

INBETRIEBNAHME DES WUPPERTALER RADIOTELESKOPS  
MIT EINER AUSARBEITUNG EINES MESSPROGRAMMS  
ZUR MESSUNG DER 21CM WASSERSTOFF LINIE

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  
Robert Bellin, Wuppertal im April 2006.

Themensteller:  
Prof. Dr. Karl-Heinz Kampert,  
Arbeitsgruppe Astroteilchenphysik, Fachgruppe Physik,  
Fachbereich C, Universität Wuppertal

Verfasser:  
Robert Bellin  
Steinbeck 92, 42119 Wuppertal, Tel. 0202-2972730,  
E-Mail bellin@uni-wuppertal.de, Matrikelnr. 0120724,  
Studium der Physik und Ev. Theologie  
für das Lehramt für die Sekundarstufen I und II

---

## Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung .....	4
2.	Historie .....	6
2.1.	Die Astronomie von der Antike bis hin zur Aufklärung .....	6
2.2.	Die Anfänge der Radioastronomie im 20. Jahrhundert .....	8
2.3.	Die heutigen Radioteleskope .....	11
3.	Theorie .....	13
3.1.	Koordinatensysteme .....	13
3.1.1.	Horizontsystem .....	13
3.1.2.	Äquatorialsystem .....	14
3.1.3.	Ekliptikalsystem .....	16
3.1.4.	Galaktisches System .....	17
3.1.5.	Supergalaktisches System .....	17
3.1.6.	Koordinatentransformationen .....	17
3.2.	Strahlungstheorie und Thermodynamik .....	20
3.2.1.	Elektromagnetische Wellen .....	20
3.2.2.	Energie .....	21
3.2.3.	Intensität .....	21
3.2.4.	Strahlungsflussdichte .....	22
3.2.5.	Strahlungsfluss .....	23
3.2.6.	Emission und Absorption .....	23
3.2.7.	Schwarzkörperstrahlung .....	24
3.2.8.	Punktquellen .....	27
3.2.9.	Flächenquellen .....	28
3.2.10.	Gas im thermodynamischen Gleichgewicht .....	28
3.3.	Die Radiostrahlung .....	30
3.3.1.	Interstellare Materie .....	32
3.3.2.	Die thermische Strahlung der Sonne .....	33
3.3.3.	Thermische Strahlung von ionisierten Gasen .....	35
3.3.4.	Nichtthermische Strahlung .....	38
3.3.5.	Quellenverteilung im Universum .....	42
3.3.6.	Kernphysikalische Grundlagen der 21cm Wasserstoff-Linie .....	46
3.3.7.	Rotation der Milchstraße .....	48
3.4.	Antennen und deren Eigenschaften .....	50
3.4.1.	Auflösungsvermögen und Keulenbreite .....	50
3.4.2.	Antennenfeldzonen .....	50
3.4.3.	Reziprozitätstheorem .....	52
3.4.4.	Antennenimpedanz .....	52
3.4.5.	Strahlungswiderstand .....	53
3.4.6.	Richtfaktor .....	53
3.4.7.	Gewinnfaktor .....	54
3.4.8.	Wirkfläche .....	55
3.4.9.	Wirksame Länge des Dipols .....	55
3.4.10.	Resonanzlänge des Dipols .....	56
3.4.11.	Rauschen und Antennentemperatur .....	57
3.4.12.	Freiraumdämpfung .....	58
4.	Versuchsaufbau .....	60
4.1.	Lage und Aufbau des Teleskops .....	60
4.2.	Vorverstärker und Frontend .....	62
4.3.	Backend .....	63

5.	Software .....	65
5.1.	Programm <i>Qradio</i> .....	65
5.2.	Programm zur Koordinatenumrechnung und Himmelskartenerstellung .....	67
5.3.	Konvertierung der FITS-Dateien .....	71
5.4.	Programm zur Dateneinlese und qualitativen Analyse .....	72
5.5.	Programm zur quantitativen Datenanalyse .....	73
6.	Experimenteller Teil .....	75
6.1.	Stand der Dinge vor Beginn der Arbeiten .....	75
6.2.	Anschluss des neuen PCs mit neuer <i>Qradio</i> -Version .....	76
6.3.	Austausch der Backend-Box .....	76
6.4.	Kalibrierung des Backends mittels Frequenzgenerator .....	76
6.5.	Überprüfung und Austausch des vorhandenen Dipols .....	79
6.6.	Bestimmung der Antennenabmessungen .....	80
6.7.	Einrichtung des Datentransfers .....	83
6.8.	Messungen – Teil 1 .....	83
6.8.1.	Sonnenmessungen .....	85
6.8.2.	Galaktisches Zentrum .....	85
6.8.3.	Cygnus A .....	86
6.8.4.	Cassiopeia A .....	86
6.8.4.	Q23 .....	87
6.8.5.	Eine erste Himmelskarte .....	87
6.8.6.	Weitere Messungen .....	88
6.9.	Messungen mit einer Sendeantenne .....	89
6.9.1.	Bestimmung der Keulenbreite .....	90
6.9.2.	Frequenz- und Amplitudenkalibrierung von <i>Qradio</i> .....	92
6.9.3.	Empfangene Leistung .....	94
6.10.	Einfluss des Gitters .....	96
6.11.	Messungen – Teil 2 .....	97
6.12.	Überprüfung der Motoren- und Winkelpositionen .....	98
6.13.	Messungen – Teil 3 .....	101
6.14.	Überprüfung der alten Box und des switched-Signals .....	102
6.15.	Messungen – Teil 4 .....	102
7.	Ausarbeitung eines Messprogramms .....	104
8.	Fazit .....	106
9.	Quellenverzeichnis .....	108
9.1.	Literaturverzeichnis .....	108
9.2.	Internetquellen .....	110
9.3.	Thematisch .....	111
9.4.	Abbildungs- und Tabellenverzeichnis .....	112
10.	Anhang .....	115
10.1.	Überblick über die offiziellen Belegungen der Frequenzbänder .....	115
10.2.	Radioquellenübersicht .....	116
10.3.	Quellendatei <i>sources.txt</i> .....	117
10.4.	Elektronikskizze .....	119
10.5.	Ergänzende Abbildungen und Spektren .....	120
10.6.	Übersicht über die Messungen .....	128
10.7.	CD .....	137
11.	Schlusserklärung .....	138

## 1. Einleitung

Der für uns wahrnehmbare Teil der elektromagnetischen Strahlung, sprich der optische Bereich von 400-750nm Wellenlänge, umfasst nur einen kleinen Teil des Spektrums, den man heutzutage mit Instrumenten beobachten kann. Neben der astronomischen Betrachtung von dem optischen-, ultravioletten- und infraroten Licht befasst sich die Forschung außerdem mit der hochenergetischen Röntgen- und  $\gamma$ -Strahlung, sowie mit der geringer energetischen, also langwelligeren, Radiostrahlung. Über die Beobachtung der extraterrestrischen Radiostrahlung kann man wesentliche Informationen über die Struktur des Universums erhalten, insbesondere über die Spektrallinien von Molekülen wie dem Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) mit einer Wellenlänge von 2,6 und 2,7 mm sowie von dem neutralen Wasserstoff mit einer Wellenlänge von 21 cm, welcher speziell bei der Erforschung von kühlen Gaswolken sehr relevant wird. Und die Beobachtung genau dieser 21cm-Linie ist das Ziel des Wuppertaler Radioteleskops, das seit etwa zwei Jahren an der Bergischen Universität steht. Mittels dieses Teleskops sollen Studierende der Physik in ihren Projektpraktika an (radio-)astronomische Beobachtungen und Methoden herangeführt werden, wobei mindestens genauso wichtig sein sollte, jene auch für diese Teildisziplin zu begeistern.

Diese Hausarbeit im Rahmen der Ersten Staatsprüfung beinhaltet nun zum einen die für die Arbeit mit dem Teleskop relevanten theoretischen Grundlagen (Kap. 3), wie die verschiedenen in der Astronomie verwendeten Koordinatensysteme, die Entstehungsmechanismen der Radiostrahlung inklusiv der kernphysikalischen Grundlagen und die Bestimmung von Antennenkenngrößen. Zum anderen wird in Kap. 4 und Kap. 6 die Inbetriebnahme des Teleskops in möglichst chronologischer Reihenfolge beschrieben. Obwohl bereits einige Gruppen ihr Praktikum an diesem Aufbau durchgeführt haben, blieb aber bei den bisherigen Messungen der Erfolg aus, so dass erstmal die Aufgabe einer Fehleranalyse bestand. Zu dem werden in Kap. 5 die verwendeten sowie die extra noch geschriebenen Programme zur Koordinatenumrechnung und Datenanalyse erläutert, deren Entwicklung parallel zu den Abschnitten des Experimentellen Teils verlief.

Das Ziel soll sein, ein funktionstüchtiges Teleskop mit einem Programm zur weiteren Arbeit zu erhalten. Zu Beginn werden aber erstmal die Anfänge von all dem dargestellt, um die Arbeit in einen historischen Kontext zu stellen.

Die verwendete Literatur wird in dieser Arbeit bestehend aus ihrer Abkürzung, die im Quellenverzeichnis (Kap. 8) aufgeschlüsselt werden, und der entsprechenden Seitenzahl in eckigen Klammern angegeben. Dort findet sich auch eine thematische Übersicht nach den Kapiteln sortiert. Die Angaben in den Fußnoten zu den Personen stammen, soweit es nicht anders angegeben war, aus [Brock] oder [wikipedia]. Da zusammen mit *Jörn Sonntag* gearbeitet wurde, wurden seine Bilder mit [Sonntag] und meine entsprechend mit [Bellin] gekennzeichnet. Außerdem werden Eigennamen immer und neue Begriffe nur bei der ersten Verwendung *kursiv* geschrieben.

## 2. Historie

### 2.1. Die Astronomie von der Antike bis hin zur Aufklärung

Die Menschen beobachteten seit jeher, dass Gestirne über ihren Kopf hinweg ziehen. Daher war der Himmel auch ein Symbol für die Natur und die Gottheit bzw. anfangs für die Gottheiten, so dass die Geschichte der Astronomie bis in die klassische Antike zurück geht. Die Griechen machten als Erste den Sprung von der Magie der Sterne, die *Astrologie*, hin zu den Gesetzen der Sterne, die *Astronomie*<sup>1</sup>. So führte schon der Vorsokratiker *Thales von Milet* um 600 v. Chr. den Kosmos auf ein Prinzip, in diesem Fall das Wasser, zurück und erkannte bereits, dass die Erde rund sei. Auch andere antike Astronomen versuchten schon die auf der Erde gültigen geometrischen Sätze auf das Weltall anzuwenden. So vermaß *Aristarch von Samos* einst die Entfernung der Erde zur Sonne und zum Mond sowie deren Durchmesser, stellte als Erster ein heliozentrisches Weltbild auf und erkannte, dass die Dimension der Entfernungen zu den Fixsternen um einiges höher sein muss als die der Entfernung zur Sonne. Dieses Wissen sollte aber im Laufe der Geschichte wieder verloren gehen.

Einen nachhaltigeren Einfluss hatte dagegen der Grieche *Hipparch von Nikaia*, der von ca. 194 bis 120 v. Chr. in der heutigen Türkei lebte. Auf der Insel Rhodos machte er seine bedeutendsten astronomischen Beobachtungen und erstellte einen Sternenkatalog, der selbst im 16. Jh. an Genauigkeit noch nicht übertroffen wurde, sowie eine Helligkeitsskala für Sterne, die bis heute in erweiterter Version verwendet wird. Er schlussfolgerte auch die Präzession der Erde aus der Beobachtung, dass das *tropische Jahr*<sup>2</sup> nicht mit dem *siderischen Jahr*<sup>3</sup> identisch sei. Andererseits lehnte er aber das heliozentrische Weltbild des *Aristarch* ab. Heute gilt *Hipparch* als der bedeutendste Astronom der Antike. Um 150 n. Chr. vervollständigte *Claudius Ptolemäus* in Alexandria dessen Werk – insbesondere bzgl. der Planetentheorie – in seinem Handbuch der Astronomie, dem *Almagest*<sup>4</sup>. Diverse Übersetzungen und Lehrbücher (vor allem der *Tractatus de Sphaera*) trugen dazu

---

<sup>1</sup> το αστρον = Stern, ο νομος = Gesetz.

<sup>2</sup> Das *tropische Jahr* (auch *Sonnen-* oder *Äquinoktialjahr*) ist die Zeit zwischen zwei Durchgängen der Erde durch den Frühlingspunkt der Ekliptik und ist 365,2422 mittlere Sonnentage lang.

<sup>3</sup> Das *siderische Jahr* (auch *Sternjahr*) orientiert sich an zwei aufeinander folgenden gleichen Positionen der Sonne und einem Fixstern bzgl. der Erde und ist somit unabhängig von der Präzession der Erde. Es dauert 365,2564 mittlere Sonnentage.

<sup>4</sup> Arabisch aus dem Griechischen Μαθηματικῆς Συναξέως.

bei, dass sich die Lehrmeinung von *Hipparch* und *Ptolemäus* von der Spätantike an bis zum Ende des Mittelalters im akademischen Kreis hielt.

Erst die Eroberung Konstantinopels durch die Türken im Jahre 1453 und damit das Auftauchen von antiken Schriftstücken im Abendland durch byzantinische Gelehrte trugen dazu bei, dass heliozentrische Systeme wie das des *Aristarch* für Gelehrte wieder präsent wurden. So begründete eine Veröffentlichung von *Nicolaus Kopernikus*<sup>5</sup> mit dem Titel *De Hypothesibus Motuum Caelestium A Se Constitutis Commentariolus* im Jahre 1510 wieder das heliozentrische Weltbild. Sein System enthielt aber wie die all seiner Vorgänger Kreisbahnen, die aufgrund der aristotelischen Überzeugung von deren Naturgegebenheit seit der Antike beibehalten wurde. Obwohl sein Werk päpstlich überwacht wurde, geriet er nicht in einen Konflikt mit der römischen Kirche, da er seine Studien stets als Privatmann betrieb. Erst die Auseinandersetzung des Vatikans mit *Galileo Galilei* brachte sein Werk auf den Index verbotener Schriften.

Ausgehend von den Beobachtungen *Tycho Brahes*<sup>6</sup>, die mit einer zuvor noch nie da gewesenen Genauigkeit gemacht wurden, konnte *Johannes Kepler*<sup>7</sup> 1609 das Planetensystem mit einer großen mathematischen Ästhetik erklären, indem er Ellipsen als Grundlage für seine Berechnungen nahm (*Keplersche Gesetze*). Seine Überlegungen zu einem heliozentrischen Weltbild hielt er aber fast sein ganzes Leben lang aus Angst vor einer Reaktion seitens der Kirche zurück; erst in seinem Sterbejahr wurden diese veröffentlicht.

Zur gleichen Zeit machte *Galileo Galilei*<sup>8</sup> diverse Entdeckungen mit seinem 1609 selbstgebauten Fernrohr (Mondkrater, Jupitermonde, Saturnringe, etc.), die ihn auch auf ein heliozentrisches Planetensystem schließen ließen. Durch mehrere Veröffentlichungen legte er sich aber mit dem Vatikan an und wurde durch die Inquisition zum Rückruf seiner Schriften aufgefordert. Erst in dieser Zeit wurde der aristotelische Grundsatz einer grundsätzlichen Unterscheidung zwischen einer himmlischen und terrestrischen Physik aufgehoben, der sich durch das Mittelalter hindurch gehalten hatte. Die Naturgesetze sollten nun sowohl für die Astronomen

---

<sup>5</sup> Polnischer Astronom und Mathematiker, \* Thorn 19.2.1473, † Frauenburg 24.5.1543.

<sup>6</sup> Dänischer Astronom, \* Knudstrup 14.12.1546, † Benátky 24.10.1601.

<sup>7</sup> Deutscher Astronom, \* Weil 27.12.1571, † Regensburg 15.11.1630, Veröffentlichungen: *Astronomia Nova* (1609), *Harmonices Mundi* (1619).

<sup>8</sup> Italienischer Mathematiker, Physiker und Philosoph, \* Pisa 15.2.1564, † Arcetri 8.1.1642. Veröffentlichungen u.a.: *Sidereus Nuncius* (1619), *Discorsi E Dimostrazioni Matematiche Intorno A Due Nuove Scienze* (1638).

als auch für die Physiker<sup>9</sup> gelten. *Isaac Newton* schuf dann 1687 in *Naturalis Principia Mathematica* mit der Gravitationstheorie eine mathematische Grundlage für beide Geltungsbereiche.

## 2.2. Die Anfänge der Radioastronomie im 20. Jahrhundert

Es begann damit, dass *James Clerk Maxwell*<sup>10</sup> vor mehr als 130 Jahren die elektromagnetische Natur des Lichtes erklärte und damit auch eine Erweiterung des elektromagnetischen Spektrums in den infraroten und ultravioletten Bereich postulierte. Dem deutschen Physiker *Heinrich Rudolf Hertz*<sup>11</sup> gelang es dann 1887 elektromagnetische Wellen im Radiobereich zu erzeugen und nachzuweisen. Im Folgenden kamen diverse Versuche zu Stande, experimentell zu prüfen, ob auch die Sonne Radiostrahlung aussendet, die aber alle erfolglos blieben:

- 1890 *Thomas Alva Edison*<sup>12</sup> in Amerika,
- 1896 *Julius Scheiner*<sup>13</sup> und *J. Wilsing* in Deutschland,
- 1900 *Oliver Joseph Lodge*<sup>14</sup> in England und
- 1902 *E. Nordmann* in Frankreich.

Der amerikanische Ingenieur *Karl Jansky* beobachtete 1932 zum ersten Mal elektromagnetische Strahlung im Radiowellenbereich (von  $10^{-3}$  bis  $10^2$  m), als er für *Bell Laboratories* die durch Gewitter verursachten und für den Funkverkehr störenden Quellen im Wellenlängenbereich von  $\lambda = 14,6$  m untersuchte. *Jansky* konnte diesen drei verschiedene Ursachen zuweisen:

1. ein nahes Gewitter,
2. ein fernes, tropisches Gewitter oder
3. ein Signal unbekanntem Ursprungs, wobei dieses mit einer Periode von 24 Stunden auftrat. Später konnte er den Ursprung im Zentrum unserer Galaxis finden.

Dies fand anfangs keine Resonanz in der Fachwelt; selbst die 1937 von dem jungen Radioingenieur *Grote Reber*<sup>15</sup> gemachten Beobachtungen fanden noch keinen

---

<sup>9</sup> Im urspr. Sinne von gr. φύσις = Natur.

<sup>10</sup> Britischer Physiker, \* Edinburgh 13.6.1831, † Cambridge 5.11.1879; er war ab 1871 Professor in Cambridge und begründete u.a. die Elektrodynamik.

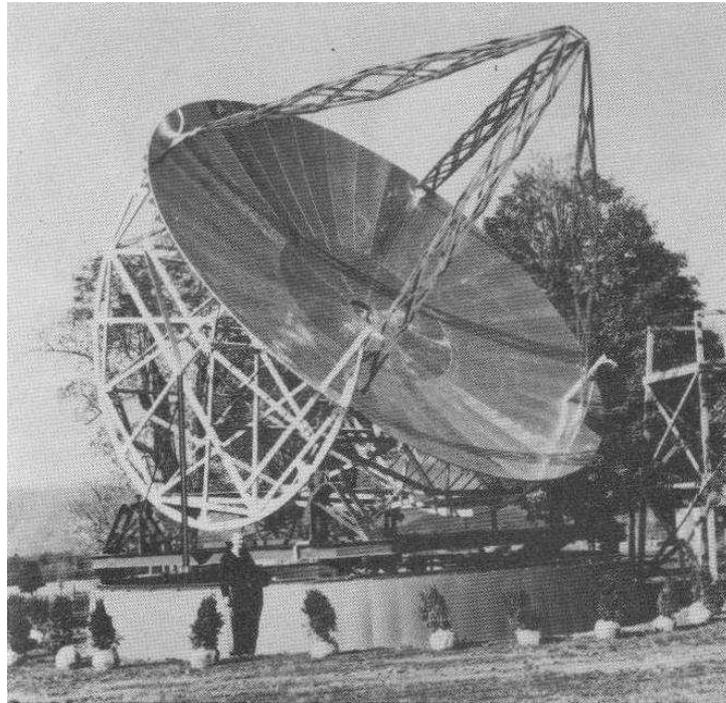
<sup>11</sup> Deutscher Physiker, \* Hamburg 22.2.1857, † Bonn 1.1.1894.

<sup>12</sup> Amerikanischer Elektrotechniker, \* Milan 11.2.1847, † West Orange 18.10.1931; er leistete auf den verschiedensten Gebieten der Technik Pionierarbeit und meldete mehr als 1000 Patente an.

<sup>13</sup> Deutscher Astrophysiker, \* Köln 25.11.1858, † Potsdam 20.12.1913; er arbeitete besonders auf dem Gebiet der Spektroskopie.

<sup>14</sup> Britischer Physiker, \* Penkull 12. 6. 1851, † Lake 22. 8. 1940; er war von 1881-1899 Professor in Liverpool und von 1900-1919 Präsident der Universität Birmingham.

Anklang. *Reber* hat mit einer selbstgebauten Antenne und einem Parabolreflektor von 9,5 m Durchmesser (s. Abbildung 1) die Milchstraße beobachtet.



**Abbildung 1:** Die 9,5m-Antenne von *Grote Reber* in Illinois [Universe 35]

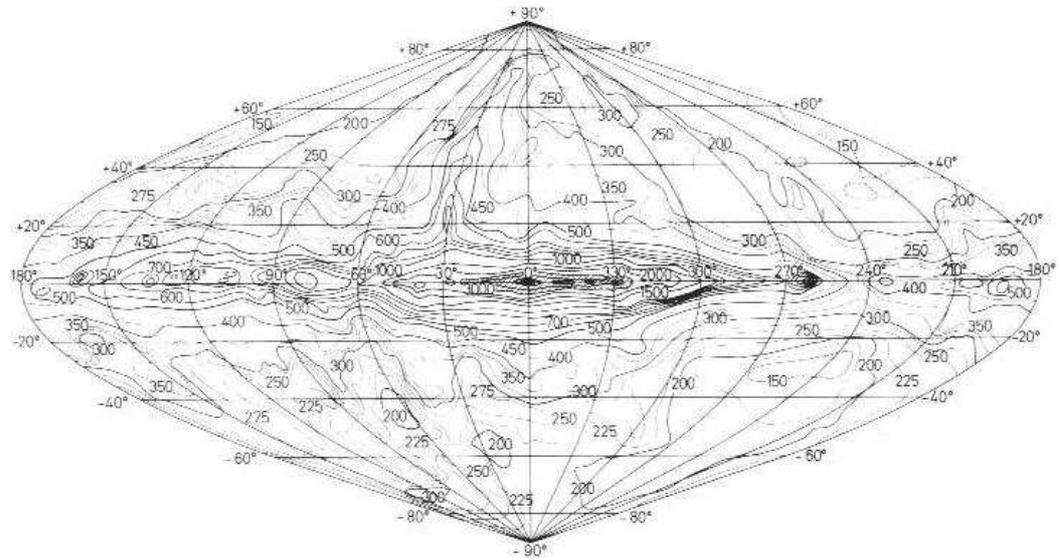
Nachdem er zuerst noch andere Empfänger für kürzere Wellenlängen (9,1 und 33 cm) verwendete, bei denen er aber keine kosmischen Quellen entdecken konnte, wurde er schließlich mit einem Empfänger für die Wellenlänge 1,87 m fündig. Erst seine vier Jahre später im *Astrophysical Journal* veröffentlichte Radiokarte der Milchstraße (s. Abbildung 2) sowie die ersten Radiomessungen der Sonne konnten die Aufmerksamkeit der Fachwelt erregen; er hatte in dieser Zeit seine Empfänger verbessert, systematisch den sichtbaren Himmel beobachtet und damit den Beginn der radioastronomischen Forschung eingeleitet.

1942, während des Zweiten Weltkrieges, maßen auch bereits *James Stanley Hey* und *J. Southworth* die Radiostrahlung der gestörten und ruhigen Sonne. 1946 erkannten *Hey*, *Phillips* und *Parson* die erste Radioquelle *Cygnus A*. Aufbauend auf den von *Jansky* gewonnenen Erkenntnissen sagte *Hendrik Christoffel van de Hulst*<sup>15</sup> 1944 die Spektrallinie des neutralen Wasserstoffs von  $\lambda = 21$  cm voraus, die experimentell im Jahre 1951 durch diverse Forscher aus den Niederlanden,

<sup>15</sup> Amerikanischer Astronom, \* 22.12.1911 Wheaton, † 20.12.2002 Tasmanien.

<sup>16</sup> Niederländischer Astrophysiker, \* 19.11.1918 Utrecht, † 31.7.2000 Leiden; er forschte außerdem über die Lichtstreuung an kleinen Teilchen, die Sonnenkorona und die interstellare Materie.

USA und Australien zeitgleich verifiziert werden sollte. Er erklärte diese im Gegensatz zu *Reber* mit der Nichtthermischen Radiostrahlung (s. 3.3.4.).



**Abbildung 2:** Radiokarte des Himmels  
in Galaktischen Koordinaten bei 150 MHz [Handbuch 178]

In den folgenden Jahren und Jahrzehnten erfolgte eine rasche Weiterentwicklung und es wurden weitere wichtige Entdeckungen gemacht:

- 1949 konnten *J. G. Bolton*, *G. J. Stanley* und *O. B. Slee* die Radioquelle *Taurus A* dem *Krebsnebel* zuweisen.
- 1954 *Walter Baade*<sup>17</sup> und *Rudolph Leo Bernhard Minkowski*<sup>18</sup> identifizierten die bereits erwähnte Radioquelle *Cygnus A* mit einer optischen Galaxie.
- In den 50er Jahren konnte durch die verbesserte Konstruktion von Einzelantennen und den Zusammenschluss von Antennen nach dem Interferometrie-Prinzip das Auflösungsvermögen (s. Kap. 2.3.) stark verbessert werden. Außerdem kamen jetzt die ersten besonders rauscharmen Verstärker auf den Markt, die die Forschung noch stärker vorantreiben sollte. So konnte 1960 von *Allan Rex Sandage*<sup>19</sup> zum ersten Mal ein Quasar als eine Radioquelle nachgewiesen werden.

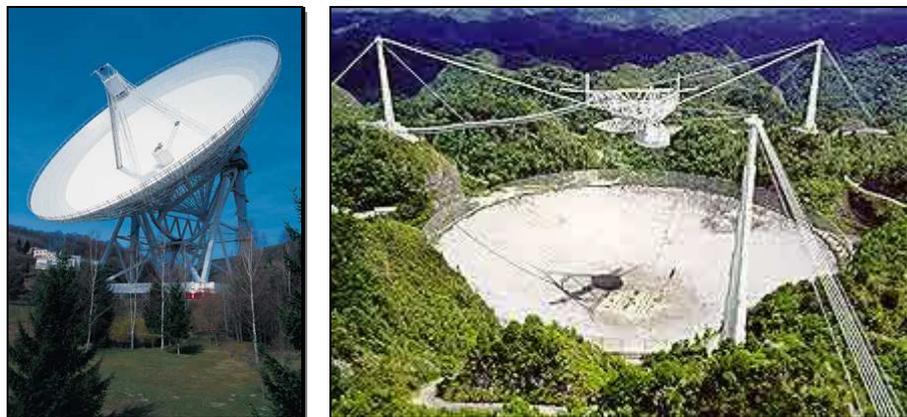
<sup>17</sup> Deutsch-amerikanischer Astronom, \* Schröttinghausen 24.3.1893, † Göttingen 25.6.1960; er erforschte besonders die Struktur von Spiralnebeln und Sternpopulationen.

<sup>18</sup> Deutsch-amerikanischer Astrophysiker, \* 28.5.1895 Straßburg, † 4.1.1976.

<sup>19</sup> Amerikanischer Astronom, \* 18.6.1926.

- *Arno Allen Penzias*<sup>20</sup> und *Robert Woodrow Wilson*<sup>21</sup> haben 1965 zum ersten Mal die 2,7° K Hintergrundstrahlung gemessen<sup>22</sup>.
- 1967 entdeckten *J. Bell* und *Antony Hewish*<sup>23</sup> über die Szintillationen<sup>24</sup> von Radioquellen die Pulsare<sup>25</sup>.
- 1968 wurde das erste organische Molekül, Formaldehyd (H<sub>2</sub>CO), von *L. Snyder*, *P. Palmer* und *B. Zuckerman* im Kosmos entdeckt.
- In den 70er Jahren wurden die Forschungen aufgrund der Fortschritte in der Verstärkertechnologie auch auf den Millimeter- und Submillimeterbereich ausgedehnt.

### 2.3. Die heutigen Radioteleskope



**Abbildung 3:** links: Das Radioteleskop des MPIfR in Effelsberg [Planck], rechts: das weltweit größte Teleskop in Arecibo auf Puerto Rico [Arecibo]

Im Bereich der 21cm-Linie stehen weltweit mehrere große Teleskope zur Verfügung. 1972 wurde das bis vor kurzem größte vollschwenkbare Radioteleskop in *Effelsberg* von dem Bonner *Max-Planck-Institut für Radioastronomie* (MPIfR, s. Abbildung 3) eröffnet, das Frequenzen von 0,4 bis 86 GHz beobachten kann und

<sup>20</sup> Amerikanischer Physiker, \* München 29. 4. 1933; Forschungen auf dem Gebiet der Radioastronomie.

<sup>21</sup> Amerikanischer Astrophysiker, \* Houston 10.1.1936; untersuchte die interstellare Materie mithilfe der Mikrowellenspektroskopie und entdeckte dabei zusammen mit *Penzias* die kosmische Hintergrundstrahlung; dafür erhielten sie zusammen mit P. L. Kapiza 1978 den Nobelpreis für Physik.

<sup>22</sup> Sie ist neben dem heutigen Anteil des Wasserstoffs im Universum und der Rotverschiebung von weit entfernten Sternen (entspricht einem expandierenden Universum) das dritte Standbein der Big-Bang-Theorie.

<sup>23</sup> Britischer Astronom, \* Fowey 11.5.1924; er war ab 1971 Professor in Cambridge und erhielt 1974 zusammen mit Sir M. Ryle den Nobelpreis für Physik.

<sup>24</sup> Ein zu beobachtendes Flimmern der Sterne besonders in Horizontnähe, das durch Luftunruhen hervorgerufen wird.

<sup>25</sup> Quellen kosmischer Radiofrequenzstrahlung, die regelmäßig Strahlungspulse von sehr kurzer Dauer abstrahlen.

eine Winkelauflösung von ca. 7,4 Gradminuten für eine Wellenlänge von 21cm besitzt.

Seit 2000 existiert das bis dato größte bewegliche Teleskop in *Green Bank* (Virginia, USA) mit einer asymmetrischen Schüssel von 100x110m. Auf Puerto Rico in der Nähe von *Arecibo* steht das mit einem Durchmesser von 305m weltweit größte Radioteleskop (s. Abbildung 3), das aber in einer natürlichen Talsenke unbeweglich montiert wurde und nur aufgrund der Erdrotation und der beweglichen Sekundärreflektoren einen großen Himmelsbereich abdecken können (1-31° Deklination, s. Kap. 3.1.2). Der Aufbau entstand zwischen 1960 und 1963, besitzt eine Auflösung von ca. 2,4' und erreichte zwischenzeitlich vor allem durch Filme wie *James Bond – Goldeneye* oder *Contact* einen hohen Bekanntheitsgrad.

Ein hohe Genauigkeit wird über die *Apertursynthese* erzielt, die auf *Sir Martin Ryle*<sup>26</sup> zurückgeht und bei denen Signale von mehreren teilweise verschiebbaren Antennen empfangen werden, wodurch eine erheblich höhere Auflösung zustande kommt als die der Einzelantenne. So besitzt das *Westerbork*-Teleskop in den Niederlanden 12 un- und 2 bewegliche Antennen mit je einem Durchmesser von 25m. Das *Very Large Array* (VLA) in Mexico hat sogar 25 Teleskope. Solche Aufbauten erreichen Winkelauflösungen von unter einer Gradsekunde. Eine Weiterentwicklung stellt dazu das *Very Long Baseline Array* (VLBA) dar. Seit 1995 sind 10 identische 25m-Teleskope quer durch die Vereinigten Staaten mit einer Spannweite von 9600 km miteinander verbunden. Es werden hierbei Auflösungen von bis unter ein Hundertstel einer Gradsekunde erreicht.

Das *Max-Planck-Institut* unterhält in Zusammenarbeit mit Kollegen Projekte in Arizona (*Arizona Radio Observatory*) und in Chile (*Atacama Pathfinder Experiment*), die aber auf den Milli- und Submillimeter-Bereich und nicht auf die 21cm-Linie ausgerichtet sind.

---

<sup>26</sup> Britischer Astrophysiker, \* 27.9.1918 Brighton, † Cambridge 14.10.1984; er war Professor in Cambridge und erhielt zusammen mit *A. Hewish* 1974 den Physik-Nobelpreis.

### 3. Theorie

#### 3.1. Koordinatensysteme

Um eindeutige Positionen von Gestirnen zu erlangen, über die man sich verständigen kann, muss man sich auf dasselbe Koordinatensystem einigen. Da aber die Systeme ihre verschiedenen Vor- und Nachteile haben, sollte man die Verwendung des jeweiligen Systems den Anforderungen und Situationen anpassen. So sind einem Beobachter auf der Erdoberfläche die Koordinaten relativ zum Galaktischen Zentrum nicht schnell ersichtlich, da erschwerend hinzu kommt, dass diese aufgrund der Ekliptik<sup>27</sup>, der Präzession und Nutation der Erde sowie natürlich der Rotation orts- und zeitabhängig sind. Da man aber z.B. zeitunabhängig den Winkel des Beobachters zur Erdoberfläche direkt messen kann, wird so ein anderes, einfach zu messendes Koordinatensystem gewählt, von dem man später in das ursprünglich beabsichtigte System umrechnet.

Dazu wird grundsätzlich ein *sphärisches Koordinatensystem* mit je zwei Winkelkoordinaten gewählt, sowie eine *Grundebene*, die die *Himmelskugel*<sup>28</sup> in zwei gleich große Halbkugeln teilt. Auf diese Ebene wird ein eigentlich willkürlicher, aber den Anforderungen angepasster *Nullpunkt* definiert, von dem in einer festzulegenden Richtung über den *Grundkreis* der erste Winkel  $\varphi_1$  (von  $0^\circ$  bis  $360^\circ$ ) gemessen wird. Alle mit der Himmelskugel konzentrischen Großkreise, die auf dem Grundkreis senkrecht stehen, schneiden sich in zwei *Polen*. Der zweiten Winkel  $\varphi_2$  wird zwischen der Ebene und einem Pol<sup>29</sup> gemessen und geht von  $-90^\circ$  bis  $+90^\circ$ .

##### 3.1.1. Horizontsystem

Das für den Beobachter auf der Erdoberfläche praktikabelste System ist das Horizontsystem. Hier wird der *Horizont* als Grundebene definiert sowie der *Zenit* als der Abstand zu dem einen Pol auf der Nordhalbkugel<sup>30</sup> (s. Abbildung 4). Als Nullpunkt der Grundebene wählt man die Nordrichtung, wobei der Winkel positiv über Osten, Süden, Westen gemessen und als *Azimut A* bezeichnet wird.

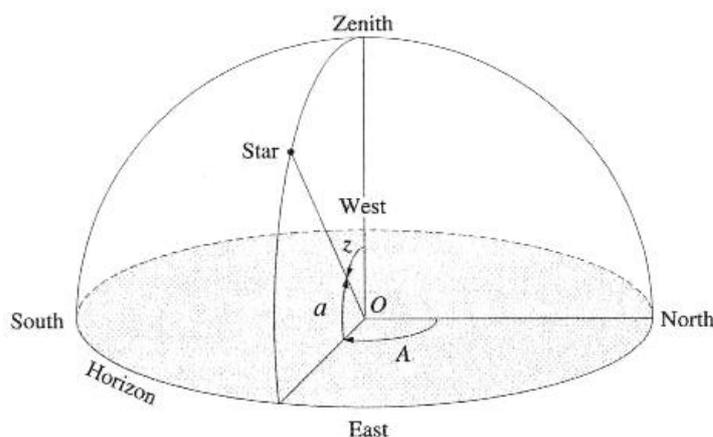
<sup>27</sup> Die von der Erde aus gesehene, scheinbare Bewegung der Sonne um die Erde.

<sup>28</sup> Mathematisch: eine unendlich entfernte Kugel, auf die man die Sterne projiziert.

<sup>29</sup> Bzw. Polen, wobei der Winkel zu dem einen Pol als positiv gesetzt wird.

<sup>30</sup> Als *Nadir* bezeichnet man den Pol auf der Südhalbkugel.

Die Höhe über dem Horizont wird als *Elevation*  $a$  bezeichnet und wird positiv zum Zenit hin definiert. Manchmal wird auch die *Zenithhöhe*  $z$ , also der Ergänzungswinkel zur Elevation, angegeben. Der Großkreis, der den Grundkreis vom Beobachter aus im Südpunkt (bzw. im Nordpunkt) schneidet, heißt *Meridian*. Die beiden Winkelkoordinaten sind für den Beobachter orts- und zeitunabhängig sowie sehr anschaulich, so sind Objekte mit  $a > 0^\circ$  über dem Horizont und daher sichtbar.



**Abbildung 4:** Koordinaten im Horizontsystem [Modern 11]

### 3.1.2. Äquatorialsystem

#### *Festes Äquatorialsystem*

Dieses System hat als Grundebene nicht mehr den Horizont, sondern die Äquatorebene. Die Pole entsprechen daher den geographischen Polen. Als Nullpunkt auf der Äquatorebene wird der Schnittpunkt mit dem Meridian gewählt und ist daher in Bezug auf den Beobachter fest. Der Winkel in der Ebene, *Stundenwinkel*  $\vartheta$ , wird über Westen, Norden, Osten definiert und rotiert mit der Erde mit (s. Abbildung 5). Die Höhe über der Ebene heißt *Deklination*  $\delta$  und ist wegen der Erdrotation für einen erdgebundenen Beobachter zeitabhängig.

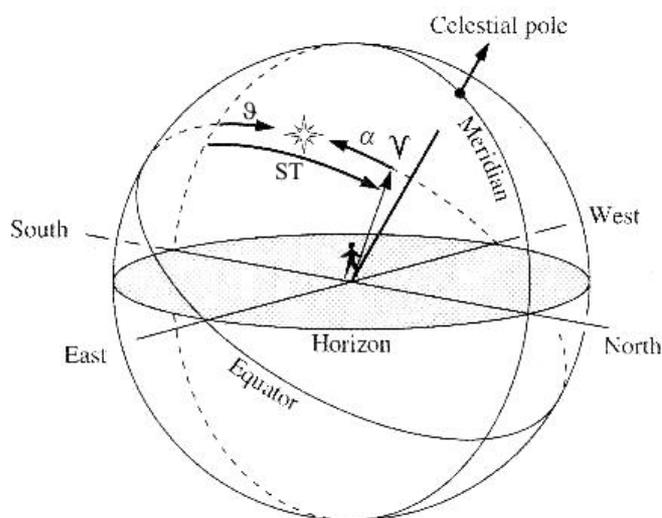
#### *Bewegtes Äquatorialsystem*

Im Unterschied zum Vorherigen wird auch der Winkel in der Grundebene beim bewegten Koordinatensystem für den Beobachter zeitabhängig, da dessen Nullpunkt nun für den Beobachter mit den Sternen rotiert. Die Position der Sterne wird aber unabhängig von der Erdrotation. Als Nullpunkt für diesen Winkel, *Rek-*

Rektaszension<sup>31</sup>  $\alpha$ , wird der *Frühlingspunkt* (auch *Widderpunkt*)  $\Upsilon$  gewählt, der erreicht wird, wenn die Sonne von der Erde aus gesehen den Schnittpunkt der Ekliptik mit der Äquatorebene von Süden nach Norden überschreitet (bzw. in das Sternbild des *Widders* eintritt). Gemessen wird in östlicher Richtung, also entgegengesetzt dem Stundenwinkel  $\vartheta$ . Der Stundenwinkel zum Frühlingspunkt wird auch als *Sternzeit* (ST) bezeichnet, die sich aus:

$$ST = \vartheta + \alpha \quad [1]$$

ergibt.



**Abbildung 5:** Koordinaten im Äquatorialsystem [Fundamental 16]

In Sternenkatalogen wird meistens nur die Deklination  $\delta$  und die Rektaszension  $\alpha$  angegeben, die über Jahre gesehen konstant bleiben. Als die *General Sidereal Time* (GST) wird die Sternzeit am Ort mit der geographischen Länge von  $0^\circ$  bezeichnet, die für den jeweiligen Beobachter in die lokale Sternzeit, *Local Sidereal Time* (LST), umgerechnet werden muss. Über die immer aktuell zu berechnende LST lassen sich aus den Äquatorialkoordinaten  $\delta$  und  $\alpha$  der Sternenkataloge die momentanen Koordinaten im Horizontsystem A und a berechnen. Konsensgemäß werden die Sternzeiten und die Rektaszension statt in Grad (bzw. in Gradminuten und -sekunden) in Stunden (bzw. Minuten und Sekunden) angegeben. Dabei entsprechen 24 Stunden genau einer Umdrehung der Erde (s. S. 6), also  $360^\circ$ . Entsprechend gilt:

	$1 \text{ h} = 15^\circ$	$1 \text{ min} = 15'$
bzw.	$1^\circ = 4 \text{ min}$	$1' = 4 \text{ sec.}$

<sup>31</sup> lat.: *gerade Aufsteigung*.

Über Jahrzehnte gesehen bleiben aber auch die Äquatorialkoordinaten aufgrund der Bewegung des gesamten Sonnensystems in unserer Galaxis nicht konstant. So werden in den Katalogen Deklination und Rektaszension immer bezogen auf ein bestimmtes Datum angegeben. Dabei handelt es sich meistens entweder um die Sternkonstellation am 1.1.1950 um 12 Uhr und wird unter *B1950* subsumiert oder die Konstellation am 1.1.2000 um 12 Uhr und wird als *J2000* bezeichnet (s. 3.1.6.).

### 3.1.3. Ekliptikalsystem

Hier wird an Stelle der Äquatorebene die zu dieser um  $\varepsilon = 23^\circ 27'$ <sup>32</sup> geneigte Ebene genommen, in der die vermeintliche Bahn der Sonne am Himmel, die *Ekliptik*, bzw. natürlich die Bahn der Erde um die Sonne liegt. So eignet sich dieses System hervorragend für die Beschreibung der Bahnen und Positionen von Objekten unseres Sonnensystems. Als Längenkoordinate in der Ebene wird die *ekliptikale Länge*  $\lambda$  genommen, die wie die Rektaszension vom Frühlingspunkt  $\Upsilon$  aus ostwärts gemessen wird (s. Abbildung 6). Der Deklination entspricht hier die *ekliptikale Breite*  $\beta$ .

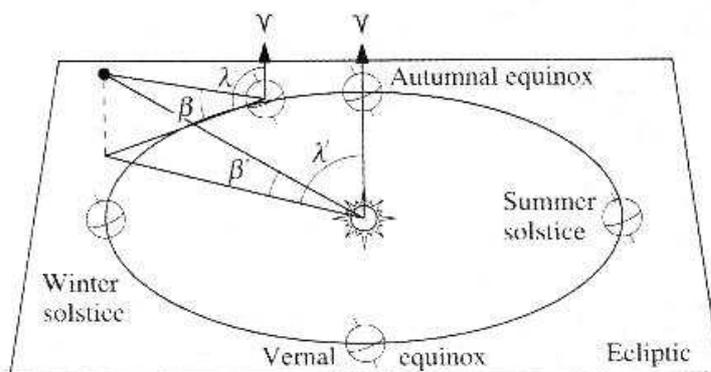


Abbildung 6: Koordinaten im Ekliptikalsystem [Fundamental 18]

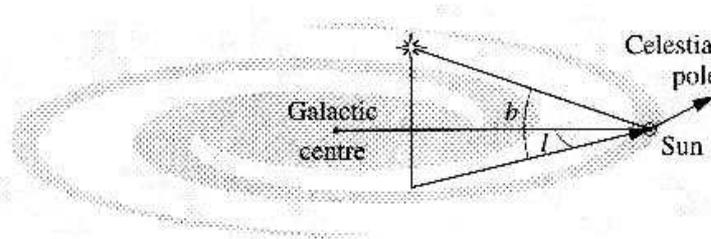


Abbildung 7: Koordinaten im Galaktischen System [Fundamental 19]

<sup>32</sup>  $\varepsilon$  ist die sog. *Schiefte der Ebene*. Die Erdachse ist gegen die Erdbahn um  $90^\circ - \varepsilon$  geneigt.

### 3.1.4. Galaktisches System

Für astronomische Angaben, die sich auf Sterne in unserer Galaxie und deren Positionen zueinander beziehen, ist es hilfreich das *Galaktische Koordinatensystem* zu verwenden. Die Grundebene ist hier die Rotations Scheibe der Milchstraße, der Ursprung liegt in unserem Sonnensystem und die ausgezeichnete Richtung (*Galaktische Länge*  $l = 0^\circ$ ) liegt in Richtung des Zentrums unserer Galaxie (s. Abbildung 7). Dieses liegt im Äquatorialsystem bei  $\alpha = 17 \text{ h } 42 \text{ m } 24 \text{ s}$  und  $\delta = -28^\circ 55'$ . Die Galaktische Länge wird in gleicher Orientierung wie die Rektaszension von  $0^\circ$  bis  $360^\circ$ , die *Galaktische Breite* von  $-90^\circ$  (in Richtung zum *Galaktischen Südpol*) bis  $+90^\circ$  (in Richtung zum *Galaktischen Nordpol*) gemessen.

### 3.1.5. Supergalaktisches System

Eine Ebene höher als das Galaktische System befindet sich das *supergalaktische*, dass als Grundebene die Ebene von dem lokalen Supercluster definiert, auf der auch die Sternbilder *Virgo*, *Hydra* und *Centaurus* liegen. Dieser supergalaktische Äquator schneidet die galaktische Ebene bei  $l = 137^\circ 22'$ . Der Längengrad an diesem Schnittpunkt wird nach [Leada] als  $0^\circ$  supergalaktischer Länge definiert, der *supergalaktische Nordpol* wird dagegen bei  $l = 47^\circ 22'$  und  $b = 6^\circ 19'$  definiert.

### 3.1.6. Koordinatentransformationen

Um insbesondere zwischen dem Äquatorial- und dem Horizontsystem Koordinaten umzurechnen, benötigt man eine Referenzzeitgröße, auf die sich alle Astronomen beziehen können. Dazu verwendet man das *Julianische Datum* (JD), welches die Anzahl an Tagen seit dem 1.1.4713 v.Chr. angibt. Der Beginn des Julianischen Tages wurde auf 12 Uhr GST festgelegt, d.h. dem 2.1.4713 v.Chr. um 0 Uhr entspricht  $JD = 0,5$ . Daher ist das JD immer positiv. Das JD für einen bestimmten Tag mit  $y = \text{Jahr}$ ,  $m = \text{Monat}$  und  $d = \text{Tag}$  lässt sich nach [Practical 6ff] wie folgt berechnen:

- falls  $m = 1$  oder  $2$  ist  $y = y - 1$  und  $m = m + 12$ .
- falls das Datum nach dem 15.10.1582 liegt (also für heutige Beobachtungen notwendig), gilt<sup>33</sup>:

$$A = \text{INT} \left( \frac{y}{100} \right)$$

<sup>33</sup> *INT* bezeichnet den Integeranteil des Arguments, sprich die nächst niedrigere Ganze Zahl.

$$B = 2 - A + \text{INT}\left(\frac{A}{4}\right)$$

- falls  $y < 0$  ist

$$C = \text{INT}(365,25y - 0,75)$$

- falls  $y \geq 0$  ist

$$C = \text{INT}(365,25y)$$

sowie

$$D = \text{INT}(30,6001 \cdot (m+1))$$

Für das Julianische Datum ergibt das:

$$\text{JD}[d] = B + C + D + d + 1720994,5. \quad [\text{Practical 6ff}] [2]$$

Dieses wird für die Umrechnung zwischen der *Universal Time* (UT oder auch *Greenwich-Time*, benannt nach der Sternwarte, durch die der nullte Längengrad verläuft) und der bereits erwähnten Sternzeit (GST) benötigt. Im Gegensatz zu dieser bezieht sich die UT auf die Sonnenposition am Längengrad von  $0^\circ$  (also abzgl. der Sommerzeit- und Zeitzonen-Differenz) und nicht auf die Positionen von Sternen. So ist ein Tag in der UT länger als in der GST, da die Erde jeden Tag einen kleinen Winkelbereich ( $\sim 1^\circ$ ) weiter rotieren muss, damit die Sonne wieder an der gleichen Position angelangt ist.

Die unterschiedlichen Zeitzonen sowie die Sommerzeit berücksichtigt im Gegensatz zu der UT die so genannte *Local Civil Time* (LCT):

$$\text{UT}[h] = \text{LCT}[h] - \Delta T_{\text{Zeitzone}} - \Delta T_{\text{Sommerzeit}} \quad [\text{Practical 14f}] [3]$$

Die GST berechnet sich wie folgt:

$$T_1 = \frac{\text{JD} - 2451545,0}{36525}$$

$$T_2 = 6697374558 + 2400051336 \cdot T_1 + 0,000025862 \cdot T_1^2$$

$$\text{GST}[h] = T_2 + \text{UT} \cdot 1,002737909 \quad [\text{Practical 17}] [4]$$

Durch wiederholte Addition oder Subtraktion von 24 ist die GST noch in den Bereich von 0 bis 24 h umzurechnen. Für die LST in Abhängigkeit vom *Längengrad* des Standortes  $\phi$  (in Grad, positiv nach Osten) gilt dann:

$$\text{LST}[h] = \text{GST}[h] + \frac{\phi[^\circ]}{15} \quad [\text{Practical 20}] [5]$$

Diese muss ggf. auch noch in den Bereich von 0 bis 24 h umgerechnet werden.

Des Weiteren gilt dann für den lokalen Stundenwinkel  $\vartheta$  (s. Kap. [1]):

$$\vartheta[h] = \text{LST}[h] - \alpha[h] \quad [\text{Practical 35}] [6]$$

### *Horizont- / Äquatorialsystem*

Für die Umrechnung aus den (bewegten) Äquatorialkoordinaten  $\delta$  und  $a$  bzw.  $J$  in das Horizontsystem mit dem Azimut  $A$  und der Elevation  $a$  gilt:

$$\begin{aligned} a &= \arcsin\left(\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos(\vartheta[^\circ])\right) \\ A &= \arccos\left(\frac{\sin \delta - \sin \phi \sin a}{\cos \phi \cos a}\right) \end{aligned} \quad [\text{Practical 36}] [7]$$

Bei der Berechnung ist außerdem zu beachten, dass die inversen trigonometrischen Funktionen immer zwei Lösungen haben, ein Rechner aber immer nur ein Ergebnis ausgibt, so dass hier für  $\sin \vartheta > 0$  die Korrektur  $A' = 360^\circ - A$  vorgenommen wird.

Für die umgekehrte Rechnung in das Äquatorialsystem werden die Koordinaten wie folgt berechnet:

$$\begin{aligned} \delta &= \arcsin(\sin a \sin \phi + \cos a \cos \phi \cos A) \\ \vartheta[^\circ] &= \arccos\left(\frac{\sin a - \sin \phi \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta}\right) \end{aligned} \quad [\text{Practical 38f}] [8]$$

Für  $\vartheta$  gelten dieselben Korrekturen wie für  $A$ .

Für die Rektaszension gilt dann mit [6]:

$$\alpha[h] = \text{LST}[h] - \vartheta[h] \quad [9]$$

### *Äquatorial- und Galaktisches System*

Da beide Systeme zeitunabhängig sind, ist auch diese Umrechnung zeitunabhängig und nur von Konstanten bestimmt. Zum einen sind es die Koordinaten des Galaktischen Nordpols, der sich bei  $\alpha = 192^\circ 51'$  und  $\delta = 27^\circ 24'$  befindet. Hieraus kann man ableiten, dass die Galaktische Ebene um  $52^\circ 36'$  gegenüber der Äquatorebene geneigt ist. Zum anderen ist es der Schnittpunkt dieser beiden Grundebenen, der sich bei der Galaktischen Länge  $l = 33^\circ$  befindet. Für die beiden Galaktischen Koordinaten gilt dann:

$$\begin{aligned} b &= \arcsin\left\{\cos \delta \cos(27,4^\circ) \cos(\alpha - 192,25^\circ) + \sin \delta \sin(27,4^\circ)\right\} \\ l &= \arctan\left\{\frac{\sin \delta - \sin b \sin(27,4^\circ)}{\cos \delta \sin(\alpha - 192,25^\circ) \cos(27,4^\circ)}\right\} + 33^\circ \end{aligned} \quad [\text{Practical 38f}] [10]$$

### *Ekliptikal- und Supergalaktisches System*

Die Umrechnungen von und in diese Systeme werden an dieser Stelle nicht speziell aufgeführt, da diese für die beabsichtigten Zwecke nicht gebraucht werden. Es wird für eine nähere Betrachtung auf das Buch *Practical Astronomy With Your Calculator* von *Peter Duffet-Smith* verwiesen, in dem auch weitere Berechnungen, wie die Positionsbestimmungen von Planeten, Kometen, der Sonne, dem Mond sowie diverse genauere Betrachtungen dargestellt sind.

## 3.2. Strahlungstheorie und Thermodynamik

### 3.2.1. Elektromagnetische Wellen

Eine elektromagnetische Welle wird immer durch die über die *Maxwellschen Gleichungen* miteinander gekoppelten Felder  $\vec{E}$  (elektrisches Feld in  $\text{Vm}^{-1}$ ) und  $\vec{H}$  (magnetisches Feld in  $\text{Am}^{-1}$ ) bestimmt. Die *Leistungsdichte*  $S$ , also die elektromagnetische Leistung pro Flächeneinheit, einer solchen Welle (bzw. auch *Energiestromdichte*, *Strahlungsdichte*, *Leistungsflussdichte*) beschreibt der *Poynting-Vektor*:

$$S[\text{W}/\text{m}^2] = H[\text{A}/\text{m}] \cdot E[\text{V}/\text{m}]$$

$$\text{oder vektoriell } \vec{S}(\vec{r}, t) = \vec{E}(\vec{r}, t) \times \vec{H}(\vec{r}, t) \quad [\text{Gronau 30}] [11]$$

Da die elektromagnetische Strahlung aus einer magnetischen und einer elektrischen Komponenten besteht und der freie Raum einen festen *Feldwellenwiderstand* besitzt, ist die Messung einer Komponente ausreichend. Der Feldwellenwiderstand ist über das Verhältnis von den zueinander transversalen Komponenten, der elektrischen Feldstärke  $E$  und der magnetischen Feldstärke  $H$ , für die eine harmonische Zeitabhängigkeit zugrunde gelegt wird, definiert:

$$Z [\Omega] = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{i\omega\mu}{\kappa + i\omega\epsilon}} \quad [\text{Rothammel 39}] [12]$$

$\kappa$ : Leitfähigkeit

Im Gegensatz zu dem komplexen Feldwellenwiderstand in einem leitenden Medium wird der Widerstand in verlustfreien Medien reell, d.h.  $\kappa \approx 0$ :

$$Z = \sqrt{\frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r}} \quad [\text{Rothammel 39}] [13]$$

Insbesondere für den freien Raum, in dem  $\mu_r = \epsilon_r = 1$  gilt, beträgt der Feldwellenwiderstand:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \cong 376,7 \Omega \quad [\text{Rothammel 39}] [14]$$

Damit kann man die Leistungsdichte  $S$  umschreiben zu:

$$S \left[ \text{W} / \text{m}^2 \right] = \frac{E^2}{Z_0} \quad [\text{Rothammel 32}] [15]$$

Somit genügt die alleinige Messung des elektrischen Feldes, um die Leistungsdichte zu bestimmen.

### 3.2.2. Energie

Bei einem Strahlungsfeld im Allgemeinen definiert man zuerst ein Flächenelement  $dA$  mit einer Normalen  $n$ , durch das die zu betrachtende Strahlungsenergie verläuft. Für einen schmalen Frequenzbereich  $d\nu$  und einen kleinen Raumwinkel

$$d\Omega = \sin \vartheta \cdot d\vartheta \cdot d\varphi \quad [\text{Kosmos 106}] [16]$$

für diese Energie:

$$dE = I_\nu(\vartheta, \varphi) d\nu \cdot \cos \vartheta \cdot dA \cdot d\Omega \cdot dt \quad [\text{Kosmos 106}] [17]$$

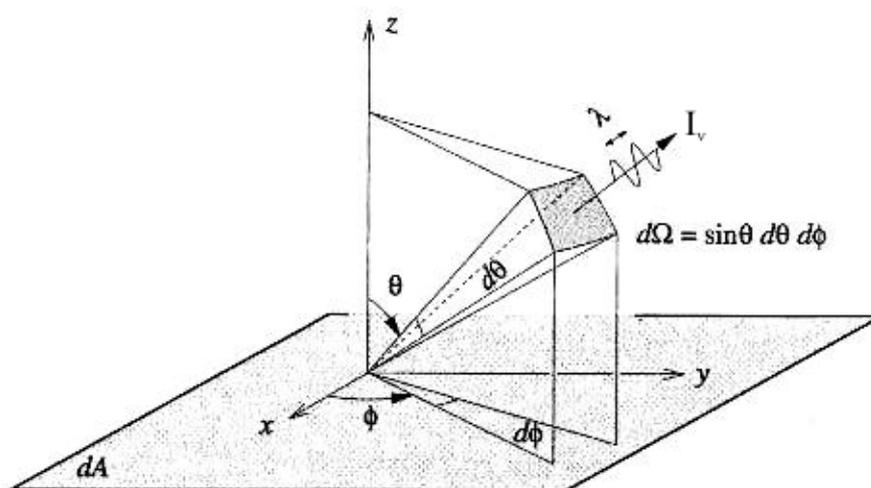


Abbildung 8: Die Intensität in Abhängigkeit von den Winkel  $\vartheta$  und  $\varphi$  [Modern 80]

### 3.2.3. Intensität

Die *spezifische Intensität*  $I(\nu) = I_\nu$  wird sodann als die Energiemenge in dem Einheitsraumwinkel  $d\Omega = 1 \text{ sr}$ <sup>34</sup>, in der Zeiteinheit  $dt = 1 \text{ s}$ , im Einheitsfrequenzbe-

<sup>34</sup> Ein Steradian (sr) entspricht einem Raumwinkel, der eine Fläche von  $A = 1 \text{ m}^2$  im Abstand von  $r = 1 \text{ m}$  aus der Einheitskugel ausschneidet.

reich von 1 Hz und durch die Einheitsfläche  $A = 1 \text{ m}^2$  in Abhängigkeit von den beiden Winkeln  $\vartheta$  und  $\varphi$  (s. Abbildung 8) definiert:

$$I_v(\vartheta, \varphi) \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{Hz} \cdot \text{sr}} \right] = \frac{dE}{dv \cdot \cos \vartheta \cdot dA \cdot d\Omega \cdot dt} \quad [\text{Kosmos 107}] [18]$$

$$= \frac{dP}{dv \cdot \cos \vartheta \cdot dA \cdot d\Omega}$$

$dP$  ist dabei die *Leistung* mit  $dP = dE / dt$ . Für den Spezialfall, dass die verwendete Antenne eine starke Richtcharakteristik besitzt, nimmt man  $\cos \vartheta \cong 1$  an, so dass dann gilt:

$$I_v \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{Hz} \cdot \text{sr}} \right] = \frac{dP}{dv \cdot dA \cdot d\Omega} \quad [19]$$

Legt man ein kleines Frequenzband  $\Delta v$  zu Grunde und mittelt man  $I$  über  $\Omega$  und  $\Delta v$ , dann vereinfacht sich [19] zu:

$$I_v \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{Hz} \cdot \text{sr}} \right] = \frac{P}{\Delta v \cdot A \cdot \Omega} \quad [20]$$

Die Intensität wird manchmal auch als *Helligkeit* (engl. *brightness*) bezeichnet. Dementsprechend ist die *Gesamtintensität* bzw. *-strahlung* (engl. *total brightness*)  $I$  das Integral über alle Frequenzen:

$$I \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{sr}} \right] = \int_0^\infty I_v dv \quad [\text{Kosmos 107}] [21]$$

### 3.2.4. Strahlungsflussdichte

Die *Strahlungsflussdichte*<sup>35</sup> (engl. *flux density*) ist das Integral über alle Intensitäten [18] in einem Raumwinkelement  $d\Omega$ :

$$F_v \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{Hz}} \right] = \oint I_v \cdot \cos \vartheta \cdot d\Omega \quad [\text{Kosmos 107}] [22]$$

$$= \int_0^{2\pi} \int_0^\pi I_v \cdot \cos \vartheta \cdot \sin \vartheta \cdot d\vartheta \cdot d\varphi$$

Man integriert über alle Strahlen einer Quelle, die durch ein entsprechendes Flächenelement hindurch treten, wobei  $\vartheta$  dabei der Winkel zu der Flächennormalen ist. Legt man eine starke Richtcharakteristik ( $\cos \vartheta \cong 1$ ) sowie ein kleines Frequenzband  $\Delta v$  zu Grunde und mittelt man  $I$  über  $\Omega$  und  $\Delta v$ , dann vereinfacht sich [22] zu:

<sup>35</sup> Diese wird auch als *Strahlungsstrom* bezeichnet.

$$F_v \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{Hz}} \right] = I \cdot \Omega \quad [23]$$

$$= \frac{P}{A \cdot \Delta v}$$

Insbesondere bei der Radioastronomie wird als gebräuchliche Einheit für die Strahlungsflussdichte 1 *Jansky* = 1 Jy =  $10^{-26} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$  verwendet, die nach dem amerikanischen Ingenieur (s. Kap. 2.2.) benannt wurde.

Entsprechend zu [21] gilt für den *Gesamtstrahlungsstrom*:

$$F \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] = \int_0^\infty F_v dv = \frac{dP}{dA} \quad [\text{Kosmos 107}] [24]$$

Betrachtet man ein sehr enges Strahlungsbündel, so ist

$$F = |\vec{S}| \quad [\text{Kosmos 107}] [25]$$

$S$ : Poynting-Vektor

### 3.2.5. *Strahlungsfluss*

Der *Strahlungsfluss*  $L$  einer Quelle ist wie die Intensität unabhängig von der Entfernung  $r$  und ist definiert als

$$L [\text{W}] = \Omega \cdot r^2 F \quad [\text{Fundamental 82}] [26]$$

### 3.2.6. *Emission und Absorption*

Ein isotrop strahlendes Volumenelement  $dV$  mit einem *Emissionskoeffizienten*  $j_v$  gibt pro Zeiteinheit eine Gesamtenergie von

$$E = 4\pi \int_0^\infty j_v dv \cdot dV \quad [\text{Kosmos 109}] [27]$$

ab. Demgegenüber steht für eine Schicht der Dicke  $ds$  ein *Absorptionskoeffizient*  $\kappa_v$ , wenn ein enges Strahlenbündel diese passiert. Für den Abfall der Intensität gilt dann:

$$\frac{dI_v}{ds} = -\kappa_v I_v \quad [\text{Kosmos 109}] [28]$$

Da die Abschwächung sowohl aus dieser Absorption als auch aus der Streuung aus der Strahlrichtung heraus mit einem Streukoeffizienten  $\sigma_v$  beschrieben werden kann, subsumiert man dies unter der *Extinktion*  $k_v = \kappa_v + \sigma_v$ . Die einzelnen Koeffizienten sind meistens abhängig von der Frequenz  $\nu$ , dem Druck und der Temperatur der Materie, der chemischen Zusammensetzung und teilweise von der Raumrichtung.

Daher ergibt das für die *Transportgleichung* auf der Strecke  $ds$ :

$$\frac{dI_v}{ds} = j_v - \kappa_n I_v \quad [\text{Kosmos 109}] [29]$$

Für eine nur absorbierende Schicht mit  $j_v = 0$  gilt dann bei einer Intensität  $I_{v,0}$  der einfallenden Strahlen für die Intensität  $I_v$  der durchgehenden Strahlen:

$$I_v = I_{v,0} \cdot e^{-\tau_v}, \quad [\text{Kosmos 110}] [30]$$

dabei sei

$$\tau = \int_0^s k_v ds \quad [\text{Kosmos 110}] [31]$$

die *optische Dicke* der Materieschicht. Mit dessen Differential  $d\tau_v = k_v ds$  und mit der Definition einer *Quellfunktion*

$$S_v = \frac{j_v}{k_v} \quad [\text{Kosmos 110}] [32]$$

lässt sich die Transportgleichung schreiben als

$$\frac{dI_v}{d\tau_v} = S_v - I_v \quad [\text{Kosmos 110}] [33]$$

Für die Intensität  $I_v$  einer Strahlung aus einer Materieschicht der Dicke  $s$  in Blickrichtung und einer konstanten Quellfunktion  $S$  mit der Schwächung

$$t_v(x) = \int_0^x k_v dx$$

gilt:

$$\begin{aligned} I_v &= \int_0^{\tau_v} S_v e^{-t_v} dt_v \\ &= S_v (1 - e^{-\tau_v}) \quad [\text{Kosmos 111}] [34] \\ &\cong \begin{cases} \tau_v S_v(T) & \text{für } \tau \ll 1 \\ S_v(T) & \text{für } \tau \gg 1 \end{cases} \end{aligned}$$

### 3.2.7. Schwarzkörperstrahlung

Man stellt sich die Strahlung kosmischer Quellen dabei vor wie einen schwarzen Hohlraum mit der Temperatur  $T_B$ , der dieselbe Strahlung abgibt. Daher wird die Temperatur  $T_B$  einer Quelle auch als *äquivalente Strahlungstemperatur* bezeichnet, die ein entsprechender *Schwarzer Körper* ausstrahlen würde. Diese Näherung gilt in soweit, als dass man bei diesen Quellen von einem *thermodynamischen Gleichgewicht* ausgeht, d.h., dass alle Flächenelemente pro Zeiteinheit gleich viel

Strahlungsenergie absorbieren und emittieren. Diese Schwarzkörperstrahlung wird durch die *Kirchhoff-Planck-Funktion*  $B_\nu(T)$  für eine bestimmte Frequenz bzw.  $B_\lambda(T)$  für eine bestimmte Wellenlänge beschrieben (s. Abbildung 9), die *Gustav Robert Kirchhoff*<sup>36</sup> 1860 erkannte und *Max Planck*<sup>37</sup> 1900 explizit berechnete:

$$B_\nu(T_B) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \cdot \frac{1}{\exp(h\nu/kT_B) - 1},$$

$$\text{bzw. } B_\lambda(T_B) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp(hc/k\lambda T_B) - 1} \quad [\text{Kosmos 112}] [35]$$

mit  $c$ : Lichtgeschwindigkeit,  $h$ : Planck-Konstante,

und  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$  Boltzmann-Konstante

In der Abbildung 9 ist erkennbar, dass die Schwarzkörper- bzw. *thermische Strahlung* bei Temperaturen unter ein paar Kelvin in den Radiobereich gelangt.

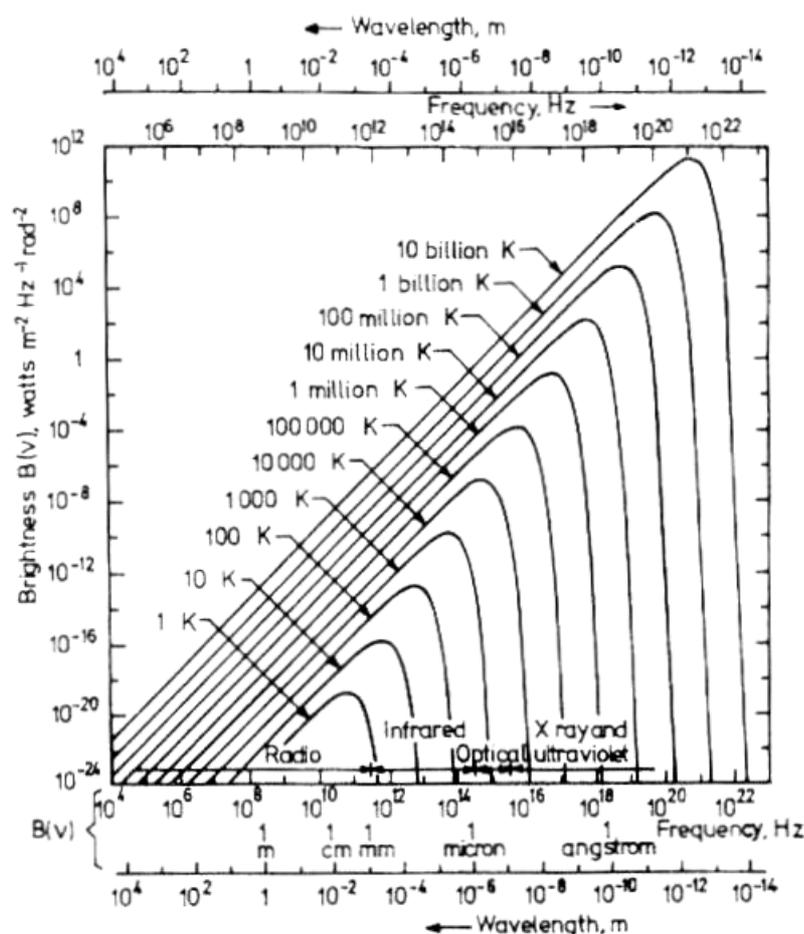


Abbildung 9: Schwarzkörperstrahlung in Abhängigkeit von  $T$  und  $\nu$  [Kosmos 12]

<sup>36</sup> Deutscher Physiker, \* Königsberg 12.3.1824, † Berlin 17.10.1887.

<sup>37</sup> Deutscher Physiker, \* Kiel 23.4.1858, † Göttingen 4.10.1947.

Als Näherung erhält man für  $\frac{h\nu}{kT_B} \gg 1$  das *Wiensche Verschiebungsgesetz*

$$B_\nu(T_B) \cong \frac{2h\nu^3}{c^2} \exp\left(\frac{-h\nu}{kT_B}\right), \quad [\text{Kosmos 112}] [36]$$

für den entgegen gesetzten Fall von  $\frac{h\nu}{kT_B} \ll 1$  kann als Näherung das *Rayleigh-Jeans-Gesetz* betrachten:

$$B_\nu(T_B) \cong \frac{2\nu^2 kT_B}{c^2} \quad [\text{Kosmos 112}] [37]$$

Integriert man die Intensität des Schwarzen Körpers über den ganzen Raum und multipliziert man mit  $\pi$ , erhält man den Gesamtstrahlungsstrom  $F^+$  in den Halbraum:

$$F^+ = \pi B(T_B) = \pi \int_0^\infty B_\nu(T_B) d\nu = \sigma T_B^4 \quad [\text{Kosmos 112}] [38]$$

$$\text{mit } \sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} \text{ als der Strahlungskonstanten}$$

Dieses *Stefan-Boltzmann-Gesetz*, das *Josef Stefan*<sup>38</sup> 1879 experimentell und *Ludwig Boltzmann*<sup>39</sup> 1884 theoretisch ableiteten, stellt die Ausstrahlung eines schwarzen Körpers der Einheitsfläche in den Halbraum dar.

Durch das thermodynamische Gleichgewicht gilt für die Quellfunktion (s. [32]) der *Kirchhoffsche Satz*:

$$S_\nu = \frac{j_\nu}{\kappa_\nu} = B_\nu(T_B) \quad [\text{Kosmos 112}] [39]$$

Für eine Materieschicht der Dicke  $s$  sowie mit der konstanten Strahlungstemperatur  $T_B$  und daher auch konstantem  $B_\nu$  ist die *thermische Emission*:

$$I_\nu(\tau_\nu(s), T_B) = B_\nu(T_B)(1 - e^{-\tau_\nu}) \\ \cong \begin{cases} \tau_\nu B_\nu(T_B) & \text{für } \tau \ll 1 \\ B_\nu(T_B) & \text{für } \tau \gg 1 \end{cases} \quad [\text{Kosmos 112}] [40]$$

Die Intensität ist also für ein optisch dichtes Medium ( $\tau \gg 1$ ) gleich der Schwarzkörperstrahlung. Für optisch dünne Materiebereiche ist die Intensität abhängig von der Schichtdicke der Materie bzw. eines Gases, so dass man auf die Intensität in Abhängigkeit von der Quellfunktion zurückgreifen muss. Dies gilt nicht, wenn

<sup>38</sup> Slowenischer Mathematiker und Physiker, \* 24.3.1835 St. Peter, † 7.1.1893 Wien.

<sup>39</sup> Österreichischer Physiker und Philosoph, \* 20.2.1844 Wien, † 5.9.1906 Duino.

man eine Materie betrachtet, die sich nicht in einem thermischen Gleichgewicht befindet, in der also  $S_v = j_v/k_v \neq B_v(T_B)$  ist.

Für den Rayleigh-Jeans-Fall und ein optisch dichtes Medium gilt für die äquivalente Strahlungstemperatur  $T_B$  (s. auch Abbildung 9) von einer Quelle mit der Intensität  $I_v$ :

$$T_B = \frac{c^2}{2k\nu^2} I_v \quad [\text{Tools 13}] [41]$$

Nach [Tools 13] kann die Strahlungstemperatur auch für höhere Frequenzen verwendet werden, nur ist dabei zu beachten, dass  $T_B$  dann von der realen Temperatur des thermodynamischen Gleichgewichts abweicht. Diese entspricht daher in der Regel nicht der wahren Temperatur, sondern stellt nur einen anderen Ausdruck für die Intensität dar.

### 3.2.8. Punktquellen

Man spricht von einer *Punktquelle* bzw. *nicht aufgelösten Quelle*, wenn der Raumwinkel  $\Omega_Q$ , in dem die Quelle für den Beobachter am Himmel erscheint, sehr viel kleiner als der Raumwinkel  $\Omega_A$  (s. Abbildung 10), den die beobachtende Antenne abdeckt, ist

$$\Omega_Q \ll \Omega_A \quad [\text{Kosmos 146}] [42]$$

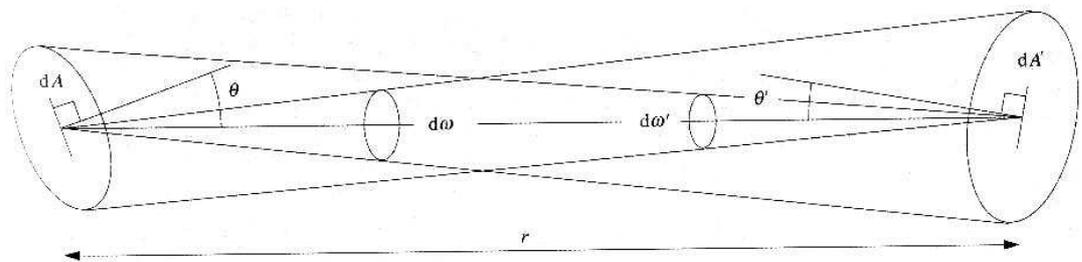


Abbildung 10: Strahlung zwischen zwei Flächenelementen [Fundamental 89]

Wenn  $R$  der Radius einer weit entfernten Quelle ( $\tan x \cong x$ ),  $r$  deren Abstand zum Beobachter und  $\psi$  der Winkel ist, unter dem man diese sieht, dann gilt für den Raumwinkel  $\Omega_Q$ :

$$\begin{aligned} \Omega_Q(r, R) &= \frac{\pi R^2}{r^2} \\ &= \pi \tan^2 \frac{\psi}{2} \cong \frac{\pi}{4} \psi^2 \end{aligned} \quad [\text{Kosmos 146}] [43]$$

Daraus folgt für den Erscheinungswinkel der Quelle am Himmel

$$\psi \cong 2 \frac{R}{r}. \quad [44]$$

Da für den Raumwinkel aus [43]  $\Omega_Q \propto 1/r^2$  gilt, ist auch die Strahlungsflussdichte antiproportional zu  $r^2$ :

$$F_v(r) \propto \frac{1}{r^2}. \quad [45]$$

Für die Beobachtung mit einem Teleskop der Fläche  $A_E$  (s. 3.4.8.) von nicht aufgelösten Quellen mit einer über die Bandbreite  $\Delta\nu$  konstanten Strahlungsflussdichte  $F_v$  (s. [23]) gilt für die empfangene Leistung  $P_p$ :

$$\begin{aligned} P_p [\text{W}] &= F_v A_E \Delta\nu \\ &= F_v [\text{Jy}] \cdot A_E \Delta\nu [\text{MHz}] \cdot 10^{-20} \end{aligned} \quad [46]$$

bzw. mit der Intensität aus [20]

$$P_p = I_v \Omega_Q A_E \Delta\nu \quad [47]$$

### 3.2.9. Flächenquellen

Die Quellen, die in einen Raumwinkel  $\Omega_Q$  strahlen, der größer oder gleich dem Raumwinkel der empfangenen Antenne  $\Omega_A$  ist ( $\Omega_Q \geq \Omega_A$ ), wird nicht mehr die gesamte Energie, sondern nur noch ein Teil dessen, was ausgesandt wurde, empfangen. Mit [23] ergibt sich für die empfangene Leistung  $P_F$  einer Flächenquelle bei einer über die Bandbreite  $\Delta\nu$  konstanten Intensität  $I_v$ :

$$P_F = A_E \cdot I_v \cdot \Omega_A \cdot \Delta\nu \quad [48]$$

Über die Strahlungsflussdichte lässt sich die Leistung auch als

$$P_F = A_E \cdot F_v \cdot \frac{\Omega_A}{\Omega_Q} \cdot \Delta\nu \quad [49]$$

ausdrücken.

### 3.2.10. Gas im thermodynamischen Gleichgewicht

Wenn die Dichte in einem Gas bei einer bestimmten Temperatur hoch genug ist, stellt sich ein thermodynamisches Gleichgewicht ein, das ggf. wie ein schwarzer Körper strahlt (s. 3.2.7.). So kann man bei einem Stern bei kleinen Volumeneinheiten von einem lokalen thermodynamischen Gleichgewicht sprechen. Aussagen über die Energie kann man machen, wenn man ein ideales Gas mit einer Temperatur  $T$  betrachtet. Die Teilchen eines Zustands  $i$  haben eine Anregungsenergie von  $E_S$  und eine kinetische Energie von

$$E_{\text{kin}} = \frac{mv^2}{2} = \frac{p^2}{2m}, \quad [\text{Kosmos 113}] [50]$$

m: Masse, p: Impuls, v: Geschwindigkeit

so dass die Gesamtenergie für diesen Zustand

$$E_i = E_S + E_{\text{kin}} \quad [\text{Kosmos 113}] [51]$$

ist. Für den Grundzustand ist  $E_S = 0$ . Nach *Boltzmann* ist die Anzahl der Teilchen im Zustand  $i$  in der Statistischen Thermodynamik im Volumen  $dV$

$$n_i \propto G_i e^{-\frac{E_i}{kT}}. \quad [\text{Kosmos 113}] [52]$$

$G_i$  ist dabei das statistische Gewicht, in das auch die unterschiedlichen Entartungen eines Zustandes eingehen. Wenn man dies in das statistische Gewicht des Zustand  $s$   $g_s$  und in das der Translationsbewegung  $g_p$  zerlegt, gilt für dieses

$$G_i = g_s \cdot g_p$$

$$n_i \propto G_i e^{-\frac{E_S}{kT}} e^{-\frac{E_{\text{kin}}}{kT}} = g_s e^{-\frac{E_S}{kT}} g_p e^{-\frac{E_{\text{kin}}}{kT}} \quad [\text{Kosmos 113}] [53]$$

Für eine thermische Anregung gilt für die Besetzungsdichte von dem Zustand  $s$  relativ zu dem Grundzustand 0

$$\frac{n_s}{n_0} = \frac{g_s}{g_0} e^{-\frac{E_S}{kT}} \quad [\text{Kosmos 114}] [54]$$

und ist somit unabhängig von der Translationsbewegung.

Man unterscheidet bei den Übergängen von Atomen zwischen drei Prozessen:

### 1. Gebunden-gebunden-Übergänge

Für eine Energie, die kleiner ist als die Ionisationsenergie, wird ein Photon absorbiert oder emittiert. Da nur diskrete Energien des entsprechenden Atoms vorliegen, entsteht ein Linienspektrum. Die Wahrscheinlichkeit, mit der ein gebundenes Elektron spontan von einem angeregten Zustand in einen niedrigeren Zustand wechselt und dabei ein Photon emittiert, wird mit dem Einsteinkoeffizienten  $A$  bezeichnet. Für eine stimulierte Emission bzw. Absorption zwischen zwei Zuständen  $i$  und  $j$  mit den Einsteinkoeffizienten  $B_{ij}$  und  $B_{ji}$  gilt der Zusammenhang bzgl. den statistischen Gewichten

$$g_i \cdot B_{ij} = g_j \cdot B_{ji}. \quad [\text{Kosmos 120}] [55]$$

### 2. Frei-gebunden-Übergänge

Sobald die Energie des anregenden Photons  $E_\gamma$  größer ist als die Ionisationsenergie eines gebundenen Elektrons  $E_i$ , wird das Elektron mit einer ki-

netischen Energie von  $E_{\text{Kin}} = E_{\gamma} - E_{\text{Ion}} + E_i$  „herausgeschlagen“ (*Ionisation*). Das Spektrum ist dabei kontinuierlich.

### 3. *Frei-frei-Übergänge*

$E_{\gamma}$  ist hier zwar auch wieder größer als  $E_{\text{Ion}}$ , aber das Photon wird nicht komplett absorbiert, sondern am Atom gestreut und fliegt mit verringerter Energie  $E_{\gamma}'$  weiter. Diese *Coulomb-Bremsstrahlung* (s. 3.3.2.) besitzt daher auch ein kontinuierliches Spektrum.

Werden die Teilchen insgesamt in einem Einheitsvolumen betrachtet, dann unterscheiden sich diese nur bei der kinetischen Energie, die über die *Maxwell-Boltzmann-Geschwindigkeitsverteilung* gegeben ist. Bei dieser ist die wahrscheinlichste Geschwindigkeit  $v_0$  abhängig von der Temperatur  $T$  sowie der Masse  $m$  eines einzelnen Teilchens und beträgt

$$v_0 = \sqrt{\frac{2kT}{m}} \quad [\text{Kosmos 114}] [56]$$

Diese *thermische Geschwindigkeit* der Teilchen verursacht eine Verbreiterung der Spektrallinien um die Dopplerbreite  $\Delta v_D$ , die gegeben ist durch

$$\Delta v_D = v_0 \cdot \frac{v_0}{c} \quad [\text{Kosmos 208}] [57]$$

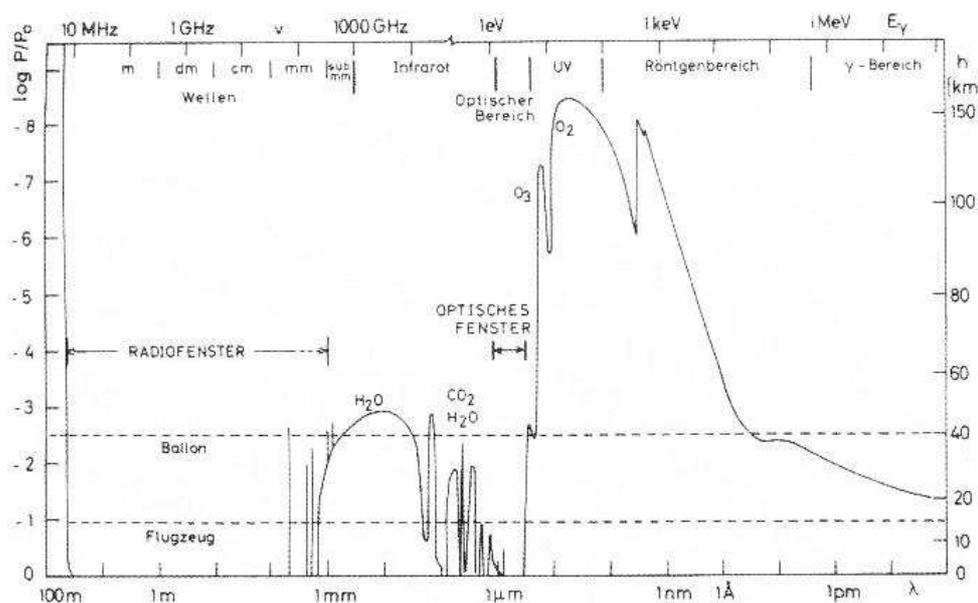
bei einer Mittenfrequenz von  $\nu_0$ .

### 3.3. Die Radiostrahlung

Mit dem Oberbegriff *Radiostrahlung* wird der Frequenzbereich ab etwa 1 mm bezeichnet und reicht bis zu einigen hundert Metern. Dabei differenziert man zwischen Submillimeter-, Millimeter-, Dezimeter-, Ultrakurz- (1-10 m), Kurz- (10-100 m), Mittel- (100 m-1 km) und Langwellen (1-10 km). Im engeren Sinne werden häufig die Submillimeter-, Millimeter- sowie die Dezimeterwellen unter dem Begriff *Mikrowellen* subsumiert; als *Radiowellen* werden dann erst Wellen ab ca. 0,3 m Wellenlänge definiert.

Wichtig für das zu beobachtende Spektrum ist, wo der Beobachtungsort liegt. Bei Teleskopen und Antennen, die sich mittels Satelliten in einer Umlaufbahn außerhalb der Erdatmosphäre bewegen, sind noch alle Wellenlängenbereiche messbar (s. Abbildung 11), bei erdgebundenen Apparaturen sieht dies anders aus. Durch die Absorption und Streuung in unterschiedlichen Höhenschichten gelangt nur Strahlung bestimmter Wellenlängenbereiche auf die Erdoberfläche.

Populärstes Beispiel hierfür ist die Absorption des UV-Lichts in der *Ozonschicht*. Hierbei wird durch die Energie der Photonen sowohl Sauerstoff ( $O_2$ ) als auch das so entstandene Ozon ( $O_3$ ) gespalten, so dass Strahlung mit einer Wellenlänge größer als 285 nm nicht auf der Erdoberfläche beobachtbar ist, wie z.B. der entsprechende Anteil im breitbandigen Strahlungsspektrum der Sonne. Dieses reicht von der genannten Grenze im UV-Bereich bis hin in den langwelligen Radiobereich. Für Wellen galaktischen oder extragalaktischen Ursprungs gilt dies zudem schon nicht mehr, da hier die interstellaren Wasserstoffatome (s. 3.3.1.) im Lyman-Bereich absorbieren.



**Abbildung 11:** Eingezeichnet ist die Höhe, bei der die Intensität nur noch die Hälfte beträgt, in Abhängigkeit von der Frequenz bzw. Wellenlänge [Kosmos 101]

Der für die Erdatmosphäre durchlässige und daher für das Teleskop relevante Bereich, der als *Radiofenster* bezeichnet wird, reicht dabei von 2-12 MHz bis 60-300 GHz (bzw. 25-150 m bis 5-1 mm). Die untere Frequenzgrenze ist aufgrund der Reflexionen in der *Ionosphäre* gegeben, auf der anderen Seite aufgrund der *atmosphärischen Absorption* von  $H_2O$ -Molekülen (s. Abbildung 11). Die Ionosphäre beginnt in einer Höhe von 50 km, deren Ionisation stark von der Sonnenstrahlung im UV-Bereich und somit von der Sonnenhöhe, Tages- und Jahreszeit, dem Erdmagnetfeld sowie der geographischen Breite abhängig ist. Die höchste Grenzfrequenz für eine Reflexion in diesem Höhenbereich wird im Winter am Tage erreicht und beträgt dann 12 MHz. Am selben Tag nur nachts betrüge diese nur 2 MHz. Für die Messungen extraterrestrischer Radiostrahlung sind daher nur

Frequenzen ab 20 MHz sinnvoll, im Zentimeter-Bereich ist dabei die Extinktion (s. Kap. 3.2.6.) bereits vernachlässigbar.

Man differenziert bei den Radiowellen zwischen vier Entstehungsmechanismen:

die thermische Strahlung eines Schwarzen Körpers (s. Kap. 3.2.7.),

die thermische Strahlung eines ionisierten Gases (s. Kap. 3.3.1. und 3.3.3.),

die nichtthermische Strahlung (s. Kap. 3.3.4.),

und die Emission der 21cm-Spektrallinie (s. Kap. 3.3.1. und 3.3.6.).

Der erste Fall wird in Kap. 3.3.2. anhand der Sonne beschrieben.

### 3.3.1. Interstellare Materie

Die *interstellare Materie* bezeichnet sowohl das Gas als auch den Staub zwischen den Sternen im Milchstraßensystem, welche anfangs noch allgemein als *Dunkelwolken* titulierte wurden, da sie durch ihre Absorption den Blick auf dahinter liegende Sterne versperrten. *Edwin Powell Hubble*<sup>40</sup> differenzierte dann bereits 1922 zwischen *galaktischem Reflexions-* und *Emissionsnebel*. Beim Ersteren wird das Licht kühler Sterne an den Staubwolken gestreut und gibt daher ein kontinuierliches Spektrum ab; im Gegensatz dazu werden bei dem Emissionsnebel die Zustände im Atom zur Emission eines Linienspektrums angeregt. Als *Dunkelwolken* werden heute Gebiete bezeichnet, die relativ zur Umgebung schwach leuchten.

Zehn Jahre später entdeckte man, dass bestimmte Sterne von einer scharf begrenzten Wasserstoffregion umgeben sind, in der der interstellare Wasserstoff aufgrund der beobachteten  $H_{\alpha}$ -Linie ionisiert sein muss und somit als *Plasma* vorliegt. Daher werden diese auch als *HII-Region* bezeichnet (s. Kap. 3.3.3.).

Dagegen bestehen *HI-Regionen* aus neutralem Wasserstoff (HI) und zu einem geringeren Anteil aus interstellarem Staub. HI kann entweder in relativ geringer Entfernung über die Absorptionslinien von Wasserstoff im ultravioletten (UV) Bereich (*Lyman-Serie*) oder in weiterer Entfernung über die 21cm-Emissionslinie der Hyperfeinstruktur (s. Kap. 3.3.6.) festgestellt werden, die *van de Hulst* bereits 1944 (s. Kap. 2.2.) im Radiobereich postulierte. Naturgemäß liegen HII-Regionen auch in Regionen des neutralen Wasserstoffs, da dieser in dem Fall teilweise ionisiert worden ist.

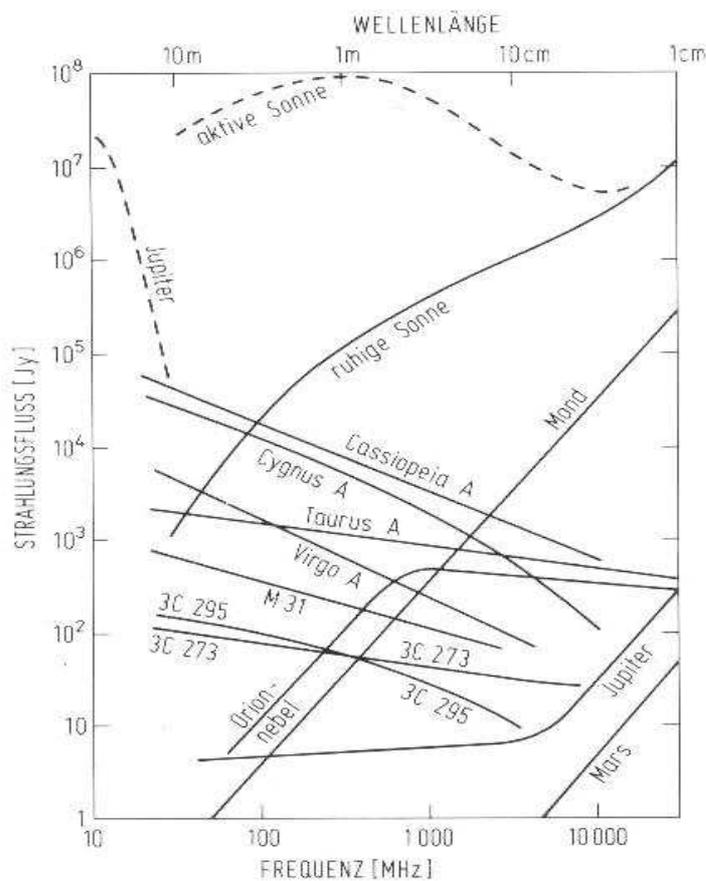
Bei einer Beobachtung der Galaxie im Bereich von  $\lambda = 21$  cm mit einer hohen Winkelauflösung von  $\sim 10$  Gradminuten und einer Frequenzauflösung von  $\sim 5$  kHz

---

<sup>40</sup> Amerikanischer Astronom, \* Marshfield 20.11.1889, † San Marino 28.9.1953. Hubble arbeitete über kosmische Nebel und Sternsysteme und entwickelte eine Theorie von der Expansion des Universums.

(entspricht einer Geschwindigkeitsauflösung von 1 km/s) lässt sich dann erkennen, dass die Ausläufer der Milchstraße, die Spiralarme, aus vielen diffusen HI-Regionen besteht. Als durchschnittlicher Durchmesser einer solchen Wolke geht man von 5 pc<sup>41</sup> aus sowie von ~80 K als mittlere Temperatur. Ggf. kann das Spektrum breitere Linien aufzeigen, wenn warme Wolken von ~6000 K, einer geringeren Dichte (Faktor ~10<sup>-2</sup>) und bereits teilweise ionisiert vorliegen (s. 3.3.3.).

### 3.3.2. Die thermische Strahlung der Sonne



**Abbildung 12:** Strahlungsflussdichte starker und markanter Quellen in Abh. von der Frequenz [Handbuch 165]

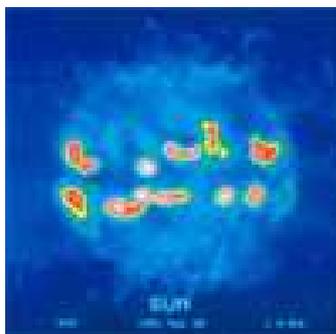
Bei der Strahlung der Sonne muss man zwischen vier Komponenten differenzieren:

- die Strahlung der ruhigen Sonne
- die der Sonnenflecken
- die der Rauschstürme

<sup>41</sup> Ein Stern ist genau 1 Parsec = 1 pc = 3,26 Lj entfernt, wenn er eine Parallaxe von einer Bogensekunde bzw. 57 Gradsekunden beschreibt.

- und die der Strahlungsausbrüche (engl. *outbursts*)

Der Anteil der ruhigen Sonne ist dabei der konstante Anteil und stammt bei einer Frequenz im Gigahertz-Bereich vorwiegend aus der *Photosphäre* (äußerste Schicht) und nur z. T. aus der Korona. Die zweite Komponente verhält sich additiv zur ersten und übersteigt diese um einen Faktor 5. Die Rauschstürme bleiben an dieser Stelle aber unberücksichtigt, da sich diese im Meterwellenlängenbereich befinden. Dagegen machen die Sonnenausbrüche (s. Abbildung 13) eine bis vier Größenordnungen aus. Bei dem für das Teleskop relevanten Frequenzbereich sind es ca. zwei Größenordnungen (s. Abbildung 12).



**Abbildung 13:** Die Sonne aufgenommen bei  $\lambda = 20\text{cm}$ , wobei die roten Regionen den Ausbrüchen entsprechen [Austin]

Für die Sonne gelten näherungsweise die Annahmen aus [40] für einen Schwarzen Körper sowie die eines optisch dichten Mediums. So kann man als Intensitätsfunktion das Plancksche Strahlungsgesetz zu Grunde legen. Da für die relevante Wasserstoff-Frequenz von  $\nu_H = 1420,4\text{ MHz}$  die Bedingung für das Rayleigh-Jeans-Gesetz (s. [37]) erfüllt ist, gilt daher mit  $T_S$  als der *mittleren Sonnentemperatur* für die Intensitätsfunktion der Sonne:

$$\begin{aligned} I_{\nu_H, \text{Sonne}}(T_S) &= \frac{2kT_S}{c^2} \nu_H^2 \\ &= 3,075 \cdot 10^{-28} \cdot \nu_H^2_{[\text{MHz}]} \cdot T_S \end{aligned} \quad [58]$$

Wenn man von der effektiven Temperatur der Photosphäre<sup>42</sup>  $T_{\text{Sonne}} = 5770\text{ K}$  ausgeht, dann ist:

$$I_{1420,4\text{MHz}, \text{Sonne}}(5770\text{K}) = 3,577 \cdot 10^{-18} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{Hz} \cdot \text{sr}} \quad [59]$$

Betrachtet man Abbildung 9, dann wird klar, dass die Radiostrahlung nur einem kleinen, niederfrequenten Ausläufer des gesamten Sonnenspektrums entspricht.

<sup>42</sup> Die Temperatur im Zentrum der Sonne beträgt dagegen  $T_{\text{Sonne, Max}} = (1,36 \pm 0,12) \cdot 10^7\text{ K}$ .

Erst bei Temperaturen unter ein paar Kelvin erreicht das Planckspektrum im Radiobereich ein Maximum. Wie auch Abbildung 12 zu entnehmen ist, strahlt daher auch der Mond im Radiobereich nicht unerheblich.

Mit einem durchschnittlichen Erscheinungswinkel von  $\psi_{\text{Sonne}} = 31' 59,3''$  bzw. einem Raumwinkel von  $\Omega_{\text{Sonne}} = 6,80 \cdot 10^{-5}$  sr (s. [Fundamental 90]) folgt daraus für die Strahlungsdichte bei  $\nu_{\text{H}}$ , wenn man von einer konstanten Quelle ausgeht:

$$\begin{aligned} F_{\nu_{\text{H}},\text{Sonne}}(T_{\text{S}}) &= 2\nu_{\text{H}}^2 \frac{kT_{\text{S}}}{c^2} \Omega_{\text{Sonne}} \\ &= 4,263 \cdot 10^{-26} \cdot T_{\text{S}} \end{aligned} \quad [60]$$

Für  $T_{\text{Sonne}} = 5770$  K folgt:

$$\begin{aligned} F_{1420,4\text{MHz},\text{Sonne}}(5770\text{K}) &= 2,4598 \cdot 10^{-22} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{Hz}} \\ &= 2,4598 \cdot 10^4 \text{ Jy} \\ &= 2,4598 \text{ SFU} \end{aligned} \quad [61]$$

Dabei ist 1 SFU (*Solar Flux Unit*) als eine Strahlungsflussdichte von  $10^{-22} \text{ Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}$  oder 10.000 Jy definiert. Ein Vergleich der Strahlungsleistung der Sonne im optischen mit der im Radiobereich ergibt nach [Universe 176] eine  $10^{14}$  größere Leistung ( $P_{\text{Sonne}} \sim 10^{26} \text{ W}$ ,  $P_{\text{Radio}} \sim 10^{12} \text{ W}$ ) !

### 3.3.3. Thermische Strahlung von ionisierten Gasen

Die thermische Strahlung entsteht in den HII-Wolken, die Galaxien umgeben und eine extrem geringe Dichte haben. Energiereiche UV-Photonen im Lymangebiet von  $\lambda < 91,1\text{nm}$  lösen Elektronen aus der Atomhülle des Wasserstoffs heraus. Die Atome werden dabei fast vollständig ionisiert. Dort bewegen sich dann bei Temperaturen zwischen 5.000 und 20.000 K die Elektronen und Ionen frei im Raum, wobei die Elektronen ständig wieder mit  $\text{H}^+$  rekombinieren. Da dies aber in allen möglichen Quantenzuständen geschieht (bis zu  $n \sim 200$ ), so dass ein gebundenes Elektron dann wieder unter Emission eines Photons über mehrere Zwischenzustände auf den Grundzustand zurückfällt, wird nicht nur  $\text{H}_{\alpha}$ -Strahlung emittiert.

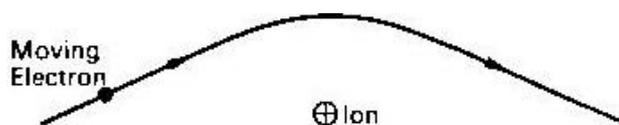


Abbildung 14: Ablenkung eines Elektrons [Universe 14]

Radiostrahlung wird dann emittiert, wenn Elektronen nicht absorbiert, sondern nur abgelenkt und so auf eine hyperbolische Bahn (s. Abbildung 14) gedrängt werden. Da sich die Elektronen sowohl vor als auch nach der Ablenkung frei durch den Raum bewegen, nennt man die emittierte Strahlung *frei-frei-Strahlung* (s. Kap. 3.2.10.) oder auch *Coulomb-Bremsstrahlung*. Das sich ergebene Spektrum ist daher kontinuierlich.

Die Strahlung wird über die optische Dicke

$$\tau = 1,3 \cdot 10^{-11} \frac{\sqrt{T_E}}{T_E^2} v^{-2} \int_0^s N^2 ds \quad [\text{Handbuch 166}] [62]$$

entlang der Sichtlinie determiniert (s. [31]).  $T_E$  ist dabei die Temperatur der Elektronen und  $N$  die Elektronendichte. Wenn  $T_B$  die beobachtete Temperatur ist, die man nach der Materieschicht der Dicke  $s$  sieht, gilt mit [30]

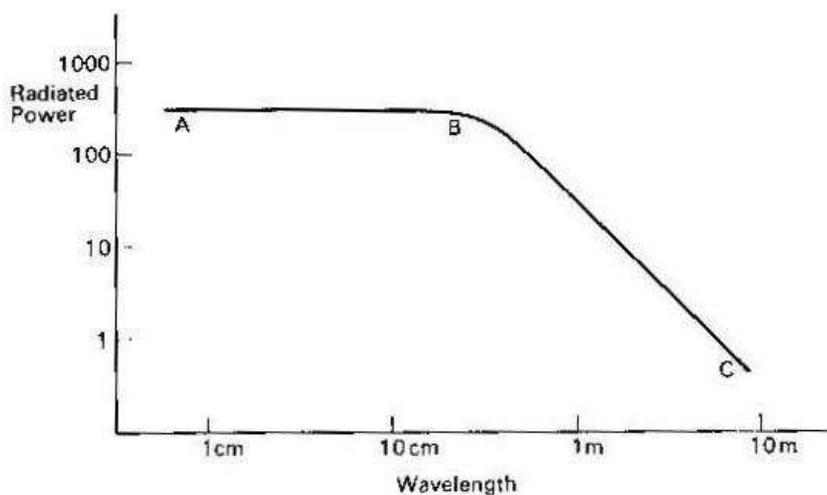
$$T_B = T_E (1 - e^{-\tau}) \quad [\text{Handbuch 166}] [63]$$

Dementsprechend ist die Intensität für ein optisch dichtes Medium ( $\tau \gg 1$ ) gegeben durch die eines Schwarzen Körpers

$$I(T_E, \nu) = \frac{2kT_E}{c^2} \nu^2 \quad [64]$$

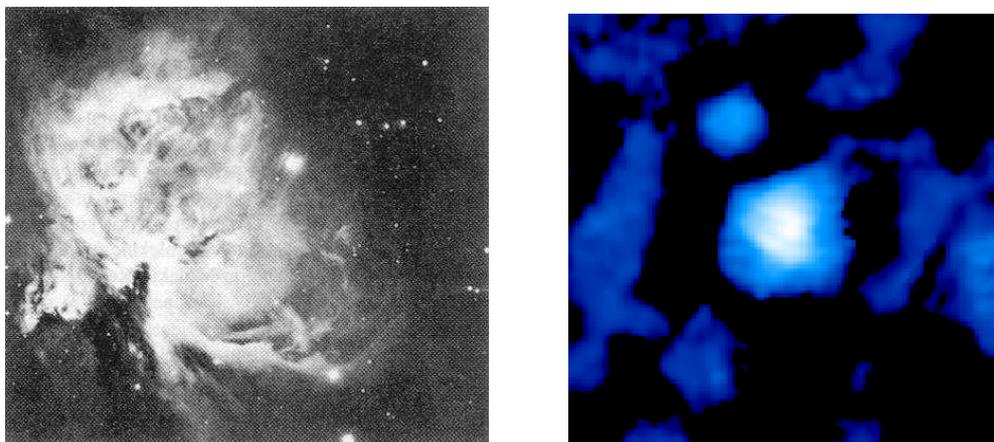
Für ein optisch dünnes Medium ( $\tau \ll 1$ ) dagegen ist die Intensität nicht mehr von der Frequenz abhängig:

$$I(T_E) = 1,3 \cdot 10^{-11} \frac{\sqrt{T_E}}{T_E^2} \int_0^s N^2 ds \cdot \frac{2kT_E}{c^2} \quad [65]$$



**Abbildung 15:** Typisches Spektrum der thermischen Strahlung  
(Leistung abhängig von der Wellenlänge) [Universe 16]

Diese beiden Fällen lassen sich gut anhand eines typischen thermischen Spektrums wie in Abbildung 15 verdeutlichen. Von Punkt A bis zu Punkt B ist das betrachtete Gas optisch dünn, es stellt sich also kein thermodynamisches Gleichgewicht ein und ist daher unabhängig von der Wellenlänge bzw. Frequenz. Entsprechend wird es oberhalb von B dicht, so dass sich wieder [64] anwenden lässt.



**Abbildung 16:** Der *Orionnebel* einmal aufgenommen im sichtbaren Bereich [Kosmos 352] und bei 1420 MHz [Austin]

Zu solchen astronomischen Quellen für thermische Strahlung gehören heiße Gaswolken in der Umgebung junger Sterne, wodurch eine HII-Region ein Anzeichen für einen Sternentstehungsort liefert. Es gibt über 1200 solcher Regionen, die sich fast alle in den Spiralarmen befinden, wodurch sie häufig aufgrund von Absorptionen im optischen Bereich nicht sichtbar sind.

Ein populäres Beispiel ist der *Orionnebel* (s. Abbildung 16), der auch mit dem bloßen Auge am Himmel sichtbar ist. Dieser befindet sich in einer Entfernung von ca. 1800 Lichtjahren (Lj), hat einen Durchmesser von  $3^\circ$  bzw. 100 Lj und eine Gesamtmasse von ungefähr 10.000 Sonnenmassen. Die stärkste Radioquelle im Nebel ist Ori A mit einem Durchmesser von ca. 19,96 Lj, einer Gesamtmasse von 13 Sonnenmassen und einer Elektronendichte von  $N = 1700 / \text{cm}^3$ . Seine Position liegt nach [Handbuch 180] bei  $a = 5\text{h } 32\text{m } 48\text{s}$  und  $d = -5^\circ 27'$ . Seine Strahlungsflussdichte liegt bei etwa 500 Jy (s. Tabelle 1). Anhand von Abbildung 12 sieht man, dass sein Spektrum ein kleines Maximum bei einer Wellenlänge von 30 cm besitzt.

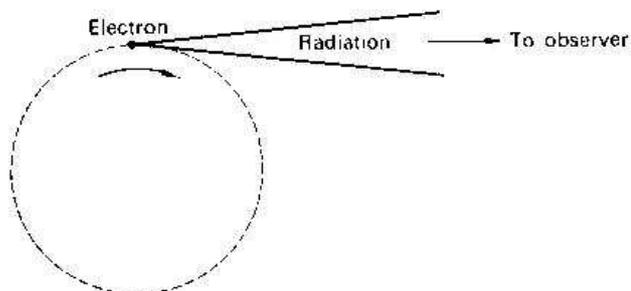
	STRAHLUNGSFLUSSDICHTE IN JY NACH		
	[Handbuch 180]	[Strasbourg] <sup>43</sup>	[Austin]
<i>Orionnebel</i>	520	262	410

**Tabelle 1:** Die stärkste HII-Region: der *Orionnebel*

Im Anhang 10.2. sind weitere bekannte und starke HII-Regionen dargestellt.

### 3.3.4. Nichtthermische Strahlung

Bereits Jansky beobachtete bei seinen ersten Messungen der Radiostrahlung die *Nichtthermische Strahlung*, die aber erst 1950 durch die beiden schwedischen Physiker *Alvén* und *Herlofson* explizit als Ursprung von Radiowellen gesehen wurde. Bei dieser trifft ein sich geradlinig bewegendes Elektron mit einer Geschwindigkeit, die an die des Lichtes grenzt, auf ein starkes Magnetfeld, und wird aufgrund der Lorentzkraft auf eine Kreisbahn senkrecht zu den Feldlinien gezwungen. Die Energieverluste werden in Form von tangential zur Spiralbahn verlaufender Radiostrahlung (*Magneto-Bremsstrahlung*) abgegeben (s. Abbildung 17), deren Intensität und Frequenz von der Elektronengeschwindigkeit und dem Magnetfeld abhängt.



**Abbildung 17:** Ein Elektron wird aufgrund eines Magnetfeldes auf eine Kreisbahn gelenkt [Universe 20]

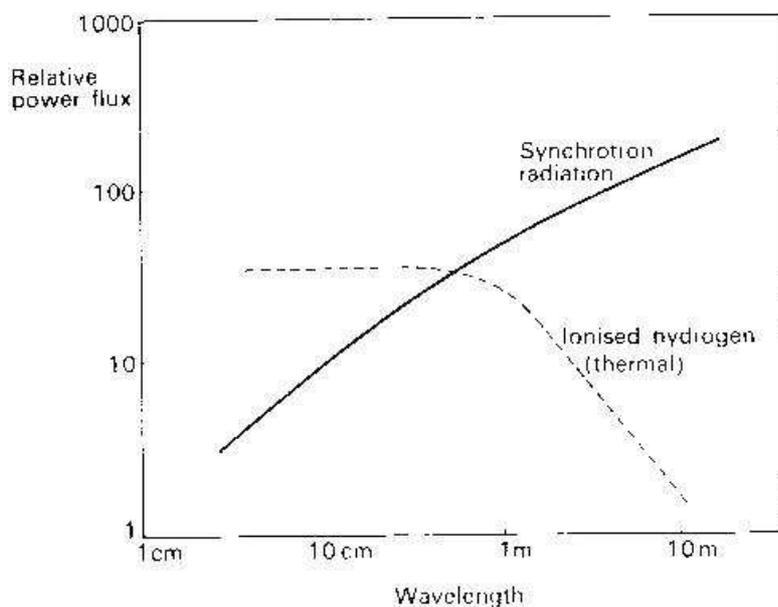
Daher ist das Spektrum auch ein kontinuierliches, das mit der Wellenlänge zunimmt (s. Abbildung 18). Da diese Strahlung auch in Teilchenbeschleunigern, so genannten *Synchrotron*, auf der Erde entsteht, nennt man sie auch entsprechend *Synchrotronstrahlung*<sup>44</sup>. Nach [Universe 21] reicht sogar schon ein Magnetfeld im Nanotesla-Bereich, wenn die Energie des Elektrons hoch genug ist ( $> 10^9$  eV).

<sup>43</sup> Strahlungsflussdichte bei einer Antennenkeulenbreite von  $5^\circ$ .

<sup>44</sup> Die Entdecker der Synchrotronstrahlung heißen H. Alfven und N. Herlofson. Ihre Theorie wurde von I. S. Shklovsky, V. L. Ginzburg und J. H. Oort weiterentwickelt.

Es werden drei Unterscheidungskriterien angeführt, die auf eine nichtthermische Strahlung hinweisen und eine thermische ausschließen:

1. die zu hohe äquivalente Strahlungstemperatur von über  $10^6$  K, die nicht thermischen Ursprungs sein kann,
2. Frequenz-Abhängigkeit  $I_\nu \propto \nu^\alpha$  mit einem *Spektralindex* von  $\alpha \leq -0,1$  (s. Abbildung 18),
3. die lineare Polarisation, wie im Jahre 1953/54 durch *Dombrowsky* und *Vashakidze* gezeigt wurde.

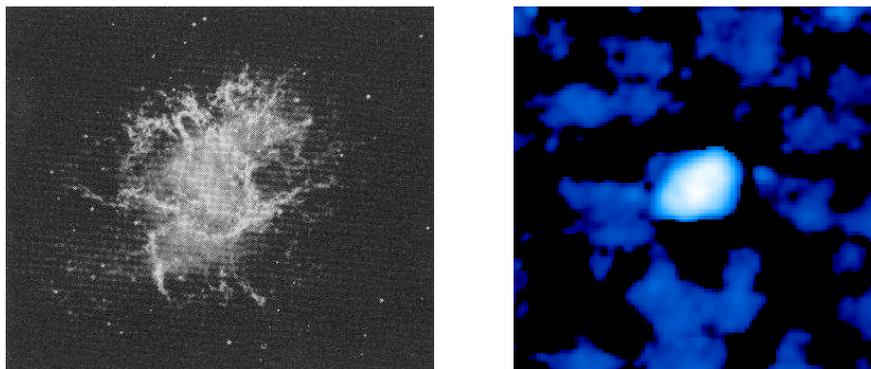


**Abbildung 18:** Thermisches und Nichtthermisches Spektrum im Vergleich (Relative Strahlungsflussdichte in Abhängigkeit von der Wellenlänge) [Universe 130]

Messungen von vielen Radioquellen haben gezeigt, dass die Verteilung der Spektralindizes ein Maximum bei  $\alpha = 0,7$  hat und gaußförmig ist.

In der Astrophysik entsteht Nichtthermische Strahlung bei Quasaren, Radiogalaxien und Supernova-Resten (s.u.) sowie in Magnetfeldern von Galaxien. So wurde auch eine nichtthermische punktförmige Quelle im Zentrum der Milchstraße (*Sagittarius A\**, Sternbild *Schütze*) erkannt. In Abbildung 12 sind die Strahlungsflussdichten nichtthermischer Quellen abgebildet, die man an ihrer Proportionalität zur Wellenlänge ( $F \propto 1/\nu$ ) erkennt.

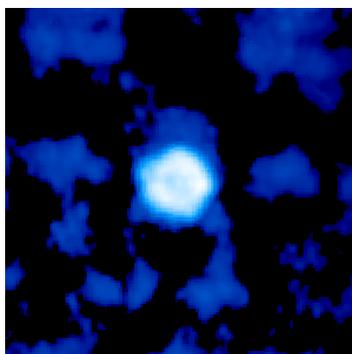
Nichtthermische Radiostrahlung aus der Milchstraße mit Wellenlängen größer als ein paar Meter können sogar mit einem empfindlichen Radioempfänger als Rauschen gehört werden. Zur Unterscheidung von dem Empfängerrauschen wird das Signal mit angeschlossener Antenne mit dem ohne Antenne verglichen.



**Abbildung 19:** Aufnahme des *Krebsnebel* im sichtbaren Bereich [Universe 141] und bei 1420 MHz [Austin]

### *Supernova-Reste*

Nachdem ein Stern das Stadium einer Supernova erreicht hat, wird dessen Hülle als so genannter *Supernova-Rest* (SNR, engl. *supernova remnants*) in das interstellare Medium ausgestoßen. Diese können Geschwindigkeiten von bis zu 10.000 km/s erreichen, was gepaart mit einer starken Abbremsung beim Auftreffen auf interstellare Materie sehr hohe Temperaturen ergibt. 120 von ihnen sind bereits katalogisiert und besitzen häufig eine Schalen- oder Ringstruktur.



**Abbildung 20:** *CasA*-Aufnahme bei 1420 MHz [Austin]

Ein bekannter Vertreter für SNR ist der 4500 Lj entfernte *Krebsnebel* (im Sternbild *TauA*), der lt. chinesischer Annalen aus einer Supernova am 4.7.1054 hervorgegangen ist. Sein Gas expandiert mit bis zu 1300 km/s. Der Pulsar<sup>45</sup> im *Krebsnebel* hat eine Periode von 33 ms, ein Magnetfeld von  $10^{-4}$  T und eine Strahlungsflussdichte von ca. 900 Jy (s. Tabelle 2). Man geht davon aus, dass dieser die

---

<sup>45</sup> Ein Pulsar ist eine Quelle mit einer periodisch schwankenden Intensität. Die Perioden schwanken i.A. zwischen 2,5 ms und 8 s.

Hauptquelle für die hochenergetischen Teilchen darstellt. So sind für die Synchrotronstrahlung Elektronen mit einer Energie von mindestens  $10^9$  eV notwendig. Der stärkste SNR ist aber *Cassiopeia A* (s. Abbildung 20), der um etwa 1700 n. Chr. entstanden ist und dessen Expansionsgeschwindigkeit über 7500 km/s beträgt. In direkter Nähe befindet sich ein weiterer SNR namens 3C10 aus dem Jahre 1572, den *Tycho Brahe* damals (im optischen Bereich) beobachtete.

	STRAHLUNGSFLUSSDICHTE IN JY NACH		
	[Handbuch 180]	[Strasbourg]	[Austin]
<i>Krebsnebel</i>	875	938	930
<i>Cassiopeia A</i>	2480	1858	2240

**Tabelle 2:** Die stärksten Supernova-Reste

Im Anhang 10.2. sind weitere starke SNR aufgelistet, die von der nördlichen Hemisphäre aus sichtbar sind.

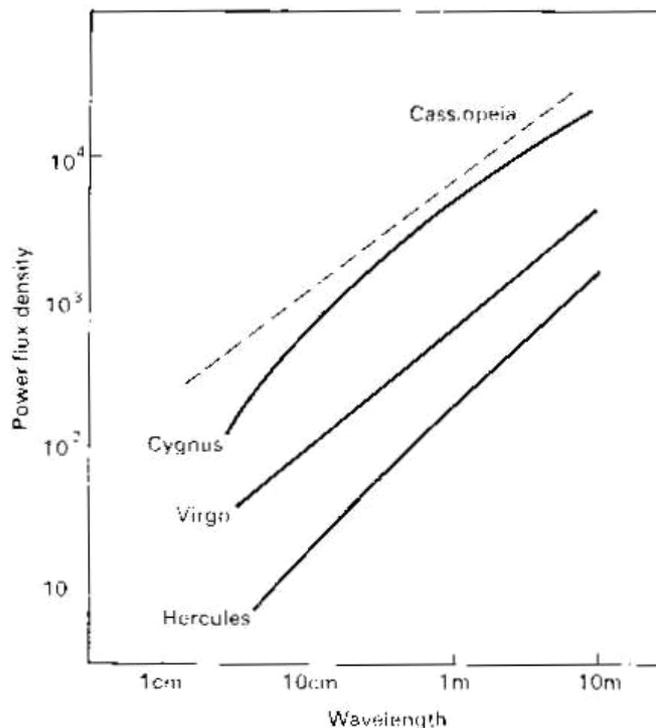
#### *Radiogalaxien und Quasare*

Da Forscher anfangs scheiterten, bekannte Galaxien wie den Andromedanebel als eine Radioquelle nachzuweisen, gelang es auf dem umgekehrten Weg, bekannte Radioquellen mit Galaxien im optischen Bereich zu identifizieren (s. S. 9). Die stärkste Radiogalaxie (s. Tabelle 3) ist *Cygnus A*, die sich mehr als  $10^9$  Lj entfernt befindet. Anhand von Abbildung 21 ersieht man bereits, dass das erste und zweite Kriterium für eine nichtthermische Strahlung für die drei Radiogalaxien *Cygnus A*, *Virgo A* und *Hercules* gegeben ist.

	STRAHLUNGSFLUSSDICHTE IN JY NACH		
	[Handbuch 180]	[Strasbourg]	[Austin]
<i>Cygnus A</i>	1495	1652	1260
<i>Virgo A</i>	198	177	220

**Tabelle 3:** Die beiden stärksten Radiogalaxien

*Quasare* sind aktive extragalaktische Sternsysteme, deren Kern im optischen Bereich die äußeren Bereiche überstrahlt und daher *quasi* wie ein Stern wirkt. Für unsere Zwecke sind sie wichtig, da der Kern von einigen Quasaren Radiostrahlung emittiert. Typisch für sie ist ihre hohe *Rotverschiebung*  $z$  (s. 3.3.7.) von bis zu 3,53. Am Anhang 10.2. sind noch mal die bekanntesten und stärksten Radiogalaxien aufgelistet.



**Abbildung 21:** Die Strahlungsflussdichte von drei Radiogalaxien in Abhängigkeit von der Wellenlänge [Universe 184]

### 3.3.5. Quellenverteilung im Universum

Auf der Internetseite vom *Centre de Données astronomiques de Strasbourg* befindet sich eine große Datenbank verschiedenster Observatorien auf der Welt, die sowohl Messdaten im optischen als auch im Radio- und anderen Frequenzbereichen ( $\gamma$ -Bereich, etc.) veröffentlicht. Dort kann man eine Unterdatenbank (VI-II/65) aufrufen (s. [Strasbourg] und Abbildung 22), die auf Messungen des *National Radio Astronomy Observatory* (NRAO) zurückgreift. Dort in Charlottesville (Virginia, USA) wurde die nördliche Hemisphäre oberhalb von  $\delta = -40^\circ$  (begrenzt durch den dortigen Breitengrad) abgefahren und zwar bei der Frequenz von 1,4 GHz.

Diese Daten lassen sich gut auf den Wuppertaler Standort übertragen, da mit dem hiesigen Breitengrad von  $\varphi = 51^\circ 15'$  auch nur der Himmel bis  $\delta = 90^\circ - \varphi = 38^\circ 45'$  observiert werden kann – abgesehen davon, dass Messungen bei niedriger Elevation aufgrund der Topographie und anderen Hindernissen schwierig sind.

Das Teleskop dort hat eine Keulenbreite (s. [NRAO]) von  $\sim 43''$ , eine minimale messbare Strahlungsflussdichte von 2,5 mJy und einen Fehler bei den Koordinaten kleiner als  $1'$  in Grad.



## VizieR Result Page



[CDS](#) · [Simbad](#) · [VizieR](#) · [Aladin](#) · [Catalogues](#) · [Nomenclature](#) · [Biblio](#) · [Tutorial](#) · [Developer's corner](#)

---

Result of VizieR Search with 1 constraint (Image: "Image")  
 ordered by increasing RAJ2000 Modify the Query

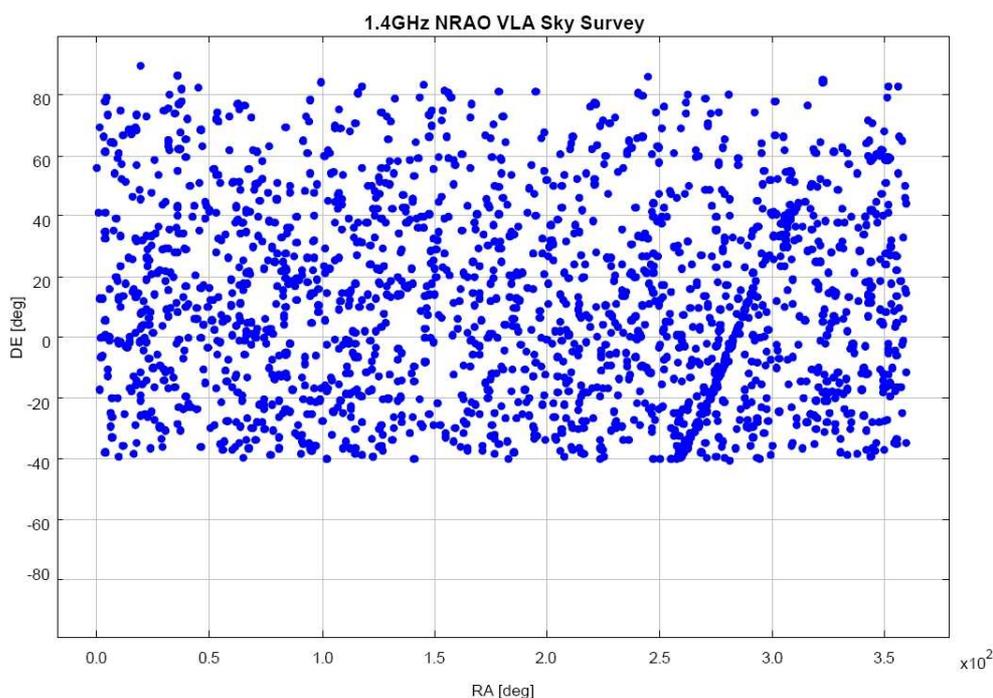
Max. Entries:      
 Output layout:      
 ALL columns      
 ReSubmit B

VIII/65/nvss     
 1.4GHz NRAO VLA Sky Survey (NVSS) (Condon+ 1998) ([ReadMe](#))  
 The NVSS Catalog [\[image/jpeg\]](#)

To get all details for a row, just click on the row number in the leftmost 'Full' column.  
 The 4 columns in color are computed by VizieR, and are *not part of the original data*.

Full	RAJ2000	DEJ2000	_Glon	_Glat	NVSS	RAJ2000	DEJ2000	S1.4	MajAxis	MinAxis
	"hms"	"dms"	deg	deg		"hms"	"dms"	mJy	arcsec	arcsec
1	00 00 00.09	-34 07 09.5	357.481	-76.928	000000-340709	00 00 00.09	-34 07 09.5	2.7	59.8	52.4
2	00 00 00.13	-38 26 28.5	343.289	-74.384	000000-382628	00 00 00.13	-38 26 28.5	3.1	117.0	51.7
3	00 00 00.16	-04 02 42.3	092.682	-63.854	000000-040242	00 00 00.16	-04 02 42.3	106.8	18.5	16.4
4	00 00 00.18	+32 12 33.3	110.448	-29.413	000000+321233	00 00 00.18	+32 12 33.3	3.7	43.8	41.0
5	00 00 00.19	+49 18 12.6	114.377	-12.712	000000+491812	00 00 00.19	+49 18 12.6	2.4	93.8	58.4

Abbildung 22: Ausgabeseite der Straßburger Datenbank [Straßbourg]

Abbildung 23: Radioquellen bei 1,4 GHz mit  $F > 1$  Jy [Straßbourg]

Auf dieser Internetseite lassen sich die gewünschten Daten auch als Himmelskarte im Äquatorialsystem darstellen, wobei aber nicht die Strahlungsflussdichte  $F$  der Quellen berücksichtigt wird. In Abbildung 23 ist ein solcher Äquatorialhimmel mit Quellen, deren Strahlungsflussdichte größer als 1 Jy und deren Deklination größer als  $-40^\circ$  ist, dargestellt. Bis auf den Nordpolbereich und die Galaktische Ebene sind die Quellen, deren Diagonale erkennbar ist, recht gut verteilt. Schaut man sich dagegen dieselbe Darstellung nur mit Quellen mit  $F > 100$  Jy (s.

Abbildung 24) an, dann lassen sich klare Kandidaten erkennen, die bereits in den vorherigen Kapiteln beschrieben wurden.

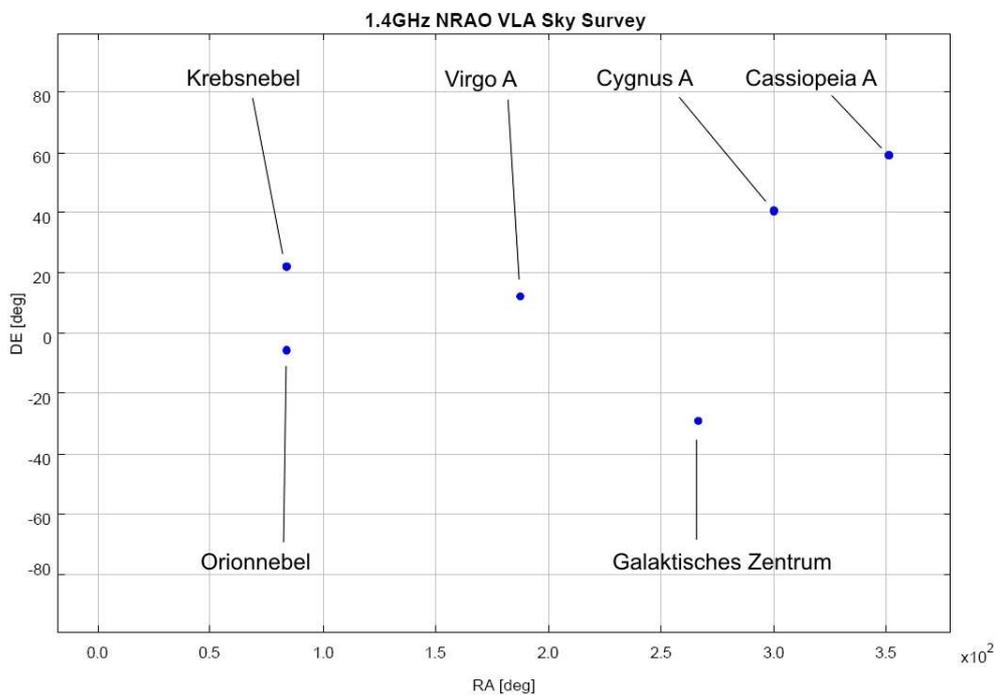


Abbildung 24: Radioquellen bei 1,4 GHz mit  $F > 100$  Jy [Straßbourg]

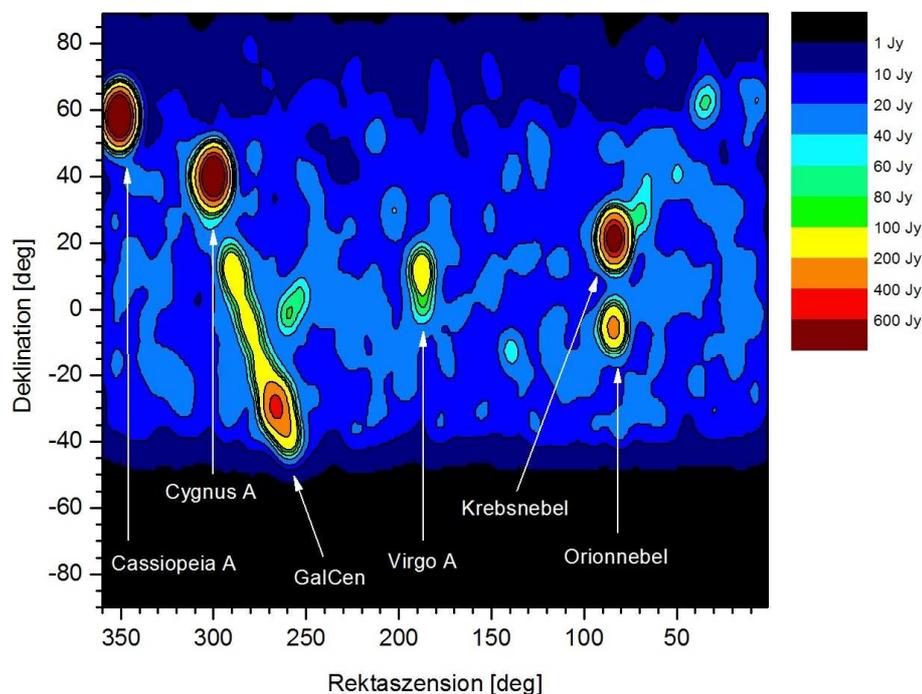
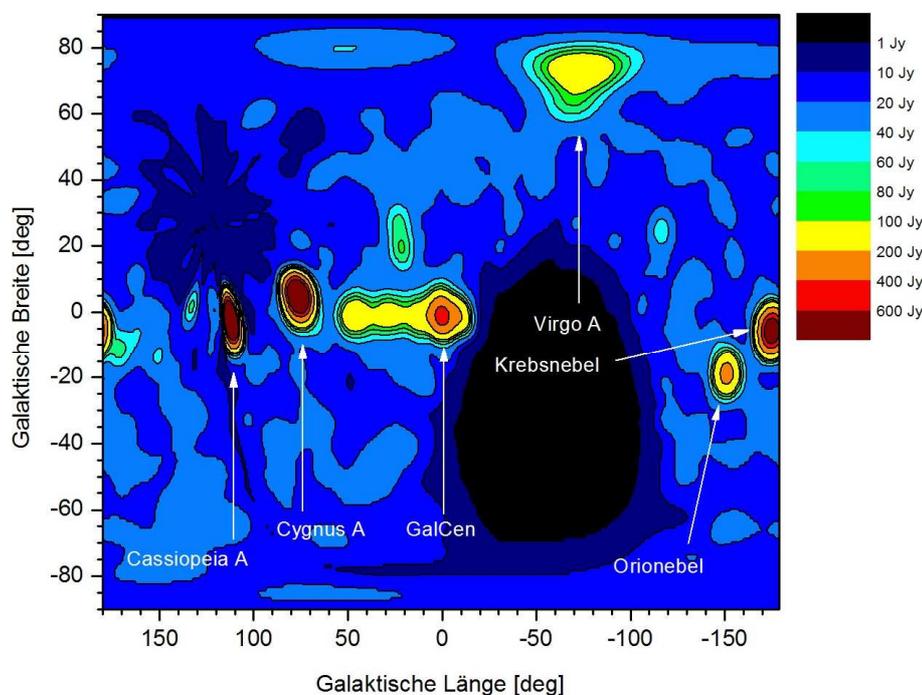


Abbildung 25: Radioquellen oberhalb von  $\delta = -40^\circ$  unter Berücksichtigung einer Keulenbreite von  $5^\circ$  (*GalCen* = Galaktisches Zentrum) [Bellin]

Da aus dieser Karte noch nicht hervorgeht, mit welcher Strahlungsflussdichte die Quellen hier auf der Erde zu beobachten sind, wurde ein Programm geschrieben,

das noch in Kap. 5.1. ausführlicher beschrieben wird, welches sowohl die Flussdichte als auch die Keulenbreite der Antenne bei der Einlese der Daten berücksichtigt. Die daraus hervorgegangenen Daten sind in Abbildung 25 graphisch dargestellt. Es soll nicht irritieren, dass die Rektaszension hier von rechts nach links ansteigt, da dies so auch ein Erdbewohner auf der Nordhalbkugel wahrnimmt. Dasselbe gilt nach 3.1.4. auch für die Galaktische Länge. Schön erkennbar ist hier die galaktische Scheibe bei  $\alpha \sim 270^\circ$ , die eine Neigung von  $\sim 60^\circ$  gegenüber der Äquatorialebene aufweist (s. Kap. 3.1.6.). Das Galaktische Zentrum ist aufgrund seiner geringen Deklination von  $\delta \sim -29^\circ$  von Wuppertal aus nur bis zu einer maximalen Höhe von  $a \sim 9^\circ 45'$  zu sehen. Diese Höhe wird im Winter zur Mittagszeit und im Sommer gegen Mitternacht erreicht.



**Abbildung 26:** Radioquellen oberhalb von  $\delta = -40^\circ$  umgerechnet in das Galaktische Koordinatensystem (GalCen = Galaktisches Zentrum) [Bellin]

In Abbildung 26 wurden die Daten noch in das Galaktische System umgerechnet. Auffallend ist der schwarze Bereich, der aber dadurch zu erklären ist, dass er dem von Wuppertal aus nicht zu beobachtenden Bereich von  $\delta < -40^\circ$  entspricht. Bei  $l \sim 130^\circ$  und  $b \sim 25^\circ$  ist der äquatoriale Nordpol erkennbar.

Leider konnten die Himmelskarten räumlich nicht korrekt wiedergegeben werden, denn alle Koordinaten mit einer Deklination bzw. einer Galaktischen Breite von

90° entsprechen einem Punkt in der Realität, genauer gesagt dem Nordpol. Dasselbe gilt für den Südpol bei -90°.

### 3.3.6. Kernphysikalische Grundlagen der 21cm Wasserstoff-Linie

Analog zu den Elektronen besitzt auch der Atomkern einen *mechanischen Drehimpuls* mit dem Betrag

$$|\vec{I}| = \sqrt{I(I+1)}\hbar$$

und der Quantenzahl  $I$ . Interessant wird dieser erst in einer bestimmten Vorzugsrichtung  $z$ , da die anderen Komponenten im Zeitmittel verschwinden. Das *magnetische Kernmoment*  $\mu_I$  kann in  $z$ -Richtung den maximalen Wert

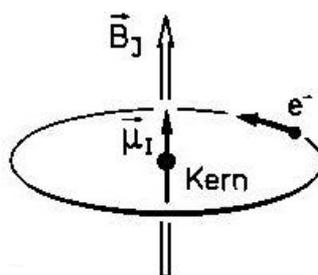
$$|\mu_{I,\text{Max}}| = g_I \mu_K I \quad [\text{Haken-Wolf 359}][66]$$

annehmen, wobei  $\mu_K$  das *Kernmagneton* ist und über

$$\mu_K = \frac{e\hbar}{2m_e c} = 5,050824 \cdot 10^{-27} \text{ Am}^2 \quad [\text{Haken-Wolf 359}][67]$$

definiert wird.  $g_I$  ist das *gyromagnetische Verhältnis*, welches nicht explizit berechnet werden kann. Speziell für das Wasserstoffatom ergibt sich mit den Werten  $I = \frac{1}{2}$  und  $g_I = 5,58$  (s. [Haken-Wolf 359]) ein magnetisches Kernmoment von

$$\begin{aligned} \mu_{I,H} &= 2,79\mu_K \\ &= 1,40918 \cdot 10^{-26} \text{ Am}^2 \end{aligned} \quad [\text{Haken-Wolf 359}][68]$$



**Abbildung 27:** Das magnetische Kernmoment ist parallel zum Magnetfeld ausgerichtet, das aufgrund der Bewegung des Elektrons entsteht. [Haken-Wolf 361]

Da die Aufenthaltswahrscheinlichkeit eines Elektrons am Kern nicht null ist, ergibt sich aus der Wechselwirkung des durch das Elektron erzeugten magnetischen Feldes  $B$  am Kern und dem Kernspin analog zur Feinstrukturaufspaltung eine *Hyperfeinstrukturaufspaltung*, die einer Zusatzenergie von

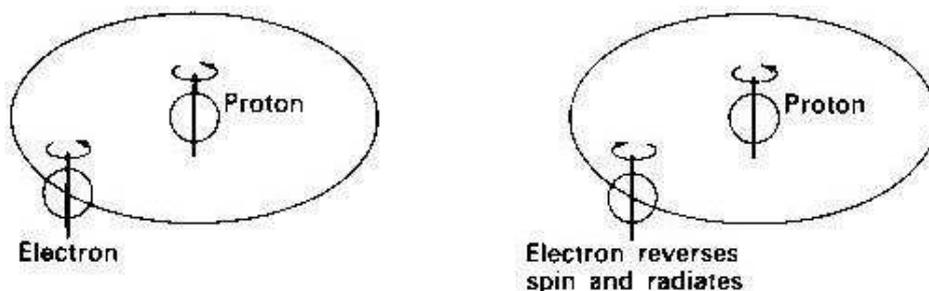
$$E_{\text{HFS}} = -\vec{\mu}_I \cdot \vec{B}$$

entspricht. Demnach kann sich der Kernspin mit dem magnetischen Moment  $\mu_I$  in oder entgegen der Richtung des B-Feldes ausrichten (s. Abbildung 27).

Für Energie ergibt sich schließlich mit dem Elektronendrehimpuls  $J$ , dem Gesamtdrehimpuls  $F$  und der *Hyperfeinstrukturkonstanten*  $a$

$$E_{\text{HFS}} = \frac{a}{2} \{F(F+1) - I(I+1) - J(J+1)\}. \quad [\text{Haken-Wolf 362}]$$

Für ein neutrales Wasserstoffatom (HI) mit  $I = J = \frac{1}{2}$  ergibt sich je nach Ausrichtung ein Gesamtdrehimpuls von  $F = 1$  (parallel) oder  $F = 0$  (antiparallel) und daher eine Energieanhebung von  $E_{\text{HFS},F=1} = \frac{1}{4}a$  bzw.  $E_{\text{HFS},F=0} = -\frac{3}{4}a$ . Betrachtet man nun den Übergang zwischen diesen beiden Ausrichtungen, also wenn der Kernspin „umklappt“ (s. Abbildung 28), dann folgt für die Differenz der Energieanhebungen  $\Delta E_{\text{HFS},1 \rightarrow 0} = a$ .



**Abbildung 28:** Links ist das magnetische Kernmoment parallel, rechts antiparallel zum Elektronenspin ausgerichtet. [Universe 25]

Die Hyperfeinstrukturkonstante lässt sich über

$$a = \frac{2}{3} \mu_0 g_I g_E \mu_B \mu_K |\psi(0)|^2 \quad [\text{Haken-Wolf 363}]$$

$g$ : elektronisches gyromagnetisches Verhältnis,

$\mu_B$ : Bohrsche Magneton,  $\mu_0$ : magnetische Feldkonstante

berechnen, wobei speziell für das s-Elektron im Wasserstoff

$$|\psi(0)|^2 = \frac{1}{\pi r_H^3} \quad [\text{Haken-Wolf 363}]$$

$r_H$ : 1. Bohrsche Radius

ist. Dies ergibt einen Wert von

$$a \cong 5,9 \cdot 10^{-6} \text{ eV} \quad [\text{Haken-Wolf 363}]$$

und entspricht einer Frequenz von

$$\nu = 1,420405751786 \cdot 10^9 \pm 0,02 \text{ Hz.} \quad [\text{Tools 312}] [69]$$

bzw. einer Wellenlänge von 21 cm. Dieser Übergang der Hyperfeinstruktur ist eigentlich verboten, da er einer magnetischen Dipolstrahlung entspricht. Da außerdem mit dem magnetischen Kernmoment [68] der Einsteinkoeffizient

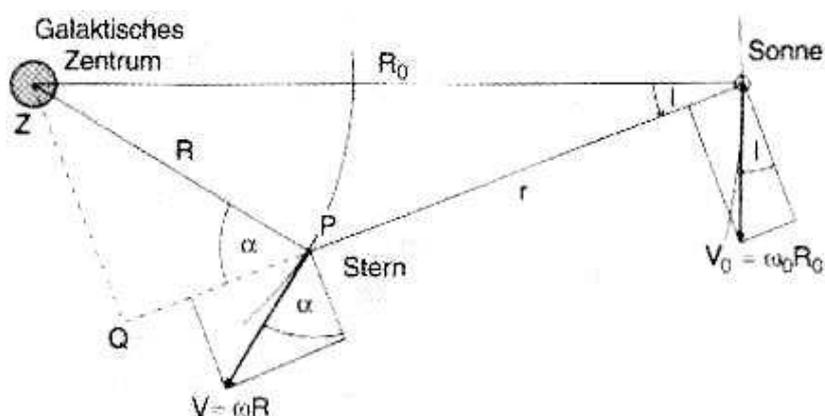
$$A_{10} = \frac{64\pi^4}{3hc^3} \nu^3 |\mu|^2 \quad [\text{Tools 313}] [70]$$

$$= 2,86888 \cdot 10^{-15} \text{s}^{-1}$$

beträgt, existiert nur eine extrem geringe Übergangswahrscheinlichkeit, so dass ein Elektron, bevor es ein Photon mit einer Wellenlänge von 21cm emittiert, im oberen Zustand  $1,1 \cdot 10^7$  Jahre ( $= 1 / A$ ) verharrt. Nur durch eine sehr geringe Dichte in der interstellaren Materie von  $\sim 1$  Atom pro  $\text{cm}^3$ , einem fast perfekten Vakuum, ist es möglich, dass diese Linie beobachtbar ist, da das H<sub>2</sub>-Molekül keine Strahlung im Radiobereich emittiert.

### 3.3.7. Rotation der Milchstraße

1926/27 entwickelten *B. Lindblad* und *J.H. Oort* ihre *Theorie der differentiellen Rotation* der galaktischen Scheibe. Dabei wird die Geschwindigkeit eines Sterns, der mit der Milchstraße um das galaktische Zentrum rotiert, zerlegt in eine radiale, d.h. in Richtung des Beobachters bzw. der Sonne,  $V_R$  und in eine tangentielle Komponente  $V_T$ . Sinnvollerweise wird das Galaktische Koordinatensystem verwendet. Nach *Abbildung 29* bildet die Verbindungslinie eines Sterns mit der Sonne mit Abstand  $r$  des Sternes zum Galaktischen Zentrum einen Winkel  $\alpha$ . Diesen kann man aber über die galaktische Länge  $l$  des Sterns mit eliminieren.



**Abbildung 29:** Die Rotation eines Sterns in der Ebene der Milchstraße um das Galaktische Zentrum [Kosmos 394]

Somit folgt für die beiden Geschwindigkeitskomponenten

$$V_R = V \sin \alpha = \omega R_0 \sin l \quad [\text{Kosmos 394}] [71]$$

$$V_T = V \cos \alpha = \omega R_0 \cos l - \omega r .$$

Berücksichtigt man noch die Rotation der Sonne mit

$$\omega_0 = \frac{V_0}{R_0} = \frac{220 \text{ km/s}}{8,5 \text{ kpc}} = 8,40 \cdot 10^{-16} \text{ s}^{-1}, \quad [\text{Kosmos 395}] [72]$$

was einer Umlaufzeit von  $2,4 \cdot 10^8$  a entspricht, und den Abstand der Sonne zum Galaktischen Zentrum mit

$$R_0 = 8,5 \text{ kpc} = 27710 \text{ Lj} = 2,62 \cdot 10^{17} \text{ km} \quad [\text{Kosmos 395}] [73]$$

zum Zentrum der Milchstraße, ergibt dies für die beiden Komponenten

$$V_R = (\omega - \omega_0) R_0 \sin l \quad [\text{Kosmos 394ff}] [74]$$

$$V_T = (\omega - \omega_0) R_0 \cos l - \omega r .$$

Im Folgenden ist nur noch die Radialkomponente  $V_R$  verwendet, da für die Rot- bzw. Blauverschiebung

$$z = \frac{\lambda_1}{\lambda_0} - 1 = \frac{v_0}{v_1} - 1 \quad [\text{Kosmos 492}] [75]$$

eines Sterns nur diese Komponente auf der Sichtlinie zum Beobachter relevant ist. Dabei bezeichnet der Index 1 den verschobenen und auf der Erde beobachteten Wert und 0 den theoretischen Wert, mit dem der Stern strahlt. Da zwischen der Rotverschiebung und der Frequenz der Zusammenhang

$$V_R = z \cdot c \quad [\text{Kosmos 176}] [76]$$

besteht, folgt für die verschobene Frequenz

$$v_1 = \frac{v_0}{\frac{V_R}{c} + 1} = \frac{v_0}{z + 1} \quad [77]$$

Mit [74] und [75] ergibt sich für die Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  eines Sterns um das galaktische Zentrum in Abhängigkeit von der galaktischen Länge  $l$  und der gemessenen verschobenen Frequenz  $v_1$

$$\omega = \omega_0 + z \frac{c}{R_0 \sin l}, \quad [78]$$

die bei nicht zu großer galaktischer Länge gut über die 21cm-Linie des neutralen Wasserstoffs in den HI-Regionen bestimmt werden kann. Außerdem ist es noch möglich, über die thermische Dopplerverschiebung (s. [57]) die thermische Geschwindigkeit der Teilchen und somit auch deren Temperatur zu bestimmen.

### 3.4. Antennen und deren Eigenschaften

#### 3.4.1. Auflösungsvermögen und Keulenbreite

Für Teleskope im Radiobereich nimmt man als Maß für das Auflösungsvermögen die *Keulenbreite*  $\psi$  der Antenne, welche als die *Halbwertsbreite*<sup>46</sup> der empfangenen Energie (bzw. Strahlungsflussdichte) definiert wird und somit als Maß für die Energieempfindlichkeit gesehen werden kann. Sie wird in der Literatur auch als *Öffnungswinkel* der Antenne bezeichnet. Es wird unterschieden zwischen der Keulenbreite in der Ebene der elektrischen Feldlinien  $\psi_E$  und der Keulenbreite in der Ebene der magnetischen Feldlinien  $\psi_H$ . Für einen Dipol verläuft die Ebene der elektrischen Feldlinien längs des Leiters und die magnetische senkrecht zu diesem. Wird nur ein einzelner Dipol betrachtet, beträgt dessen Keulenbreite  $\psi = 78^\circ$ . Wenn die Energie in der Hauptstrahlrichtung der Antenne ihren Maximalwert erreicht, so sinkt diese auf  $E_{\text{Max}} / 2$ , sobald man um  $\psi / 2$  in der entsprechenden Ebene von der Hauptstrahlrichtung abweicht. Da dies in dB einer Abschwächung von -3dB entspricht, wird die Keulenbreite auch als *3-dB-Breite* bezeichnet. Für Radioteleskope ist die Keulenbreite definiert als

$$\psi [\text{rad}] = 1,03 \frac{\lambda}{D_E}, \quad [\text{Kosmos 146}] [79]$$

wobei  $D_E$  den *effektiven Durchmesser* der Antenne darstellt und kleiner ist als der geometrische Durchmesser  $D_G$ . Daher ist  $\psi$  im Vergleich zu optischen Teleskopen, deren Keulenbreite<sup>47</sup> über  $\psi = 1,22 \cdot \lambda / D_G$  definiert ist, kleiner. Als Faustregel gilt, dass zwei Objekte genau dann voneinander unterscheidbar sind, wenn die beiden in einem Winkel von

$$\psi \gg \lambda / D \quad [\text{Kosmos 143}]$$

zu sehen sind.

#### 3.4.2. Antennenfeldzonen

Die verwendete Antenne (s. Kap. 4.) entspricht einem *Hertzchen Dipol*. Eine elektromagnetische Welle erzeugt in Abhängigkeit ihrer Polarisation an einem elektrischen Leiter eine Spannung. Verwendet man diesen Dipol als Sender, erzeugt eine angelegte Wechselspannung ein Feld, das die jeweilige Energie enthält.

<sup>46</sup> engl. *half-power beam width* (HPBW): Position, an der die Energie auf die Hälfte ihres Maximalwertes abgesunken ist.

<sup>47</sup> Die genaue Herleitung wird in [Fundamental 78] dargestellt.

Schaltet man die Spannungsquelle aus, kehrt die Energie wieder in den Leiter zurück. Da sich die elektromagnetischen Wellen aber mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten und daher immer eine gewisse Laufzeit benötigen, die eine Verzögerung hervorruft, wird bei jedem An- und Abschaltvorgang ein Teil der Energie in den Raum abgegeben, so dass sich eine elektromagnetische Welle mit derselben Frequenz wie der Erregerfrequenz ausbreitet.

Üblicherweise wird das Feld einer Antenne in drei Zonen unterteilt:

- Nahfeld
- Übergangsfeld
- Fernfeld

Das *Fernfeld* beginnt grob gesehen ab dem Drei- bis Vierfachen der Wellenlänge  $\lambda$ ; die genaue Abgrenzung wird in der Literatur sehr unterschiedlich gesehen. So gibt das Antennenhandbuch von Rothammel drei verschiedene Formeln aus drei verschiedenen Quellen für den Grenzradius  $r_{\text{Fern}}$  an. Im Folgenden wird die Formel nach *Kraus*

$$r_{\text{Fern}} = \frac{2D^2}{\lambda} \quad [\text{Rothammel 40}] [80]$$

verwendet, die für große Antennen mit einem Durchmesser von  $D > 2,5 \cdot \lambda$  gültig ist. Andernfalls gelten andere Fernfeldbedingungen, die von dem Verhältnis von  $D$  zu  $\lambda$  abhängen:

$$r_{\text{Fern}} > 5 \cdot D, \text{ wenn } 0,33 \cdot \lambda < D < 2,5 \cdot \lambda \text{ ist,}$$

$$r_{\text{Fern}} > 1,6 \cdot \lambda, \text{ wenn } D < 0,33 \cdot \lambda \text{ ist.}$$

Generell gilt für den Feldwellenwiderstand (vgl. [14]) eines elektrischen Dipols

$$Z_{\text{W}} = Z_0 \cdot \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\lambda}{r}. \quad [\text{Rothammel 39}] [81]$$

Als reaktives Nahfeld bezeichnet die Regulierungsbehörde (s. [Rothammel 40]) den Bereich von  $r = 0$  bis  $r = \lambda / 2\pi$ , da dort der Feldwellenwiderstand  $Z_{\text{W}}$  größer wird als der im freien Raum  $Z_0$ , d.h. das elektrische Feld wird größer als das magnetische Feld und macht eine getrennte Messung von B- und E-Feld erforderlich. Außerdem ist das E-Feld in Achsenrichtung des Dipols ungleich null. Da die beiden Felder um  $90^\circ$  phasenverschoben sind, wird bei einer Antenne als Sender in diesem Bereich keine Strahlung abgegeben, es wird nur eine Blindenergie gespeichert, die zwischen Umgebung und Antenne pendelt. Das E-Feld nimmt im Gegensatz zum B-Feld, das mit  $1 / r^2$  abnimmt, mit  $1 / r^3$  ab. Im Fernfeld dagegen

sind die beiden Komponenten in Phase, über  $Z_0$  linear miteinander verknüpft und nehmen mit  $1/r$  ab.

Da der Dipol nur eine Polarisationsachse besitzt, empfängt er daher auch nur die gleich polarisierten Wellen. Entgegengesetzt polarisierte Wellen werden unendlich und die zirkular polarisierten um die Hälfte (-3dB) gedämpft empfangen.

### 3.4.3. Reziprozitätstheorem

Ausgehend vom *Reziprozitätstheorem*, das nach *Arnold Sommerfeld*<sup>48</sup> und *Carson* verallgemeinert für Antennen gilt, ist die Impedanz sowie der Gewinn einer Antenne unabhängig davon, ob sie als Sende- oder Empfangsantenne verwendet wird, so dass es genügt, einen der beiden Fälle zu betrachten. Das Gesamtsystem wird dabei als Vierpol betrachtet. Voraussetzung ist nur, dass das Medium isotrop, also richtungsunabhängig, und linear sein muss. Nur die Stromverteilung kann variieren je nach dem, ob die Antenne sendet oder empfängt.

### 3.4.4. Antennenimpedanz

Eine Kenngröße ist die *Antennenimpedanz*, die immer auf eine bestimmte Stelle der Antenne bezogen ist (üblicherweise ist dies der Fußpunkt), wobei man dann von einer *Eingangsimpedanz* spricht:

$$Z_E = R_E + iX_E \quad [\text{Rothammel 72}] [82]$$

Dabei ist  $R_E$  der *Wirkwiderstand*, der bei einem verlustfreien Dipol gleich dem *Strahlungswiderstand*  $R_S$  ist. Andernfalls ist

$$R_E = R_S + R_V, \quad [\text{Rothammel 72}] [83]$$

wobei  $R_V$  der *Verlustwiderstand* ist.

Für den Resonanzfall muss der Imaginärteil  $X_E$  verschwindend gering werden. Dieser wird daher auch als *Blindwiderstand* bezeichnet. Ein idealer, d.h. unendlich dünner, verlustloser  $\lambda/2$ -Dipol im freien Raum besitzt eine Eingangsimpedanz von

$$Z_E = (73 + i42,5)\Omega. \quad [\text{Rothammel 73}] [84]$$

und ist damit nicht resonant. Damit man eine resonante Antenne erhält, muss der reale Dipol entsprechend kürzer gestaltet werden (s. 3.4.10.), so dass letztendlich der Wirkwiderstand  $R_E$  kleiner als  $73\Omega$  wird. Abhängig ist die Eingangsimpe-

---

<sup>48</sup> Deutscher Physiker, \* Königsberg 5.12.1868, † München 26.4.1951. Er war Professor in Claus-thal-Zellerfeld, Aachen und ab 1906 in München; 1915 formulierte er die relativistische Theorie der Feinstruktur des Wasserstoffspektrums, 1916 die Quantentheorie des normalen Zeeman-Effekts.

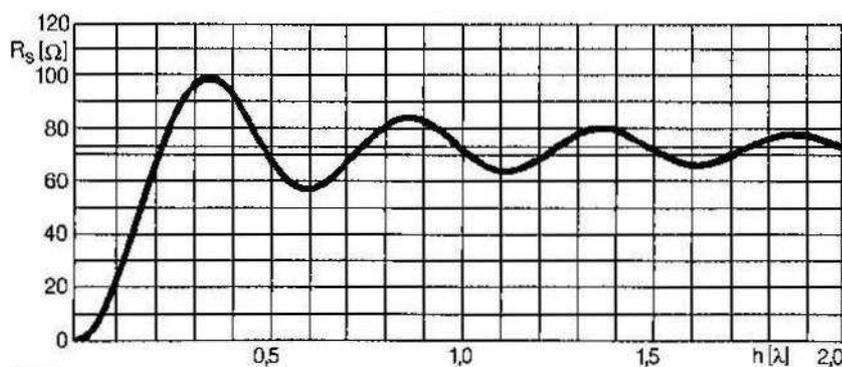
danz vom Schlankheitsgrad, vom Abstand von der Erde (insbesondere im Größenbereich der Wellenlänge) sowie natürlich von der Umgebung.

### 3.4.5. Strahlungswiderstand

Der Strahlungswiderstand  $R_S$  selbst ist eine wichtige Kenngröße für den Gewinn von Antennen und ist ebenfalls ortsabhängig. Definiert wird er über die *Strahlungsleistung*  $P_S$  und die *effektive Stromstärke*  $I$  im Bezugspunkt:

$$R_S = \frac{P_S}{I^2} \quad [\text{Rothammel 73}] [85]$$

Der Wert eines Halbwellendipols ist in Abhängigkeit von der Höhe in. In einer gegenüber der Wellenlänge großen Höhe beträgt der Wert ca.  $73 \Omega$  (s. Abbildung 30).



**Abbildung 30:** Der Strahlungswiderstand eines Halbwellendipols in Abhängigkeit von der Höhe relativ zur Wellenlänge [Rothammel 74]

### 3.4.6. Richtfaktor

Der *Richtfaktor* gibt den Leistungsgewinn einer verlustfreien Antenne in der horizontalen und vertikalen Ebene im Vergleich zu der mittleren abgestrahlten Leistung eines isotropen Strahlers  $P_I$  an. Genauer gesagt ist der Richtfaktor das Verhältnis der *Strahlstärke*, die als Leistung  $P_{\text{Max}}$  pro Raumwinkel  $\Omega_A$  in der Hauptstrahlrichtung der Antenne mit

$$\Phi_{\text{max}} [W] = \frac{P_{\text{max}}}{\Omega_A} \quad [\text{Rothammel 77}] [86]$$

definiert ist, zur Strahlstärke

$$\Phi_I = \frac{P_I}{4\pi} \quad [\text{Rothammel 77}] [87]$$

eines isotropen Strahlers (mit einem Raumwinkel von  $4\pi$ ). Dies ergibt für den Richtfaktor  $D$  demnach:

$$D = \frac{\Phi_{\max}}{\Phi_I} = \frac{4\pi}{\Omega_A} \quad [\text{Rothammel 77}] [88]$$

Er stellt den maximal möglichen Gewinn einer idealen Antenne dar. Es gibt für Antennen mit einer großen Antennenkeule die *Kraus-Gleichung* mit

$$D \cong \frac{32400}{\Psi_E [^\circ] \cdot \Psi_H [^\circ]} \quad [\text{Modern 46}] [89]$$

als Näherung für den Richtfaktor und für Antennen mit einer kleinen Antennenkeule die *Tai-Pereira-Gleichung*

$$D \cong \frac{72815}{(\Psi_E [^\circ])^2 + (\Psi_H [^\circ])^2} \quad [\text{Modern 48}] [90]$$

### 3.4.7. Gewinnfaktor

Der Gewinnfaktor oder kürzer der Gewinn  $G$  bezeichnet ein Leistungsverhältnis zwischen der maximalen Empfangsleistung  $P_{\max}$  und der Leistung eines isotropen Strahlers  $P_I$ :

$$G = \frac{P_{\max}}{P_I} \quad [\text{Rothammel 78}][91]$$

Über die Beziehung  $P = U^2 / R$  erhält man außerdem den *Feldstärkegewinn*:

$$\sqrt{G} = \frac{U_{\max}}{U_I} \quad [92]$$

Gegenüber dem Richtfaktor enthält der Gewinn auch die Verluste der Antenne ( $G < D$ ). Üblicherweise werden Richtfaktor und Gewinn logarithmisch in Dezibel angegeben:

$$d[\text{dB}] = 10 \cdot \lg(D) \quad \text{bzw.} \quad g[\text{dB}] = 10 \cdot \lg(G) \quad [93]$$

Nach [Rothammel 80] beträgt der Gewinn eines Halbwellendipols  $g = 1,64$  dB. Analog zum Richtfaktor kann auch für den Gewinnfaktor eine Näherung nach [Modern 60] mit

$$G \cong \frac{30000}{\Psi_E [^\circ] \cdot \Psi_A [^\circ]} \quad [94]$$

erfolgen.

### 3.4.8. Wirkfläche

Wenn man bei einer Antenne von einer Fläche spricht, kann einmal a) die *geometrische* Fläche bzw. die des Reflektors, dann b) die *theoretische* oder c) die *effektive Wirkfläche* gemeint sein. Die Wirkfläche ist eine fiktive, zur Ausbreitungsrichtung senkrechte Fläche, durch die die maximale Empfangsleistung  $P_{\max}$  bei einer bestimmten Strahlungsflussdichte  $F$  hindurch tritt:

$$A = \frac{P_{\max}}{F} \quad [\text{Rothammel 83}] [95]$$

Die Wirkfläche bei einer Wellenlänge  $\lambda$  ist im [Handbuch 171] und [Kosmos 146] allgemein definiert als

$$A = \frac{\lambda^2}{\Omega_A} . \quad [96]$$

Für die theoretische Wirkfläche  $A_0$ , die über den Richtfaktor  $D$ , der den maximal möglichen Gewinn darstellt, definiert ist, gilt mit [94]:

$$A_0 = \frac{\lambda^2}{4\pi} D \cong \frac{32400 \cdot \lambda^2}{4\pi \cdot \psi_E \psi_H} . \quad [\text{Rothammel 83}] [97]$$

Die effektive Wirkfläche ist dagegen gegeben als

$$A_E = \frac{\lambda^2}{4\pi} G \quad [\text{Rothammel 83}] [98]$$

und hängt damit nicht vom Richtfaktor als dem theoretischen Maximalgewinn, sondern von dem realen Gewinn ab. Mit [94] folgt für die effektive Fläche

$$A_E \cong \frac{30000 \cdot \lambda^2}{4\pi \cdot \psi_E \psi_H} \quad [99]$$

Speziell für einen *Halbwelldipol* ( $\lambda/2$ -Dipol) für Wellenlängen von  $\lambda = 0,21\text{m}$  ohne Berücksichtigung eines Reflektors ist die effektive Wirkfläche

$$\begin{aligned} A_E &= \frac{30}{73\pi} \lambda^2 . & [\text{Rothammel 83}] [100] \\ &= 5,769\text{m}^2 \end{aligned}$$

### 3.4.9. Wirksame Länge des Dipols

Wie auch die Wirkfläche ist die *wirksame Länge*  $l_w$  eine fiktive Größe und ist abgesehen vom Hertzchen Dipol nicht identisch mit der geometrischen Länge  $l_G$ . Sie berücksichtigt die ortsabhängige Stromverteilung und ist über die Leerlaufspannung  $U_0$  und die Feldstärke  $E_0$  definiert:

$$I_w = \frac{U_0}{E_0} \quad [\text{Rothammel 84}] [101]$$

Für den konkreten Fall eines Halbwellendipols für Wellenlängen von  $\lambda = 21$  cm ergibt sich die Wirksame Länge aus

$$I_w = \frac{\lambda}{\pi} = 6,68 \text{ cm.} \quad [\text{Rothammel 84}] [102]$$

### 3.4.10. Resonanzlänge des Dipols

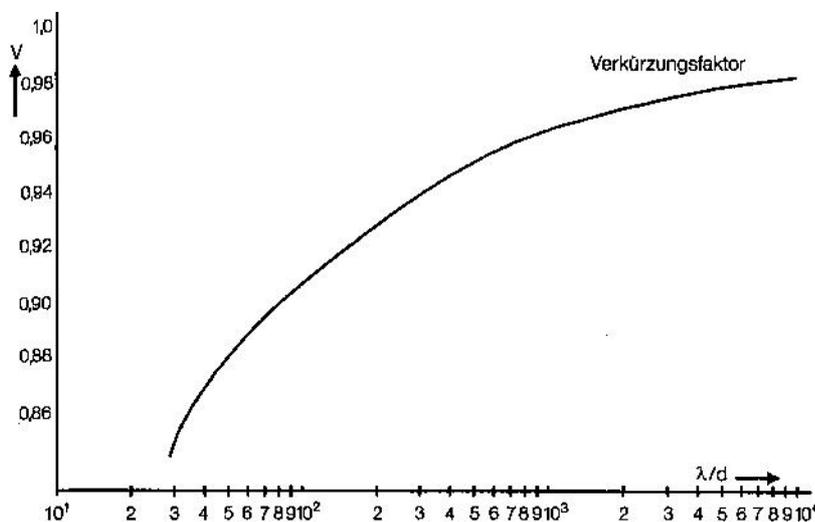
Für einen *idealen* Dipol ist die *Resonanzlänge*  $l_R$  gleich der *theoretischen Länge*  $l_T$ . Für einen Halbwellendipol ist natürlich  $l_T = \lambda / 2$ . Da aber ein Dipol einen gewissen Durchmesser  $d$  und damit auch immer Endkapazitäten an beiden Enden besitzt, die verlängernd wirken, ist die Resonanzlänge immer kleiner als  $l_T$  und abhängig von dem *Schlankheitsgrad*  $S$  des Dipols. Dieser ist definiert über

$$S = l / d \quad [\text{Rothammel 86}] [103]$$

In Abbildung 31 ist die Resonanz- bzw. wirkliche Länge  $l_R$  über den *Verkürzungsfaktor*

$$V = l_R / l_T \quad [\text{Rothammel 86}] [104]$$

bestimmbar.



**Abbildung 31:** Bestimmungsdiagramm des Verkürzungsfaktor in Abhängigkeit von dem Schlankheitsgrad  $S$  [Rothammel 85]

### 3.4.11. Rauschen und Antennentemperatur

Aufgrund ihres Wirkwiderstandes  $R_E$  (s. 3.4.4.) rauschen Antennen, da die unregelmäßige Wärmebewegung der Leitungselektronen nach *Harry Nyquist*<sup>49</sup> eine *Rauschspannung*  $U_R$  am Widerstand hervorrufen. Man spricht daher von einem *Eigenrauschen* der Antenne. Die *Rauschleistung* des Widerstandes  $P_R$

$$P_R = kT_R \Delta\nu \quad [\text{Kosmos 151}] [105]$$

ist unabhängig von dessen Widerstandsbetrag und nur abhängig von der physikalischen Temperatur  $T_R$  des Widerstandes und dem beobachteten Frequenzbereich  $\Delta\nu$ . Weist eine Antenne dieselbe Rauschleistung  $P_A$  auf wie die eines solchen Widerstandes mit der Temperatur  $T_R$ , spricht man von der *Antennentemperatur*  $T_A$ . Diese enthält noch die Rauschleistung des Verstärkers  $P_{\text{Amp}}$ , der Atmosphäre  $P_{\text{Atm}}$  und die eigentliche Strahlung aus dem Universum  $P_Q$  dazu. Letzteres wird auch im Allgemeinen als *Weltraumrauschen* bezeichnet, das in diesem Fall gemessen werden soll.  $P_{\text{Amp}}$  entsteht in Halbleitern, Dioden, etc. und lässt sich analog zu [105] auch mit einer Empfängerrauschtemperatur  $T_{\text{Amp}}$  ausdrücken. Daher ist es sinnvoll, besonders rauscharme Verstärker zu verwenden. Insgesamt lässt sich mit  $P_A = P_R + P_{\text{Atm}} + P_Q$  alles wie folgt zu einer Gesamtleistung  $P_{\text{Ges}}$  zusammenfassen:

$$P_{\text{Ges}} = P_{\text{Amp}} + P_A \quad [106]$$

Da  $P_A$  in der Regel von einer Antenne mit einem bestimmten Gewinn  $G$  verstärkt wird, muss dies natürlich berücksichtigt werden:

$$P_{\text{Ges}} = P_{\text{Amp}} + G \cdot (P_R + P_{\text{Atm}} + P_Q) \quad [107]$$

Die Leistung lässt sich auch mit [105] mit äquivalenten Temperaturen ausdrücken:

$$T_{\text{Ges}} = T_{\text{Amp}} + G \cdot T_A \quad [108]$$

Werden [47] und [105] gleichgesetzt, ergibt sich für eine Punktquelle eine äquivalente Antennentemperatur  $T_Q$  von

$$T_Q = F \frac{A_E}{2k} = I_v \frac{\Omega_Q A_E}{2k}. \quad [109]$$

Da ein Dipol nur die Hälfte der Leistung empfängt (s. 3.4.2.), wurde ein Faktor  $\frac{1}{2}$  ergänzt. Mit der Rayleigh-Jeans-Näherung für einen Schwarzen Körpers [37] und mit der effektiven Fläche nach [96] kann man auch

<sup>49</sup> Amerikanischer Physiker, \* 7.2.1889 Nilsby (Schweden), † 14.4.1976 Harlingen (USA); er forschte über das thermische Rauschen, welches auch unter *Nyquist-Rauschen* bekannt wurde. Er arbeitete wie Jansky bei Bell Laboratories.

$$T_Q = T_B \frac{\Omega_Q}{\Omega_A} \quad [\text{Kosmos 147}] [110]$$

schreiben, wobei hier  $A_E = A_0$  angenommen wurde. Das bedeutet, dass die Strahlungstemperatur  $T_B$  von einer Punktquelle einer um das Raumwinkelverhältnis verringerten Temperatur  $T_Q$  entspricht. Selbiges kann man auch für Flächenquellen anwenden, so dass deren Antennentemperatur

$$\begin{aligned} T_Q &= I_v \frac{\Omega_A A_E}{2k} \\ &= T_B \frac{\Omega_A A_E}{\lambda^2} = T_B \end{aligned} \quad [\text{Kosmos 147}] [111]$$

identisch mit der Strahlungstemperatur ist. Da viele Empfänger zwischen dem eigentlichen Antennensignal mit  $T_{\text{Ges}}$  und dem Signal mit  $T_{\text{Ges,W}}$  eines angeschlossenen Widerstands mit einer konstanten Temperatur  $T_W$ , das nur  $T_{\text{Amp}}$  aus den Verstärkerstufen und  $T_W$  besteht, hin- und herschalten, lässt sich aus deren Differenz (s. [106]) die Antennentemperatur  $T_A$  bestimmen:

$$\begin{aligned} T_{\text{Ges}} - T_{\text{Ges,W}} &= T_A - T_W \\ &= G \cdot (T_{\text{Atm}} + T_Q + T_R) - T_W \end{aligned} \quad [112]$$

Ist dabei  $T_Q$  gegenüber  $T_{\text{Atm}}$  und  $T_R$  groß, kann  $T_A \cong T_Q$  gesehen werden.

### 3.4.12. Freiraumdämpfung

Wird eine Sendeantenne mit einer Leistung von  $P_S$  betrachtet, die mit einem Signal der Wellenlänge  $\lambda$  auf eine Empfängerantenne, die sich im Abstand  $r$  in Sichtlinie befindet, gerichtet, dämpft der freie Raum das Signal, so dass nur noch eine Empfangsleistung von  $P_E$  die Antenne erreicht. Man spricht dann von einer *Freiraumdämpfung*. Mit der *Allgemeinen Ausbreitungsformel* nach *H.T. Fries*

$$P_E = P_S \frac{A_{E,S} A_{E,E}}{r^2 \lambda^2} \quad [\text{Rothammel 755}]$$

und [98] gilt dann für die empfangene Leistung nach [Rothammel 755] sowie [Modern 867]

$$P_E [\text{W}] = P_S [\text{W}] \cdot P_D [\text{W}] \cdot G_S G_E \left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \quad [113]$$

bzw. in Dezibel gerechnet

$$p_E [\text{dB}] = p_S [\text{dB}] + p_D [\text{dB}] + g_S^S + g_E^I + 20 \cdot \log \left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right). \quad [114]$$

$A_{E,S}$  effektive Wirkfläche der Sendeantenne

$A_{E,E}$  effektive Wirkfläche der Empfangsantenne

- $P_S$  bzw.  $p_S$  gesendete Leistung in W (bzw. in dB, s. [93])  
 $P_E$  bzw.  $p_E$  empfangene Leistung in W (bzw. in dB)  
 $P_D$  bzw.  $p_D$  Dämpfungsglied (bzw. in dB)  
 $G_S$  bzw.  $g_S$  Gewinn der Senderantenne gegenüber einem isotropen Strahler (bzw. in dB)  
 $G_E$  bzw.  $g_E$  Gewinn der Empfangsantenne dB gegenüber einem isotropen Strahler (bzw. in dB)

Außerdem ist zu beachten, dass eine Dipolantenne bei einer nicht polarisierten elektromagnetischen Welle aufgrund ihrer eigenen Polarisationsrichtung nur die Hälfte der Leistung empfangen kann, so dass noch ein Faktor  $\frac{1}{2}$  mit in die Gleichungen einfließt. Zwei linear polarisierte Antennen sollten entsprechend ausgerichtet werden.

## 4. Versuchsaufbau

### 4.1. Lage und Aufbau des Teleskops



**Abbildung 32:** links: Blick vom Uni-Gebäude U nach Süden auf das Radioteleskop, rechts: Blick vom Radioteleskop nach Norden auf das Uni-Gebäude [Bellin]

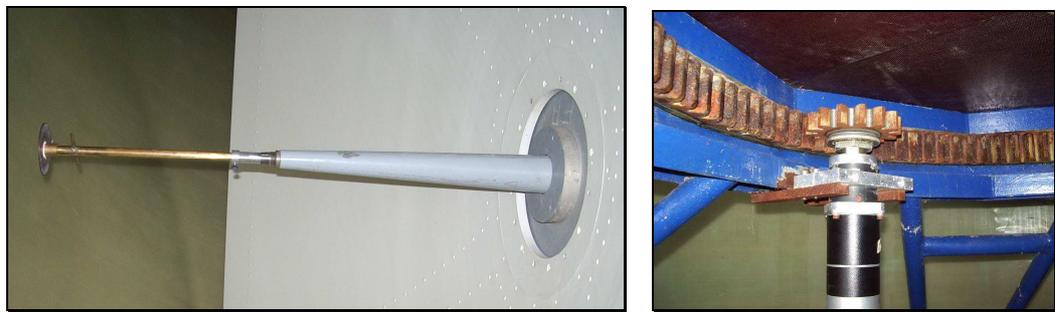


**Abbildung 33:** Silo mit dem Teleskop (links), Container mit dem Backend und den Rechnern (rechts) [Bellin]

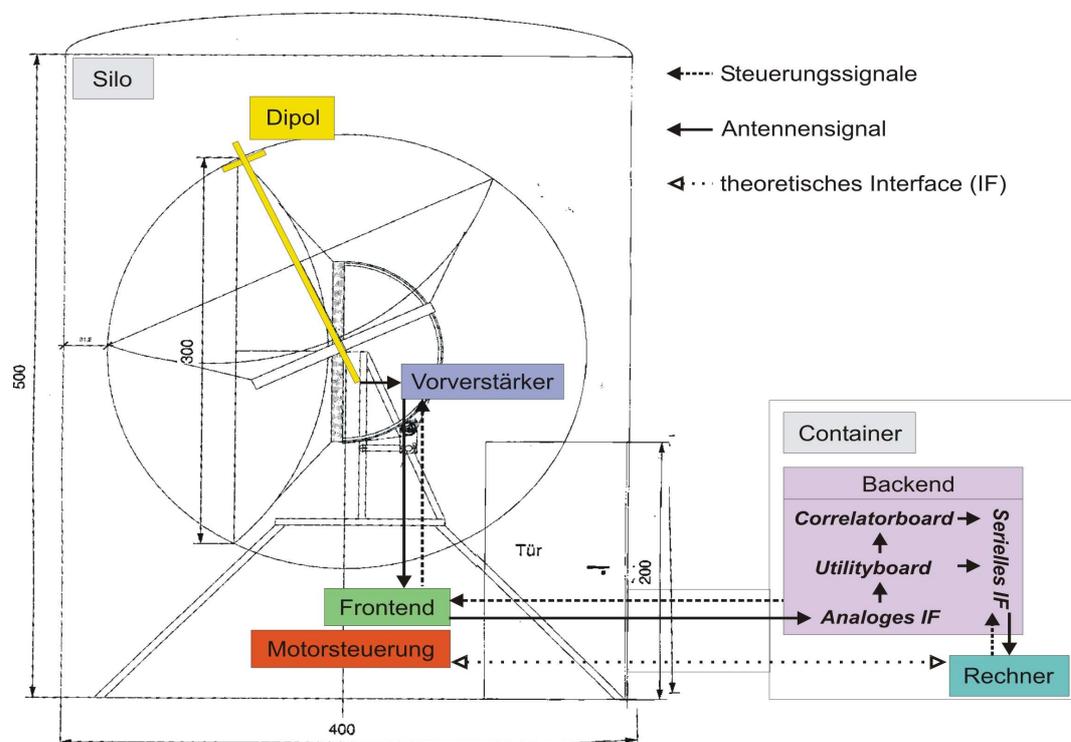
Das Radioteleskop wurde vor ein bis zwei Jahren nicht weit des Hauptgebäudes der Wuppertaler Universität erbaut. Es befindet sich ca. 150 m nördlich von Gebäude U sowie ca. 50 m vor den Containern des Fachbereichs Sportwissenschaften. Abbildung 32 zeigt den Blick aus der 8. Etage über dem Boden in Richtung Süden (Cronenberg, Campus Freudenberg) sowie den Blick zurück auf das Gebäude U und die so genannten *Sport-Container*. Die Koordinaten von Wuppertal betragen nach [calsky]  $7^{\circ} 10' 12''$  östliche Länge und  $51^{\circ} 15' 00''$  nördliche Breite. Der Aufbau besteht zum einen aus einem *Silo*, in dem sich das eigentliche Teleskop sowie die *Motorensteuerung* und die ersten zwei Stufen der Elektronik (*Vorverstärker* und *Frontend*, s. 4.2.) befinden. Zum anderen steht in unmittelba-

rer Nähe ein blauer Container (s. Abbildung 33) mit dem so genannten *Backend* (s. 4.3.) und zwei Rechnern.

Das Teleskop besteht aus einem Aufbau mit einer sphärischen *Reflektorschüssel*, die von Telefunken stammt und als Richtfunkantenne diente, und einem Halbwel- lendipol an einer langen *Dipolstange* sowie einer kleinen Reflektorscheibe, die sich ca. 10 cm hinter dem Dipol befindet (s. Abbildung 34). Die Schüssel mit dem Dipol wird über zwei *Schrittmotoren* (s. Abbildung 34) in der horizontalen (Azi- mut) und der vertikalen Ebene (Elevation) bewegt, welche mittels eines *Joystick- pulsts*, das *Karl-Heinz Becker* programmiert hat, gesteuert werden. An der Anzeige des Pulsts ist die momentane Position im Horizontsystem ablesbar.



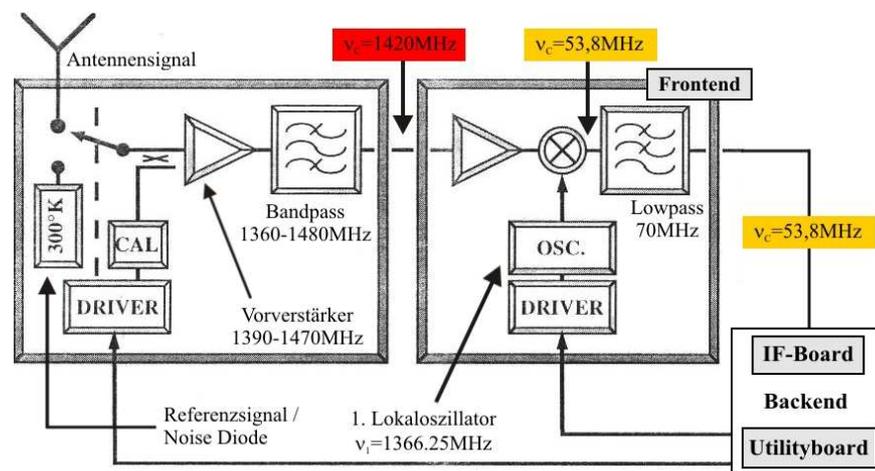
**Abbildung 34:** links: Dipol-Stange mit Reflektor [Sonntag],  
rechts: Der Schrittmotor für die Azimut-Ausrichtung [Sonntag]



**Abbildung 35:** Skizze der Antenne sowie der Elektronik [Bellin]  
basierend auf der Teleskopskizze von *Steffen Hartmann*

## 4.2. Vorverstärker und Frontend

Das über den Reflektor verstärkte und mit der Dipolantenne empfangene Signal wird direkt hinter der Schüssel mit einem Vorverstärker heraufgesetzt (s. Abbildung 35). Dieser passt so die Impedanz der Antenne an die der nachfolgenden Schaltung an, dass die maximale Leistung gewährleistet ist, und sorgt dafür, dass das Signal größer ist als das Eigenrauschen des *Mischers* im Frontend. Außerdem selektiert der Vorverstärker sowie ein nachfolgender Bandpassfilter die Frequenzen auf einen Frequenzbereich von 1390 bis 1470 MHz (s. Abbildung 36, betrachtet bei einer *Mittenfrequenz*<sup>50</sup> von  $\nu_C = 1420$  MHz). Es ist außerdem möglich, über ein Steuerungskabel zum *Utilityboard* zwischen dem Antennensignal und einem *Referenzsignal* bzw. einer *Noisediode* umzuschalten (s. 5.1.).



**Abbildung 36:** Übersicht über die Elektronik von der Antenne bis zum Frontend [Bellin] basierend auf einer Skizze aus [Onsala]

Unten im Silo steht dann das Frontend, in dem sich der erste *Lokaloszillator* mit einer Frequenz von  $\nu_{LO1} = 1366,25$  MHz befindet. In einem Mischer (Symbol  $\otimes$ ) wird dieses mit  $\nu_C$  *gemischt*, d.h. die Signale werden miteinander multipliziert und es entstehen zwei *Schwebungsfrequenzen*<sup>51</sup>

$$\nu_{1/2} = |\nu_C \pm \nu_{LO1}|. \quad [115]$$

Die erste Frequenz mit  $\nu_1 = 2786,25$  MHz wird direkt im nachstehenden *Lowpassfilter*, der alle Frequenzen oberhalb von 70 MHz herausfiltert, eliminiert. Dafür wird die zweite Frequenz mit  $\nu_2 = 53,75$  MHz durchgelassen und geht über ein

<sup>50</sup> Engl. *center frequency*.

<sup>51</sup> Sie wird auch häufig als *Zwischenfrequenz* bezeichnet.

Koaxialkabel als neue Mittenfrequenz  $\nu_C$  in den Container zu dem Backend. Dieses wird auch als *Superheterodyn*-Empfänger<sup>52</sup> bezeichnet.

Das Lowpassfilter im Vorverstärker sorgt außerdem noch dafür, dass die so genannte *Spiegelfrequenz*  $\nu_S = 1312,5$  MHz herausgefiltert wird, die im Mischer auch eine Schwebungsfrequenz von  $|\nu_S - \nu_{LO1}| = 37,25$  MHz ergeben und damit als unerwünschte Frequenz durchgelassen würde.

### 4.3. Backend

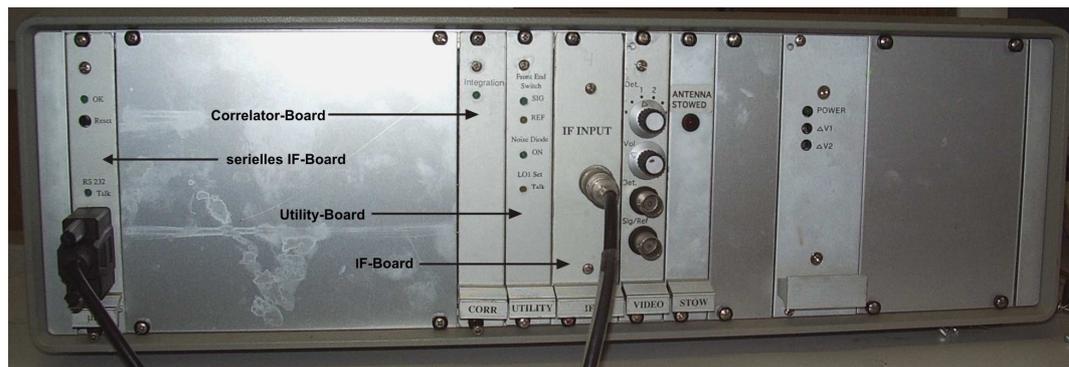


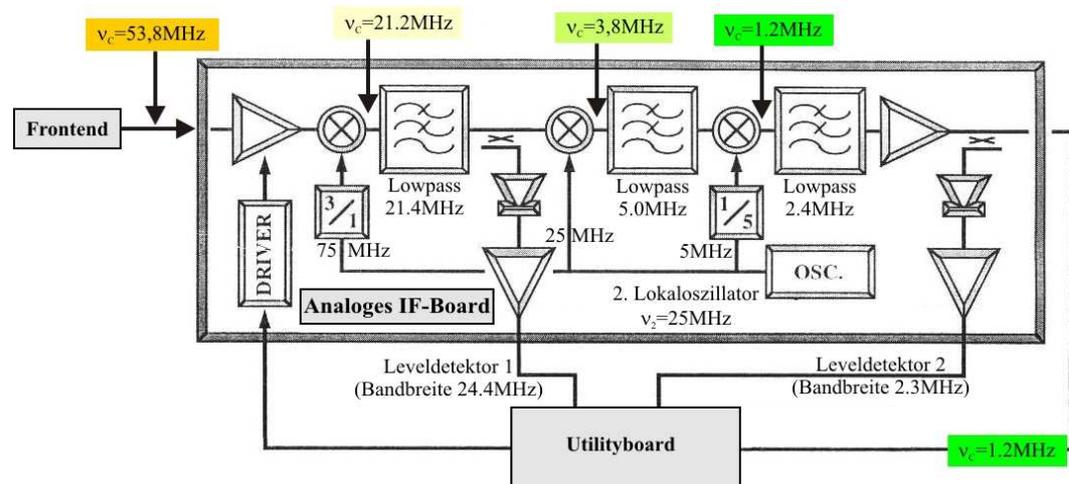
Abbildung 37: Frontansicht des Backends [Sonntag]

Im Backend (s. Abbildung 37 und Abbildung 38) wird das Signal zunächst in das *analoge Interface-Board* (IF-Board) geleitet. Dort befindet sich ein zweiter Lokaloszillator mit einer Frequenz von  $\nu_{LO2} = 25$  MHz. Mit diesem wird das Signal im Folgenden dreimal heruntergemischt. Dabei wird beim ersten Mal die dreifache Frequenz  $\nu_{LO2}$  von 75 MHz, beim zweiten die eigentliche Frequenz von 25 MHz und schließlich ein Fünftel der Frequenz  $\nu_{LO2}$  von 5 MHz verwendet. Daraus ergeben sich neue Mittenfrequenzen von 21,2 MHz, 3,8 MHz und 1,2 MHz. Zwischen den drei Mixern befinden sich drei Lowpassfilter, die schließlich die Bandbreite auf 2,4 MHz heruntersetzen.

An zwei Stellen wird zusätzlich zu dem zu analysierenden Signal die Signalthöhe in *Leveldetektoren* bestimmt und verstärkt. Der erste Leveldetektor (LD1) nimmt das Signal hinter dem ersten Lowpassfilter bei einer Bandbreite von 24,4 MHz und der zweite (LD2) nach dem letzten Filter bei einer Bandbreite von 2 MHz ab. Sowohl am Backend-Eingang als auch kurz vor dem Ausgang wird das Signal noch verstärkt (Symbol  $\triangleright$ ), welches dann in das *Utility-Board* geht. Dort wird es

<sup>52</sup> von lat. *super* = über, gr.  $\epsilon\tau\epsilon\rho\omicron\varsigma$  = verschieden und gr.  $\delta\upsilon\nu\alpha\mu\iota\varsigma$  = Kraft. Dagegen werden beim *Homodyn*-Empfänger zwei gleiche Frequenzen verwendet.

mit einem *2-bit-Sampler* in ein digitales Signal umgewandelt (s. 10.4.). Nach Herstellerangaben (s. [Onsala]) beträgt die Halbwertsbreite 2,4 MHz, dabei beträgt die effektive Halbwertsbreite 2,025 MHz. Die Frequenzanalyse erfolgt im Correlator-Board und erzeugt ein Histogramm über 64 Kanälen, wobei die Hersteller eine effektive Kanalanzahl von 54 angeben. Jeder Kanal hat dabei eine Bandbreite von  $\Delta v_{\text{Kanal}} = 37,5 \text{ kHz}$ .



**Abbildung 38:** Übersicht über die Elektronik vom Frontend bis zum Utilityboard [Bellin] basierend auf einer Skizze aus [Onsala]

## 5. Software

### 5.1. Programm *Qradio*

Von dem schwedischen Hersteller der Elektronik stammt auch das Programm *Qradio*, das von *Michael Olberg*, *Elsa-Maria Gustafsson* und *Ragnhild Walton* geschrieben worden ist (s. [Qradio]). Auf dem alten Rechner im Container ist Suse 8.0 sowie die *Qradio*-Version 1.0 installiert. Auf dem später hinzugekommenen Rechner (s. 6.2.) mit Suse 9.2 ist die Version 2.0 installiert, die aber prinzipiell die gleichen Funktionalitäten besitzt. Es ist leider aufgrund der Linux-Version nicht möglich, Version 1.0 auf dem neuen Rechner laufen zu lassen. Da die alte Version später vorwiegend zum Einsatz kommt, wird das Programm anhand dieser Version beschrieben. Nicht alle beschriebenen Funktionen arbeiten korrekt, was später in Kap. 6. ausführlicher behandelt wird.

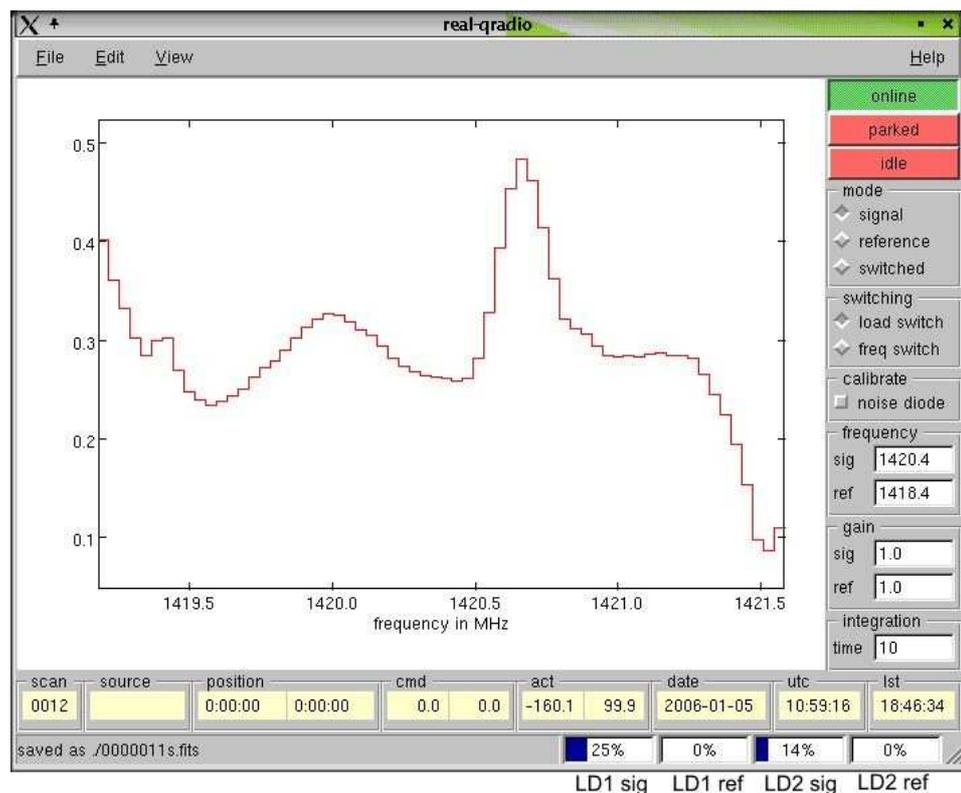


Abbildung 39: Bildschirm von *Qradio* 1.0. auf dem alten Rechner [Bellin]

Bevor man *Qradio* aufruft, sollte man in der Befehlskonsole in das Verzeichnis wechseln, in der auch nachher die Messdateien (im *FITS*-Format) gespeichert werden sollen. Bevor *Qradio* über den Befehl `qradio` gestartet wird, sollte zuerst das Backend eingeschaltet werden. In Abbildung 39 ist das sich dann öffnende

graphische Interface dargestellt. Rechts oben sind drei Buttons, die bei Inaktivität rot sind. Der erste startet die serielle Kommunikation mit der seriellen Schnittstelle des Backends; der zweite ist vorerst irrelevant, da dieser einer theoretisch möglichen Motorenfernsteuerung dient; der unterste startet die Integration. Die Zeit, über die integriert werden soll, kann rechts unten eingegeben werden.

Unter `Mode` kann zwischen drei Modi `signal`, `referenz`, `switched` ausgewählt werden. Bei der Aktivierung des ersten Modes wird nur das Antennensignal, bei dem zweiten Mode dagegen nur das Referenz-/Noise-Signal aufgenommen. Darunter kann nun gewählt werden, ob ein Referenzsignal (`freq switch`) oder die Noisediode (`load switch`) ausgegeben wird, falls zuvor `referenz` gewählt worden ist. Unter `calibrate` lässt sich auch die Noisediode einschalten, was aber bislang keinerlei Auswirkungen gezeigt hat. Unter `frequency` und `gain` lässt sich die jeweilige Centerfrequenz mit ihrer relativen Verstärkung einstellen. Mit Hilfe dieser Centerfrequenz des Signals lässt sich der *Qradio*-Ausschnitt in einen tieferen oder höheren Frequenzbereich verschieben. Bei der Standard-Centerfrequenz von 1402,4 MHz umfasst der Frequenzbereich 1419,3 bis 1421,6 MHz.

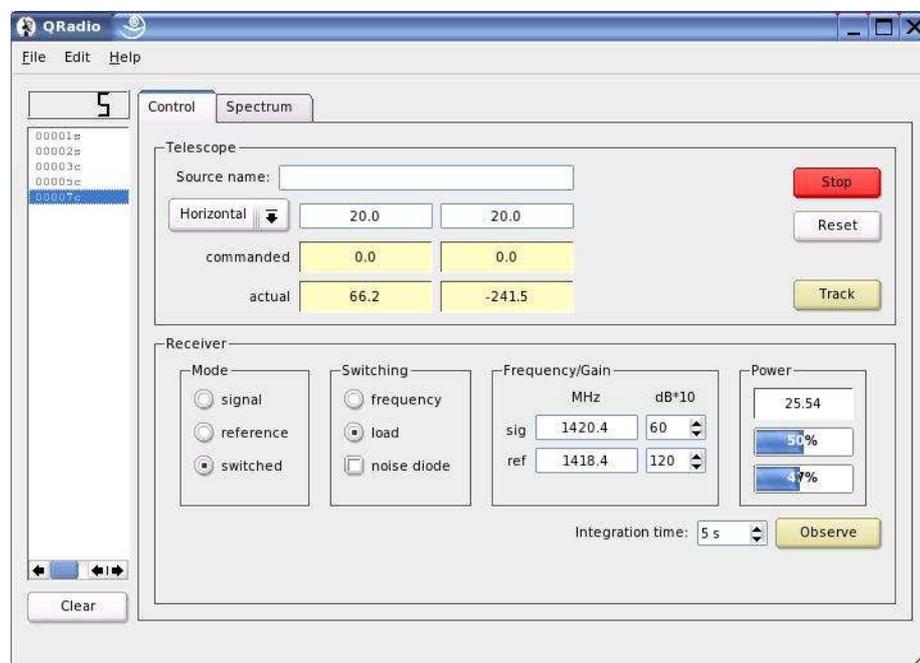


Abbildung 40: Screenshot der neuen *Qradio*-Version [Bellin]

Unten in der Statuszeile befinden sich noch prozentuale Anzeigen für die beiden Leveldetektoren sowohl des Signals als auch des Referenzsignals. Daneben erscheint in der Zeile, unter welchem Namen die letzte Messung gespeichert wurde.

Die Signaldaten werden dabei immer in der Datei `[Nummer]s.fits`, die Daten des Referenzsignals in `[Nummer]r.fits` gespeichert. `[Nummer]` bezeichnet immer die laufende Nummer. Es werden nur bei der Einstellung `switched` beide Dateien generiert.

Im Gegensatz zur neuen Version (s. Abbildung 40) kann diese *Qradio*-Version nämlich keine vorherigen Messungen erneut anzeigen. Alle anderen Funktionen dienen weitestgehend nur der Motorensteuerung, der Anzeige von Koordinaten sowie entsprechender Daten wie LST, LCT und Datum.

Wenn die neue *Qradio*-Version gestartet werden soll, ist zuvor der Befehl

```
export LD_LIBRARY_PATH=$LD_LIBRARY_PATH:/root/qradio/qwt-4.2.0/lib/
```

erforderlich. Anschließend kann im Ordner `qradio/newradio/` mit dem Befehl `./newradio` das Programm gestartet werden.

## 5.2. Programm zur Koordinatenumrechnung und Himmelskartenerstellung

Zur bequemeren und sichereren Koordinatenumrechnung wurde vom Verfasser ein Programm in C++ namens *radio.cpp* (Quellcode s. 10.7.) geschrieben. Dieses umfasst zum einen die Umrechnung zwischen den drei relevanten Koordinatensystemen Horizont-, Äquatorial- und dem Galaktischen System. Dabei verwendet es die Formeln nach [Practical], die in 3.1.6. beschrieben worden sind. Verifiziert wurde das Programm über verschiedene Vergleichswerte, um es als Fehlerquelle auszuschließen. So stimmt die vom Programm berechnete LST mit der von den Internetseiten [tycho] und [Giesen] überein; die Koordinatentransformationen wurden mit Hilfe des Programms *Cartes du Ciel Sky Charts*, welches kostenlos im Internet (s. [Cartes]) zu bekommen ist, und der Internetseite [java] kontrolliert. Die Eingabe der Koordinaten erfolgt entweder über eine Eingabemaske oder über eine Datei *sources.txt* (s. 10.3.), in der bereits wichtige Quellen eingetragen sind. **Abbildung 41** zeigt das Hauptmenü, das nach dem Start erscheint. Unterhalb der Titelzeile sieht man alle momentanen Einstellungen, die z.T. im Programm neu gesetzt werden können, wie das Datum, die Uhrzeit und die *Nullposition des Azimutmotors*. Letzteres gibt an, bei welchem wahren Azimutwinkel der Motor die Position  $0^\circ$  anzeigt. Dieses ist notwendig geworden, da der wahre Azimut (s. 3.1.1.) positiv über Osten-Süden-Westen definiert ist, die Motorsteuerung aber über Westen-Süden-Osten positiv misst. Da der Motor in der Regel im Süden ge-  
eicht wird, ist  $180^\circ$  voreingestellt. Dieses kann aber über den Menübefehl 2 geän-

dert werden. Als lokaler Azimut wird im Programm nun immer der Winkel laut Motorsteuerung bezeichnet, um Fehler bei der Umrechnung zu vermeiden.

```

*****
PROGRAMM ZUM WUPPERTALER RADIOTELESKOP
*****
Laengengrad:  7 deg 10'  1"      Datum:      0.0.  0
Breitengrad:  51 deg 15'  0"      Uhrzeit:    0: 0
Juliandate:   0                   d          LST:     0 h 0 m 0 s
Nullposition des Azimutmotors bei: 180 deg 0' 0"
Keulenbreite:4

1 *) Datum und Uhrzeit eingeben
2 *) Eichung der Azimut-Einstellung des Teleskops
3 >  AZ, EL -> RA, DE
      -> GL, GB
4 >  RA, DE -> AZ, EL
      -> GL, GB
5 >  GL, GB -> RA, DE
      -> AZ, EL
6 #>  RA, DE -> AZ, EL fuer mehrere Std.
7 #>  RA, DE -> AZ, EL fuer mehrere Min.
8 #>  GL, GB -> AZ, EL fuer mehrere Std.
9 #>  GL, GB -> AZ, EL fuer mehrere Min.
10#> Momentane Position aller Radioquellen der DB
11#> Anzeige der momentan beobachtbaren Radioquellen
12#> Anzeigen einer Radioquelle fuer mehrere Std.
13#> Anzeigen einer Radioquelle fuer mehrere Min.
14#> Messprogramm fuer die Galaxis erstellen
15#> Theoretisches Bild im Horizontsystem z.Z.
16#> Theoretisches Bild im Aequatorsystem
17#> Theoretisches Bild im Galakt. System

0 > Programm beenden
* = sollte am Anfang eingestellt bzw. ueberprueft werden
# = mit Dateiausgabe

*****
Auswahl: 1

Bitte Datum im Format DDMMYYYY eingeben: 07042006
Bitte Uhrzeit im Format HHMM eingeben: 1200

```

Abbildung 41: Menü des Programms *radio.cpp* [Bellin]

RA	Rektaszension	GL	Galaktische Länge
DE	Deklination	GB	Galaktische Breite
AZ	wahrer Azimut	EL	Elevation
lokal	lokaler Azimut	Deg	Grad
h, min, sec	Stunden, Minuten, Sekunden	LST	Lokale Sternzeit

Tabelle 4: verwendete Abkürzungen im Programm [Bellin]

Zu Beginn sollte in der Regel das Datum und die Uhrzeit eingegeben werden, für welche man Positionen bestimmen möchte. Nachdem über die Auswahl 3, 4 oder 5 manuell eine Position im gewünschten System eingegeben wurde, erscheint das Ergebnis in den beiden anderen Systemen. Auswahl 6 und 8 bzw. 7 und 9 dienen zur Positionsberechnung für mehrere Stunden bzw. Minuten (s. **Abbildung 42**), dabei werden die Daten auch gleichzeitig in eine Datei ausgegeben, was für alle Menüpunkte mit # gilt. Der Dateiname setzt sich aus den Koordinaten sowie dem

Datum und der Uhrzeit zusammen und wird am Ende der Ausgabe angezeigt. Die Abkürzungen in dem Programm sind wie folgt zu verstehen:

Die nun folgenden Menüauswahlpunkte 10 bis 13 nutzen alle die oben genannte *sources.txt*. Auswahl 10 zeigt alle Quellen aus dieser Datei an, dagegen zeigt 11 nur die an, die momentan (lt. Zeiteinstellung) sichtbar sind, d.h. der Elevationswinkel  $a$  muss zwischen  $0^\circ$  und  $90^\circ$  liegen<sup>53</sup>. Um sich eine einzelne Quelle für mehrere Stunden oder Minuten anzeigen zu lassen, dienen die Auswahlpunkte 12 und 13. Außerdem wird die Anzeige wieder in die angezeigte Datei ausgegeben.

Bei der Ausgabe für mehrere Stunden sollte grundsätzlich bedacht werden, dass die entsprechende Zeit auf die LST aufaddiert wird, ohne diese aber neu zu berechnen. Daher kann die Position nach 24 Stunden aufgrund der Ungleichheit zwischen Stern- und Sonnentag bis zu  $1^\circ$  von der wahren Position abweichen (s. [Modern 12]). Für die Position laut der richtigen LST muss der Weg dann wieder über eine erneute Zeiteingabe (Auswahl 1) erfolgen.

```
Auswahl: 6
Eingabe RA h : 12
Eingabe RA min: 7
Eingabe RA sec: 0
Eingabe DE deg: -3
Eingabe DE min: 30
Eingabe DE sec: 0

Eingabe des Zeitraums in h: 3
+ 0h | AZ:  8 deg  3' 56" | lokal: 171 deg 56'  3" | EL: -41 deg -59' -9"
+ 1h | AZ: 27 deg 27'  0" | lokal: 152 deg 32' 59" | EL: -39 deg  -6' -54"
+ 2h | AZ: 44 deg 45' 39" | lokal: 135 deg 14' 20" | EL: -33 deg -34' -38"
+ 3h | AZ: 59 deg 47' 11" | lokal: 120 deg 12' 48" | EL: -26 deg  -9' -18"
... Daten wurden erfolgreich in RA181DE356_7042006_1200.txt abgespeichert.
```

Abbildung 42: Koordinatenumrechnung für die nächsten drei Stunden [Bellin]

```
Auswahl: 14
max. Bereich GL von 0 bis 360.
GL untere Grenze: 0
GL obere Grenze: 90

max. Bereich GB von -90 bis +90 deg.
GB untere Grenze: -20
GB obere Grenze: 20

Messintervall in min: 3
Ges. Messzeitraum in h: 3

Galaktische Koordinaten werden umgerechnet...
...Positionen wurden in Messprogramm_0-90_-20-20.txt gespeichert.
```

Abbildung 43: Menüauswahl 14 – Eingabe der Parameter [Bellin]

<sup>53</sup> Es wurde bereits vorweg genommen, dass demnächst auch Winkel über  $45^\circ$  messbar sein werden.

Um eine Himmelskarte in Galaktischen Koordinaten mit dem Teleskop zu messen, ist es möglich über die Auswahl 14 ein Messprogramm erstellen zu lassen. Dabei gibt man (s. Abbildung 43) zum einen den Bereich an, den man abdecken möchte, und dann das *Messintervall* sowie den *Messzeitraum*. Das Intervall sollte so eingestellt werden, dass es in der Zeit möglich ist, das Teleskop entsprechend nachzufahren. Erfahrungsgemäß liegt die Zeit zwischen 3 und 5 Minuten. Der Zeitraum gibt an, wie lange gemessen werden soll. Für jeden Zeitpunkt werden die einzelnen Punkte in den eingegebenen Grenzen solange durchlaufen bis entsprechende Horizontalkoordinaten in den für das Teleskop sichtbaren Bereich kommen, d.h. Elevationswinkel  $< 90^\circ$ .

Das Ergebnis (s. Abbildung 44) liefert eine druckfertige Liste mit den Horizont- und den dazu gehörigen Galaktischen Koordinaten. Natürlich ist es nicht möglich, eine komplette Himmelskarte zu erstellen.

```
Datum: 7.4.2006, Zeit: 14:0
GL von 0 bis 90 deg.
GB von -20 bis 20 deg.
Messintervall von 3 Minuten in einem Zeitraum von 3 Std.

+   0 min   GL:    62 GB:  -20
    lokaler AZ: 265.8 EL: 15.1   fitsnr. _____
+   3 min   GL:    63 GB:  -20
    lokaler AZ: 265.2 EL: 15.6   fitsnr. _____
+   6 min   GL:    64 GB:  -20
    lokaler AZ: 264.6 EL:  16   fitsnr. _____
+   9 min   GL:    65 GB:  -20
    lokaler AZ:  264 EL: 16.5   fitsnr. _____
...

```

**Abbildung 44:** Auszug aus der ausgegebenen TXT-Datei [Bellin]

Bei den letzten drei Menüfunktionen 15 bis 17 werden die Daten aus der Straßburger Datenbank verwendet (s. Kap. 3.3.5.), die sich in der Datei *db.txt* (s. Anhang 10.7.) befinden. In diese wurden alle Quellen mit einer Strahlungsflussdichte größer als 0,5 Jy (entspricht 6597 Quellen) importiert.

Unter der Annahme, dass die Strahlungsflussdichten für den Bereich der Antennenkeule mit einer Halbwertsbreite von  $\psi$  einer Gauß-Verteilung folgen, werden für jede Position die Strahlungsflussdichten der einzelnen Quellen nach

$$S_0 = \sum S_i \cdot \exp\left(-\ln 2 \frac{(\Delta\rho)^2}{\psi^2}\right)$$

aufaddiert. Dabei stellt  $S_0$  die gesamte Strahlungsflussdichte für den von der Antenne abgedeckten Bereich dar.  $\Delta\rho$  ist der Abstand zwischen einer einzelnen

Quelle der Datenbank (mit den Koordinaten  $\alpha_i$  und  $\delta_i$ ) und den Koordinaten  $\alpha_0$  und  $\delta_0$  der jeweiligen Position, der sich wie folgt berechnen lässt:

$$\Delta\rho = \sqrt{(\alpha_0 - \alpha_i)^2 + (\delta_0 - \delta_i)^2}$$

Es werden im Programm alle Quellen im Bereich der dreifachen Keulenbreite berücksichtigt. Damit folgt für die gesamte Flussdichte:

$$S_0 = \sum S_i \cdot \exp\left(-\ln 2 \frac{(\alpha_0 - \alpha_i)^2 + (\delta_0 - \delta_i)^2}{\psi^2}\right) \quad [116]$$

Genau diese Rechnung wird beim Aufruf der Auswahl 16 für alle Koordinaten im Äquatorialsystem ausgeführt. Dabei sind noch als Parameter eine minimale Intensität und eine Schrittweite von  $\geq 1^\circ$  einzugeben. Letzteres bedeutet, dass maximal  $181 \cdot 360 = 65160$  Positionen durchlaufen werden. Als Ausgabedateien findet sich zum einen die Datei *aequator-matrix.txt* mit einer Matrix aller Positionen, die mit Programmen wie *Origin* oder *Excel* eingelesen und graphisch dargestellt werden können (Himmelskarten s. Kap. 3.3.5.). Zum anderen die *aequator.txt*, die in einer Liste alle Positionen mit einer Strahlungsflussdichte größer als die eingegebene minimale Intensität enthält. Diese dient hauptsächlich dazu, um sich schnell einen Überblick zu verschaffen.

Entsprechend rechnet die Menüauswahl 17 dasselbe nur in Galaktischen Koordinaten und erzeugt so eine Matrix für das Galaktische System. Die Ausgabedateien heißen hier *galaxis.txt* und *galaxis-matrix.txt*.

Wurde über die Auswahl 1 der gewünschte Zeitpunkt eingegeben, kann mit der Auswahl 15 eine Quellenkarte für das Horizontsystem erstellt werden. Der entsprechende Dateiname wird entsprechend angezeigt.

### 5.3. Konvertierung der FITS-Dateien

Da *Qradio* die Dateien im FITS-Format speichert, was für *Flexible Image Transport System* steht und das Standardformat für astronomische Daten ist, müsse diese entsprechend konvertiert werden. Sie können nicht nur Bildinformationen wie bei einem JPG oder GIF, sondern auch Tabellen oder mehrdimensionale Matrizen sowie *Keywords* mit Informationen über die Position, Aufnahmezeit, das Teleskop, u.v.m. enthalten. Auf der Internetseite [Goddard] finden sich weitere Informationen über FITS-Dateien und insbesondere die Programmbibliothek *fitsio* bzw. *cfitsio*. *Lorenzo Perrone*, ein ehemaliger Mitarbeiter der Arbeitsgruppe, hat Zeit ein Perl-Skript (*make\_ascii.pl*) geschrieben, mit dem die Dateien in TXT-

Dateien konvertiert werden können. Im Skript selbst müssen ggf. die Eingabe- und Ausgabepfade geändert werden (`my $input_loc` bzw. `my $output_loc`). Aufgerufen wird das Skript über `./make_ascii.pl [i] [j]`, wobei der Parameter `[i]` die Nummer der ersten und `[j]` die der letzten FITS-Datei darstellt. Außerdem muss ggf. die *Auger Offline Software* über die Befehle `source /common/Astro/taup/setup/taup_setup.sh` und `ao` gestartet werden. Falls keine `[Nummer]s.fits-` bzw. `[Nummer]r.fits-` Datei vorliegt, wird dennoch eine entsprechende TXT-Datei erstellt, die aber mit der jeweils anderen Datei identisch ist. Die TXT-Dateien bestehen aus einer Spalte mit den Frequenzen der 64 Kanäle sowie einer mit der zugehörigen Signalhöhe.

#### 5.4. Programm zur Dateneinlese und qualitativen Analyse

Zur einfacheren qualitativen Analyse der Dateien mit Programmen wie *Origin*, *Excel*, o.ä. wurden vom Verfasser kurze C++-Programme geschrieben, die die TXT-Dateien eines Ordners einlesen und in eine Datei packen, die alle Daten in Form einer Matrix enthält. Dabei wird die Frequenz bereits gemäß der Kalibrierung in Kap. 6.9.2. skaliert. Die Signalhöhe wird über eine anzugebende Anzahl von Messungen gemittelt. Die Einlese-Informationen werden aus einer Datei namens *ordner.txt* ausgelesen. Dort steht jeweils pro Zeile der Ordnername, dann die Anfangs- und Enddateinummer sowie die Anzahl der Messungen, über die gemittelt wird. Alle vier Werte sollten durch Tabulatoren getrennt werden. Der Dateiname der Ausgabedatei wird entsprechend generiert.

Es gibt drei verschiedene Varianten des Programms (Quellcodes s. 10.7.):

- *Einlesen.cpp*: Die Signalhöhe wird zusätzlich mit einem Faktor abhängig von der Frequenz (bzw. Kanal) aus der Datei *normalize.txt* skaliert. Dieser soll die unterschiedliche Verstärkung der Elektronik (s. Kap. 6.4. und 6.9.2.) ausgleichen. Außerdem wird durch den Untergrund gemäß der Datei *mittelwerte.txt* dividiert.
- *Einlesen\_S-R.cpp*: Die Skalierung fällt hier weg, dafür wird zusätzlich das Referenzsignal (`[Nummer]r.txt`-Dateien) eingelesen, das von dem ursprünglichen Signal abgezogen wird.
- *Einlesen\_S.R.cpp*: Die Skalierung fällt auch wie zuvor weg. Das Signal wird diesmal aber durch das entsprechende Referenzsignal dividiert.

## 5.5. Programm zur quantitativen Datenanalyse

Mit sehr großer Unterstützung von *Jan-Patrick Hülß*, Mitarbeiter in der Arbeitsgruppe *Astroteilchenphysik*, wurde ein Programm zur Datenanalyse geschrieben. Dieses besteht aus der Headerdatei *ampl.h* sowie *auswertung.cpp* und *ampl.cpp* (Quellcode s. 10.7.). Das Programm liest erstmal die jeweiligen TXT-Dateien ein. Für die entsprechenden Informationen existiert wieder (s. Kap. 5.4.) eine Datei *ordner.txt*, die den Ordnername, die Anfangs- und Endnummer sowie die Anzahl der Messungen, über die gemittelt werden soll, enthält. Dann werden noch die Skalierung aus *normalize.txt* und der Untergrund mit Standardabweichung aus *mittelwerte.txt* eingelesen.

[modus] = 0	Skalierung aus, Abzug Untergrund an
[modus] = 1	Skalierung an, Abzug Untergrund an
[modus] = 2	Skalierung aus, Abzug Untergrund aus
[modus] = 3	Skalierung an, Abzug Untergrund aus
[sort] = 0	Peaksortierung aus
[sort] = 1	Peaksortierung an
[print] = 0	Ausgabe ohne Rotverschiebung und Radialgeschwindigkeit
[print] = 1	Zusätzliche Ausgabe der Rotverschiebung $z$ des Peaks in Bezug auf die Wasserstofflinie (nach [75]) und der Radialgeschwindigkeit $v$ (nach [76])

**Tabelle 5:** Parameter für das Programm *auswertung.cpp* [Bellin]

Bei der Analyse werden die drei höchsten Peaks einer Datei gesucht und deren Maximum, die zugehörigen Mittenfrequenzen, die Halbwertsbreite, die unteren und oberen Grenzen sowie das Integral über diesen Bereich bestimmt. Je nach Parameter (s.u.) wird der Untergrund abgezogen und/oder mit der Skalierung multipliziert. Ein Peak existiert dann, wenn die Signalhöhe größer ist als der Untergrund zgl. seiner dreifachen Standardabweichung. Ein Peakmaximum in den unteren fünf Kanälen wird nicht berücksichtigt. Haben in einer Messreihe<sup>54</sup> zwei Peaks nur einen Abstand von bis zu 6 Kanälen, werden die beiden zu einem Peak zusammengefasst. Die Peaks einer Messreihe werden nach der Höhe des Integrals

<sup>54</sup> Messreihe bezeichnet die gemittelten Daten. Wenn über eine Messung nur gemittelt wird, entspricht eine Messreihe also einer Messung bzw. Datei.

sortiert. Die Ausgabedatei wird nach dem Ordner sowie nach der Anfangsdateinummer benannt und beinhaltet pro Zeile die Daten einer Messreihe in der folgenden Reihenfolge: *laufende Nummer*, *Mittelfrequenz Peak 1*, *Halbwertsbreite Peak 1*, *Integral Peak 1*, *Anzahl von Peak 1 in der laufenden Messreihe*, *Mittelfrequenz Peak 2*, ...

Das Programm erfordert beim Start drei Parameter: [modus], [sort], [print], deren Belegungen in Tabelle 5 gelistet sind.

Der Befehl für die Ausführung mit Skalierung, Abzug eines Untergrunds und einer Peaksortierung aber ohne erweiterte Ausgabe lautet demnach so

```
./auswertung 1 1 0
```

## 6. Experimenteller Teil

### 6.1. Stand der Dinge vor Beginn der Arbeiten

Laut Auskunft der Arbeitsgruppe und dem Protokoll des letzten Projektpraktikums (s. [Statusbericht]) konnte von den bisherigen Praktikumsgruppen noch keine vernünftige Messung gemacht werden. Problem sei, dass der momentane Dipol bei einer Ausrichtung auf die Sonne mit einem 1,8 GHz *Spectrum-Analyzer* im ganzen Spektrum kein Signal zeige sowie etwas verrostet sei und evtl. einen eingebauten Filter besitzen könne. Außerdem sei die bisherige Backend-Box seit geraumer Zeit defekt und müsse entweder in Schweden bei dem Hersteller repariert werden oder durch eine zweite baugleiche Box ausgewechselt werden. Die Symptome sind, dass bei *Qradio* teilweise kein Spektrum mehr angezeigt wird oder zwei deutlich künstliche Peaks sichtbar sind und der Leveldetektor sowohl laut grafischer Anzeige im *Qradio*-Fenster als auch in der Befehlskonsole immer einen konstanten Wert liefert. Kein Spektrum bedeutet für die Daten, dass an Stelle der Signalthöhe *NAN (Not A Number)* ausgegeben wird.

*Jens Dopke*, ein ehemaliger Projektpraktikant (s. [Statusbericht]), berichtete, dass er alle Bestandteile des Backends (IF-, Utility- und Correlator-Board), soweit es ihm möglich war, auseinander genommen und analysiert hatte. Er hatte sowohl alle Komponenten vor dem Backend als auch die Kommunikation zwischen Backend und Rechner geprüft. Das Ergebnis war, dass alle Komponenten voll funktionstüchtig waren bis auf das Correlator-Board. So erkennt *Qradio* nicht immer die korrekte Anzahl der vier Correlatorchips, zu denen aber seitens des Herstellers keine vernünftige Dokumentation existiert. Ein weiterer Defekt ist, dass die von *Qradio* gesteuerte Umstellung zwischen Signal und Referenzsignal bzw. dem *Switched-Modus* (s. 5.1.) nicht ordnungsgemäß funktioniert, da die Dioden an den Boards des Backends häufig einen anderen Modus als *Qradio* anzeigen und sich der Modus nicht mehr ändern lässt. Die Funktion *freq-switched* ist z.B. nicht funktionstüchtig, da nach dem Einschalten des Modus nur noch die Signaldiode am Backend leuchtet und nicht mehr zusammen mit der Referenzdiode blinkt. Wird dann wieder auf *load-switched* gestellt, leuchtet auch nur eine Diode. Erst wenn ein paar Mal hin und her geschaltet oder beim Backend auf den Reset-Knopf gedrückt wird, läuft *load-switched* wieder. Auch das Variieren der Verstär-

kung (Gain) der Signale zeigt keinerlei Auswirkung auf das Spektrum, so dass man auf die schwächste Verstärkung angewiesen ist.

## 6.2. Anschluss des neuen PCs mit neuer *Qradio*-Version

Da die neue Version 2.0 des Programms *Qradio* nur auf einem neueren und schnelleren Rechner zur Verfügung stand, wurde dieser Rechner zusätzlich in den Container gestellt. *Qradio* zeigte gelegentlich ein Spektrum an, das „sehr mysteriös“ aussah und wahrscheinlich aufgrund der Periodizität sowie des viel zu hohen Signals auf einen künstlichen Ursprung schließen ließ. Meistens aber zeigt das Programm kein Spektrum oder nur einen waagerechten Strich an (Bildschirmbilder s. Anhang 10.5., S. 126). Zudem ist der PC ungeheuer langsam; genauer gesagt benötigt er zum Laden eines Fenster mit dem Inhalt eines Ordners mehrere Minuten sowie zum Hochfahren fast eine Stunde. Das zuletzt Genannte konnte später aber teilweise verbessert werden, sobald der Rechner an ein Netzwerk angeschlossen wurde (s. Kap. 6.7.).

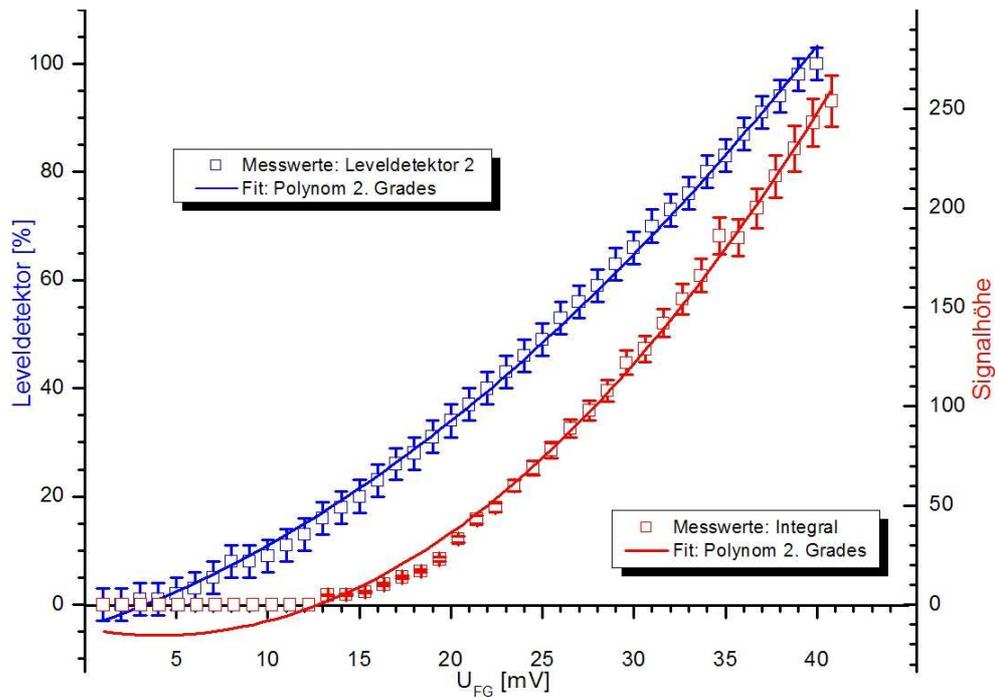
## 6.3. Austausch der Backend-Box

Da bekannt war, dass das *Astronomische Institut der Ruhr-Universität Bochum* (RUB) dieselbe Elektronik bzw. Backend-Box verwenden wie wir hier in Wuppertal, wurde mit dortigen Kollegen (*Eva Manthey*, Dr. *Marcus Jütte*, *Klaus Weißbauer*) Kontakt aufgenommen, die auch sofort bereit waren, zu einer Sichtung vorbei zu kommen. Im Gepäck hatten sie ihre Box, die nach dem Anschließen an den neuen PC sofort wesentlich bessere Resultate bei den Signalen des Leveldetektors lieferte als die Wuppertaler Box. Da das Spektrum aber mysteriös blieb, wurde entschlossen, den alten PC wieder anzuschließen. Die alte *Qradio*-Version lief dann mit dem Bochumer Backend zufrieden stellend, nur die in Kap. 6.1. beschriebenen Funktionalitäten arbeiteten noch immer nicht korrekt. Die Bochumer Kollegen haben dankenswerterweise ihre Box bis auf weiteres den Wuppertalern geliehen. Dennoch sollte sehr bald die alte Box repariert bzw. zur Reparatur nach Schweden geschickt werden.

## 6.4. Kalibrierung des Backends mittels Frequenzgenerator

Um das neue Backend generell und die *Qradio*-Anzeigen auf ihre Abhängigkeit von der Spannung zu überprüfen, wurde ein *Frequenzgenerator* der Arbeitsgruppe Elementarteilchenphysik entliehen, der mit einem üblichen Koaxialkabel an das

IF-Board des Backends angeschlossen wurde. Zu Beginn wurde der maximale Ausschlag (100%) der Anzeige des zweiten Leveldetektors (LD2) bei einer angelegten Wechselspannung  $U_{FG}$  von 40 mV festgestellt, wobei als Frequenz 1420 MHz verwendet wurde. Im Folgenden wurden bei dieser Frequenz in 1mV-Schritten Spannungen von 0 bis 40 mV angelegt und dabei der Leveldetektor 2 und die Signalhöhe gemessen.



**Abbildung 45:** Abhängigkeit des Leveldetektor-2-Signals und der Signalhöhe bei  $Q_{radio}$  von einer am IF-Board angelegten Spannung [Bellin]

In Abbildung 45 sieht man, dass beide Graphen sehr gut mit einem polynomi-schen Fit zweiten Grades beschrieben werden können. Der Leveldetektor hat eine Schwellenspannung  $\sim 3$  mV, wobei die Signalhöhe eine von 13 mV hat.

$$LD2 = -4,19 + 1,13 \cdot U_{FG} + 0,0391 \cdot U_{FG}^2$$

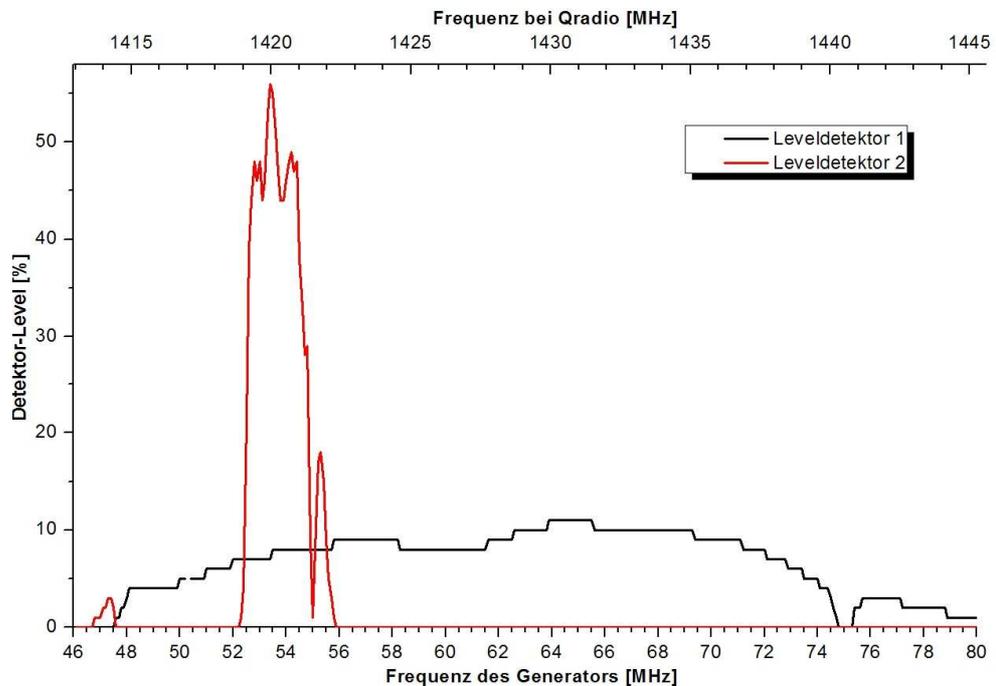
Für die Signalhöhe folgt:

$$Signal = -12,0 - 1,69 \cdot U_{FG} + 0,212 \cdot U_{FG}^2$$

Diese Zusammenhänge sind im Weiteren quantitativ irrelevant, aber qualitativ lässt sich schließen, dass sowohl die Leveldetektoranzeige als auch die Signalhöhe zur Leistung bzw. zur Strahlungsflussdichte (s. [15]) proportional sind.

Um die Bandbreite der Leveldetektoren zu überprüfen, wurde bei einer konstanten Spannung  $U_{FG} = 40$  mV des Frequenzgenerators der Frequenzbereich von 40 bis

80 MHz<sup>55</sup> durchfahren und die Höhe in der *Qradio*-Anzeige notiert (s. Abbildung 46). Der Verlauf des ersten Detektorsignals zeigt dabei die gewünschte Bandbreite von  $\sim 25$  MHz zuzüglich von Bereichen der Spiegelfrequenzen sowie eine relativ geringe Signalhöhe.



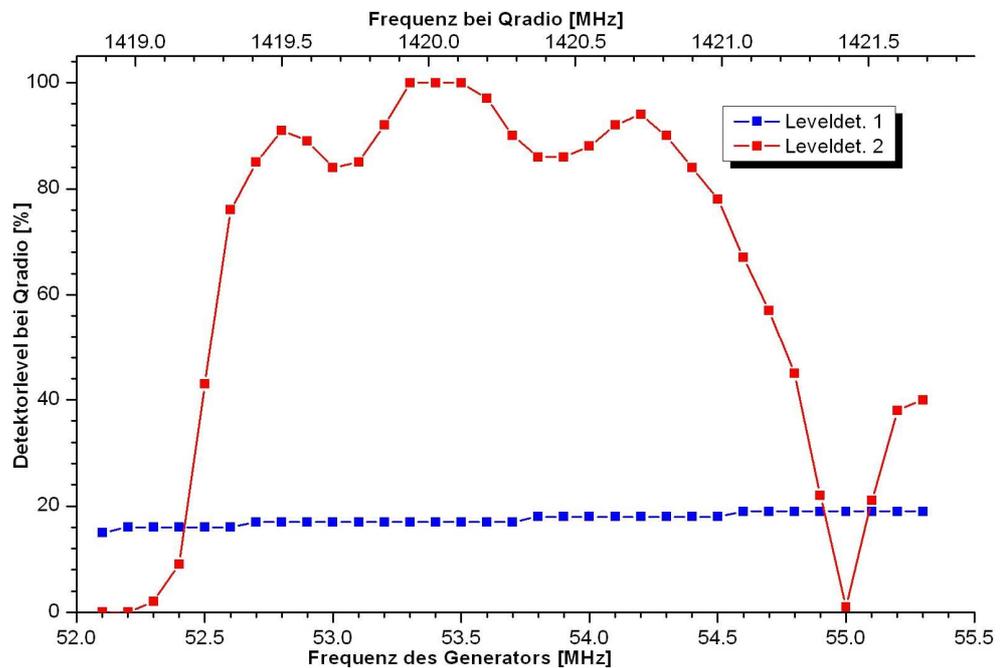
**Abbildung 46:** Messung der beiden Detektorlevels abhängig von der Frequenz am IF-Board des Backends (Frequenzgenerator) [Bellin]

Die zweite Anzeige zeigt das Signal in einer Bandbreite von 2,3 MHz entsprechend verstärkt an, wie man in Abbildung 47 genauer erkennen kann, wobei die Verstärkung über die Bandbreite nicht konstant bleibt. Der Bereich von 52,7 bis 55,0 MHz entspricht dabei dem üblichen *Qradio*-Frequenzbereich von 1419,3 bis 1421,6 MHz bei einer Mittenfrequenz von 1420,4 MHz. Diese Messdaten wurden nun dazu verwendet, die unterschiedliche Verstärkung der Elektronik bei der Datenanalyse zu berücksichtigen. Dazu wurde die Signalhöhe des zweiten Detektors durch das maximale Signal dividiert und dessen Kehrwert als Faktor für den dazugehörigen Kanal verwendet.

Die Faktoren wurden in den Einlese- und Analyse-Programmen (s. Kap. 5.4. und 5.5.) als Skalierung berücksichtigt. Da aus diesen Messungen nicht hervorging, wie die Dipol-Antenne selbst oder die Elektronik vor dem Backend (Vorverstärker und Frontend) die Signale verstärken, konnte zuerst nicht ausgeschlossen

<sup>55</sup> 80 MHz ist die maximale Frequenz des Generators.

werden, dass diese genau die komplementäre Verstärkungscharakteristik besitzen würden. Später (s. Kap. 6.9.2.) konnte dies aber über eine Messung mit einem künstlichen Sender definitiv ausgeschlossen werden.



**Abbildung 47:** präzisere Messung der beiden Detektorlevels  
im Ausschnitt des relevanten Frequenzbereichs [Bellin]

## 6.5. Überprüfung und Austausch des vorhandenen Dipols

Um die Ursache zu finden, weswegen die Antenne bisher nicht funktionierte (s. 6.1.), kam *Norbert Menke*, der einen Funkservice in Sprockhövel betreibt, vorbei. Dieser konnte aber nur feststellen, dass der bisherige Dipol so verrostet wäre (s. Abbildung 48), dass die Antenne nicht funktionsfähig sei. Mit einem Messgerät, das direkt an die Dipol-Stange angeschlossen wurde und die Stehwellen maß, wurde keine ausgeprägte Resonanz der Antenne erkennbar. Erst mit einer neuen Dipol-Antenne seien laut Menke weitere Messungen sinnvoll.

Bereits vor Beginn dieser Arbeit wurde laut *Karl-Heinz Becker*, Mitarbeiter in der Arbeitsgruppe, nach den Abmessungen des Original-Dipols der schwedischen Hersteller ein neuer Dipol gefertigt. Mit Hilfe der *Physik-Werkstatt* der Universität wurde die alte Dipol-Stange aus der Halterung abmontiert und die neue eingesetzt. Da dieser einen kleineren Durchmesser hat, musste noch ein Gewinde eingesetzt werden.



**Abbildung 48:** Verrosteter Dipol, bei dem die andere Hälfte nach dem Austausch abgebrochen war [Bellin]

## 6.6. Bestimmung der Antennenabmessungen

Um den Radius  $R$  der sphärischen Reflektorschüssel zu bestimmen, wurde zum einen die Tiefe  $T$  der Schüssel bis auf die Höhe des Schüsselrandes und zum anderen der maximale Abstand  $r$  der Dipolstange bis zum Schüsselrand mit einem Zollstock gemessen. Für  $R$  folgt dann über die Kreisgleichung

$$R = \frac{T^2 + r^2}{2T} = 2,128 \pm 0,012 \text{ m} \quad [117]$$

Tiefe $T$ der Reflektorschüssel	$64,7 \pm 0,5 \text{ cm}$
Max. Abstand $r$ zwischen Dipolstange und dem Rand der Reflektorschüssel	$150,5 \pm 0,5 \text{ cm}$
Durchmesser der Reflektorschüssel $D = 2 \cdot r$	$301,0 \pm 1 \text{ cm}$
Radius $R$ der Reflektorschüssel	$212,8 \pm 1,2 \text{ cm}$
Geometrische Fläche $A_G$	$7,12 \pm 0,24 \text{ m}^2$
Abstand $f_R$ des Dipol zur Reflektorscheibe	$60,4 \pm 0,1 \text{ mm}$
Durchmesser $d$ des Dipols	$6,0 \pm 0,1 \text{ mm}$
Geometrische Länge $l_G$ des Dipols	$102,4 \pm 0,1 \text{ mm}$
Schlankheitsgrad $S$ des Dipols	$17,1 \pm 0,3$
Verkürzungsfaktor des Dipols	$0,89 \pm 0,01$
Resonanzlänge $l_R$ des Dipols	$93,5 \pm 0,11 \text{ mm}$
Brennweite $f_I$ für den innersten Strahl	$106,3 \pm 0,6 \text{ cm}$
Brennweite $f_A$ für den äußersten Strahl	$62,3 \pm 1,3 \text{ cm}$
Abstand $f_{\text{Dipol}}$ des Dipols zur Schüssel	$93,9 \pm 0,7 \text{ cm}$

**Tabelle 6:** Abmessungen des Teleskops [Bellin]

Außerdem wurden auch die Maße des Dipols, der Durchmesser  $d$  und die geometrische Länge  $l_G$ , mit Hilfe einer Mikrometerschraube bestimmt. Der damit be-

stimmbarer Schlankheitsgrad wurde mit [103] berechnet, womit sich wiederum über den Verkürzungsfaktor  $V$  aus Abbildung 31 und [104] die Resonanzlänge  $l_R$  bestimmen lässt. Obwohl  $l_R$  aufgrund der Bestimmung über den Graphen nicht genau ist, lässt sich aber dennoch wegen der hohen Abweichung gegenüber  $l_G$  schließen, dass der verwendete Dipol  $\sim 9$  mm zu lang ist. In Tabelle 6 befindet sich eine Übersicht über alle Abmessungen.

Da die Reflektorschüssel nicht parabolisch, sondern sphärisch ist, variiert die Brennweite  $f$  je nach der Entfernung  $h$  ( $h_{\text{Max}} = r$ ) von der optischen Achse des Teleskops. Um die Brennweite zu bestimmen, wird diese in zwei Komponenten geteilt:  $f'$  ( $f'_{\text{Max}} = R/2$ ) ist der auf die optische Achse projizierte reflektierte Strahl und  $t$  ( $t_{\text{Max}} = T$ ) die Entfernung des auf die optische Achse projizierten Reflexionspunktes von der Schüssel.  $t$  lässt sich anhand einer Kreisgleichung wie folgt berechnen:

$$t(h) = R - \sqrt{R^2 - h^2} \quad [118]$$

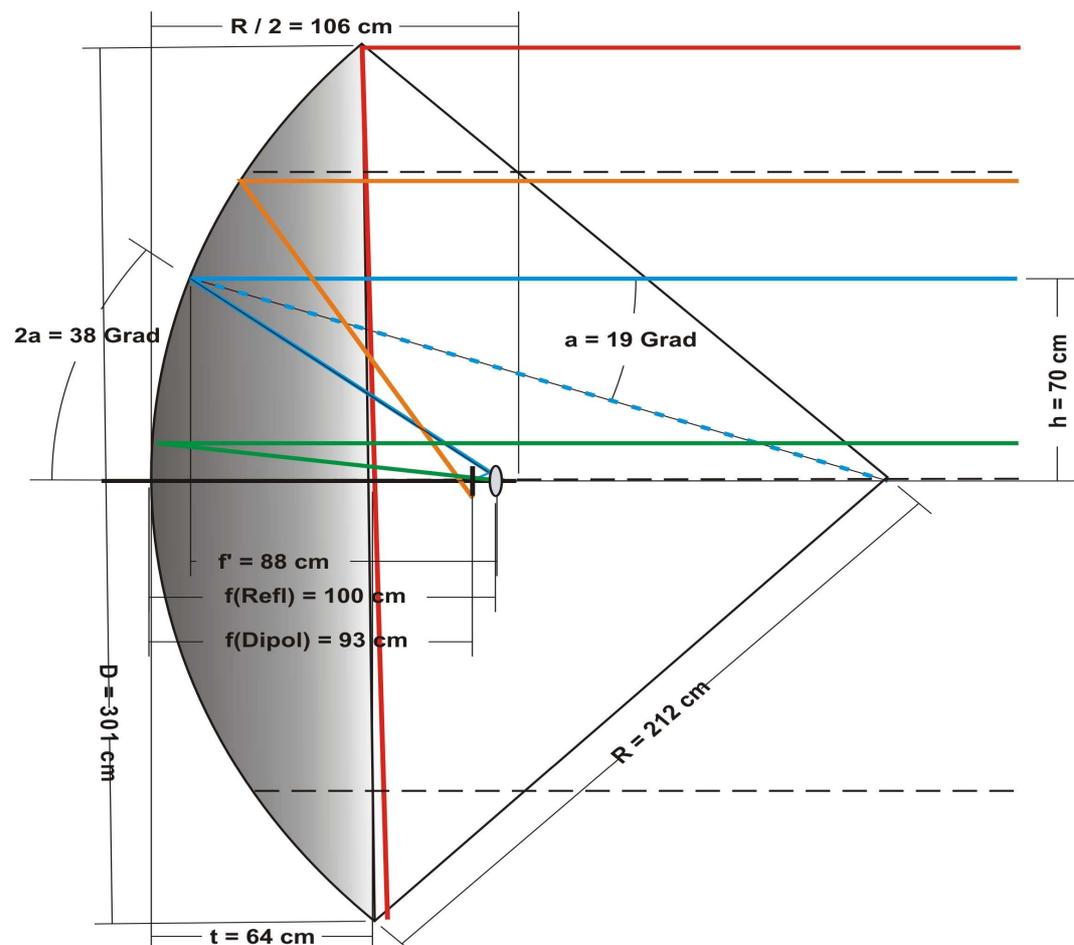


Abbildung 49: Maßstabgetreue Skizze des Teleskops mit einer Brennweitenbestimmung für den Abstand  $h = 70$  cm [Bellin]

Wenn  $\alpha$  der Einfallswinkel ist, lässt sich anhand der Skizze (s. Abbildung 49) erkennen, dass für die zweite Komponente gilt:

$$f'(h) = \frac{h}{\tan(2\alpha)} = \frac{h}{\tan\left(2 \arcsin \frac{h}{R}\right)} \quad [119]$$

Für die Brennweite  $f(h) = f' + t$  ergibt sich somit (s. Abbildung 50):

$$f(h) = \frac{h}{\tan\left(2 \arcsin \frac{h}{R}\right)} + R - \sqrt{R^2 - h^2} \quad [120]$$

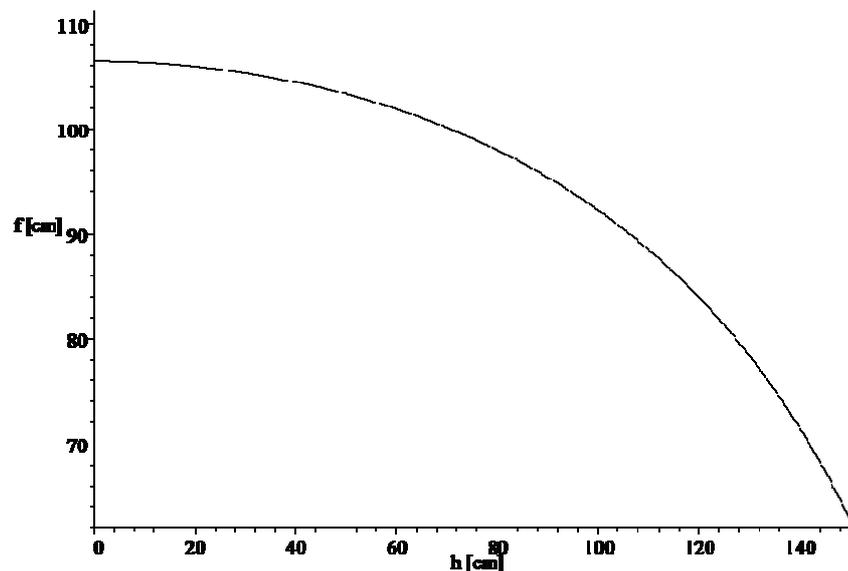
Aus der Skizze wird ersichtlich, dass für einen Strahl unter einem Einfallswinkel von  $19^\circ$  (blauer Strahl) die Brennweite 99,7 cm beträgt. Die schwarz gestrichelten Linien grenzen den Bereich ein, in dem die Hälfte der Strahlen ankommt. Ein genau auf der optischen Achse auftreffender Strahl wird bei einer Brennweite von  $R/2$  fokussiert. Da aber der minimale Abstand von der optischen Achse durch die Dipollänge gegeben ist, folgt für die Brennweite der inneren Strahlen  $f_i = 106,3$  cm  $\cong R/2$ . Dagegen werden die äußeren Strahlen bei einer Brennweite  $f_A = 62,3$  cm fokussiert. Da aber erst die sehr weit äußeren Strahlen groß von der maximalen Brennweite  $f_i$  abweichen (s. Abbildung 50), wird die Reflektorscheibe in den Abstand  $f_{\text{Reflektor}}$

$$f_{\text{Reflektor}} = f_A - f_R = 100,3 \text{ cm} \quad [121]$$

geschoben, so dass sich der Dipol (s. Abbildung 49) bei

$$f_{\text{Dipol}} = f_{\text{Reflektor}} - f_R = 93,9 \text{ cm} \quad [122]$$

befindet.



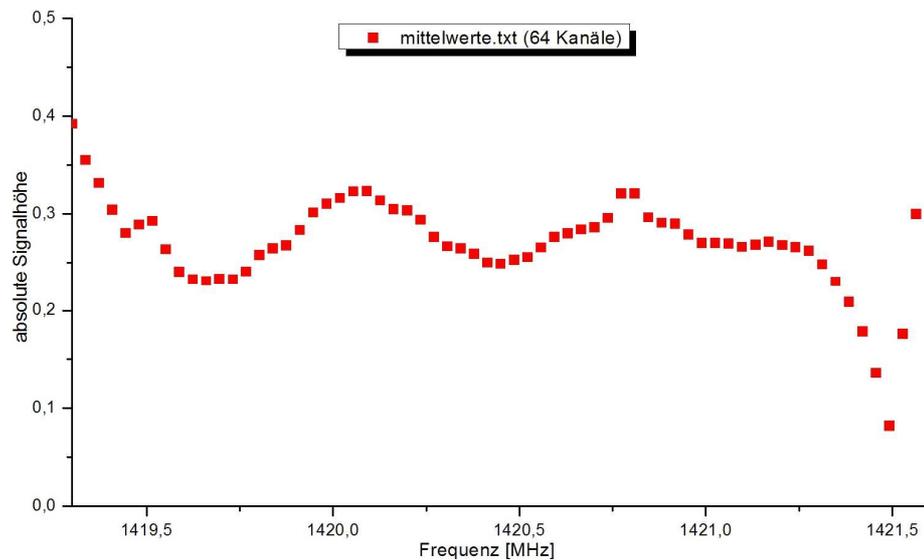
**Abbildung 50:** Abhängigkeit der Brennweite  $f$  vom Abstand  $h$   
zur optischen Achse [Bellin]

## 6.7. Einrichtung des Datentransfers

Eine an sich triviale Angelegenheit hat sich in diesem Fall als sehr viel aufwendiger herausgestellt: es war zu Beginn nicht möglich, die aufgenommenen FITS-Dateien (oder sonstige Dateien) von dem alten Rechner herunter zu bekommen. Der alte Rechner besitzt nämlich keinen CD-Brenner, das Diskettenlaufwerk bzw. –Controller ist defekt und der USB-Port erkennt keine Komponenten. Der neue PC besitzt zwar einen Brenner und ein funktionierendes Diskettenlaufwerk, kann aber über einen Netzwerk-HUB nicht auf den alten Rechner zugreifen. Da bei dem alten Rechner zumindest die Netzwerkkarte zu funktionieren schien, wurde mit freundlicher Unterstützung von *Robert Schneider*, Mitarbeiter im Hochschulrechenzentrum (HRZ), ein Accesspoint für das WLAN der Uni konfiguriert. Dieser konnte erfolgreich an das Netzwerk-HUB angeschlossen werden, so dass nun beide Rechner online sind. Leider wurde noch keine optimale Position für die WLAN-Antenne gefunden, die sich nun im Silo befindet. Sie ist auf eine andere WLAN-Antenne auf dem Turm des Gebäudes M konfiguriert. Je nach Wetterlage kann aber auch zeitweise keine Verbindung zustande kommen.

## 6.8. Messungen – Teil 1

Die ersten Quellenmessungen wurden von zwei Schülern durchgeführt, Torben und Dennis, die für zwei Wochen ein Praktikum in der Arbeitsgruppe absolviert haben. Dabei standen als Quellen die Sonne, die stärksten Quellen laut der Straßburger Datenbank sowie das Galaktische Zentrum im Vordergrund. Für die Positionsberechnung wurde das bereits beschriebene Programm (s. Kap. 5.2.), als einheitlicher Zeitgeber ein handelsüblicher Funkwecker sowie zur Umwandlung *cfitsio* verwendet. Mit dem Richtkompass von *Karl-Heinz Becker* wurde außerdem noch die Südposition überprüft, die durch einen Strich an der Innenwand des Silos markiert war. Es wurde eine Übereinstimmung gefunden und eine zusätzliche Markierung an der Außenseite des Zahnradkranzes für die Horizontalbewegung angebracht. Zu einem späteren Zeitpunkt wird die ideale Brennweite noch mit einem künstlichen Sender (s. Kap. 6.9.1.) und die Südposition mit Hilfe des Sonnenstandes versucht zu bestimmen (s. Kap. 6.12.).



**Abbildung 51:** Untergrund-Spektrum anhand von Messungen des Gebäude K (*mittelwerte.txt*) [Bellin]

Für den Untergrund wurde das Teleskop auf das Gebäude K der Uni gerichtet (Anhang 10.6., Nr. 0). Das Signal (s. Abbildung 51) ist insofern geeignet, als es dem charakteristischen Spektrum der Elektronik ähnelt, welches man auch erhält, wenn man den Vorverstärker von der Dipol-Stange trennt und Messungen aufnimmt, wobei man aber im letzteren Fall über das offene Ende auch Störsignale einfangen würde. Die Skalierung (s. Kap. 6.4.) wurde nicht berücksichtigt, da die Charakteristik der Verstärkerstufen bereits in das Untergrundsignal eingegangen ist. Es wurden nur die ersten und letzten Kanäle abgeschnitten, bei denen die Verstärkung weniger als die Hälfte der Maximalverstärkung betrug, so dass nur die effektive Kanalanzahl ausgewertet wurde (s. Kap. 4.3.).

Die 50 Messungen wurden gemittelt und zusammen mit der Standardabweichung in *mittelwerte.txt* gespeichert. Zur qualitativen Auswertung wurden die Signale  $S$  relativ zum Untergrund  $R$  ( $s = S / R$ ) mit dem Einleseprogramm in eine Matrix umgewandelt, um dann mit dem Programm *Origin* dreidimensional dargestellt zu werden. Es wird auf den Anhang 10.6. verwiesen, in dem sich eine tabellarische Übersicht über alle Messungen samt den Ergebnissen des Auswertungsprogramms befindet, bei der alle Messungen durchnummeriert sind. Dort ist auch angegeben, über wie viele Messungen jeweils gemittelt wurde. In der Regel waren es 4-5 Aufnahmen, die in einer Minute realistisch zu messen waren.

Im Folgenden beziehen sich die Positionsangaben immer auf die Anzeige der Motorensteuerung (lokaler Azimut  $A$  und Elevation  $a$ ), obwohl sich später herausstellen sollte, dass diese nicht die wahren Winkel widerspiegeln (s. Kap. 6.12.).

### 6.8.1. Sonnenmessungen

Mit [calsky] wurden die Positionen der Sonne zu bestimmten Zeiten berechnet, welche dann in einem Zeitraum von 30 min beobachtet wurden (15 min vorher und nachher). Das Ziel war gewesen, anhand eines Sonnendurchgangs die Keulenbreite der Antenne zu bestimmen. In Tabelle 7 sind die qualitativen Ergebnisse zusammengefasst; die dazugehörigen dreidimensionalen Spektren befinden sich im Anhang 10.5. (S. 121).

Das erste Spektrum erfüllte die Erwartungen von thermischer Strahlung und zeigt ein kontinuierliches Spektrum, dass mit der Zeit ansteigt. Die anderen Messungen zeigen ein Signal-zu-Untergrund-Verhältnis kleiner als 1,1 und einen Peak bei 1420,73 MHz an, der bei der zweiten Messung sogar bis zu 30 mal höher ist als der Untergrund. Auffallend sind noch die zwei Minima, die das zweite Spektrum zeigt, die eine Tendenz zu einer Periodizität zeigen. So sind diese Messungen mit der Erwartung einer thermischen Strahlung nicht in Einklang zu bringen.

NR.	DATUM	ZEIT	POSITION AZ / EL	QUALITATIVES ERGEBNIS
1	24.01.2006	10:25	30 / 15	Kontinuierliches mit der Zeit ansteigendes Spektrum bis $s \sim 1,4$
2	24.01.2006	11:25	18 / 19	$s < 1,1$ mit einem einzelmem Peak bei 1420,73 MHz mit $s \sim 1,5$ nach 21 min
3	24.01.2006	11:55	8 / 19	$s < 1$ mit einem kontinuierlich abfallendem Peak von $s \sim 30$ auf $\sim 15$ bei 1420,73 MHz, Minima nach 7 und 21 min
4	17.02.1006	14:03	333 / 23	$s < 1$ , kleiner Peak bei 1420,73 MHz von 1,1 mit einem Minimum

**Tabelle 7:** Sonnenmessungen, Nummer bezieht sich auf Anhang 10.6. [Bellin]

### 6.8.2. Galaktisches Zentrum

Das Galaktische Zentrum wurde an einem Tag insgesamt 8 mal zu unterschiedlichen Zeiten und Positionen jeweils in einem kurzen Zeitintervall von ein paar Minuten gemessen. Der zeitliche Spielraum zum Messen ist nicht groß, da das Zentrum maximal eine Elevation von  $9^\circ$  erreicht, welche im Frühjahr morgens gegen 9 Uhr erreicht wird. Bei dieser Höhe spielen daher terrestrische Störquellen eine nicht unerhebliche Rolle.

Grundsätzlich wäre die charakteristische und unverschobene HI-Linie von 1420,4 MHz zu erwarten. Die Ergebnisse zeigen aber, dass ganz unterschiedliche Spekt-

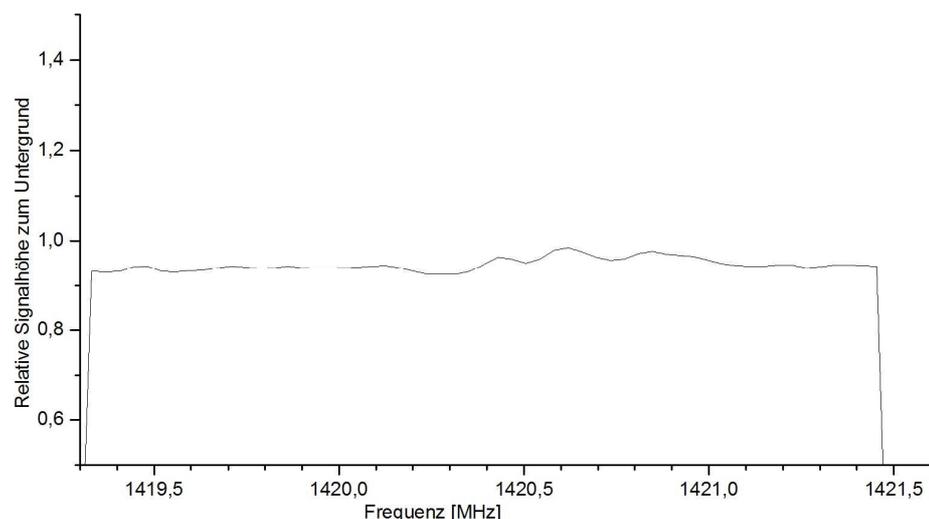
ren vorliegen. Zwar liegen einige der Peaks bei dieser Frequenz, aber ebenso sind häufig auch stärkere Peaks anderer Frequenzen vorhanden. Zwei von den Spektren befinden sich im Anhang 10.5. (S. 122).

### 6.8.3. *Cygnus A*

Bei *Cygnus A* ist generell ein nichtthermisches, also kontinuierliches Spektrum zu erwarten, das, wenn eine feste Position über einen längeren Zeitraum gemessen wird, mit der Zeit ansteigt oder fällt. Bei den Messungen, deren Spektren im Anhang 10.5. (S. 122) zu finden sind, ergibt sich aber kein solches Bild. Entweder es herrscht ein kontinuierliches, aber konstantes Signal (s. Messung Nr. 15) vor, oder es existiert ein einzelner ansteigender bzw. abfallender Peak (s. Messungen Nr. 13 und 16). Es wurde bei Messung Nr. 17 sogar über 100 min gemessen, deren Spektrum einen breiten Peak immer bei derselben Frequenz zeigt, aber mit der Zeit immer wieder fällt und steigt (es wird bereits über vier Messungen gemittelt).

### 6.8.4. *Cassiopeia A*

Die stärkste Radioquelle für diesen Standort, abgesehen von der Sonne, sollte *Cassiopeia A* sein, welche wie *Cygnus A* ein nichtthermisches Spektrum liefern sollte (s. Kap. 3.3.4.). Sie wurde fünf mal gemessen (Nr. 18-22), jedes Mal bei einer Elevation größer als  $42^\circ$ , was terrestrische Einflüsse minimieren sollte. Aber alle Messungen zeigen – im Gegensatz zu den vorherigen Messungen – grundsätzlich ein Signal-Rausch-Verhältnis, das kleiner oder gleich 1 ist. Dieses bedeutet, dass das Signal niedriger als das angenommene Rauschen und so zu schwach ist. Exemplarisch ist in Abbildung 52 das Spektrum der Messung Nr. 18 dargestellt.



**Abbildung 52:** Spektrum von Messung Nr. 18,  
welches *CasA* entsprechen sollte [Bellin]

#### 6.8.4. Q23

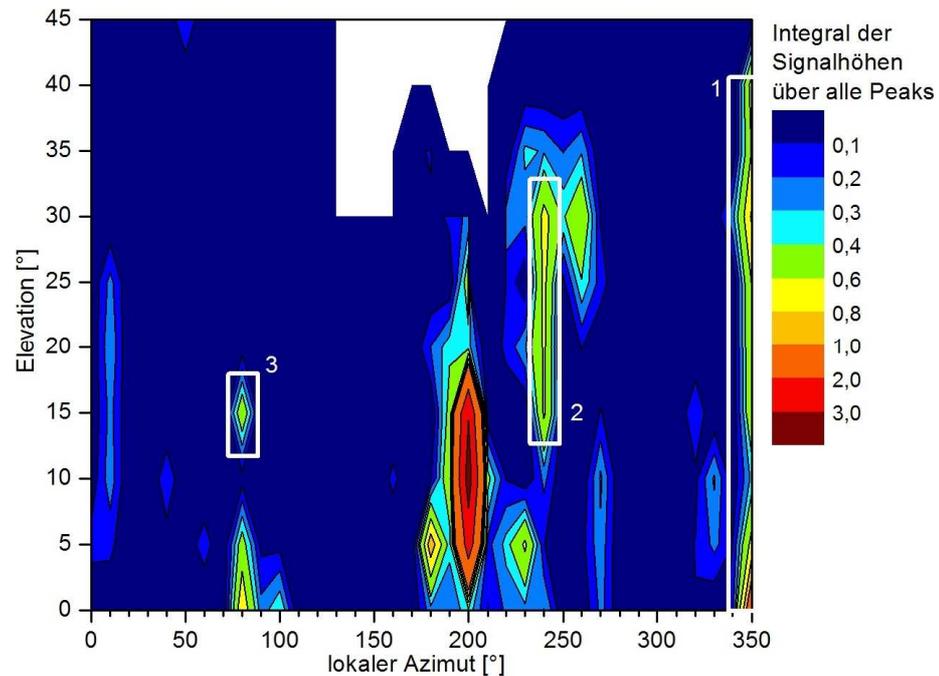
Diese mit 31 Jy (nach [Strasbourg]) im Vergleich zu den vorherigen Objekten recht schwache Quelle schien anfangs sehr gut messbar zu sein. Es ist aber nicht bekannt, welcher Art das Spektrum theoretisch sein sollte. In der Tabelle sind alle Messungen von Nr. 23 bis 34 ersichtlich. Es wurde zuerst eine Position der Quelle gemessen und dann noch zweimal nachgefahren (Nr. 23-25). Immer wurde ein Peak um 1420,23-1420,43 MHz gemessen, der bei der zweiten und dritten Messung noch anstieg. Als diese Position zehn Tage später erneut gemessen wurde, an der Q23 zu dem Zeitpunkt definitiv nicht war (Nr. 26), wurden dieser Peak – diesmal sogar stärker – sowie noch zwei weitere bei 1419,6 und 1421,0 MHz gemessen. Dafür konnte keine Erklärung gefunden werden.

Bei den Messungen Nr. 27-29 wurde eine Q23-Position eingestellt und in drei Zeitintervallen aufgenommen. Die Spektren finden sich im Anhang 10.5. (S. 123). Es ist zu erkennen, dass der Peak um 1419,7 MHz mit der Zeit herauswandert. Bei derselben Position zu einem anderen Zeitpunkt (Nr. 30) ergab sich diesmal ein sehr viel geringerer Peak. Dieses Ergebnis ließe vermuten, wenn nicht die anderen Messungen gewesen wären, dass diesmal eine Quelle gemessen werden konnte.

#### 6.8.5. Eine erste Himmelskarte

Zusammen mit den beiden Praktikanten wurde eine Messreihe gestartet, bei der beim Azimut alle  $10^\circ$  und bei der Elevation alle  $5^\circ$  gemessen worden ist. Da dies mehrere Stunden in Anspruch genommen hat, ist die Quellenpositionen natürlich zeitabhängig. Daraus ist die Idee entstanden, die Galaktischen Koordinaten vorzugeben und dann die jeweiligen Horizontalkoordinaten zu verschiedenen Zeitpunkten zu berechnen, was schließlich mit in das Programm *radio.cpp* (s. Kap. 5.2.) einfluss.

Aus der daraus entstandenen Himmelskarte in Horizontalkoordinaten (zuvor ausgewertet mit *auswertung.cpp*, s. Abbildung 53) geht eine wichtige Entdeckung hervor: bei einem Azimut von  $200^\circ$  und in geringer Höhe von  $0-20^\circ$  erschien ein sehr starkes Signal, das nicht natürlichen Ursprungs sein konnte, da in der Richtung auf das Uni-Gebäude T, U und die Sport-Container geschaut wurde. Bei der Suche nach der Ursache konnte zumindest die Fachgruppe von Prof. Dr. *Frahm* (Festkörperphysik) im Gebäude U ausgeschlossen werden. In der weißen Region (Azimut  $130-210^\circ$ , Elevation  $30-45^\circ$ ) konnten keine Messungen vorgenommen werden, da dort die Reflektorschüssel an den Türrahmen gestoßen wäre.



**Abbildung 53:** Die Himmelskarte zeigt die Integrale der Signalarbeit mit Abzug des Untergrundes in Abhängigkeit von den Horizontalkoordinaten [Bellin]

Drei Regionen aus Abbildung 53 wurden exemplarisch auf natürliche Quellen untersucht. Dafür wurden die entsprechenden theoretischen Himmelskarten (erstellt mit *radio.cpp*) für die drei Zeiten erstellt, die sich im Anhang 10.5. befinden. Daraus geht hervor, dass sich im Bereich 1 die Galaktische Ebene nahe des Galaktischen Zentrums befand. Bereich 3 befindet sich zwischen dem *Orionnebel* und dem *Krebsnebel*. Hier könnte eine Ursache darin liegen, dass die Winkelpositionen laut der Motorensteuerung von den realen Winkeln abweichen. Im Bereich 2 sind dagegen keinerlei starke Quellen im Umkreis zu sehen, wofür sich noch keine Erklärung gefunden hat.

#### 6.8.6. Weitere Messungen

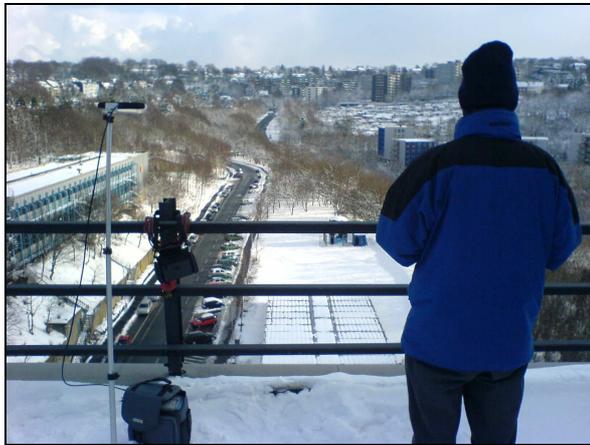
An anderen Quellen wurden der *Krebsnebel* (Nr. 35-38), *Virgo A* (Nr. 39-40) sowie nach der Straßburger Datenbank (s. Anhang 10.3.) die Quellen Q11 (Nr. 41-42), Q13 (Nr. 43-46), Q18 (Nr. 47), Q22 (Nr. 48-50), Q28 (Nr. 51) und Q30 (Nr. 52) gemessen. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass bei diesen Messungen entweder gar keine Peaks vorhanden waren oder Peaks einer Quelle unterschiedliche Mittenfrequenzen besaßen.

Es wurde außerdem angefangen, die Messreihen für die Galaxis (s. Kap. 5.2.) aufzunehmen. Da in den ersten Messungen (Nr. 55-74) keine Peaks zu erkennen wa-

ren und aufgrund der vorangegangenen Messungen der starken Quellen keine eindeutigen und vor allem reproduzierbaren Ergebnisse vorlagen, wurde dies erstmal abgebrochen.

### 6.9. Messungen mit einer Sendeantenne

Am 2.3.2006 kam *Norbert Menke* mit seiner Elektronik und einer Senderantenne ein zweites Mal vorbei. Es sollte geprüft werden, ob die neue Dipol-Antenne auch wirklich die gewünschten Frequenzen empfängt, und diverse Kalibrierungen geführt werden, wie z.B. die Keulenbreite experimentell zu bestimmen, um darüber den Gewinn der Antenne zu überprüfen.



**Abbildung 54:** *Norbert Menke* mit der Sendeantenne auf der 15. Etage des Gebäudes U mit Blick auf das Radioteleskop [Bellin]

Zu Beginn wurde – wie bei dem letzten Besuch *Menkes* – ein Stehwellenmesser direkt an die Dipol-Antenne angeschlossen. Dieser zeigte diesmal in einem breiten Frequenzband inkl. bei den gewünschten Frequenzen eine große Resonanz. Damit ist der Dipol funktionstüchtig und als Fehlerquelle ausgeschlossen.

Für die folgenden Messreihen ist *Jörn Sonntag* beim Teleskop geblieben, *Norbert Menke*, *Karl-Heinz Becker* und der Verfasser haben sich auf das Dach (15. Etage, entspricht der 7. über Bodenhöhe) von Gebäude U der Uni begeben. Dort wurde die Sendeantenne auf ein Stativ gestellt und auf das Radioteleskop gerichtet. Die Höhe der Senderantenne über dem Teleskop wurde grob über die Anzahl der Stockwerke und deren Höhe (3,5 m) geschätzt, wobei die Höhe des Teleskops von 2,5 m abgezogen und die Stativhöhe von 1,60 m dazu addiert wurde, und ergibt

$$h_s = 23,60 \pm 1,75\text{m},$$

wobei als Fehler eine halbe Stockwerkhöhe angenommen wurde. Mit dem eingestellten Elevationswinkel von  $a = 8^\circ$ , ergibt sich daraus für den Abstand  $r$  des Senders zum Radioteleskop

$$r = h_s / \sin a = 169,6 \pm 16,4 \text{ m} .$$

Damit befindet sich der Sender eindeutig im Fernfeld der Antenne, dessen Grenze über [80] mit  $r_{\text{Fern}} = 86,3 \pm 0,3 \text{ m}$  gegeben ist. Generell lässt sich sagen, dass sehr große Signalhöhen in den richtigen Bereichen gemessen wurden, so dass das Teleskop prinzipiell funktionstüchtig sein sollte.

### 6.9.1. Bestimmung der Keulbreite

Indem das Teleskop über einen bestimmten Azimut- und Elevations-Bereich gefahren wurde, wurde die richtige Ausrichtung ( $A = 216^\circ$ ,  $a = 8^\circ$ ) auf den Sender von Herrn Menke gefunden und gleichzeitig eine Messreihe zur Bestimmung der Keulbreite in der elektrischen und magnetischen Ebene aufgenommen (Anhang 10.6., Nr. 75). Gesendet hat Herr Menke hier mit  $1 \text{ mW} = -30 \text{ dB}^{56}$  zzgl. eines Dämpfungsgliedes von  $-40 \text{ dB}$  und dem Gewinn  $G_s \cong 5 \text{ dB}$  des Senders, was eine Gesamtleistung von

$$P_{S,\text{Ges}} = -65 \text{ dB} = 3,2 \cdot 10^{-7} \text{ W}$$

ergibt.

Die elektrische Ebene, also die Ebene der optischen mit der Dipol-Achse, entspricht hier der horizontalen Ebene, da der Dipol in horizontaler Ausrichtung angebracht wurde. Für die Messung der Keulbreite in der magnetischen Ebene muss entweder die Dipolachse um  $90^\circ$  gedreht oder – wie in diesem Fall – in der vertikalen Ebene gemessen werden.

Aus den Messungen ging eine Keulbreite in der elektrischen Ebene (s. Abbildung 55) von

$$\psi_E = 4,78 \pm 0,69^\circ \quad [123]$$

und in der magnetischen Ebene (s. Abbildung 56) von

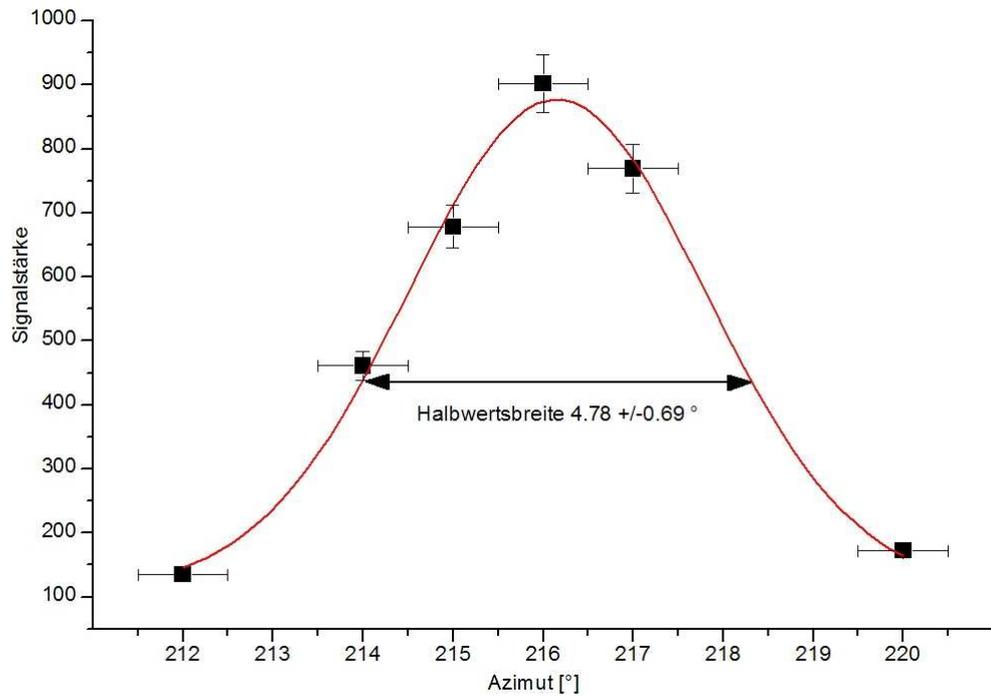
$$\psi_H = 4,35 \pm 1,66^\circ \quad [124]$$

hervor, wenn man eine Gaußverteilung annimmt. Beide Werte sind höher als die theoretische Keulbreite aus [79] mit

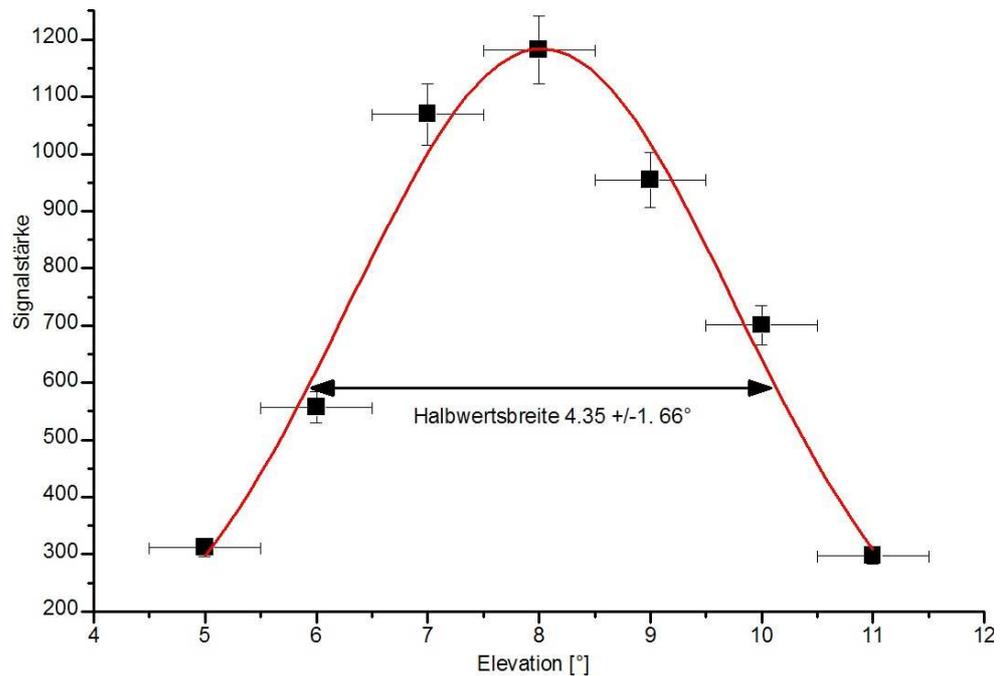
$$\psi_{\text{Theor}} = 4,12 \pm 0,01^\circ$$

---

<sup>56</sup> Es ist auch für  $-30 \text{ dB}$  die Bezeichnung  $0 \text{ dBm}$  gebräuchlich und bezieht sich immer auf eine Leistung von einem Milliwatt.



**Abbildung 55:** Bestimmung der Keulbreite in der elektrischen (in diesem Fall: horizontalen) Ebene mit dem Sender von Herrn Menke [Sonntag, Bellin]



**Abbildung 56:** Bestimmung der Keulbreite in der magnetischen (in diesem Fall: vertikalen) Ebene mit dem Sender von Herrn Menke [Sonntag, Bellin]

Es wurde ein Fehler von 5% bei der Signalstärke und ein absoluter von  $0,5^\circ$  bei den Schrittmotoren angenommen, in deren Fehler nicht eine mögliche Abweichung von der Südposition, die in diesem Fall irrelevant wäre, eingeht.

Aus diesen Werten können der Richtfaktor  $D$  (s. [89]), der Gewinn  $G_E$  (s. [94]), die effektive und theoretische Fläche  $A_E$  (s. [98]) und  $A_0$  (s. [97]) sowie der Raumwinkel  $\Omega_A$  der Antenne (s. [96]) bestimmt werden. Die Werte wurden in Tabelle 8 zusammengefasst.

Es wurde alternativ versucht, über das künstliche „Uni-Signal“ die Keulbreite zu bestimmen (Nr. 95). Das Spektrum (s. Anhang 10.5., S. 120) ist leider nicht so monochromatisch wie das der Sendeantenne; für die Keulbreitenbestimmung wurde daher der Peak im Frequenzbereich von 1419,6 bis 1419,8 MHz genommen. Der entsprechende Gauß-Fit (s. S. 120) ergab eine Keulbreite von  $\sim 4,82^\circ$ , wobei bei diesem Messverfahren der Fehler aufgrund des breiten Spektrums und der Unkenntnis über den Ursprung der Signals sehr hoch und nicht genau angebar ist. Daher wird dies aufgrund der Übereinstimmung mit der vorherigen Messung nur als eine Bestätigung gesehen.

Richtfaktor $D$	$1558 \pm 636$ (= 31,9 dB)
Gewinnfaktor $G_E$	$1443 \pm 589$ (= 31,5 dB)
Theoretische Wirkfläche $A_0$	$5,22 \pm 2,23 \text{ m}^2$
Effektive Wirkfläche $A_E$	$5,06 \pm 2,07 \text{ m}^2$
Raumwinkel $\Omega_A$	$(8,70 \pm 3,55) \cdot 10^{-03} \text{ sr}$

**Tabelle 8:** Übersicht über weitere Antennencharakteristika

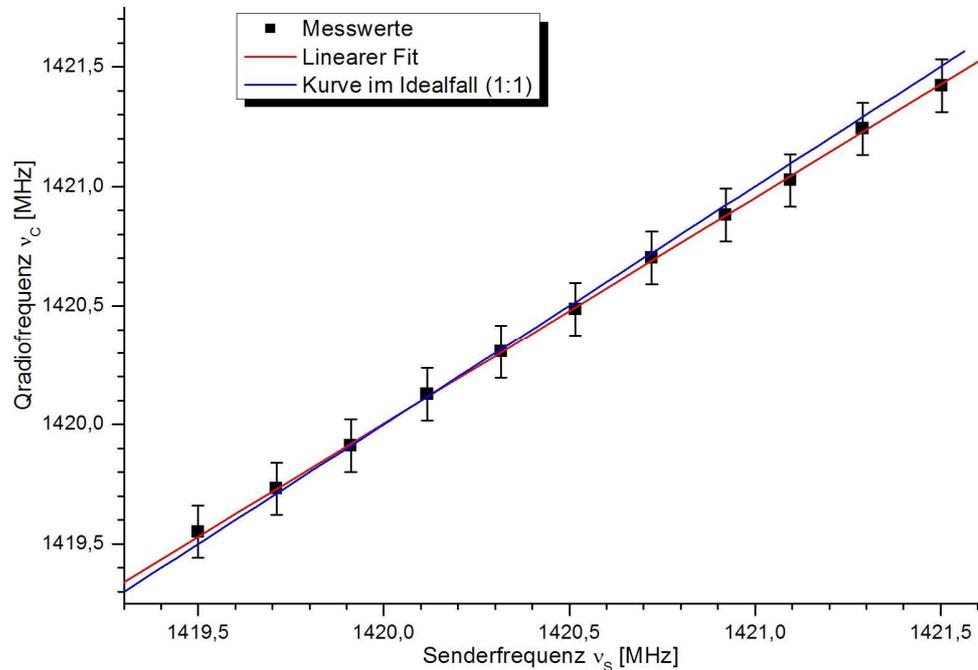
Schließlich wurde noch die Brennweite der Schüssel überprüft, indem bei einer konstanten abgegebenen Leistung von -85 dB die Dipol-Antenne in der Halterung verschoben wurde (Nr. 77). Es ergaben sich zum einen keine eklatanten Unterschiede und zum anderen wurde das höchste Signal auch bei der ursprünglichen Position gemessen. Daher wurde die vorherige Position beibehalten.

### 6.9.2. Frequenz- und Amplitudenkalibrierung von *Qradio*

Um die Frequenzanzeige bei *Qradio* zu kalibrieren, wurden mit dem Sender von Herrn Menke Signale mit verschiedenen Frequenzen  $\nu_s$  auf das Teleskop gesendet (Nr. 76). Die aufgenommenen Spektren wurden mit dem Auswertungsprogramm analysiert und deren Centerfrequenz  $\nu_c$  bestimmt. Da der Sender mit einer sehr kleinen Halbwertsbreite in der Frequenz sendet, wird die Breite der Peaks fast nur von der Kanalbreite und der Genauigkeit der Elektronik bestimmt. So ergaben sich Halbwertsbreiten von 0,1 MHz (entspricht 2,5 Kanälen) und wurden als Fehler für  $\nu_c$  genommen. Der lineare Fit (s. Abbildung 57) aus den Messwerten ergab für die *Qradio*-Frequenz

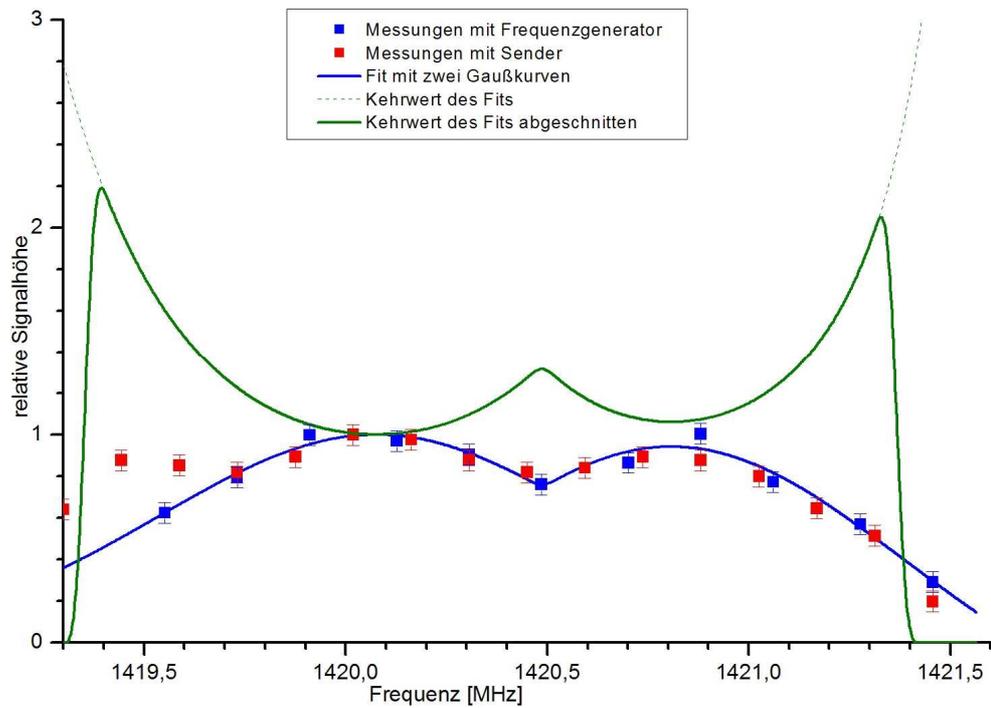
$$\nu_c [\text{MHz}] = m \cdot \nu_s [\text{MHz}] + c \quad [125]$$

mit  $c = -86,962 \pm 9,054$  und  $m = 1,061 \pm 9,054$ . Die Kalibrierung wurde sowohl in das Analyse- (s. Kap. 5.5.) als auch in das Einleseprogramm (s. Kap. 5.4.) eingearbeitet, obwohl unter der Berücksichtigung der Fehler dies nicht unbedingt notwendig gewesen ist.



**Abbildung 57:** Frequenzkalibrierung: Die angezeigte Frequenz bei *Qradio* in Abhängigkeit von der eingestellten Senderfrequenz. [Bellin]

Außerdem wurde zugleich die *Qradio*-Amplitude in Abhängigkeit von der Frequenz gemessen (s. Abbildung 58). Diese wurde mit zwei Gauß-Fits angepasst., die sich in der Mitte überlagern. Dabei ergab sich ein fast identisches Bild wie bei der Kalibrierung des Backends (s. Kap. 6.4.). Nur bei Frequenzen kleiner als 1419,7 MHz macht sich noch eine kleine zusätzliche Verstärkung des Frontends bemerkbar. Somit ist die Verstärkungscharakteristik nicht komplementär zu der Charakteristik der Antenne bzw. des Frontends. Die bereits verwendete Skalierung ist damit verifiziert. Der Kehrwert dessen wird als Skalierung verwendet, wobei wieder die oberen unteren Kanäle abgeschnitten werden (s. Kap. 6.4.).



**Abbildung 58:** Bestimmung der Signalverstärkung mit einem künstlichen Sender [Bellin]

### 6.9.3. Empfangene Leistung

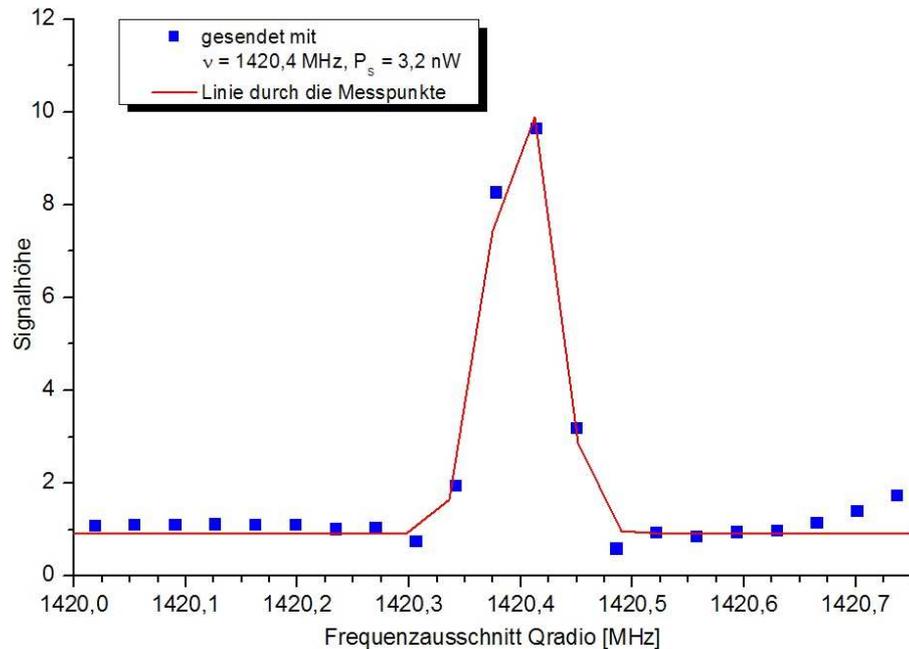
Anhand der Messungen eines Senders mit bekanntem Gewinn  $G_S$ , Sendeleistung  $P_S$  und Entfernung  $r$  kann mit der Freiraumdämpfung (s. [113]) die Empfangsleistung an einer Antenne bestimmt werden. Herr *Menkes* Sender hat bei den hier zu betrachteten Messungen mit einer Sendeleistung von 1 mW gesendet ( $\nu = 1420,4$  MHz), wozu noch ein Dämpfungsglied von -60 dB kam, das zwischen Sendeverstärker und Sendeantenne geschaltet wurde. Die Polarisationsachsen der beiden Antennen wurden aufeinander ausgerichtet. Wenn man noch den Gewinn der Antenne laut Herrn *Menke* mit  $G_S = 5$  dB berücksichtigt, betrug somit die Gesamtsendeleistung  $P_{S,Ges} = 3,16$  nW .

Über [98] folgt für die effektive Antennenfläche  $A_S = 1,11 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$ , zusammen mit [96] ergibt sich dann für den Raumwinkel der Sendeantenne  $\Omega_S = 3,97$  sr . Da der Fehler des Gewinns  $G_S$  nicht bekannt ist, wird im Folgenden für  $G_S$ ,  $A_S$  und  $\Omega_S$  kein Fehler angenommen. Über die Freiraumdämpfung [113] erhält man als empfangene Leistung mit Berücksichtigung des Entfernungsfehlers und des Gewinnfaktors des Radioteleskops

$$P_{E,0} = (4,43 \pm 1,81) \cdot 10^{-14} \text{ W}$$

und entspricht einer Dämpfung der gesendeten Gesamtleistung von -48 dB. In Abbildung 59 ist das zugehörige Spektrum sichtbar, in dem ein Peak mit einer Signalstärke von ca. 10 erkennbar ist. Die Halbwertsbreite wurde über einen Gauß-Fit mit  $\Delta\nu = 75,23$  kHz bestimmt. Da  $\Omega_s > \Omega_A$  ist und somit eine Flächenquelle vorliegt, ergibt sich mit [23] somit für die Strahlungsflussdichte  $F$

$$F = \frac{\Omega_A}{\Omega_s} \frac{P_E}{A_s \Delta\nu} = \frac{5,8 \cdot 10^{-10} \text{ W/m}^2}{\Delta\nu} \quad [126]$$



**Abbildung 59:** Messung des Senders mit 3,16nW bei einer Frequenz von 1420,4 MHz und in einer Entfernung von 170 m [Bellin]

$\Delta\nu$  ist der Frequenzbereich, in dem  $F$  konstant sein sollte. In diesem Fall wird als Frequenzbereich näherungsweise die Halbwertsbreite des gemessenen Peaks genommen, so dass damit für  $F$  folgt:

$$F = (7,7 \pm 3,4) \cdot 10^{-15} \text{ W/m}^2\text{Hz} \quad [127]$$

Bei dem Fehler  $\Delta F$  konnte nur der Fehler des Raumwinkels  $\Delta\Omega_A$  des Teleskops eingehen (s.o.). Mit einem typischen Rauschen von 0,3-0,5 und der Signalstärke dieser Messung von  $\sim 10$  folgt so, dass *Qradio* Signale bei den hier vorgenommenen Einstellungen mit einer Flussdichte von

$$F \gg 4 \cdot 10^{-16} \text{ W/m}^2\text{Hz} = 40 \text{ GJy} \quad [128]$$

aflösen kann. Das ist eindeutig zu hoch!

Die ruhige Sonne hat eine Strahlungsflussdichte von 12.500 Jy (s. Kap. 3.3.2., zzgl. eines Faktors  $\frac{1}{2}$  aufgrund der Polarisation des Dipols), wobei die Flussdichte von Strahlungsausbrüchen sogar noch darüber liegen sollte. Dagegen strahlt *Cygnus A* auch nur mit  $\sim 800$  Jy. Damit liegen sogar die stärksten Radioquellen weit außerhalb der minimalen Strahlungsflussdichte.

Wie schon in Kap. 6.1. erwähnt wurde, funktioniert bei der alten und hier genutzten *Qradio*-Version die einstellbare Verstärkung nicht. Ab einer Verstärkung von  $\sim 63$  dB müsste die Sonne und ab  $\sim 75$  dB Radioquelle *Cygnus A* theoretisch messbar sein. Das Problem ist, dass die Einstellung der Verstärkung bei der neuen Version *Qradio 2.0* im Gegensatz zur alten zwar funktioniert, aber das Programm – wie bereits beschrieben – grundsätzlich keine brauchbaren Daten aufzeichnet.

### 6.10. Einfluss des Gitters

Bei den Messungen mit Herrn *Menke* ist aufgefallen, dass das Gitter merklichen Einfluss auf die Messungen hat. Es schien vorher, als ob das Teleskop hoch genug wäre bzw. nur im Bereich einer Elevation von  $0^\circ$  beeinflussbar wäre. Bei einer Ausrichtung auf das künstliche „Uni-Signal“ bei ca.  $200\text{--}210^\circ$  Azimut (s. Kap. 6.8.) wurden Messungen mit und ohne Gittertor, das sich auch in dieser Richtung öffnet, aufgenommen (Nr. 78-90).

	AZ	EL	PEAK 1 1419.7 MHz	PEAK 2 1420.9 MHz	PEAK 3 1420.85 MHz	SUMME
mit Gitter	200	0	0.11	0.16		0.27
ohne Gitter	200	0	0.06	0.15		0.21
			<b>+104%</b>	<b>+1%</b>		<b>+28%</b>
mit Gitter	210	0	1.27	1.13		2.39
ohne Gitter	210	0	0.92	0.81		1.73
			<b>+38%</b>	<b>+38%</b>		<b>+38%</b>
mit Gitter	210	5	2.06	1.71		3.78
ohne Gitter	210	5	1.52	1.39		2.91
			<b>+36%</b>	<b>+23%</b>		<b>+30%</b>
mit Gitter	210	10	3.23			3.23
ohne Gitter	210	10	3.81			3.81
			<b>-15%</b>			<b>-15%</b>
mit Gitter	210	15		0.19	0.25	0.44
ohne Gitter	210	15		0.32	0.57	0.89
				<b>-41%</b>	<b>-56%</b>	<b>-51%</b>

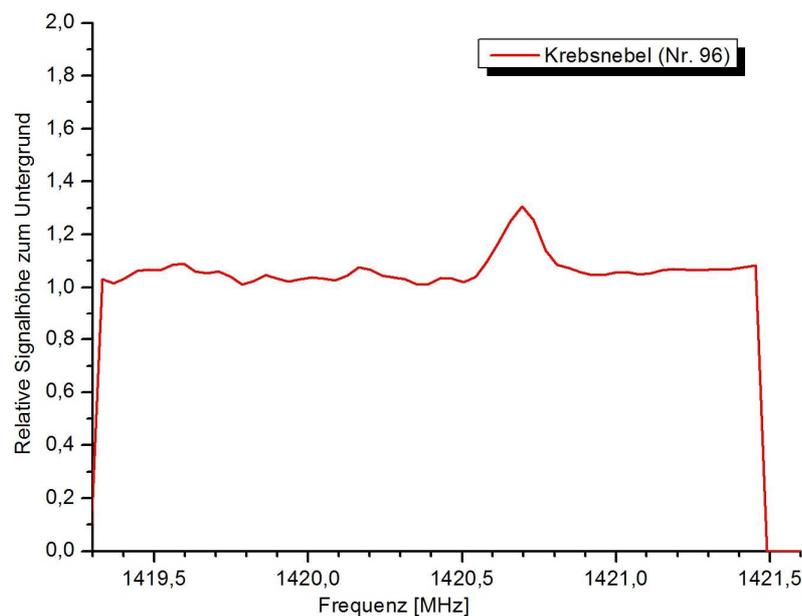
**Tabelle 9:** Messungen der Signalhöhen mit und ohne Gitter [Bellin]

Die Messungen erfolgten jeweils unmittelbar aufeinander, so dass eine Konstanz des Signals vorausgesetzt werden konnte, und wurden mit *auswertung.cpp* aus-

gewertet, wobei die künstlichen Peaks auf drei Frequenzen verteilt werden konnten. In Tabelle 9 sind die Ergebnisse gelistet, aus denen eindeutig hervorgeht, dass das Gitter einen erheblichen Einfluss hat. Es kann bis zu 50% dämpfen oder verstärken. Laut Herrn *Menke* ist der Einfluss dieser Reflexionen am Gitter kaum vorhersagbar, geschweige denn berechenbar. Daher ist die logische Konsequenz, dass das Gitter demnächst abmontiert werden sollte.

### 6.11. Messungen – Teil 2

Bei den nächsten Messungen wurden entsprechend der vorherigen Erkenntnisse niedrige Position unter  $\alpha = 15\text{-}20^\circ$  vermieden. Dennoch zeigte eine Messung des *Krebsnebels* (Nr. 96), der ein thermisches, also ein kontinuierliches Spektrum und daher ein angehobenes Signal-Rausch-Verhältnis erwarten ließ, nur ein geringfügig stärkeres Signal als das Rauschen und einen leichten Peak (s. Abbildung 60). Im Gegensatz hierzu ist im Spektrum des *Orionnebels* (HII-Region) ein deutlicher Peak mit zwei Maxima erkennbar (s. Anhang 10.5., S. 124).

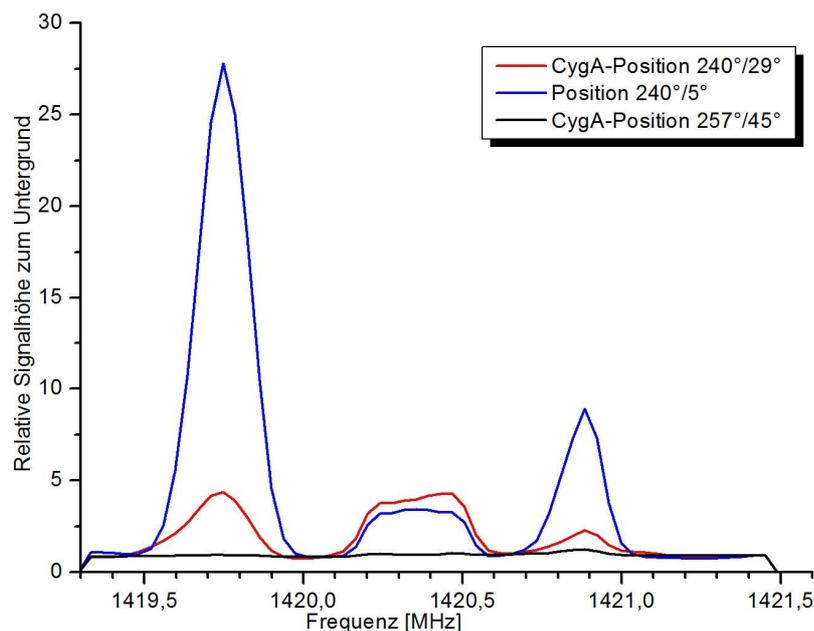


**Abbildung 60:** *Krebsnebel*-Spektrum bei  $A = 60^\circ$  und  $\alpha = 45^\circ$   
am 8.3.2006 um 16:25 [Bellin]

Diese Peakhöhen sollten aber bei den Messungen von *Cygnus A* wieder relativiert werden. Die Quelle wurde zweimal bei  $\alpha = 32^\circ$  und  $\alpha = 29^\circ$  gemessen (Nr. 98-99) und zeigte relative Signalthöhen von bis zu 5 an. Die darauf folgenden Messungen folgten nicht mehr dem *CygA*-Verlauf, sondern gingen bei einem konstanten Azimutwinkel bei dem Elevationswinkel in  $5^\circ$ -Schritten herunter (Nr. 100-105).

Das Ergebnis war ernüchternd. Wie in Abbildung 61 deutlich wird, wurde die Charakteristik des Spektrums deutlich bis auf eine relative Signalhöhe von ca. 27 verstärkt. Die daraus resultierende Vermutung war, dass bei einer hohen Elevation keine große Signalhöhe zu erwarten sei, was bei einer entsprechenden *CygA*-Messung unter  $\alpha = 45^\circ$  bestätigt wurde (Nr. 106, s. Abbildung 61). Die Messungen Nr. 106-113 konnten das Ergebnis aus Nr. 100-105 reproduzieren und ergeben eine grobe Grenze, unter der kein Signal mehr vorhanden ist, von  $\alpha \sim 35-40^\circ$ . Somit folgt auch die Feststellung, dass *Cygnus A* nicht messbar ist.

Wenn dazu noch die Messtabelle (s. 10.6.) analysiert wird, stellt man fest, dass bis auf wenige Ausnahmen die meisten Messungen mit großen Integralen über die Signalhöhen in einem groben Azimutwinkelbereich von  $180-260^\circ$  stattfanden. Dies ist natürlich der Bereich, in dem sich das Gebäude U, die Sport-Container und auch der zum Teleskop gehörende Container befinden, wobei die Container komplett aus Metall bestehen! Daher lässt sich schließen, dass diese Objekte über Reflexionen erheblichen Einfluss auf die Signale ausüben.

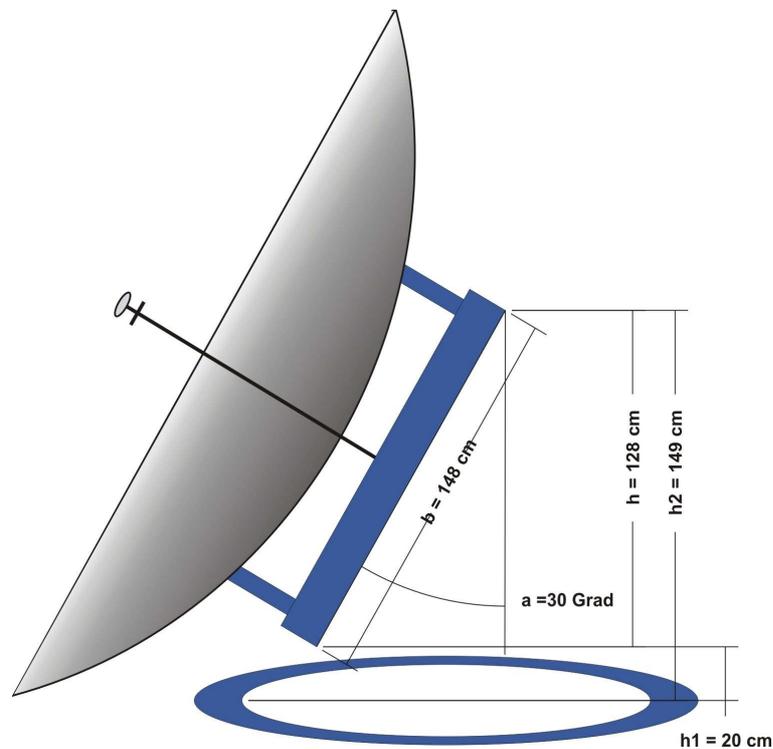


**Abbildung 61:** Vergleich des Spektrums von CygA bei  $A = 240^\circ / \alpha = 29^\circ$  mit einer in maximaler Höhe ( $\alpha = 45^\circ$ ) und einer Position  $24^\circ$  niedriger [Bellin]

## 6.12. Überprüfung der Motoren- und Winkelpositionen

Mit dem Ziel, eine weitere mögliche Fehlerquelle auszuschließen, wurden die Winkelpositionen überprüft. Einerseits kann ein absoluter Fehler aus der falschen Eichung nach Süden stammen, die anfangs mit Hilfe eines Kompass bestimmt wurde (s. Kap. 6.8.). Eine Eichung über den Sonnenstand ist dabei genauer, da

hier Metallvorkommen oder die Abweichung des geographischen vom magnetischen Pol irrelevant sind. Dazu wurden an einem sonnigen Tag (17.3.2006), als die Sonne am Mittag um 12:40 laut [calsky] im Zenit stand, ein Holzpfosten genau in den Sonnenschatten in den Boden gesteckt. Dabei wurde darauf geachtet, dass dies genau an einer Stelle geschah, wo die Verlängerung der beiden Pfosten durch die Silo-Tür und die horizontale Drehachse des Teleskops verlief, und wo der Boden eben war, was mittels einer Wasserwaage geprüft worden war. Dies geschah mit großer Unterstützung von *Nils Nierstenhöfer* und *Julian Rautenberg*. Das Ergebnis war, dass der Süden um  $2 \pm 0,5^\circ$  nach Osten abwich. Dies entspricht zwar noch nicht der Keulenbreite, aber dürfte dennoch eine merkliche Auswirkung auf die Signalhöhe haben. Diese Abweichung wird noch nicht im Programm *radio.cpp* berücksichtigt.



**Abbildung 62:** maßstabsgetreue Skizze der Abmessungen für die Elevationsmessung [Bellin]

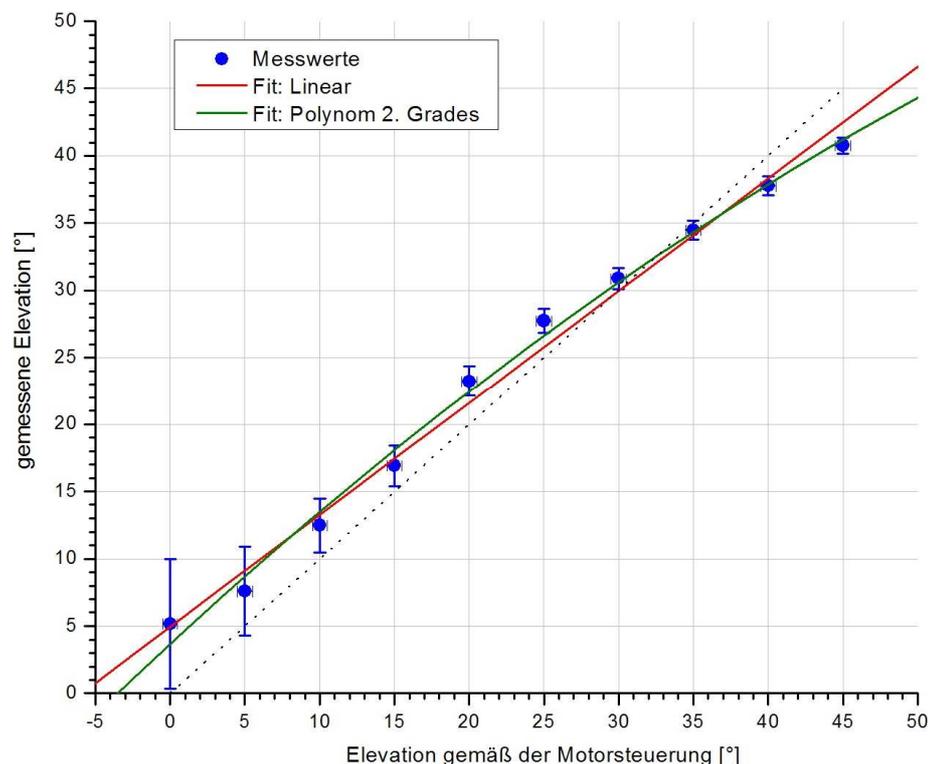
Andererseits kann ein relativer Fehler in der Ungenauigkeit der Schrittmotoren liegen, die mit steigender Abweichung von der Eichposition zunimmt. Um dies zu überprüfen, wurde ein handelsüblicher Laserpointer an die Dipol-Stange montiert. Bei verschiedenen Positionen wurde jeweils der Lichtpunkt an der Innenwand des Silos markiert und das Teleskop hin und her, hoch und runter gefahren und teilweise sogar um  $360^\circ$  gedreht. Jedes Mal traf der Lichtpunkt wieder relativ genau

auf die Markierung und auch nach einer ganzen Umdrehung blieb die Azimutposition nahezu identisch, was einen relevanten Motorenfehler in der Horizontalen ausschließt.

Nun blieb noch als Fehlerquelle die Eichung des vertikalen Schrittmotors übrig. Dazu wurde, wie in Abbildung 62 illustriert, die Elevation in  $5^\circ$  Schritten (laut der Anzeige auf dem Joystickpult) hochgefahren. Gemessen wurde immer die Höhe  $h_1$  der Unterkante des Rahmens, auf dem das Teleskop befestigt ist, über der Holzplatte, die auf dem Radkranz liegt und mit einer Wasserwaage ausgerichtet worden war, sowie die Höhe  $h_2$  der Oberkante über der Holzplatte. Über die Differenz  $h$  der beiden Höhen und der Rahmenbreite  $b = 148 \pm 0,5$  cm kann die Elevation  $a$  über

$$a = \arccos\left(\frac{h}{b}\right)$$

bestimmt werden. Bei den Höhen wurde ein Fehler von 2 cm angenommen.



**Abbildung 63:** Kalibrierung der Motorsteuerung für die Elevation mit zwei angelegten Fits. Die gestrichelte Linie entspricht einer 1:1-Umsetzung. [Bellin]

In Abbildung 63 sind der gemessene Winkel  $a$  in Abhängigkeit von dem vorgegebenen Winkel  $a_{\text{Motor}}$  sowie zwei Fits aufgetragen (ein linearer und ein polynomieller 2. Grades).

Es ist erkennbar, dass nur die Messwerte bei einem Winkel von 30 bis 35° auch dem eingestellten Winkel entsprechen. Ansonsten weichen die Winkel um bis zu 5° ab. Der polynomische Fit spiegelt zwar die Messungen besser wieder, aber die lineare Abhängigkeit ist besser erklärbar, da in diesem Fall der vertikale Schrittmotor falsch konfiguriert sein würde. Die Fits ergaben:

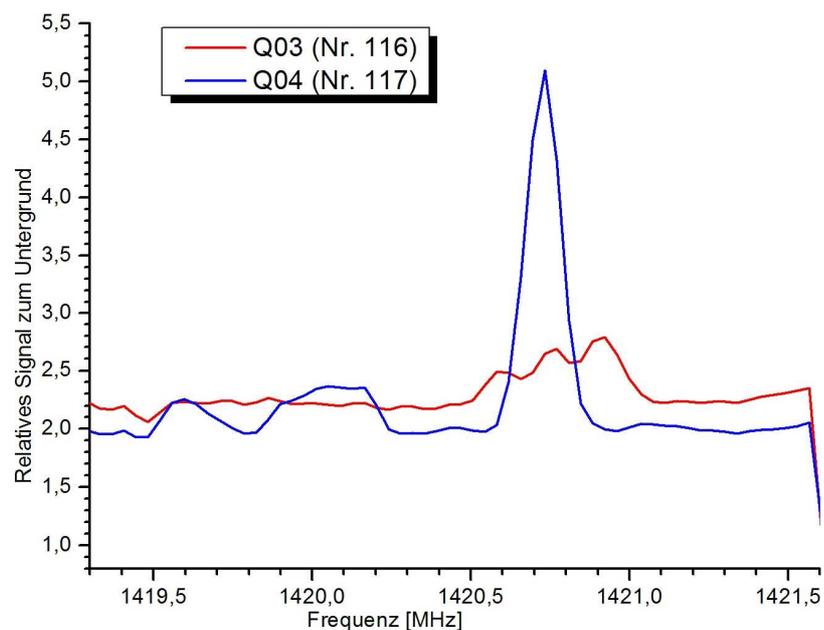
$$a_{\text{Linear}} = 4,94 + 0,83392 \cdot a_{\text{Motor}} \quad [129]$$

$$a_{\text{Polynom}} = 3,67 + 1,02 \cdot a_{\text{Motor}} - 0,00424 \cdot a_{\text{Motor}}^2$$

Im Folgenden wird immer der polynomische Fit verwendet. Diese Korrektur geht noch nicht im Programm *radio.cpp* ein. Interessant wäre es natürlich nun zu wissen, wie der Verlauf oberhalb der momentanen Grenze von  $a = 45^\circ$  aussieht. *Karl-Heinz Becker* beabsichtigt, demnächst die Motorensteuerung umzuprogrammieren, so dass auch bis über 80° gemessen werden kann.

### 6.13. Messungen – Teil 3

Mit der Berechnung der wahren Winkelpositionen wurden noch zweimal *Cygnus A* (Nr. 114-115) sowie der *Orionnebel* (Nr. 116) und Q04 (Nr. 117) gemessen, wobei versucht wurde, bei einem möglichst hohen Winkel zu messen. Die Positionen befanden sich außerdem nicht in dem Einflussbereich des Gitters bzw. der möglichen Reflexionen (s. Kap. 6.11.). Die Messungen von *Cygnus A* waren dabei leider genauso wenig aussagefähig, wie bereits bei den vorherigen (s. Kap. 6.8.).



**Abbildung 64:** Das Spektrum vom Orionnebel (=Q03) und Q04 bei ihrem Maximum bei einer Elevation von 34° bzw. 33° [Bellin]

In Abbildung 64 sind dagegen die beiden anderen Quellen bei ihrem Maximum dargestellt. Es sind generell erhöhte Niveaus erkennbar und besonders bei Q04 ein großes Maximum. Da beide Quellen HII-Regionen sind, entsprechen beide Spektren den Vorstellungen, da sie ein erhöhtes Level sowie bei Q04 sogar einen potentiellen verschobenen Peak des neutralen Wasserstoffs.

#### 6.14. Überprüfung der alten Box und des switched-Signals

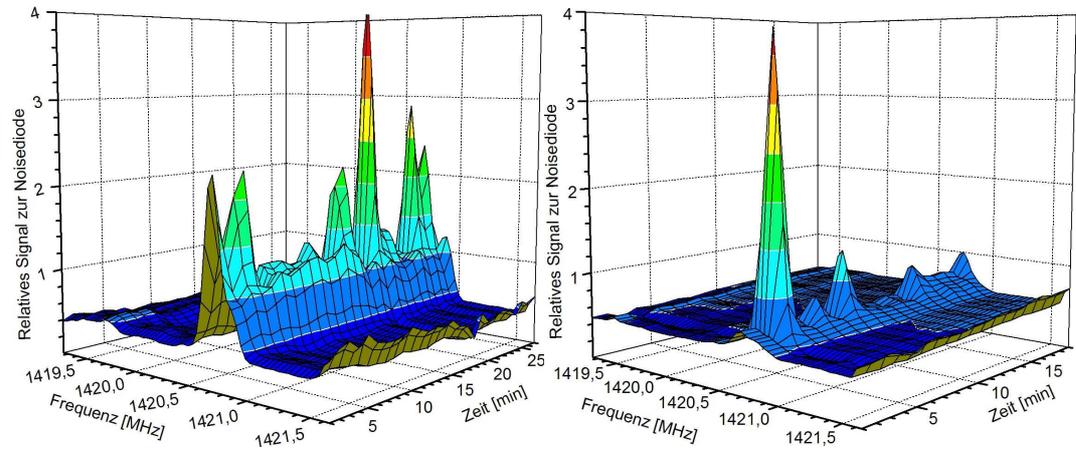
Da die Bochumer Kollegen in absehbarer Zeit ihr Backend verständlicherweise zurückbekommen möchten, wurde zum Schluss noch mal die alte Box angeschlossen. Die Hoffnung stirbt ja bekanntlich zuletzt. Aber es hat sich nach dem Dipol-Austausch und den Korrekturen nichts an der Situation geändert. Alle Werte der Signalhöhe werden nach der Konvertierung ins TXT-Format als *NAN* ausgegeben.

Dafür funktioniert das *switched-Signal* teilweise. Zwar bleiben die in Kap. 6.1. beschriebenen Probleme bestehen, wenn zwischen dem Referenzsignal und dem Antennensignal umschaltet wird (*freq-switched*), aber falls noch nicht zum *freq-switched* umgeschaltet worden ist, dann kann das Signal aus der Noisediode abwechselnd gemessen werden (*load-switched*). Dieses kann an Stelle des Untergrunds verwendet werden, da es genauso die Verstärkercharakteristik enthält wie der zuvor verwendete Untergrund des Gebäudes K. An Stelle des Antennensignals liefert die Noisediode ein thermisches Rauschen, welches das Signal der Antenne ggf. auch übersteigen kann (s. Kap. 3.4.11.). In den Spektren ist nun jeweils das Verhältnis des Antennensignals zur Noisediode angegeben.

#### 6.15. Messungen – Teil 4

Kurz vor Ende der experimentellen Arbeiten wurden noch vier Messungen mit dem *load-switched-Signal* gemacht. Die beiden Sonnenmessungen (Nr. 120-121) zeigten ein konstant unter dem Noise-Signal liegendes Signal (s. Anhang 10.5., S. 121), was auf ein generell zu niedriges Signal schließen lässt und die Vermutung aus Kap. 6.9.3. bestätigt, dass die Verstärkung zu gering ist. Dagegen zeigten die Messungen der beiden HII-Regionen Q39 und Q41 (s. Anhang 10.3., Nr. 118-119) beide bei etwa der gleichen Mittenfrequenz Peaks (s. Abbildung 65), die theoretisch möglich sind. Im Vergleich zu den anderen bisher gemessenen Quellen ist die Strahlung dieser beiden HII-Regionen, die in dem für Wuppertal sicht-

baren Abschnitt der Galaktischen Scheibe liegen, aber relativ schwach (nach [Straßbourg]  $F < 200$  Jy).



**Abbildung 65:** links: Q39 am 16.3.2006 (Nr. 118),  
rechts: Q41 am 16.3.2006 (Nr. 119) [Bellin]

## 7. Ausarbeitung eines Messprogramms

Ziel dieser Examensarbeit war ursprünglich ein komplettes Programm aufzustellen, wie in Zukunft mit dem Wuppertaler Radioteleskop gearbeitet und gemessen werden kann. Da aber noch nicht vollständig geklärt ist, ob und welche Objekte mit dem Teleskop beobachtet werden können, werden in diesem Abschnitt Vorschläge zur weiteren Vorgehensweise gemacht sowie noch notwendige Messungen und Reparaturen gelistet:

- Da vermutlich die Strahlungsflussdichte der Radioquellen zu gering ist (s. Kap. 6.9.3.), um sie ohne Verstärkung zu messen, sollte die Einstellung der Verstärkung bei *Qradio* korrigiert werden.
- Wenn bald die Motorensteuerung auch bis zu einer Elevation bis über  $80^\circ$  geht, sollten die Winkel wie in Kap. 6.12. beschrieben weiter nachgemessen werden.
- Es wäre sinnvoll, den Winkelbereich, in dem Reflexionen und andere Störquellen relevant werden und der bereits in Kap. 6.11. angedeutet wurde, genauer zu erfassen. Das künstliche „Uni-Signal“ kann dabei auch noch genauer bestimmt werden, wie z.B. deren mögliche Polarisierung, indem die Dipolachse um  $90^\circ$  gedreht wird.
- Wie bereits in Abbildung 35 angedeutet wurde, ist es auch möglich, die Schrittmotoren fernzusteuern, wofür nur ein Rechner mit einer freien seriellen Schnittstelle notwendig ist. So kann das Teleskop langfristig gesehen auch aus einem Uni-Gebäude bedient werden.
- In Kap. 6.10. wurde bereits geschlossen, dass der Zaun, der das Silo umgibt, definitiv abmontiert werden muss. Längerfristig ist auch der Abbau des blauen Containers notwendig. Voraussetzung hierfür ist aber die genannte Motorenfernsteuerung sowie eine geeignete und vor allem geschützte Unterbringungsmöglichkeit für das Backend und einen Rechner.
- Mittelfristig sollte aber erstmal das alte Backend repariert werden, so dass die Bochumer Kollegen ihre Elektronik wiederbekommen können.
- Eine weitere Verbesserung betrifft *Qradio*. Für den jeweiligen Experimentator wäre es sehr sinnvoll, das Programm so zu programmieren, dass es selbsttätig z.B. jede Minute eine Messung macht, um so bequemer über einen großen Zeitraum messen zu können. Eine 24-Stunden-Aufnahme wäre beim „Uni-Signal“ wie auch in anderen Richtungen sehr interessant.

Für den eigentlichen Messvorgang sollte zur Positionsbestimmung der Radioquellen das Programm *radio.cpp* und für die Sonne die Internetseite [calsky] benutzt werden. Damit bei einer großen Elevation gemessen wird, sollten Quellen immer in ihrem Zenit gemessen werden, der sich bei den meisten Quellen beim Durchgang durch den Süden befindet (ansonsten ist es bei einer großen Deklination der Norddurchgang).

Bei *Qradio* sollte das *load-switched-Signal* verwendet werden, da damit sehr gut die Verstärkercharakteristik eliminiert wird. Über dieses Signals der Noisediode kann die Antenne auch kalibriert werden, was in Kap. 3.4.11. teilweise beschrieben ist und in [Tools] ausführlich behandelt wird. Voraussetzung ist auch hier wieder, dass eine ausreichende Verstärkung gewährleistet ist. Die Einstellung der Mittenfrequenz bzw. somit der Lokalszillatorfrequenz  $\nu_{LO1}$  kann dazu genutzt werden, andere Frequenzbereiche als der von 1419,3-1421,6 MHz zu beobachten. Nachdem die bekannten, starken Quellen erfolgreich gemessen worden sind, kann mit Hilfe des Programms *radio.cpp* die Galaktische Scheibe vermessen werden (s. Kap. 5.2.). Anhand der Rotverschiebung kann dann deren Rotationsgeschwindigkeit berechnet und entsprechend dargestellt werden (s. Kap. 3.3.7.).

## 8. Fazit

Nach Abschluss der Arbeiten am Wuppertaler Radioteleskop sind viele mögliche Fehlerquellen entweder ausgeschlossen oder verifiziert worden. So stellte sich direkt am Anfang heraus, dass die in Wuppertal verwendete Backend-Box definitiv defekt ist und der zuvor verwendete Dipol keinerlei Resonanz in dem entsprechenden Frequenzbereich aufwies. Auch die möglicherweise nicht korrekt eingestellte Brennweite der Reflektorschüssel wurde korrigiert. Letztendlich konnte mit der Sendeantenne von Herrn *Menke* gezeigt werden, dass unsere Antenne definitiv Signale im gewünschten Frequenzbereich messen kann, womit sie prinzipiell funktionstüchtig ist. Als feste Fehlerquelle kann der Zaun um das Silo herum festgehalten werden, der für viele vermeintliche Quellenpeaks verantwortlich gewesen ist. Zur endgültigen Klarstellung wurden noch die Fehler bei den Winkeleinstellungen berücksichtigt.

Die Messungen ergeben aber nach alledem ein mehrdeutiges Bild. Die Sonne ist nicht deutlich messbar, die starken Quellen ergaben immer wieder unterschiedliche Bilder (die teilweise durch die Reflexionen und das „Uni-Signal“ gegeben waren) und dann zeigten zudem noch schwache Quellen ein viel versprechendes Bild (s. Kap. 6.15.). Letztere konnten aber auch nur künstlicher Herkunft sein, da fast alle Sonnenmessungen ein niedrigeres Signal-Verhältnis als diese zeigten bis auf eine Messung mit einer schwankenden Peakhöhe um die 30 relativ zum Untergrund, welche aber nicht über das theoretische Sonnenspektrum, das keine Peaks enthalten sollte, erklärbar ist. Daher stärkt dies die Vermutung einer nicht ausreichenden Verstärkung. Zugegebenermaßen ist auch die Lage des Teleskops keineswegs ideal: es steht auf der einen Seite umringt von den fünf bis acht Stockwerke höheren Uni-Gebäuden, die die Sicht versperren und alle mit diversen WLAN- und Mobilfunk-Antennen bestückt sind (die zwar eine andere Frequenz haben, aber deren Einfluss nicht ganz auszuschließen ist), und andererseits stehen nebenan die Sport-Container und der eigene blaue Container. Eine bessere Position müsste jedenfalls höher und exponierter sein sowie von weniger Sendern umgeben sein.

Abschließend lässt sich sagen, dass die Arbeit mir einen guten Einblick in die (Radio-)Astronomie und in deren praktischen Probleme gegeben hat. Bei einem funktionierendem Aufbau würde ich vermuten, dass sich dieser Aufbau auch gut

für Schüler- bzw. Kursbesuche eignet, die an Projekttagen o.ä. einen oder mehrere Tage messen könnten.

Zum Schluss möchte ich noch folgenden Personen danken, die während meiner Examensarbeit bei organisatorischen Problemen halfen, die Arbeit Korrektur gelesen haben, mir wichtige Tipps gaben, bei bestimmten Messungen die fünfte und sechste Hand stellten und bei der Beschaffung von Geräten behilflich waren:

Prof. Dr. *Karl-Heinz Kampert*, Dr. *Christopher Wiebusch*, *Jan-Patrick Hülß*, *Jens Dopke*, *Norbert Menke*, *Eva Manthey*, Dr. *Marcus Jütte*, *Klaus Weißbauer*, *Peter Kind*, *Robert Schneider*, *Ingrid Schaarwächter*, *Gabriele Zeitler*, *Nils Nierstenhöfer*, *Viviane Scherini*, *Alexander Thiel*, *Julian Rautenberg*, *Karl-Heinz Becker*, den beiden Praktikanten *Dennis Hopp* und *Torben Beckert* sowie meinem Kollegen *Jörn Sonntag* und generell der Arbeitsgruppe *Astroteilchenphysik* an der Bergischen Universität Wuppertal.

Insbesondere möchte ich aber noch *Jan-Patrick Hülß* und *Jens Dopke* hervorheben, die mit viel Zeitaufwand bei der Lösung von Problemen halfen, mir beim Programmieren zur Seite standen sowie viele nützliche Tipps geben konnten.

## 9. Quellenverzeichnis

Grundsätzlich werden im Rahmen dieser Examensarbeit entstandene und selbst zu verantwortende Fotos, Skizzen, Tabellen und Diagramme mit [Bellin] gekennzeichnet. [Sonntag] dagegen weist auf meinen Kollegen *Jörn Sonntag* als Quelle hin. Die Personendaten in den Fußnoten stammten – soweit es nicht anders angegeben wurde – aus [wikipedia] oder [Brock]. Die folgenden Listen sind nach der verwendeten Abkürzung sortiert. In Kap. 9.3. wurde den einzelnen Kapitel noch die verwendete Literatur zugewiesen.

### 9.1. Literaturverzeichnis

- Alfred Weigert, Heinrich J. Wendker, Lutz Wisotzki,  
*Astronomie und Astrophysik*,  
 Weinheim <sup>4</sup>2004 [Astrophysik]
- Constantine A. Balanis,  
*Antenna theory: analysis and design*,  
 New York 1982 [Balanis]
- Fritz Bergtold, Erhard Graff,  
*Antennen-Handbuch: Bauelemente, Planung u. Technik d. Fernseh- u.  
 Tonrundfunk-Empfangs-Antennenanlagen*,  
 München <sup>2</sup>1977 [Bergtold]
- Bibliographisches Institut & F.A. Brockhaus AG (Hrg.),  
*Der Brockhaus multimedial 2002 premium*,  
 Mannheim 2001 [Brock]
- Arnold Willemer,  
*Einstieg in C++*,  
 Bonn <sup>2</sup>2005 [C++]
- Joachim Herrmann,  
*dtv-Atlas Astronomie*,  
 München <sup>15</sup>2005 [dtv]
- Bundesnetzagentur (Hrg.),  
*Frequenznutzungsplan gemäß TKG über die Aufteilung des Frequenzbereichs von 9 kHz  
 bis 275 GHz auf die Frequenznutzungen sowie über die Festlegungen für diese Frequenz-  
 nutzungen*,  
 Bonn 2005 [Frequenz]
- Hannu Karttunen u.a. (Hrgg.),  
*Fundamental astronomy*,  
 Berlin <sup>4</sup>2003 [Fundamental]
- Gregor Gronau,  
*Höchstfrequenztechnik*,

- Berlin 2001 [Gronau]  
 Otto Hachenberg, Bernd Vowinkel,  
*Technische Grundlagen der Radioastronomie*,  
 Mannheim 1982 [Grundlagen]
- Hermann Haken, Hans Christoph Wolf,  
*Atom- und Quantenphysik*,  
 Berlin <sup>6</sup>1996 [Haken-Wolf]
- Günter Dietmar Roth,  
*Handbuch für Sternfreunde*,  
 Berlin <sup>3</sup>1980 [Handbuch]
- Gernot Zimmer,  
*Hochfrequenztechnik: lineare Modelle*,  
 Berlin 2000 [Hochfrequenz]
- Albrecht Unsöld, Bodo Baschek,  
*Der neue Kosmos*,  
 Berlin <sup>7</sup>2002 [Kosmos]
- Dale A. Ostlie, Bradley W. Carroll,  
*An introduction to modern stellar astrophysics*,  
 Reading 1996 [Modern]
- M. Hagström, L. Helldner, M. Olberg, P. Hillerström, R. Byström,  
*Laboration Radio Astronomy Receiver for Institutes and Observatories*,  
 Chalmers University of Technology: Onsala Space Observatory,  
 Onsala 2001 [Onsala]
- Peter Duffett-Smith,  
*Practical astronomy with your calculator*,  
 Cambridge <sup>3</sup>1998 [Practical]
- Michael Olberg, Elsa-Maria Gustafsson, Ragnschild Walton,  
*Qradio – A control program for the Onsala 2.3m lab antenna* [Qradio]
- Karl Rothammel, Alois Krischke,  
*Rothammels Antennenbuch*,  
 Baunatal <sup>12</sup>2001 [Rothammel]
- Albrecht Krüger,  
*Introduction to solar radio astronomy and radio physics*,  
 Dordrecht 1979 [Solar]
- Jens Dopke, Sebastian Weber,  
*Statusbericht Radioteleskop*,  
 Wuppertal 2005 [Statusbericht]
- Ekbert Hering, Rolf Martin, Martin Stohrer,  
*Taschenbuch der Mathematik und Physik*,  
 Berlin <sup>3</sup>2001 [Taschenbuch]
- Kristen Rohlf, Thomas L. Wilson,  
*Tools of radio astronomy*,

- Berlin <sup>4</sup>2004 [Tools]
- James Stanley Hey,  
*The radio universe*,  
Oxford <sup>3</sup>1983 [Universe]
- ## 9.2. Internetquellen
- Argelander-Institut für Astronomie Abteilung Radioastronomie  
<http://www.astro.uni-bonn.de/~webrai/german/index.php> [Argelander]
- National Astronomy and Ionosphere Center Arecibo Observatory  
<http://www.naic.edu> [Arecibo]
- The Arizona Radio Observatory  
<http://aro.as.arizona.edu/index.htm> [Arizona]
- Westerbork Synthesis Radio Telescope (WSRT)  
*am Stichting Astronomisch Onderzoek in Nederland (ASTRON)*  
<http://www.astron.nl/p/home.htm> [Astron]
- Astronomie.de - der Treffpunkt für Astronomie  
<http://www.astronomie.de/bibliothek/lexikon/lex-r.htm> [Astronomie]
- Atacama Pathfinder Experiment  
<http://www.mpifr-bonn.mpg.de/div/mm/apex.html> [Atacama]
- Stephen F. Austin State University (SFASU):  
*1420 MHz Radio Source List*,  
<http://observe.phy.sfasu.edu/Misc/wagers/1420Sources.html> [Austin]
- Himmelskalender von Arnold Barmettler  
<http://www.calsky.de> [calsky]
- Cartes du Ciel Sky Charts  
<http://www.stargazing.net/astropc/index.html> [Cartes]
- Chandra X-Ray Observatory  
<http://chandra.harvard.edu/photo/2000/0216/index.html> [Chandra]
- Homepage von Jürgen Giesen  
<http://www.jgiesen.de/astro/astroJS/siderealClock/> [Giesen]
- Goddard Space Flight Center  
<http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/heasarc/fits.html> [Goddard]
- MIT Haystack Observatory  
<http://www.haystack.mit.edu/> [Haystack]
- Internetseite „Astro Java“  
<http://www.roman-britain.org/astronomy/astro.htm#> [java]
- LEDA Lyon-Meudon Extragalactic Database  
<http://leda.univ-lyon1.fr/leda/param/celpos.html> [Leda]
- J. J. Condon, u.a.,  
*Astronomical Journal 1998, 115, 1693: NRAO VLA Sky Survey*,  
National Radio Astronomy Observatory (NRAO) in Charlottesville 1998,  
<http://www.cv.nrao.edu/> [NRAO]

in elektronischer Form verfügbar über die Internet-Datenbank des <i>Centre de Données astronomiques de Strasbourg</i> , <a href="http://cdsweb.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR?-source=VIII/65">http://cdsweb.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR?-source=VIII/65</a>	[Strasbourg]
Chalmers University of Technology : Onsala Space Observatory, <a href="http://www.oso.chalmers.se">www.oso.chalmers.se</a>	[OnsalaURL]
Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn <a href="http://www.mpifr-bonn.mpg.de">http://www.mpifr-bonn.mpg.de</a>	[Planck]
Time Service Department des U.S. Naval Observatory <a href="http://tycho.usno.navy.mil/sidereal.html">http://tycho.usno.navy.mil/sidereal.html</a>	[tycho]
Institut für Umweltphysik <a href="http://www.espere.net/Germany/water/deozonde.html">www.espere.net/Germany/water/deozonde.html</a>	[Umweltphysik]
Wikipedia <a href="http://de.wikipedia.org/">http://de.wikipedia.org/</a>	[Wikipedia]

### 9.3. Thematisch

#### *zu Kap. 2. – Historie*

[Handbuch 161ff] [Kosmos 6ff, 100ff, 147ff, 338f] [Brock] [Fundamental 67ff] [Modern 3ff]  
[Wikipedia] [Universe 181]

#### *zu Kap. 3.1 – Koordinatensysteme*

[Practical] [Modern] [dtv] [Fundamental 9ff] [Kosmos 10ff] [Astrophysik]

#### *zu Kap. 3.2. – Strahlungstheorie und Thermodynamik*

[Fundamental 81ff] [Kosmos 106ff, 113ff, 208f] [Practical 81ff] [Rothammel] [Universe 6ff]

#### *zu Kap. 3.3 – Radiostrahlung allgemein*

[Universe] [Handbuch 163ff] [Kosmos 100, 322ff, 338ff] [Austin] [Strasbourg] [Brock] [Umwelt-  
physik] [Astronomie] [Planck]

#### *zu Kap. 3.3.1. – Interstellare Materie*

[Solar 2, 18ff] [Handbuch 182ff] [Universe 129ff]

#### *zu Kap. 3.3.2. – Thermische Sonnenstrahlung*

[dtv 245] [Handbuch 178ff, 163ff] [Kosmos 352] [Solar] [Handbuch 182]

#### *zu Kap. 3.3.3. – Thermische Strahlung von ionisierten Gasen*

[Kosmos 347] [Universe 14ff, 136ff]

#### *zu Kap. 3.3.4. – Nichtthermische Strahlung*

[Handbuch 178ff] [Kosmos 358ff] [Universe 16ff, 125ff, 140ff, 181ff]

#### *zu Kap. 3.3.6. – Kernphysikalische Grundlagen*

[Kosmos 347ff] [Tools 311ff] [Haken-Wolf 357ff]

zu Kap. 3.4. – Antenneneigenschaften

[Fundamental 48, 337ff] [Kosmos 146f, 151f, 348, 390ff, 493, 176, 484] [Rothammel 32ff, 94ff]  
[Handbuch 163] [Tools 14f] [Solar 27ff]

zu Kap. 4. und 5.1. – Versuchsaufbau und Qradio

[Wikipedia] [Onsala] [OnsalaURL] [Statusbericht] [Qradio]

## 9.4. Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

<b>Abbildung 1:</b> Die 9,5m-Antenne von <i>Grote Reber</i> [Universe 35] .....	9
<b>Abbildung 2:</b> Radiokarte des Himmels [Handbuch 178] .....	10
<b>Abbildung 3:</b> Radioteleskop in Effelsberg [Planck] und in Arecibo [Arecibo] .....	11
<b>Abbildung 4:</b> Koordinaten im Horizontsystem [Modern 11] .....	14
<b>Abbildung 5:</b> Koordinaten im Äquatorialsystem [Fundamental 16] .....	15
<b>Abbildung 6:</b> Koordinaten im Ekliptikalsystem [Fundamental 18] .....	16
<b>Abbildung 7:</b> Koordinaten im Galaktischen System [Fundamental 19] .....	16
<b>Abbildung 8:</b> Definition der Intensität [Modern 80] .....	21
<b>Abbildung 9:</b> Schwarzkörperstrahlung [Kosmos 12] .....	25
<b>Abbildung 10:</b> Strahlung zwischen zwei Flächenelementen [Fundamental 89] .....	27
<b>Abbildung 11:</b> Höhenabhängigkeit der Intensität [Kosmos 101] .....	31
<b>Abbildung 12:</b> Strahlungsflussdichte starker Quellen [Handbuch 165] .....	33
<b>Abbildung 13:</b> Die Sonne bei $\lambda = 20\text{cm}$ [Austin] .....	34
<b>Abbildung 14:</b> Ablenkung eines Elektrons [Universe 14] .....	35
<b>Abbildung 15:</b> Spektrum der thermischen Strahlung [Universe 16] .....	36
<b>Abbildung 16:</b> <i>Orionnebel</i> im sichtbaren Bereich [Kosmos 352] und bei 1420 MHz [Austin] .....	37
<b>Tabelle 1:</b> Die stärkste HII-Region .....	38
<b>Abbildung 17:</b> Kreisbahn eines Elektrons im Magnetfeld [Universe 20] .....	38
<b>Abbildung 18:</b> Thermisches und Nichtthermisches Spektrum [Universe 130] .....	39
<b>Abbildung 19:</b> <i>Krebsnebel</i> im sichtbaren Bereich [Universe 141] und bei 1420 MHz [Austin] ..	40
<b>Abbildung 20:</b> <i>CasA</i> -Aufnahme bei 1420 MHz [Austin] .....	40
<b>Tabelle 2:</b> Die stärksten Supernova-Reste .....	41
<b>Tabelle 3:</b> Die stärksten Radiogalaxien .....	41
<b>Abbildung 21:</b> Strahlungsflussdichte in Abhängigkeit von der Wellenlänge [Universe 184] .....	42
<b>Abbildung 22:</b> Ausgabeseite der Straßburger Datenbank [Straßbourg] .....	43
<b>Abbildung 23:</b> Radioquellen bei 1,4 GHz mit $F > 1\text{ Jy}$ [Straßbourg] .....	43
<b>Abbildung 24:</b> Radioquellen bei 1,4 GHz mit $F > 100\text{ Jy}$ [Straßbourg] .....	44
<b>Abbildung 25:</b> Radioquellen oberhalb von $\delta = -40^\circ$ in Äqu. Koord. [Bellin] .....	44
<b>Abbildung 26:</b> Radioquellen oberhalb von $\delta = -40^\circ$ in Gal. Koord. [Bellin] .....	45
<b>Abbildung 27:</b> Das magnetische Kernmoment [Haken-Wolf 361] .....	46
<b>Abbildung 28:</b> Das magnetische Kernmoment ausgerichtet zum Elektronenspin [Universe 25] ..	47
<b>Abbildung 29:</b> Rotation eines Sternes um das Galakt. Zentrum [Kosmos 394] .....	48
<b>Abbildung 30:</b> Strahlungswiderstand eines Halbwellendipols [Rothammel 74] .....	53

<b>Abbildung 31:</b> Bestimmungsdiagramm des Verkürzungsfaktor [Rothammel 85].....	56
<b>Abbildung 32:</b> Blick vom Uni-Gebäude U nach Süden und zurück [Bellin].....	60
<b>Abbildung 33:</b> Außenansicht Silo und Container [Bellin].....	60
<b>Abbildung 34:</b> Dipol-Stange mit Reflektor; Schrittmotor [Sonntag].....	61
<b>Abbildung 35:</b> Skizze der Antenne sowie der Elektronik [Bellin].....	61
<b>Abbildung 36:</b> Elektronik von der Antenne bis zum Frontend [Bellin].....	62
<b>Abbildung 37:</b> Frontansicht des Backends [Sonntag].....	63
<b>Abbildung 38:</b> Elektronik vom Frontend bis zum Utilityboard [Bellin].....	64
<b>Abbildung 39:</b> Bildschirm von <i>Qradio</i> 1.0. auf dem alten Rechner [Bellin].....	65
<b>Abbildung 40:</b> Screenshot der neuen <i>Qradio</i> -Version [Bellin].....	66
<b>Abbildung 41:</b> Menü des Programms <i>radio.cpp</i> [Bellin].....	68
<b>Tabelle 4:</b> verwendete Abkürzungen im Programm [Bellin].....	68
<b>Abbildung 42:</b> Koordinatenumrechnung für die nächsten drei Stunden [Bellin].....	69
<b>Abbildung 43:</b> Menüauswahl 14 – Eingabe der Parameter [Bellin].....	69
<b>Abbildung 44:</b> Auszug aus der ausgegebenen TXT-Datei [Bellin].....	70
<b>Tabelle 5:</b> Parameter für das Programm <i>auswertung.cpp</i> [Bellin].....	73
<b>Abbildung 45:</b> Abhängigkeit des Leveldetektor-2-Signals [Bellin].....	77
<b>Abbildung 46:</b> Messung der beiden Detektorlevels [Bellin].....	78
<b>Abbildung 47:</b> präzisere Messung der beiden Detektorlevels [Bellin].....	79
<b>Abbildung 48:</b> Bild vom verrosteten Dipol [Bellin].....	80
<b>Tabelle 6:</b> Abmessungen des Teleskops [Bellin].....	80
<b>Abbildung 49:</b> Maßstabsgetreue Skizze des Teleskops [Bellin].....	81
<b>Abbildung 50:</b> Abhängigkeit der Brennweite $f$ vom Abstand $h$ [Bellin].....	83
<b>Abbildung 51:</b> Untergrund-Spektrum ( <i>mittelwerte.txt</i> ) [Bellin].....	84
<b>Tabelle 7:</b> Sonnenmessungen [Bellin].....	85
<b>Abbildung 52:</b> Spektrum von Messung Nr. 18 [Bellin].....	86
<b>Abbildung 53:</b> Himmelskarte [Bellin].....	88
<b>Abbildung 54:</b> <i>Norbert Menke</i> mit der Sendeantenne [Bellin].....	89
<b>Abbildung 55:</b> Bestimmung der Keulenbreite 1 [Sonntag, Bellin].....	91
<b>Abbildung 56:</b> Bestimmung der Keulenbreite 2 [Sonntag, Bellin].....	91
<b>Tabelle 8:</b> Übersicht über weitere Antennencharakteristika.....	92
<b>Abbildung 57:</b> Frequenzkalibrierung [Bellin].....	93
<b>Abbildung 58:</b> Bestimmung der Signalverstärkung [Bellin].....	94
<b>Abbildung 59:</b> Messung des Senders mit 3,16nW [Bellin].....	95
<b>Tabelle 9:</b> Messungen der Signalhöhen mit und ohne Gitter [Bellin].....	96
<b>Abbildung 60:</b> <i>Krebsnebel</i> -Spektrum bei $A = 60^\circ$ und $a = 45^\circ$ [Bellin].....	97
<b>Abbildung 61:</b> Vergleich des Spektrums von CygA bei $A = 240^\circ / a = 29^\circ$ mit einer in maximaler Höhe ( $a = 45^\circ$ ) und einer Position $24^\circ$ niedriger [Bellin].....	98
<b>Abbildung 62:</b> maßstabsgetreue Skizze für die Elevationsmessung [Bellin].....	99
<b>Abbildung 63:</b> Kalibration der Motorsteuerung [Bellin].....	100
<b>Abbildung 64:</b> Das Spektrum vom Orionnebel [Bellin].....	101
<b>Abbildung 65:</b> links: Nr. 118, rechts: Nr. 119 [Bellin].....	103

<b>Abbildung 66:</b> Spektrum der Messung mit dem künstlichen Signal [Bellin] .....	120
<b>Abbildung 67:</b> Bestimmung der Keulenbreite [Bellin] .....	120
<b>Abbildung 68:</b> Sonnenmessungen 1 [Bellin] .....	121
<b>Abbildung 69:</b> Sonnenmessungen 2 [Bellin] .....	121
<b>Abbildung 70:</b> Sonnenmessungen 3 [Bellin] .....	121
<b>Abbildung 71:</b> Messungen des Galaktischen Zentrums [Bellin].....	122
<b>Abbildung 72:</b> CygA-Messungen 1 [Bellin].....	122
<b>Abbildung 73:</b> CygA-Messungen 2 [Bellin].....	122
<b>Abbildung 74:</b> CygA-Messung Nr. 15 [Bellin].....	123
<b>Abbildung 75:</b> Q23-Messungen, links: Nr. 27, rechts: Nr. 28 [Bellin].....	123
<b>Abbildung 76:</b> Q23-Messungen, links: Nr. 29, rechts: Nr. 30 [Bellin].....	123
<b>Abbildung 77:</b> Spektrum des <i>Orionnebel</i> bei $A = 39^\circ$ und $a = 26^\circ$ am 8.3.2006 beginnend um 16:45 [Bellin].....	124
<b>Abbildung 78:</b> Theoretische Himmelskarte für den Bereich 1 [Bellin] .....	124
<b>Abbildung 79:</b> Theoretische Himmelskarte für den Bereich 2 [Bellin] .....	125
<b>Abbildung 80:</b> Theoretische Himmelskarte für den Bereich 3 [Bellin] .....	125
<b>Abbildung 81:</b> Bildschirm von <i>Qradio</i> 2.0 [Bellin].....	126
<b>Abbildung 82:</b> Bildschirm von <i>Qradio</i> 2.0 – „mysteriös“ [Bellin].....	126
<b>Abbildung 83:</b> Bildschirm von <i>Qradio</i> 2.0 – waagerechter Strich [Bellin] .....	127

## 10. Anhang

### 10.1. Überblick über die offiziellen Belegungen der Frequenzbänder

Bei der Bundesnetzagentur kann man einen Frequenznutzungsplan (s. [Frequenz]) einsehen, der alle offiziell genehmigten Frequenzbänder sowie deren erlaubte aktive und passive Nutzung enthält. Auch sind geschützte Frequenzbänder aufgelistet, damit sie nicht anderweitig verwendet werden. Folgende Tabelle listet gemäß dem Nutzungsplan alle Frequenzbänder innerhalb der Frequenz von 1420 MHz  $\pm$ 54 MHz der Zwischenfrequenz des Oszillators (s. Kap. 4.2.).

FREQUENZBAND	NUTZUNG	NUTZUNGS- BEREICH
1350 - 1375 MHz	NICHTNAVIGATORISCHER ORTUNGSFUNKDIENST	Militär
1370 - 1400 MHz	Erderkundungsfunkdienst über Satelliten (passiv)	Militär
1370 - 1400 MHz	Weltraumforschungsfunkdienst (passiv)	Militär
1375 - 1400 MHz	FESTER FUNKDIENST	Militär
1400 - 1427 MHz	ERDERKUNDUNGSFUNKDIENST ÜBER SATELLITEN (passiv) Passive Sensoren (Radiometer) an Bord von Weltraumfahrzeugen für die wissenschaftliche und technische Forschung, für den Empfang vorhandener Strahlung von der Erde, zur Erkundung der Eigenschaften der Erde, von Naturerscheinungen und zur Gewinnung von Daten über den Zustand der Umwelt.	Zivil
1400 - 1427 MHz	RADIOASTRONOMIEFUNKDIENST Empfang von Funkwellen und Strahlungen aus dem Weltraum	Zivil
1400 - 1427 MHz	WELTRAUMFORSCHUNGSFUNKDIENST (passiv) Passive Sensoren (Radiometer) an Bord von Weltraumfahrzeugen für die wissenschaftliche und technische Forschung, für den Empfang vorhandener Strahlung aus den Tiefen des Weltraums.	Zivil
1427 - 1429 MHz	FESTER FUNKDIENST	Zivil, Militär
1427 - 1429 MHz	MOBILFUNKDIENST außer mobiler Flugfunkdienst	Zivil, Militär
1427 - 1429 MHz	WELTRAUMFERNWIRKUNGSFUNKDIENST (Richtung Erde-Weltraum) Umlaufbahnverfolgung, Fernmessungen und Fernsteuern von Weltraumfahrzeugen	Zivil, Militär
1429 - 1452 MHz	FESTER FUNKDIENST	Militär
1429 - 1452 MHz	MOBILFUNKDIENST außer mobiler Flugfunkdienst	Militär
1452 - 1479,5 MHz	RUNDFUNKDIENST D345 Übertragung von digitalen Ton- und Datensignalen nach dem DAB-Standard. Zusätzlich ist auch die Übertragung digitaler Bildsignale unter Einhaltung des DAB-Standards möglich. Die Übertragung von Rundfunk hat Vorrang vor der Übertragung sonstiger Inhalte (Mediendienste, Teledienste). Kanalbandbreite: 1,5 MHz Kanalraster: 1,5 MHz	Zivil, Militär
1474 - 1481,5 MHz	MOBILFUNKDIENST außer mobiler Flugfunkdienst® Auslaufend Datenübertragung für Telemetrie zwecke	Zivil, Militär
1479,5 - 1492 MHz	RUNDFUNKDIENST ÜBER SATELLITEN D345	Zivil, Militär

	Übertragung von digitalen Ton- und Datensignalen nach dem DAB-Standard . Zusätzlich ist auch die Übertragung digitaler Bildsignale unter Einhaltung des DAB-Standards möglich. Die Übertragung von Rundfunk hat Vorrang vor der Übertragung sonstiger Inhalte (Mediendienste, Teledienste).	
--	---	--

## 10.2. Radioquellenübersicht

### *HII-Regionen*

NAME	REKTASZENSION [H:M:S]	DEKLINATION [° ']	STRAHLUNGSFLUSS FÜR $\lambda = 20\text{CM}$ [JY]
W 38	18 17 48	- 16 09	1060
W 51	19 20 48	+ 14 08	710
Ori A	05 32 48	- 05 27	520
W 28	17 58 12	- 23 22	360
W 29	18 01 00	- 24 22	260
W 37	18 16 18	- 13 45	260
W 33	18 10 24	- 18 00	190
W 3	02 22 42	+ 61 51	170
Ori B	05 38 24	- 01 54	95
W 49 A/B	19 08 12	+ 09 02	75

Quelle: [Handbuch 180]

### *Supernova-Reste*

NAME	REKTASZENSION [H:M:S]	DEKLINATION [° ']	STRAHLUNGSFLUSS FÜR $\lambda = 20\text{CM}$ [JY]
Cassiopeia A (~1700 n.Chr.)	23 21 06	+ 58 33	2480
Krebsnebel (TauA, 1054 n.Chr.)	05 31 30	+ 21 59	875
3C157	06 14 18	+ 21 59	190
W 44	18 53 36	+ 01 15	171
W 78	20 48 12	+ 29 30	90
W 41	18 31 36	- 08 57	75
3C10 (1572 n.Chr., Tycho Brahe)	00 22 36	+ 63 52	44
3C58	02 01 54	+ 64 35	34
3C391	18 46 48	- 00 59	20
3C358 (1604 n.Chr.)	17 27 42	- 21 27	15

Quelle: [Handbuch 180]

### *Radiogalaxien*

NAME	REKTASZENSION [H:M:S]	DEKLINATION [° ']	STRAHLUNGSFLUSS FÜR $\lambda = 20\text{CM}$ [JY]
Cygnus A	19 57 42	+ 40 36	1495
Virgo A	12 28 18	+ 12 40	198
3C353	17 17 54	- 00 56	57
3C123	04 33 54	+ 29 34	47
Her A	16 48 42	+ 05 05	45
3C218	09 15 42	- 11 53	43
3C295	14 09 36	+ 52 26	23
3C270	12 16 48	+ 06 06	18
3C84	03 16 30	+ 41 20	14
3C390.3	18 45 54	+ 79 43	12

Quelle: [Handbuch 180]

### *Quasare*

NAME	REKTASZENSION [H:M:S]	DEKLINATION [°']	STRAHLUNGSFLUSS FÜR $\lambda = 20\text{CM}$ [JY]
3C273	12 26 36	+ 02 20	46
3C147	05 38 42	+ 49 50	23
3C48	01 34 48	+ 32 54	16
3C286	13 28 48	+ 30 46	15
3C196	08 10 00	+ 48 22	14
3C380	18 28 12	+ 48 43	14
3C279	12 53 36	- 05 31	11
3C454.3	22 51 30	+ 15 53	11
3C138	05 18 18	+ 16 35	10
3C309.1	14 59 00	+ 71 52	9

Quelle: [Handbuch 180]

### 10.3. Quellendatei *sources.txt*

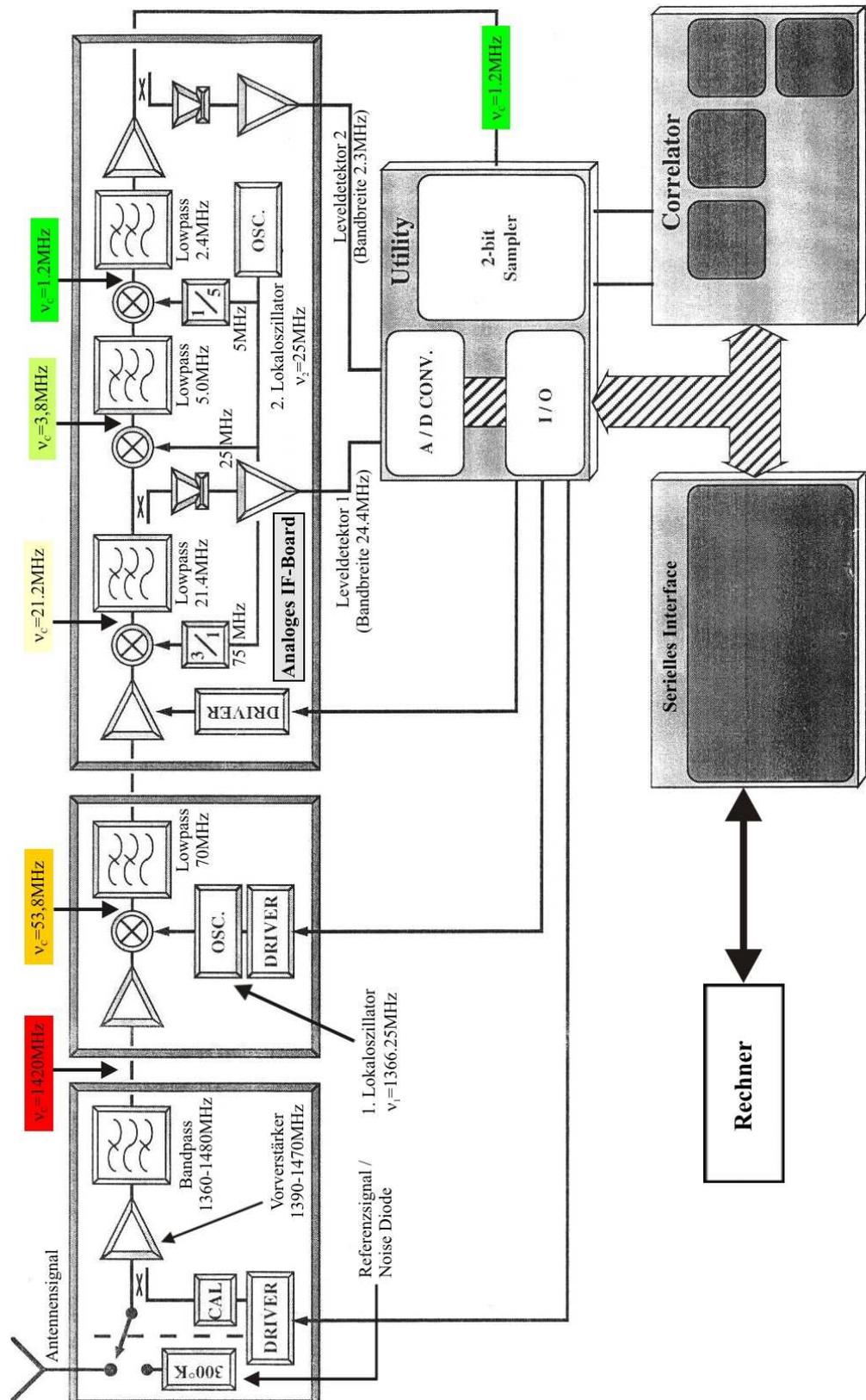
Im Folgenden ist die Quellenliste aus der *sources.txt* abgebildet, wie sie das Programm *radio.cpp* einliest. Quellenamen beginnend mit C (ggf. in Klammern) sind aus [Strasbourg], ansonsten aus [Handbuch 180] (s. auch Anhang 10.2.). SNR steht dabei für Supernova-Rest, RG für Radiogalaxie und HII für eine HII-Region. Diese Datei befindet sich außerdem noch auf der beigegeführten CD (s. Anhang 10.7.)

NR.	NAME	RA [DEG]	DE [DEG]
0	GalacticCenter(C1752M28)	266,426	-29,004
1	C0230P64	36,500	62,167
2	CrabNebula(C0536P24) (SNR)	83,617	22,034
3	OrionNebel(C0536M04)	83,822	-5,379
4	C0536P00	85,415	-1,914
5	C1232P04	187,277	2,051
6	C1648P04	252,799	4,989
7	3C353(C1720P00)	260,144	-0,979
8	W41 (SNR)	277.90	-8.95
9	CygnusA(RG) (C2000P40)	299,850	40,739
10	CasA (SNR) (C2330P60)	350,857	58,839
11	C0048P52	10,787	52,060
12	C0130P32	24,422	33,160
13	C0320P40	49,951	41,512
14	C0432P28	69,269	29,671
15	Quelle15	69,250	80,750
16	C0540P48	85,651	49,852
17	C0624M04	96,792	-5,885
18	C0820P48	123,400	48,217
19	C0920M12	139,524	-12,095
20	C1232P04	187,277	2,051
21	VirgoA(925075) (RG)	187,706	12,389

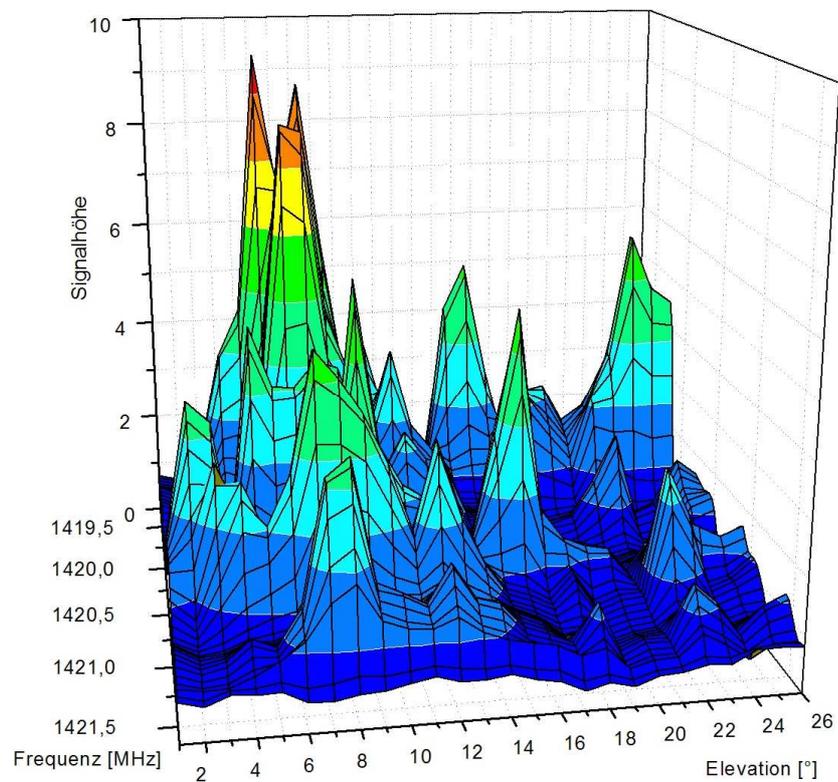
22	C1330P32	202,785	30,509
23	C1424P52	212,836	52,203
24	C1724M36	259,505	-37,443
25	C1724M36	261,188	-34,176
26	C1808M20	272,358	-20,324
27	C1820P48	277,383	48,746
28	C1840M20	278,417	-21,061
29	C1840P00	281,903	-1,923
30	C1856P00	285,445	1,217
31	W49(C1912P08)	287,564	9,105
32	C1928P16	290,927	14,509
33	C1928M28	291,213	-29,242
34	C2016P24	303,615	23,581
35	C2120P24	320,936	25,070
36	C2256P16	343,490	16,148
37	C1720M40	260,029	-38,959
38	Quelle38*	172,912	45,248
39	W38(HII)	274,450	343,850
40	W51(HII)	290,200	14,130
41	W44(SNR)	283,400	1,250
42	3C157(SNR)	93,575	22,600
43	OriA(HII)	83,200	354,550
44	OriB(HII)	84,600	358,100
45	W37(HII)	270,272	346,250
46	W33(HII)	272,600	342,000
47	W29(HII)	270,250	335,633
48	W28(HII)	269,550	336,633
49	W03(HII)	35,675	61,850

## 10.4. Elektronikskizze

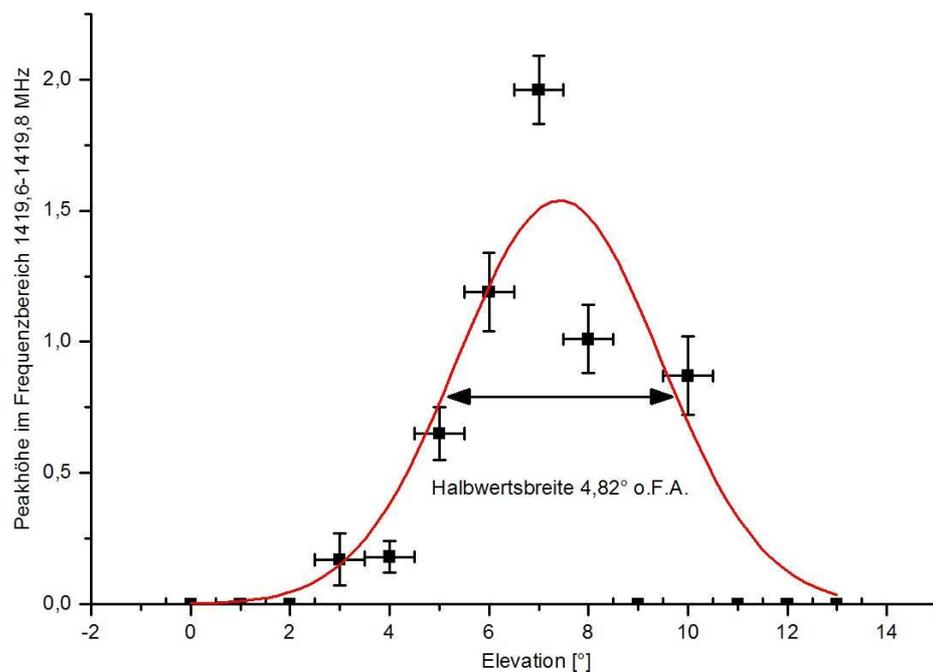
Basierend auf einer Skizze aus [Onsala] werden in der folgenden Grafik alle relevanten Elektronikteile angefangen bei dem Vorverstärker bis zum Rechner. Diese Skizze befindet sich außerdem noch auf der beigelegten CD (s. Anhang 10.7.).



## 10.5. Ergänzende Abbildungen und Spektren

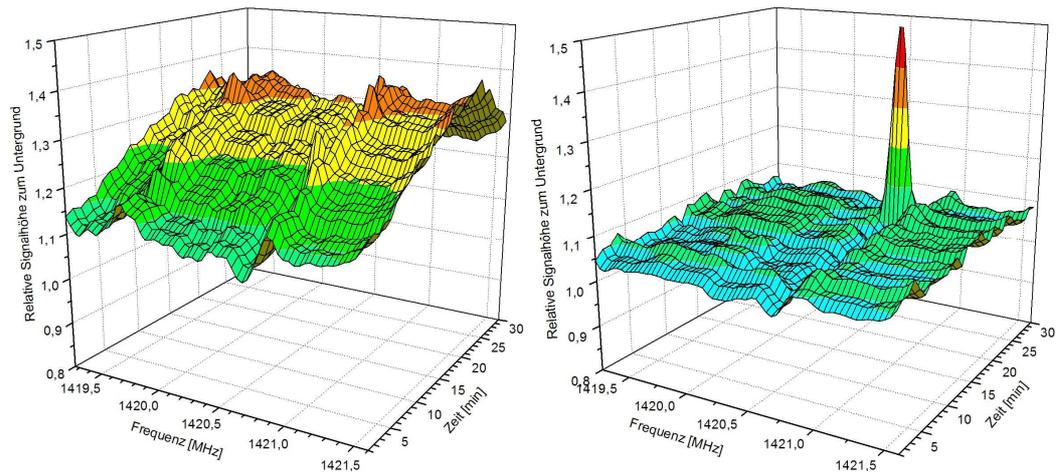
*Alternative Keulenbreitenbestimmung*

**Abbildung 66:** Spektrum der Messung mit dem künstlichen Signal aus der Uni, um die Keulenbreite zu bestimmen [Bellin]

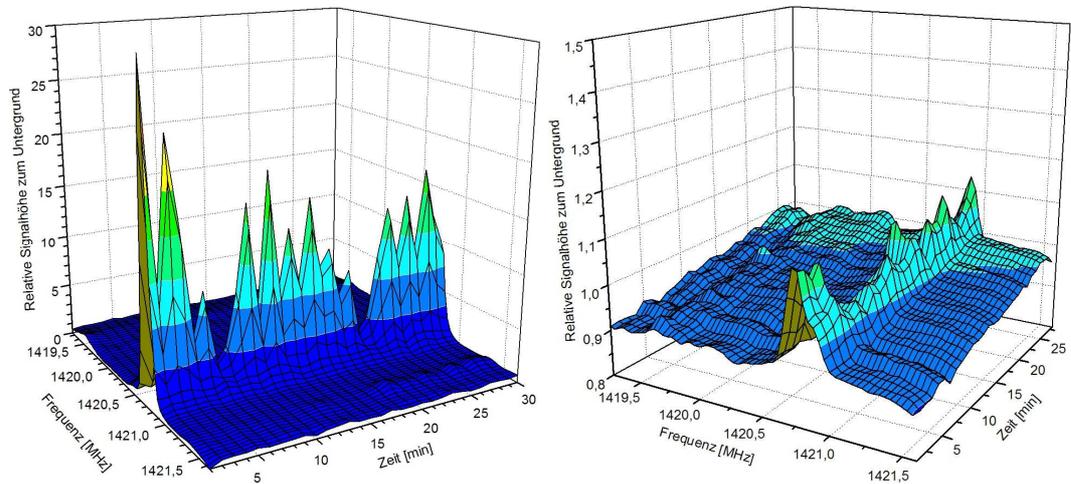


**Abbildung 67:** Bestimmung der Keulenbreite anhand der Messung mit dem künstlichen Signal aus der Uni und einem gewichteten Gauß-Fit. Die Peakhöhe entspricht dem Integral über den Peak und wurde mit *auswertung.cpp* bestimmt. Dabei wurden alle Peaks im Frequenzbereich 1419,6-1419,8 MHz berücksichtigt. [Bellin]

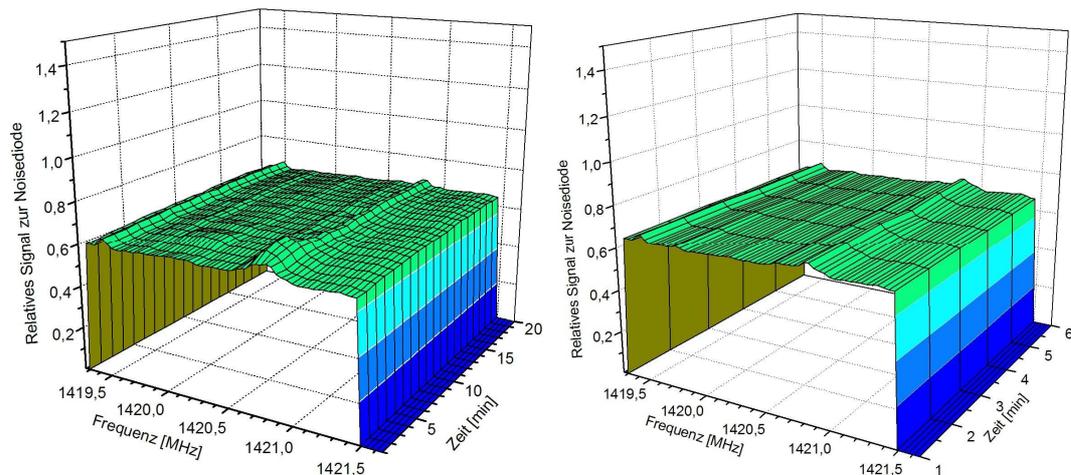
## Spektren der Sonne



**Abbildung 68:** Sonnenmessungen am 24.1.2006, links: Nr. 1, rechts: Nr. 2, theoretischer Durchgang nach der Hälfte der Zeit [Bellin]

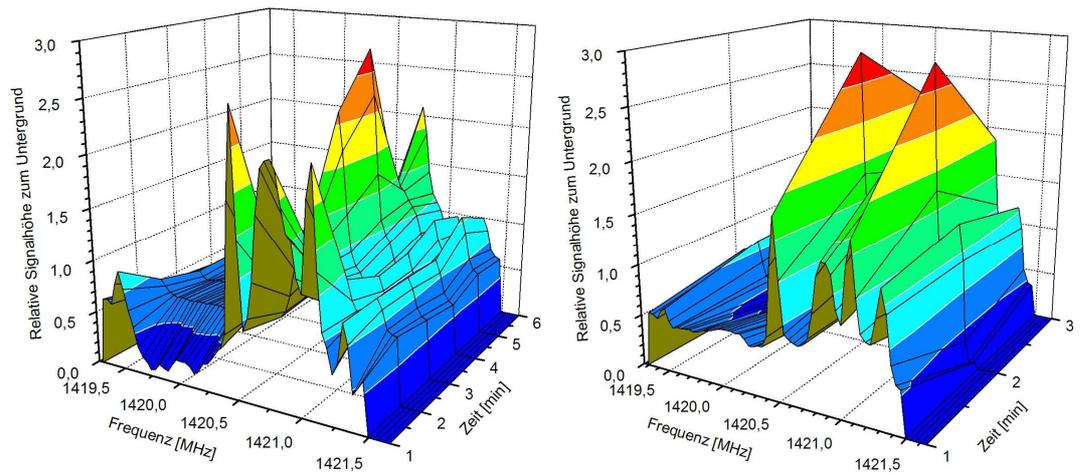


**Abbildung 69:** Sonnenmessungen, links: Nr. 3 am 24.1.2006, rechts: Nr. 4 am 17.2.2006, theoretischer Durchgang nach der Hälfte der Zeit [Bellin]



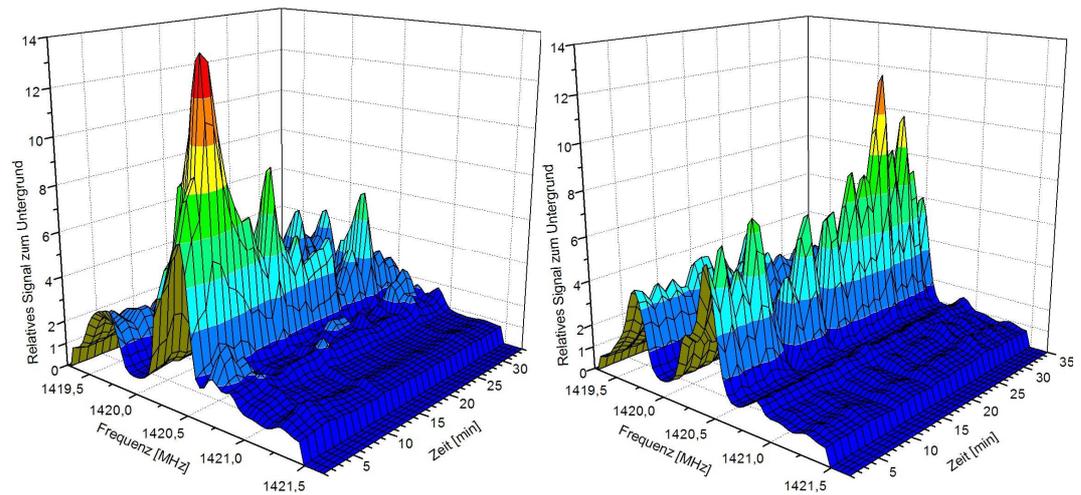
**Abbildung 70:** Sonnenmessungen am 16.3.2006 mit der Noisediode als Untergrund, links: Nr. 118, rechts Nr. 121, theoretischer Durchgang bei 0 min [Bellin]

### Spektren des Galaktischen Zentrums

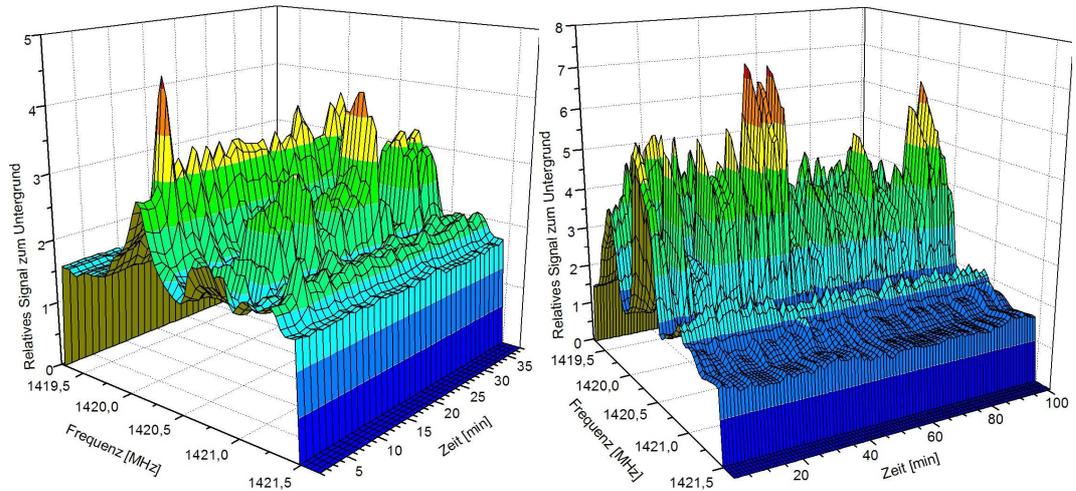


**Abbildung 71:** Messungen des Galaktischen Zentrums,  
links: Nr. 8, rechts: Nr. 10 [Bellin]

### Spektren von Cygnus A



**Abbildung 72:** CygA-Messungen, links: Nr. 13, rechts: Nr. 16 [Bellin]



**Abbildung 73:** CygA-Messungen, links: Nr. 14, rechts: Nr. 17 [Bellin]

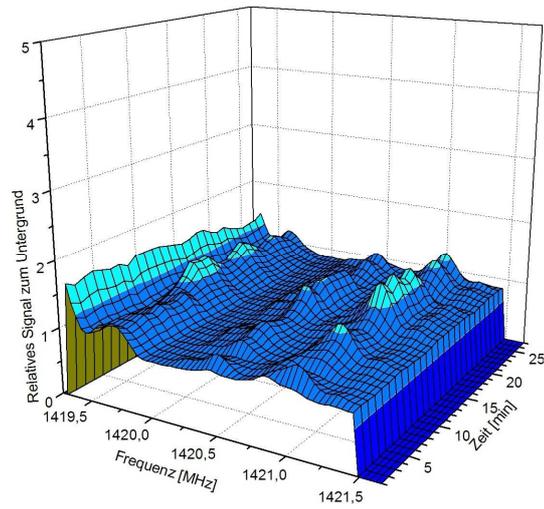
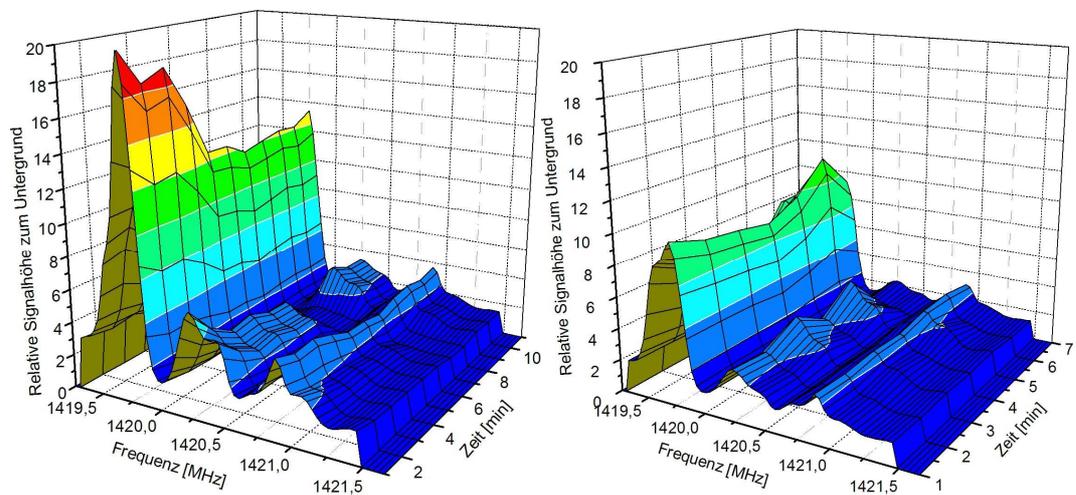
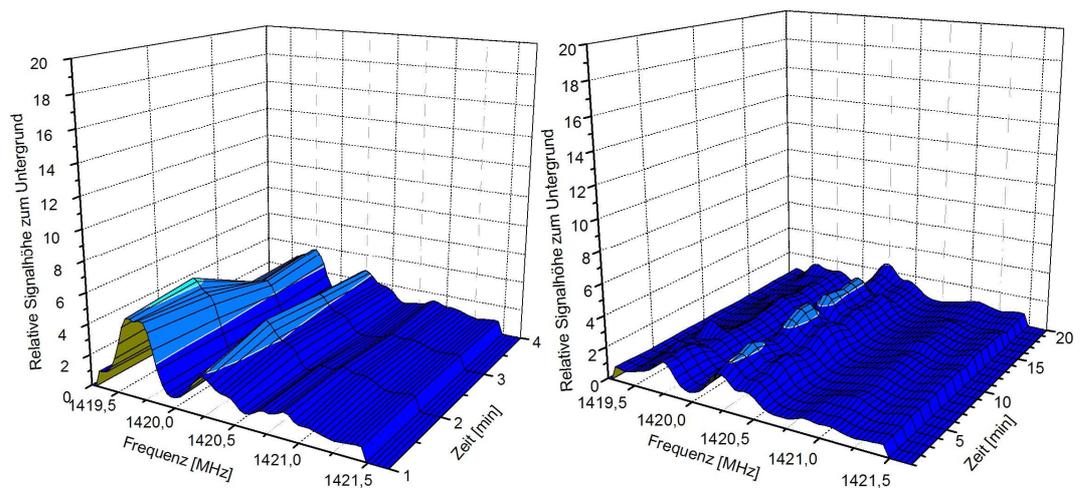
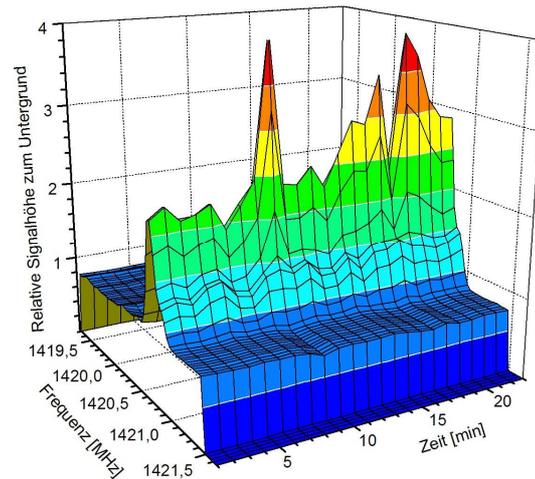


Abbildung 74: CygA-Messung Nr. 15 [Bellin]

## Spektren von Q23

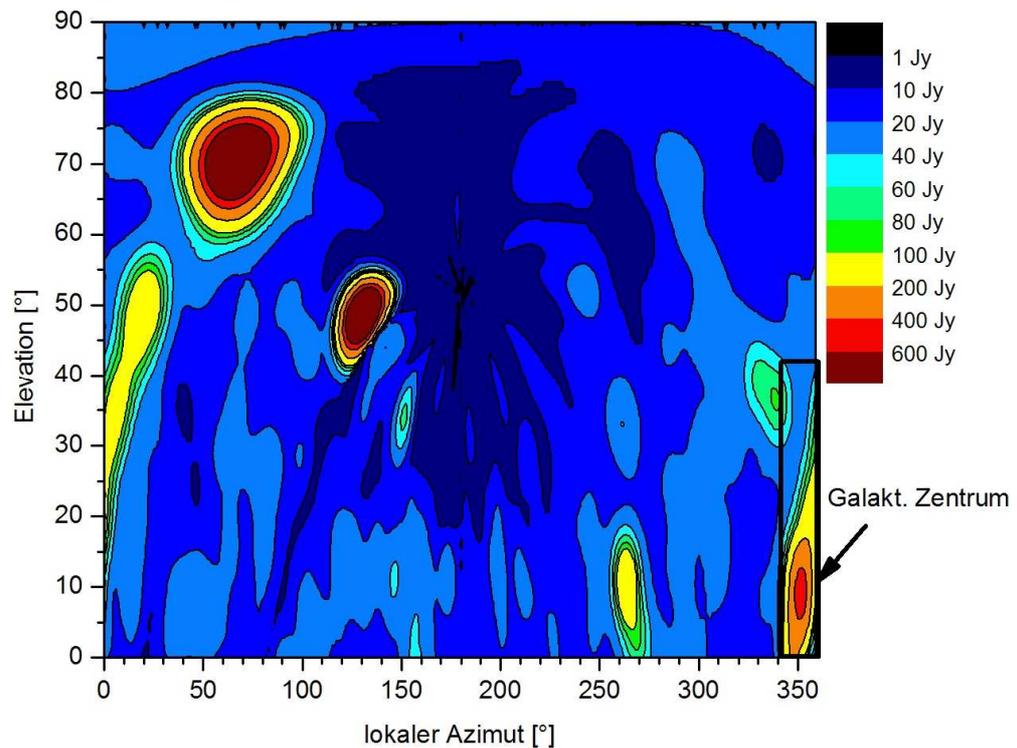
Abbildung 75: Q23-Messungen, links: Nr. 27,  
rechts: Nr. 28 (11 min nach Nr. 27) [Bellin]Abbildung 76: Q23-Messungen, links: Nr. 29 (15 min nach Nr. 28),  
rechts: Nr. 30 (keine Q23-Position) [Bellin]

### Spektrum des Orionnebels

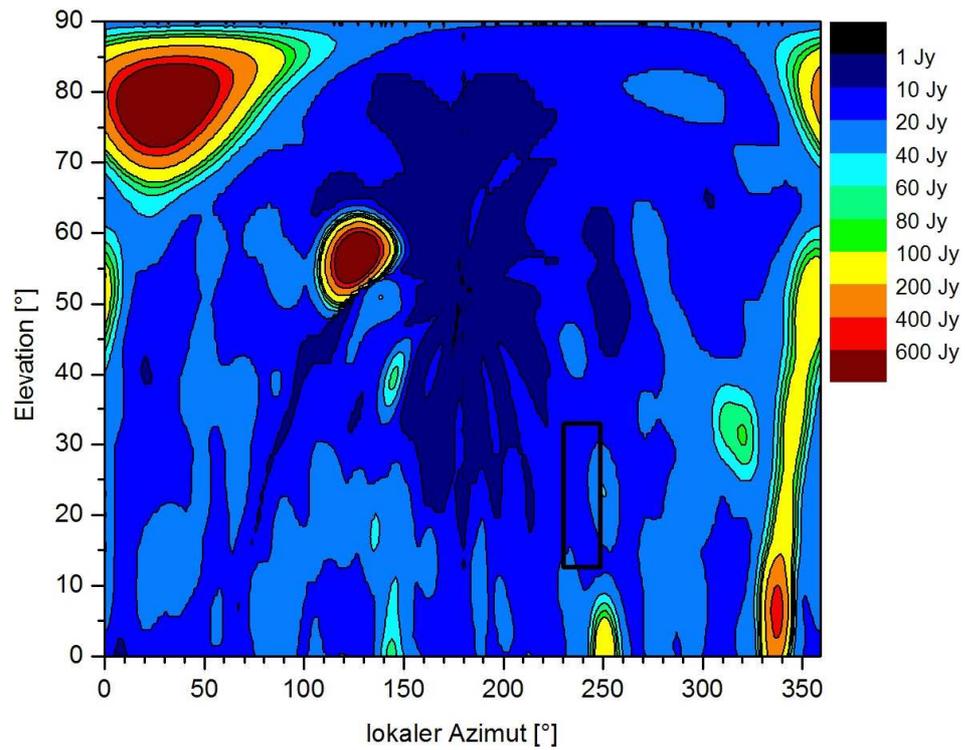


**Abbildung 77:** Spektrum des *Orionnebel* bei  $A = 39^\circ$  und  $a = 26^\circ$   
am 8.3.2006 beginnend um 16:45 [Bellin]

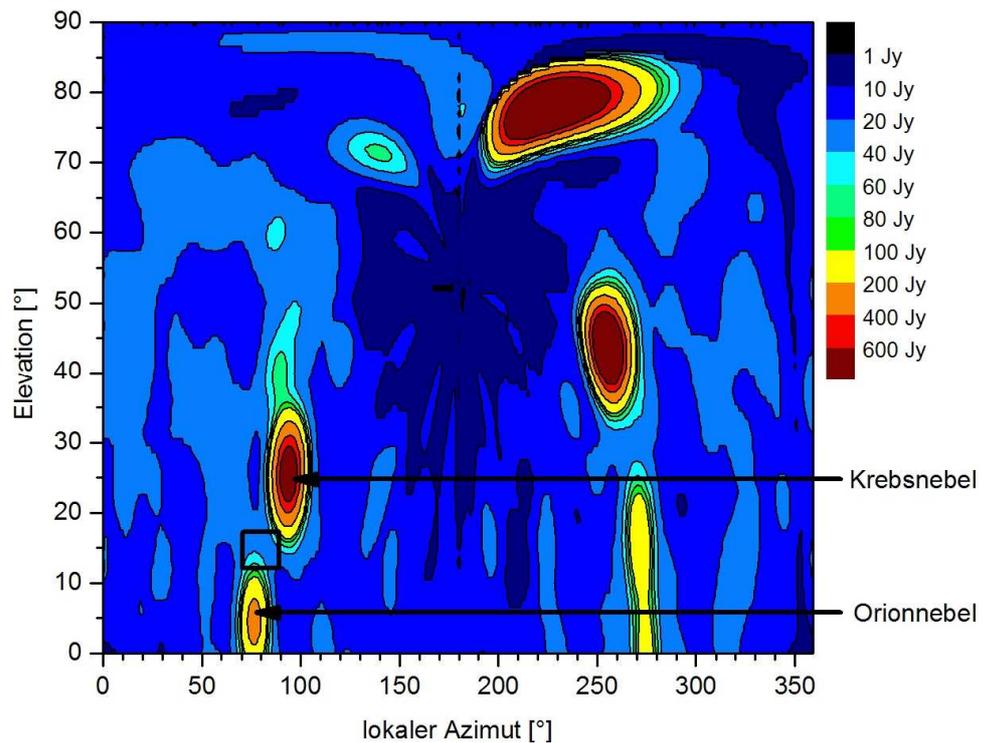
### Theoretische Himmelskarten



**Abbildung 78:** Theoretische Himmelskarte  
für den Bereich 1 (23.01.06, 10:45) [Bellin]



**Abbildung 79:** Theoretische Himmelskarte  
für den Bereich 2 (23.01.06, 11:50) [Bellin]



**Abbildung 80:** Theoretische Himmelskarte  
für den Bereich 3 (23.01.06, 16:50) [Bellin]

*Bildschirmfotos von Qradio 2.0*

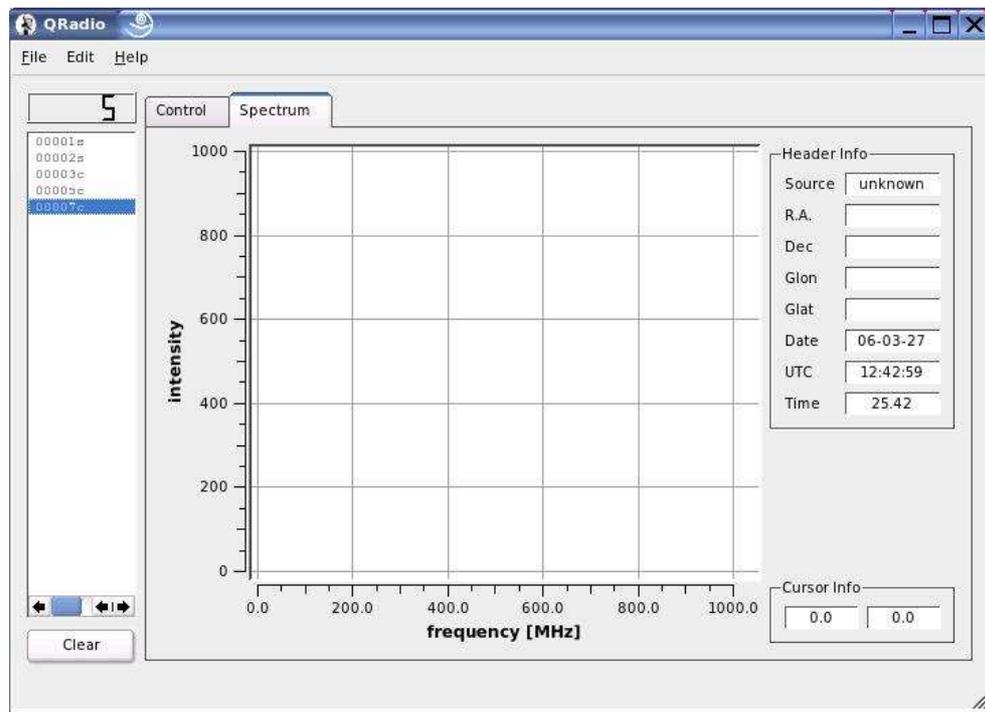


Abbildung 81: Bildschirm von *Qradio* 2.0 – es wurde gemessen, ohne dass ein Spektrum angezeigt wird [Bellin]

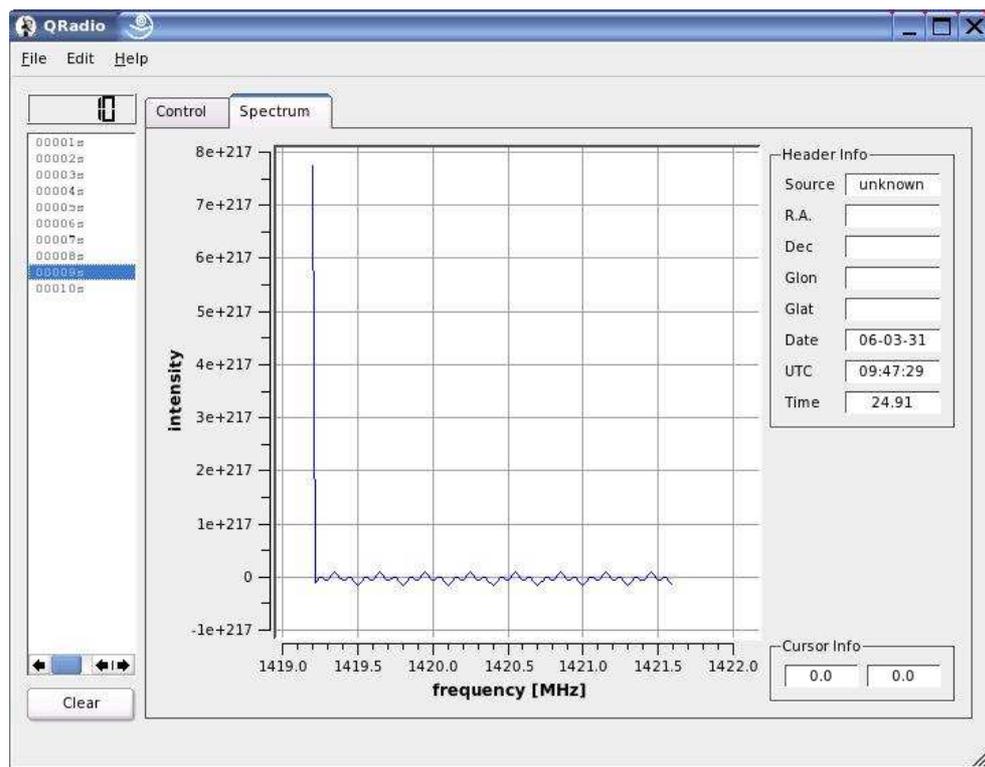
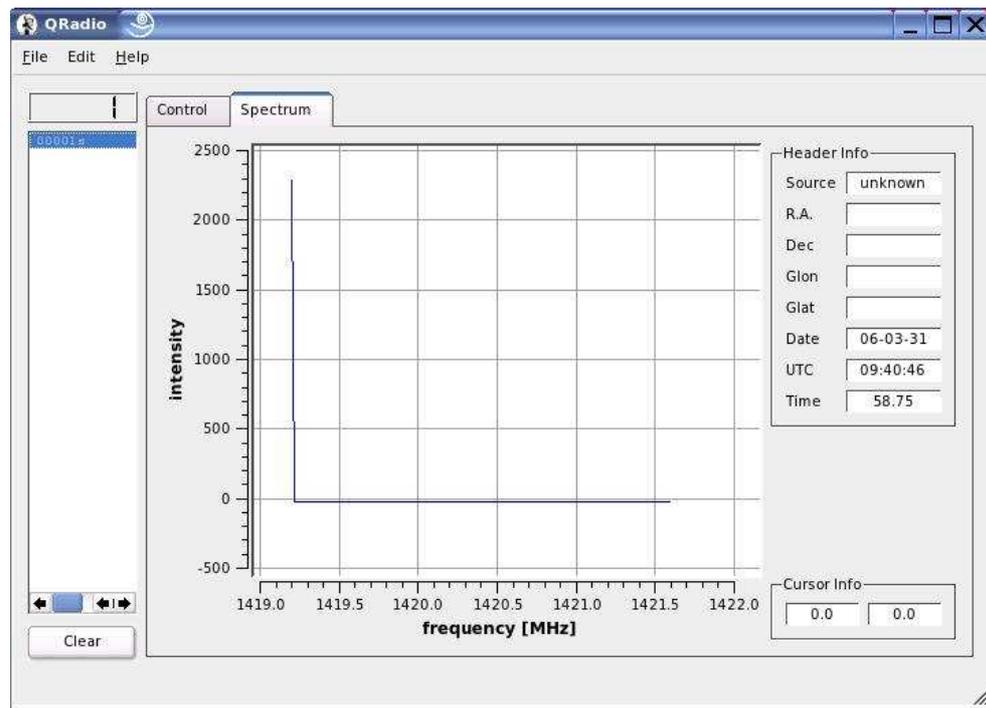


Abbildung 82: Bildschirm von *Qradio* 2.0 – „mysteriöses“ Spektrum [Bellin]



**Abbildung 83:** Bildschirm von *Qradio 2.0* –  
Dritte Anzeige-Möglichkeit nach einer Messung: waagerechter Strich [Bellin]

## 10.6. Übersicht über die Messungen

Die folgende Übersicht beinhaltet alle Messungen. Sie sind alle durchgehend durchnummeriert. Dabei sind die ersten 120 Eintragungen die im Laufe der Arbeit erwähnt und analysiert werden. Die Tabelle musste aufgrund der Seitenränder aufgeteilt werden.

Im ersten Abschnitt finden sich nach der Spaltenreihenfolge: die *Objekte* (wobei *Pos* reine Positionsmessungen sind, ohne dass eine Quelle bewusst gemessen wird), Azimut und Elevation laut Motorensteuerung (*AZ Motor*, *EL Motor*) sowie deren nach Kap. 6.12. korrigierten Werte, das *Datum*, zwei *Uhrzeiten* (Start der Messungen und Zeit des theoretischen Quellendurchgangs) und die Zahl der Messungen (*Messreihe*), über die gemittelt wird.

Im zweiten Abschnitt befinden sich die Ergebnisse des Programms *auswertung.cpp*. Für alle drei potentiellen Peaks gibt es jeweils vier Spalten: die Mittenfrequenz (*Peak*), die Halbwertsbreite (*Hwb*), das Integral über den Peak (*Int.*) sowie die *Zahl* der gefundenen Peaks in einer Messreihe. Ein x in der *Peak*-Spalte bedeutet, dass kein Peak gefunden wurde. Da das Programm noch nicht so umprogrammiert wurde, dass beim Mode *Load-Switched* die r-fits-Dateien als Untergrund verwendet werden, fehlen bei den entsprechenden Messungen diese Daten.

*Messtabelle: Erster Abschnitt*

NR.	OBJEKT	AZ	EL	AZ	EL	DATUM	ZEIT	ZEIT	MESS- REIHE
		MOTOR	MOTOR	REAL	REAL		BEGINN	Q	
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

Messtabelle: Zweiter Abschnitt

NR.	PEAK1/ MHZ	HWB1/ MHZ	INT. 1	ZAHL 1	PEAK2/ MHZ	HWB2/ MHZ	INT. 2	ZAHL 2	PEAK 3/ MHZ	HWB3/ MHZ	INT. 3	ZAHL 3
1	1420.71	0.14	1.216	2	x				x			
2	x				x				x			
3	1420.71	0.14	1.216	2	x				x			
4	x				x				x			
5	x				x				x			
6	1420.45	0.14	0.037	2	x				x			
7	x	x	x		x				x			
8	1420.71	0.18	0.099	2	x				x			
9	1420.45	0.11	0.024	2	x				x			
10	1421.05	0.11	0.095	5	1420.45	0.11	0.04	5	x			
11	1421.31	0.14	0.082	1	1420.82	0.18	0.066	1	x			
12	1420.45	0.11	0.036	1	1420.82	0.18	0.065		x			
13	1420.45	0.35	1.266	4	x				x			

14	1420.75	0.38	1.114	3	x				x			
15	x				x				x			
16	1420.45	0.25	0.86	4	x				x			
17	1420.23	0.36	1.469	4	1419.26				x			
18	x				x				x			
19	x				x				x			
20	x				x				x			
21	x				x				x			
22	x				x				x			
23	1420.23	0.28	0.138	1	x				x			
24	1420.23	0.36	0.168	5	x				x			
25	1420.43	0.35	0.223	5	x				x			
26	1420.23	0.32	1.073	1	1419.59	0.25	1.051	2	1421.01	0.29	1.242	4
27	x				1419.74	0.25	2.803	4	x			
28	x				1419.7	0.34	1.764	4	x			
29	1420.23	0.32	0.208	4	1419.69	0.35	0.399	4	x			
30	1420.23	0.39	0.191	4	1419.74	0.22	0.052	2	x	x	x	
31	x				x				x			
32	1420.23	0.28	0.189	4	1419.59	0.21	0.177	4	1421.01	0.29	0.17	4
33	x				x				x			
34	1420.23	0.25	0.393	4	1419.65	0.36	0.103	3	1421.01	0.25	0.348	4
35	x				x				x			
36	1419.96	2.16	0.796		x				x			
37	x				x				x			
38	1419.81	2.16	0.502		x				x			
39	1420.37	0.36	0.133	2	x				x			
40	1420.37	0.36	0.092	1	x				x			
41	x				x				x			
42	x				x				x			
43	1420.37	0.36	0.119	2	x				x			
44	1420.37	0.36	0.094	1	x				x			
45	x				x				x			
46	x				x				x			
47	x				x				x			
48	1419.74	0.25	0.318		1420.86	0.17	0.093		x			
49	1420.45	0.35	0.342		x				x			
50	1420.71	0.18	0.052		x				x			
51												
52	1420.71	0.14	0.101		x				x			
53	1419.74	0.25	0.137		x				x			
54	1419.74	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	1420.71	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	1419.78	0.24	1.267		1420.87	0.36	1.125		x			
83	1419.81	0.46	2.064		1420.82	0.46	1.714		x			
84	1419.59	0.28	3.231		x				x			
85	1420.23	0.25	0.252		1420.84	0.36	0.188		x			
86	1420.98	0.39	0.154		1419.59	0.28	0.056		x			
87	1419.65	0.39	0.916		1420.82	0.43	0.813		x			
88	1420.8	0.56	1.39		1419.65	0.5	1.515		x			
89	1419.59	0.42	3.809		x				x			
90	1420.23	0.25	0.572		1420.85	0.39	0.32		x			
91	1419.59	0.35	0.098	1	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	1420.26	0.35	0.365	4	1419.74	0.32	0.114	4	x			
99	1420.43	0.35	0.345	4	1419.74	0.25	0.222	4	x			
100	1419.74	0.32	0.156	4	1420.86	0.28	0.081	1	x			
101	1419.74	0.22	0.193	4	1420.86	0.17	0.093	4	x			
102	1419.74	0.22	0.069	4	1420.86	0.24	0.074	4	x			
103	1420.86	0.17	0.101	4	1419.74	0.22	0.134	4	x			
104	1419.74	0.22	1.43	4	1420.86	0.17	0.421	4	1420.37	0.36	0.492	
105	1419.74	0.22	1.057	4	1420.86	0.24	0.42	4	1420.34	0.36	0.192	
106	x				x				x			
107	x				x				x			
108	1419.74	0.25	0.385	4	1420.86	0.28	0.29	4	1420.45	0.35	0.323	
109	1420.39	0.35	0.383	4	1419.74	0.22	0.216	4	x			
110	1419.74	0.25	0.378	4	1420.36	0.36	0.279	4	1420.86	0.21	0.082	4
111	1419.59	0.39	0.25	4	1420.86	0.17	0.124	4	x			
112	1419.74	0.22	0.387	4	1420.86	0.17	0.119	4	1420.23	0.32	0.071	1
113	1419.74	0.22	0.644	4	1420.86	0.17	0.256	4	1420.35	0.35	0.181	3
114	x				x				x			
115	x				x				x			
116	1421.42	0.43	1.243	4	x				x			
117	1421.42	0.46	1.174	4	x				x			
118												
119												
120												
121												
122	x				x				x			
123	1420.45	0.35	0.235		x				x			
124	1419.74	0.25	0.143		1420.45	0.31	0.137		x			
125	x				x				x			
126	1420.71	0.14	0.079		x				x			
127	1419.72	0.39	0.094		1420.78	0.17	0.114		1421.01	0.21	0.059	
128	x				x				x			
129	x				x				x			
130												
131	1419.74	0.22	0.468		1420.23	0.29	0.352		1420.91	0.39	0.106	
132	1420.45	0.24	0.09		1419.74	0.25	0.058		x			
133	1419.68	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	1419.74	0.22	0.603	4	1420.86	0.17	0.209	4	1420.34	0.36	0.168	1
154												
155	x				x				x			
156	x				x				x			
157												
158												
159												
160												
161	x				x				x			

## 10.7. CD

Dieser Arbeit ist eine CD beigelegt, die folgendes beinhaltet:

- Eigene Fotos und Skizzen
- *Messtabelle.pdf*
- Quellcode *radio.cpp*
- *db.txt*
- *sources.txt*
- *mittelwerte.txt*
- *normalize-fg.txt*
- *normalize-1.txt*
- Quellcode *Einlesen.cpp*
- Quellcode *Einlesen\_S.R.cpp*
- Quellcode *Einlesen\_S-R.cpp*
- Quellcode *auswertung.cpp*
- Quellcode *ampl.h*
- Quellcode *ampl.cpp*
- Quellcode *mittel.cpp*

## 11. Schlusserklärung

Ich versichere, dass ich die schriftliche Hausarbeit einschließlich evtl. beigefügter Zeichnungen, Kartenskizzen, Darstellungen u.ä.m. selbstständig angefertigt habe und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Alle Stellen, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken entnommen sind, habe ich in jedem Fall unter genauer Angabe der Quelle deutlich als Entlehnung kenntlich gemacht.

Ich bin damit einverstanden, dass diese Hausarbeit nach Abschluss meiner Ersten Staatsprüfung wissenschaftlich interessierten Personen oder Institutionen zur Einsichtnahme zur Verfügung gestellt wird und dass zu diesem Zweck Ablichtungen dieser Hausarbeit hergestellt werden, sofern diese keine Korrektur- oder Bewertungsvermerke enthalten.

Wuppertal, 7. April 2006