

**Aufbau und Inbetriebnahme eines Radioteleskops
zur Verwendung im Projektpraktikum
des Physik-Studiengangs**

Schriftliche Hausarbeit im Rahmen der Ersten Staatsprüfung für das
Lehramt für die Sekundarstufe I und II dem Staatlichen Prüfungsamt für
Erste Staatsprüfungen für Lehrämter an Schulen Essen vorgelegt von:

Jörn Sonntag, Wuppertal im April 2006

Themensteller:

Prof. Dr. Karl-Heinz Kampert,
Arbeitsgruppe Astroteilchenphysik, Seminar Physik,
Fachbereich C, Universität Wuppertal

Inhaltsverzeichnis:

| | |
|---|-----------|
| 1. Einleitung..... | 3 |
| 2. Grundlagen..... | 5 |
| 2.1 Geschichte der Radioastronomie..... | 5 |
| 2.2 Aktuelle Radioteleskope | 8 |
| 2.3 Radiofenster..... | 11 |
| 2.4 Entstehung von Radiostrahlung..... | 13 |
| 2.4.1 Schwarzkörperstrahlung | 13 |
| 2.4.2 Bremsstrahlung..... | 15 |
| 2.4.3 Synchrotronstrahlung | 16 |
| 2.4.4 Charakteristische Linienstrahlung..... | 17 |
| 2.4.4.1 21 cm-Linie des neutralen Wasserstoffs | 18 |
| 2.5 Dopplereffekt..... | 19 |
| 2.5.1 Rotationsgeschwindigkeit der Milchstrasse..... | 20 |
| 2.5.1.1 Tangentialpunktmethode..... | 22 |
| 2.6 Koordinatensysteme | 23 |
| 2.6.1 Horizontsystem..... | 24 |
| 2.6.2 Äquatorialsysteme..... | 25 |
| 2.6.2.1 Festes Äquatorialsystem..... | 25 |
| 2.6.2.2 Bewegliches Äquatorialsystem..... | 26 |
| 2.6.3 Galaktisches Koordinatensystem..... | 27 |
| 2.6.4 Ekliptikalsystem | 28 |
| 2.7 Eigenschaften von Antennen..... | 29 |
| 2.7.1 Auflösungsvermögen..... | 29 |
| 2.7.2 Halbwellendipol..... | 31 |
| 3. Das Wuppertaler Radioteleskop..... | 32 |
| 3.1 Mechanischer Aufbau..... | 34 |
| 3.2 Auswertelektronik und -software..... | 35 |
| 3.3 Aufnahme des Projektes..... | 39 |
| 3.3.1 Verbesserungen am Radioteleskop..... | 40 |
| 3.3.2 Vorbereitende Messungen..... | 40 |
| 3.4 Verwendete Computerprogramme | 43 |
| 3.5 Messungen mit dem Radioteleskop..... | 46 |
| 3.5.1 Sonnenmessungen | 46 |
| 3.5.2 Störquellen Messung – Erstellung einer Himmelskarte | 48 |
| 3.5.3 Messung von Radioquellen | 49 |
| 3.5.4 Messung der Milchstrasse | 51 |
| 3.6 Fehlerquellensuche..... | 52 |

| | |
|--|-----------|
| 3.6.1 Überprüfung des Empfangs..... | 52 |
| 3.6.2 Gittermessung..... | 56 |
| 3.6.3 Position des Radioteleskops..... | 57 |
| 3.6.2.1 Positionsverschiebung..... | 57 |
| 3.6.2.2 Überprüfung der Elevationeinstellung..... | 58 |
| 3.6.2.3 Überprüfung der Azimutheinstellung | 60 |
| 3.7 Schlussmessungen und -analysen..... | 61 |
| 4. Einsatz im Praktikum der Physikstudenten..... | 65 |
| 4.1 Projektpraktikum | 67 |
| 4.1.1 Versuchsanleitung A zum Projekt Radioteleskop..... | 68 |
| 4.1.2 Versuchsanleitung B zum Projekt Radioteleskop..... | 70 |
| 5. Fazit..... | 73 |
| 6. Literaturverzeichnis nach Kapiteln..... | 76 |
| 7. Formelliteratur..... | 80 |
| 8. Abbildungsverzeichnis..... | 80 |
| 9. Anhang..... | 83 |

1. Einleitung

Fast täglich kann man verschiedenen Medien entnehmen, dass die Astronomie auf viele Menschen, ob jung oder alt, ob Frau oder Mann, eine große Faszination ausübt. Aktuell (29.03.2006) gibt es spezielle Angebote zu einem „Sonnenfinsternis-Trip“. Reiseveranstalter bieten Pauschalreisen in die Türkei an, um dort das große Himmelsereignis, die erste totale Sonnenfinsternis nach 1999, erleben zu können. Die Beobachtung mit

einem Fernrohr ist für viele Menschen schon fast eine "sinnliche" Erfahrung. Die Beobachtung mittels Radioteleskop ist da schon weniger bekannt. Als Sportstudent konnte ich erfahren, dass einigen Mitarbeitern der Sportfakultät der „komische Bunker“ - das Wuppertaler Radioteleskop befindet sich unmittelbar neben dem Container des Fachbereichs Sportwissenschaften in einem Silo - völlig unbekannt ist. So wurde ich gefragt, was ich ständig im „Bunker“ mache. Meine Antwort, die im Weltall auftretende Strahlung zu nutzen, um unter anderem die Sonne zu „beobachten“, gab großen Erklärungsbedarf.

Die vorliegende Examensarbeit beschäftigt sich mit dem Wuppertaler Radioteleskop als experimenteller Aufbau zur Erforschung des Radiohimmels. Die Beobachtung im Radiofrequenzbereich um 1420 MHz soll dazu dienen, den Physikstudenten der Wuppertaler Universität im Rahmen des Projektpraktikums die Möglichkeit zu geben, bekannte Phänomene im Weltraum zu studieren und zu reproduzieren. Die Aufgabe meines Kommilitonen, Robert Bellin, und mir sollte es sein, das Wuppertaler Radioteleskop funktionsfähig zu machen, um somit einen reibungslosen Einsatz im Projektpraktikum zu gewährleisten. Als ein Teil dieser gemeinschaftlichen Arbeit an dem Radioteleskop ist es speziell meine Aufgabe, das Radioteleskop experimentell und didaktisch sinnvoll in das Projektpraktikum zu integrieren.

Die vorliegende Arbeit beginnt mit einem geschichtlichen Überblick der wichtigsten radioastronomischen Entwicklungen des 20. Jahrhunderts und der Vorstellung einiger der bekanntesten, aktuellen Radioteleskope der Welt. Danach werden grundlegende physikalische Phänomene erläutert, die für die astronomische Beobachtung mit einem Radioteleskop wichtig sind. So wird zunächst das Radiospektrum als ein Teil des elektromagnetischen Spektrums eingeordnet. Im Anschluss daran werden die verschiedenen Entstehungsmöglichkeiten der Radiostrahlung im Weltraum und deren charakteristische Eigenschaften beschrieben. Besonders der physikalische Dopplereffekt hat in der astronomischen Beobachtung einen hohen Stellenwert und wird entsprechend dargestellt. Bei der Beobachtung astronomischer Objekte ist eine genaue Positionsangabe unabdingbar, so dass es sinnvoll ist, die wichtigsten Koordinatensysteme zu beschreiben und deren Bedeutung bzw. Einsatzschwerpunkt darzulegen. Ebenso ist das Auflösungsvermögen ein wichtiger Aspekt zum Ver-

ständnis der Funktionsweise eines Radioteleskops. Das Wuppertaler Radioteleskop nutzt als Empfangsantenne einen Halbwellendipol im Brennstrahl des sphärischen Radiospiegels. Die physikalischen Grundlagen eines solchen Halbwellendipols bilden den Abschluss der Grundlagen dieser Examensarbeit.

Nach der theoretischen Betrachtung folgt der experimentelle Teil der Examensarbeit. Als Einleitung erfolgt zunächst ein kurzer Überblick der Entstehungsgeschichte des Wuppertaler Radioteleskops. Weiter geht es mit der Beschreibung des mechanischen Aufbaus und der Funktion der Auswertelektronik des Radioteleskops. Anschließend wird genau beschrieben, wie Robert Bellin und ich das Radioteleskop auf dessen Funktionsfähigkeit überprüft und angemessene Veränderungen vorgenommen haben. Danach werde ich unsere durchgeführten Messungen mit dem Radioteleskop ausreichend dokumentieren und als möglichen Einsatz im Projektpraktikum der Physikstudenten reflektieren. Der Schluss meiner Examensarbeit beinhaltet konkrete Vorschläge, die dazu beitragen sollen, das Radioteleskop Wuppertal als sinnvolles Experiment des Projektpraktikums im Physikstudium zu integrieren.

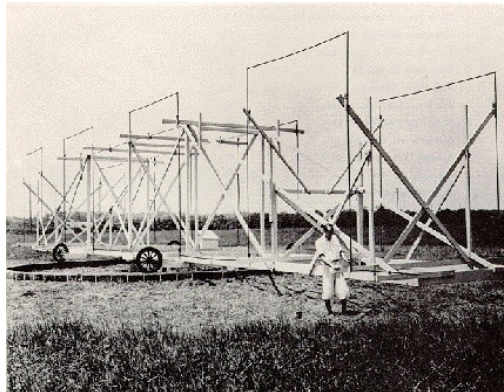
2. Grundlagen

2.1 Geschichte der Radioastronomie

Um sich einen Überblick über die Geschichte bzw. die Entwicklung der Radioastronomie zu verschaffen, muss man seinen Blick auf das Jahr 1894 richten. Zu diesem Zeitpunkt, sechs Jahre nach der erstmaligen Erzeugung von Radiowellen im Laboratorium durch Heinrich Hertz, sprach Sir Oliver Lodge seine Ansicht aus, das Spektrum der Sonne würde sich nicht nur auf den sichtbaren Bereich beschränken. Er gab vor der britischen königlichen Gesellschaft seine Hoffnung kund, „die von der Sonne kommende langwellige Strahlung durch Ausfiltern der gewöhnlichen be-

kannten Wellen mit einer Wandtafel oder einem anderen hinreichend undurchlässigen Körper abscheiden zu können“ [Hey, S. 9]. Allerdings kam bei seinen Forschungen in Liverpool nichts heraus, wofür er als Ursachen sowohl irdische Störquellen in einer Großstadt wie Liverpool als auch seine unzureichend empfindliche Messanordnung vermutete. Letzterer Grund führte auch in den folgenden vierzig Jahren dazu, dass keine astronomischen Beobachtungen im Bereich der Radiowellen gemacht wurden.

Erst 1931 entdeckte der Radioingenieur Karl Jansky erstmals Radio-



strahlung aus dem Universum.

Dies geschah allerdings eher zufällig, während er für die Bell Telephone Laboratorien die Einfallsrichtung atmosphärischer Störungen mit einer eigens konstruierten Antenne untersuchte (Abb. 2.1), die ihm ermöglichte, Frequenzen im Bereich von 15 MHz bis 30 MHz (dies entspricht einer Wellenlänge von 15 m) zu messen.

Abb. 2.1 Karl Jansky vor seiner Antenne bei den „Bell Laboratories“.

Jansky hatte bis 1933 drei Ursachen gefunden, aus denen das empfangene Radorauschen resultierte, nämlich nahes Gewitter, die vereinte Strahlung entfernter Gewitter und eine außerirdische Quelle in der Umgebung des Zentrums der Milchstrasse. Die zuletzt genannte Quelle lokalisierte er später als einen ausgedehnten Ort, der sich über die ganze Milchstrasse

erstreckt und dessen größte Stärke aus Richtung des galaktischen Zentrums kommt. Seine Anregungen, weitere Untersuchungen im Meterwellenlängenbereich mit parabolischen Spiegeln zu unternehmen, fanden damals keine Resonanz.

1937 entschied sich Grote Reber, ebenfalls ein Radioingenieur, Janskys Arbeit weiter zu führen und baute aus eigenen Mitteln einen parabolischen Reflektor mit einem Durchmesser von 9,5 m (Abb. 2.2). Er begann seine

Messungen im Bereich von kürzeren Wellenlängen, weil er sich dort eine höhere Auflösung versprach. Nachdem seine Untersuchungen bei den Wellenlängen 9 cm und 33 cm fehlgeschlagen waren, konnte er seinen ersten Erfolg bei einer Wellenlänge von 1,9 m verzeichnen. Diese nutzte Reber für die Erstellung der ersten Radiokarte der Milchstrasse.

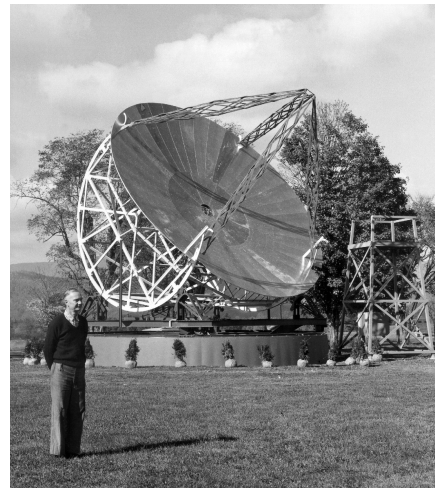


Abb. 2.2 Grote Reber vor seinem Radioteleskop im eigenen Garten.

Radiostrahlung von der Sonne wurde zum ersten Mal 1942 von J.S. Hey gemessen, der in einer Forschungsgruppe der britischen Armee arbeitete. Unter anderem bestand seine Arbeit darin, alle Fälle von Störungen bei den Radargeräten der Armee zu untersuchen. Dabei hatten Berichte von vielen Stationen, die an Wellenlängen von 4 m bis 8 m arbeiteten, Hey zu der Erkenntnis verholfen, dass die Sonne eine starke Radioemission ausstrahlt und diese mit einem großen Sonnenfleck auf der Sonne verbunden ist. Im selben Jahr machte G.C. Southworth die erste erfolgreiche Entdeckung der normalen solaren Radioemission (thermische Strahlung) im Zentimeterwellenlängenbereich.

1945 konnten Hey und seine Kollegen S.J. Parsons und J.W. Phillips die erste diskrete kosmische Radioquelle Cygnus A nachweisen. In den nächsten zehn Jahren wurden weitere diskrete Quellen entdeckt, unter anderem Galaxien und Supernovae. Die nächste entscheidende Entdeckung wurde 1951 durch H.I. Ewen und E.M. Purcell gemacht. Sie maßen die Emissionslinie des neutralen Wasserstoffes, die in das Radiospektrum fällt. Dadurch war es zum ersten Mal für die Astronomen möglich, die Form unserer eigenen Galaxie zu ergründen (ca. 90% der interstellaren Materie besteht aus Wasserstoff).

Ein weiterer Meilenstein in der Astronomie wurde 1963 gelegt, als Penzias und Wilson die kosmische Hintergrundstrahlung entdeckten und somit den stärksten Beweis für den Urknall lieferten. Dafür bekamen sie 1978 den Nobelpreis in Physik.

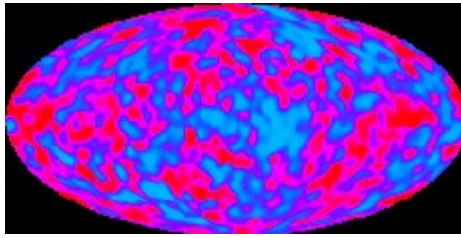


Abb. 2.3 Aufzeichnung der Verteilung der kosmischen Mikrowellenhintergrundstrahlung.



Abb. 2.4 Mikrowellen-Antenne von Penzias und Wilson.

In den späten 60er Jahren wurden schließlich auch die von den Theoretikern vorhergesagten Radiopulsare entdeckt. 1974 folgte dafür der Nobelpreis für die Physiker Hewish und Ryle.

2.2 Aktuelle Radioteleskope

Dieses Kapitel dient der Vorstellung einiger bekannter Radioteleskope auf der ganzen Welt, die momentan für radioastronomische Zwecke genutzt werden.

In Effelsberg in der Eifel steht das zurzeit größte schwenkbare Radioteleskop Europas (Abb. 2.5). Es besitzt einen Parabolspiegel mit einem Durchmesser von 100 m und wird von dem Bonner Max-Planck-Institut für Radioastronomie betrieben. Das Teleskop kann im Wellenlängenbereich von ca. 70 cm bis 3,5 mm messen.



Abb. 2.5 Das Effelsberger Radioteleskop hat einen Durchmesser von 100m.



Das weltweit größte bewegliche Radioteleskop befindet sich in Green Bank, West Virginia (Abb. 2.6). Mit seiner 100 m x 110 m asymmetrischen Parabolschüssel (effektiv 102 m) ist es nur unwesentlich größer als das des Bonner Max-Planck-Instituts. Anders als bei anderen Teleskopen besitzt das Green Bank Teleskop nur einen Arm zur Halterung der Antenne im Brennpunkt. Störende Einflüsse werden durch diese spezielle Trägerkonstruktion verringert.

Abb. 2.6 Das größte bewegliche Radioteleskop der Welt bei Green Bank, West Virginia.

Das wohl populärste und größte feststehende Teleskop auf der Welt ist der sphärische 305 m Spiegel in einer Bergmulde in Arecibo auf Puerto Rico (Abb. 2.7). Seinen hohen Bekanntheitsgrad, auch unter den nicht Astronomie Interessierten, bekam es durch den James Bond Film „Golden Eye“, in dem es Schauplatz des actionreichen Finales war. Trotz der festen Position im Boden, ist eine effektive Richtungsänderung in begrenztem

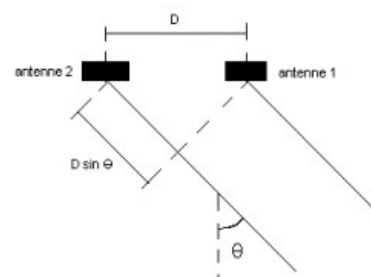
Umfang möglich, indem die Phasen der einfallenden Wellen durch Schwenken der Speiseantenne variiert werden.



Am 16. November 1974 wurde zum ersten Mal eine Botschaft von der Erde an mögliche Außerirdische in Form eines Radiowellen-signals von dem Arecibo Teleskop gesendet. Die Botschaft beinhaltete Informationen über den Menschen in mathematischer Sprache.

Abb. 2.7 Das Arecibo Radioteleskop. Der sphärische Reflektor im Boden ist nicht beweglich. Zur Richtungsänderung wird die an Drahtseilen hängende Speiseantenne geschwenkt.

In Socorro, New Mexico, befinden sich 27 identische bewegliche Parabolantennen mit einem Durchmesser von je 25 m, die in einer Y-Form angeordnet sind (Abb. 2.8). Das Very Large Array (VLA) arbeitet nach dem Prinzip der Interferometrie. Die Teleskope werden phasengerecht zusammengeführt und dann weiter verstärkt (Abb. 2.9). Im Zentimeterwellenbereich ist das VLA das momentan empfindlichste Radiointerferometer. Es arbeitet im Bereich von 0,7 cm bis 400 cm, die beste erzielbare Winkelauflösung¹ liegt bei 0,5 Bogensekunden. Im Gegensatz zur optischen Interferometrie ist es in der Radioastronomie möglich, die einfallenden Wellen über mehrere Kilometer durch Kabel und bis zu einigen 10km über eine Richtfunkstrecke zu übertragen.



¹ Erklärung in Kapitel 2.7.1

Abb. 2.8 Das Very-Large-Array (VLA) in Socorro, New Mexiko. 27 identische Parabolantennen mit einem Durchmesser von 25 m sind in Y-Form angeordnet

Abb. 2.9 Geometrie eines Interferometers aus zwei Antennen. Der Gangunterschied der einfallenden Strahlen wird im Verstärker berücksichtigt.

Um noch höhere Auflösungen zu erzielen, entwickelte man die „Very-Long-Baseline-Interferometry“ (VLBI). Dabei beobachten mehrere über die ganze Welt verteilte Radioteleskope ein gemeinsames astronomisches Objekt (Abb. 2.10). Aufgrund der großen Abstände ist es nicht möglich, die Antennen phasengerecht zum gleichen Zeitpunkt miteinander zu verbinden. Unabhängig voneinander registrieren sie auf genau derselben Frequenz die Strahlung derselben Radioquelle als Funktion der Zeit. Nachträglich werden die digital auf Videoband aufgenommenen Signale in einem Computer (Korrelator) zur Interferenz gebracht. Diese weltweite Verbundschaltung macht es möglich, eine Winkelauflösung mit bis zu 0,0001 Bogensekunden zu erzielen.

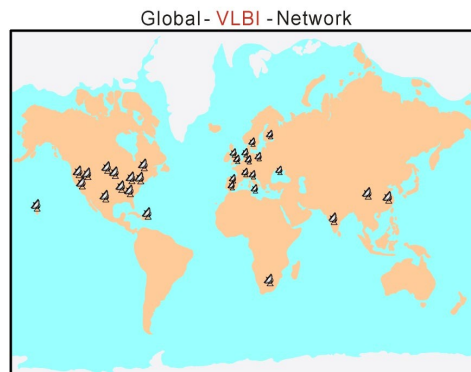


Abb. 2.10 Das Very-Long-Baseline-Interferometry (VLBI) ist ein Verbund von Radioteleskopen, die über die ganze Welt verteilt sind. Durch gleichzeitiges Beobachten einer ausgewählten Radioquelle werden Winkelauflösungen mit bis zu 0,0001 Bogensekunden erreicht.

2.3 Radiofenster

Die in Kapitel 2.2 beschriebenen Radioteleskope haben eines gemeinsam, sie untersuchen elektromagnetische Signale im Radiowellenlängenbereich aus dem Weltraum. Abbildung 2.11 zeigt das komplette elektromagnetische Spektrum, das von der kurzwelligen Gammastrahlung über die

Röntgenstrahlung, Ultraviolettstrahlung, den optischen Bereich, die Infrarotstrahlung bis hin zur langwelligeren Radiostrahlung geht.

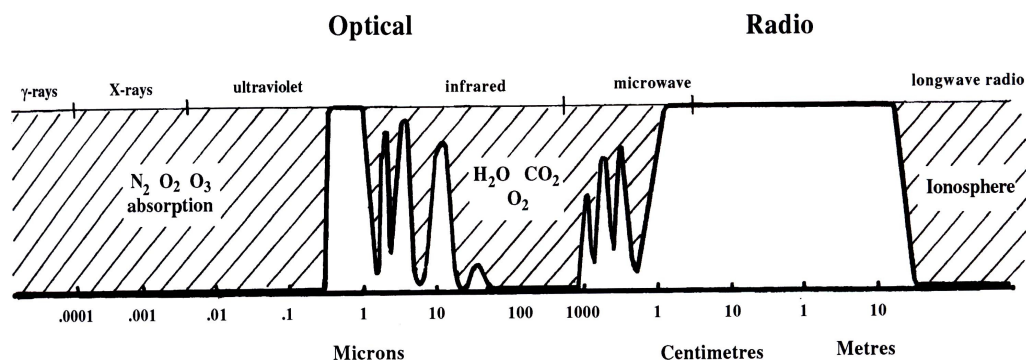


Abb. 2.11 Das elektromagnetische Spektrum. Der Radiobereich wird bei Wellenlängen ab ca. 12 m von der Ionosphäre und bei Wellenlängen unter ca. 5 cm von der Atmosphäre absorbiert.

Zusätzlich ist über alle Wellenlängen der Energiefluss der Strahlung, die die Erdoberfläche aus dem Weltraum erreicht, grafisch dargestellt. Nur ein Teil des elektromagnetischen Spektrums passiert die Erdatmosphäre ungehindert. Der Bereich links neben dem optischen Bereich, also der kleineren Wellenlängen, wird vollständig absorbiert. Dabei erfährt die Ultraviolettstrahlung eine Absorption durch die Ozonschicht, und die noch kürzeren Wellenlängen werden durch Sauerstoff und Stickstoff absorbiert. Auch Teile der Infrarotstrahlung können aufgrund von Absorptionen durch Kohlendioxid, Wasser und Sauerstoff nicht an der Erdoberfläche beobachtet werden.

Bei Betrachtung des Radiowellenzahlbereiches wird verständlich, warum der Observation von Radiostrahlung aus dem Weltraum viel Aufmerksamkeit geschenkt wird. Bis auf Radiowellen unter 0,5 cm Wellenlänge, die von der Atmosphäre absorbiert werden, und Radiowellen ab ungefähr

12 m Wellenlänge, die von der Ionosphäre absorbiert werden, gelangt der große Bereich des „Radiofensters“ zwischen diesen Grenzwellenlängen ungehindert an die Erdoberfläche. Gelegentliche Einflüsse durch das Wetter (z.B. Schnee) in der Troposphäre werden dabei vernachlässigt.

Die Entstehung der Radiostrahlung im Weltraum wird in Kapitel 2.4 näher erläutert.

2.4 Entstehung von Radiostrahlung

Die Entstehung von Radiostrahlung im Weltraum kann verschiedene Ursachen haben, die sowohl auf thermische als auch auf nicht thermische Einflüsse zurück zu führen sind. Das empfangene Emissionsspektrum gibt dabei eindeutige Hinweise auf die Entstehungsvorgänge. In diesem Kapitel werden die bekanntesten Vorgänge bei der Emission von Radiostrahlung vorgestellt.

2.4.1 Schwarzkörperstrahlung

Führen temperaturbedingte atomare Schwingungen zu Ladungsbewegungen, so werden die dabei emittierten Wellen als thermische Strahlung bezeichnet. Somit geben alle Körper infolge ihrer Temperatur elektromagnetische Strahlung ab.

Eine Strahlungsquelle kann näherungsweise als schwarzer Körper² betrachtet werden. Die *Kirchhoff-Planck-Funktion* liefert zur physikalischen Erfassung des schwarzen Körpers einen Zusammenhang zwischen der Temperatur T und der Frequenz ν . Es gilt:

$$B_{\nu}(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad (2.1)$$

bzw.

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/k\lambda T} - 1} \quad (2.2)$$

[KOS, S.112]

wobei $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$ die Boltzmann-Konstante, $c = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$ die Lichtgeschwindigkeit und $h = 6,6261 \cdot 10^{-34} \text{ m}^2\text{kg s}^{-2}$ das Plancksche Wirkungsquantum ist. Durch zwei gültige Grenzfälle kann die Funktion allerdings vereinfacht werden:

² Ein idealisierter hypothetischer Körper, der auf ihn treffende elektromagnetische Strahlung bei jeder Wellenlänge vollständig absorbiert.

Wien'sches Gesetz³ ($\frac{h\nu}{kT} \gg 1$):

$$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} e^{-h\nu/kT} \quad (2.3)$$

Rayleigh-Jeans-Gesetz⁴ ($\frac{h\nu}{kT} \ll 1$):

$$B_\nu(T) = \frac{2\nu^2 kT}{c^2} \quad (2.4)$$

[KOS, S.112]

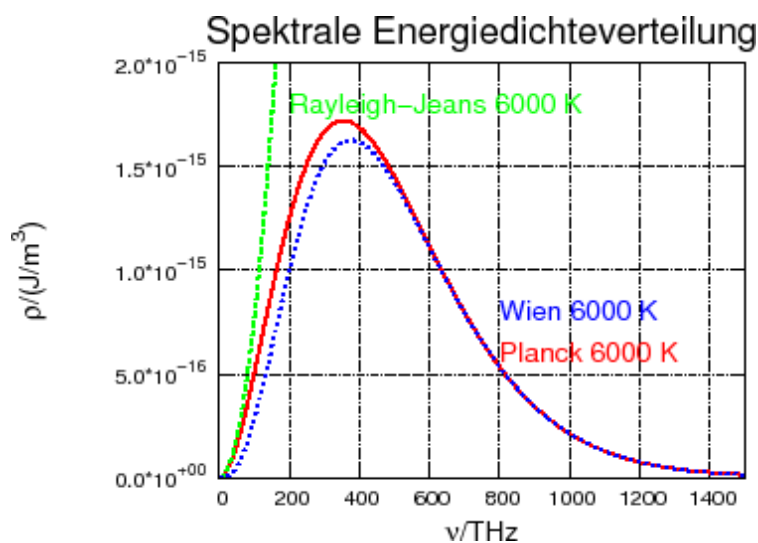


Abb. 2.12

Schwarzkörperspektrum

Das Wien'sche Verschiebungsgesetz

³ Strahlungsgesetz, das auf einem empirischen Versuch von Wilhelm Wien beruht. Es liefert allerdings nur für große ν eine sehr gute Übereinstimmung mit Planck.

⁴ Klassisches Modell zur Beschreibung des schwarzen Körpers. Für genügend kleine ν (bei $T = 5000$ K muss gelten: $\lambda = c/\nu > 2\mu\text{m}$) ergibt sich eine gute Übereinstimmung mit der Planckschen Strahlungsformel. Bei großen ν kommt es zu einem starken Unterschied. Die Gültigkeit der Rayleigh-Jeans-Formel hätte eine *Ultraviolett-Katastrophe* zur Folge.

$$\frac{c}{\nu_{\max}} \approx T = 5,10 \cdot 10^{-3} \text{ mK} \quad (2.5)$$

bzw.

$$\lambda_{\max} T = 2,90 \cdot 10^{-3} \text{ mK} \quad (2.6)$$

[KOS, S. 112]

liefert das temperaturabhängige Maximum der Kirchhoff-Planck-Funktion (2.1) bzw. (2.2).

Die in einem breiten Frequenzband emittierte Strahlung nimmt für kleine Frequenzen ab. Es wird nur ein geringer Teil der Wärmestrahlung im Radiobereich abgestrahlt. Das kosmische Hintergrundrauschen ist das wahrscheinlich bekannteste Beispiel für thermische Strahlung. Es entspricht einer Temperatur von 2,7 K.

2.4.2 Bremsstrahlung

Elektromagnetische Wellen können stark ionisierte Gebiete⁵ unbeeinflusst durchlaufen, aber auch von ihnen absorbiert oder reflektiert werden.

Abhängig von der Wellenlänge der Strahlung und der Dicke der ionisierenden Schicht werden durch Absorption hohe Energien emittiert. In der Chromosphäre ($T \approx 10^4 \text{ K}$) der Sonne ist dies der Fall bei Wellenlängen im Zentimeterbereich und in der Korona ($T \approx 160 \text{ K}$) der Sonne im Meterbereich. Dort sind die freien Elektronen zu starker Absorption imstande, während zur gleichen Zeit eine starke Emission aus der thermischen Energie der Elektronen entspringt.

Emission, die entsteht, wenn die Flugbahn eines Elektrons durch ein Proton (positives Ion) abgelenkt wird, nennt man Bremsstrahlung oder „free-free“ Emission. Bei der Elektron-Proton Kollision wird das Proton aufgrund seiner viel größeren Masse als ortsfest betrachtet (Abb. 2.13). Die Flugbahn des Elektrons nähert sich dem Proton, womit eine Verringerung der Elektronengeschwindigkeit einhergeht. Dabei emittiert es eine Radiowelle mit der Energie:

⁵ Gebiete elektrisch geladener Atome oder Moleküle. Durch Elektronenmangel oder Elektronenüberschuss kann es sich um positiv bzw. negativ geladene Ionen handeln.

$$W = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{2e^2}{3c^3} \Gamma^2 dt \quad (2.7)$$

[SRA, S. 38]

wobei $\Gamma = e/mr^2$ ist.

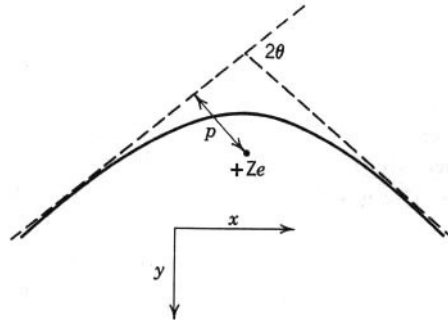


Abb. 2.13 Entstehung von Bremsstrahlung („free-free“- Emission). Das Elektron wird in einer hyperbolischen Flugbahn in dem Feld eines Protons abgelenkt und emittiert ein Energiequant.

Da in diesem Fall die Emission ein Resultat der thermischen Bewegung in dem ionisierten Gas ist, wird die Bremsstrahlung genau wie die Schwarzkörperstrahlung als thermische Strahlung bezeichnet und weist ebenfalls ein kontinuierliches Spektrum auf.

2.4.3 Synchrotronstrahlung

Durchlaufen Elektronen ein Magnetfeld, so werden sie durch die Lorentzkraft auf eine Kreis- oder Spiralbahn gezwungen. Die dabei auftretende Beschleunigung verursacht die so genannte *Synchrotronstrahlung*, die erstmals in einem Teilchenbeschleuniger beobachtet wurde. Aufgrund der hohen Elektronengeschwindigkeit werden die emittierten Radiowellen nach vorne in Bewegungsrichtung in einem engen Kegel mit dem Öffnungswinkel

$$\vartheta; \frac{m_e c^2}{E} = \frac{1}{\gamma} \quad (2.8)$$

[KOS, S. 440]

ausgesandt, \mathcal{E} ist dabei der Lorentzfaktor $\gamma(v) = 1/\sqrt{1-v^2/c^2}$ (Abb. 2.14).

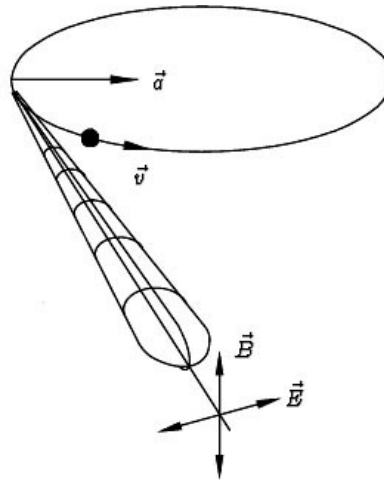


Abb. 2.14 Das auf eine Kreisbahn gezwungene Elektron emittiert elektromagnetische Strahlung in einem engen Kegel (Synchrotronstrahlung).

Der Beobachter empfängt eine Folge von Strahlungsblitzen der Dauer Δt . Unter Berücksichtigung des relativistischen Dopplereffektes⁶ ergibt die spektrale Zerlegung⁷ ein kontinuierliches Spektrum. Den ersten entscheidenden Beweis für den Synchrotroncharakter der Strahlung eines astronomischen Objektes lieferte der Krebsnebel⁸.

2.4.4 Charakteristische Linienstrahlung

Linienstrahlung entsteht aufgrund des Phänomens der gequantelten Zustände eines Atoms. Jeder dieser Zustände besitzt einen diskreten Energiewert. Sobald ein Elektron in einem Atom auf ein niedrigeres Energieniveau (zurück) fällt, gibt es die Energiedifferenz in Form von elektromagnetischer Strahlung wieder ab. Durch diese diskrete Energieabgabe kann nur elektromagnetische Strahlung in einer bestimmten Wellenlänge bzw. Frequenz abgegeben werden.

⁶ Unterscheidet sich nur durch den zusätzlichen Lorentzfaktor vom „einfachen“ Dopplereffekt (Kapitel 2.4).

⁷ Die spektrale Zerlegung geschieht mittels mathematischer Fourieranalyse.

⁸ Überrest einer Supernovae-Explosion aus dem Jahre 1054 AD.

2.4.4.1 21 cm-Linie des neutralen Wasserstoffs

Die interstellare Materie besteht zu 99 % aus Gas. Wasserstoff, das häufigste Element im Universum, hat allein einen Anteil von rund 90 %. Es wird in so genannte HI- und HII-Gebiete aufgeteilt. Bei den HII-Regionen handelt es sich um ionisierten Wasserstoff bei Temperaturen mit bis zu 10.000 K. In den wesentlich kälteren HI-Regionen des neutralen Wasserstoffes (etwa 100 K) befinden sich aufgrund des niedrigen Anregungsgrades im Prinzip alle H-Atome im Grundzustand. Beobachtungen von Absorptionslinien im optischen Spektralbereich sind damit bis auf Ausnahmen ausgeschlossen.

Dennoch kann die HI-Region kontinuierlich beobachtet werden, da sie Ausgangspunkt der Emission einer Spektrallinie bei $\lambda = 21$ cm ist. Diese Emissionslinie des neutralen Wasserstoffs als eine Möglichkeit der charakteristischen Strahlung wird nun genauer betrachtet. Messungen mit dem Wuppertaler Radioteleskop werden ausschließlich in diesem Bereich vorgenommen.

Innerhalb des Grundzustandes $1s^2S_{1/2}$ des Wasserstoffatoms kann es zu einem Hyperfeinstruktur-Übergang kommen (Abb. 2.15). Sowohl das Proton als auch das Elektron besitzen in dem etwas höheren Energieniveau den Gesamtspin $F = 1$ (Kern- und Elektronenspin parallel). Kippt der Spin des Elektrons in die entgegen gesetzte Richtung, herrscht in dem Grundzustand der Gesamtspin $F = 0$ (Kern- und Elektronenspin antiparallel). Durch die Freisetzung der geringen Energiedifferenz von $6 \cdot 10^{-6}$ eV wird ein Radioquant mit der Wellenlänge $\lambda_0 = 21,1061$ cm bzw. der Frequenz

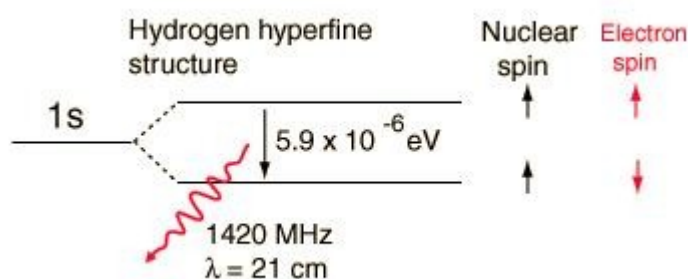


Abb. 2.15 Hyperfeinstrukturübergang des Wasserstoffs. Der parallele Kern- und Elektronenspinzustand geht durch Kippen des Elektronenspins in den antiparallelen Zustand über. Es wird ein 21cm-Radioquant emittiert.

$\nu_0 = 1420,4058$ MHz emittiert. Allerdings ist dieser Übergang „verboten“ (magnetische Dipolstrahlung) und hat eine äußerst geringe Übergangswahrscheinlichkeit. Sie beträgt $A=2,87 \cdot 10^{-15} \text{ s}^{-1}$ und entspricht der Lebensdauer des $F = 1$ Zustandes von

$$t_{1/2} \cong \frac{1}{A_{10}} = 3,49 \cdot 10^{14} \text{ s} \cong 1,11 \cdot 10^7 \text{ a} \quad [\text{ToR, S. 225}]$$

Vergleichsweise ist die Wahrscheinlichkeit eines „erlaubten“ optischen Übergangs um den Faktor 10^{23} größer als der Hyperfeinstrukturübergang des neutralen Wasserstoffes. Neben der spontanen Emission der 21 cm-Photonen kommt es allerdings auch zu Stoßanregung unter den Atomen in dem interstellaren Gas, bei der die Atome sowohl in einen höher auch als niedriger energetischen Zustand gelangen können. Bei Labortests mit neutralem Wasserstoff sind die Kollisionsraten wegen der hohen Dichten signifikant höher und der Zustand $F=1$ ist bereits entvölkert, bevor es zur Emission eines 21 cm-Quants kommt. Der einzige Ort, an dem 21 cm-Strahlung entstehen kann, ist somit der Weltraum. Die niedrigen Dichten im interstellaren Gas geben den angeregten Atomen zwischen eventuellen Stößen die nötige Zeit, durch spontane Emission Strahlung abzugeben.

2.5 Dopplereffekt

Bewegt sich eine Quelle relativ zu einem Empfänger, so kommt es zwischen der von der Quelle abgestrahlten Frequenz und der empfangenen zu keiner Übereinstimmung. Sobald sich die Quelle nämlich auf den Empfänger zu bewegt, ist die empfangene Frequenz höher als die der Quelle. Anders herum ist die empfangene Frequenz niedriger, wenn sich die Quelle von dem Empfänger weg bewegt (Abb. 2.16). Das als Dopplereffekt bezeichnete Phänomen ist auch zu berücksichtigen, wenn man astronomische Objekte beobachtet, da sie eine relative Bewegung zur Erde auf-

weisen. So kann unter anderem die Rotationsgeschwindigkeit der Milchstrasse ermittelt werden, indem die gemessene Verschiebung der empfangen Frequenz unterschiedlicher Objekte im Weltraum Rückschlüsse auf deren relative Geschwindigkeit zur Erde gibt. Dabei wird auf der Erde die radiale Komponente gemessen:

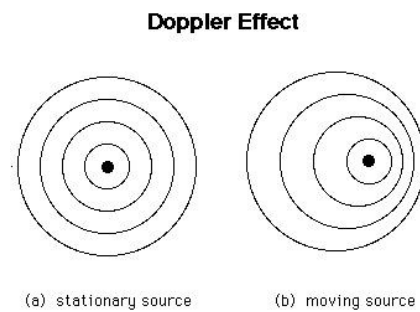


Abb. 2.16 Dopplereffekt. Bewegt sich eine Quelle relativ zu einem Beobachter, so werden ihre emittierten Wellen gestaucht bzw. gestreckt.

$$v_r = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} c, \quad (2.9)$$

[KOS, S. 27]

Hier ist λ_0 die Ruhewellenlänge des atomaren Übergangs und $\Delta\lambda = \lambda_{\text{obs}} - \lambda_0$ die Verschiebung der Wellenlänge. Weiter wird $v_r > 0$ so definiert, dass sich das Objekt von uns wegbewegt.

2.5.1 Rotationsgeschwindigkeit der Milchstrasse

Zur quantitativen Bestimmung der Winkelgeschwindigkeit der Milchstrasse beginnt man mit der Annahme, dass alle Bewegungen auf Kreisbahnen in einer Ebene um das galaktische Zentrum (Z) stattfinden. Ein Stern P wird in der Entfernung r von der Sonne (S) unter der galaktischen Länge l (Kap. 2.6.3) beobachtet. Aufgrund der Rotation um das Zentrum Z ist sein Geschwindigkeitsvektor \vec{V}_r die Tangente an die Kreisbahn mit dem Radius R (Abb. 2.17). Dieser wird relativ zur Sonne $\vec{v} = \vec{v}_r - \vec{v}_0$ in Richtung SP und senkrecht hierzu zerlegt.

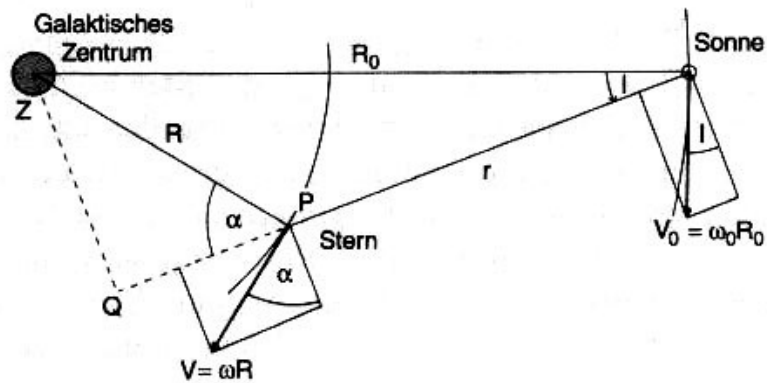


Abb. 2.17 Rotation in der galaktischen Scheibe.

Man erhält die Radialgeschwindigkeit

$$V_r = V \sin \alpha - V_0 \sin l \quad (2.10)$$

und die Tangentialgeschwindigkeit

$$V_t = V \cos \alpha - V_0 \cos l. \quad (2.11)$$

Der Hilfswinkel α kann eliminiert werden, indem aus dem geometrischen Hilfsdreieck SZQ die Beziehungen

$$R \sin \alpha = R_0 \sin l, \quad (2.12)$$

$$R \cos \alpha + r = R_0 \cos l \quad (2.13)$$

entnommen werden. Eingesetzt in (2.10) bzw. (2.11) ergibt dies:

$$V_r = R_0(\omega - \omega_0) \sin l \quad \text{und} \quad (2.14)$$

$$V_t = R_0(\omega - \omega_0) \cos l - \omega r. \quad (2.15)$$

[KOS, S. 394]

Jetzt lässt sich mit der Formel (2.14) durch Messung von V_r die Winkelgeschwindigkeit ω bestimmen, nicht aber der Abstand R , zu dem sie gehört. Es gibt unter bestimmten Berücksichtigungen oder Näherungen diverse

Verfahren, mit denen eine Zuordnung der Winkelgeschwindigkeit von Sternen und ihrem Abstand R vom galaktischen Zentrum vorgenommen werden kann. Bei Messungen der 21 cm-Linie ist die *Tangentialpunktmethode* ein übliches Verfahren.

2.5.1.1 Tangentialpunktmethode

Es wird ein Sehstrahl bei fester galaktischer Länge l (Kap. 2.6.3) betrachtet (Abb. 2.18), wobei $|l| < \pi/2$ ist. Die Radialgeschwindigkeit hat dort ihren Maximalwert

$$V_m = R_0 \omega(R_m) - \omega_0 \sin l, \quad (2.16)$$

[KOS, S. 395]

wo der Strahl in Punkt 3 die galaktische Kreisbahn tangential berührt. Dies trifft zu bei

$$R_m = R_0 \sin l. \quad (2.17)$$

[KOS, S. 396]

Zeitgleich ist V_r bzw. V_m durch die Tangentenbedingung auch die Rotationsgeschwindigkeit des Objektes um das galaktische Zentrum

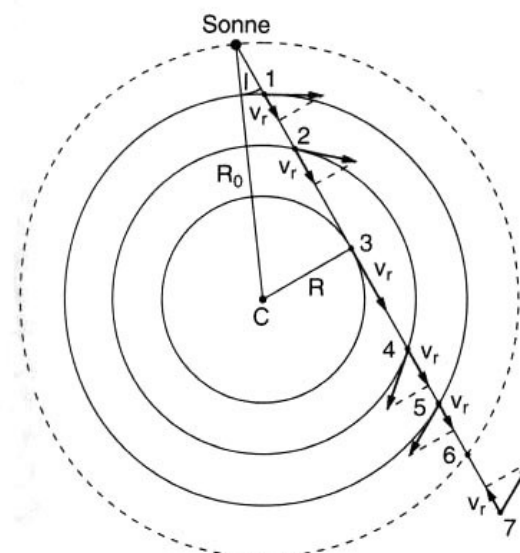


Abb. 2.18 Objekte der Galaxie bewegen sich auf Kreisbahnen (Annahme). Im Tangentialpunkt (Punkt 3) wird die gesamte Geschwindigkeit auf die Radialgeschwindigkeit projiziert.

V_r kann jetzt für verschiedene galaktische Längen l als Funktion des Abstands R vom galaktischen Zentrum aufgetragen werden. R wird mit der Formel (2.17) bestimmt, wobei R_0 mit 8,5 kpc (15% Unsicherheit) bekannt ist.

2.6 Koordinatensysteme

Die bisherigen Kapitel lieferten bereits einige Informationen über Radioemission aus dem Weltraum. Nachdem unter anderem erläutert wurde, dass ein großer Teil des Radiospektrums ungehindert die Erdoberfläche erreicht (Kap. 2.3), stellt sich nun die Frage, wie eine genaue Lokalisierung der empfangenen Signale aus dem Weltraum vorgenommen werden kann. Dies wird durch die Definition von Koordinatensystemen gewährleistet.

Abhängig von der Art der Beobachtung oder des Beobachtungsortes sind verschiedene Koordinatensysteme behilflich, die alle nach dergleichen systematischen Herangehensweise kreiert werden. Zuallererst definiert man eine Einheitskugel, auch Himmelskugel genannt, um ein Objekt mit zwei Winkeln in einem sphärischen System parametrisieren zu können.

Mit theoretisch unendlich großem Radius ist sie eine gedachte, den Beobachter scheinbar umgebende Kugel. Zur Festlegung oder Orientierung der Parameter wird ebenfalls eine Grundebene definiert. Sie schneidet die Himmelskugel in einem Großkreis, dem Grundkreis. Dort wird ein willkürlicher Nullpunkt gewählt, von dem man die erste Koordinate misst. Die Pole des



Abb. 2.19 Die Himmelskugel

Systems werden als Schnittpunkte definiert. Sie werden von allen Großkreisen gebildet, die denselben Radius des Grundkreises haben und senkrecht auf ihm stehen. Zur Bestimmung der zweiten Koordinate ist nun der Großkreis relevant, der durch das betrachtete Objekt geht. Der Winkelabstand zwischen dem Grundkreis und dem Objekt entlang dieses Großkreises liefert die fehlende Koordinate. In der Astronomie wird somit analog zur Definition der Längen- und Breitengrade auf der Erde verfahren. Dennoch muss aufgrund der relativen Erdbewegung weiter differenziert werden.

2.6.1 Horizontsystem

Bei dem wahrscheinlich verständlichsten Koordinatensystem wird der Horizont des Beobachtungsortes als Grundkreis gewählt (Abb. 2.20). Die Definition des Nullpunktes wird unterschiedlich gehandhabt. In der Geodäsie sowie Radioastronomie wird der Nordpol als Nullpunkt festgelegt, in der klassischen Astronomie ist dies der Südpol. *Zenit* (Punkt über dem Beobachter) und *Nadir* (Punkt unter dem Beobachter) sind die Pole des Systems. Der Großkreis, der die Pole sowie den Nullpunkt durchläuft, wird

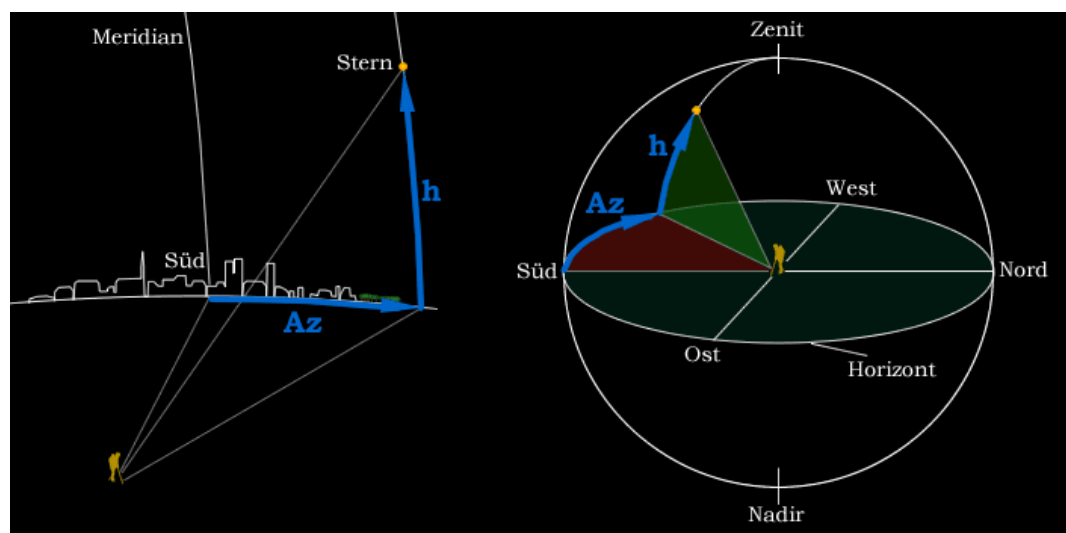


Abb. 2.20 Das Horizontsystem. Koordinaten: Azimut Az , Höhe h . Der Nullpunkt wird im Süden oder Norden gewählt.

als *Meridian* bezeichnet. Die erste Koordinate ist das *Azimuth* Az , das zwischen *Meridian* und dem Großkreis des Sterns liegt. Die zweite Koordinate, die *Elevation* oder die *Höhe* h , wird von der Horizont- bzw. Beobachtungsebene entlang des Großkreises des Sterns gemessen. Aufgrund technisch optimierter Handhabung verwendet man meistens anstelle des Bogenmaßes eine Winkelangabe in Grad. Zum Beobachten von Sternen an einem festgelegten Ort zu einer festgelegten Zeit eignet sich dieses System sehr gut. Soll die Beobachtung allerdings über einen längeren Zeitraum geschehen, so treten wegen der (relativen) Erdbewegung und Erdrotation Probleme auf.

2.6.2 Äquatorialsysteme

Die Äquatorebene der Erde ist hier die Grundebene des Systems. Deshalb wird der Grundkreis Himmelsäquator oder einfach nur Äquator genannt. Dies hat den Vorteil, dass die Fixsterne eine konstante Höhenkoordinate haben, die in diesem System die *Deklination* δ genannt wird. Für die Festlegung der zweiten Koordinate gibt es zwei Varianten, nämlich das feste und das bewegliche Äquatorialsystem.

2.6.2.1 Festes Äquatorialsystem

In dem festen Äquatorialsystem wird der Nullpunkt fest gegenüber der Erde gewählt. Er ist der Schnittpunkt des *Meridians* mit dem Himmelsäquator. Die zweite Koordinate ist der so genannte Stundenwinkel t , der vom Nullpunkt des Systems bis zum Schnittpunkt Himmelsäquator / Stundenkreis in Richtung W, N, O gemessen wird. Im Laufe eines Tages nimmt

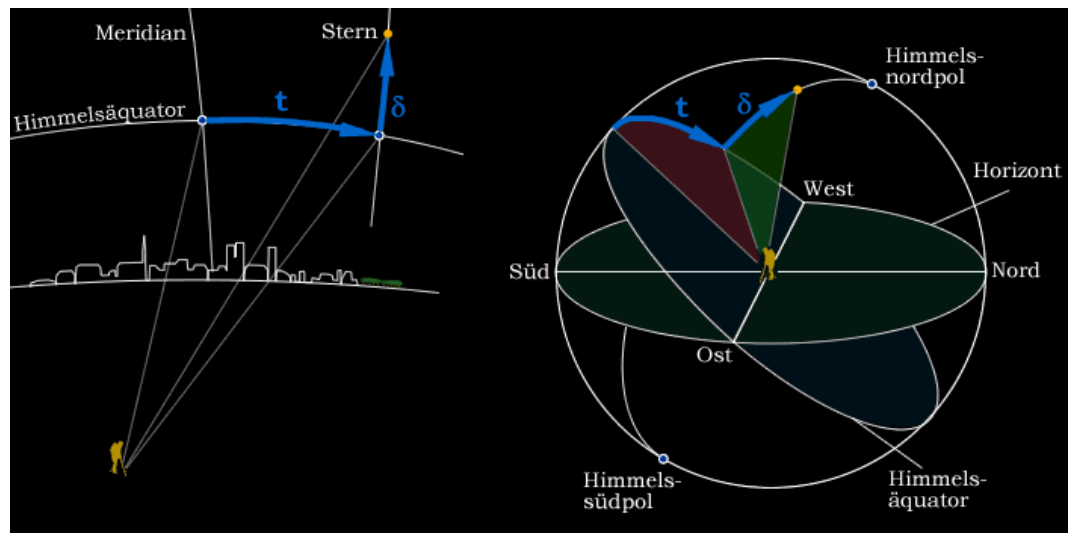


Abb. 2.21 Das feste Äquatorialsystem. Koordinaten: Deklination λ , Stundenwinkel t . Der Nullpunkt ist der Schnittpunkt Meridian / Himmelsäquator.

er infolge der Erdrotation alle Werte von 0° bis 360° an. Meistens wird t aber nicht im Gradmaß, sondern im Zeitmaß gemessen, wobei folgendes Verhältnis gilt:

$$24^h = 360^\circ; \quad 1^h = 15^\circ; \quad 1^m = 15'; \quad 1^s = 15''$$

Mit dem zeitlich und örtlich abhängigen Stundenwinkel t ist es allerdings nicht möglich, Sterne zu katalogisieren.

2.6.2.2 Bewegliches Äquatorialsystem

Im beweglichen Äquatorialsystem wird der Nullpunkt in einen Stern auf den Himmelsäquator gelegt. Dazu wählt man einen Stern mit orts- und zeitabhängigen Koordinaten. In der Regel ist dies der so genannte Frühlingspunkt (früher Widderpunkt), der Schnittpunkt des Himmelsäquators mit der Ekliptik⁹. Dort steht die Sonne meist um den 21. März. Die

⁹ Projektion der scheinbaren Sonnenbahn auf die Himmelskugel im Verlauf eines Jahres.

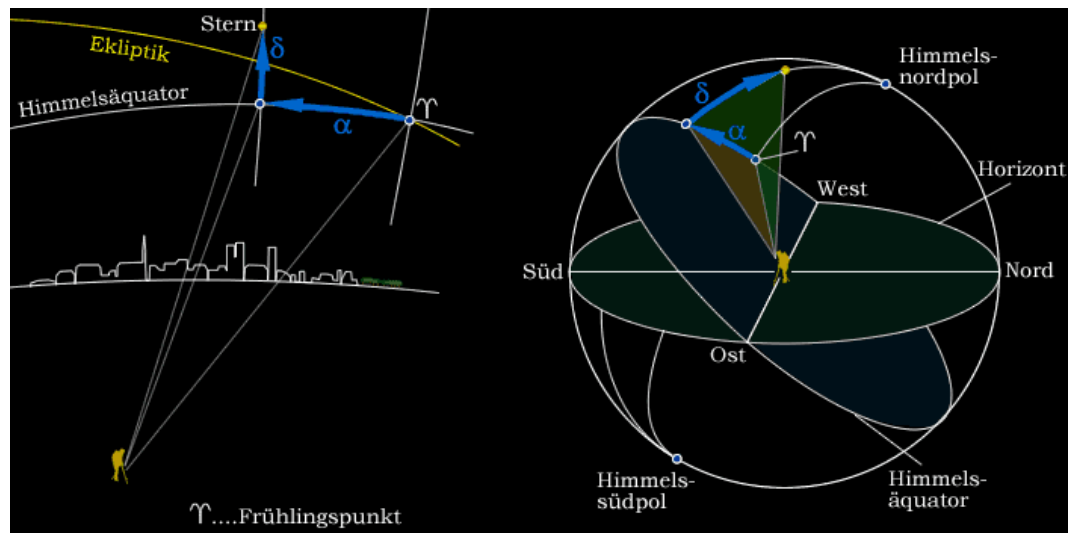


Abb. 2.22 Das bewegliche Äquatorialsystem. Koordinaten: Deklination δ , Rektaszension α . Der Nullpunkt ist der Frühlingspunkt γ , der Schnittpunkt des Himmelsäquators mit der Ekliptik¹².

frühere Bezeichnung Widderpunkt (daher auch das Symbol) rührt von seiner damaligen Position im Sternbild Widder. Aufgrund der Präzessionsbewegung der Erde ist diese aber heute im Sternbild Fische.

Die zweite Koordinate, die Rektaszension α , wird von dem Frühlingspunkt aus gemessen, entgegengesetzt zum Stundenwinkel t . Möchte man eine Umrechnung zwischen den Koordinaten der beiden Äquatorialsysteme vornehmen, so benötigt man nur die Sternzeit Θ , den Stundenwinkel des Frühlingspunktes. Es besteht folgende Beziehung:

$$t = \Theta - \alpha \quad (2.18)$$

[Weig, S. 4]

2.6.3 Galaktisches Koordinatensystem

Astronomen bestimmen die relativen Positionen zwischen Sternen und anderen Himmelsobjekten innerhalb der Milchstrasse mithilfe des galaktischen Koordinatensystems. In diesem Koordinatensystem ist der galaktische Äquator die Grundebene. Der Grundkreis liegt somit in der Rotationsebene unserer Galaxie. Die relevante Orientierungsrichtung bzw. der

Nullpunkt des Systems ist die Linie von unserer Sonne zum galaktischen Zentrum. Von dort aus werden die Koordinaten *galaktische Länge l* und *galaktische Breite b* definiert, beides sind Angaben in Grad. Die galaktische Länge wächst von 0° bis 360° in dieselbe Richtung wie die *Rektaszension* α an, während die galaktische Breite von 0° bis 90° nördlich und 0° bis -90° südlich des galaktischen Äquators variiert. Der Nullpunkt ($l = 0^\circ$; $b=0^\circ$) liegt im beweglichen Äquatorialsystem bei:

$$\alpha = 17\text{h}42\text{m}4\text{s} \text{ und } \delta = 28^\circ55' \quad [\text{PAC, S. 32}]$$

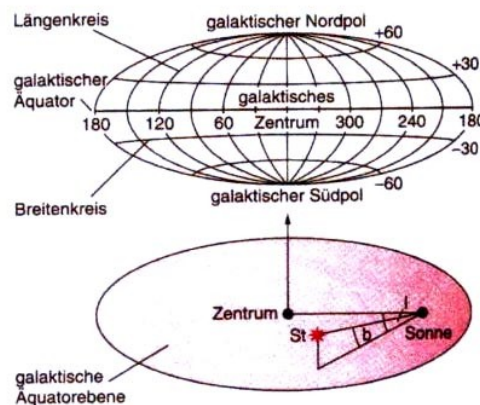


Abb. 2.23 Galaktische Ebene. Koordinaten: Galaktische Länge l , galaktische Breite b . Der Nullpunkt ist die Linie von unserer Sonne zum galaktischen Zentrum.

2.6.4 Ekliptikalsystem

Der Grundkreis des Ekliptikalsystem ist die *Ekliptik*, die scheinbare Sonnenbahn am Himmel im Verlauf eines Jahres. Genau wie bei den Äquato-

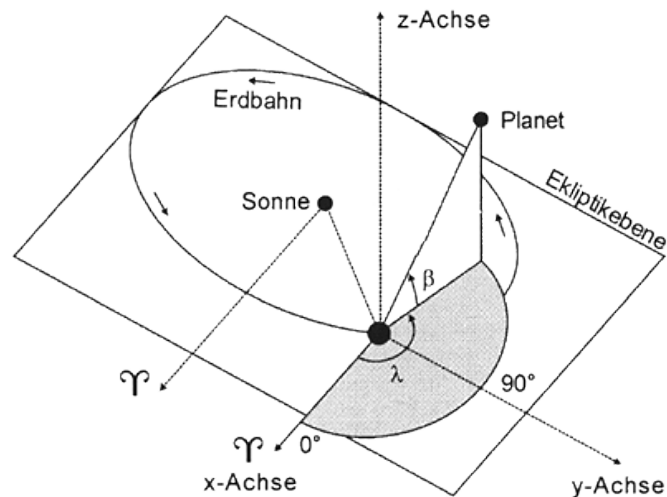


Abb. 2.24 Das Ekliptikalsystem. Koordinaten: Ekliptikale Länge λ , ekliptikale Breite β . Der Nullpunkt des Systems ist der Frühlingspunkt.

rialsystemen wählt man den Frühlingspunkt als Nullpunkt (Abb. 2.24). Die *ekliptikale Länge* λ wird entlang der Ekliptik gemessen, und die *ekliptikale Breite* β verläuft auf den Großkreisen, welche durch die Pole des Systems verlaufen, senkrecht zum Grundkreis. Die Pole sind als Schnittpunkte der Himmelskugel mit der Rotationsachse der Erde definiert. Die so genannte *Schiefe der Ekliptik* beträgt

$$\varepsilon = 23,5^\circ. \quad [\text{Weig, S. 4}]$$

Sie ist der Winkel zwischen der Ekliptikebene und der Äquatorebene. Das Ekliptikalsystem eignet sich am besten zur Beschreibung von Bewegungen im Planetensystem.

2.7 Eigenschaften von Antennen

In diesem Kapitel sollen mit dem Auflösungsvermögen eines Radioteleskops und der Funktion des Halbwellendipols zwei Aspekte behandelt werden, die zum Verständnis des Wuppertaler Radioteleskops beitragen.

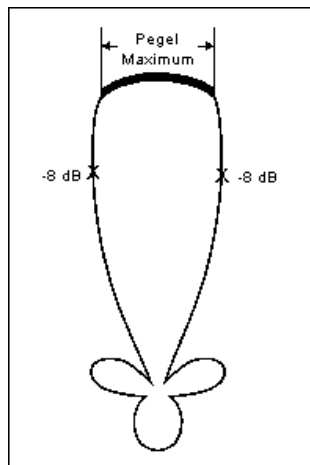
2.7.1 Auflösungsvermögen

Der Begriff Winkel- bzw. Auflösungsvermögen ist bei der Vorstellung aktueller Radioteleskope (Kap. 2.2) einige Male genannt worden. Für die Beobachtung astronomischer Objekte und der Interpretation der gemessenen Signale ist die Kenntnis über das Auflösungsvermögen des benutzten Teleskops entscheidend.

Den kleinsten Winkelabstand zweier Sterne, die man gerade noch getrennt sehen kann, bezeichnet man als das *Auflösungsvermögen* φ_A . Zwei Sterne werden dann getrennt wahrgenommen, wenn das Maximum 0. Ordnung des einen Sternbildes in das Minimum 1. Ordnung des zweiten Sternbildes fällt. Es gilt nach der Beugungstheorie:

$$\varphi_A = 1,22 \frac{\lambda}{D}, \quad (2.19)$$

[KOS, S. 130]



wobei λ die Wellenlänge der einfallenden Strahlung und D der Durchmesser des Teleskops ist. φ_A wird in Bogenmaß angegeben. Häufig findet man auch den Begriff *Keulbreite* in der Radioastronomie. Das ist der Winkel zwischen den Punkten der Hauptkeule (Abb. 2.25), an denen die Energieempfindlichkeit vom Maximum auf die Hälfte abgesunken ist. Sie beträgt:

Abb. 2.25 Hauptkeule einer Antenne.

$$\varphi_K = 1,03 \frac{\lambda}{D_{\text{eff}}} \quad (2.20)$$

[KOS, S. 146]

Die Keulbreite unterscheidet sich nur unwesentlich von dem Auflösungsvermögen (2.19), da aufgrund der Richtcharakteristik des Emp-

fängerhorns für den effektiven Durchmesser des Hauptspiegels gilt:

$$D_{\text{eff}} < D.$$

Zudem kann das Auflösungsvermögen φ_A bzw. die Keulenbreite φ_K durch den Raumwinkel $\Omega_A \sim \varphi^2$ der Antennenkeule beschrieben werden. Zu-

sammen mit der (effektiven) Antennenfläche bzw. Apertur $A_{\text{eff}} : D_{\text{eff}}^2$ erhält man die allgemein gültige Beziehung

$$A_{\text{eff}} \Omega_A = \lambda^2. \quad (2.21)$$

[KOS, S. 146]

2.7.2 Halbwellendipol

Der Halbwellendipol ist das einfachste und gleichzeitig am stärksten verbreitete Resonanzgebilde in der Antennentechnik. Wie sein Name schon sagt, entspricht seine Längsausdehnung etwa der halben Wellenlänge ($\lambda/2$) der jeweils verwendeten Frequenz. Er ist in seiner geometrischen Mitte aufgetrennt, daher auch der Name Dipol („Zweipol“). Die in der Mitte entstehenden „2 Pole“ werden als Speisepunkte bezeichnet (Abb. 2.26). Die Speiseleitung bzw. der Sender oder der Empfänger wird an diese

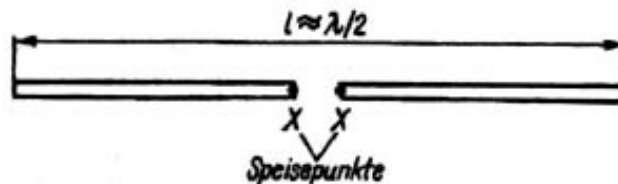
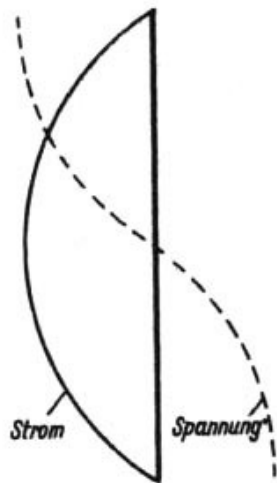


Abb. 2.26 Ein Halbwellendipol hat eine Längenausdehnung von der halben Wellenlänge der verwendeten Frequenz. An den zwei Speisepunkten in der Mitte wird der Sender oder Empfänger angeschlossen

Speisepunkte angeschlossen. Wie jeder gestreckte Leiter weist der Halbwellendipol eine bestimmte Induktivität und Kapazität auf. Aus dieser Tatsache kann die Strom- und Spannungsverteilung eines resonanten Halbwellendipols abgeleitet werden. Die Spannung und der Strom weisen eine Phasenverschiebung von 90° auf, der Phasenunterschied der Spannung

an den Strahlerenden beträgt 180° (Abb. 2.27). Zudem zeigt die Verteilung auch, dass der Strom in der Strahlermitte ein Maximum hat (Strombauch).



Dort beträgt die Spannung hingegen null (Spannungsknoten). An den Strahlerenden ist es der umgekehrte Fall. Es herrscht ein Spannungsmaximum und Stromknoten. Aus der Spannungsverteilung geht hervor, warum Halbwellenelemente häufig in ihrer geometrischen Mitte direkt und metallisch leitend mit dem geerdeten Antennenträger verbunden sind. Eine Isolation wird dadurch überflüssig.

Abb. 2.27 Die Strom- und Spannungsverteilung in einem Halbwellendipol.

3. Das Wuppertaler Radioteleskop

Im Jahr 2004 wurde an der Universität Wuppertal ein Radioteleskop gebaut (Abb. 3.1), um den Physikstudenten schon im physikalischen Praktikum die Möglichkeit zu geben, sich mit der Thematik „Erforschung des Radiohimmels“ zu beschäftigen. Den fundamentalsten Teil des Aufbaus, ein sphärischer¹⁰ Spiegel aus den 50er Jahren (Abb. 3.2), erwarb der Fachbereich Physik vor etwa 5 Jahren von der Firma Telefunken, die den Spiegel in der Richtfunkstrecke eingesetzt hatte. An der Universität

¹⁰ Teil einer Kugeloberfläche. Im Gegensatz zur Parabolschüssel besitzt die sphärische keinen Brennpunkt, sondern einen Brennstrahl.

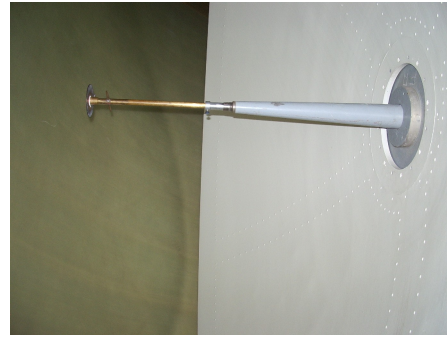
Wuppertal hatte man ursprünglich über diverse Einsatzmöglichkeiten des Spiegels nachgedacht. Schließlich entschied man sich, diesen Spiegel zur Messung der 21 cm-Linie im Rahmen eines physikalischen Praktikums zu nutzen. Da es sich um einen wetterempfindlichen Aufbau handelt, wurde ein Futtermittelsilo aus der Agrarwirtschaft angeschafft, in dem das Radioteleskop alle horizontalen und vertikalen (bis 45°) Positionen einnehmen



Abb. 3.1 Das Wuppertal Radioteleskop. Die Radioschüssel in dem Agrarsilo (links) und der Container als Auswertungsort.

kann. Neben das Silo stellte man einen Container mit entsprechender Auswerteelektronik. Eine direkte Verbindung sorgt für den Transfer der empfangenden Signale. Die Auswerteelektronik kommt aus dem Onsala Space Observatory in Schweden, ein Unternehmen, das sich auf den Bau kleinerer Radioteleskope spezialisiert hat. In den folgenden Kapitel

werde ich die genaue Konstruktion - was ermöglicht das Variieren der Antennenausrichtung, wie arbeitet die Auswertelektronik - erläutern.



3.1 Mechanischer Aufbau

Das Radioteleskop wurde mit bereits montiertem Gerüst geliefert. Es besteht aus einem statischen und einem dynamischen Teil. Der sphärische Spiegel ist an dem dynamischen Teil befestigt. Durch eine Zahnradkonstellation kann das obere bewegliche Drehgestell gegen den unteren festen

Bereich bewegt werden (Abb. 3.3), um eine azimuthale Variation des Teleskops vorzunehmen. Die Firma Telefunken hat diese Eigenschaft allerdings nie genutzt, so dass ein Techniker der Fachgruppe Astroteilchenphysik nachträglich ein Kugellager zwischen den Gestellen integrieren musste. Der Einbau eines Schrittmachers in das System ermöglicht den Antrieb der Zahnradkonstellation.



Abb. 3.3 Der obere dynamische Teil des Gerüst wird gegen den unteren mittels Zahnräder bewegt

Die Veränderung des Höhenwinkels (Elevation) bis maximal 45 Grad wird durch einen Kettenzug realisiert. An dem halbkreisförmigen Metallabschnitt des Gerüsts, unmittelbar hinter der sphärischen Schüssel, befestigte man eine Kette, die ebenfalls durch einen Schrittmotor betrieben wird

(Abb. 3.4). Da das Radioteleskop nicht im Schwerpunkt hängt, stellt es ein Sicherheitsrisiko für die im Silo befindlichen Personen dar. Dieses Risiko musste durch bestimmte Maßnahmen minimiert werden. So verhindern zwei integrierte Flüssigkeitsdämpfer sowie entsprechende Motorbremsen

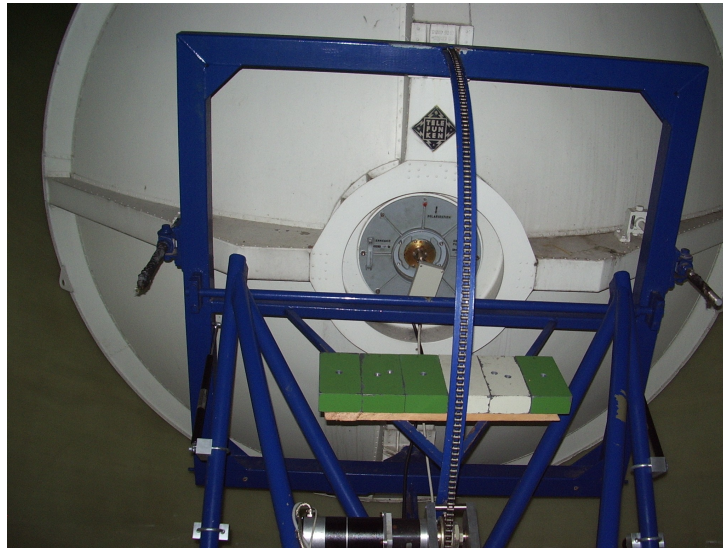


Abb. 3.4 Die Veränderung des Höhenwinkels wird durch einen Kettenzug realisiert.

ein unerwartetes „Herunterfallen“ der Schüssel. Zusätzlich befindet sich auf dem Halbkreis ein Gegenstück von 80 kg. Beide Motoren werden von einer digitalen Steuerkonsole bedient. Mit Hilfe eines Joysticks ist eine Azimuth- und Elevationseinstellung in 1° -Schritten möglich.

3.2 Auswerteelektronik und -software

In diesem Kapitel wird beschrieben, welchen Weg die mit dem Radioteleskop empfangenen Signale der in Kapitel 2.4.4.1 erläuterten Wasserstofflinie bei 1420,4 MHz in der Auswertelektronik durchlaufen, so dass sie letztendlich mit Hilfe des Computerprogramms *Qradio* interpretiert werden können.

Die einfallenden Radiowellen werden von dem sphärischen Spiegel auf einen kleinen Reflektor fokussiert und vom Dipol der Speiseantenne aufgefangen. Am anderen Ende der Speiseantenne, unmittelbar hinter dem Radiospiegel, beginnt das Frontend der Auswerteelektronik (Abb. 3.5). In

diesem ist ein Schalter eingebaut, der vom Container aus gesteuert wird. Anstelle des Antennensignals kann wahlweise eine Noise-Diode (ND) in den Schaltkreis integriert werden. Das von ihr verursachte „Rauschen“ kann bei Messungen verwendet werden. Ein Hochfrequenzvorverstärker ist mit einem 80 MHz breiten Bandpassfilter mit einer Mittenfrequenz von 1430 MHz gekoppelt. Das verstärkte Antennensignal läuft anschließend zum ersten Mischer. Dort liegt ein lokaler Oszillator an, der das Signal auf eine niedrigere Frequenz herabsetzt. Auf diese Weise wird eine

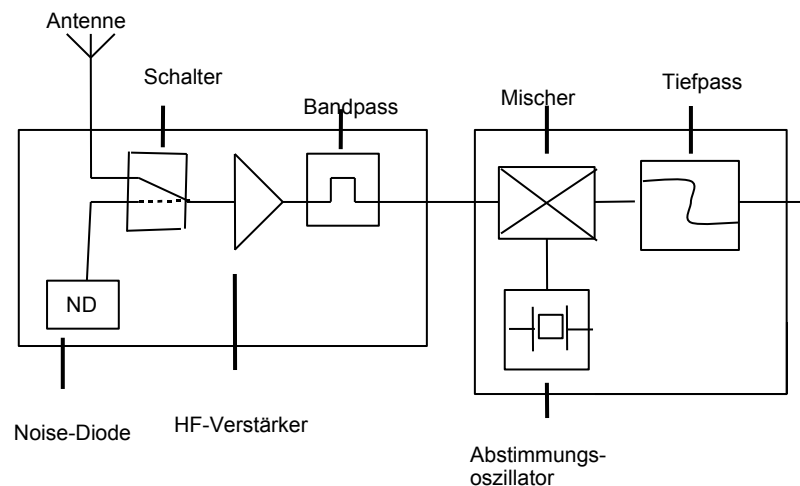


Abb. 3.5 Frontend der Auswerteelektronik: Das empfangene Antennensignal wird verstärkt, durch einen Bandpassfilter in seiner Bandbreite begrenzt und mit einem Oszillator heruntergemischt. Ein abschließender Tiefpass legt eine obere Grenzfrequenz für das Signal vor.

dämpfungsarme Weiterleitung des Signals gewährleistet. Der Oszillator arbeitet auf einer Frequenz von 1366,6 MHz. Das empfangene Signal wird somit auf eine Frequenz von 53,8 MHz herunter gemischt. Ein Tiefpass von 70 MHz am Ausgang der Schirmungsbox des Mixers unterdrückt eine Weiterleitung von eventuell vorhandenen höher frequenten Signalen. Danach läuft das Signal über ein Koaxkabel in den Container. Dort wird es in den so genannten Lab-Receiver (Backend), der Analysebox aus Schweden (Abb. 3.6), eingespeist. Dieser besteht aus einem Analog- und Digitalteil. Der Analogteil mischt das Signal in mehreren Schritten runter.

Dabei erreicht es eine Mittenfrequenz von 1,2 MHz mit einer Bandpassbreite von ca. 2,4 MHz, die durch einen 9-stufigen Tiefpass begrenzt wird. Der Analogteil besitzt zwei Ausgänge. In einem Ausgang verlässt das Signal den Lab-Receiver in dem bereits erwähnten 2,4 MHz Fenster. In dem zweiten Ausgang ist die Bandbreite des Signals noch nicht so klein, sie beträgt 24,4 MHz. Die Signale beider Ausgänge werden später im Programm *Qradio* als Leveldetektor 1 (24,4 MHz Bandbreite) und Leveldetektor 2 (2,4 MHz Bandbreite) registriert.

Der Digitalteil des Lab-Recievers besteht aus drei Abschnitten. Der erste Abschnitt ist ein Utility-Board, das die Leveldetektorsignale digitalisiert und ein Stufensignal aus dem eigentlichen Signal erzeugt. Über ein Steuerkabel zum Utility-Board kann zwischen dem Antennensignal und der Noise-Diode gewechselt werden. Der zweite Abschnitt ist ein Correlator-Board.

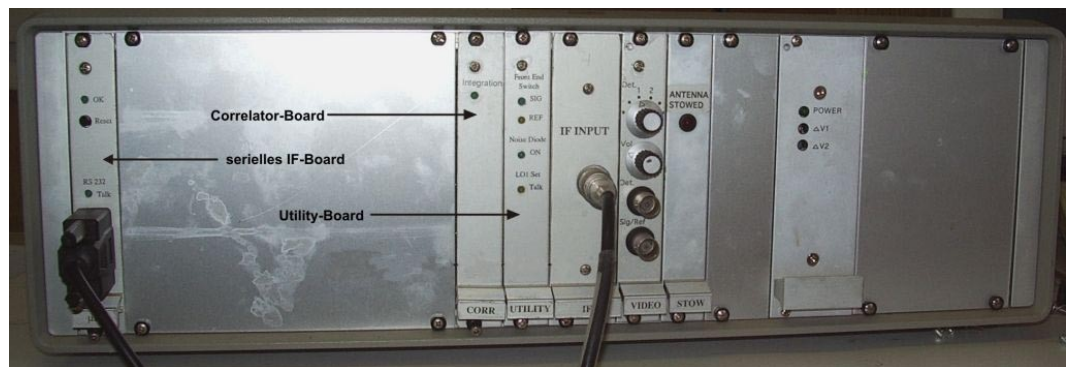


Abb. 3.6 Der Lab-Receiver (Backend) mischt die Signale auf eine Bandpassbreite von 2,4 MHz herunter und digitalisiert sie.

Dieses übernimmt die eigentliche Datenaufzeichnung und unterteilt das Stufensignal in 64 Kanäle. Der dritte Abschnitt ist ein serielles Interface. Dieses kommuniziert mit dem Correlator-Board und dem Utility-Board.

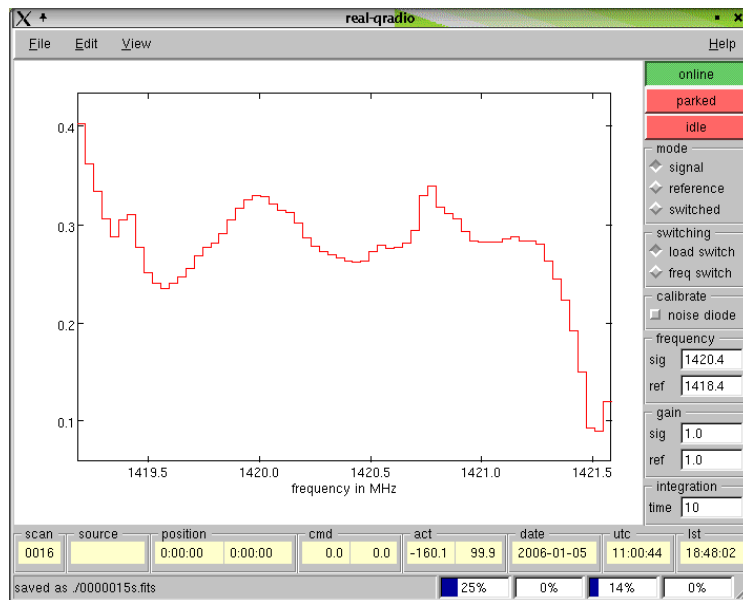


Abb. 3.7 Mit dem Programm *Qradio* werden die empfangenen Signale in einem 2,4 MHz breiten Fenster grafisch dargestellt und als Fit-Dateien auf dem Computer abgelegt.

Über einen seriellen Anschluss gelangen die digitalen Signale in den Computer und werden von dem Programm *Qradio* interpretiert (Abb. 3.7). Sobald *Qradio* auf „Online“ gestellt wird, zeigen die beiden Leveldetektoren die Höhe (Prozentangabe) der empfangenen Signale an. Der Leveldetektor 1 registriert die Signale, die das Backend mit einer Bandpassbreite von 24,4 MHz ausgibt. Die „Feinanalyse“ übernimmt der Leveldetektor 2. Er erhält die Signale, die vom Backend auf eine Bandpassbreite von 2,4 MHz herunter gemischt sind. Dieser 2,4 MHz Bereich von 1419,2 MHz bis 1421,6 MHz ist in die bereits erwähnten 64 Kanäle unterteilt, die bei der Aufnahme eines Spektrums als Fit-Datei abgelegt und zusätzlich in *Qradio* grafisch dargestellt werden. Wird die Schaltfläche „Idle“ betätigt, so integriert *Qradio* über das empfangene Signal und erstellt eine Fit-Datei. Unter der Option „Mode“ besteht die Möglichkeit, das „Rauschen“ der Noise-Diode einzuschalten. Zudem kann über die Eingabe „switched“ (unter „mode“) und „load switch“ (unter „switching“) ein ständiger Wechsel zwischen dem Antennensignal und dem „Rauschen“ erzwungen werden.

Dieser „switched“-Modus funktioniert nicht einwandfrei (nur sehr fehlerhaft). Mal lässt er sich einschalten, mal nicht. Laut Anleitung ist es möglich, unter der Option „freq switch“ (unter „switching“) ein Referenzsignal mit wählbarer Frequenz einzuspeisen. Was genau bei der Erzeugung dieses Referenzsignals in der Messapparatur passieren soll, ist uns nicht bekannt. Diese Funktion lässt sich ohnehin nicht eingeschalten. Unter der Option „gain“ soll es möglich sein, Signale zu verstärken. Bei Eingabe unterschiedlicher Verstärkungsfaktoren veränderte sich das Spektrum aber nicht. In diesem Zusammenhang sei noch erwähnt, dass eine weitere, neuere Version des Programms *Qradio* existiert. In dieser Version funktioniert nur die Verstärkung. Ein Spektrum des Antennensignals sucht man vergeblich. Daher ist es nicht weiter verwendet worden.

3.3 Aufnahme des Projektes

Im Januar 2006 haben Robert Bellin und ich die Arbeit am Radioteleskop Wuppertal aufgenommen. Ziel war es, die Messung der 21 cm-Linie möglich zu machen, Messlisten zu erstellen und Vorschläge für den zukünftigen Gebrauch des Teleskops zu geben. Ausschlaggebend dafür stand die Tatsache, dass seit Beginn des Einsatzes im Projektpraktikum keine Gruppe die Messung der Wasserstofflinie wirklich nachweisen konnte. Entweder kam kein Messergebnis zustande oder *Qradio* zeigte ein Spektrum, welches immer gleich aussah (ein links und rechts verschobener Peak) und keine Variation in der Frequenz und Intensität aufwies. Anfangs versuchten wir mehrfach, eine Messung zu starten, ohne eine Veränderung im Aufbau der Anlage vorzunehmen. Leider ohne Erfolg. Wir erhielten kein Signal. Selbst das charakteristische „2-Peak“-Spektrum, welches schon so von anderen Gruppen entdeckt wurde, tauchte nicht auf. Bei der Fehlersuche profitierten wir von Ratschlägen des Physikstudenten Jens Dopke, der sich von allen Projektpraktikanten am intensivsten mit den möglichen Fehlerquellen der Apparatur auseinandergesetzt hatte. Seine Bemühungen ließen den Schluss zu, dass die Analysebox aus Schweden fehlerhaft arbeitet. Auch der alte verrostete Dipol machte auf uns nicht den besten Eindruck. Um diese Unsicherheit endgültig zu klären, kam uns der Messtechniker Norbert Menke zur Hilfe. Sein „Spectral-Analyser“ brachte die nötige Bestätigung. Als Herr Menke nämlich die relevanten 1420,4 MHz direkt in den Dipol einspeiste, wurde im

Analyser keine Resonanz registriert. Zusätzlich überprüfte er eine Ersatzantenne mit Dipol aus Messing auf dieselbe Weise, das Resultat war positiv. Nun galt es, diese Fehlerquellen zu eliminieren.

3.3.1 Verbesserungen am Radioteleskop

Im zeitlichen Rahmen einer Examensarbeit konnten wir die Analysebox nicht zur Reparatur nach Schweden schicken. Der Fachbereich Physik der Ruhr-Universität Bochum hat vor einigen Jahren dasselbe Analysepaket zur Messung der 21 cm-Linie erworben und es trotz vorhandenen Radioteleskops noch nicht zum Einsatz gebracht. Die Kontaktaufnahme mit der Uni Bochum bewirkte das erwünschte Ziel. Man stellte uns die Box für einen unbestimmten Zeitpunkt zur Verfügung. Die verantwortlichen Physiker aus Bochum werden von uns regelmäßig über den aktuellen Forschungsstand informiert.

Beim Austausch des Dipols waren wir auf die Hilfe der Werkstatt des Fachbereiches Physik der Uni Wuppertal angewiesen, da die Speiseantenne des Ersatzdipols nicht in den am Radioteleskop angebrachten Aufsatz passt. Die Art Befestigung des Ersatzdipols erlaubt nun eine Korrektur der Dipolposition im Brennstrahl des sphärischen Spiegels. Zudem schliff man den kleinen auf der Spitze der Speiseantenne befindlichen Reflektor passend zurecht. Sobald alles moniert war, konnten wir mit unseren Messungen beginnen. Bereits die ersten Messversuche stimmten uns positiv.

3.3.2 Vorbereitende Messungen

Schon bei den ersten Messungen mit dem Radioteleskop stellten wir etwas Interessantes fest. Keines der gemessenen Spektren wies eine eindeutige Nulllinie auf. Zeigte sich kein eindeutiger Peak, so erhielten wir jedes Mal dasselbe charakteristische Spektrum (Abb. 3.8). Unter der Annahme, dass dieses Spektrum eventuell durch das Heruntermischen in

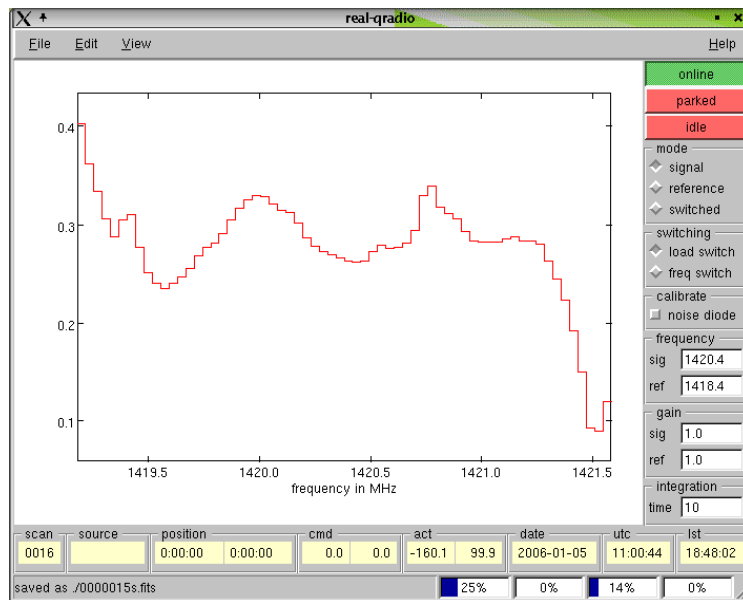


Abb. 3.8 Zeigte sich kein eindeutiger Peak, so wurde mit Qradio das abgebildete Spektrum registriert. Dies entspricht einer „Nullmessung“.

der Analysebox hervorgerufen wird, wollten wir der Sache genauer nachgehen. Mittels Frequenzgenerator der Fachgruppe Elementarteilchenphysik speisten wir direkt ein Signal in den Lab-Receiver ein und nahmen eine Messtabelle auf. Bei einer Spannung von 40 mV wurde der Frequenzbereich von 46,5 MHz bis 80 MHz¹¹ in 0,1 MHz Schritten durchlaufen. Jeder Frequenzeinstellung folgte ein Ablesen der Höhe der beiden Leveldetektoren. Als weitere Information wurde die Peakhöhe im Spektrum durch einfaches Ablesen der Y-Werte am Monitor ermittelt. Dieses Verfahren ist sicherlich ungenau. Dennoch wollten wir untersuchen, ob auch dieser Vorgehensweise eine gewisse Systematik zwischen Peakhöhe und Leveldetektor zu entnehmen ist.

Das Resultat, insbesondere die grafische Darstellung der Messung erweisen sich als sehr aufschlussreich (Abb. 3.9, Abb. 3.10). Der erste Leveldetektor mit einer Bandpassbreite von (35 ± 5) MHz (theoretisch 24,4 MHz) ist dabei nicht so interessant. Schaut man sich hingegen die Werte

¹¹ Dies entspricht beim Programm *Qradio* einem Frequenzbereich von 1413,3 MHz bis 1446,8 MHz (siehe Kapitel 3.2).

des zweiten, im relevanten Frequenzbereich liegenden Leveldetektors, an, so erkennt man deutliche Unterschiede in der Höhe, obwohl jede Frequenzeinstellung mit derselben Spannungshöhe von 40 mV einhergeht. Genau wie das bis jetzt unerklärliche charakteristische Spektrum (Abb. 3.8) verzeichnet unsere Messung (Abb. 3.9) bei denselben Positionen einen Anstieg. Dieses Ergebnis wird ebenfalls durch unser ungenaues Ablesen mit dem Lineal gestützt. Somit ist verständlich, dass mit der Auswertelektronik keine reine Nulllinie gemessen werden kann. Beim Heruntermischen des Signals in der Analysebox scheint tatsächlich eine charakteristische Verstärkung einzusetzen. Dies wurde als Nullpunktkorrektur in dem Programm *Auswertung.cpp* (Kap. 3.4) implementiert.

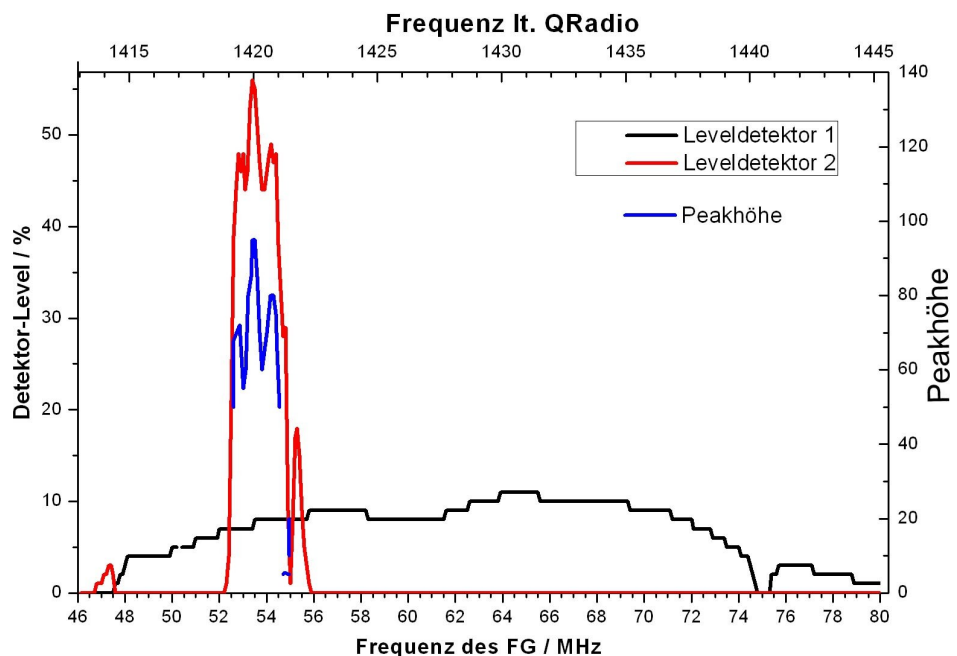


Abb. 3.9 Vorbereitende Messung: Mit einem Frequenzgenerator wird ein Signal mit 40 mV Spannung in die Analysebox (Backend) eingespeist. Die Frequenz (von 46,5 MHz bis 80 MHz in 0,1 MHz Schritten) ist gegen die Höhe der Leveldetektoren 1,2 und gegen die Peakhöhe im Spektrum aufgetragen.

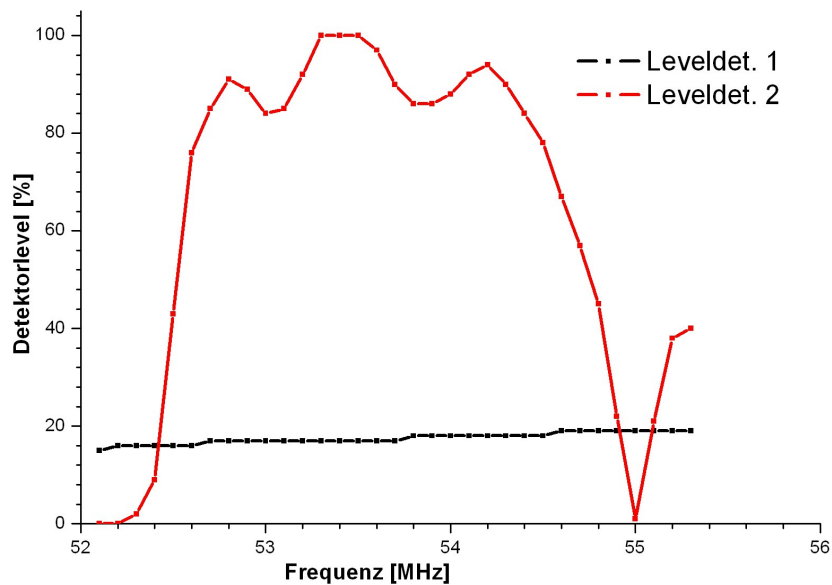


Abb. 3.10 Vorbereitende Messung: Genaue Betrachtung des relevanten Messbereiches von 52,4 MHz bis 55,1 MHz.

3.4 Verwendete Computerprogramme

Zu der Messung mit dem Radioteleskop und der anschließenden Analyse der gemessenen Signale benötigt man einige Computerprogramme. Diese werden im Folgenden vorgestellt.

Die empfangenen Signale werden mit Hilfe des Programms *Qradio* (siehe Kap. 3.2) als Fit-Dateien auf dem Computer abgelegt. Da man diese Fits nicht ohne weiteres mit einem Analyseprogramm lesen kann, müssen die Daten erst in das gängige txt-Format übersetzt werden. Das hierzu nötige Programm *Cfitsio* wurde von dem Mitarbeiter der Astroteilchenphysik Lorenzo Perrone¹² geschrieben.

Nach der Übersetzung der Fits folgt eine Analyse der txt-Dateien. Eine qualitative Analyse der Daten erfolgt zunächst mit dem Programm *Origin-Pro 7.5*. Die gemessenen Spektren werden in einem 3D-Plot nebenein-

¹² Er ist jetzt an der Universität Lecce, Italien.

ander gelegt (Abb. 3.11), um unter anderem den zeitlichen Verlauf eines beobachteten Objektes darzustellen. Alternativ zu der 3D-Darstellung haben wir die gemessenen Daten in einem 2D-Farbplot dargestellt (Abb. 3.12).

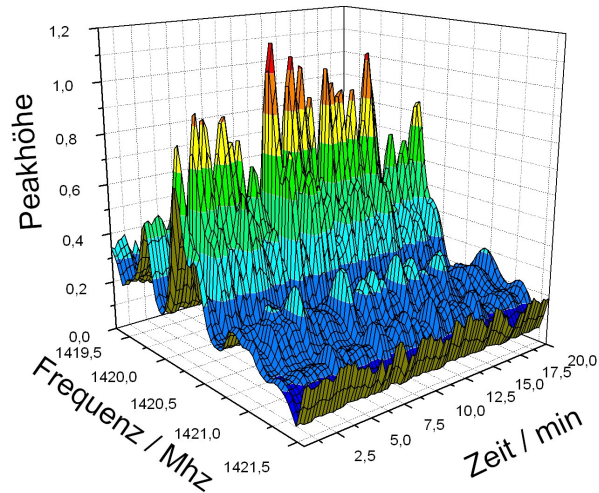


Abb. 3.11 3D-Plot (*OriginPro 7.5*) einer 20 minütigen Messung bei fester Position. Die gemessenen Spektren (von 1419,2 MHz bis 1421,5 MHz) sind als zeitlicher Verlauf nebeneinander gelegt.

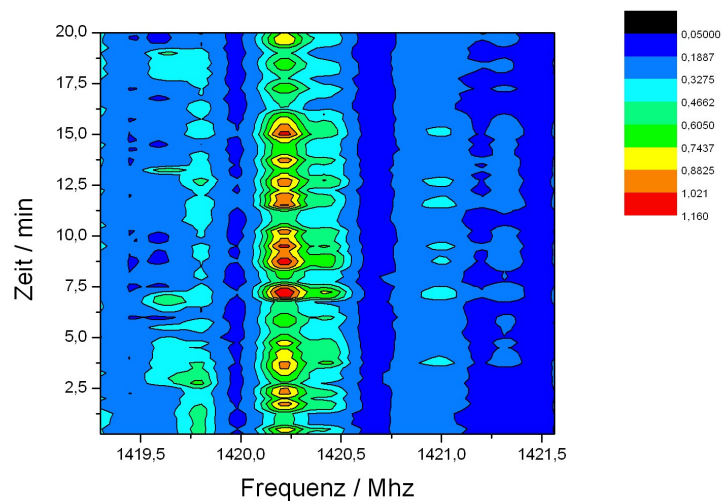


Abb. 3.12 2D-Farbplot (OriginPro 7.5) von der Messung, die bereits in Abb. 3.11 gezeigt ist.

Ein weiteres Analyseprogramm heißt *Auswertung.cpp*. Dieses haben wir gemeinsam mit großer Unterstützung des Physik Studenten Jan-Patrick Hültz entwickelt. Es wird zur quantitativen Analyse der Messwerte verwendet. Das Programm untersucht die txt-Dateien nach Signalen (Peaks), wobei es die charakteristische Verstärkung der Analysebox berücksichtigt. Hat es einen Peak gefunden (max. drei Peaks in einem Spektrum), so berechnet es dessen Halbwertsbreite, Integral, Rotverschiebung und die dazugehörige Relativgeschwindigkeit. Das Programm bietet auch die Möglichkeit, vorher festzulegen, über wie viele txt-Dateien bzw. gemessene Spektren das Programm mitteln soll. Führten wir vier Messungen pro Minute durch, war dies auch in der Regel die Anzahl, über die gemittelt wurde. So erhielten wir zu jeder gemessenen Minute die eben genannten Informationen.

Damit wir systematische Beobachtungen mit dem Radioteleskop durchführen konnten, brauchten wir genaue Positionsangaben über die zu untersuchenden Objekte. Auf der Internetseite <http://www.calsky.com/> gibt es die Möglichkeit, in Horizontalkoordinaten die Sonnenposition, bezogen auf den Standort Wuppertal, zu jedem Zeitpunkt berechnen zu lassen. Darüber hinaus beabsichtigten wir, weitere astronomische Objekte zu beobachten, die eine Radiostrahlung von 1420,4 MHz emittieren. Die Internetseite <http://cdsweb.u-strasbg.fr/> der Universität Strasbourg beinhaltet Archive über sämtliche Quellen im Weltraum. Das aktuellste Archiv ist aus dem Jahr 2000. Die für uns relevanten Quellen, die in späteren Kapiteln genauer benannt werden sollen, sind auf der Strasbourg Internetseite in Äquatorialkoordinaten angegeben. Um nicht jedes Mal eine Koordinatentransformation per Hand vornehmen zu müssen, schrieb Robert Bellin für diese Aufgabe das Programm *Radio.cpp*. Über die Funktion der Koordinatentransformation von Äquatorial- in Horizontalkoordinaten hinaus, verfügt es über viele weitere Möglichkeiten der Positionsberechnung. An dieser Stelle möchte ich auf die Examensarbeit von Robert Bellin verweisen. Die in diesem Kapitel genannten Computerprogramme sind in seiner Arbeit ausführlich erklärt. Zudem hat er die Quelltexte der Programme als Anhang beigefügt.

3.5 Messungen mit dem Radioteleskop

Gegen Ende Januar 2006 konnten wir schließlich mit unseren Messungen beginnen. Zu diesem Zeitpunkt absolvierten zwei Schüler einer Jahrgangsstufe 11 ein 3wöchiges Praktikum in der Fachgruppe Astroteilchenphysik. Im Rahmen ihres Praktikums wurden diese Schüler auch von uns betreut. Unter Aufsicht und Anleitung konnten die Praktikanten die ersten Messungen am Teleskop durchführen. Sowohl die Messungen der Praktikanten als auch unsere eigenen sind in der Tabelle 9.2 (Anhang) aufgeführt. In der ersten Spalte der Tabelle stehen die jeweils gemessenen Quellen. Wenn wir nicht bewusst die Position einer Quelle mit dem Teleskop angefahren haben, so steht in dieser Spalte das Kürzel „Pos“ für Position. Die Angaben der Elevation und des Azimuth sind jeweils zweimal zu jeder Messung vorhanden. In den Kapiteln 6.3.2.1 und 6.3.2.2 wird dieses Verfahren näher erläutert. Informationen über Datum und Beginn einer Messung sind in der Tabelle ebenfalls berücksichtigt. Die Spalte „Zeit Q“ ist nur bei konkreten Quellenmessungen ausgefüllt und gibt den Zeitpunkt an, zu dem sich die Quelle laut *Radio.cpp* an der in Spalte 1 (Azimuth) und Spalte 2 (Elevation) angegebenen Position befindet. Die Spalte „Messreihe“ gibt die Anzahl an, über die *Auswertung.cpp* in der Analyse der Messung gemittelt hat. In einer weiteren Spalte ist die Dauer der Messung in Minuten angegeben. Die restlichen Spalten enthalten die Ergebnisse der *Auswertung.cpp*-Analyse. Sobald das Programm einen Peak in den aufgenommenen Spektren gefunden hat (max. 3 Peaks), ist seine Frequenz, Halbwertsbreite und Integral in der Tabelle eingetragen. Während einer Quellenmessung wurden mehrere Spektren aufgenommen. Die Integrale der einzelnen Peaks in der Tabelle sind jeweils die größten von jeder Messung.

3.5.1 Sonnenmessungen

Am 24.01.06 begannen die Praktikanten mit den ersten Messungen. Sie beobachteten drei Sonnendurchgänge mit dem Ziel, das Auflösungsvermögen bzw. die Keulenbreite des Radioteleskops zu bestimmen. Wir betrachten die Sonne als punktförmige Quelle, die die Empfangskeule unseres Radioteleskops durchläuft. Für die Berechnung des Auflösungsvermögens benötigt man die Halbwertszeit Δt , die Zeit also, in der die detektierte Intensität vom Maximum auf die Hälfte abgesunken ist (siehe Kap.

2.7.1). Zusammen mit der Winkelgeschwindigkeit ω der Erde lässt sich das Auflösungsvermögen bzw. die Keulenbreite des Teleskops gemäß der Formel $\varphi = \Delta t \cdot \omega$ bestimmen.

Bei den Sonnenmessungen sollten die Praktikanten das Teleskop auf eine Sonnenposition, die mit *CalSky* berechnet wurde, zu einem festgelegten Zeitpunkt einstellen. Bei fester Position des Teleskops wurde eine halbe Stunde lang gemessen. Nach 15 Minuten sollte sich laut *CalSky* die Sonne im Zentrum der Empfangskeule befinden. Das Ergebnis war nicht zufriedenstellend. Die 2. Messung lieferte kein Signal. Die 1. und 3. Messung sahen in dieser Hinsicht anders aus: *Qradio* lieferte eindeutige Signale. Eine Analyse der Messung stellte uns dennoch wenig zufrieden, da unsere Erwartungen, dass die Integrale der „Sonnen-Peaks“ einen gaussförmigen Verlauf lieferten, nicht eintrafen. Mit diesem Ergebnis war eine Bestimmung der Halbwertszeit nicht möglich. Leider lassen diese Messungen den Schluss zu, dass unsere Messwerte nichts mit einer Sonnenmessung zu tun haben. Eine Quelle wie die Sonne, die konstant eine Radiostrahlung im 1,4 GHz Bereich emittiert, weist eine solche Schwankung in ihrer Intensität nicht auf (Abb. 3.13).

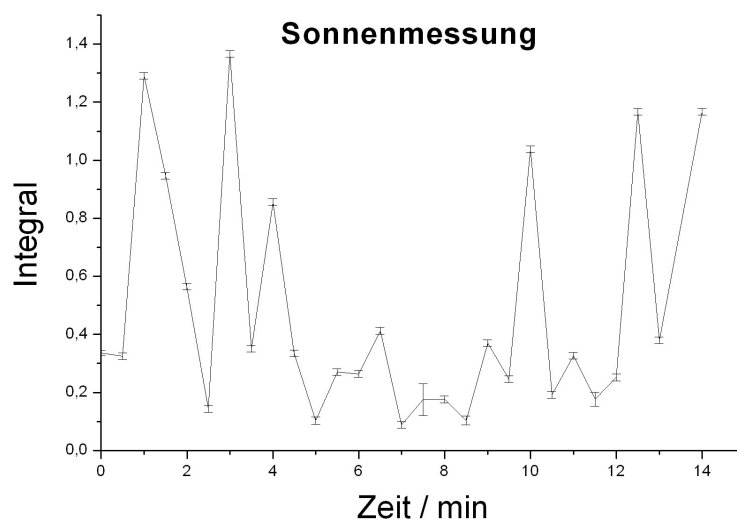


Abb. 3.13 15-minütiger Ausschnitt einer Sonnenmessung. Bei ca. 4 Minuten sollte sich die Sonne im Zentrum der Antennenkeule befinden. Diese Schwankung in der Intensität (Integrale der Peaks) deutet nicht auf das thermische Spektrum der Sonne hin.

3.5.2 Störquellen Messung – Erstellung einer Himmelskarte

Nach Durchführung der Sonnenmessungen wollten wir feststellen, ob eine 360° Abtastung der Umgebung eine Art Muster erkennen lässt, das z.B. auf terrestrische Störquellen hinweist. Auch diese „Himmelsmessung“ wurde von den Praktikanten durchgeführt. Sie durchliefen mit dem Radioteleskop alle Azimutheinstellungen von 0° bis 360° in 10°-Schritten, die Elevation bzw. die Höhe wurde dabei von 0° bis 45° (max. Höhe) in 5°-Schritten variiert. Einige Positionen mussten allerdings ausgelassen werden. Die Tür des Silos liegt ungefähr bei einer Azimutheinstellung von 200°. In diesem Bereich kann das Teleskop nicht über eine bestimmte Höhe gefahren werden, da es sonst an die Einbuchtung des Türrahmens stößt.

Später wurden die gemessenen Spektren (Fits) zuerst mit *Auswertung.cpp* quantitativ ausgewertet und danach mit *OriginPro 7.5* in einem 2-D Farbplot dargestellt (Abb. 3.14). Der Bereich, in dem nicht gemessen werden konnte, ist in dem Plot weiß markiert.

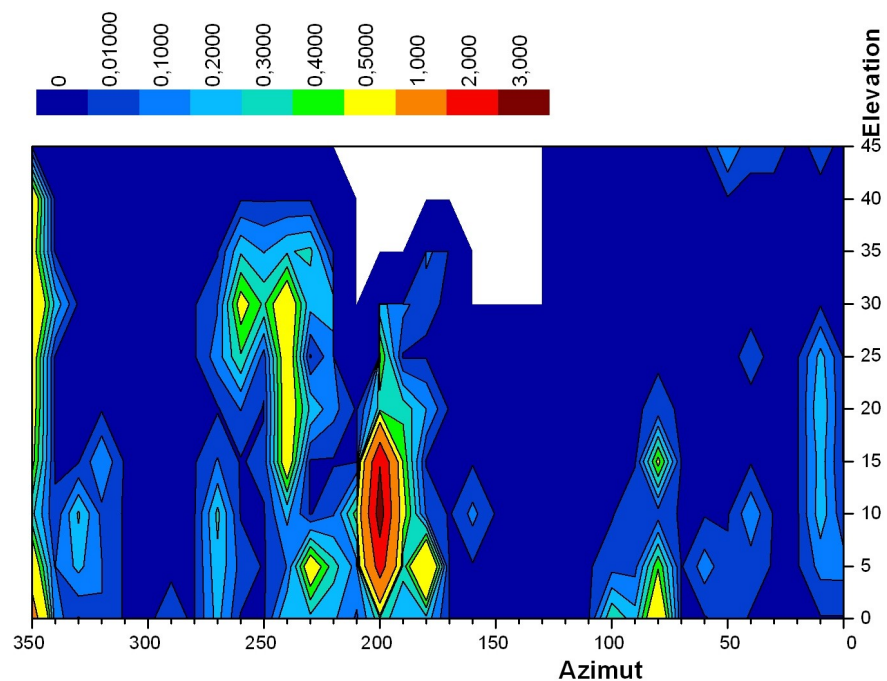


Abb. 3.14 „Himmelskarte“: Eine 360° Abtastung (10°-Schritte) der Umgebung mit einer Höhenvariation von 0° bis 45° (5°-Schritte). In dem weißen Bereich konnte nicht gemessen werden. Dort befindet sich die Tür des Silos.

Der stärkste Signalbereich liegt bei einem Azimuth von 200°. In dieser Richtung befinden sich die Hauptgebäude der Universität Wuppertal. Zusätzlich steht in derselben Richtung der Container des Fachbereichs Sportwissenschaften, der nur ca. 50 m von dem Teleskop entfernt ist. Diese Tatsache lässt vermuten, dass es sich bei dem starken Signal um eine terrestrische Quelle handelt, deren Ursprung im Universitätsgebäude zu suchen ist. Doch wo genau sollte diese Quelle zu finden sein? Ein direkter Sender, der im Bereich um 1420 MHz arbeitet, ist nicht möglich. Schließlich ist dieser Frequenzbereich nur für astronomische Beobachtungen „reserviert“ und darf nicht zum Senden auf der Erde verwendet werden. Da wir an dieser Stelle nicht weiter kamen, setzten wir uns erneut mit dem Messtechniker Norbert Menke in Verbindung. Er kam zu dem Schluss, dass die Signale durch Hilfs- bzw. Mischoszillatoren verursacht werden könnten, die im 1,4 GHz Bereich arbeiten. Obwohl es sich hier nicht um direkte Sender handelt, ist die Abstrahlung während ihrer Funktion hinreichend intensiv, um registriert zu werden.

3.5.3 Messung von Radioquellen

Im Anschluss an die Himmelskarten-Messung wollten wir gezielt Beobachtungen von bekannten Radioquellen vornehmen. Wir bedienten uns dabei der in Kapitel 3.4 erwähnten Internetseite <http://cdsweb.u-strasbg.fr/> der Universität Strasbourg. In deren aktuellsten Archiv aus dem Jahre 2000 konnte eine direkte Suche nach 1,4 GHz Radioquellen durchgeführt werden. Wir schränkten die Suchergebnisse ein, indem ein minimaler Strahlungsfluss von 10 Jansky vorausgesetzt wurde. In dem Buch *Handbuch für Sternfreunde* von G. D. Roth fanden wir weitere 1,4 GHz Quellen. Die Radioquellen beider Archive trugen keinen uns bekannten Namen und wurden nur unter einem Ziffercode aufgeführt. Aus diesem Grund haben wir alle Quellen durchnummeriert und in einer Tabelle zusammengefasst (Tab. 9.1; Anhang). Später fanden wir allerdings unter der Internetadresse http://observe.phy.sfasu.edu/Misc/wagers/1420_Sources.html die Äquatorialkoordinaten der bekannten Radioquellen Krebsnebel, CygnusA, CassopeiaA, Orion Nebel und VirgoA. Ein Vergleich mit unserer Tabelle

zeigte, dass wir diese Radioquellen bereits aufgeführt hatten. Die Äquatorialkoordinaten der Quellen wurden nun mithilfe des Programms *Radio.cpp* in Horizontalkoordinaten umgerechnet, so dass wir gezielte Messungen mit dem Teleskop vornehmen konnten. Eine Messung der Quelle 23 am 8.02.06 lieferte uns ein positiv stimmendes Ergebnis. Abbildung 3.15 zeigt die Quelle in dem Zeitraum von 15:00 bis 15:11 auf der Position 202° Azimuth und 18° Elevation. Es scheint, als wenn die Quelle aus dem Blickfeld unseres Teleskops „hinausgewandert“ wäre. Später, um 15:33, haben wir wieder auf derselben Position für 8 Minuten gemessen (Abb. 3.16). Diesmal war das Signal fast vollständig verschwunden. Nachdem wir uns die Messungen mit *OriginPro 7.5* angeschaut hatten, waren wir ziemlich sicher, dass es sich um ein astronomisches Objekt handelte. Diese zeitliche Entwicklung deutete nicht auf eine terrestrische Quelle hin.

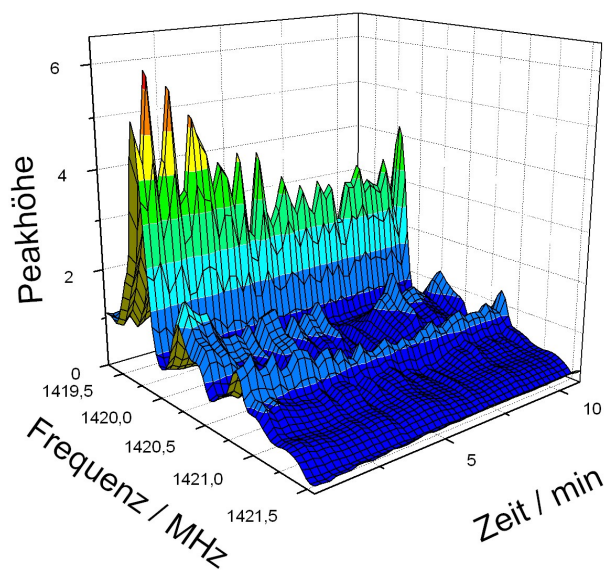


Abb. 3.15 Die Quelle 23 scheint von 15:00 bis 15:11 (8.2.06) aus der Empfangskeule des Radioteleskops „hinauszuwandern“. Die Spektren der Messung sind in zeitlicher Abfolge nebeneinander gesetzt (ohne Abzug des Untergrundes).

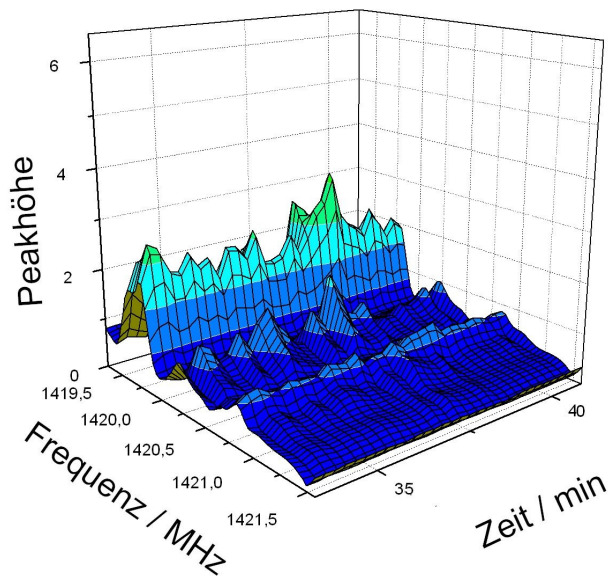


Abb. 3.16 Dieselbe Position wie in Abb. 3.15 von 15:33 bis 15:41. Das Signal ist deutlich schwächer geworden.

Mit den anderen Messungen waren wir nicht zufrieden. Das Ziel, die Messungen von Quellen zu bestätigen, indem wir sie zu anderen Zeitpunkten und Position maßen, war nicht erfolgreich. Keine der gemessenen Quellen konnten wir wirklich reproduzieren. An manchen Tagen erhielten wir ein eindeutiges Signal, wenn wir die Position von CygnusA mit dem Teleskop ansteuerten. An anderen Tagen wurde kein Signal registriert. Meistens war letzteres der Fall, wenn wir CygnusA bei einer höheren Elevation als 40° beobachtet haben.

3.5.4 Messung der Milchstrasse

In Kapitel 2.5.1.1 wurde mit der Tangentialpunktmethod ein Verfahren erläutert, mit dem sich eine Zuordnung der Rotationsgeschwindigkeit von Objekten in der Milchstrasse zu deren Abstand R vom galaktischen Zentrum ermitteln lässt. Dieses Verfahren wollten wir anwenden.

Mithilfe von *Radio.cpp* konnten wir Messreihen erstellen, die auf das Tangentialpunktverfahren zugeschnitten sind. Dabei berechnet das Programm für alle drei Minuten Positionen entlang der galaktischen Länge l mit geringer Abweichung in der galaktischen Breite b von 0° . Dort ist das Vorkommen an neutralem Wasserstoff am größten und somit auch die Emission der 21 cm-Linie. Die erhoffte unterschiedliche Frequenzverschiebung der 21 cm-Linie bei unterschiedlichen galaktischen Längen l konnten wir aber nicht nachweisen. Bei der Messung der galaktischen Ebene registrierten wir kein Signal. Das Teleskop ist möglicherweise nicht sensibel genug eingestellt, um die Emissionslinie der neutralen Wasserstoffwolken messen zu können.

3.6 Fehlerquellensuche

Mit den in Kapitel 3.5 beschriebenen Messungen konnten wir nicht zufrieden sein. Aus diesem Grund versuchten wir, Ursachen für diese Messresultate zu finden. In diesem Kapitel ist die Fehlerquellensuche schrittweise erläutert.

3.6.1 Überprüfung des Empfangs

Bei der Ursachenforschung stellten wir uns erst einmal die Frage: Kann das Radioteleskop überhaupt Signale in einem Frequenzbereich von 1420,4 MHz messen? Um eine Antwort auf diese Frage zu bekommen, kontaktierten wir wiederholt den Messtechniker Norbert Menke. Herr Menke besitzt einen Sender, der bei Bedarf eine Frequenz von 1420,4 MHz emittieren kann.

So postierte er sich mit diesem Sender auf einem Universitätsgebäude in ca. 180 m Entfernung vom Radioteleskop (Abb. 3.17). Mit Hilfe von Walkie-Talkies standen wir im ständigen Kontakt. Um das Silo des Radio-



Abb. 3.17 Der 1,4 GHz Sender ist an dem Geländer eines Universitätsgebäudes befestigt. Das Radioteleskop befindet sich in ca. 180 m Entfernung (Hintergrund).

teleskops ist ein Gitter aufgestellt. Da sich dieses Gitter genau in unserer Messrichtung (Sender / Teleskop) befand, öffneten wir es auf Anweisung von Herrn Menke, um einen Einfluss des Gitters auf unsere Messung zu verhindern. Sobald Herr Menke seinen Sender eingestellt hatte, registrierte das Teleskop und somit auch *Qradio* ein relativ starkes Signal bei 1420,4 MHz. Wiederholtes Ein- und Ausschalten des Senders zeigte uns, dass das gemessene Signal tatsächlich vom Sender herrührte. Nach der eindeutigen Bestätigung des Signals musste die optimale Position des Radioteleskops zum Sender herausgefunden werden. Bei fester Position des Senders variierten wir das Teleskop, bis ein maximales Signal registriert wurde. Mit den Werten aus der Positionsbestimmung konnten wir im Nachhinein die Keulenbreite des Teleskops bestimmen. Die horizontale Keulenbreite entnahmen wir aus den Spektren (Fits) bei einer festen Elevation von 10° (Dipol steht parallel zum Boden). In Abbildung 3.18 ist der Azimuthwinkel gegen die Peakhöhe des Signals aufgetragen. Mittels Gauss-Fit an die gemessenen Punkte erhielten wir die Keulenbreite $\varphi = 4,78 \pm 0,69^\circ$. Analog dazu wurde die vertikale Keulenbreite bestimmt. Das Variieren der Elevation bei einem festen Azimuth von 216° lieferte uns

eine Keulbreite von $\varphi = 4,35 \pm 1,66^\circ$ (Abb. 3.19). Die Werte weichen 2,5 % bzw. 11 % von der theoretischen Keulbreite ($\varphi = 4,9$) ab.

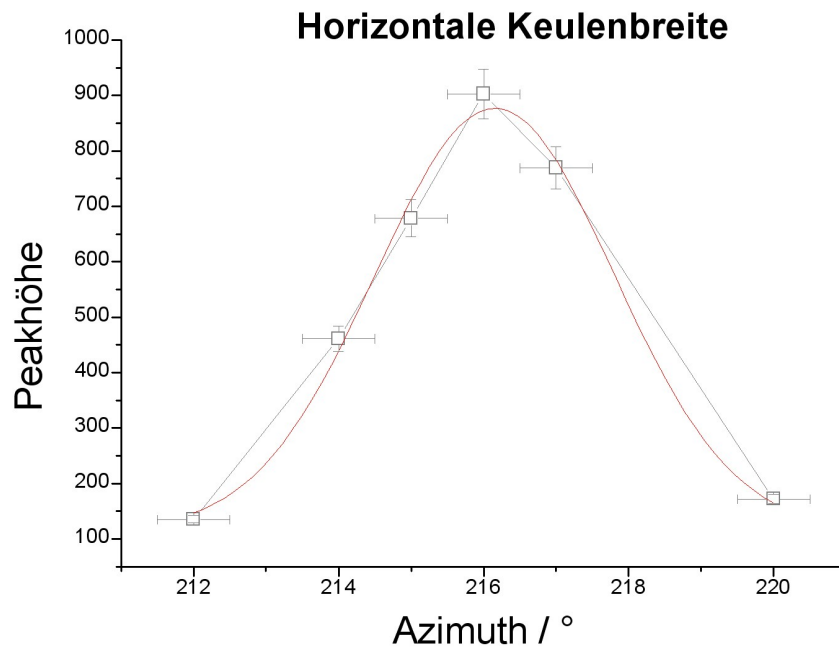


Abb. 3.18 Bei einer festen Elevation von 10° wurde der Azimuth des Teleskops von 212° bis 220° variiert, während der Sender auf dem Gebäude seine Position behielt.

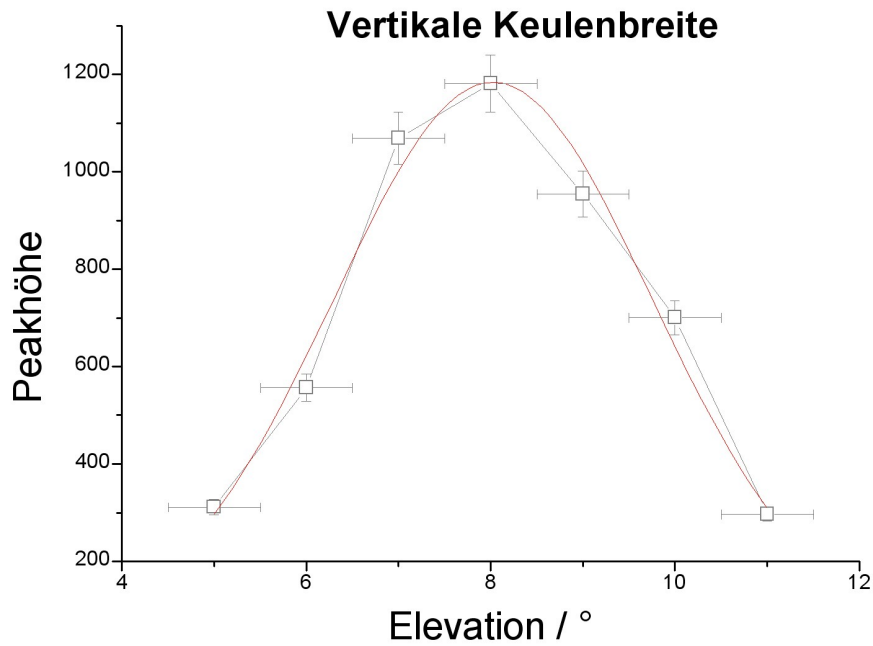


Abb. 3.19 Bei einem festen Azimuth von 216° wurde die Elevation des Teleskops von 5° bis 11° variiert. Der Sender behält seine Position.

Weiterhin wollten wir herausfinden, ob die ganze Bandbreite im *Qradio* Fenster von 1419,2 MHz bis 1421,6 MHz auf den Sender reagieren würde. Herr Menke durchlief in 0,2 MHz Schritten das komplette Fenster. *Qradio* registrierte die entsprechenden Frequenzverschiebungen, allerdings mit kleinen Abweichungen (Abb. 3.20). Eine Korrektur dieser Abweichungen wurde daraufhin in *Auswertung.cpp* integriert.

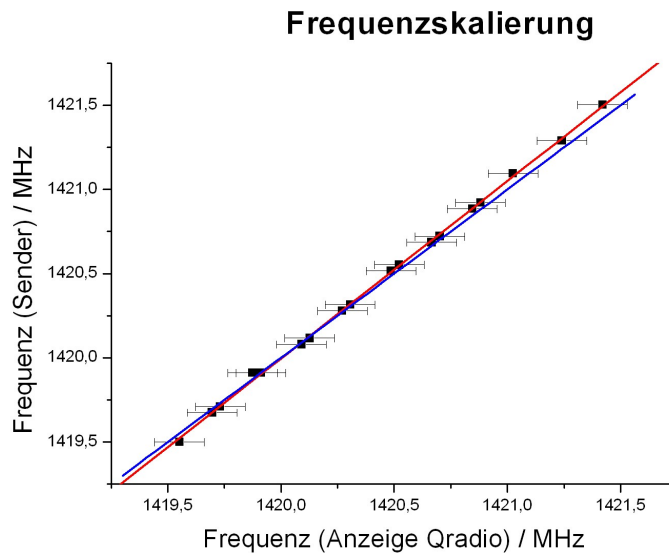


Abb. 3.20 Die Frequenzanzeige von *Qradio* ist gegen die Frequenzvorgabe des Senders aufgetragen. Die gemessenen Punkte auf der roten Geraden weichen nur unwesentlich von der blauen Idealgeraden ab.

Leider konnte keine genaue Signalstärkenkalibration des Teleskops vorgenommen werden. Mit Herrn Menkes Equipment war dieses Problem nicht zu lösen. Dennoch wollten wir versuchen, ungefähr eine Vorstellung davon zu bekommen, in welchen Bereichen das Teleskop misst. Die Strahlungsdaten des Senders von Herrn Menke waren uns dabei behilflich. Die Ergebnisse unserer Überlegungen sind in Kapitel 3.7 erläutert.

3.6.2 Gittermessung

In Kapitel 2.6.2 wurde erwähnt, dass der Messtechniker Norbert Menke auf ein Öffnen des Gittertores während der Messung Wert legte. Er vermutete, dass die Nähe des Gitters Einfluss auf den Empfang einer Messung habe. Zur Überprüfung dieser Vermutung richteten wir das Teleskop auf das Universitätsgebäude. Wie schon erwähnt, wird in dieser Richtung ständig ein starkes Signal gemessen. Genau in dieser Richtung liegt auch das Tor des Gitters. Bei einem Azimuth von 210° nahmen wir

einige Spektren auf, wobei eine Variation der Elevation erfolgte. Jede Position wurde im ständigen Wechsel bei geöffnetem und geschlossenem Gitter gemessen, um eine unterschiedliche Signalstärke von der „Universitätsquelle“ zu berücksichtigen.

Die Spektren wurden später mit *Auswertung.cpp* gemittelt und in der Tabelle 9.2 abgetragen. Die Analyse bestätigte eindeutig einen Einfluss des Gitters. Es zeigte sich aber auch, dass bei einigen Positionen das Signal ohne Gitter größer war, bei anderen Positionen mit Gitter. Für Herrn Menke war dieses Ergebnis keineswegs erstaunlich, da das fest positionierte Gitter wegen der verschiedenen Teleskoppositionen unterschiedliche Reflexionen hervorruft und somit das empfangene Signal auf unterschiedliche Weise verfälscht.

Abschließend können wir festhalten, dass das Gitter einen Einfluss auf den Empfang des Teleskops hat und aus diesem Grund entfernt werden sollte.

3.6.3 Position des Radioteleskops

Bei der Fehlerquellensuche stellte sich auch die Frage, ob wir der Positionsangabe der Steuerkonsole trauen konnten. Es wurde uns zwar zuvor versichert, dass die vorgenommenen Einstellungen bis auf kleine Fehler (max. $1/2^\circ$) korrekt waren, dennoch wollten wir wegen unserer unbefriedigenden Resultate alles noch einmal überprüfen. Dies beinhaltete zum einen die Kontrolle der Azimuth- und Elevationseinstellung. Zum anderen musste überprüft werden, ob es bei dem ständigen Hin- und Herfahren des Teleskops zu Positionsverschiebungen kommt.

3.6.2.1 Positionsverschiebung

Bei einer Besprechung der Gruppe Astroteilchenphysik wurde die Möglichkeit in Betracht gezogen, dass sich die Position des Teleskops durch schnelles und ständiges Hin- und Herfahren verschiebt. Um dies zu überprüfen, ersetzten wir den kleinen Reflektor am Ende der Antenne durch einen Laserpointer. Dann fuhren wir das Teleskop mithilfe der Angaben der Steuerelektronik auf ca. 50 verschiedene Positionen. Durch den Strahl des Laserpointers konnten wir diese Position mit einem wasserlöslichen-Stift markieren (Abb. 3.21). Die nächste halbe Stunde blieb das Teleskop

fast ständig in Bewegung, wir führten schnelle und abrupte Positionswechsel durch.



Abb. 3.21 An der Antenne ist mit Klebeband ein Laserpointer befestigt. Die angesteuerten Positionen des Teleskops wurden mithilfe des Laserstrahls an der Siloinnenseite markiert.

Mithilfe des Laserpointer kontrollierten wir die Übereinstimmung der Markierungen an der Wand mit den Angaben der Steuerkonsole. Es konnten keine Positionsabweichungen festgestellt werden.

3.6.2.2 Überprüfung der Elevationseinstellung

Hinter dem Radiospiegel besteht ein Teil des Gerüsts aus einem rechtwinkligen Metallrahmen (Abb. 3.4). Die längeren Seiten dieses Rahmens stehen bei einer Elevation von 0° senkrecht zum Boden. Wird das Tele-



skop nach oben bewegt, so dreht sich dieser Rahmen mit. Durch Bestimmung des Winkels vom Rahmen zur Horizontalen erhält man auch den Höhenwinkel des Radioteleskops. Dies machten wir von 0° bis 45° in 5° -Schritten

Abb. 3.22 Mittels Maßband wurde die Elevation des Radioteleskops bestimmt.

(Angaben der Steuerkonsole). Mit einem Maßband wurden die Abstände der

beiden kürzeren Seitenlängen des Rahmens von einem fest gewählten Fixpunkt ermittelt (Abb. 3.21). Die Relation beider Abstände lieferte den Winkel. Diese Messung ergab, dass die tatsächlichen Höhenwinkel von den Angaben der Steuerkonsole abweichen. In Abbildung 3.22 sind die Angaben der Steuerkonsole gegen die berechneten Winkel aufgetragen. Die Punkte weichen von der blauen Idealgeraden ab, sie liegen sowohl über als auch unter dieser.

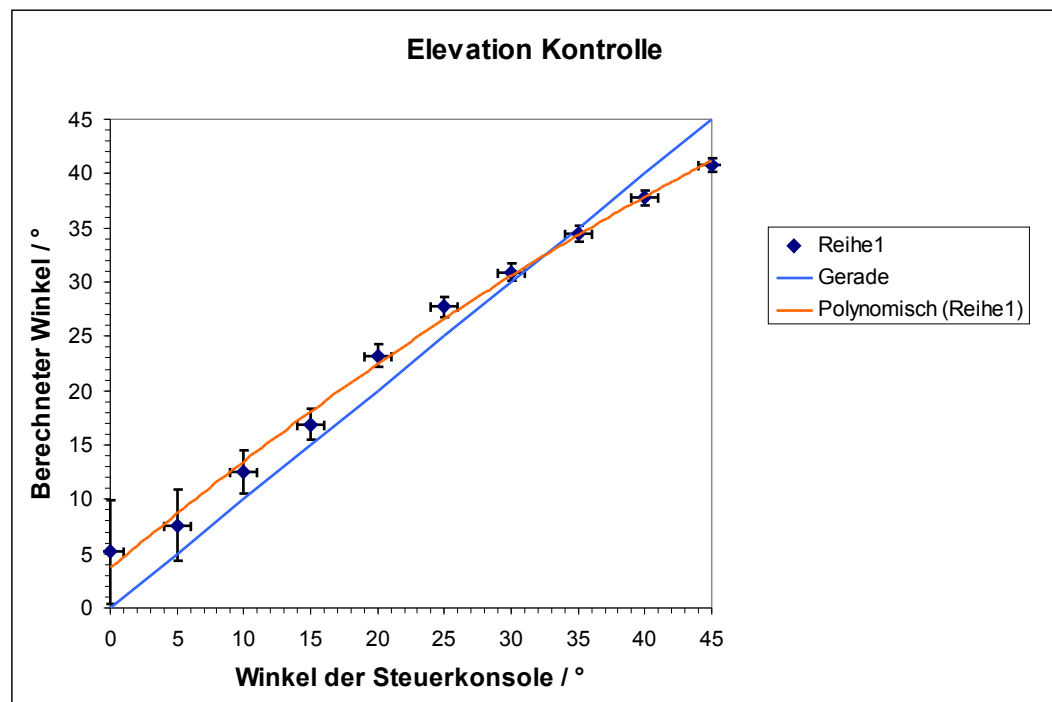


Abb. 3.23 Die Winkelangaben der Steuerkonsole sind gegen die (tatsächlichen), berechneten Winkel aufgetragen. Es gibt keinen linearen Verlauf. Bis 30° liegen sie über und danach unter der blauen „Idealgeraden“.

Die 30°-Einstellung der Steuerkonsole stimmte mit unserer Messung weitestgehend überein (31 ± 0,8°). Winkelmaße, die größer als 30° sind, wurden kleiner gemessen (bei 45° der Steuerkonsole bestimmten wir nur

41 0,6°). Winkelmaße, die kleiner als 30 ° sind, wurden größer gemessen (der 20°-Winkel beträgt nach unserer Messung 23 1,1°). Die Ergebnisse im Winkelbereich von 0° bis 10° bestätigen die bereits genannten Tendenzen, dennoch sind die berechneten Werte in diesem Bereich mit zu großen Fehlern (bis 100%) behaftet, als dass man dort wirklich eine Aussage treffen könnte. Die Maßband-Methode ist bei den kleinen Winkeln zu ungenau.

Diese Erkenntnis über die Elevationsverschiebung wurde in späteren Messungen anhand des Fitergebnisses umgerechnet. Zudem folgte eine entsprechende Ergänzung zu den bereits ausgewerteten Daten. Tabelle 9.2 enthält eine Spalte mit der Beschreibung „El Motor“. Unter dieser Spalte sind die von *Radio.cpp* berechneten Höhenwinkelangaben der beobachteten Objekte und somit auch unsere bis zu diesem Zeitpunkt gewählten Einstellungen (Steuerkonsole) aufgelistet. Spalte „El real“ enthält die Winkelangaben, unter denen wir tatsächlich gemessen haben.

3.6.2.3 Überprüfung der Azimutheinstellung

Nachdem wir die Fehler in der Elevationseinstellung des Teleskops festgestellt hatten, folgte eine Kontrolle der Azimutheinstellung. Die Nullposition für das Azimuth ist in Südrichtung definiert. Genau wie unsere Vorgänger hatten auch wir zu Anfang unseres Projektes diese Südeinstellung mit einem Peilkompass kontrolliert und die bestehende Süd-Markierung im Silo bestätigt. Damit waren wir später nicht mehr zufrieden. Schließlich könnte eine Richtungsbestimmung mit einem Kompass einen Fehler von

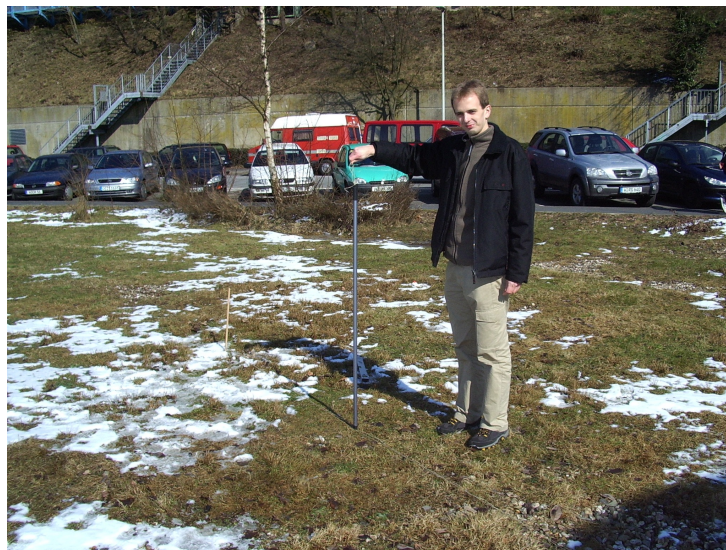


Abb. 3.24 Der Schatten eines frei hängenden symmetrischen Stabs markiert die Südrichtung. Am 17.03.06 stand die Sonne um 12:40 Uhr im Süden.

mehreren Grad aufweisen. Deshalb wählten wir eine genauere Richtungsbestimmung. Die Sonne sollte als Orientierungspunkt dienen. *Calsky* lieferte uns für den 17.03.06 den Zeitpunkt, an dem die Sonne im Süden steht. Der Schattenwurf eines frei hängenden symmetrischen Stabs zu dem genannten Zeitpunkt wurde mit einer Kordel in das Silo übertragen (Abb. 3.23). Dabei wurde das eine Ende der Kordel durch ein Holzpflock auf der Grünfläche fixiert (Abb. 3.24), und das andere durch ein Lot am Teleskop. Unsere Markierung weicht (2 ± 1)° Richtung Osten von der ursprünglichen Südmarkierung ab. Auch diese Feststellung haben wir in unseren späteren Messungen berücksichtigt und in der Tabelle 9.2 für unsere alten Messungen eingetragen. Analog zur Elevationangabe wurde auch hier eine zusätzliche Spalte angelegt, die den Azimuthunterschied von 2° berechnet.



Abb. 3.25 Der „Südschatten“ wurde mit einer Kordel in das Silo übertragen.

3.7 Schlussmessungen und -analysen

Im Anschluss an die Fehlerquellensuche folgten einige Messungen unter den korrigierten Positionsangaben. Wir begannen zunächst mit der Radioquelle CygnusA. Die bisherigen Messungen dieser Radioquelle hatten keine konstanten Ergebnisse geliefert. Bei Betrachtung der alten Messungen fällt auf, dass bei Höhenwinkeln um 30° Signale von CygnusA registriert wurden, bei Höhenwinkel ab 40° dagegen nicht. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Elevationskontrolle schien dies plausibel.

Wir erinnern uns: Höhenwinkel um 30° auf der Steuerkonsole weichen nur unwesentlich von der tatsächlichen Steigung ab, Höhenwinkel ab 40° hingegen bis zu 4° . Diese Abweichung liegt in der Größenordnung der Keulenbreite des Radioteleskops. Wir schienen die Lösung gefunden zu haben. Doch dann kam die Enttäuschung. Eine CygnusA-Messung bei einer Elevation von 41° unter Berücksichtigung der Positionskorrektur lieferte keine Signale.

Anschließende Messungen der Sonne ergaben ebenfalls kein Resultat. Somit standen wir immer noch vor dem Problem, dass unsere Beobachtungen nicht reproduzierbar waren und eine Erklärung für dieses Phänomen gesucht werden musste. Die Analyse einer früheren CygnusA-Messung bzw. Messreihe brachte schließlich eine wichtige Erkenntnis. Bei dieser Messung hatten wir den Verlauf von CygnusA verfolgt (Abb. 3.25). Bei einem Azimuth von ungefähr 250° (die relative Planetenbahn variiert täglich) tritt CygnusA in das Sichtfenster unseres Teleskops (41°). Am 10. März 2006 nahmen wir um 13:39 Uhr bei einer Position von 255° Azimuth und 41° Elevation die ersten Spektren von CygnusA auf, ohne ein Signal zu erhalten. Die nächste Messung folgte um 14:06 Uhr bei 251° Azimuth und 39° Elevation. Wir registrierten ebenfalls nichts.

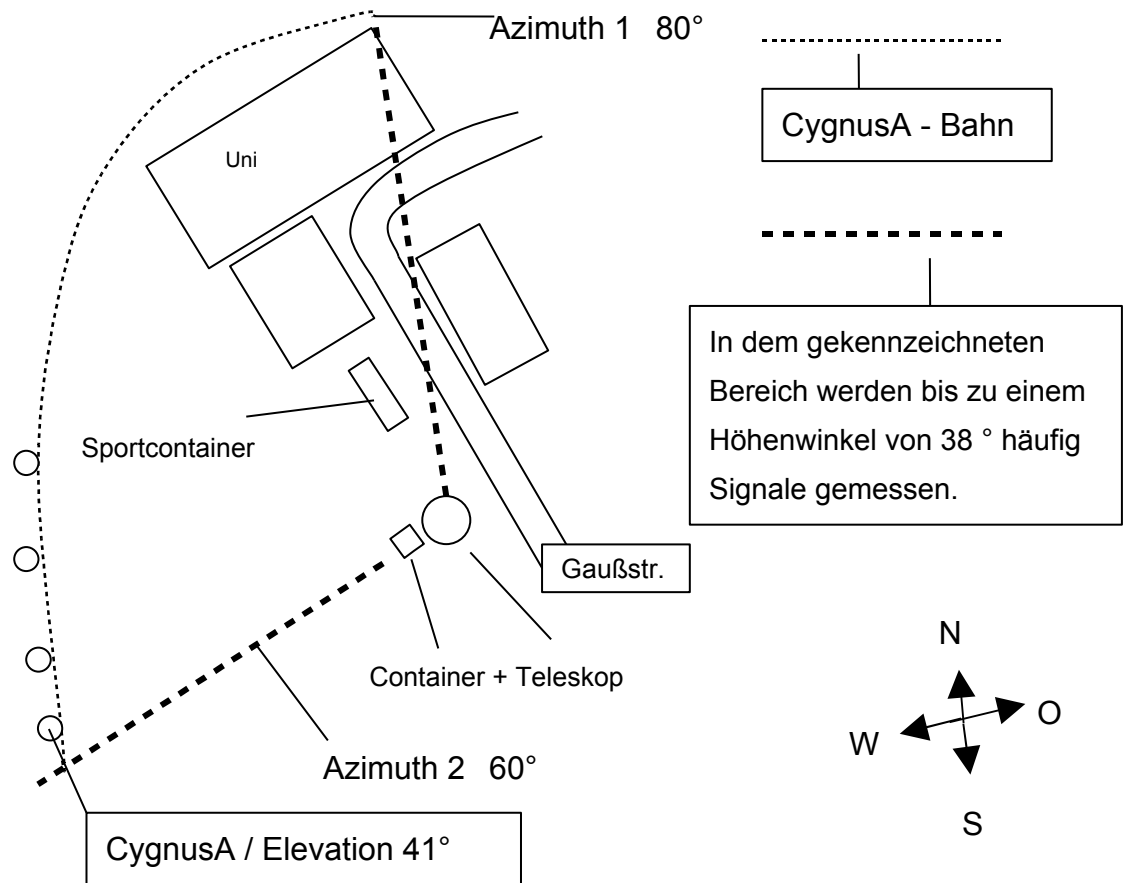


Abb. 3.26 Skizze des Radioteleskops Wuppertal und Umgebung aus der Vogelperspektive.

Schließlich wurde CygnusA nacheinander bei den Positionen ($244^\circ / 34^\circ$), ($239^\circ / 31^\circ$) und ($238^\circ / 30^\circ$) gemessen. Die Spektren wiesen zwei relativ starke Peaks auf. Wohl mehr aus instinktiven Gründen wichen wir dann von unserer Vorgehensweise ab. Das Teleskop wurde um 15:36 Uhr auf die Position ($238^\circ / 22^\circ$) gefahren. CygnusA lag weiter oben, bei ($239^\circ / 28^\circ$). Dennoch wies das gemessene Spektrum die gleichen Peaks mit ähnlicher Intensität auf. Weitere Messungen bei einer noch niedrigeren

Elevation lieferten dasselbe Ergebnis, teilweise waren die Peaks noch stärker. Das Ergebnis dieser Messreihe ließ nur folgenden Schluss zu: Wir hatten die ganze Zeit überhaupt nicht CygnusA gemessen. Die registrierten Signale mussten offensichtlich von der Universität kommen. Und so war es! Wenn wir das Teleskop direkt auf die Universitätsgebäude steuerten, erhielten wir ein identisches Spektrum, allerdings mit noch größerer Intensität. Offensichtlich sind die „Universitätssignale“ auch bei Höhenwinkeln mit bis zu 38° von Relevanz. Als Ursache muss hier das Reflexionsverhalten an Gitter und Container angenommen werden.

Betrachtet man unter diesen Voraussetzungen unsere bis jetzt durchgeführten Messungen, fällt auf, dass fast alle Messungen, bei denen eindeutige Signale gemessen wurden, im Bereich zwischen 180° und 260° Azimuth unter einer Elevation von 38° stattfanden. Ein Vergleich mit der Himmelskarte (Abb. 3.14) aus Kapitel 3.5.2 zeigt das gleiche Resultat. Damals interpretierten wir nur die ganz starken Signale im Bereich von 200° Azimuth und 0° Elevation als Strahlung nicht identifizierbarer Universitätsquellen. Jetzt vermuten wir, dass der ganze Bereich von 180 bis 260° damit zu erklären ist. Dies würde wiederum bedeuten, dass wir noch nie eine astronomische Quelle gemessen haben.

Diese Feststellung wird durch Überlegungen, die mithilfe der Messungen von Herrn Norbert Menke (Kap. 3.6.1) gemacht wurden, untermauert. Herr Menke hat unter anderem mit einer Strahlungsleistung von 3,16 Nanowatt gesendet. Unter Berücksichtigung der Freiraumdämpfung, die aufgrund der Entfernung Sender / Radioteleskop (180m) relevant ist, und der Antennen- und Sendercharakteristika (Raumwinkel, ...) entspricht dies einer Strahlungsflussdichte am Radioteleskop von

$F_{\text{Sen}} = (7,7 \pm 3,4) \cdot 10^{-15} \text{ W/m}^2\text{Hz}$ oder auch $F_{\text{Sen}} = 7,7 \cdot 10^{11} \text{ Jy}$ (Jansky). Der

große Fehler der Strahlungsflussdichte kommt wegen der ungenauen Entfernungsinformation und Richtgrößen der Antenne zu Stande. Bei der Messung mit 3,16 Nanowatt registrierte *Qradio* ein Signal mit einer Peakhöhe von 10. Wegen des charakteristischen „Verstärkungsuntergrunds“ (Kap. 3.3.2) muss ein eindeutig registrierbares Signal mindestens 0,5 betragen, also 1/20 des gemessenen Peaks von 10. Dies bedeutet, dass am Radioteleskop eine Mindestflussdichte von $1/20 F_{\text{Sen}} = 4 \cdot 10^{-16} \text{ W/m}^2\text{Hz} = 40 \text{ GJy}$ vorliegen muss, damit wir dies als Signal deuten können. Ein Ver-

gleich mit der für uns stärksten astronomischen Quelle, die Sonne, liefert ein interessantes Ergebnis. Die Strahlungsflussdichte der Sonne (bei 5770 K) für die Frequenz 1420,4 MHz beträgt nur $F_{\text{Son}} = 2,4598 \cdot 10^{-22} \text{ W/m}^2\text{Hz}$ 24.000 Jy.

Zudem ist noch zu berücksichtigen, dass Herr Menke die Polarisationsrichtung seines Senders auf die Ausrichtung unseres Dipols angepasst hat. Die Strahlung der Sonne ist unpolarisiert. Deshalb muss die errechnete Strahlungsflussdichte der Sonne zusätzlich mit dem Faktor 0,5 multipliziert werden. Man erhält somit $0,5 F_{\text{Son}} = 12.000 \text{ Jy}$, also nur ca. $3 \cdot 10^{-5} \%$ der errechneten Mindestflussdichte. Stimmen unsere Berechnungen, so wird verständlich, dass wir mit dem Radioteleskop keine Radioquelle messen konnten. Wir vermuten, dass sich diese Tatsache durch eine intakte Verstärkungsfunktion („gain“) in *Qradio* beheben lässt. Aber auch dann wird eine astronomische Beobachtung in dem Azimuthbereich 180° bis 260° bis zu einer Elevation von 38° nicht möglich sein, da die Signale der künstlichen Quellen der Universität in diesem Bereich zu hoch sind. Die Berechnungen der Strahlungsflussdichten sind in der Examensarbeit von Robert Bellin enthalten, da er die benötigten Formeln in seinem Theorieteil beschrieben hat.

Zusätzlich ist noch zu erwähnen, dass die „switched“-Funktion an den letzten Tagen unserer Arbeit an dem Radioteleskop häufig ansprang. Ein konstantes Nutzen dieser Option in Zukunft wäre wünschenswert. Durch das integrierte „Rauschen“ der Noise-Diode verschwindet nämlich die charakteristische Verstärkung der Auswerteelektronik (Kap. 3.3.2). Wenn kein eindeutiges Signal registriert wird, weisen nun die Y-Werte im Spektrum die gleiche Höhe über das komplette Fenster auf. Sollte diese Funktion durch vollständige Wiederherstellung des Programms *Qradio* bald immer nutzbar sein, müsste das Analyseprogramm *Auswertung.cpp* insofern erweitert werden, dass es auch die von *Qradio* separat abgelegten Fits des „Rauschen“ der Noise-Diode berücksichtigt.

4. Einsatz im Praktikum der Physikstudenten

Das Radioteleskop Wuppertal bietet Physikstudenten der Universität Wuppertal in Rahmen des Projektpraktikums (PP) die Möglichkeit, Aspekte der Astronomie experimentell kennen zu lernen. Mit dem Radioteleskop

und entsprechender Messapparatur lassen sich diverse Messungen im Radiofrequenzbereich bei 1420 MHz durchführen. Vor diesem Projektpraktikum haben die Physikstudenten schon 2 physikalische Praktika absolviert, deren Prinzip und Ziele kurz erläutert werden, da die beiden Praktika experimentelle Fertigkeiten vermitteln, die Grundvoraussetzungen für das PP sind.

Das Anfängerpraktikum ist seit dem Jahr 2000 in die beiden Praktika AP1 und AP2 unterteilt. Im AP1 werden die Studenten des 1. oder 2. Semesters mit jeweils 12 Versuchen konfrontiert. Jeder Versuch soll in Partnerarbeit innerhalb eines Nachmittages (4-5 Stunden) durchgeführt werden. Die Abgabe des Versuchsprotokolls (in der Regel handschriftlich) erfolgt am selben Tag. Im Anfängerpraktikum erfahren die Studenten erstmals die Physik als experimentelle Wissenschaft. Die Versuche haben einen leichten bis mittleren Schwierigkeitsgrad. Die Vorgaben sind eindeutig. Ein Versuchsheft, in dem die Theorie vollständig enthalten ist, beinhaltet klare Anweisungen der Versuchsdurchführungen. Die Studenten sollen ihre volle Konzentration auf den Versuchsaufbau und -ablauf und die spätere Analyse richten. Das AP2 enthält 14 Versuche und wird von Studenten des 2. oder 3. Semesters durchgeführt. Der Ablauf und die Kriterien sind dieselben wie beim AP1.

Nach dem Grundstudium folgt das Fortgeschrittenenpraktikum FP. Dieses Praktikum umfasst 10 Versuche. 17 Versuche stehen den Studenten zur Auswahl, die gewissen Kriterien unterliegt. Die Versuche des FP sind wesentlich anspruchsvoller und komplexer, ihre Durchführung und Auswertung laufen selbständiger als beim Anfängerpraktikum. Jeder Versuch dauert ungefähr 8 – 10 Stunden. Entsprechend steht für die Versuchsbeschreibung mehr Zeit zur Verfügung (innerhalb von 2 Wochen muss ein ausführliches Versuchsprotokoll bei dem jeweiligen Betreuer abgeliefert werden. Dieses ist digital bearbeitet und umfasst ungefähr 15 - 20 Seiten). Auch im FP erhalten die Studenten eine Versuchsanleitung. Der Theorie-Teil ist kurz gehalten und enthält nur einen Teil des nötigen Hintergrundwissens. Mithilfe von beigefügten Literaturangaben müssen die Physikstudenten diese physikalische Basis durch Bibliotheks- und Internetrecherche ergänzen.

4.1 Projektpraktikum

Das PP ist das dritte und letzte physikalische Praktikum im Physikstudium. Auch hier haben die Praktikanten die Möglichkeit, die durchzuführenden Versuche selbst zu bestimmen. Das Praktikum umfasst 3 Versuche bzw. Projekte, deren (betreute) Arbeitszeit jeweils ca. 32 Stunden beträgt. Die Versuche des PPs verlangen ein wesentlich selbständigeres Handeln. Die Studenten sollen im Rahmen dieses Praktikums erfahren, was es bedeutet, wissenschaftlich zu arbeiten. Sie werden an aktuelle Fragestellungen und Methoden der Forschung herangeführt und lernen, die selbstständige Planung, Durchführung, Auswertung und Dokumentation anspruchsvoller Experimente und Projekte zu vertiefen. Darüber hinaus wird durch das Praktikum Gelegenheit geboten, in einigen Forschungsgruppen zu arbeiten und die Arbeitsweise innerhalb der Fachgruppen kennen zu lernen. Diese Möglichkeit erleichtert später die Auswahl einer geeigneten Diplomarbeit.

Ein Projekt wird in der Regel von zwei Studenten durchgeführt, die im Anschluss einen Bericht von 15 – 20 Seiten verfassen. Alternativ können die Praktikanten in Absprache mit dem Betreuer eine Publikation (max. 10 Seiten) schreiben. Diese muss sich in ihrer Gliederung und äußeren Form an den üblichen wissenschaftlichen Publikationen orientieren.

Zum Abschluss eines Projekts wird ein (gemeinsamer) Seminarvortrag von ungefähr 45 Minuten Dauer gehalten, der üblicherweise im Rahmen eines Seminars der jeweiligen Forschungsgruppe stattfindet. In dem Vortrag werden die erzielten Resultate des Projektes vorgestellt und mit der Forschungsgruppe diskutiert.

In den folgenden Kapiteln werde ich Vorschläge machen, wie der Ablauf des Projektes „Radioteleskop“ im Rahmen des Projektpraktikums aussehen könnte. Ein fertiges Konzept für Studenten im Sinne einer Versuchsanleitung, die einen Theorieteil, eine konkrete Versuchsdurchführung und -anleitung beinhaltet, wird es nicht geben. Dieses würde dem Prinzip des Projektpraktikums widersprechen. Ich habe den momentanen Koordinator des Projektpraktikums, Herrn Klaus Hamacher, kontaktiert und ihn nach seiner Vorstellung einer angemessenen Versuchsbeschreibung befragt. Mit der Idee der Vereinheitlichung aller Versuche des Projektpraktikums erfolgt eine kurze Vorstellung jedes Versuchs auf ungefähr zwei Seiten, die eine Kurzbeschreibung des Versuches, grobe Punkte des Arbeitsab-

laufes, Lernziele, die Voraussetzungen und die zu benutzende Literatur beinhaltet. Diese Beschreibung existiert schon von einigen PP-Versuchen, nicht aber vom dem Projekt „Radioteleskop“. Als Orientierung hat Herr Hamacher mir die Versuchsanleitung des PP-Versuches „Untersuchung der Feldemissionseigenschaften kalter Kathoden“ mitgegeben und mich gebeten, dieses Konzept auf das Radioteleskop – Projekt zu übertragen. Die Vorschläge des Arbeitsablaufes in meiner Versuchsanleitung (Kap. 4.1.1) unterliegen allerdings der Voraussetzung, dass das Radioteleskop inklusive seiner Messapparatur intakt ist. So sollte es mit dem Radioteleskop z.B. möglich sein, die Radioemission der Sonne zu messen. Zurzeit gibt es hier noch Probleme (Kap. 3). Dies bedeutet aber nicht, dass derzeit ein Praktikum am Teleskop nicht sinnvoll wäre (Fehlerquellensuche ist ebenfalls ein wichtiger Aspekt der experimentellen Physik). In Kapitel 4.1.2 möchte ich deshalb Vorschläge machen, wie ein momentaner Arbeitsablauf aussehen könnte.

4.1.1 Versuchsanleitung A zum Projekt Radioteleskop

Analog zu der Versuchsanleitung „Untersuchung der Feldemissionseigenschaften kalter Kathoden“ des PP wird in diesem Kapitel eine Versuchsanleitung zum Thema Radioteleskop erstellt. Anmerkung: Die Vorgabe des Praktikumskoordinators, Klaus Hamachers, die Anleitung solle zwei Seiten umfassen, orientiert sich an anderen Textformaten. Eine diese Anforderungen erfüllende Version befindet sich im Anhang.

Versuchsanleitung A:

Messung mit einem 3-m Radioteleskop

Projektpraktikum am Wuppertaler Radioteleskop

Kategorie: Experimentalphysik, Astroteilchenphysik

Absprechpartner / Betreuer: K.-H. Becker / J. Rautenberg

Kurzbeschreibung:

Die Radioastronomie gehört zu den bedeutendsten Methoden für die Erforschung des Universums. Allein die Tatsache, dass alle beobachtenden Astronomen, die bisher mit dem Nobelpreis ausgezeichnet wurden, Radioastronomen waren, dient als eindrucksvoller Beweis. Mit immer sensi-

bleren und höher auflösenden Radioteleskopen bzw. Verbunden aus Radioteleskopen (VLA, VLBI) gelangt der Blick immer tiefer in den Welt- raum, dorthin, wo die optische Astronomie schon längst gescheitert ist. Die Universität besitzt ein eigenes Radioteleskop. Dieses ermöglicht mit seinen „nur“ 3 m Durchmesser bereits seriöse Messungen. So wird im Praktikum nach einer Einarbeitung in die Messapparatur das Auflösungs- vermögen des Teleskops mithilfe von astronomischen Objekten bestimmt. Die Erstellung einer Himmelskarte bietet die Möglichkeit einer ersten Analyse der astronomischen und terrestrischen Umgebung. Der reprodu- zierbare Nachweis und die Katalogisierung von Radioquellen sind ebenso ein Bestandteil der astronomischen Forschung. Zudem soll durch Messung der 21 cm-Emissionslinie des neutralen Wasserstoffes die Rota- tionskurve der Milchstrasse aufgenommen werden.

Vorstellung des Arbeitsablaufs:

- 1) Einweisung in die Funktionsweise und Benutzung des Radiotele- skops und der dazugehörigen Messapparatur.
- 2) Einarbeitung in die nötige Software: Programme zur Datenumwand- lung, Auswertung und Erstellung von Messreihen.
- 3) Experimentelle Bestimmung der Winkelauflösung des Teleskops für die Frequenz der Wasserstofflinie (1,4 GHz) mithilfe von astrono- mischen Objekten.
- 5) Erstellung einer „Himmelskarte“ durch eine 360° Abtastung mit dem Radioteleskop.
- 6) Beobachtung bekannter Radioquellen (1,4 GHz): Reproduktion und Katalogisierung.
- 7) Beobachtung der Wasserstofflinie an verschiedenen Orten unserer Galaxie:
 - a) Ermittlung der Intensitätsverteilung von neutralem Wasserstoff in der Milchstrasse.
 - b) Bestimmung der Rotationskurve der Milchstrasse mithilfe der Tangentialpunktmethod.

Lernziele:

- 1) Kenntnisse über die Funktionsweise eines Radioteleskops.
- 2) Kenntnisse über das Radiouniversum als ein Aspekt der Weltrau- merforschung.

- 3) Kenntnisse über die experimentelle Radioastronomie.
- 4) Erlernen bzw. Optimierung der eigenständigen Entwicklung und Begründung von Messreihen für die geforderten Messziele.
- 5) Erlernen bzw. Optimierung der Datenauswertung und Bildanalyse mit moderner Software.

Voraussetzungen:

- 1) Vorlesung zur Atomphysik.
- 2) Kenntnisse über die Entstehung von Radiostrahlung.
- 3) Grundkenntnisse über Auswertungssoftware.

Literaturvorschläge:

Olberg, M. et al.: *Qradio- A control program for the Onsala 2.3m lab antenna*

Hagström, M. et al.: *Laboration Radio Astronomy receiver for institutes and observatories*, Onsala Space Observatory 2001

Unsöld, A.; Baschek, B.: *Der neue Kosmos: Einführung in die Astronomie und Astrophysik*, Berlin: Springer

Karttunen, H. et al.: *Fundamental Astronomy*, Berlin: Springer

Burke, F. B.; Graham-Smith, F.: *An Introduction to Radio Astronomy*, New York: Cambridge University Press

Rohlfs, K.: *Tools of Radio Astronomy*, Berlin: Springer

Carrol, B.W.; Ostlie, D.A.: *An Introduction to Modern Astrophysics*, New York: Addison-Wesley Publishing Company, Inc.

4.1.2 Versuchsanleitung B zum Projekt Radioteleskop

Der momentane Zustand des Radioteleskops lässt eine Durchführung der unter Kapitel 4.1.1 genannten Arbeitsschritte im Rahmen des Projektpraktikums nicht vollständig zu. Zurzeit ist die Untersuchung von bisher unbekanntem Störquellen durch Praktikanten besonders interessant. Durch Absprache mit möglichen Verursachern der Störsignale (Medienzentrum,...) könnten eventuelle Quellen ein- bzw. ausgeschaltet werden. Das Ergebnis

einer Nachtmessung ist auch diesbezüglich interessant. In den nächsten Tagen beabsichtigt Herr Karl Heinz Becker die Steuerkonsole zu verbessern, so dass das Radioteleskop auch über einer Elevation von 45° bewegt werden kann. In diesem Bereich wurde noch nicht gemessen. Diese Aspekte sind in der Versuchsanleitung B berücksichtigt. Alternativ zur Versuchsanleitung B sind allerdings noch andere Aufgaben denkbar. So wäre es z.B. wünschenswert, dass erfahrene Programmierer das alte und neue *Qradio* wieder voll funktionsfähig herstellen. Die Positionssteuerung des Radioteleskops vom Computer zu ermöglichen, ist ebenfalls eine sinnvolle Verbesserung, da der Aufenthalt im Silo während der Positionsverschiebung Gefahren in sich birgt.

Versuchsanleitung B:

Messung mit einem 3-m Radioteleskop

Projektpraktikum am Wuppertaler Radioteleskop

Kategorie: Experimentalphysik, Astroteilchenphysik

Absprechpartner / Betreuer: K.-H. Becker / J. Rautenberg

Kurzbeschreibung:

Die Radioastronomie gehört zu den bedeutendsten Methoden für die Erforschung des Universums. Allein die Tatsache, dass alle beobachtenden Astronomen, die bisher mit dem Nobelpreis ausgezeichnet wurden, Radioastronomen waren, dient als eindrucksvoller Beweis. Mit immer sensibleren und höher auflösenden Radioteleskopen bzw. Verbunden aus Radioteleskopen (VLA, VLBI) gelangt der Blick immer tiefer in den Weltraum, dorthin, wo die optische Astronomie schon längst gescheitert ist. Die Universität besitzt ein eigenes Radioteleskop. Dieses ermöglicht mit seinen „nur“ 3 m Durchmesser bereits seriöse Messungen. So wird im Praktikum nach einer Einarbeitung in die Messapparatur das Auflösungsvermögen des Teleskops mithilfe von experimentell bestimmt. Die Erstellung einer Himmelskarte bietet die Möglichkeit einer ersten Analyse der astronomischen und terrestrischen Umgebung. Diese Analyse muss unter der Fragestellung betrachtet werden: Was beobachten wir? Handelt es sich hierbei um astronomische oder terrestrische Signale? Was sind die Charakteristika beider Signale, wie unterscheiden sie sich?

Vorstellung des Arbeitsablaufs:

- 1) Einweisung in die Funktionsweise und Benutzung des Radioteleskops und der dazugehörigen Messapparatur.
- 2) Einarbeitung in die nötige Software: Programme zur Datenumwandlung, Auswertung und Erstellung von Messreihen.
- 3) Erstellung einer „Himmelskarte“ durch eine 360° Abtastung mit dem Radioteleskop.
- 4) Genaue Lokalisierung von künstlichen Quellen. Bestimmung ihrer Ursachen. Gegebenenfalls Absprache mit den möglichen Verursachern (Ein- / Ausschalten eventueller Quellen)
- 5) Weitere Untersuchungen von Quellen durch Nachtmessungen.

Lernziele:

- 1) Kenntnisse über die Funktionsweise eines Radioteleskops.
- 2) Kenntnisse über das Radiouniversum als ein Aspekt der Weltraumerforschung.
- 3) Kenntnisse über die experimentelle Radioastronomie mit Berücksichtigung von terrestrischen Störquellen.
- 4) Erlernen bzw. Optimierung der eigenständigen Entwicklung und Begründung von Messreihen für die geforderten Messziele.
- 5) Erlernen bzw. Optimierung der Datenauswertung und Bildanalyse mit moderner Software.

Voraussetzungen:

- 1) Vorlesung zur Atomphysik.
- 2) Kenntnisse über die Entstehung von Radiostrahlung.
- 3) Grundkenntnisse über Auswertungssoftware.

Literaturvorschläge:

Olberg, M. et al.: *Qradio- A control program for the Onsala 2.3m lab antenna*

Hagström, M. et al.: *Laboration Radio Astronomy receiver for institutes and observatories*, Onsala Space Observatory 2001

Unsöld, A.; Baschek, B.: *Der neue Kosmos: Einführung in die Astronomie und Astrophysik*, Berlin: Springer

Karttunen, H. et al.: *Fundamental Astronomy*, Berlin: Springer

Burke, F. B.; Graham-Smith, F.: *An Introduction to Radio Astronomy*, New York: Cambridge University Press

Rohlfs, K.: *Tools of Radio Astronomy*, Berlin: Springer

Carrol, B.W.; Ostlie, D.A.: *An Introduction to Modern Astrophysics*, New York: Addison-Wesley Publishing Company, Inc.

5. Fazit

Die vorliegende Examensarbeit hat gezeigt, dass das Radioteleskop der Universität Wuppertal ein anspruchsvolles und komplexes Projekt ist. Viele Aspekte, die vor Beginn unserer gemeinsamen Tätigkeit nicht als Problem gesehen wurden, entwickelten sich während der Experimentierphase zu neuen Hürden, die stets unsere ganze Aufmerksamkeit erforderten. Schon die Überprüfung der Messapparatur zeigte, dass der Lab-Receiver aus Schweden und der alte Dipol nicht funktionierten. Ein neuer Lab-Receiver der Universität Bochum und der Austausch des Dipols

lösten dieses Problem. Zusätzlich stellten wir fest, dass durch die Auswertelektronik eine charakteristische Verstärkung („Untergrund“) im Spektrum einsetzt, die bei der Analyse jedes empfangenen Signals zu berücksichtigen ist. Dennoch lieferten uns die Ergebnisse der ersten Messungen kein zufrieden stellendes Ergebnis. Oft erhielten wir bei der Beobachtung der Sonne kein Signal, oder das registrierte Signal deutete nicht auf das thermische Spektrum der Sonne hin. Auch der Verlauf des gemessenen „Sonnenspektrums“ ließ die experimentelle Bestimmung der Keulenbreite bzw. des Auflösungsvermögens des Teleskops nicht zu. Die Messung bekannter 1,4 GHz Radioquellen lieferte völlig neue Gesichtspunkte. Die laut Quellenarchiv angegebenen Äquatorialkoordinaten wurden mit *Radio.cpp* in Horizontalkoordinaten für den Standort Wuppertal umgerechnet und mit dem Teleskop überprüft. Dabei registrierte das Teleskop durchaus eindeutige Signale, eine Reproduktion der gemessenen Quellen war leider nicht möglich. Interessanterweise deutete nämlich die Aufnahme einer „Himmelskarte“ durch eine 360°-Abtastung der Umgebung mit der Veränderung der Elevation bis 45° darauf hin, dass das Gebäude der Universität Ausgangspunkt von terrestrischen Störquellen sein musste. Dies hatten wir vorher nie in Betracht bezogen, weil wir davon ausgingen, dass ein Senden mit einer Frequenz von 1,4 GHz auf der Erde nicht erlaubt ist. Der Messtechniker Norbert Menke brachte uns Klarheit. Relevante Signale können z.B. von Mischoszillatoren verursacht werden, die bei 1,4 GHz arbeiten.

Diese neue Erkenntnis brachten wir aber nicht mit der Nichtreproduzierbarkeit der astronomischen Quellen zusammen. Schließlich hatten wir oft Signale bei einer höheren Elevation als 30° erhalten. Eine terrestrische Beeinflussung in diesem Bereich schien uns nicht möglich. Die Suche nach anderen Ursachen führte uns wiederholt zum Messtechniker Norbert Menke. Durch eine Messung mit seinem 1,4 GHz Sender konnte eindeutig der Empfang dieser Frequenz beim Radioteleskop nachgewiesen werden. Auch die Feststellung, dass das Gitter um das Silo einen Einfluss auf das empfangene Signal hat, war sehr aufschlussreich. Da wir diesen Einfluss auf einer Elevation von max. 15° schätzen, schien dies nicht die Lösung des Problems zu sein. Die anschließenden Untersuchungen der Radioteleskopposition überraschten uns sehr. Zu Beginn unserer Messung wurde uns versichert, dass die Angaben der Steuerkonsole ziemlich ge-

nau sind. Bei der Überprüfung der Elevation stellten wir jedoch einen Fehler von bis zu 4° fest. Den Nullpunkt des Azimuth, die Südrichtung, ermittelten wir $(2 \pm 1)^\circ$ neben der alten Südmarkierung. Diese Erkenntnisse machten uns kurzfristig neue Hoffnungen. Leider erhielten wir auch unter Positionskorrektur keine besseren Ergebnisse. Letztendlich lieferte uns eine genauere Analyse einer älteren Messreihe die Lösung. Die Problematik der Nichtreproduzierbarkeit hatte eine völlig andere Ursache: Es handelte sich die ganze Zeit um Signale, die aus dem Universitätsgebäude kamen. Wir hatten nur vorher nie die Möglichkeit in Betracht gezogen, dass diese terrestrischen Signale bis zu einem Winkel von ca. 38° relevant sind. Aufgrund des Reflexionsverhaltens von Gitter und Container scheint dies begründet zu sein. Auch unsere alten Messungen deuten auf diese Theorie hin. Sowohl die „Himmelskarte“ als auch die Überprüfung unsere Messtabelle zeigten, dass beinahe alle empfangenen Signale in den Azimuthbereich 180° bis 260° unter einer Elevation von 38° einzuordnen sind. Die Überlegungen wurden weiter gestützt. Aus der Messung mit dem 1,4 GHz Sender hatten wir einige Informationen über die Strahlungsintensitäten. Daraus leiteten wir die minimale Strahlungsflussdichte ab, die unser Teleskop empfangen kann. Der errechnete Wert wird von keiner Radioquelle erreicht, auch nicht von der Sonne. Somit wurde immer deutlicher, dass wir kein astronomisches Signal messen konnten. In diesem Punkt wären weitere Verbesserungen an der Messapparatur, insbesondere an dem Programm *Qradio* nötig, um dieses Problem zu beheben. Für ein experimentelles Thema wie dieses ist es schade, dass der zeitliche Rahmen einer Examensarbeit so knapp bemessen ist. Ich möchte Herrn Prof. Dr. Karl-Heinz Kampert dafür danken, dass er uns die Möglichkeit gegeben hat, an diesem Thema zu arbeiten. So konnten wir etwas von der Faszination des experimentellen Forschens erleben. Zudem habe ich erkannt, wie wichtig Teamarbeit für die Forschung ist. In diesem Zusammenhang möchte ich den Mitarbeitern Herrn Dr. Christopher Wiebusch, Dipl.-Physiker Herrn Peter Kind, Physikstudent Herrn Nils Niershöfer, Dipl.-Physikerin Frau Viviane Scherini, Herrn Dr. Julian Rautenberg, Dipl.-Physiker Herrn Karl-Heinz Becker und Physikstudent Herrn Robert Bellin für ihre Unterstützung und Beratung danken. Ebenso möchte ich dem Dipl.-Ingenieur Herrn Norbert Menke für sein Engagement danken, der uns in vielen unbezahlten Telefongesprächen mit seinem fach-

männischen Rat zur Verfügung stand. Abschließend gilt ein besonderes Dankeschön den Physikstudenten Herrn Jens Dopke und Herrn Jan-Patrick Hültz für die praktische Hilfe am Radioteleskop, für anregende Diskussionen und für die Unterstützung der Entwicklung geeigneter Auswertungsprogramme.

6. Literaturverzeichnis nach Kapiteln

Geschichte der Radioastronomie (Kap. 2.1)

Hey, J. S.: *Radiouniversum*, 1. Auflage, Oxford: Pergamon Press 1971 (S. 9 ff.)

Karttunen, H. et al.: *Fundamental Astronomy*, 3. überarbeitete Auflage, Berlin: Springer 1995 (S. 75 ff.)

Burke, F. B.; Graham-Smith, F.: *An Introduction to Radio Astronomy*, 2. überarbeitete Auflage, New York: Cambridge University Press 2002 (S. 367ff.)

Aktuelle Radioteleskope (Kap. 2.2)

Unsöld, A.; Baschek, B.: *Der neue Kosmos: Einführung in die Astronomie und Astrophysik*, 7. überarbeitete Auflage, Berlin: Springer 2002 (S. 146 ff.)

Karttunen, H. et al.: *Fundamental Astronomy*, 3. überarbeitete Auflage, Berlin: Springer 1995 (S. 75 ff.)

Wikipedia, <http://de.wikipedia.org/wiki/Arecibo-Botschaft> (Zugriff am 10.3.06)

Radiofenster (Kap. 2.3)

Burke, F. B.; Graham-Smith, F.: *An Introduction to Radio Astronomy*, 2. überarbeitete Auflage, New York: Cambridge University Press 2002 (S. 2 f.)

Rohlfs, K.: *Tools of Radio Astronomy*, 1. Auflage, Berlin: Springer 1986 (S. 3 f.)

Schwarzkörperstrahlung (Kap. 2.4.1)

Unsöld, A.; Baschek, B.: *Der neue Kosmos: Einführung in die Astronomie und Astrophysik*, 7. überarbeitete Auflage, Berlin: Springer 2002 (S.111 f.)

Demtröder, W.: *Experimentalphysik 3 – Atome, Moleküle und Festkörper*, 3. überarbeitete Auflage, Berlin: Springer 2005

Hey, J. S.: *Radiouniversum*, 1. Auflage, Oxford: Pergamon Press 1971 (S. 25 ff.)

Wikipedia, http://de.wikipedia.org/wiki/Schwarzer_K%C3%B6rper (Zugriff am 11.3.06)

Wikipedia, http://de.wikipedia.org/wiki/Wiensches_Strahlungsgesetz (Zugriff am 11.3.06)

Bremsstrahlung (Kap. 2.4.1)

Kundu, M. R.: *Solar Radio Astronomy*, 1. Auflage, Michigan: John Wiley & Sons, Inc. 1965 (S. 37 f.)

Burke, F. B.; Graham-Smith, F.: *An Introduction to Radio Astronomy*, 2. überarbeitete Auflage, New York: Cambridge University Press 2002 (S. 113 ff.)

Synchrotronstrahlung (Kap. 2.4.3)

Unsöld, A.; Baschek, B.: *Der neue Kosmos: Einführung in die Astronomie und Astrophysik*, 7. überarbeitete Auflage, Berlin: Springer 2002 (S. 440 f.)

Carrol, B.W.; Ostlie, D.A.: *An Introduction to Modern Astrophysics*, 1. überarbeitete Auflage, New York: Addison-Wesley Publishing Company, Inc. 1996 (S. 614 f.)

21cm Linie des neutralen Wasserstoffes (Kap. 2.4.4.1)

Rohlfs, K.: *Tools of Radio Astronomy*, 1. Auflage, Berlin: Springer 1986 (S. 225 f.)

Carrol, B.W.; Ostlie, D.A.: *An Introduction to Modern Astrophysics*, 1. überarbeitete Auflage, New York: Addison-Wesley Publishing Company, Inc. 1996 (S. 443 ff.)

Karttunen, H. et al.: *Fundamental Astronomy*, 3. überarbeitete Auflage, Berlin: Springer 1995 (S. 359 ff.)

Weigert, A.; Wendker, H. J.: *Astronomie und Astrophysik*, 2. überarbeitete Auflage, Weinheim: VHC 1989 (S. 190 ff.)

Dopplereffekt (Kap. 2.5)

Unsöld, A.; Baschek, B.: *Der neue Kosmos: Einführung in die Astronomie und Astrophysik*, 7. überarbeitete Auflage, Berlin: Springer 2002 (S. 26 f.)

Tipler, P. A.: *Physik*, 3. überarbeitete Auflage, New York: Spektrum Akademischer Verlag 2000 (S. 487 ff.)

Rotationsgeschwindigkeit der Milchstrasse (Kap. 2.5.1)

Unsöld, A.; Baschek, B.: *Der neue Kosmos: Einführung in die Astronomie und Astrophysik*, 7. überarbeitete Auflage, Berlin: Springer 2002 (S. 394 ff.)

Measurement of Galactic Rotation Curve,

<http://web.haystack.mit.edu/SRT/memoindex.html> (Zugriff am 10.02.06)

Demtröder, W.: *Kern-, Teilchen- und Astrophysik*, 1. Auflage, New York: Springer 1998 (S. 389 ff.)

Koordinatensysteme (Kap. 2.6)

Weigert, A.; Wendker, H. J.: *Astronomie und Astrophysik*, 2. überarbeitete Auflage, Weinheim: VHC 1989 (S. 1 ff.)

Duffett-Smith, P.: *Practical Astronomy with your Calculator*, 3. überarbeitete Auflage, Cambridge: Cambridge University Press 1989 (S. 10 ff.)

Astronomische Koordinaten, <http://www.greier-greiner.at/hc/koord.htm> (Zugriff am 14.01.06)

Auflösungsvermögen (Kap. 2.7.1)

Unsöld, A.; Baschek, B.: *Der neue Kosmos: Einführung in die Astronomie und Astrophysik*, 7. überarbeitete Auflage, Berlin: Springer 2002 (S. 130, 146)

Zill, B.: *Astronomie, Gymnasiale Oberstufe-Grundstudium*, 3. überarbeitete Auflage, Berlin: Paetec 2005 (S. 59)

Halbwellendipol (Kap. 2.7.1)

Krischke, A.: *Rothammels Antennenbuch*, 12. überarbeitete Auflage, Baunatal: DARC Verlag 2001 (S. 185 f.)

Sonnenmessungen (Kap. 3.5.1)

Small Radio Telescope: Operator's Manual,
<http://web.haystack.mit.edu/SRT/SRTManual.pdf> (Zugriff am 20.01.06)

Auswertelektronik und- software (Kap. 3.2)

Olberg, M. et al.: *Qradio- A control program for the Onsala 2.3m lab antenna*

Hagström, M. et al.: *Laboration Radio Astronomy receiver for institutes and observatories*,
Onsala Space Observatory 2001

Messungen mit dem Radioteleskop

CALSKY, <http://www.calsky.com/> (Erstzugriff am 05.01.06)

Centre de Données astronomiques de Strasbourg, <http://cdsweb.u-strasbg.fr/> (Erstzugriff am 10.01.06)

1420 MHz Radio Source List,
<http://observe.phy.sfasu.edu/Misc/wagers/1420Sources.html> (Zugriff am 25.02.06)

Roth, G. D.: *Handbuch für Sternfreunde*, 3. überarbeitete Auflage, Berlin: Springer 1980

Einsatz im Praktikum der Physik Studenten (Kap. 4)

Experimente des Anfängerpraktikums, <http://www.delphi.uni-wuppertal.de/%7Ekind/APPRAK.HTML> (Zugriff am 26.3.06)

Experimente des Anfängerpraktikums 2, <http://www.physik.uni-wuppertal.de/Studium/Lehrveranstaltungen/Praktika/APII/> (Zugriff am 26.3.06)

Fortgeschrittenenpraktikum, <http://www.physik.uni-wuppertal.de/Studium/Lehrveranstaltungen/Praktika/FP/> (Zugriff am 26.3.06)

Projektpraktikum (Kap. 4.1)

Das Projektpraktikum, <http://www.physik.uni-wuppertal.de/Studium/Lehrveranstaltungen/Praktika/PP/> (Zugriff am 26.3.06)

7. Formelliteratur

[KOS] Unsöld, A.; Baschek, B.: *Der neue Kosmos: Einführung in die Astronomie und Astrophysik*, 7. überarbeitete Auflage, Berlin: Springer 2002

[PAC] Duffett-Smith, P.: *Practical Astronomy with your Calculator*, 3. überarbeitete Auflage, Cambridge: Cambridge University Press 1989

[SRA] Kundu, M. R.: *Solar Radio Astronomy*, 1. Auflage, Michigan: John Wiley & Sons, Inc. 1965

[ToR] Rohlfs, K.: *Tools of Radio Astronomy*, 1. Auflage, Berlin: Springer 1986

[Weig] Weigert, A.; Wendker, H. J.: *Astronomie und Astrophysik*, 2. überarbeitete Auflage, Weinheim: VHC 1989

8. Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1 *The Milky Way's Invisible Light*,

http://space.gsfc.nasa.gov/astro/education/mw_film/jansky.GIF (Zugriff am 11.02.06)

Abb. 2.2 *The University of Manchester- Jodrell Bank Observatory*,

<http://www.jb.man.ac.uk/news/reber/Reber.jpg> (Zugriff am 5.03.06)

Abb. 2.3 *Electromagnetic Waves – Microwaves*,

<http://www.uvi.edu/SandM/Physics/dave/DavesArchives/032601/Phys212NetPlay.html>
(Zugriff am 14.02.06)

Abb. 2.4 *Kosmologie – Astronomie*, [http://www.kinkel-](http://www.kinkel-bischem.de/kosmologie/antennepenzas.jpg)

[bischem.de/kosmologie/antennepenzas.jpg](http://www.kinkel-bischem.de/kosmologie/antennepenzas.jpg) (Zugriff am 14.02.06)

Abb. 2.5 *Radioteleskope der Erde*, [http://www.astro.uni-](http://www.astro.uni-bonn.de/~webrai/german/public_telescopes.php)

[bonn.de/~webrai/german/public_telescopes.php](http://www.astro.uni-bonn.de/~webrai/german/public_telescopes.php) (Zugriff am 15.02.06)

Abb. 2.6 *Radioteleskope der Erde*, [http://www.astro.uni-](http://www.astro.uni-bonn.de/~webrai/german/public_telescopes.php)

[bonn.de/~webrai/german/public_telescopes.php](http://www.astro.uni-bonn.de/~webrai/german/public_telescopes.php) (Zugriff am 15.02.06)

- Abb. 2.7** *Arecibo*, http://www.aldebaran.cz/bulletin/2004_15/arecibo.jpg (Zugriff am 11.03.06)
- Abb. 2.8** *VLA*, <http://www.astro.umd.edu/~miller/Gallery/instruments/vla.jpg> (Zugriff am 11.03.06)
- Abb. 2.9** *Interferometrie*,
http://www.ifremer.fr/flotte/equipements_sc/images/sondeurs_multi/interferometrie.jpg
(Zugriff am 11.03.06)
- Abb. 2.10** *Was ist VLBI ?*, <http://www.mpifr-bonn.mpg.de/public/angela/main.html> (Zugriff am 11.03.06)
- Abb. 2.11** Burke, F. B.; Graham-Smith, F.: *An Introduction to Radio Astronomy*, 2. überarbeitete Auflage, New York: Cambridge University Press 2002 (S. 3)
- Abb. 2.12** *Thermische Strahlung*, <http://wwwex.physik.uni-ulm.de/lehre/gk4-2005/img238.gif> (Zugriff am 06.03.06)
- Abb. 2.13** Kundu, M. R.: *Solar Radio Astronomy*, 1. Auflage, Michigan: John Wiley & Sons, Inc.1965 (S. 38)
- Abb. 2.14** *Synchrotronstrahlung*, <http://schulzeundschantze.anphy.uni-duesseldorf.de/veroff/Diplome/Volker.Solinus/img61.gif> (Zugriff am 14.03.06)
- Abb. 2.15** *The Hydrogen 21-cm Line*, <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/quantum/h21.html> (Zugriff am 14.03.06)
- Abb. 2.16** *Doppler Effect*, <http://www.drphysics.com/syllabus/doppler/doppler.GIF> (Zugriff am 12.03.06)
- Abb. 2.17** Unsöld, A.; Baschek, B.: *Der neue Kosmos: Einführung in die Astronomie und Astrophysik*, 7. überarbeitete Auflage, Berlin: Springer 2002 (S. 394)
- Abb. 2.18** Demtröder, W.: *Kern-, Teilchen- und Astrophysik*, 1. Auflage, New York: Springer 1998 (S. 391)
- Abb. 2.19** *Wikipedia*, <http://de.wikipedia.org/wiki/Himmelskugel> (Zugriff am 20.03.06)
- Abb. 2.20** *Das Horizontsystem*, <http://www.greier-greiner.at/hc/horizont.htm> (Zugriff am 21.03.06)
- Abb. 2.21** *Das Äquatorsystem I (ruhend)*, http://www.greier-greiner.at/hc/parall_1.htm
(Zugriff am 21.03.06)
- Abb. 2.22** *Das Äquatorsystem II (rotierendes)*, http://www.greier-greiner.at/hc/parall_2.htm (Zugriff am 21.03.06)

Abb. 2.23 Demtröder, W.: *Kern-, Teilchen- und Astrophysik*, 1. Auflage, New York: Springer 1998 (S. 242)

Abb. 2.24 *Koordinatensysteme*, http://www.bph.ruhr-uni-bochum.de/~axelm/spica/bilder/pic_492.gif (Zugriff 03.04.06)

Abb. 2.25 *Antennenkeule*, <http://www.kathrein.de/de/sat/images/antennenkeule.gif> (11.03.06)

Abb. 2.26 Krischke, A.: *Rothammels Antennenbuch*, 12. überarbeitete Auflage, Baunatal: DARC Verlag 2001 (S. 185)

Abb. 2.27 Krischke, A.: *Rothammels Antennenbuch*, 12. überarbeitete Auflage, Baunatal: DARC Verlag 2001 (S. 186)

Abb. 3.1 [Foto im Rahmen der Examensarbeit gemacht.]

Abb. 3.2 [Foto im Rahmen der Examensarbeit gemacht.]

Abb. 3.3 [Foto im Rahmen der Examensarbeit gemacht.]

Abb. 3.4 [Foto im Rahmen der Examensarbeit gemacht.]

Abb. 3.5 [Skizze im Rahmen der Examensarbeit angefertigt.]

Abb. 3.6 [Foto im Rahmen der Examensarbeit gemacht.]

Abb. 3.7 [Screenshot im Rahmen der Examensarbeit gemacht.]

Abb. 3.8 [Screenshot im Rahmen der Examensarbeit gemacht.]

Abb. 3.9 [Diagramm im Rahmen der Examensarbeit erstellt.]

Abb. 3.10 [Diagramm im Rahmen der Examensarbeit erstellt.]

Abb. 3.11 [Plot im Rahmen der Examensarbeit erstellt.]

Abb. 3.12 [Plot im Rahmen der Examensarbeit erstellt.]

Abb. 3.13 [Diagramm im Rahmen der Examensarbeit erstellt.]

Abb. 3.14 [Plot im Rahmen der Examensarbeit erstellt.]

Abb. 3.15 [Plot im Rahmen der Examensarbeit erstellt.]

Abb. 3.16 [Plot im Rahmen der Examensarbeit erstellt.]

Abb. 3.17 [Foto im Rahmen der Examensarbeit gemacht.]

Abb. 3.18 [Diagramm im Rahmen der Examensarbeit erstellt.]

Abb. 3.19 [Diagramm im Rahmen der Examensarbeit erstellt.]

Abb. 3.20 [Diagramm im Rahmen der Examensarbeit erstellt.]

Abb. 3.21 [Foto im Rahmen der Examensarbeit gemacht.]

Abb. 3.22 [Foto im Rahmen der Examensarbeit gemacht.]

Abb. 3.23 [Diagramm im Rahmen der Examensarbeit erstellt.]

Abb. 3.24 [Foto im Rahmen der Examensarbeit gemacht.]

Abb. 3.25 [Foto im Rahmen der Examensarbeit gemacht.]

Abb. 3.26 [Skizze im Rahmen der Examensarbeit angefertigt.]

9. Anhang

Tab. 9.1 1,4 GHz Radioquellen

| Nr. | Ziffercode: Aus Strasbourg Archiv (C...) u. Handb. für Sternenfr. (W...) + eventueller Quellename (+ eventueller Quellename) | RA [Deg] | Dec [Deg] |
|-----|---|-----------|-------------|
| 0 | C1752M28 (Galaktisches Zentrum) | 266.44212 | -28.97453 |
| 1 | C0230P64 | 36.5 | 62.16666666 |
| 2 | C0536P24 (Krebsnebel) | 83.61679 | 22.03403 |
| 3 | C0536M04 (Orion Nebel) | 83.82158 | -5.37864 |
| 4 | C0536P00 | 85.415 | -1.91361 |
| 5 | C1232P04 | 187.27671 | 2.05142 |
| 6 | C1648P04 | 252.79875 | 4.98861 |
| 7 | C1720P00 | 260.14362 | -0.979 |
| 8 | W41(SNR) | 277.90 | -8.95 |
| 9 | C2000P40 (CygnusA) (RG) | 299.85012 | 40.73867 |
| 10 | C2330P60 (CassopeiaA) | 350.85658 | 58.83928 |
| 11 | C0048P52 | 10.78662 | 52.05956 |
| 12 | C0130P32 | 24.42196 | 33.15989 |
| 13 | C0320P40 | 49.95067 | 41.51169 |
| 14 | C0432P28 | 69.26904 | 29.67061 |
| 15 | Quelle15 | 69.25 | 80.75 |
| 16 | C0540P48 | 85.65063 | 49.85214 |
| 17 | C0624M04 | 96.79192 | -5.88503 |
| 18 | C0820P48 | 123.40029 | 48.21719 |
| 19 | C0920M12 | 139.52408 | -12.09481 |
| 20 | C1232P04 | 187.27671 | 2.05142 |
| 21 | 925075 (VirgoA)(RG) | 187.70608 | 12.38933 |
| 22 | C1330P32 | 202.78463 | 30.509 |

| | | | | |
|----|------------|-------|-------------|------------|
| 23 | C1424P52 | | 212.83596 | 52.2025 |
| 24 | C1724M36 | | 259.505 | -37.44272 |
| 25 | C1724M36 | | 261.18783 | -34.17567 |
| 26 | C1808M20 | | 272.35792 | -20.32353 |
| 27 | C1820P48 | | 277.3825 | 48.74631 |
| 28 | C1840M20 | | 278.41658 | -21.06108 |
| 29 | C1840P00 | | 281.90283 | -1.923 |
| 30 | C1856P00 | | 285.44471 | 1.21694 |
| 31 | C1912P08 | (W49) | 287.56429 | 9.10531 |
| 32 | C1928P16 | | 290.92712 | 14.50864 |
| 33 | C1928M28 | | 291.21296 | -29.24194 |
| 34 | C2016P24 | | 303.61492 | 23.58136 |
| 35 | C2120P24 | | 320.93579 | 25.06967 |
| 36 | C2256P16 | | 343.49042 | 16.14817 |
| 37 | C1720M40 | | 260.02879 | -38.95947 |
| 38 | Quelle38* | | 172.9120833 | 45.2476389 |
| 39 | W38(HII) | | 274.45 | 343.85 |
| 40 | W51(HII) | | 290.2 | 14.13 |
| 41 | W44(SNR) | | 283.4 | 1.25 |
| 42 | 3C157(SNR) | | 93.575 | 22.6 |
| 43 | OriA(HII) | | 83.2 | 354.55 |
| 44 | OriB(HII) | | 84.6 | 358.1 |
| 45 | W37(HII) | | 270.271667 | 346.25 |
| 46 | W33(HII) | | 272.6 | 342 |
| 47 | W29(HII) | | 270.25 | 335.63333 |
| 48 | W28(HII) | | 269.55 | 336.633333 |
| 49 | W03(HII) | | 35.675 | 61.85 |

Tabelle 9.2 Messungen mit dem Radioteleskop im Rahmen der Examensarbeit.

| Nr. | Objekt | AZ Motor | EL Motor | AZ real | EL real | Datum | Zeit Beginn | Zeit Q | Mess- reihe |
|-----|-----------|-------------|-------------|------------|------------|----------|----------------|-----------|----------------|
| 1 | Sonne | 30 | 15 | 28 | 18,1 | 24.01.06 | 10:25 | 10:40 | 2 |
| 2 | Sonne | 18 | 18 | 16 | 20,8 | 24.01.06 | 11:15 | 11:30 | 2 |
| 3 | Sonne | 8 | 19 | 6 | 21,6 | 24.01.06 | 11:55 | 12:10 | 2 |
| 4 | Sonne | 333 | 23 | 331 | 25 | 17.02.06 | 14:03 | | 4 |
| 5 | Q0 GalCen | 354 | 10 | 352 | 13,5 | 27.01.06 | 10:15 | 10:17 | 5 |
| 6 | Q0 GalCen | 354 | 9 | 352 | 12,5 | 27.01.06 | 10:19 | 10:20 | 5 |
| 7 | Q0 GalCen | 352 | 9 | 350 | 12,5 | 27.01.06 | 10:24 | 10:27 | 5 |
| 8 | Q0 GalCen | 349 | 9 | 347 | 12,5 | 27.01.06 | 10:38 | 10:41 | 5 |
| 9 | Q0 GalCen | 347 | 9 | 345 | 12,5 | 27.01.06 | 10:47 | 10:49 | 5 |
| 10 | Q0 GalCen | 347 | 8 | 345 | 11,6 | 27.01.06 | 10:51 | 10:52 | 5 |
| 11 | Q0 GalCen | 344 | 8 | 342 | 11,6 | 27.01.06 | 11:03 | 11:05 | 5 |
| 12 | Q0 GalCen | 343 | 8 | 341 | 11,6 | 27.01.06 | 11:07 | 11:08 | 5 |
| 13 | Q09 CygA | 243 | 32 | 241 | 32,2 | 16.02.06 | 16:27 | 16:35 | 4 |
| 14 | Q09 CygA | 233 | 23 | 231 | 25 | 16.02.06 | 17:15 | 17:41 | 3 |
| 15 | Q09 CygA | 226 | 18 | 224 | 20,8 | 22.02.06 | 17:33 | 18:01 | 4 |
| 16 | Q09 CygA | 241 | 30 | 239 | 30,6 | 23.02.06 | 16:12 | 16:21 | 4 |
| 17 | Q09 CygA | 233 | 23 | 231 | 25 | 24.02.06 | 17:02 | 17:10 | 4 |
| 18 | Q10 CasA | 226 | 45 | 224 | 41,3 | 22.02.06 | 18:51 | 18:51 | 4 |
| 19 | Q10 CasA | 226 | 45 | 224 | 41,3 | 22.02.06 | 19:05 | 18:51 | 4 |
| 20 | Q10 CasA | 226 | 45 | 224 | 41,3 | 22.02.06 | 19:20 | 18:51 | 4 |
| 21 | Q10 CasA | 224 | 42 | 222 | 39,3 | 22.02.06 | 19:24 | 19:44 | 4 |
| 22 | Q10 CasA | 225 | 43 | 223 | 40 | 22.02.06 | 19:26 | 19:34 | 4 |
| 23 | Q23 | 225 | 32 | 223 | 32,2 | 27.01.06 | 13:07 | 13:09 | 5 |
| 24 | Q23 | 224 | 31 | 222 | 31,4 | 27.01.06 | 13:12 | 13:14 | 5 |

| | | | | | | | | | |
|----|------------|-------|------|-----|------|----------|-------|-------|----|
| 25 | Q23 | 222 | 30 | 220 | 30,6 | 27.01.06 | 13:26 | 13:28 | 5 |
| 26 | Pos | 225 | 32 | 223 | 32,2 | 08.02.06 | 15:16 | x | 4 |
| 27 | Q23 | 202 | 18 | 200 | 20,8 | 08.02.06 | 15:00 | 15:00 | 4 |
| 28 | Q23 | 202 | 18 | 200 | 20,8 | 08.02.06 | 15:33 | 15:00 | 4 |
| 29 | Q23 | 202 | 18 | 200 | 20,8 | 08.02.06 | 15:56 | 15:00 | 4 |
| 30 | Pos | 202 | 18 | 200 | 20,8 | 09.02.06 | 10:55 | x | 4 |
| 31 | Q23 | 237 | 45 | 235 | 41,3 | 09.02.06 | 10:05 | 10:30 | 4 |
| 32 | Q23 | 211 | 22 | 209 | 24,2 | 14.02.06 | 13:19 | 13:40 | 4 |
| 33 | Q23 | 227 | 34 | 225 | 33,7 | 17.02.06 | 11:26 | 11:27 | 4 |
| 34 | Q23 | 209 | 21 | 207 | 23,3 | 20.02.06 | 13:30 | 13:30 | 4 |
| 35 | Q02 Crab | 75 | 40 | 73 | 37,9 | 15.02.06 | 16:30 | 16:52 | 4 |
| 36 | Q02 Crab | 68 | 44 | 66 | 40,6 | 15.02.06 | 17:20 | 17:20 | 4 |
| 37 | Q02 Crab | 66 | 45 | 64 | 41,3 | 23.02.06 | 16:50 | 16:55 | 4 |
| 38 | Q02 Crab | 66 | 45 | 64 | 41,3 | 24.02.06 | 16:44 | 16:50 | 4 |
| 39 | Q21 Virgo | 275 | 20 | 273 | 22,5 | 16.02.06 | 7:52 | 8:12 | 4 |
| 40 | Q21 Virgo | 275 | 20 | 273 | 22,5 | 16.02.06 | 9:12 | 8:12 | 4 |
| 41 | Q11 | 121 | 45 | 119 | 41,3 | 27.01.06 | 11:48 | 11:53 | 5 |
| 42 | Q11 | 123 | 44 | 121 | 40,6 | 17.02.06 | 10:13 | 10:15 | 4 |
| 43 | Q13 | 113 | 36 | 111 | 35,1 | 27.01.06 | 14:00 | 14:02 | 5 |
| 44 | Q13 | 112 | 37 | 110 | 35,8 | 27.01.06 | 14:06 | 14:08 | 5 |
| 45 | Q13 | 109 | 40 | 107 | 37,9 | 27.01.06 | 14:27 | 14:27 | 5 |
| 46 | Q13 | 105 | 44 | 103 | 40,6 | 27.01.06 | 14:53 | 14:53 | 5 |
| 47 | Q18 | 146 | 19 | 144 | 21,6 | 20.02.06 | 14:05 | 14:14 | 4 |
| 48 | Q22 | 243 | 18 | 241 | 20,8 | 17.02.06 | 10:48 | 10:52 | 4 |
| 49 | Q22 | 226 | 5 | 224 | 8,69 | 17.02.06 | 12:46 | 12:30 | 4 |
| 50 | Q22 | 237 | 13 | 235 | 16,3 | 20.02.06 | 11:13 | 11:15 | 4 |
| 51 | Q28 | 342 | 16 | 340 | 19 | 17.02.06 | 10:26 | 10:31 | 4 |
| 52 | Q30 | 309 | 28 | 307 | 29,1 | 20.02.06 | 12:26 | 12:26 | 4 |
| 53 | Pos | 243 | 18 | 241 | 20,8 | 17.02.06 | 12:31 | x | 4 |
| 54 | Pos | 243 | 18 | 241 | 20,8 | 20.02.06 | 11:37 | x | 4 |
| 55 | Gal | 306,1 | 16 | 304 | 19 | 16.02.06 | 13:03 | x | 4 |
| 56 | Gal | 305,4 | 16,6 | 303 | 19,5 | 16.02.06 | 13:06 | x | 4 |
| 57 | Gal | 304,6 | 17,2 | 303 | 20 | 16.02.06 | 13:09 | x | 4 |
| 58 | Gal | 303,6 | 17,8 | 302 | 20,6 | 16.02.06 | 13:12 | x | 4 |
| 59 | Gal | 303,2 | 18,4 | 301 | 21,1 | 16.02.06 | 13:15 | x | 4 |
| 60 | Gal | 302,4 | 19 | 300 | 21,6 | 16.02.06 | 13:18 | x | 4 |
| 61 | Gal | 301,6 | 19,6 | 300 | 22,1 | 16.02.06 | 13:21 | x | 4 |
| 62 | Gal | 300,9 | 20,2 | 299 | 22,7 | 16.02.06 | 13:24 | x | 4 |
| 63 | Gal | 300,1 | 20,8 | 298 | 23,2 | 16.02.06 | 13:27 | x | 4 |
| 64 | Gal | 299,3 | 21,4 | 297 | 23,7 | 16.02.06 | 13:30 | x | 4 |
| 65 | Gal | 298,5 | 22 | 297 | 24,2 | 16.02.06 | 13:33 | x | 4 |
| 66 | Gal | 297,8 | 22,5 | 296 | 24,6 | 16.02.06 | 13:36 | x | 4 |
| 67 | Gal | 297 | 23,1 | 295 | 25,1 | 16.02.06 | 13:39 | x | 4 |
| 68 | Gal | 296,2 | 23,7 | 294 | 25,6 | 16.02.06 | 13:42 | x | 4 |
| 69 | Gal | 295,4 | 24,2 | 293 | 26 | 16.02.06 | 13:45 | x | 4 |
| 70 | Gal | 294,6 | 24,8 | 293 | 26,5 | 16.02.06 | 13:48 | x | 4 |
| 71 | Gal | 293,8 | 25,4 | 292 | 27 | 16.02.06 | 13:51 | x | 4 |
| 72 | Gal | 292,9 | 25,9 | 291 | 27,4 | 16.02.06 | 13:54 | x | 4 |
| 73 | Gal | 292,1 | 26,5 | 290 | 27,9 | 16.02.06 | 13:57 | x | 4 |
| 74 | Gal | 292 | 15 | 290 | 18,1 | 16.02.06 | 14:00 | x | 4 |
| 75 | Menke | | | -2 | 3,67 | 02.03.06 | | x | 1 |
| 76 | Menke | 216 | 8 | 214 | 11,6 | 02.03.06 | | x | 1 |
| 77 | Menke | 216 | 8 | 214 | 11,6 | 02.03.06 | | x | 1 |
| 78 | Menke | 200 | 10 | 198 | 13,5 | 02.03.06 | | x | 1 |
| 79 | Menke | 200 | | 198 | 3,67 | 02.03.06 | | x | 4 |
| 80 | Gitter | 49 | 20 | 47 | 22,5 | 03.03.06 | 9:43 | x | 4 |
| 81 | mit Gitter | 200 | | 198 | 3,67 | 03.03.06 | | x | 12 |

| | | | | | | | | | |
|-----|--------------|-----|----|-----|------|----------|-------|-------|----|
| 82 | mit Gitter | 210 | | 208 | 3,67 | 03.03.06 | | x | 12 |
| 83 | mit Gitter | 210 | 5 | 208 | 8,69 | 03.03.06 | | x | 12 |
| 84 | mit Gitter | 210 | 10 | 208 | 13,5 | 03.03.06 | | x | 8 |
| 85 | mit Gitter | 210 | 15 | 208 | 18,1 | 03.03.06 | | x | 8 |
| 86 | ohne Gitter | 200 | | 198 | 3,67 | 03.03.06 | | x | 12 |
| 87 | ohne Gitter | 210 | | 208 | 3,67 | 03.03.06 | | x | 12 |
| 88 | ohne Gitter | 210 | 5 | 208 | 8,69 | 03.03.06 | | x | 12 |
| 89 | ohne Gitter | 210 | 10 | 208 | 13,5 | 03.03.06 | | x | 8 |
| 90 | ohne Gitter | 210 | 15 | 208 | 18,1 | 03.03.06 | | x | 8 |
| 91 | mit Gitter | 220 | 40 | 218 | 37,9 | 10.03.06 | 13:00 | x | 4 |
| 92 | mit Gitter | 220 | 45 | 218 | 41,3 | 10.03.06 | 13:00 | x | 4 |
| 93 | ohne Gitter | 220 | 40 | 218 | 37,9 | 10.03.06 | 13:00 | x | 4 |
| 94 | ohne Gitter | 220 | 45 | 218 | 41,3 | 10.03.06 | 13:00 | x | 4 |
| 95 | Keulenbreite | 205 | | 203 | 3,67 | 10.03.06 | 15:04 | x | 3 |
| 96 | Q02 Crab | 60 | 45 | 58 | 41,3 | 08.03.06 | 16:29 | 16:25 | 4 |
| 97 | Q03 Orion | 39 | 26 | 37 | 27,5 | 08.03.06 | 16:45 | 16:43 | 4 |
| 98 | Q09 CygA | 234 | 32 | 232 | 32,2 | 09.03.06 | 15:14 | 15:14 | 4 |
| 99 | Q09 CygA | 240 | 29 | 238 | 29,9 | 09.03.06 | 15:43 | 15:43 | 4 |
| 100 | Pos | 240 | 25 | 238 | 26,7 | 09.03.06 | 15:48 | x | 4 |
| 101 | Pos | 240 | 20 | 238 | 22,5 | 09.03.06 | 15:52 | x | 4 |
| 102 | Pos | 240 | 15 | 238 | 18,1 | 09.03.06 | 15:56 | x | 4 |
| 103 | Pos | 240 | 10 | 238 | 13,5 | 09.03.06 | 16:00 | x | 4 |
| 104 | Pos | 240 | 5 | 238 | 8,69 | 09.03.06 | 16:04 | x | 4 |
| 105 | Pos | 240 | | 238 | 3,67 | 09.03.06 | 16:08 | x | 4 |
| 106 | Q09 CygA | 257 | 45 | 255 | 41,3 | 10.03.06 | 13:39 | 13:39 | 4 |
| 107 | Q09 CygA | 253 | 41 | 251 | 38,6 | 10.03.06 | 14:06 | 14:06 | 4 |
| 108 | Q09 CygA | 246 | 35 | 244 | 34,4 | 10.03.06 | 14:47 | 14:47 | 4 |
| 109 | Q09 CygA | 241 | 30 | 239 | 30,6 | 10.03.06 | 15:23 | 15:23 | 4 |
| 110 | Q09 CygA | 240 | 29 | 238 | 29,9 | 10.03.06 | 15:30 | 15:30 | 4 |
| 111 | Pos | 240 | 25 | 238 | 26,7 | 10.03.06 | 15:33 | x | 4 |
| 112 | Pos | 240 | 20 | 238 | 22,5 | 10.03.06 | 15:36 | x | 4 |
| 113 | Pos | 240 | | 238 | 3,67 | 10.03.06 | 15:45 | x | 4 |
| 114 | Q09 CygA | 255 | 45 | 253 | 41,3 | 14.03.06 | 13:40 | 13:48 | 4 |
| 115 | Q09 CygA | 255 | 45 | 253 | 41,3 | 15.03.06 | 13:33 | 13:45 | 4 |
| 116 | Q03 Orion | 2 | 34 | | 33,7 | 15.03.06 | 18:34 | 18:34 | 4 |
| 117 | Q04 | 2 | 38 | | 36,5 | 15.03.06 | 18:39 | 18:41 | 4 |
| 118 | Q39 | 2 | 20 | | 22,5 | 16.03.06 | 7:13 | 7:14 | 4 |
| 119 | Q41 | 2 | 42 | | 39,3 | 16.03.06 | 7:41 | 7:50 | 1 |
| 120 | Sonne | 336 | 34 | 334 | 33,7 | 16.03.06 | 14:00 | 14:20 | 4 |
| 121 | Sonne | 331 | 33 | 329 | 32,9 | 16.03.06 | 14:22 | 14:28 | 4 |
| 122 | Pos | 216 | 17 | 214 | 19,9 | 17.02.06 | 10:39 | x | 4 |
| 123 | Pos | 226 | 5 | 224 | 8,69 | 17.02.06 | 14:39 | x | 4 |
| 124 | Pos | 343 | 18 | 341 | 20,8 | 17.02.06 | 14:48 | x | 4 |
| 125 | Pos | 237 | 13 | 235 | 16,3 | 20.02.06 | 14:27 | x | 4 |
| 126 | Pos | 309 | 28 | 307 | 29,1 | 20.02.06 | 14:40 | x | 4 |
| 127 | Pos | 200 | 20 | 198 | 22,5 | 23.02.06 | 15:56 | x | 20 |
| 128 | Pos | 260 | 20 | 258 | 22,5 | 23.02.06 | 16:02 | x | 20 |
| 129 | Pos | 270 | 14 | 268 | 17,2 | 23.02.06 | 16:07 | x | 20 |
| 130 | Rauschen | | | -2 | 3,67 | 23.02.06 | | x | 50 |
| 131 | Pos | 201 | 7 | 199 | 10,6 | 24.02.06 | 9:32 | x | 4 |
| 132 | Pos | 180 | 20 | 178 | 22,5 | 24.02.06 | 12:37 | x | 10 |
| 133 | Pos | 200 | 20 | 198 | 22,5 | 24.02.06 | 12:41 | x | 10 |
| 134 | Pos | 150 | 29 | 148 | 29,9 | 24.02.06 | 12:44 | x | 10 |
| 135 | Pos | 10 | 30 | 8 | 30,6 | 24.02.06 | 12:54 | x | 10 |
| 136 | Pos | 12 | 30 | 10 | 30,6 | 24.02.06 | 12:55 | x | 10 |
| 137 | Pos | 14 | 30 | 12 | 30,6 | 24.02.06 | 12:58 | x | 10 |
| 138 | Pos | 16 | 30 | 14 | 30,6 | 24.02.06 | 13:00 | x | 10 |

| | | | | | | | | | |
|-----|----------|-----|----|-----|------|----------|-------|---|----|
| 139 | Pos | 18 | 30 | 16 | 30,6 | 24.02.06 | 13:02 | x | 10 |
| 140 | Pos | 20 | 30 | 18 | 30,6 | 24.02.06 | 13:04 | x | 10 |
| 141 | Pos | 22 | 30 | 20 | 30,6 | 24.02.06 | 13:06 | x | 10 |
| 142 | Pos | 24 | 30 | 22 | 30,6 | 24.02.06 | 13:08 | x | 10 |
| 143 | Pos | 26 | 30 | 24 | 30,6 | 24.02.06 | 13:11 | x | 10 |
| 144 | Pos | 30 | 30 | 28 | 30,6 | 24.02.06 | 13:13 | x | 10 |
| 145 | Pos | 40 | 30 | 38 | 30,6 | 24.02.06 | 13:15 | x | 10 |
| 146 | Pos | 50 | 30 | 48 | 30,6 | 24.02.06 | 13:17 | x | 10 |
| 147 | Pos | 60 | 30 | 58 | 30,6 | 24.02.06 | 13:20 | x | 10 |
| 148 | Pos | 70 | 30 | 68 | 30,6 | 24.02.06 | 13:22 | x | 10 |
| 149 | Pos | 70 | 40 | 68 | 37,9 | 24.02.06 | 13:24 | x | 10 |
| 150 | Pos | 70 | 30 | 68 | 30,6 | 24.02.06 | 13:29 | x | 10 |
| 151 | Pos | 80 | 30 | 78 | 30,6 | 24.02.06 | 13:31 | x | 10 |
| 152 | Pos | 90 | 30 | 88 | 30,6 | 24.02.06 | 13:32 | x | 1 |
| 153 | Alte Box | 240 | 20 | 238 | 22,5 | 10.03.06 | 15:40 | x | 4 |
| 154 | Alte Box | | | -2 | 3,67 | 10.03.06 | | x | 1 |
| 155 | Pos | 255 | 35 | 253 | 34,4 | 15.03.06 | 13:55 | x | 4 |
| 156 | Pos | 255 | 25 | 253 | 26,7 | 15.03.06 | 13:57 | x | 4 |
| 157 | SigRef | 2 | 38 | | 36,5 | 15.03.06 | 19:10 | x | 1 |
| 158 | SigRef | 2 | 42 | | 39,3 | 16.03.06 | 8:01 | x | 1 |
| 159 | Pos | 249 | 36 | 247 | 35,1 | 16.03.06 | 13:51 | x | 4 |
| 160 | Pos | 249 | 25 | 247 | 26,7 | 16.03.06 | 13:59 | x | 4 |
| 161 | Geb. K | 120 | | 118 | 3,67 | 23.02.06 | 17:13 | x | 25 |

Tab. 9.2 Auswertung.cpp-Analyse der Messungen

| Nr. | Peak 1 / MHz | HWB 1 / MHz | Int. 1 | Peak 2 / MHz | HBW 2 / MHz | Int. 2 | Peak 3 / MHz | HWB 3 / MHz | Int. 3 |
|-----|-----------------|----------------|--------|-----------------|----------------|--------|-----------------|----------------|--------|
| 1 | 1420,7 | 0,14 | 1,216 | x | | | x | | |
| 2 | x | | | x | | | x | | |
| 3 | 1420,7 | 0,14 | 1,216 | x | | | x | | |
| 4 | x | | | x | | | x | | |
| 5 | x | | | x | | | x | | |
| 6 | 1420,5 | 0,14 | 0,037 | x | | | x | | |
| 7 | x | x | x | x | | | x | | |
| 8 | 1420,7 | 0,18 | 0,099 | x | | | x | | |
| 9 | 1420,5 | 0,11 | 0,024 | x | | | x | | |
| 10 | 1421,1 | 0,11 | 0,095 | 1420,5 | 0,11 | 0,04 | x | | |
| 11 | 1421,3 | 0,14 | 0,082 | 1420,8 | 0,18 | 0,066 | x | | |
| 12 | 1420,5 | 0,11 | 0,036 | 1420,8 | 0,18 | 0,065 | x | | |
| 13 | 1420,5 | 0,35 | 1,266 | x | | | x | | |
| 14 | 1420,8 | 0,38 | 1,114 | x | | | x | | |
| 15 | x | | | x | | | x | | |
| 16 | 1420,5 | 0,25 | 0,86 | x | | | x | | |
| 17 | 1420,2 | 0,36 | 1,469 | 1419,3 | | | x | | |
| 18 | x | | | x | | | x | | |
| 19 | x | | | x | | | x | | |
| 20 | x | | | x | | | x | | |
| 21 | x | | | x | | | x | | |
| 22 | x | | | x | | | x | | |
| 23 | 1420,2 | 0,28 | 0,138 | x | | | x | | |
| 24 | 1420,2 | 0,36 | 0,168 | x | | | x | | |
| 25 | 1420,4 | 0,35 | 0,223 | x | | | x | | |
| 26 | 1420,2 | 0,32 | 1,073 | 1419,6 | 0,25 | 1,051 | 1421 | 0,29 | 1,242 |
| 27 | x | | | 1419,7 | 0,25 | 2,803 | x | | |
| 28 | x | | | 1419,7 | 0,34 | 1,764 | x | | |

| | | | | | | | | | |
|----|--------|------|-------|--------|------|-------|------|------|-------|
| 29 | 1420,2 | 0,32 | 0,208 | 1419,7 | 0,35 | 0,399 | x | | |
| 30 | 1420,2 | 0,39 | 0,191 | 1419,7 | 0,22 | 0,052 | x | x | x |
| 31 | x | | | x | | | x | | |
| 32 | 1420,2 | 0,28 | 0,189 | 1419,6 | 0,21 | 0,177 | 1421 | 0,29 | 0,17 |
| 33 | x | | | x | | | x | | |
| 34 | 1420,2 | 0,25 | 0,393 | 1419,7 | 0,36 | 0,103 | 1421 | 0,25 | 0,348 |
| 35 | x | | | x | | | x | | |
| 36 | 1420 | 2,16 | 0,796 | x | | | x | | |
| 37 | x | | | x | | | x | | |
| 38 | 1419,8 | 2,16 | 0,502 | x | | | x | | |
| 39 | 1420,4 | 0,36 | 0,133 | x | | | x | | |
| 40 | 1420,4 | 0,36 | 0,092 | x | | | x | | |
| 41 | x | | | x | | | x | | |
| 42 | x | | | x | | | x | | |
| 43 | 1420,4 | 0,36 | 0,119 | x | | | x | | |
| 44 | 1420,4 | 0,36 | 0,094 | x | | | x | | |
| 45 | x | | | x | | | x | | |
| 46 | x | | | x | | | x | | |
| 47 | x | | | x | | | x | | |
| 48 | 1419,7 | 0,25 | 0,318 | 1420,9 | 0,17 | 0,093 | x | | |
| 49 | 1420,5 | 0,35 | 0,342 | x | | | x | | |
| 50 | 1420,7 | 0,18 | 0,052 | x | | | x | | |
| 51 | | | | | | | | | |
| 52 | 1420,7 | 0,14 | 0,101 | x | | | x | | |
| 53 | 1419,7 | 0,25 | 0,137 | x | | | x | | |
| 54 | 1419,7 | 0,22 | 0,127 | x | | | x | | |
| 55 | x | | | x | | | x | | |
| 56 | x | | | x | | | x | | |
| 57 | x | | | x | | | x | | |
| 58 | x | | | x | | | x | | |
| 59 | x | | | x | | | x | | |
| 60 | x | | | x | | | x | | |
| 61 | x | | | x | | | x | | |
| 62 | 1420,7 | 0,14 | 0,042 | x | | | x | | |
| 63 | x | | | x | | | x | | |
| 64 | x | | | x | | | x | | |
| 65 | x | | | x | | | x | | |
| 66 | x | | | x | | | x | | |
| 67 | x | | | x | | | x | | |
| 68 | x | | | x | | | x | | |
| 69 | x | | | x | | | x | | |
| 70 | x | | | x | | | x | | |
| 71 | x | | | x | | | x | | |
| 72 | x | | | x | | | x | | |
| 73 | x | | | x | | | x | | |
| 74 | x | | | x | | | x | | |
| 75 | x | | | x | | | x | | |
| 76 | x | | | x | | | x | | |
| 77 | x | | | x | | | x | | |
| 78 | x | | | x | | | x | | |
| 79 | x | | | x | | | x | | |
| 80 | x | | | x | | | x | | |
| 81 | 1421 | 0,28 | 0,155 | 1419,6 | 0,32 | 0,114 | x | | |
| 82 | 1419,8 | 0,24 | 1,267 | 1420,9 | 0,36 | 1,125 | x | | |
| 83 | 1419,8 | 0,46 | 2,064 | 1420,8 | 0,46 | 1,714 | x | | |
| 84 | 1419,6 | 0,28 | 3,231 | x | | | x | | |
| 85 | 1420,2 | 0,25 | 0,252 | 1420,8 | 0,36 | 0,188 | x | | |
| 86 | 1421 | 0,39 | 0,154 | 1419,6 | 0,28 | 0,056 | x | | |

| | | | | | | | | | |
|-----|--------|------|-------|--------|------|-------|--------|------|-------|
| 87 | 1419,7 | 0,39 | 0,916 | 1420,8 | 0,43 | 0,813 | x | | |
| 88 | 1420,8 | 0,56 | 1,39 | 1419,7 | 0,5 | 1,515 | x | | |
| 89 | 1419,6 | 0,42 | 3,809 | x | | | x | | |
| 90 | 1420,2 | 0,25 | 0,572 | 1420,9 | 0,39 | 0,32 | x | | |
| 91 | 1419,6 | 0,35 | 0,098 | x | | | x | | |
| 92 | x | | | x | | | x | | |
| 93 | x | | | x | | | x | | |
| 94 | x | | | x | | | x | | |
| 95 | x | | | x | | | x | | |
| 96 | x | | | x | | | x | | |
| 97 | x | | | x | | | x | | |
| 98 | 1420,3 | 0,35 | 0,365 | 1419,7 | 0,32 | 0,114 | x | | |
| 99 | 1420,4 | 0,35 | 0,345 | 1419,7 | 0,25 | 0,222 | x | | |
| 100 | 1419,7 | 0,32 | 0,156 | 1420,9 | 0,28 | 0,081 | x | | |
| 101 | 1419,7 | 0,22 | 0,193 | 1420,9 | 0,17 | 0,093 | x | | |
| 102 | 1419,7 | 0,22 | 0,069 | 1420,9 | 0,24 | 0,074 | x | | |
| 103 | 1420,9 | 0,17 | 0,101 | 1419,7 | 0,22 | 0,134 | x | | |
| 104 | 1419,7 | 0,22 | 1,43 | 1420,9 | 0,17 | 0,421 | 1420,4 | 0,36 | 0,492 |
| 105 | 1419,7 | 0,22 | 1,057 | 1420,9 | 0,24 | 0,42 | 1420,3 | 0,36 | 0,192 |
| 106 | x | | | x | | | x | | |
| 107 | x | | | x | | | x | | |
| 108 | 1419,7 | 0,25 | 0,385 | 1420,9 | 0,28 | 0,29 | 1420,5 | 0,35 | 0,323 |
| 109 | 1420,4 | 0,35 | 0,383 | 1419,7 | 0,22 | 0,216 | x | | |
| 110 | 1419,7 | 0,25 | 0,378 | 1420,4 | 0,36 | 0,279 | 1420,9 | 0,21 | 0,082 |
| 111 | 1419,6 | 0,39 | 0,25 | 1420,9 | 0,17 | 0,124 | x | | |
| 112 | 1419,7 | 0,22 | 0,387 | 1420,9 | 0,17 | 0,119 | 1420,2 | 0,32 | 0,071 |
| 113 | 1419,7 | 0,22 | 0,644 | 1420,9 | 0,17 | 0,256 | 1420,4 | 0,35 | 0,181 |
| 114 | x | | | x | | | x | | |
| 115 | x | | | x | | | x | | |
| 116 | 1421,4 | 0,43 | 1,243 | x | | | x | | |
| 117 | 1421,4 | 0,46 | 1,174 | x | | | x | | |
| 118 | | | | | | | | | |
| 119 | | | | | | | | | |
| 120 | | | | | | | | | |
| 121 | | | | | | | | | |
| 122 | x | | | x | | | x | | |
| 123 | 1420,5 | 0,35 | 0,235 | x | | | x | | |
| 124 | 1419,7 | 0,25 | 0,143 | 1420,5 | 0,31 | 0,137 | x | | |
| 125 | x | | | x | | | x | | |
| 126 | 1420,7 | 0,14 | 0,079 | x | | | x | | |
| 127 | 1419,7 | 0,39 | 0,094 | 1420,8 | 0,17 | 0,114 | 1421 | 0,21 | 0,059 |
| 128 | x | | | x | | | x | | |
| 129 | x | | | x | | | x | | |
| 130 | | | | | | | | | |
| 131 | 1419,7 | 0,22 | 0,468 | 1420,2 | 0,29 | 0,352 | 1420,9 | 0,39 | 0,106 |
| 132 | 1420,5 | 0,24 | 0,09 | 1419,7 | 0,25 | 0,058 | x | | |
| 133 | 1419,7 | 0,31 | 0,11 | x | | | x | | |
| 134 | x | | | x | | | x | | |
| 135 | x | | | x | | | x | | |
| 136 | x | | | x | | | x | | |
| 137 | x | | | x | | | x | | |
| 138 | x | | | x | | | x | | |
| 139 | x | | | x | | | x | | |
| 140 | x | | | x | | | x | | |
| 141 | x | | | x | | | x | | |
| 142 | x | | | x | | | x | | |
| 143 | x | | | x | | | x | | |
| 144 | x | | | x | | | x | | |

| | | | | | | | | | |
|-----|--------|------|-------|--------|------|-------|--------|------|-------|
| 145 | x | | | x | | | x | | |
| 146 | x | | | x | | | x | | |
| 147 | x | | | x | | | x | | |
| 148 | x | | | x | | | x | | |
| 149 | x | | | x | | | x | | |
| 150 | x | | | x | | | x | | |
| 151 | x | | | x | | | x | | |
| 152 | x | | | x | | | x | | |
| 153 | 1419,7 | 0,22 | 0,603 | 1420,9 | 0,17 | 0,209 | 1420,3 | 0,36 | 0,168 |
| 154 | | | | | | | | | |
| 155 | x | | | x | | | x | | |
| 156 | x | | | x | | | x | | |
| 157 | | | | | | | | | |
| 158 | | | | | | | | | |
| 159 | | | | | | | | | |
| 160 | | | | | | | | | |
| 161 | x | | | x | | | x | | |

