.

BECOME

Konstruktion & Bau

Become.Sat

Das von uns gebaute und auf den Namen BECOME („Berlin Cosmic Microwave Experiment“) getaufte Radioteleskop, besteht aus mehreren Komponenten. Zum Einen besteht das Experiment aus einer abgeschirmten Satellitenschüssel, die in Verbindung mit einem handelsüblichen LNB (Low Noise Blockconverter) arbeitet, zum Anderen aus einem selbstkonstruierten Detektor, auf den im folgenden Kapitel näher eingegangen wird.



Figur II.1: Chris, BECOME und Timo

Bauteil	Gilbertini Offset-Satellitenschüssel	Invacom LNB SNH-031	Coax-Kabel	Tubuskonstruktion
Spezifikation	Maße: 97,0 cm X 104,0 cm Frequenzbereich: 10,0 bis 13,0 GHz	Frequenzbereich: Low-band: 10,7 – 11,7 GHz High-band: 11,7 – 12,75 GHz	Abschirmung: > 90 dB Länge: 7m	Aluminium-Gitterrohr-tubuskonstruktion mit mehrschichtiger Abschirmverkleidung aus Kaninchendraht und Rettungsfolie.
Verstärkung	39,4 dB@10,95 GHz	50 – 60 dB	-	-
Preis (in Euro)	69,00	27,00	5,00	150,00

Einfaches Satellitenequipment

Für die Hardware unseres Projekts benutzten wir nach reiflicher Vorüberlegung eine einfache 100cm-Gilbertini-Offset-Satellitenschüssel, sowie ein LNB der Marke Invacom mit der Produktbezeichnung SNH-031. Des Weiteren wurde ein 7m-Kabel mit einer Abschirmung von über 90 dB verwendet.

Die 100cm-Schüssel stellt hierbei einen Kompromiss aus Verstärkungsleistung und Transportabilität dar. Jede größere Antenne wäre nicht mehr zu transportieren gewesen. Außerdem hätte eine Satellitenschüssel ab 120 cm Durchmesser eine Baugenehmigung erfordert. Die Auswahl des LNBs erfolgte nach den Kriterien der Verstärkung und des Rauschmaßes. Wir wählten den Invacom LNB aus, da dieser lediglich ein durchschnittliches Rauschen von 0,3 dB, jedoch eine Leistungsverstärkung von 50 – 60 dB ermöglicht. Der Vorteil der Invacom LNBs ist, dass diese bereits ab Werk individuell vermessen werden, und der Kunde die Messprotokolle beim Kauf erhält.

Faraday und Kaninchendraht

Nachdem uns klar war, welche Komponenten für die Detektion der Hintergrundstrahlung zum Einsatz kommen sollten, stellte sich uns die Frage, wie dieses Instrumentarium bestmöglich vor Störstrahlungen abgeschirmt werden kann.

Dabei wurde uns relativ schnell klar, dass wir auf das bewährte Prinzip des Teleskoptubus zurückgreifen werden, das wir schon aus längerer Erfahrung mit der optischen Astronomie kannten. Dieser Tubus sollte später auf unsere parallaktische EQ6-Montierung befestigt werden, um den Himmel abzuscannen.

Dabei konnte ein Volltubus, aufgrund der Gewichtsbelastung von vorneherein ausgeschlossen werden. Um Gewicht einzusparen, war unsere nächste Überlegung, einen Tubus aus Polystyrol mit einer Verkleidung aus Rettungsfolie anzufertigen. Jedoch wäre dabei das eingesparte Gewicht nur minimal gewesen, und die Stabilität der Konstruktion wäre negativ beeinflusst worden. Ferner wären die Materialkosten hoch gewesen. Stattdessen wählten wir das Prinzip des Gitterrohrtubus aus, wobei wir von der Teleskopmanufaktur Berlin, die uns auch ihre Räumlichkeiten zur Herstellung bereit stellte, bei der Konstruktion beraten wurden. Die Verkleidung und Abschirmung sollte ebenfalls mittels Rettungsfolie erfolgen, jedoch waren wir nicht sicher, ob dies zur Abschirmung ausreichen sollte.

So wurde ein Aluminiumträger in eine L-Form gebogen. Dieser wurde mit einer Sternkonstruktion aus Aluminiumstangen verschraubt, auf der wiederum die Satellitenschüssel fixiert wurde. Von diesem „Stern“ ausgehend wurden nun die Verstrebungen für die Gitterkonstruktion aus Aluminiumwinkelmaterial angebracht. Diese wurden am oberen Ende miteinander verschraubt. Fixiert wurden die Verstrebungen durch einen Ring aus gebogenem Rundmaterial, der ebenfalls aus Aluminium bestand. Befestigt wurde der Ring an den Streben mittels Kabelbindern. Der Ring wurde ebenfalls durch zusätzliche Streben, die vom Hauptträger ausgingen, verbunden. Dies diente dazu, dass der Tubus abgefangen wurde, und somit nicht das komplette Gewicht der Konstruktion auf dem Stern lastete.

Um die Transportabilität des Geräts zu gewährleisten, wurde uns bereits früh klar, dass der Tubus in zwei zusammensetzbare Teile konstruiert werden musste. So bauten wir zum Einen den Tubus und zum Anderen – in Anlehnung an das Prinzip einer Taukappe bei optischen Teleskopen – eine zweite Gitterkonstruktion, die an beiden Enden ebenfalls einen Ring erhielt. Dieses als Taukappe bezeichnete Tubusstück verlängert das Teleskop um ca. 50 cm, wobei allein der Tubuskörper mit der Satellitenschüssel eine Länge von 110 cm besitzt. Die Gesamtkonstruktion hat somit eine Länge von 160 cm und der Durchmesser beträgt 120 cm.

Nachdem die Rahmenkonstruktion fertig war, kam erneut die Frage nach der besten Abschirmung auf. Quasi über Nacht hatten wir die Idee, den Tubus als Faradayschen Käfig zu konstruieren. Uns fiel dabei ein, dass man den Tubus mit Drahtgeflecht umwickeln könnte. So kam es dazu, dass wir nach einer kurzen Suche im Baumarkt auf Kaninchendrahtzaun stießen. Dieser Kaninchendraht besaß mit 13 mm Durchmesser hinreichend kleine Maschen, um jede unserer möglichen Störstrahlungen deutlich zu absorbieren. Aus diesem Grund wurde das Konstrukt von uns mit Drahtgeflecht umwickelt, welches wir wieder mit Kabelbindern befestigten. Um uns bei der Abschirmung ganz sicher zu sein, wurde der Tubus zusätzlich mit Rettungsfolie verkleidet, die mit Hilfe von Klebeband befestigt wurde.

Dennoch wurden wir von einem Problem überrascht: Die Taukappe konnte nicht stabil auf dem Tubus befestigt werden. Doch auch hier fanden wir eine praktikable Lösung, indem wir auf elastische Bänder zurückgriffen, die am oberen Ring der Taukappe und an zusätzlich angebrachten Halterungen an den Tubusstreben eingehakt werden können. Damit wurde die Taukappe derart unter Spannung gesetzt, dass sie sich ohne Probleme auf dem Tubus halten konnte.

Trotzdem blieb zwischen Tubus und Taukappe ein Spalt frei, der so groß war, dass er den Effekt des Faradayschen Käfig aufheben konnte. So wurden von uns Manschetten angefertigt, die zwischen die elastischen Bänder und den Tubus geschoben werden konnten. Bei diesen Manschetten griffen wir jetzt auf das anfänglich erwähnte Polystyrol zurück, da es sich hier nur um einen schmalen Streifen handelte. Auf diesen Polystyrol-Streifen wurde mit doppelseitigem Klebeband wieder ein Streifen Kaninchendraht geklebt, um die Lücke im Faradayschen Käfig zu schließen. Zusätzlich wurden die Manschetten ebenfalls mit Rettungsfolie umwickelt.

Zuletzt wurde eine Prismenschiene mit dem Hauptträger verschraubt, damit der Tubus auf der parallaktischen Montierung befestigt werden konnte.

Become.Dec



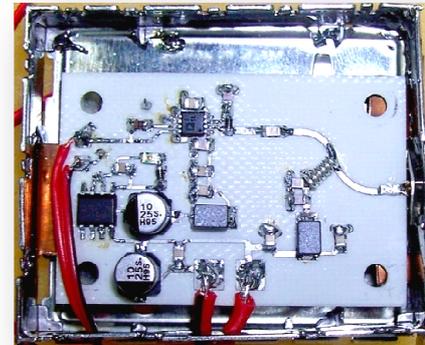
Figur II.2: BECOME-Detektor mit Multimeter

Der LNB wandelt die hochfrequenten Eingangssignale von 10,7 bis 12,75 GHz mit Hilfe eines lokalen Oszillators auf 950 bis 2150 MHz herunter. Um nun dieses heruntergemischte 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 detektieren.

Dabei konnten wir einiges vom Aufbau handelsüblicher Satellitenreceiver lernen. Doch reichte unser Wissen schon bald nicht mehr aus, und da man außerdem bei der Entwicklung von Hochfrequenztechnik viele Besonderheiten beachten muss, wandten wir uns mit unserem Problem an das Ferdinand-Braun-Institut in Berlin-Adlershof. Dort lernten wir einiges über Herstellungsverfahren und Möglichkeiten für die technische Realisierung.

Der Detektor ist auf eine beim Satellitenempfang typische Impedanz von 75 Ohm (Ω) ausgelegt und basiert auf SMD-Technologie, um die Größe des Gerätes minimal zu halten, was in diesem Frequenzbereich sehr wichtig ist. Der Detektor besitzt mehrere Untereinheiten, um die oben genannten Aufgaben erfüllen zu können.

Jegliche Restwechselspannungen sollen durch die mehr als 10 integrierten Kondensatoren und durch die Ferritbausteine im Gesamtaufbau abgeleitet werden. Das Herzstück stellt jedoch der hochempfindliche logarithmische Detektor AD8313 von Analog Devices dar [W03]. Dieses Bauteil wandelt das Eingangssignal in eine logarithmisch skalierte Ausgangsspannung um, welche wiederum gemessen werden kann. Dieses bietet den Vorteil eines großen dynamischen Messbereiches, welcher sich von -60 dBm bis zu -20 dBm erstreckt und eine hohe Linearität aufweist. Unser Eingangssignal liegt im Bereich von etwa -40 dBm. Weiterhin ist es sogar möglich, die Skalierung, den sogenannten „Slope“ ($\sim 50\text{mV/dB @}33\text{k}\Omega$), mit Hilfe eines Widerstandes am AD8313 zu regeln. Des Weiteren wurde ein 5V-Spannungswandler vom Typ 7805 für die AD8313-Spannungsversorgung sowie eine grüne LED eingebaut. Die eigentliche mit einem Labornetzteil eingespeiste Spannung von etwa 12 V wird über eine kleine Spule zum Coax-Kabel geführt. Der Stromverbrauch des gesamten Gerätes beträgt gerade einmal 100 mA. Die Platine wurde in eine alte Satellitenreceivereingangsbox eingelötet, um der F-Steckerbuchse einen ausreichenden Halt zu bieten und den Detektor vor äußeren Störquellen abzuschirmen.



Figur II.3: BECOME-Detektorplatine

Nach der Konstruktion ging es an das konkrete Platinendesign, welches mit Hilfe des Programmes Eagle 4.16 [W05] erfolgte. Nach dem Fräsen der Platine bestückten wir diese mit den winzigen SMD-Teilen und überprüften die Schaltung unter dem Mikroskop. Zur sicheren Aufbewahrung bauten wir spontan noch eine alte Teedose um, welche von innen mit Schaumstoff ausgelegt wurde. Diese dient uns als Transportschutz und zur weiteren (u.a. auch thermischen) Isolierung. Einzig das LNB-Kabel, sowie das Ein- und Ausgangskabel, welche mit „Bananensteckern“ realisiert wurden, schauen noch gut erkennbar hinaus (Figur II.2).

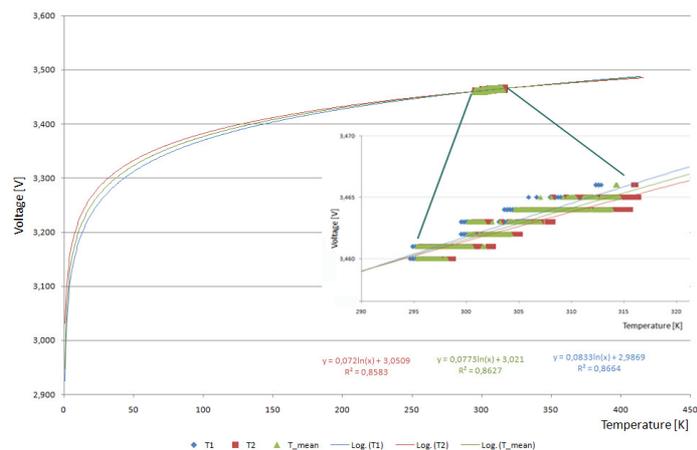
Im Hahn-Meitner-Institut hatten wir dann die Möglichkeit, den fertigen Detektor zu vermessen, indem Signale wohl definierter Signalstärke eingespeist, und die auszugebende Spannung gemessen wurde. Es ergab sich eine hohe Linearität bei Signalen auf der logarithmischen Skala zwischen -60 dBm und -20 dBm.

TEMPERATURMESSUNG AM HIMMEL

Kalibrierung

Während der Messung gibt der Detektor ständig neue Messwerte in Form von Spannungen aus. Nun besteht die Kunst darin, genau diesen Werten entsprechende Temperaturen zuzuordnen. Dies kann man durch Messen bestimmter Referenzquellen mit einer wohldefinierten Temperatur erzielen.

Leider bewies sich nach einigen Fehlversuchen der Kalibrierung, die einzig darauf basierten den LNB ohne Antenne zu vermessen, 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. Diese sind aber bei den genutzten Frequenzen nicht erhältlich. Daher suchten wir nach einer praktikablen Lösung für das Problem. Auch hier wurden wir durch Dinge des Alltags inspiriert. So kamen wir auf Wasser, wobei wir die Dipolnatur des Wassermoleküls ausnutzen.



Figur III.1: Kalibrierungskurve



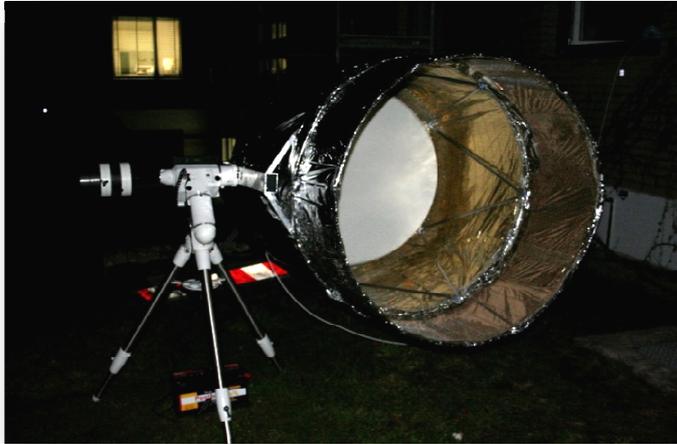
Figur III.2: „Calibration Tower“

Davon ausgehend bauten wir aus item®-Material einen 1,6 m hohen „Calibration Tower“, der den eigentlichen sandwichartigen Aufbau trug. Dieser bestand aus einer tragenden und im Radiobereich durchsichtigen Plexiglasplatte, bedeckt von zwei zusammengenähten Badezimmerteppichen, in die zwei Thermofühler eingebracht wurden. Die später mit Wasser getränkten Matten wurden mit Hilfe von drei Heizfolien gleichmäßig beheizt. Zum Abschluss wurden noch vier alten Holzplatten zur Wärmedämmung aufgelegt. Der Ablauf der Messung bestand darin, dass die vom Detektor ausgegebene Spannung parallel mit den Wassertemperaturen bestimmt und auf einem PC gespeichert wurden. Dieser Weg wurde gewählt, da er das Gesamtsystem mit berücksichtigt, wie z.B. auch das Eigenrauschen des LNBs.

Aus Gleichung (3) lässt sich ein linearer Temperaturzusammenhang vorhersagen, und unser Detektor logarithmiert diesen. Stellt man nun die gemessenen Spannungen über die Temperaturen dar (s. III.1), so erkennt man deutlich die logarithmische Ausgleichskurve, die für unseren Log-Detektor zu erwarten war.

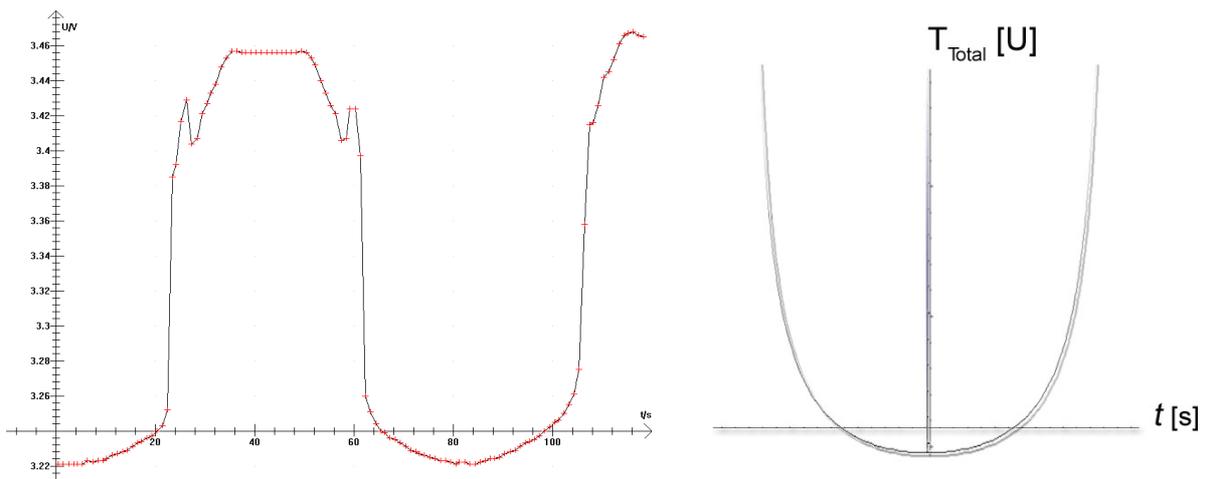
Messung am Nachthimmel

Nachdem wir nun den Messwerten feste Temperaturen zuordnen konnten, entschlossen wir uns, erste Messungen am Himmel zu wagen. Dazu brachten wir die Antenne samt Taukappe und Montierung auf die Wiese vor dem Schülerlabor des Hahn-Meitner-Institutes, was bereits schwierig war, da die Gesamtkonstruktion gerade so durch alle zu passierenden Türen passte.



Figur III.3: Radioteleskop auf seiner Montierung

Nach dem Aufsatteln auf die Montierung stellte sich ein weiteres Problem ein: Der Hebelarm war zu lang, so dass wir erst einmal unschöne Geräusche durch die Induktionsmotoren zu hören bekamen. Doch nachdem auch dieses Problem durch Gewichtsverlagerungen größtenteils gelöst worden war, konnten wir gespannt den ersten Himmelstreifen abfahren (Figur III.3).

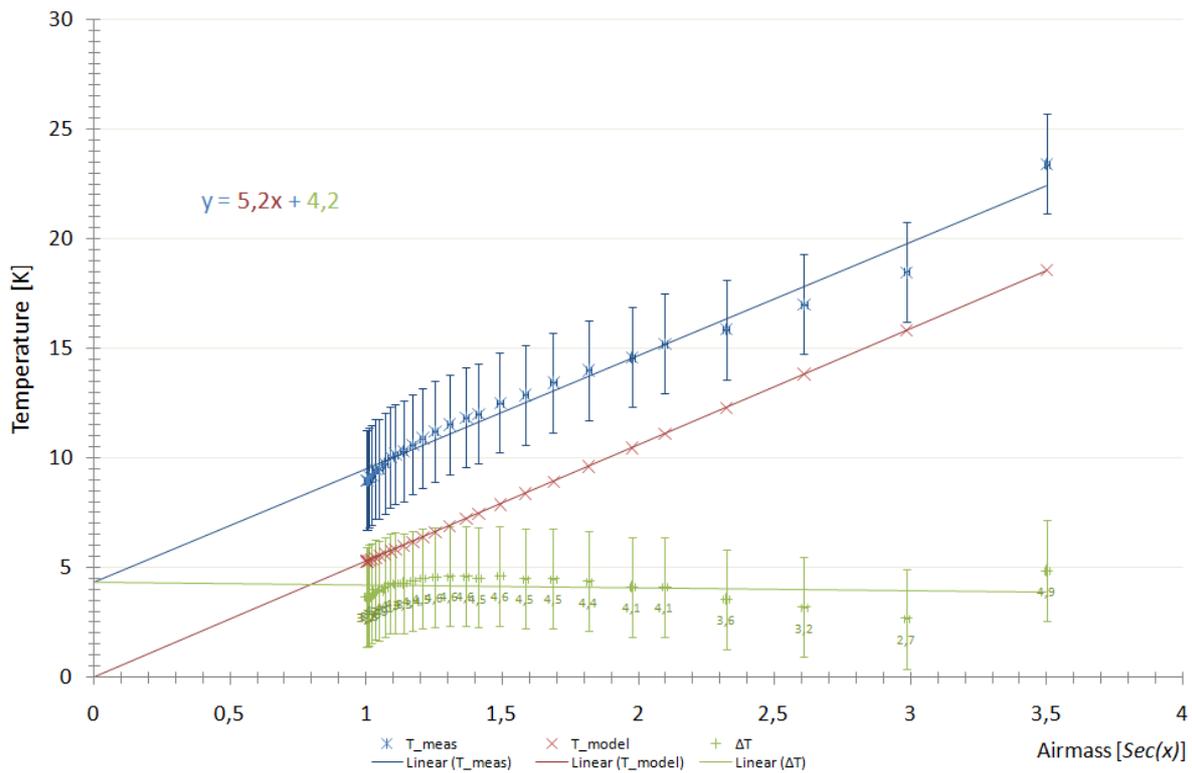


Figur III.4: First light – erste Messung am Himmel und theoretisch erwartende Kurve

Das Teleskop schwenkte mit einer Winkelgeschwindigkeit von etwa $2,8^\circ/\text{s}$ gleichmäßig über den Himmel und nahm jede Sekunde mit Hilfe des Detektors einen Spannungswert mit einer Genauigkeit von etwa 1 mV auf, der mit Hilfe eines Multimeters (Voltkraft VC820) über USB auf dem PC abgespeichert wurde. Die Kurve oben links zeigt die allererste Messung – das „first light“ – für BECOME. Links begannen wir im Zenit bis wir den Horizont erreichten; wir verharrten kurz in dieser Position, um dann einmal die ganze Halbkugel abzufahren. Erstaunlicherweise entsprach der Verlauf der Spannungs- bzw. Temperaturkurve fast genau dem zuvor mit Mathematica 6.0 berechneten Profil oben rechts.

Weitere Versuche – z.B. den Mond aufzunehmen oder auch eine entfernte Baumgruppe anzufahren – ergaben deutliche Ausschläge in unserer Messkurve. Das Gleiche geschah auch, wenn einer von uns beiden vor der Antenne vorbeiging. Jedoch schien das gemessene Signal keine Beeinträchtigung durch warme Körper – wie z.B. eines Menschen in Teleskopnähe – zu erhalten. Dies spricht für den hohen Wirkungsgrad der BECOME-Abschirmung.

Bestimmung der CMB-Temperatur



Figur III.5: Ergebnisgraph (blau: Messung; rot: Modellatmosphäre und grün: Reststrahlung)

Um mit den gemessenen Werten arbeiten zu können, müssen diese jedoch weiter verarbeitet werden. Auf unsere Rohdaten angewandt heißt dies konkret, dass die ursprünglichen Parameter – sprich die Zeit t [in s] und die Spannung U [in V] (ausgehend vom Minimalwert des Kurvenverlaufes (vgl. Figur III.4)) – in reale Winkel an der Himmelskugel umgerechnet werden. Weiterhin werden mit Hilfe der Kalibrierungskurve (s. Figur III.1) die Spannungen in Temperaturwerte T_A umgewandelt.

Bei den Messungen entlang des Himmels wurden die Antennentemperaturen T_A ermittelt. Nun unterteilt sich T_A im Wesentlichen in zwei Hauptsummanden (s. Gleichung (4)):

$$T_A = T_{Atm}(\theta) + T_{CMB} + T_{Rest} \tag{4}$$

T_{Atm} ist die Atmosphärentemperatur, welche proportional zum Sekant des Zenitwinkels θ verläuft:

$$T_{atm} \propto T_{atm_0} \cdot \sec \theta \tag{5}$$

Um die Grundatmosphärentemperatur T_{atm_0} zu bestimmen, kann man sich den oben beschriebenen Zusammenhang (5) zu Nutze machen und die aus dem Messgraphen (III.5) folgende Steigung der Ausgleichsgeraden bestimmen. Diese ist zugleich die gesuchte Größe T_{atm_0} bei etwa 10 GHz. Dabei ergibt sich:

$$T_{atm_0} = 5,2K \tag{6}$$

Dieser Wert deckt sich sehr gut mit den in der Literatur zu findenden Temperaturen. Außerdem ist die Antennentemperatur T_A nach der Urknalltheorie mit einem konstanten, isotropen Teil untersetzt, nämlich der kosmischen Hintergrundstrahlung, welche die Temperatur T_{CMB} hat.

$$T_{CMB \text{ Literatur}} = const. \approx 2,7K \tag{7}$$

Von weiteren Störquellen T_{Rest} nehmen wir an, dass BECOME diese sehr effektiv abschirmt und somit deren Werte für eine grobe Schätzung zu vernachlässigen sind. Dieses gilt auch für weitere sehr schwache radioastronomische Quellen.

Dabei ist zu erkennen, dass nach der Interpolation unser Ergebnis für $T_{\text{CMB BECOME}}$ einen Wert zwischen 3,6 K und 4,5 K ergibt. Betrachtet man nun Werte nahe dem Zenit, so ergibt sich durchweg eine Temperatur von etwa 3,8 K. Dieses entspricht auch unserer Erwartung, da in diesem Bereich das Modell für die Atmosphärentemperatur am besten passt.

$$T_{\text{CMB BECOME}} \approx 3,8 \text{ K} \quad (8)$$

Fehlereinschätzung

Doch nun wollen wir uns auf eine Fehlerbetrachtung unserer Messung einlassen, um die Genauigkeit unserer Ergebnisse besser einschätzen zu können. Diese Betrachtung gliedert sich grundsätzlich in zwei Fehlerquellen; nämlich die Kalibrierungs- und die Messfehler.

Zur Kalibrierung ist zu sagen, dass der Temperaturgradient über der beheizten Fläche maximal 2 K betrug. Dieses wurde mit Hilfe von Infrarotthermometern während der Kalibrierung bestimmt.

In Anbetracht von nur geringen Messfehlern im 1 mV-Bereich kommt es zu einer maximalen Temperaturänderung von etwa 0,3 K. Dieser Fehler minimiert sich jedoch erheblich, da die Messwerte für jede Sekunde gemittelt werden. Weiterhin kann man den Fehler durch die Nebenkeulen der Antenne (side-loops) auf etwa 0,5 K und die Messungenauigkeit durch das sogenannte spill-over – das über die Schüssel hinwegsehen des LNBs – auf 0,3 K abschätzen.

Da es sich um unabhängige Fehlerquellen handelt, müssen diese geometrisch gemittelt werden.

Fehlerquelle	Geschätzter Fehler
Messfehler	0,3 K
Side-loops	0,5 K
Spill-over	0,3 K
Kalibrierungsfehler	2 K
Gesamt	$\sqrt{(0,3 \text{ K})^2 + (0,5 \text{ K})^2 + (0,3 \text{ K})^2 + (2 \text{ K})^2}$ <u>≅ 2,1 K</u>

Somit ergibt sich eine Unsicherheit von etwa $\pm 2,1 \text{ K}$ für $T_{\text{CMB BECOME}}$, welche kleiner ist als der in der Literatur angegebene Wert für die CMB-Temperatur von etwa 2,7 K und den von uns bestimmten Werten zwischen 3,6 K und 4,5 K.

Fazit

Zu Beginn des Projektes waren wir noch sehr skeptisch, ob es wirklich möglich sei, mit einfachem Equipment und auf „low-budget“-Basis wirklich die kosmische Hintergrundstrahlung zu detektieren. Doch im Verlauf der Planung und nach ausgiebigen Rechnungen wurde BECOME immer realistischer und umsetzbarer.

Weiterhin ist es uns nun möglich, die Strahlung direkt zu isolieren, somit übertrifft der jetzige Stand unsere Erwartungen um ein Vielfaches. Ferner ist es uns gelungen, mit BECOME radioastronomische Objekte präzise zu erfassen.

Es ist uns also gelungen, mit Hilfe unseres selbstkonstruierten Versuchsaufbaus und den dahinterstehenden Überlegungen, die Frage nach der Messbarkeit der durch den Urknall verursachten kosmischen Hintergrundstrahlung positiv zu beantworten!

Damit erfüllt unsere Konstruktion alle Kriterien eines vollwertigen, funktionsfähigen und präzisen Radioteleskopes. Unsere zuvor theoretisch entwickelten Modelle der Messkurven stimmen mit den realen Messwerten des praktischen Versuchs überein. Auch wenn das gesamte Projekt sehr zeitaufwendig und anstrengend war, so haben wir durch die vielen zu lösenden Probleme eine Menge gelernt.

Nach der Konstruktion und Umsetzung von BECOME haben wir unser im Vergleich zu anderen Missionen relativ einfaches Verfahren auch für Schulen und Universitäten optimiert und als kostengünstige Unterrichtseinheit vorbereitet.

Ausblick

Momentan ist BECOME *mobile* im Entstehen, eine kleinere Schwesterversion unseres Projektes. Diese ist für uns der nächste logische Entwicklungsschritt, da wir allen interessierten Schulen und Universitäten einen kompakten Versuchsaufbau zur Verfügung stellen möchten.

Ergänzend dazu haben wir ein Webportal zu BECOME ins Leben gerufen, wo sich Interessierte und Fachleute austauschen und informieren können.

<http://www.astrosceince-berlin.org>

Weiterhin wollen wir noch Messungen durchführen, um mehr über die CMB zu erfahren und die Ergebnisse zu verfeinern.

Danksagung

Wir möchten uns an dieser Stelle herzlich bedanken:

Zunächst danken wir besonders unserer Betreuerin Frau Dr. Martina von Lucke-Petsch vom Schülerlabor des Hahn-Meitner-Instituts Berlin für ihre Hilfe. Weiterhin möchten wir Herrn Dr. Sven Bönisch (HMI) für die Bereitstellung der Messapparaturen für die Vermessung des Detektors danken.

Ein besonderer Dank geht auch an das Ferdinand-Braun-Institut für Höchstfrequenzforschung, in deren Laboratorien wir unseren Detektor bauen und optimieren konnten. Hier sind vor allem Silvio Kühn und Herr Dr. Heymann zu erwähnen, von denen wir vieles über ihre Forschungsgebiete gelernt haben.

Der Teleskopmanufaktur Berlin und im Besonderen Roland Lederer möchten wir für das Bereitstellen der Geräte für den Bau des Teleskopes danken.

Im Laufe unseres Projektes kam es zu einem sehr intensiven Austausch mit richtungsweisenden Experten auf diesem Gebiet.

Für das fachliche Feedback und die positive Bewertung unseres Projektes und seiner Ergebnisse möchten wir uns bei Herrn Dr. Wayne Hu von der University of Chicago und auch bei Herrn Prof. David Spergel

von der Princeton University bedanken. Ein außerordentlicher Dank geht auch an Herrn Prof. John Mather vom Goddard Space Flight Center (NASA) für seine Hilfe und den regen e-Mail-Verkehr.

Auch Dr. Alex Kraus vom Max-Planck-Institut für Radioastronomie und dem Radioobservatorium Effelsberg möchten wir für den Erfahrungsaustausch danken.

Zuletzt möchten wir uns bei unserem langjährigen Mentor Herrn Dr. Wolfgang Hasse von der Wilhelm-Foerster-Sternwarte für seine Anregungen und seine Aufmunterungen in turbulenten Zeiten herzlich bedanken.

Last but not least sind unsere beiden Familien zu erwähnen, die uns zu jedem Zeitpunkt unterstützt haben und uns auch in der aufreibenden Zeit des Endspurts geholfen haben, einen klaren Kopf zu bewahren.

An Hand der Danksagung ist bereits zu erkennen, dass dieses Projekt viele neue Wege beschreitet. Wir haben von den oben stehenden Personen vieles gelernt und möchten uns nochmals bei allen herzlich bedanken.

LITERATURVERZEICHNIS

Artikel

[A01] A.A. Penzias u. R.W. Wilson, "A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s", *Astrophysical Journal* **142**,419-421 (1965).

[A02] 419. R. H. Dicke, P. J. E. Peebles, P. G. Roll and D. T. Wilkinson, "Cosmic Black-Body Radiation," *Astrophysical Journal* **142** (1965), 414.

[A03] Wayne Hu and Martin White, "Acoustic Signatures in the Cosmic Microwave Background." *Astrophysical Journal*, **471**, 30.

Bücher

[B01] Schutz, Bernard (2003): "*Gravity from the ground up*" (Cambridge: Cambridge University Press).

Webseiten

[W01] http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1978/ [20.02.2008,18:53].

[W02] http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2006/ [20.02.2008,18:53].

[W03] http://www.analog.com/en/prod/0,,759_847_AD8313,00.html [20.02.2008,18:53].

[W04] <http://www.cadsoft.de/>[20.02.2008,18:50].

[W02] [http://www.rssd.esa.int/SA/PLANCK/docs/Bluebook-ESA-SCI\(2005\)1_V2.pdf](http://www.rssd.esa.int/SA/PLANCK/docs/Bluebook-ESA-SCI(2005)1_V2.pdf)
[20.02.2008,18:50].

[W03] <http://lambda.gsfc.nasa.gov/> [20.02.2008,18:53].

[W04] http://en.wikipedia.org/wiki/Cosmic_microwave_background_radiation [20.02.2008,18:53].

[W05] <http://aether.lbl.gov/> [20.02.2008,18:53].

[W06] <http://background.uchicago.edu/~whu/> [20.02.2008, 18:45].

ANHANG

Verwendete Konstanten

	Name	Wert	Einheit
ν	Frequenz	-	Hz [s ⁻¹]
α	Proportionalitätsfaktor	2.821439	-
T	Temperatur	-	K
h	Plancksches Wirkungsquantum	$6.62606896 \times 10^{-34}$	W · s ⁻²
c	Lichtgeschwindigkeit	299 792 458	m · s ⁻¹
k	Boltzmannkonstante	1.386504×10^{-23}	J · K ⁻¹
T_0	Referenztemperatur	290 -174	K dBm/Hz
T_A	Antennentemperatur	-	K
T_I	Instrumententemperatur	-	K
B	Bandbreite	$B = \nu_2 - \nu_1$	Hz
NF	Rauschmaß (noise figure)	-	dB
F	Rauschzahl	$F = 10^{(NF/10)}$	-
G	Verstärkung (Gain)	-	dB
θ	Zenithwinkel	-	°

Detektorplanung

