

Pulsarforschung und Messdatenorganisation

1. Inhalt

1. Inhalt	1
2. Einleitung	1
3. Die Pulsarmessdatenbank	1
3.1 Anforderungen	1
3.2 Funktionsumfang des Programms	2
3.3 Die neuen Pulsarrechner in Effelsberg und Bonn	4
4. Entwicklung eines Modells zur Beschreibung von Pulsaren	4
4.1 Was ist ein Pulsar ?	4
4.2 Überlegungen zu Pulsaren und ihrer Strahlung	5
4.2.1 Der Entstehungsort der Strahlung	5
4.2.2 Der Winkel zwischen Rotationsachse und Magnetfeldachse und seine Bedeutung für die Beobachtungen	6
4.2.3 Allgemeine Berechnung des Strahlungsbereiches im Magnetfeld	6
5. Untersuchung von Pulsarprofilen	7
5.1 Quellen für Messdaten	7
5.2 Vergleich der Profile eines Pulsars bei verschiedenen Wellenlängen	8
5.3 Der Strahlungskegel der Pulsare	10
5.4 Besteht ein Zusammenhang zwischen Profilbreite und Wellenlänge ?	11
5.5 Der Abstrahlungsort der einzelnen Wellenlängen	12
5.6 Wie wirkt sich der Schnitt durch den Strahlungskegel auf die Messung aus ?	15
5.7 Entstehen die Intensitätsmaxima bei verschiedenen Wellenlängen auf denselben Feldlinien? Wie wird der Strahlungskegel geschnitten?	16
5.8 Perspektiven	18
6. Eigene Bewertung des Modells	19
7. Literatur, Informationsquellen und verwendete Messungen	20
8. Danksagung	20
9. Anhang (CD)	20

2. Einleitung

Ihren Anfang fand meine Arbeit „Pulsarforschung und Messdatenorganisation“ in einem Praktikum am Max-Planck-Institut für Radioastronomie (MPIfR) in Effelsberg (Eifel) im Sommer 2002. Ich verbrachte zwei Monate am dortigen 100m-Radioteleskop.

Ich wollte diese Zeit hauptsächlich auf die Analyse von Pulsarmessungen mit dem Ziel der Entwicklung eines eigenen Modells verwenden. Dieses Pulsarmodell ist auch tatsächlich der zweite Teil meines Projektes geworden. Zu Anfang stellte sich jedoch die Messdatensuche im Pulsararchiv des MPIfR, zu dem kein zweckmäßiges Inhaltsverzeichnis existierte, als dermaßen umständlich heraus, dass ich zuerst einmal versucht habe, eine dauerhafte und effiziente Lösung für die Messdatensuche zu finden. Die optimale Lösung sah ich in einem Datenbankprogramm, welches nun der ersten Teil meiner Arbeit ausmacht.

3. Die Pulsarmessdatenbank

3.1 Anforderungen

Zu Beginn meines Praktikums bestand das Pulsarmessdatenarchiv aus über 21800 Messungen auf gut 200 CDs mit *jeweils* einer computergenerierten Textdatei als Inhaltsverzeichnis. Die

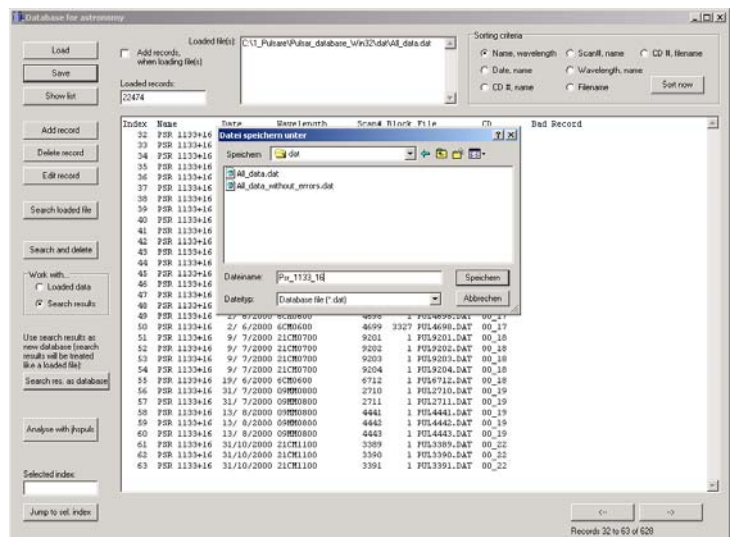
sehr zeitaufwendige Messdatensuche behinderte die Pulsarforschung, da man für die Datensuche in gut 200 Textdateien mehrere Stunden ansetzen musste.

Mein Ziel war es durch ein Datenbankprogramm, ein möglichst schnelles, einfaches Auffinden aller in der Pulsarmessdatenbank gespeicherten Messungen für alle Pulsarforscher des MPIfR dauerhaft zu ermöglichen. Das Programm muss also über eine Datenbank mit entsprechenden Informationen¹ (Fußnote beachten !) verfügen und in dieser nach flexiblen Kriterien suchen können. Auch soll es die Daten sortieren, ergänzen, korrigieren und in einem für andere Programme lesbaren Format abspeichern können. Da das Programm den Ort, an dem eine Messung gespeichert ist, kennt, bot sich an, das direkte Laden einer Messung (von CD oder Festplatte) in ein Auswertungsprogramm zu ermöglichen. Ein einfach verständliches Benutzerinterface trägt zum schnellen Auffinden der richtigen Messung(en) bei. Da das Programm nicht nur von deutschsprachigen Forschern benutzt wird, empfahl sich als Sprache Englisch. Auch war es gewünscht, dass das Programm in einer Win32-Version und einer Linux-Version verfügbar ist, da dies den Pulsarforschern des MPIfR sehr entgegen kommt.

3.2 Funktionsumfang des Programms

Hier soll aus Platzgründen nur ein recht kompakter Überblick über den Funktionsumfang des Datenbankprogramms gegeben werden. Eine ausführliche Beschreibung findet sich jedoch auf der beiliegenden CD (0_J...P..._Lang....doc).

Das Entscheidende zuerst: Das entstandene Datenbankprogramm ermöglicht es dem Forscher sich zunächst einfach und schnell einen Überblick über vorhandene Messungen zu verschaffen und diese dann zu sichten. Die vorher sehr zeitaufwendige Messdatensuche, die Stunden in Anspruch nehmen konnte, wurde jetzt auf wenige Minuten verkürzt.



Bei dem Programm handelt es sich um ein in C++ geschriebenes, englischsprachiges Datenbankprogramm mit einer Windowsversion und einer Linuxversion. Die Benutzeroberflächen für Windows und Linux stimmen so weit wie möglich überein und sind möglichst einfach und übersichtlich aufgebaut. Kleine informative Hilfetexte helfen bei der Programmsteuerung. Steuerelemente werden in Situationen, in denen sie nicht verwendet werden dürfen, versteckt oder deaktiviert, um Verwirrung zu vermeiden. Verschiedene Methoden zum Blättern und Springen in den in einem großen Fenster angezeigten Daten erleichtern die schnelle Durchsicht von großen Datenmengen. Es werden ständig Informationen über geladene Dateien und den Umfang der geladenen Datensätze angezeigt.

Als Datenquelle verwendet das Programm die computergenerierten Textdateien, die schon lange als Inhaltsverzeichnisse gedient haben. Leider können in diesen Textdateien fast alle nur denkbaren Arten von Fehlern auftreten; von ungültigen Daten über fehlende Daten bis zu Befehlszeichen im Eintrag für den Pulsarnamen kommt alles vor. Ich musste also einen Einlesealgorithmus schreiben, der in der Lage ist, mit allen denkbaren Fehlern umzugehen.

¹ Folgende Informationen zu jeder Pulsarmessung: Pulsarname, Datum der Messung (Tag, Monat, Jahr), Scannummer (Nummer der Messung), erster Block (Anfang der Messung in der Datei), Dateiname, Pfad (meist mit Wellenlängeninformation), CD-Nummer

Die Daten werden also beim Einlesen sehr gründlich untersucht, so dass einerseits der Einlesealgorithmus nicht aus der Bahn geworfen werden kann und andererseits die aller meisten Fehler automatisch erkannt werden. Wird ein Fehler erkannt, so wird der Datensatz als fehlerhaft markiert.

Hat man die Textdateien einmal eingelesen, so kann man die Daten im programmeigenen Datenbankformat (*.dat) abspeichern. Hierbei werden Informationen über Fehler in den Daten sowie Kommentare mitgespeichert. Das *.dat-Format ist zum Speichern der gesamten Datenbank und zum Speichern von Auszügen aus dieser, mit denen man noch mal weiterarbeiten möchte, gedacht. Selbstverständlich kann das Programm *.dat-Dateien auch lesen. Beim Lesen von Dateien besteht die Möglichkeit, mehrere Dateien gleichzeitig einzulesen bzw. Dateien zu vorher geladenen Dateien hinzuzuladen.

Des Weiteren bietet das Programm die Möglichkeit Daten, z.B. Suchergebnisse, in einer als Tabelle formatierten Textdatei (*.prn) abzuspeichern. Diese kann dann in anderen Programmen, wie z.B. Excel, weiterverarbeitet werden.

Um Fehler in der Datenbank zu korrigieren, bietet das Programm die Möglichkeit, einzelne Datensätze zu editieren, zu löschen oder hinzuzufügen. Beim Editieren und Hinzufügen von Datensätzen kontrolliert das Programm selbst, ob die Benutzereingaben überhaupt Sinn machen können, und weist den Benutzer auf sinnlose oder fehlende Eingaben hin.

Eine der wichtigsten Funktionen des Programms ist die Datensuche. Sie ist besonders flexibel, da sie dem Anwender erlaubt, eine beliebige Kombination von Informationen, wie z.B. Pulsarname und Wellenlänge der Messung, einzugeben. Bei Zahlenwerten wie Jahr und Scannummer² sind sogar Eingaben wie >, >=, <, <= und != (ungleich) möglich. Auch kann man als Suchkriterium angeben, ob der Datensatz offensichtliche Fehler haben darf, wobei man die Art der Fehler genauer spezifizieren kann (z.B. fehlerhaft bzgl. Name, Datum, Scannummer, ...).

Beim Suchen ist es möglich, die neuen Suchergebnisse zu den vorherigen hinzuzufügen.

Eine weitere bedeutende Funktion ist das Sortieren. Mein Programm kann die Daten nach einem primären und einem sekundären Kriterium zu sortieren, wobei für diese Sortierkriterien sieben Kombinationen zur Verfügung stehen. Für das Sortieren der Daten verwende ich die sehr effiziente Heapsort.

Eine weitere zentrale Funktion meines Programms besteht darin, eine Messung direkt an ein Messdatenanalyseprogramm („jhpuls“) weiterzugeben und dieses so zu steuern, dass es die Messkurve direkt auf den Bildschirm bringt. Dies funktioniert, wenn die betreffende Messung entweder auf der Festplatte des Computers gespeichert ist oder die CD mit der Messung im CD-ROM Laufwerk liegt. Dem Messdatenanalyseprogramm wird eine Folge von Befehlen übergeben, wobei die Standardbefehlsfolge aus einer Datei ausgelesen wird, welche vom Benutzer editiert werden kann. Bevor die Befehle an das Analyseprogramm übergeben werden, werden sie erst einmal dem Anwender vorgeschlagen und können von ihm verändert werden. Die möglichen Befehle sind in der Hilfe zu meinem Programm dokumentiert.

Nachdem einige Pulsarforscher ein großes Interesse an einer Linuxversion des Programms geäußert hatten, habe ich den ursprünglich für Windows bestimmten Quellcode so umgeschrieben, dass er auf beiden Systemen läuft. Hierzu habe ich u.a. alle betriebssystemspezifischen Befehle im Quelltext, insbesondere Formularzugriffe, in Funktionen verpackt und diese Funktionen für Windows und Linux getrennt definiert.

Zu dem Programm habe ich eine ausführliche, englischsprachige Hilfe geschrieben. Sie besteht aus einer Benutzerhilfe und einer Dokumentation über die Struktur des Programms,

² Die Messungen werden fortlaufend durchnummeriert.

damit jemand anders es bei Bedarf weiterentwickeln kann. Diese Teile der Hilfe liegen als übersichtliche HTML-Seiten mit Navigationsframe vor. Insbesondere in der Benutzerhilfe wird der Text durch zahlreiche Illustrationen unterstützt. Der Benutzer wird auch durch sehr viele erklärende Kommentare im Programm selbst unterstützt. Für Programmierer finden sich neben der HTML-Dokumentation etliche Kommentare im Quelltext (~30% des Quelltextes).

3.3 Die neuen Pulsarrechner in Effelsberg und Bonn

Als das Pulsardatenbankprogramm „endlich“ fertig war, habe ich einen Computer am MPIfR in Effelsberg, welcher extra zu diesem Zweck mit zwei 160 GB Festplatten ausgestattet wurde, als Pulsarrechner eingerichtet, d.h. ich habe sowohl die Win32-Version als auch die Linux-Version des Pulsardatenbankprogrammes eingerichtet und einen großen Teil der Pulsarmessdaten auf ihn überspielt. Zusätzlich habe ich noch eine Recovery-CD hinterlassen. Die Pulsargruppe zeigte sich von dieser neuen Möglichkeit des viel schnelleren Zugriffs auf Pulsarmessdaten sehr angetan. Man äußerte bald auch am MPIfR in Bonn sehr großes Interesse an einem zweiten derartigen Pulsarrechner, der auch die Arbeit der dortigen Mitgliedern der Pulsargruppe effizienter gestalten soll: weniger Suche, mehr Forschung! Im März/April 2003 habe ich in Effelsberg auch an der Fertigstellung des Pulsarrechners für Bonn gearbeitet. Er soll dort in Kürze zur Verfügung stehen.

4. Entwicklung eines Modells zur Beschreibung von Pulsaren

4.1 Was ist ein Pulsar ?

Bei einem Pulsar handelt es sich um einen Neutronenstern. Ein Neutronenstern hat eine extrem hohe Dichte. Seine Masse liegt zwischen 1 und 1,4 Sonnenmassen bei einem Durchmesser von nur 10 bis 20 km.

Ein Neutronenstern ist der Endzustand der Entwicklung eines Sterns, dessen Anfangsmasse zwischen 6 und 10 Sonnenmassen lag. Nachdem ein solcher Stern in einem Nebel geboren wurde, findet in ihm erst einmal für ca. 1 Mrd. Jahre die Fusion von Wasserstoff (H) zu Helium (He) statt. Dann sind die Wasserstoffvorräte erschöpft und der Stern beginnt Helium zu schwereren Elementen zu fusionieren. Hierbei nimmt sein Volumen um ein Vielfaches zu. In diesem Zustand wird er Roter Riese genannt. Wenn auch die Heliumvorräte erschöpft sind, kommt es zu einer gigantischen Explosion, einer Supernova, bei der die äußeren Schichten des Roten Riesen ins All geschleudert werden. Die inneren Schichten kollabieren unter ihrer eigenen Schwerkraft, weil sie keinen ausreichenden, der Schwerkraft entgegenwirkenden thermischen Druck mehr erzeugen können. Die Schwerkraft wirkt so stark, dass die Elektronen und Protonen zu Neutronen zusammengequetscht werden und eine Art gigantischer Atomkern entsteht, der fast nur aus Neutronen besteht. Dieser sogenannte Neutronenstern hat einen Durchmesser von nur 10 bis 20 km.

Da bei dem Kollabieren des Sterns das Magnetfeld erhalten bleibt, während das Volumen sich extrem verkleinert, wird das Magnetfeld des Neutronensterns extrem stark.

Auch der Drehimpuls bleibt erhalten. Für ihn gilt:
$$L = J \cdot \omega = \omega \int r^2 dm = konst.$$

Wenn der Radius des Sterns sehr klein wird, dann verkleinert sich der Wert des Integrals $\int r^2 dm$ gravierend. Aufgrund der Konstanz des Drehimpuls muss also die Winkelgeschwindigkeit sehr stark zunehmen, d.h. der Neutronenstern muss sehr schnell rotieren.

Pulsar nennt sich ein Neutronenstern, wenn von ihm Radiosignale ausgehen, die sich bei Messungen in zeitlich kurzen, regelmäßigen Abständen wiederholen.

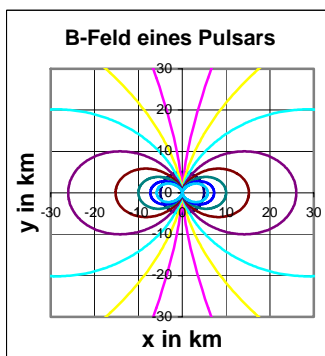
4.2 Überlegungen zu Pulsaren und ihrer Strahlung:

4.2.1 Der Entstehungsort der Strahlung

Als erste Arbeitsgrundlage erhielt ich von meinem Betreuer den Hinweis, man gehe davon aus, dass die von Pulsaren kommende **Strahlung durch Ladungsträger erzeugt wird, die sich entlang der Magnetfeldlinien des Pulsars bewegen und dass die Strahlung tangential zu diesen Feldlinien abgestrahlt wird.**^{Q1}

Beim Magnetfeld eines Pulsars handelt es sich um das Magnetfeld eines Dipols. Es wird durch folgende Formel^{Q1} beschrieben (in Polarkoordinaten):

$$r(\theta) = r_* \frac{\sin^2 \theta}{\sin^2 \theta_*} \quad \begin{array}{l} r, \theta = \text{Polarkoordinaten eines Punktes auf einer Feldlinie} \\ r_* = \text{Radius bis zur Pulsaroberfläche} \\ \theta_* = \text{Polarkoordinate (Winkel) eines Schnittpunktes von Feldlinie \& Pulsaroberfläche} \end{array}$$



Einige Feldlinien eines Pulsarmagnetfeldes

Da das Magnetfeld mit dem Pulsar rotiert, ist die Rotationsgeschwindigkeit einer Feldlinie der Entfernung von der Rotationsachse proportional. In ausreichender Entfernung von der Rotationsachse muss es also Feldlinien geben, die bei klassischer Betrachtung die Lichtgeschwindigkeit durchbrechen müssten. Betrachten wir nun Ladungsträger, die sich entlang einer solchen Feldlinie bewegen, so müssen diese eine extrem hohe kinetische Energie erreichen (relativistische Effekte!). Es liegt nahe zu vermuten, dass diese Ladungsträger so hochenergetisch werden, dass sie aus dem sehr starken Magnetfeld des Pulsars ausbrechen und ins All davonfliegen. **Dieser Effekt würde einen Ladungsträgerfluss (Strom) entlang der Feldlinien, welche bei klassischer Betrachtung die Lichtgeschwindigkeit mindestens erreichen würden³, verursachen. Da beschleunigte Ladungen (krumme Feldlinien !) bekanntlich strahlen, könnte auf diese Weise Synchrotronstrahlung entstehen.** Dieser Effekt kann eine Strahlungsursache sein; es kann jedoch noch weitere Effekte geben, welche Strahlung verursachen.

Wenn man einen Pulsar beobachtet, misst man schnell aufeinanderfolgende, kurze, regelmäßige Pulse, die sich nach Sekunden oder gar Millisekunden wiederholen. Wenn man nun die sehr schnelle Rotation der Pulsare berücksichtigt (Begründung: siehe 4.1), dann liegt es nahe zu vermuten, dass **der Pulsar nur in wenige Richtungen strahlt und bei jeder Umdrehung die Erde nur einmal/zweimal/... trifft. Immer wenn sich die Pulse wiederholen, ist eine Umdrehung (Periode) vorbei.**

Führt man nun die obigen (fettgedruckten) Vermutungen zusammen, so muss man fragen, wo die beobachtete Strahlung entstehen kann. Da Pulsare offensichtlich nur in wenige Richtungen strahlen und man relativ zur Rotationsperiode kurze Strahlungspulse misst, muss es sich um verhältnismäßig kleine Regionen im Magnetfeld handeln. Bereiche, die sich bei klassischer Betrachtung mit Überlichtgeschwindigkeit bewegen müssten, scheiden aus, da sich dort keine Ladungsträger auf den Feldlinien bewegen können. Feldlinien, die klassisch nie die Lichtgeschwindigkeit c erreichen, kommen auch nicht in Frage, da Pulsare in diesem Fall in fast alle Richtungen strahlen müssten. Es bleibt die Region über den Magnetpolen des Pulsars. Hier befindet sich der Bereich auf den klassisch die Lichtgeschwindigkeit c überschreitenden Feldlinien, welcher c noch nicht überschritten hat. Wird Strahlung über den Magnetpolen eines Pulsars tangential zu den Feldlinien abgestrahlt, so erhält man zwei recht schmale **Strahlungskegel**, welche eine plausible Erklärung dafür liefern, dass man kurze

³ Vermutung: Hierbei könnte es sich um die Emissionsregion der Strahlung handeln.

Strahlungspulse mit relativ langen Pausen misst. Die hier bestimmte Strahlungsregion stimmt mit der für Synchrotronstrahlung zu erwartenden Region überein.

Fazit: Die Pulsarstrahlung wird von Ladungsträgern erzeugt, die sich entlang der Feldlinien bewegen, die die Lichtgeschwindigkeit c , klassisch betrachtet, überschreiten müssten. Die Strahlung entsteht in dem Bereich dieser Feldlinien, der c – klassisch – noch nicht überschritten hat. Dieser Bereich befindet sich über den Magnetpolen des Pulsars. Die von diesen Regionen ausgehende Strahlung breitet sich kegelförmig aus.

4.2.2 Der Winkel zwischen Rotationsachse und Magnetfeldachse und seine Bedeutung für die Beobachtungen

Pulsare strahlen immer in Richtung ihrer Magnetfeldachse. Sind Rotations- und Magnetfeldachse identisch, so zeigen die Strahlungskegel immer in dieselbe Richtung. Ein relativ zum Pulsar ruhender Beobachter wäre somit entweder nie im Strahlungskegel, wodurch der Pulsar unsichtbar würde, oder er wäre immer im Kegel, wo er aber auch keine pulsierende Strahlung messen würde; es wäre höchstens das Messen von periodischen Intensitätsschwankungen aufgrund einer leichten Asymmetrie des Strahlungskegels denkbar.

Stehen Rotations- und B-Feldachse senkrecht aufeinander, so misst der Beobachter entweder beide Strahlungskegel oder gar keinen. Misst der Beobachter den Pulsar, so sieht er ihn pro Rotationsperiode zweimal. Nur wenn beide Achsen senkrecht aufeinander stehen entspricht die Messung des Beobachters einem geraden Kegelschnitt; dieser muss nicht zentral sein.

Haben Rotations- und Magnetfeldachse irgendeinen anderen Winkel zueinander, so misst der Beobachter einen kreisbogenförmigen Schnitt durch höchstens einen Strahlungskegel. Je kleiner der Winkel zwischen den Achsen, desto gekrümmter der Schnitt.

Die aus dem Schnitt durch den Strahlungskegel resultierenden Verzerrungen sollten bei der Messungsauswertung unbedingt berücksichtigt werden.

4.2.3 Allgemeine Berechnung des Strahlungsbereiches im Magnetfeld

Der Bereich, in dem die Strahlung entsteht, wird durch die Feldlinie begrenzt, die bei maximaler Entfernung von der Rotationsachse, klassisch betrachtet, gerade die Lichtgeschwindigkeit erreicht.

$$\text{Für alle Feldlinien gilt: } r(\theta) = r_* \frac{\sin^2 \theta}{\sin^2 \theta_*}$$

Stimmen Magnetfeld- und Rotationsachse überein, so erreicht jede Feldlinie ihren größten Abstand von der Rotationsachse, wenn $\theta = 90^\circ$ erreicht, denn dann wird $\sin^2 \theta$ maximal (1).

Also gilt für den größten Radius und damit für die größte Rotationsgeschwindigkeit:

$$r_{\max} = r(90^\circ) = \frac{r_*}{\sin^2 \theta_*} \quad \text{mit} \quad v_{\max} = \omega \cdot r_{\max} \quad \text{und} \quad \omega = \frac{2\pi}{T}$$

Es folgt für die maximale Rotationsgeschwindigkeit einer Feldlinie: $v_{\max} = \frac{2\pi \cdot r_*}{T \cdot \sin^2 \theta_*}$

Für die gesuchte Feldlinie gilt $v_{\max} = c$; es folgt: $c = \frac{2\pi \cdot r_*}{T \cdot \sin^2 \theta_*} \rightarrow \sin^2 \theta_* = \frac{2\pi \cdot r_*}{T \cdot c}$

Setzt man nun in die Feldliniengleichung $r(\theta) = r_* \frac{\sin^2 \theta}{\sin^2 \theta_*}$ ein, so erhält man mit $r(\theta) = \frac{T \cdot c \cdot \sin^2 \theta}{2\pi}$

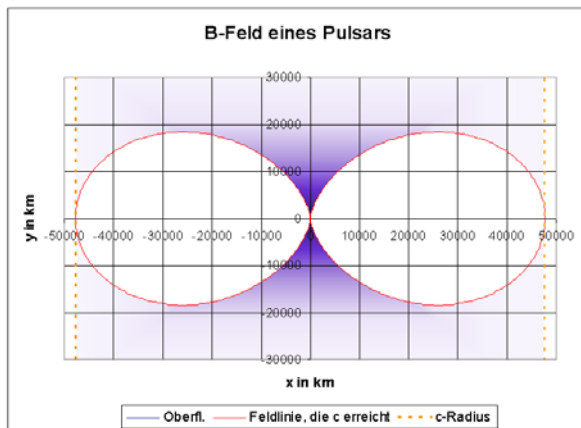
die Feldliniengleichung der Feldlinie eines Pulsars, die die Lichtgeschwindigkeit, klassisch betrachtet, so gerade erreicht, wenn Magnetfeld- und Rotationsachse des Pulsars übereinstimmen. Stimmen diese Achsen nicht überein, so ist der berechnete Radius der gesuchten Feldlinie bei der obigen Formel jedoch immer um einen konstanten Faktor k ,

welcher vom Winkel φ zwischen Rotations- und Magnetfeldachse abhängt, zu klein. Dieser Faktor k kann Werte zwischen 1 und 2,6 annehmen.

Die Feldliniengleichung der Feldlinie eines Pulsars, die die Lichtgeschwindigkeit, klassisch betrachtet, so gerade erreicht:

$$r(\theta) = k(\varphi) \cdot \frac{T \cdot c \cdot \sin^2 \theta}{2\pi}$$

mit $\varphi = \angle(\text{Achse}_{\text{Rot}}, \text{Achse}_{\text{Mag}})$ $1 = k(0^\circ) \leq k(\varphi) \leq k(90^\circ) \approx 2,6$



Setzt man die Periodendauer $T = 1\text{s}$ und für $k = 1$, so erhält man die rote Feldlinie im linken Diagramm, die die Strahlende Region begrenzt. Die gelbe, gestrichelte Linie markiert den Abstand von der Rotationsachse y , ab dem die Lichtgeschwindigkeit c überschritten werden müsste. Die Strahlung kann, nach den bisherigen Erkenntnissen überall im violetten Bereich entstehen. Da die Strahlungspulse im allgemeinen schmal sind, liegt der Entstehungsort

φ	$k(\varphi)$
0°	1
$30,5^\circ$	1,1
$41,5^\circ$	1,2
45°	1,24
$61,5^\circ$	1,5
$78,2^\circ$	2
90°	2,6

Hier einige Orientierungswerte für $k(\varphi)$

der Strahlung vermutlich im dunkelvioletten Bereich.

Der Pulsar ist so klein, dass er bei diesem Maßstab nicht sichtbar ist (Radius 5-10 km).

5. Untersuchung von Pulsarprofilen

Nachdem ich mit einfachen Informationen über Messungen und theoretischen Überlegungen das Modell soweit entwickelt hatte, dass ich begründete Aussagen über den Strahlungsentstehungsort machen konnte, erschien es mir sinnvoll, mein Modell anhand von Messungen zu prüfen und weiterzuentwickeln.

5.1 Quellen für Messdaten:

Die naheliegendste Messdatenquelle war das Pulsararchiv des MPIfR in Effelsberg, wo ich Zugriff auf alle Pulsarmessungen (seit 1991) des dortigen 100m-Radioteleskops habe. **Bei der Messdatensuche war jetzt das von mir entwickelte Pulsarmessdatenbankprogramm äußerst hilfreich; es ersparte mir viel mühsames, zeitaufwendiges Suchen.** Ich entschied mich dafür zwei Pulsare zu untersuchen, von denen viele Messungen bei vielen verschiedenen Wellenlängen verfügbar waren: PSR 1133+16 und PSR 0329+54. Zur Berechnung der Pulsarprofile aus den Rohdaten verwendete ich das Programm jhspuls. Die Profile habe ich dann entweder zur zeichnerischen Auswertung ausgedruckt oder nach Excel exportiert.

In der Datenbank fand ich 604 Einträge zu PSR 1133+16 und 548 Einträge zu PSR 0329+54. Dies klingt nach vielen Messungen, aber da jede Messung aufgezeichnet wird, sind auch viele Fehlmessungen dabei, die nur Rauschen enthalten. Oft muss man sich 10 oder 15 Messungen anschauen, bevor man eine gute Messung findet. Die Messungen aus dem Wellenlängenbereich 30cm bis 2,8cm und eine 9mm Messung habe ich aus dem Effelsberger Pulsararchiv.

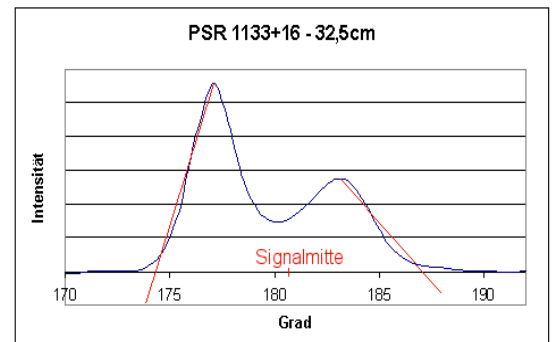
Da es mir sinnvoll erschien, auch größere Wellenlängen zu untersuchen, habe ich auch Pulsarprofile des *European Pulsar Archive*, welches auf der Homepage des MPIfR Bonn frei zugänglich ist, verwendet (Wellenlängen 2,92m bis 32,5cm und 9mm). Die Adresse lautet: <http://www.mpifr-bonn.mpg.de/div/pulsar/data/>. Zur graphischen Auswertung habe ich die aus Zeit- und Intensitätsinformationen bestehenden Daten in Excel dargestellt und ausgedruckt.

Eine Auflistung der verwendeten Messungen befindet sich in Kapitel 7.

5.2 Vergleich der Profile eines Pulsars bei verschiedenen Wellenlängen

Betrachtet man das Profil eines Pulsars bei verschiedenen Wellenlängen, so fällt auf, dass in den Messungen ein oder mehrere auffällige Peaks vorkommen, die man meist bei allen Wellenlängen wiederfindet. Es liegt nahe zu untersuchen, ob sich die Breite und die Form dieser Peaks mit der Wellenlänge verändert. Hierzu ordnet man am besten alle verfügbaren Messungen zum Vergleich genau übereinander an. Man muss also die Signalmitte möglichst genau bestimmen, z.B. folgendermaßen:

Man zeichnet eine Gerade von der Spitze des linken Peaks nach links durch die Grad-Achse, so dass die Peakfläche über der Geraden mit der nicht-Peakfläche unter der Geraden übereinstimmt. Mit dem rechten Peak verfährt man analog. Die Mitte zwischen den Schnittpunkten mit der Grad-Achse ist die Signalmitte. Der Schnittpunkt-Abstand ist die Profiltbreite. Dieses Verfahren hat gegenüber dem Versuch, den Übergangspunkt vom Signal zum Rauschen zu finden, den Vorteil, dass die Übergänge auch noch bei starkem Rauschen recht genau bestimmbar sind.

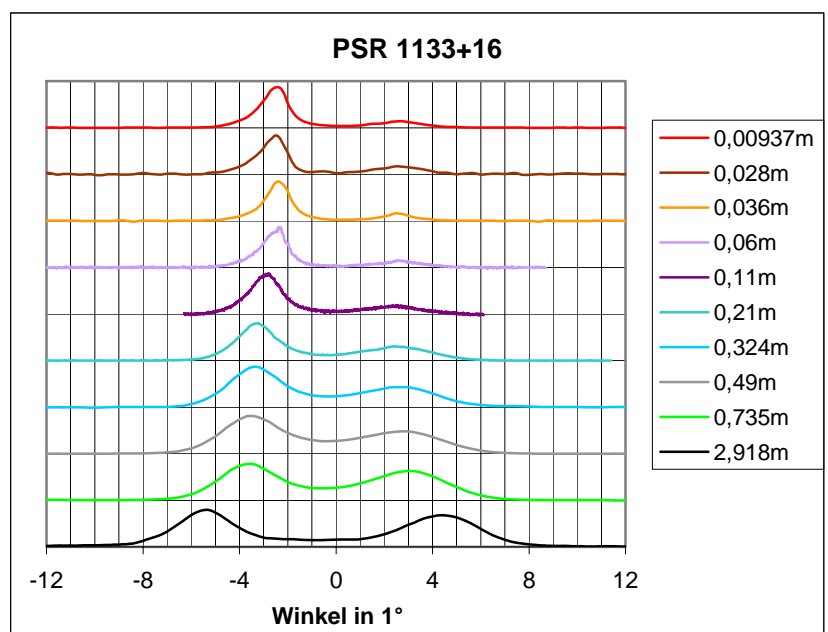


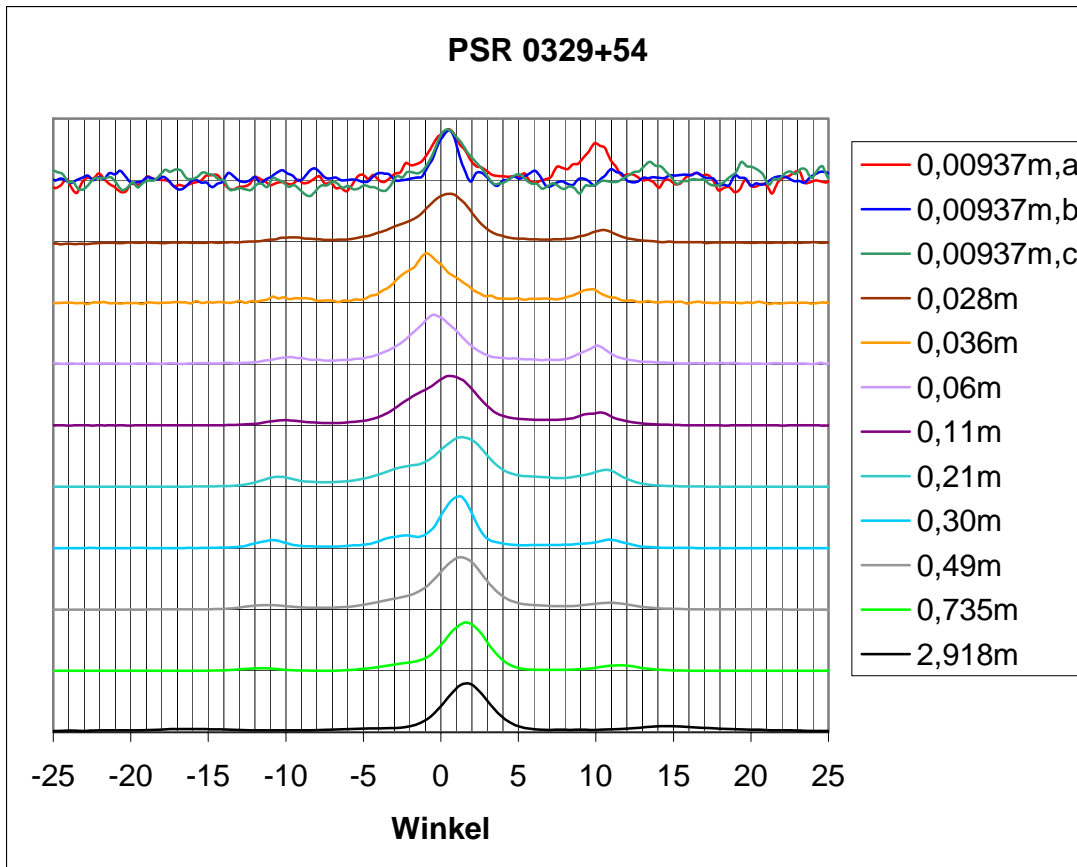
Die Verwendung von Grad - anstatt der Zeit - auf der Längswertachse hat folgenden Grund:

Bis sich das Signal wiederholt, dreht sich der Pulsar einmal um 360° , d.h. eine Periode entspricht einer Rotation. Folglich entspricht $1/360$ der Periodendauer einer Rotation um ein Grad. Man kann also aus Zeit und Periodendauer leicht berechnen, wie weit sich der Pulsar bei einem bestimmten Messwert gedreht hat. Gibt man nun statt der Zeit diesen Winkel an, dann kann man leicht ablesen, um wie viel Grad sich der Pulsar von Anfang bis Ende des Signals dreht. Dieser Wert lässt sich leicht mit anderen Pulsaren vergleichen und er lässt, wie später gezeigt werden wird, auch Rückschlüsse auf den Entstehungsort der Strahlung zu.

Bestimmt man nun mit der oben beschriebenen zeichnerischen Methode die Signalmitte bei Messungen des Pulsars PSR 1133+16 für verschiedene Wellenlängen und setzt für die Signalmitte 0° , dann erhält man das folgende Diagramm, bei dem auffällt:

1. Das Signal hat bei allen Wellenlängen dieselbe Grundstruktur: zwei Peaks.
2. Bei 2,918m sind beide Peaks fast gleich groß. Mit kürzerer Wellenlänge wird der rechte Peak relativ zum linken bis 6cm flacher und scheint dann wieder etwas zu wachsen.
3. Das Tal zwischen den Peaks wird mit kürzerer Wellenlänge tiefer. Bei 11cm und kürzer liegt in diesem Tal ein Bereich, in dem kaum Strahlung gemessen werden kann.
4. Das Signal scheint mit kürzerer Wellenlänge schmaler zu werden. Hier passen die 2,8cm-Messung und die 9mm-Messung jedoch nicht ganz ins Bild.





Um mich nicht durch Besonderheiten eines Pulsars in die Irre führen zu lassen, habe ich dieselbe Untersuchung für den Pulsar PSR 0329+54 gemacht.

Die horizontale Position der 9,37mm-Messungen musste wegen Rauschens geschätzt werden.

Es sind Unterschiede zu PSR 1133+16, aber auch Gemeinsamkeiten zu erkennen:

1. Es ist immer dieselbe Grundstruktur aus drei Peaks erkennbar (Ausnahme 9mm).
2. Der mittlere Peak ist immer eindeutig der stärkste.
3. Der rechte Peak wird mit kürzeren Wellenlängen stärker, der linke Peak ist immer relativ schwach; er erreicht sein relatives Maximum bei einer Wellenlänge von 30cm.
4. Auch hier scheinen die Signale mit kürzerer Wellenlänge schmaler zu werden. Die Signalbreite der 2,8cm-Messung passt auch hier nicht ganz ins Bild.
5. Interessanterweise deutet sich bei der 73,5cm-Messung links neben dem Hauptpeak ein Zusatzpeak an. Dieser wird mit kürzerer Wellenlänge deutlicher, wächst und verschmilzt dann mit dem Hauptpeak, wodurch dieser etwas nach links rutscht (insbesondere bei 3,6cm). Bei 2,8cm wird der Zusatzpeak wieder schwächer, die Peaks trennen sich wieder und der Hauptpeak rutscht zurück nach rechts.
6. Bei 9mm beobachtet man, trotz starken Rauschens, einen weiteren Effekt. PSR 0329+54 hat bei 9mm drei verschiedene Profile. Meinem Betreuer, Herrn Dr. Jessner, zufolge treten diese Profile wechselnd auf und nennen sich „Pulsarmoden“.^{Q1}
7. Das Signal von PSR 0329+54 ist viel breiter als das von PSR 1133+16.

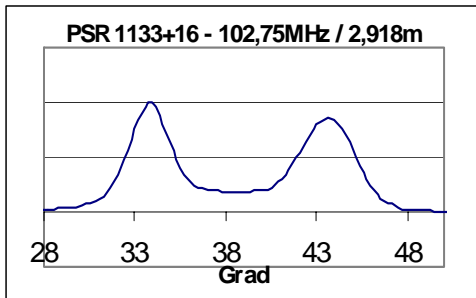
Das starke Rauschen bei den 9mm-Messungen hat verschiedene Gründe:

1. Pulsare strahlen bei kurzen Wellenlängen weniger stark.^{Q1}
2. Bei kurzen Wellenlängen ist die Empfangsfläche des Teleskops kleiner.^{Q1}
3. Bei kurzen Wellenlängen sind die Empfänger weniger empfindlich.^{Q1}

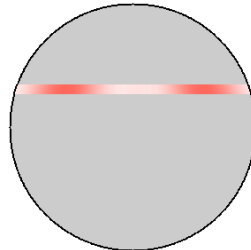
Da die 9mm-Messung von PSR 1133+16 nicht verrauscht ist, muss er entweder eine deutlich stärkere 9mm-Quelle als PSR 0329+54 sein, oder das Profil ist aus viel mehr Einzelpulsen gemittelt worden. Natürlich beeinflusst auch das Wetter die Messungsqualität entscheidend.

5.3 Der Strahlungskegel der Pulsare:

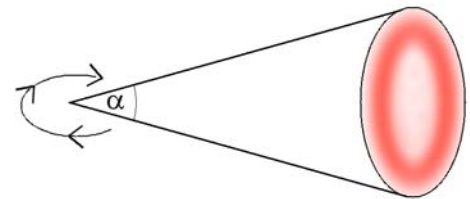
Wenn der Strahlungskegel eines Pulsars über die Erde streift, dann erhält man bei einer Messung einen Schnitt durch den Kegel. Da die obigen Messungen einer Klappsymmetrie recht nahe kommen, kann man davon ausgehen, dass bei einem Schnitt senkrecht zur Kegelachse bei gleichem Abstand zum Schnittpunkt ähnliche Intensitäten zu beobachten sind. Dies lässt sich gut an einem Beispiel nachvollziehen:



Die 2,918m-Messung des Pulsars PSR 1133+16.



Bei dieser Messung könnte es sich um diesen Schnitt durch den Strahlungskegel von PSR 1133+16 handeln.



Nach obiger Schlussfolgerung müsste der Strahlungskegel des Pulsars PSR 1133+16 für die Wellenlänge 2,918m so aussehen.

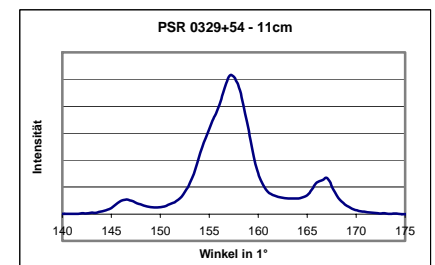
Da man der **einzelnen** Messung nicht ansieht, wie der Strahlungskegel geschnitten wurde, kann man ein weiteres Maximum im Zentrum des Kegels nicht mit Sicherheit ausschließen; man kann aber davon ausgehen, dass im äußeren Bereich des Kegels ein hohlkegelförmiger Bereich existiert, in dem die 2,918m-Strahlung besonders intensiv ist. Auf den Schnitt durch den Strahlungskegel von PSR 1133+16 wird in Kapitel 5.7 noch genauer eingegangen.

Die Pulsprofilbreite in Grad, die sich wie in Kapitel 5.2 beschrieben aus den Messungen ermitteln lässt, stimmt mit dem Winkel α in der obigen Zeichnung überein, wenn die Messung ein gerader, zentraler Schnitt durch den Strahlungskegel ist. Da sich die Profilbreite mit der Wellenlängen ändert, ändert sich auch der Winkel α mit der Wellenlänge. Man kann also jeder Wellenlänge einen eigenen Strahlungskegel zuordnen, mit eigenem Winkel α und eigener Anordnung der (Hohl-)Kegel besonders hoher Intensität. Den gesamten Strahlungskegel kann man sich als eine Vielzahl ineinandergeschachtelter Kegel vorstellen. Nach der in Kapitel 5.2 gemachten Beobachtung, dass kurzwelligere Strahlung schmalere Profile hat, werden die kurzwelligeren Strahlungskegel von den langwelligeren umhüllt.

Geht man davon aus, dass die Strahlung tangential zu den Feldlinien abgestrahlt wird, dann folgt, dass der Winkel zwischen den äußersten strahlenden Feldlinien in der Strahlungsregion mit dem Winkel α übereinstimmt. (Wichtig für Bestimmung der Strahlungsregion !)

Ein weiteres Beispiel für einen Strahlungskegel:

Wenn die kurzwelligeren Strahlungskegel im Zentrum des gesamten Strahlungskegels liegen, dann ist das Beobachten derselben Struktur in der Mitte der Messung bei kurz- und langwelligeren Messungen ein Indiz für einen relativ zentralen Schnitt durch den Gesamtkegel. Handelte es sich um einen Schnitt am Rand des Strahlungskegels, dann würde man nur die langwelligeren, aber nicht die kurzwelligeren Strahlungskegel schneiden. Man würde keine kurzwellige Strahlung oder - bei einem Berühren eines kurzwelligen Kegels - ein sich im kurzwelligen Bereich stark veränderndes Profil messen.



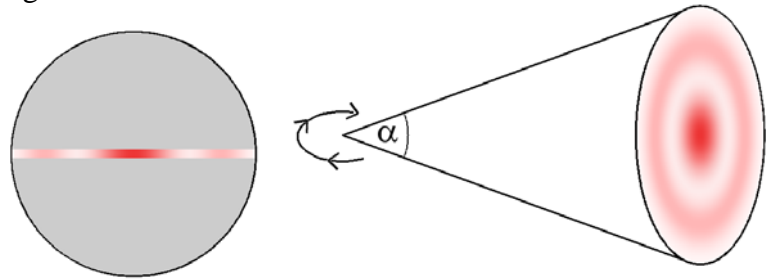
Die 11cm-Messung des Pulsars PSR 0329+54.

Da der starke Peak in der Mitte des Profils bei allen gemessenen Wellenlängen von PSR 0329+54 zu beobachten ist (siehe Kapitel 5.2), wird es sich in diesem Fall um einen Schnitt durch den zentralen Bereich des Strahlungskegels handeln. Auf den Schnitt durch den Kegel

von PSR 0329+54 wird in Kapitel 5.7 noch genauer eingegangen. Alle möglichen Strahlungskegelschnitte werden in Kapitel 5.6 genau beschrieben.

Links: Ein Schnitt durch den Strahlungskegel, dem die 11cm-Messung von PSR 0329+54 entsprechen könnte.

Rechts: So könnte der Strahlungskegel des Pulsars PSR 0329+54 bei der Wellenlänge von 11cm aussehen.



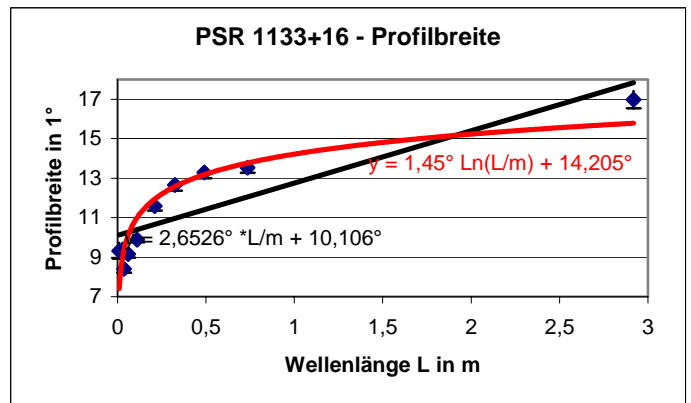
5.4 Besteht ein Zusammenhang zwischen Profilbreite und Wellenlänge ?

In Kapitel 5.2 ist aufgefallen, dass die Profile bei kürzeren Wellenlängen kürzer zu sein scheinen als bei langwelliger Strahlung. Um Existenz und Art eines Zusammenhangs zwischen Profilbreite und Wellenlänge zu untersuchen, macht es Sinn, erst einmal die Profilbreite bei den einzelnen Wellenlängen zu bestimmen und in ein Diagramm zu zeichnen. Das verwendete Verfahren zur Bestimmung der Profilbreite ist in Kapitel 5.2 erklärt. Für PSR 1133+16 erhält man mit ihm die in der Tabelle aufgeführten Ergebnisse.

Wellenlänge	Pulsbreite	zeichnerischer Fehler
0,00937 m	9,32°	+/- 0,4 °
0,028 m	9,32°	+/- 0,4 °
0,036 m	8,41°	+/- 0,2 °
0,06 m	9,15°	+/- 0,17°
0,11 m	9,88°	+/- 0,12°
0,21 m	11,58°	+/- 0,22°
0,324 m	12,65°	+/- 0,28°
0,491 m	13,29°	+/- 0,3 °
0,735 m	13,53°	+/- 0,26°
2,918 m	16,98°	+/- 0,44°

Versucht man die Messpunkte durch eine Gerade anzunähern, so kommt man noch zu keinem überzeugenden Ergebnis. Versucht man dies jedoch mit einer logarithmischen Funktion (rote Kurve), so zeigt sich, dass fast alle Messpunkte durch folgende Funktion gut angenähert werden.

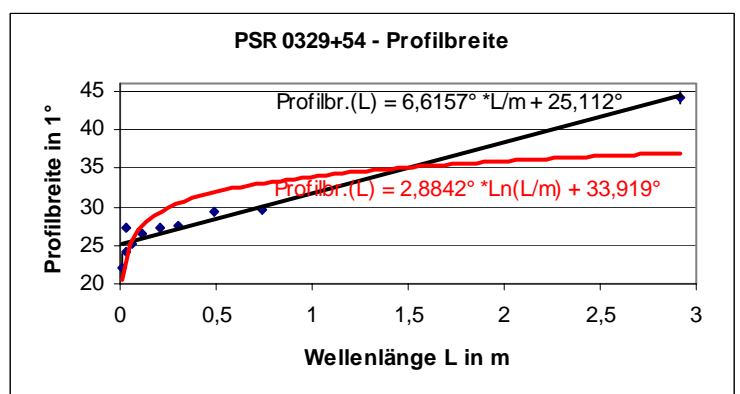
$$\alpha(\lambda) = 1,45^\circ \cdot \ln\left(\frac{\lambda}{m}\right) + 14,205^\circ$$



Es scheint offensichtlich einen Zusammenhang zwischen Profilbreite und Wellenlänge zu geben.

Um festzustellen, ob eine ln-Funktion die Abhängigkeit von Wellenlänge und Profilbreite wirklich gut beschreibt, habe ich dieselbe Untersuchung noch für PSR 0329+54 durchgeführt:

Wellenlänge	Pulsbreite	zeichnerischer Fehler
0,00937m	22,2 °	+/- 1,8°
0,028 m	27,33°	+/- 0,4°
0,036 m	24,18°	+/- 0,4°
0,06 m	25,29°	+/- 0,43°
0,11 m	26,58°	+/- 0,47°
0,21 m	27,39°	+/- 0,4°
0,3 m	27,51°	+/- 0,4°
0,492 m	29,24°	+/- 0,5°
0,735 m	29,55°	+/- 0,5°
2,918 m	44,25°	+/- 0,75°



Die Näherung als Gerade:

$$\alpha(\lambda) = 6,6157^\circ \cdot \frac{\lambda}{m} + 25,112^\circ$$

Die Näherung mit einer logarithmischen Funktion:

$$\alpha(\lambda) = 2,8842^\circ \cdot \ln\left(\frac{\lambda}{m}\right) + 33,919^\circ$$

Bei PSR 0329+54 wird die Abhängigkeit von Profilbreite und Wellenlänge recht gut durch eine Gerade beschrieben; die ln-Näherung beschreibt den Zusammenhang nur bei den

kürzesten Wellenlängen besser, weicht aber bei größeren Wellenlängen durch das breite 2,918m-Profil sehr stark ab.

Es liegt nahe zu vermuten, dass die Funktion $\alpha(\lambda)$, die den Winkel α an der Strahlungskegelspitze in Abhängigkeit von der Wellenlänge beschreibt, immer vom selben Typ ist. Die Beobachtung, dass verschiedene Funktionstypen Profilbreite und Wellenlänge verknüpfen, könnte durch Messungen, die verschiedenartige Schnitte durch den Strahlungskegel darstellen, erklärt werden. Es ist also zu erwarten, dass für verschiedene Strahlungskegelschnitttypen verschiedene Näherungsfunktionen $\alpha(\lambda)$ zu beobachten sind.

Eine Gleichung $\alpha(\lambda)$, die Wellenlänge und Profilbreite verknüpft, hat folgende Vorteile:

1. Sie ermöglicht es, für nicht gemessene Wellenlängen die Profilbreite vorherzusagen.
2. Da die Profilbreite bei einem zentralen, geraden Strahlungskegelschnitt gleich dem Winkel an der Kegelspitze ist, kann man mit einer Gleichung $\alpha(\lambda)$ den Kegel für jede einzelne Wellenlänge viel besser beschreiben. Kennt man den Strahlungskegelschnitt, dann kann man den Winkel an der Kegelspitze aus der Profilbreite berechnen.
3. Da der Winkel an der Strahlungskegelspitze mit dem Winkel zwischen den äußeren, strahlenden Feldlinien (B-Feld, siehe auch Kapitel 4.2.1 & 4.2.3) übereinstimmt, kann man mit einer Gleichung $\alpha(\lambda)$ Aussagen über den Abstrahlungsort einer Wellenlänge machen. Entsprechende Berechnungen finden sich in Kapitel 5.5.

5.5 Der Abstrahlungsort der einzelnen Wellenlängen:

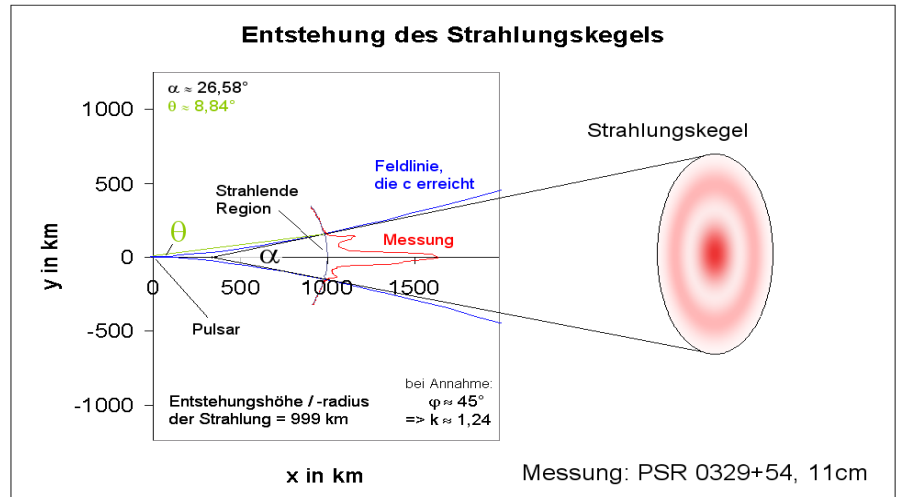
Die Bestimmung der genauen Abstrahlungsregion der einzelnen Wellenlängen setzt folgende Annahmen und Erkenntnisse voraus:

1. Die Strahlung entsteht in dem Bereich der - klassisch betrachtet - die Lichtgeschwindigkeit überschreitenden Feldlinien, welcher die Lichtgeschwindigkeit noch nicht erreicht hat (siehe 4.2.1 & 4.2.3).
2. Die Strahlung wird tangential zu den Feldlinien abgestrahlt.
3. **Annahme:** Das gesamte Profil wird in einem Abstand vom Pulsarmittelpunkt (Höhe) abgestrahlt. **Ohne diese Annahme** kann man die Abstrahlungshöhe nur für die Profilränder bestimmen.
4. **Annahme:** Es handelt sich bei den Messungen um gerade, zentrale Strahlungskegelschnitte. **Ohne diese Annahme** lässt sich, ohne Kenntnis des genauen Schnittes, kein genauer Abstrahlungsort angeben. Je nach Schnitt treten verschiedene Verzerrungen der Profilbreite auf. Auf die Fehler, die für die Berechnung des Abstrahlungsortes aus diesen Verzerrungen folgen, wird in Kapitel 5.6 eingegangen.

Wenn die Strahlung tangential zu den Feldlinien abgestrahlt wird, dann entspricht der Winkel α zwischen den äußeren Strahlen des Strahlungskegels dem Winkel zwischen den äußeren Feldlinien des Abstrahlungsbereiches. Wenn jetzt die äußeren Feldlinien des Abstrahlungsbereiches mit den Feldlinien übereinstimmen, die bei klassischer Betrachtung die Lichtgeschwindigkeit c bei ihrer größten Entfernung von der Rotationsachse gerade erreichen (Berechnung der Feldliniengleichung: siehe 4.2.3), dann findet die Abstrahlung in dem Abstand vom Pulsarmittelpunkt statt, in dem der Winkel zwischen diesen Feldlinien (in einer Magnetfeldachsebene) mit dem Winkel α des Strahlungskegels übereinstimmt.

Die folgende Zeichnung zeigt, in welchem Abstand zum Pulsarmittelpunkt der 11cm-Strahlungskegel von PSR 0329+54 entsteht. Die Randstrahlen des Kegels werden tangential zu den Feldlinien, die die Lichtgeschwindigkeit c gerade erreichen, abgestrahlt. Der Winkel α an der Kegelspitze entspricht folglich dem Winkel zwischen zwei gegenüberliegenden solchen Feldlinien. Der Winkel α entspricht wiederum der Profilbreite in der Messung; er ist

also mit der Messung gegeben. Mit dem Winkel α lässt sich der Ort auf den Feldlinien, welche c erreichen, an dem die Randstrahlung des Profils entsteht, ermitteln. Nimmt man nun an, dass die gesamte Strahlung einer Wellenlänge in einer Höhe entsteht, dann hat man die gesamte strahlende Region bestimmt.



Berechnung des Entstehungsradius $R(\lambda)$ in Abhängigkeit von der Profilbreite $\alpha(\lambda)$:

Die Feldlinie, welche die Lichtgeschwindigkeit gerade erreicht (Herleitung: Kapitel 4.2.3):

$$r(\theta) = k(\varphi) \cdot \frac{T \cdot c \cdot \sin^2 \theta}{2\pi} \quad \text{Für den Entstehungsradius gilt somit: } R(\lambda) = k(\varphi) \cdot \frac{T \cdot c \cdot \sin^2 \theta(\lambda)}{2\pi}$$

Nun muss ein Ausdruck für den Winkel $\theta(\lambda)$ gefunden werden.

$\theta(\lambda)$ lässt sich aus $\alpha(\lambda)$ berechnen, für die Berechnung fehlt hier jedoch der Platz (ca. 2,5 Seiten); sie findet im Anhang auf der CD im Ordner „0_Jugend forscht 2003“. Es ergibt sich:

$$\theta(\lambda) = \cot^{-1} \left(\frac{3}{4} \cot \frac{\alpha(\lambda)}{2} + \sqrt{\frac{9}{16} \cot^2 \frac{\alpha(\lambda)}{2} + \frac{1}{2}} \right)$$

Setzt man diese Gleichung in die Emissionsradiusformel $R(\lambda) = k(\varphi) \cdot \frac{T \cdot c \cdot \sin^2 \theta(\lambda)}{2\pi}$ ein, so erhält man folgenden Ausdruck, der einer Profilbreite direkt einen Entstehungsradius zuweist:

$$R(\lambda) = k(\varphi) \cdot \frac{T \cdot c}{2\pi} \cdot \sin^2 \left[\cot^{-1} \left(\frac{3}{4} \cot \frac{\alpha(\lambda)}{2} + \sqrt{\frac{9}{16} \cot^2 \frac{\alpha(\lambda)}{2} + \frac{1}{2}} \right) \right]$$

R Emissionsradius, λ Wellenlänge, k Korrekturfaktor, φ Winkel zw. Rotations- & B-Feldachse, T Rotationszeit, c Lichtgeschwindigkeit, α Profilbreite

Setzt man nun in die Gleichung des Strahlungsentstehungsradius $R(\lambda)$ für $\alpha(\lambda)$ eine Gleichung ein, die die Profilbreite in Abhängigkeit von der Wellenlänge beschreibt, dann hat man eine Formel, die jeder Wellenlänge (bei korrektem Wert $k(\varphi)$) einen Strahlungsentstehungsradius zuordnet. Man hat damit die Entstehungsregion jeder Wellenlänge bestimmt.

Setzt man die in Kapitel 5.4 gefundenen Näherungen für $\alpha(\lambda)$ in $R(\lambda)$ ein und nimmt man an, dass $k(\varphi)=2$ bzw. $\varphi=78^\circ$ (\rightarrow Kap. 5.7), so erhält man für PSR 1133+16:

Profilbreite nach Näherungsgerade:
(schlechte Näherung)

$$\alpha(\lambda) = 2,6526^\circ \cdot \frac{\lambda}{m} + 10,106^\circ$$

Profilbreite nach ln-Funktion:
(gute Näherung)

$$\alpha(\lambda) = 1,45^\circ \cdot \ln \left(\frac{\lambda}{m} \right) + 14,205^\circ$$

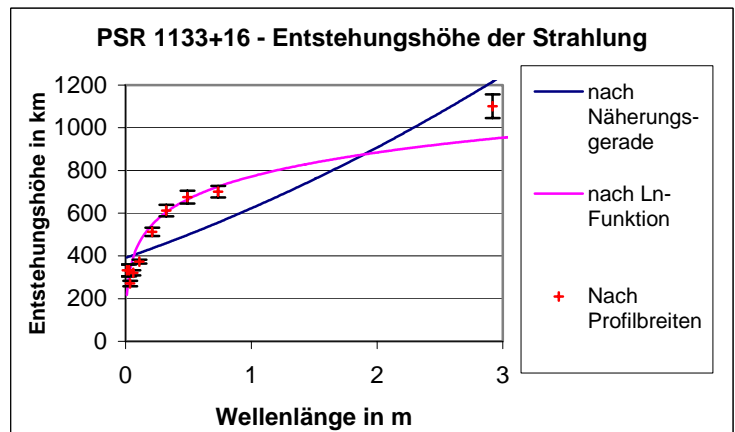
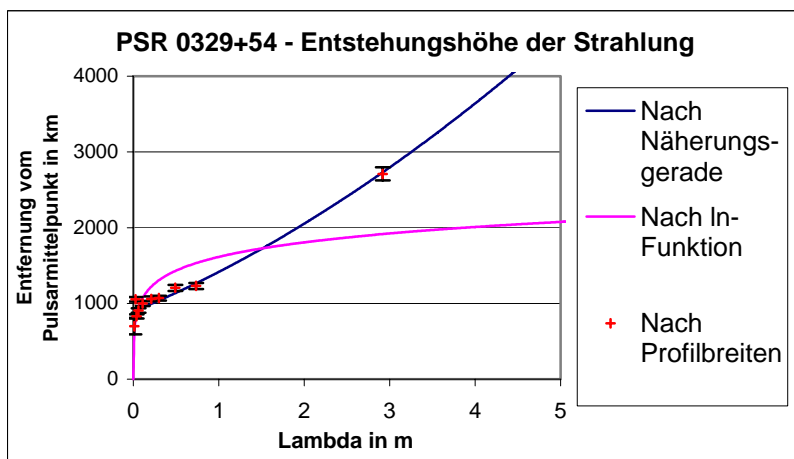


Diagramm und Tabelle zeigen die Abstrahlungshöhen der einzelnen Wellenlängen für **PSR 1133+16**. Die berechneten Kurven basieren auf einer Näherung als Gerade und einer In-Näherung für die Profilbreite bei den einzelnen Wellenlängen. Die **logarithmische**

Wellenlänge	Pulsbreite	zeichnerischer Fehler	Strahlungshöhe	Fehler
0,00937 m	9,32°	+/- 0,4 °	333 km	+/- 28 km
0,028 m	9,32°	+/- 0,4 °	333 km	+/- 28 km
0,036 m	8,41°	+/- 0,2 °	271 km	+/- 13 km
0,06 m	9,15°	+/- 0,17°	321 km	+/- 12 km
0,11 m	9,88°	+/- 0,12°	374 km	+/- 9 km
0,21 m	11,58°	+/- 0,22°	513 km	+/- 19 km
0,324 m	12,65°	+/- 0,28°	612 km	+/- 27 km
0,491 m	13,29°	+/- 0,3 °	676 km	+/- 30 km
0,735 m	13,53°	+/- 0,26°	700 km	+/- 27 km
2,918 m	16,98°	+/- 0,44°	1101 km	+/- 56 km

Näherung beschreibt die gemessenen Profilbreiten und somit auch die Strahlungsemissionshöhe besser. Der Strahlungsentstehungsort wurde unter der Annahme, dass die Profilbreite mit der eines geraden, zentralen Strahlungskegelschnittes übereinstimmt, berechnet. Anmerkungen zu Verzerrungen durch andere Schnitte finden sich in Kapitel 5.6.

Folgendes Diagramm zeigt die Emissionshöhe der einzelnen Wellenlängen für **PSR 0329+54** unter der Annahme, dass die Messungen zentrale, gerade Strahlungskegelschnitte darstellen.



Profilbreite nach Näherungsgerade:
(gute Näherung)

$$\alpha(\lambda) = 6,6157^\circ \cdot \frac{\lambda}{m} + 25,112^\circ$$

Profilbreite nach In-Funktion:
(schlechte Näherung)

$$\alpha(\lambda) = 2,8842^\circ \cdot \ln\left(\frac{\lambda}{m}\right) + 33,919^\circ$$

Das obige Diagramm zeigt für **PSR 0329+54** die Emissionshöhe von Strahlung verschiedener Wellenlängen. Die Berechnungen basieren

auf einer Geraden bzw. einer In-Funktion als Näherung für die Profilbreite. Da diesmal die gemessenen Profilbreiten eher der **Näherungsgeraden** entsprechen, beschreibt die aus dieser Geraden berechnete Kurve die Strahlungshöhe besser.

Der Strahlungskegelschnitt bei **PSR 1133+16** (zentral, leicht gekrümmt) wird in Kapitel 5.7 diskutiert. Auf die hier

Wellenlänge	Pulsbreite	Zeichnerischer Fehler	Strahlungshöhe	Fehler
0,00937m	22,2 °	+/- 1,8°	699 km	+/-108 km
0,028 m	27,33°	+/- 0,4°	1055 km	+/- 30 km
0,036 m	24,18°	+/- 0,4°	828 km	+/- 27 km
0,06 m	25,29°	+/- 0,43°	905 km	+/- 30 km
0,11 m	26,58°	+/- 0,47°	999 km	+/- 35 km
0,21 m	27,39°	+/- 0,4°	1060 km	+/- 30 km
0,3 m	27,51°	+/- 0,4°	1069 km	+/- 30 km
0,492 m	29,24°	+/- 0,5°	1206 km	+/- 40 km
0,735 m	29,55°	+/- 0,5°	1231 km	+/- 41 km
2,918 m	44,25°	+/- 0,75°	2711 km	+/- 88 km

geringen schnittbedingten Verzerrungen wird in Kap. 5.6 eingegangen.

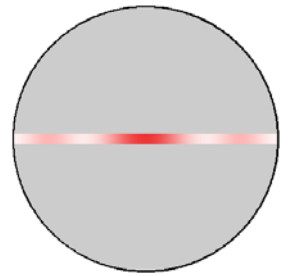
Bei den Messungen zu **PSR 0329+54** handelt es sich um einen gekrümmten Schnitt durch den mittleren Bereich des Strahlungskegels (Begründung: Kapitel 5.3, 5.7); daher müssten die berechneten Strahlungshöhen relativ genau zutreffen. Die größten Ungenauigkeiten stammen von den Näherungen für $\alpha(\lambda)$ und der ungenauen Kenntnis von ϕ . Durch genaues Kennen des Strahlungskegelschnittes ließen sich die Strahlungshöhen genauer berechnen. Genaueres zum Schnitt in Kapitel 5.7 und zu den Folgen für die berechnete Strahlungshöhe in Kapitel 5.6.

Bei den berechneten Strahlungshöhen fallen zwei Ergebnisse deutlich aus dem Rahmen. Bei **PSR 1133+16** liegt die 3,6cm-Strahlungshöhe auffällig tief und bei **PSR 0329+54** liegt die 2,8cm-Strahlungshöhe erstaunlich hoch. Eine mögliche Erklärung hierfür sind Messungenauigkeiten, da die betroffenen Messungen eine schlechte Auflösung haben.

5.6 Wir wirkt sich der Schnitt durch den Strahlungskegel auf die Messung aus ?

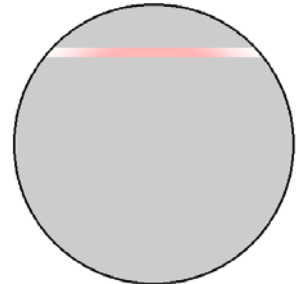
- 1a) Der einfachste, aber leider sehr seltene Strahlungskegelschnitt ist **gerade und zentral**. Ein gerader Schnitt tritt auf, wenn Rotations- und Magnetfeldachse des Pulsars senkrecht aufeinander stehen. Ein solcher Schnitt ist zentral, wenn sich der Beobachter in der Rotationsebene der Magnetfeldachse befindet.

Profilbreite: Kegelwinkel α Verzerrungen: keine
 Vollständigkeit: alle Radien sichtbar. Strahlungshöhe: richtig berechnet
 Wellenlängen: für alle dieselben Strukturen sichtbar.



- 1b) Der **gerade, nicht-zentrale Schnitt** tritt auf, wenn Rotations- und Magnetfeldachse des Pulsars senkrecht zueinander stehen und sich der Beobachter außerhalb der Rotationsebene der B-Feldachse befindet.

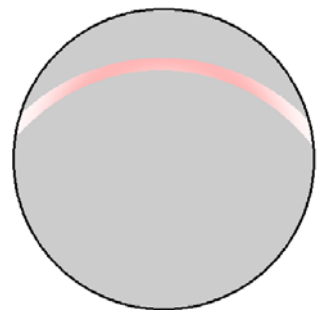
Profilbreite: Ist **kleiner** als der Winkel α des Strahlungskegels
 Verzerrungen: Die Struktur in der Mitte des Schnitts wird viel breiter dargestellt als bei einem zentralen Schnitt.
 Vollständigkeit: Strukturen im Kegelpunkt bleiben unsichtbar.
 Wellenlängen: Bei kurzen Wellenlängen können Strukturen aus der Mitte des Schnitts verschwinden; im Extremfall verschwindet das gesamte Profil.
 Strahlungshöhe: Die Strahlungshöhe wird zu niedrig berechnet.



2. Ein **kreisbogenförmiger Schnitt** tritt auf, wenn Magnetfeld- und Rotationsachse des Pulsars weder senkrecht aufeinander stehen noch parallel sind. Je kleiner der Winkel zwischen den Achsen, desto gekrümmter der Schnitt. Wie der Kreisbogen den Kegel schneidet, hängt von der Position des Beobachters ab.

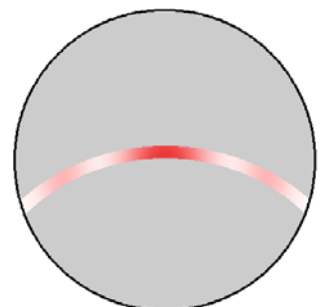
- 2a) **Kreisbogenförmiger Schnitt, der das Kegelpunkt umrundet:**

Profilbreite: Die Profilbreite ist meist größer als der Winkel α des Kegels; sie kann aber auch kleiner sein.
 Verzerrungen: Die Schnittmitte wird viel breiter dargestellt als bei einem zentralen Schnitt. Auch die Randstrukturen des Schnitts werden etwas verbreitert dargestellt.
 Vollständigkeit: Strukturen im Kegelpunkt bleiben unsichtbar.
 Wellenlängen: Bei kurzen Wellenlängen können Strukturen aus der Mitte des Schnitts verschwinden. Im Extremfall verschwindet das gesamte Profil plötzlich.
 Strahlungshöhe: Wird meist zu hoch und manchmal zu niedrig berechnet.



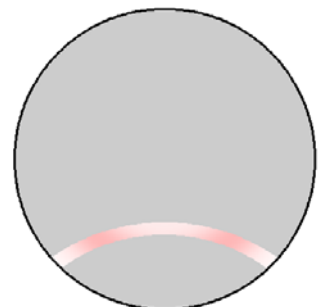
- 2b) **Kreisbogenförmiger Schnitt durch das Kegelpunkt:**

Profilbreite: Die Profilbreite ist größer als der Kegelwinkel α .
 Verzerrungen: Die Randstrukturen der Messungen werden breiter dargestellt als bei geraden, zentralen Schnitten.
 Vollständigkeit: Alle Radien werden beobachtet.
 Wellenlängen: Bei kurzen Wellenlängen sind die Randstrukturen weniger stark verbreitert als bei langen Wellenlängen.
 Strahlungshöhe: Die Strahlungshöhe wird zu hoch berechnet.



- 2c) **Kreisbogenförmiger Schnitt, der sich zum Kegelpunkt hinwölbt:**

Profilbreite: Die Profilbreite ist meist kleiner als der Kegelwinkel α ; sie kann aber auch größer sein.



- Verzerrungen: Die Profilmitte wird viel breiter dargestellt als bei einem zentralen Schnitt. Die Profiliränder werden weniger stark verbreitert dargestellt.
- Vollständigkeit: Strukturen im Zentrum des Kegels bleiben unsichtbar.
- Wellenlängen: Bei kurzen Wellenlängen können Strukturen aus der Mitte des Schnitts verschwinden; im Extremfall verschwindet das gesamte Profil. Dies geschieht dann aber weniger plötzlich als bei 2a.
- Strahlungshöhe: Wird meist zu niedrig, manchmal aber auch zu hoch berechnet

3. **Stimmen Rotationsachse und Magnetfeldachse überein**, dann sieht ein Beobachter den Pulsar entweder immer oder nie. Er beobachtet immer denselben Radius im Strahlungskegel.

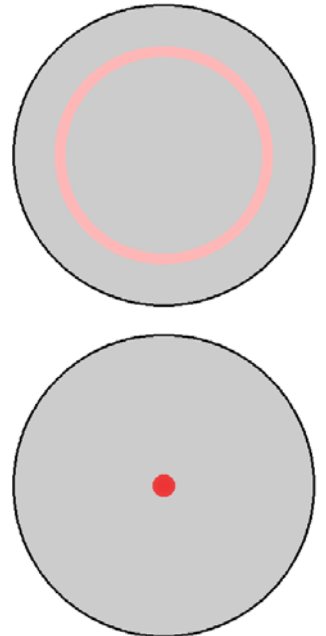
3a) In dem wahrscheinlicheren Fall, dass sich der **Beobachter nicht auf den Achsen** befindet, betrachtet er einen Ring im Strahlungskegel. Es werden u.U. periodische Intensitätsschwankungen beobachtet.

Profilbreite: Das Profil ist 360° breit; es sind keine direkten Rückschlüsse auf den Kegelwinkel α möglich.

Vollständigkeit: Kegelzentrum und Kegelrand bleiben unsichtbar.

Wellenlängen: Je kürzer die Wellenlänge, desto weiter außen misst man im Kegel. Es kann passieren, dass der Pulsar bei kurzen Wellenlängen verschwindet.

3b) In dem sehr unwahrscheinlichen Fall, dass sich der **Beobachter auf den Achsen** befindet, betrachtet er nur das Kegelzentrum. Es werden keine periodischen Intensitätsschwankungen beobachtet. Der Pulsar ist, falls überhaupt, nur durch sein Spektrum als solcher zu erkennen.

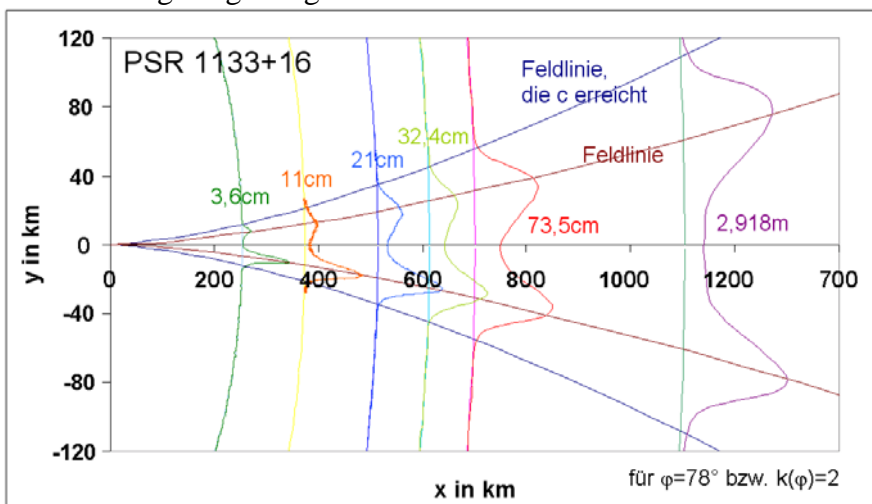


5.7 Entstehen die Intensitätsmaxima bei verschiedenen Wellenlängen auf den selben Feldlinien? Wie wird der Strahlungskegel geschnitten?

Um den Strahlungsprozess zu beschreiben, macht es Sinn zu prüfen, ob die Intensitätsmaxima (Peaks) bei verschiedenen Wellenlängen auf denselben Feldlinien erzeugt werden.

Wenn ja, dann hängt die Strahlungsintensität einer Feldlinie wellenlängenunabhängig von denselben Faktoren ab. Eine Feldlinie würde entweder bei allen Wellenlängen stark strahlen oder bei keiner. Wenn die Intensitätsmaxima auf denselben Feldlinien entstehen, lassen sich auf dieser Basis auch Rückschlüsse über den Strahlungskegelschnitt ziehen.

Falls die Intensitätsmaxima bei verschiedenen Wellenlängen auf verschiedenen Feldlinien liegen, dann gibt es den Strahlungsvorgang beeinflussende Faktoren, welche eine bestimmte Wellenlänge begünstigen.

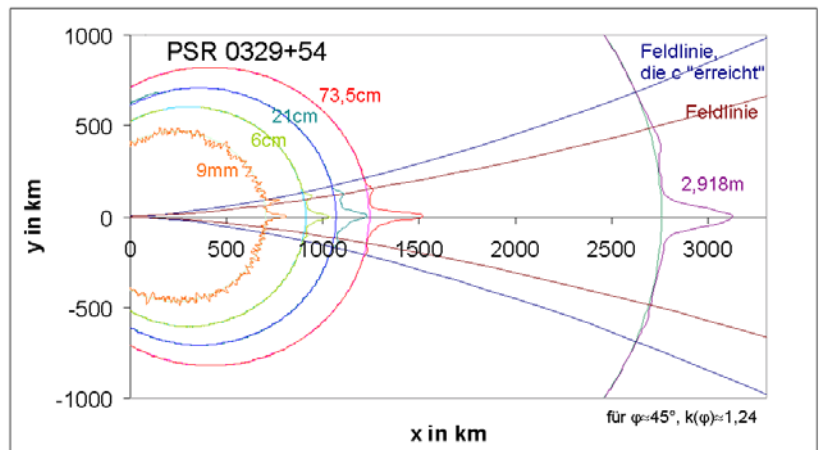


Die linke Zeichnung zeigt für PSR 1133+16 die Entstehungsregionen von sechs Wellenlängen. Die Strahlungsmaxima sind dort eingezeichnet, wo sie entstehen. Man sieht deutlich, dass die Strahlungsmaxima der einzelnen Wellenlängen auf denselben Feldlinien erzeugt werden (braune Feldlinie).

Der Schnitt durch den Strahlungskegel des Pulsars PSR 1133+16:

Die Tatsache, dass bei **PSR 1133+16** alle Peaks recht genau auf einer Feldlinie (der braunen) liegen, stützt die Annahme, dass die Messungen geraden, zentralen Strahlungskegelschnitten ähneln. Da in den Messungen jedoch nur ein Profil, d.h. einer von zwei Strahlungskegeln, beobachtet wird, kann der Winkel φ zwischen Rotations- und Magnetfeldachse nicht ganz 90° betragen. Es müsste sich um einen **leicht gekrümmten, zentralen Strahlungskegelschnitt** handeln. Der Wert $\varphi = 78^\circ$, also $k = 2$, sollte hier eine realistische Schätzung sein.

Bei derselben Untersuchung für PSR 0329+54 fällt auf, dass die Peaks der verschiedenen Wellenlängen nicht exakt auf einer Feldlinie zu liegen scheinen. Die braune Feldlinie ist die Feldlinie, auf der die stärkste 21cm-Strahlung des oberen Peaks entsteht. Die Peaks der anderen Messungen befinden sich nicht auf, sondern nur in der Nähe dieser Feldlinie. Die entsprechenden kurzwelligen Peaks liegen näher am Messungsrand, die langwelligeren weiter im Zentrum.



Die Tatsache, dass die oberen Peaks alle nahe der braunen Feldlinie liegen, lässt vermuten, dass die Spitzen der Peaks trotzdem wie bei PSR 1133+16 alle auf dieser Feldlinie liegen. Die Beobachtung, dass die kurzwelligeren Peaks weiter außen und die langwelligeren Peaks weiter innen liegen, lässt sich auf einen nicht-zentralen Strahlungskegelschnitt zurückführen.

Der Schnitt durch den Strahlungskegel des Pulsars PSR 0329+54:

Da bei dem Pulsar **PSR 0329+54** bei allen Wellenlängen dieselbe Struktur in der Messungsmitte deutlich erkennbar ist, handelt es sich vermutlich um einen Schnitt durchs Kegelszentrum. Da nur ein Pulsarprofil (keine zwei) zu beobachten ist, welches bis zu 44° breit ist, kann der Winkel φ zwischen Rotations- und Magnetfeldachse höchstens 68° betragen. Da das Pulsarprofil klar erkennbar ist, muss dieser Winkel auch deutlich größer als 0° sein; es muss sich also um einen **kreisbogenförmigen Schnitt durch das Zentrum des Strahlungskegels** (5.6, 2b) handeln. Der Wert $\varphi = 45^\circ$, also $k=1,24$ dürfte für PSR 0329+54 eine realistische Schätzung sein. Der Schnitt hat zur Folge, dass die Messungsränder im Vergleich zum geraden, zentralen Schnitt besonders stark verbreitert werden, insbesondere bei langwelligen Messungen. Bei Anpassung der Messungen an einen geraden, zentralen Schnitt, so werden alle, insbesondere die langwelligen Profile, schmaler. Die äußeren Peaks werden insbesondere bei den langwelligen Messungen schmaler und rutschen relativ zur gesamten Messung weiter an den Profilrand.

Nach diesen Veränderungen lägen die untersuchten Peaks auf einer Feldlinie. Da die Strahlungsmaxima aller Wellenlängen auf einer Feldlinie liegen, wenn man einen kreisbogenförmigen Schnitt durch das Kegelszentrum annimmt, ist es sehr wahrscheinlich, dass...

- es sich bei den Messungen des Pulsars PSR 0329+54 um kreisbogenförmige Schnitte durch das Zentrum des Strahlungskegels handelt und
- die Strahlungsmaxima aller Wellenlängen wirklich auf denselben Feldlinien erzeugt werden.

Die Folgen für den Strahlungsprozess:

Weil die Strahlungsmaxima der verschiedenen Wellenlängen alle auf denselben Feldlinien erzeugt werden, wirken sich die für das Strahlen von einer Feldlinie verantwortlichen Faktoren auf die Strahlungsintensität aller Wellenlängen gleichermaßen aus. Eine Feldlinie

strahlt entweder stark oder schwach für alle Wellenlängen. Die versch. Wellenlängen werden jedoch in verschiedenen Abständen vom Pulsarmittelpunkt abgestrahlt. Diese Beobachtungen müssen bei der Untersuchung des Strahlungsmechanismus berücksichtigt werden.

5.8 Perspektiven

Auch wenn dieses Modell viele Fragen zu Pulsaren, insbesondere zum Strahlungskegel und der Emissionsregion, beantwortet, so bietet es doch viele Ansätze zur Weiterentwicklung. Im Folgenden einige Ideen und Fragen, die man auf dem Modell basierend untersuchen könnte:

- Aufbauend auf den verschiedenen Strahlungskegelschnitten (Kapitel 5.6), die eine Messung darstellen kann, ließen sich mathematische Verfahren entwickeln, mit denen man eine Messung, die keinen zentralen, geraden Schnitt darstellt, in einen solchen umrechnen kann.
- **Es wäre praktisch, ein einfaches Verfahren zu entwickeln, mit dem erkannt werden kann, welcher Strahlungskegelschnitt vorliegt. Hierfür gibt es folgende Ansatzpunkte:**
 - Dieses könnte auf dem Vergleich von Pulsarmessungen bei verschiedenen Wellenlängen basieren. Die möglichen Kegelschnitte lassen sich durch den Gleichungstyp, der Wellenlängen und Profilbreiten am besten verknüpft, auf jeden Fall eingrenzen.
 - Ansatz: Die Profilpeaks sind im allgemeinen auf denselben Feldlinien zu finden.
 - Falls Unterschiede in der linken und rechten Profilhälfte (z.B. Peakhöhen) auf den Winkel zwischen Rotations- und B-Feldachse zurückführbar sind, dann könnte man diesen Winkel aus den Profilhälftenunterschieden bestimmen. Damit ließe sich der Krümmungsgrad eines Strahlungskegelschnittes bestimmen.
- **Ansatzpunkte für eine Untersuchung des Emissionsprozesses:**
 - Die Grundannahme, dass die Strahlung tangential zu den B-Feldlinien abgestrahlt wird, kann als gesichert angesehen werden, da auf ihr basierend viele sinnvoll erscheinende Erkenntnisse gewonnen wurden, die im Einklang mit den Beobachtungen stehen.
 - Da die Strahlung tangential zu den B-Feldlinien abgestrahlt wird, ist zu vermuten, dass die Strahlung von Teilchen erzeugt wird, die sich entlang dieser Feldlinien bewegen. Diese Teilchen müssen ein Magnetfeld spüren; es muss sich um Ladungsträger handeln. Dieser Ansatz wird durch den Hinweis meines Betreuers, Dr. A. Jessner, in Kapitel 4.2.1 gestützt. Eine mögliche Strahlungsursache ist, dass die Teilchenbewegung entlang der Feldlinien eine Radialbeschleunigung verursacht, welche das Strahlen zur Folge hat.
 - Die Erkenntnis, dass die Strahlung auf den B-Feldlinien entsteht, die klassisch betrachtet die Lichtgeschwindigkeit c durchbrechen, in einem Bereich, der c noch nicht durchbrochen hat.
 - Die Erkenntnis, dass Feldlinien entweder auf allen untersuchten Wellenlängen stark oder auf allen schwach strahlen.
 - Die Erkenntnis, dass die verschiedenen Wellenlängen in verschiedenen Entfernungen vom Pulsarmittelpunkt erzeugt werden. Kurze Wellenlängen werden näher an der Pulsaroberfläche erzeugt als lange.
- Es wäre sicherlich sinnvoll weitere Pulsare zu untersuchen, um die hier gewonnenen Erkenntnisse auf ein breiteres Messdatenfundament zu stellen und ggf. zu korrigieren.
- Es wäre interessant zu untersuchen, ob oder wie sich die Rotationszeit auf den Strahlungskegel und die Strahlungsregion auswirkt. Ein schneller rotierender Pulsar könnte einen breiteren Kegel haben, weil die Feldlinien, die klassisch betrachtet die Lichtgeschwindigkeit c erreichen, bei festem Abstand zum Pulsarmittelpunkt (Strahlungsregion) einen größeren Winkel zueinander haben. Vielleicht ändert sich der Strahlungskegel aber auch nicht, dann würde der Winkel zwischen den Feldlinien, die c erreichen, in der Emissionsregion gleich bleiben, d.h. die Strahlungsregion müsste sich näher an der Pulsaroberfläche befinden.
- Es könnte eine Erklärung dafür gesucht werden, dass die Pulsarprofile nicht absolut klappsymmetrisch sind. Es könnte daran liegen, dass der Winkel zwischen Rotations- und

Magnetfeldachse meist einen Wert zwischen 0° und 90° hat. Dies hat zur Folge, dass das strahlende Stück einer strahlenden Feldlinie, welches klassisch die Lichtgeschwindigkeit noch nicht erreicht hat, bei gleicher Feldliniengleichung verschiedene Längen haben kann.

6. Eigene Bewertung des Modells

Das entstandene Modell kann zahlreiche Fragen zu Pulsaren in sich schlüssig beantworten:

- Die Ursache für das schnelle Rotieren von Pulsaren wird gefunden.
- Die geometrische Form der Pulsarstrahlung wird als Strahlungskegel erkannt.
- Der Aufbau des Strahlungskegels wird beschrieben.
- Die Messung wird als Strahlungskegelschnitt interpretiert. Es werden alle Schnittmöglichkeiten beschrieben und auf Folgen für die Messungsauswertung hin untersucht.
- Der Entstehungsort der Strahlung wird so bestimmt, dass er die Breite der Pulsarprofile erklärt, und es wird eine Formel für den Strahlungsort hergeleitet.
- Es werden Eigenschaften des Emissionsprozesses von Strahlung beschrieben, die bei einer Untersuchung des Emissionsprozesses berücksichtigt werden müssen.
- Das Modell bietet zahlreiche Ansätze für die Untersuchung weiterer Fragen.

Alle Fragen sind an zwei Pulsaren unabhängig voneinander untersucht worden, die wegen ihrer starken Profile ausgewählt wurden. Es ist zu hoffen, dass diese Auswahl für den durchschnittlichen Pulsar repräsentativ ist. Da alle Ergebnisse durch Messungen beider Pulsaren gestützt werden, kann man, vorausgesetzt es handelt sich um typische Pulsare, davon ausgehen, dass die Aussagen des Modells für durchschnittliche Pulsare zutreffen.

Die Grundannahmen, auf denen die Untersuchungen basieren, führen zu in sich schlüssigen Ergebnissen. Dies deutet darauf hin, dass die Grundannahmen, wie z.B. dass die Strahlung tangential zu den Magnetfeldlinien abgestrahlt wird, berechtigt sind.

Auch der Entstehungsort der Strahlung als der Bereich der klassisch die Lichtgeschwindigkeit c durchbrechenden Feldlinien, welcher c noch nicht durchbrochen hat, bestätigt sich dadurch, dass bei diesem Entstehungsort die Peaks der einzelnen Messungen auf derselben Feldlinie liegen. Dies bestätigt auch die Annahme, dass die gesamte Strahlung einer Wellenlänge in eine Höhe entsteht. Der Emissionsort scheint also richtig bestimmt und richtig durch eine Formel beschrieben worden zu sein. Die Ergebnisse stützen sich hier gegenseitig.

Auf Verzerrungen, die durch Messungen, die keinen zentralen, geraden Strahlungskegelschnitt darstellen, und auf Folgen für berechnete Strahlungshöhen wird sorgfältig eingegangen.

Einige Fragen, mit denen sich das Modell auseinandersetzt, insbesondere im Zusammenhang mit dem Strahlungsmechanismus, sind im Moment (2002/2003) Gegenstand aktuellster Pulsarforschung, da noch keine Theorie die Beobachtungen vollständig erklären kann.

Als besondere Ehre empfand ich eine Einladung der Pulsarforschergruppe des MPIfR zu einem Gastvortrag, den ich am 17.9.2002 am MPIfR in Bonn gehalten habe. Mein englischsprachiger Vortrag (50min) über die Pulsarmessdatenbank und insbesondere das Pulsarmodell endete in reger Diskussion, in der mir die interessierten Zuhörer unter anderem auch den Einklang meiner Ergebnisse mit ihren Forschungsergebnissen bestätigten. Ganz besonders hat es mich gefreut, dass Alex Wolszczan, der erste Entdecker eines extrasolaren Planetensystems (um Pulsar B1257+12), unter meinen Zuhörern war.

Das hier vorgestellte Pulsarmodell, welches im Einklang mit den aktuellen Erkenntnissen der Pulsarforschung steht, hat den Vorteil, dass es auch von interessierten Laien mit soliden Oberstufenphysikkenntnissen verstanden werden kann. Physiklehrer könnten ihre Schüler in Physikleistungskursen oder einer Astronomie AG Teile des Modells anhand von Messdaten (aus der Arbeit oder dem Internet) selbst erarbeiten lassen und so physikalisches Denken üben

und den Unterricht interessanter machen. Auch bietet das Modell viele Anknüpfungspunkte für weitere Untersuchungen, für die ich (noch) keine Zeit gefunden habe. Solche Anknüpfungspunkte könnten von neugierig gewordenen Lesern dann selbst untersucht werden (Messdaten unter <http://www.mpifr-bonn.mpg.de/div/pulsar/data/>). Sie eignen sich auch gut als Themen für Physik Facharbeiten.

7. Literatur, Informationsquellen und verwendete Messungen

I (Q1) Gespräch mit meinem Betreuer, Herrn Dr. A. Jessner

II Pulsararchiv des MPIfR in Effelsberg: verwendete Messungen (Teleskop: 100m-Effelsberg)

Pulsar	Wellenlänge	Scannummer	Datum	Uhrzeit	CD
PSR 1133+16	21cm	8750	04.02.2000	02:54:13 MEZ	00_10
	11cm	8959	09.03.1999	22:28:00 MEZ	99_05
	6cm	4698	02.06.2000	19:55:33 MEZ	00_17
	3,6cm	4043	02.10.1999	10:15:35 MEZ	99_17
	2,8cm	5143	23.07.1994	17:32:20 MEZ	94_3
	9mm	4441	13.08.2000	10:50:45 MEZ	00_19
PSR 0329+54	30cm	5227	26.02.2001	21:51:54 MEZ	01_02
	21cm	5516	03.03.2001	03:36:05 MEZ	01_02
	11cm	5327	15.08.1998	11:59:27 MEZ	98_30
	6cm	5933	02.03.2002	13:24:19 MEZ	02_04
	3,6cm	8810	02.11.1999	02:29:24 MEZ	99_23
	2,8cm	5106	23.07.1994	11:37:49 MEZ	94_3

III European Pulsar Archive auf der Homepage des MPIfR in Bonn:

<http://www.mpifr-bonn.mpg.de/div/pulsar/data/>

bzw. <http://www.mpifr-bonn.mpg.de/div/pulsar/data/browser.html>

Pulsar	Wellenlänge	Teleskop	Quellenverweis	Name	Wellenlänge	Teleskop	Datum	Quellenverw.
PSR 1133+16 (B 1133+16)	2,918m	bsalpa	kl99	PSR 0329+54 (B 0329+54)	9mm*	Effelsberg	04.07.1994	kxj+97
	73,5cm	Lovell	gl98		9mm*	Effelsberg	03.07.1994	kxj+97
	49cm	Lovell	gl98		9mm*	Effelsberg	04.07.1994	kxj+97
	32,4cm	Lovell	gl98					
PSR 0329+54 (B 0329+54)	2,918m	bsalpa	ki96					
	73,5cm	Lovell	gl98					
	49cm	Lovell	gl98					

* Es handelt sich um drei Moden des Pulsars.

8. Danksagung

Hier möchte ich mich herzlichst bei meinem Betreuer, Herrn Dr. Jessner, für die nette und hilfreiche Betreuung bedanken. Auch Danke für die vielen tiefgehenden nicht-physikalischen Gespräche. Vielen Dank auch an Herrn Walter Stein für seine tatkräftige Unterstützung.

9. Anhang (CD)

Auf der CD befinden sich...

- Ein **Inhaltsverzeichnis der CD**,
- diese Arbeit + die ausführlichere Landeswettbewerbssfassung
+ eine ausführliche Fassung von Kapitel 5.5 (Berechnung der Strahlungshöhe),
- das Pulsardatenverwaltungsprogramm (Win32 und Linux) mit jhspuls (Messdatenanalyse) und GSView (zur Messkurvendarstellung benötigt),
- die Dokumentation des Pulsardatenverwaltungsprogramms,
- alle untersuchten Messungen,
- die Messungsauswertungen (Excel und zeichnerisch),
- alle Grafiken und
- die Powerpointpräsentation zum Vortrag am MPIfR (17.9.2003)