

Untersuchung der TeV-Gammaspektren
des schalenartigen Supernova-Überrests

RX J1713.7–3946

mit

H.E.S.S.



Bachelorarbeit

vorgelegt von

Susanne Raab

Tag der Abgabe: 21. Juli 2010

Erlangen Centre for Astroparticle Physics
Physikalisches Institut
Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

1. Gutachter: Prof. Dr. Christian Stegmann
2. Gutachter: Prof. Dr. Ulrich Katz

M

AN HAT den Eindruck, dass die moderne Physik auf Annahmen beruht, die irgendwie dem Lächeln einer Katze gleichen, die gar nicht da ist.

Albert Einstein

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
1.1	RX J1713.7–3946	7
1.2	H.E.S.S.	8
2	Messung der spektralen Energieverteilung	9
2.1	Analyse	9
2.2	Konfidenz-Bereiche	11
3	Energiespektrum der Gesamtquelle	15
4	Räumlich aufgelöste Spektren	19
4.1	Zirkulare Teilregionen	19
4.2	Teilregionen nach Schalenstruktur	23
5	Zusammenfassung und Ausblick	27
	Anhang	29

1 Einleitung

1.1 RX J1713.7–3946

Bei RX J1713.7–3946 handelt es sich um einen schalenartigen Supernovaüberrest, der im Sternbild Skorpion in der galaktischen Ebene beheimatet ist. Entdeckt wurde er 1996 im all-sky survey des Röntgensatelliten ROSAT [Pfeffermann & Aschenbach (1996)]. Die radiale Ausdehnung der komplexen Schalenstruktur beträgt in etwa $0,65^\circ$, was immerhin größer als der Durchmesser des Mondes ist.

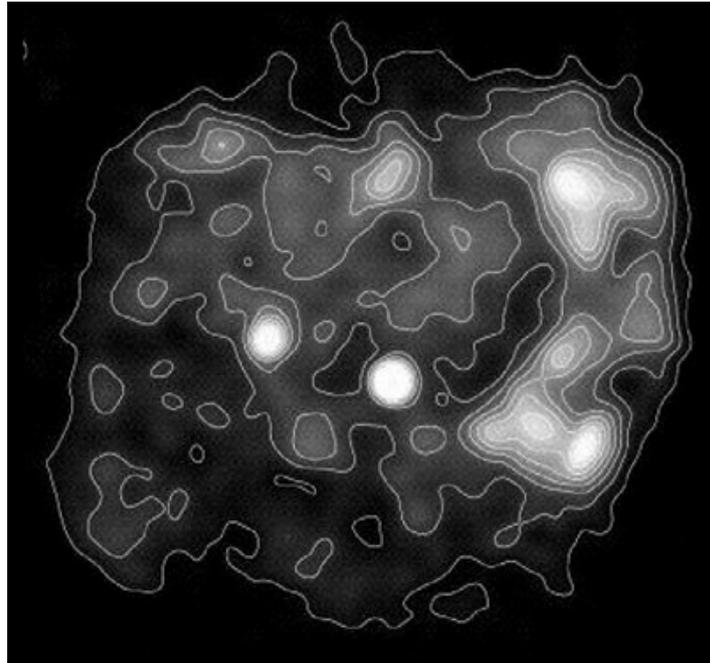


Abbildung 1: ROSAT-Röntgenaufnahme von RX J1713.7–3946 [H.E.S.S.-Source of the Month, Januar 2005]

Das Alter und die Entfernung des SNR wird noch diskutiert. *Koyama et al. (1997)* leiteten eine Entfernung von etwa 1 kpc und ein Alter von ca. 1000 Jahren aus der Säulendichte von ASCA-Messungen ab. Mit dieser Annahme sind auch die Messungen von XMM-Newton und NANTEN konsistent. *Slane et al. (1999)* propagierten hingegen eine Entfernung von 6 kpc und ein damit einhergehendes Alter von 10000 Jahren. Dieses Ergebnis resultiert auf einer möglichen Verbindung zwischen RX J1713.7–3946 und einer Molekülwolke in dieser Region. Eine Entfernung von 1 kpc würde die These von *Wang et al. (1997)* stützen, wonach RX J1713.7–3946 der Überrest der Supernova SN 393 ist, die im Herbst des Jahres 393 u.Z. von chinesischen Astronomen beobachtet wurde. Weitere CO-Messungen von *Fukui et al. (2003)* stützen ebenfalls die 1 kpc-Theorie, da hier eine Interaktion mit CO-Molekülen an der Position des Gammastrahlungs-Maximum festgestellt werden konnte.

Die ASCA-Messungen zeigten, dass es sich bei der Röntgenstrahlung um ein „non-thermal continuum“ ohne erkennbare Emissionslinien handelt [Koyama et al. (1997), Slane et al. (1999)]. Die Radiostrahlung von RX J1713.7–3946 ist im Gegensatz dazu nur sehr schwach [Lazendic et al. (2004)]. Es ist nur ein weiteres Objekt bekannt, das ein ähnliches Verhalten aufweist (RX J0852.0-4622).

Im Bereich der hochenergetischen Gammastrahlung wurde RX J1713.7–3946 zunächst 1998 von der CANGAROO-Kollaboration detektiert [Muraishi et al. (2000)]. Durch die bessere Sensitivität und Winkelauflösung gelang es H.E.S.S. die Morphologie der TeV-Strahlungsquelle aufzulösen.

1.2 H.E.S.S.

H.E.S.S. bezeichnet ein Array aus Imaging Atmospheric Cherenkov Telescopes, das Gammastrahlung mit Energien über 100 GeV registrieren kann. Dabei ist H.E.S.S. das Akronym für „High Energy Stereoscopic System“ und zugleich eine Hommage an Victor Hess, dem Entdecker der kosmischen Strahlung.



Abbildung 2: Photo der H.E.S.S.-Site im Khomas-Hochland in Namibia, ungefähr 100 km südwestlich von Windhoek

Die Teleskope registrieren Licht, das bei der Wechselwirkung hochenergetischer Gammastrahlung in der Atmosphäre entsteht. Wenn ein solches Teilchen weit oben in der Atmosphäre wechselwirkt entsteht ein ausgedehnter Schauer an energiereichen Sekundärteilchen. Wenn sich diese nun schneller durch die Atmosphäre bewegen, als es das Licht in dieser Umgebung vermag, so emittieren sie Cherenkov-Licht.

Dieses Cherenkov-Licht ist allerdings sehr schwach, beispielweise können bei einem Primärteilchen mit einer Energie von 1 TeV nur ungefähr 100 Photonen/m² am Boden registriert werden, die innerhalb eines sehr kurzen Zeitfensters von einigen Nanosekunden dort eintreffen.

Um dies detektieren zu können, sind entsprechend große Sammelflächen und ein leistungsfähiges optisches System von Nöten. Die Rekonstruktion der Schauergeometrie wird dadurch erleichtert, dass die einzelnen Teleskope zu einem stereoskopischen System zusammengefasst werden.

Das Ziel von H.E.S.S. ist die Erforschung der Produktion und Ausbreitung von hochenergetischen Teilchen im Universum.

So kann die detektierte Gammastrahlung z.B. dazu benutzt werden, um kosmische Beschleuniger zu lokalisieren. Als Quellen kommt dabei gleich ein ganzer Zoo an galaktischen und extra-galaktischen Objekten in Frage, wie z.B. Supernovaüberreste, Galaxiencluster, AGNs, Doppelsternsysteme, Pulsare und PWNs. Wenn es gelingt, eine ausreichende Anzahl von Objekten zu detektieren, kann versucht werden, die Beschleunigungsmechanismen zu klassifizieren.

2 Messung der spektralen Energieverteilung

2.1 Analyse

In Abbildung 3 ist eine Illustration zur Rekonstruktion eines Ereignisses dargestellt. Die Breiten und Längen der Ellipsen spiegeln die Morphologie des Schauers wieder, aus der Lage der Hauptachsen kann auf die Richtung des Primärteilchens geschlossen werden und die detektierte Lichtmenge ist ein Maß für dessen Energie.

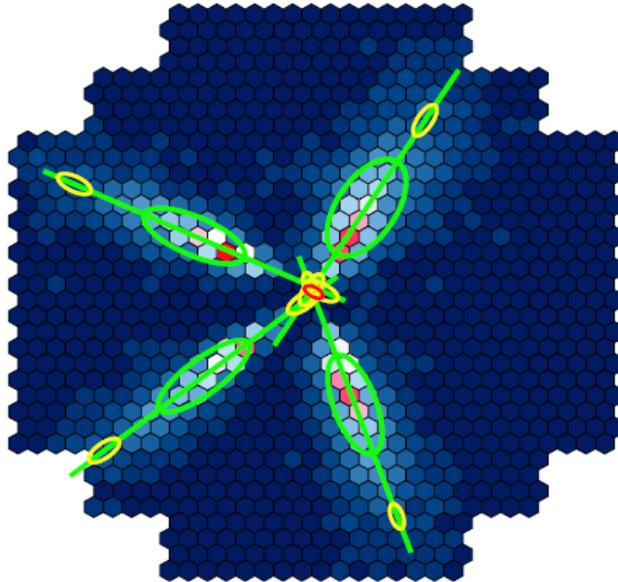


Abbildung 3: Projektion des Schauersabbilds von 4 Teleskopen in die Kameraebene [Berge, D. (2006)]

Die Teleskope können in Verschiedenen Modi messen. Zum einen gibt es sogenannte On- bzw. Off-Runs, bei denen sich die Zielregion im Zentrum des Gesichtsfelds befindet bzw. komplett außerhalb.

Ein anderes Konzept wird bei den Wobble-Runs angewandt. Hierbei liegt die Zielregion etwas neben dem Zentrum des Blickfeldes, so dass die notwendigen Daten zur Hintergrundabschätzung auf der gegenüberliegenden Seite des Blickfelds aufgenommen werden können. Insbesondere haben so On- und Off-Region den gleichen Abstand zum Zentrum des Blickfeldes.

Zusätzliche muss die Akzeptanz der Kameras berücksichtigt werden. Im einfachen Modell kann für die Kameras zunächst eine radiale Akzeptanz angenommen werden. Alternativ gibt es auch ein Modell, das eine 2D-Akzeptanz bestimmt, was zum Beispiel von Vorteil ist, da die Kamera in Realität allerdings eher hexagonal als rund ist. Genaue Details dazu finden sich in Berge, D., Funk, S. & Hinton, J. (2006) und Aharonian, F. et al. (2006).

Um die aufgenommenen Daten aufzubereiten ist es notwendig, zunächst den Hintergrund abzuschätzen. Hierzu gibt es verschiedene Ansätze.

Beim Ring Background werden die Daten aus einem Ring um das jeweilige Pixel (bei der Erstellung einer Karte) bzw. um die zentrale Quelle (bei einem Spektrum) mit denen aus dem Pixel/Quelle verglichen. Damit in diese Abschätzung nicht fälschlicherweise andere Quellen als Hintergrund eingehen, werden um diese, sogenannte Exclusion Regions definiert, so dass diese Bereiche nicht zum Ring Background beitragen. Selbiges wird auch mit der unmittelbaren Umgebung der Quelle gemacht.

Das Template Model bedient sich im Gegensatz dazu zweier Gruppen von Ereignissen, Gamma-kandidaten und Untergrundereignisse. Bei diesem Verfahren wird die Anzahl der Gammakandidaten mit der Zahl der Untergrundereignisse der selben Region verglichen.

Die in dieser Arbeit dargestellten Ergebnisse beruhen alle auf Model++ Analysen. Diese Analysen basieren auf einem log-likelihood Vergleich zwischen dem registriertem Schauer und einem semi-analytischen Modell. Nähere Informationen hierzu in *de Naurois, M. & Rolland, L. (2009)* und *Aharonian, F. et al. (2006)*.

Die Berechnung des Spektrums erfolgt im Prinzip durch einen Vergleich der Zahl der beobachteten Ereignisse in einem Energiebin mit der erwarteten Anzahl, die durch die Form des Spektrums, der Energieauflösung und der effektiven Fläche gegeben ist. Die Fit-Prozedur basiert dabei auf einem Levenberg & Marquardt minimization algorithm.

2.2 Konfidenz-Bereiche¹

Beim Fit des Spektrums können zusätzlich auch die Konfidenz-Bereiche der spektralen Parameter bestimmt werden, im Falle eines reinen Potenzgesetzes also vom spektralen Index Γ und dem normierten Fluss.

Dies geschieht im wesentlichen dadurch, dass für alle möglichen Kombinationen der Parameter die Abweichung von der log-likelihood Differenz mittels

$$\sigma = \sqrt{2\Delta \ln \mathcal{L}} \quad (2.1)$$

berechnet wird. In Abbildung 4 entsprechen die eingezeichneten Linien jeweils einer Standardabweichung σ , d.h. die gesuchte Kombination der Parameter liegt mit einer Wahrscheinlichkeit von 68 % im zentralen roten Oval, mit 95 % im gelben Ring und mit einer Wahrscheinlichkeit von 99 % im grünen 3σ -Bereich.

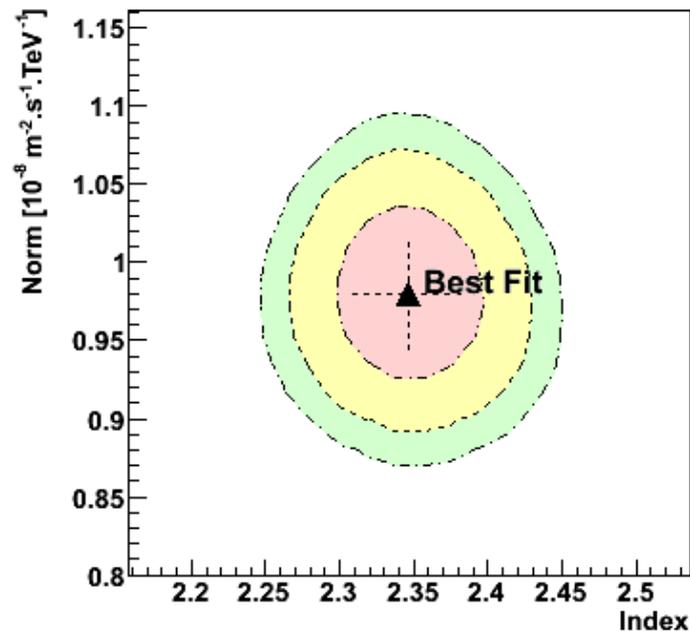


Abbildung 4: Konfidenz-Bereiche der spektralen Parameter. Aufgetragen ist hierbei der spektrale Index Γ gegen den Fluss an der Stelle der Referenzenergie.

Bei dieser Auftragung ist zu beachten, dass die Normierung des Flusses an der Stelle der Referenzenergie geschieht und nicht bei der Dekorrelationsenergie. Als Dekorrelationsenergie wird hierbei die Energie bezeichnet, bei der der relative Fehler des Flusses minimal ist. Wie der Name bereits andeutet, hat diese Energie den entscheidenden Vorteil, dass an dieser Stelle die spektralen Parameter als unkorreliert angenommen werden können, weshalb später der integrierte Fluss ausgehend von der Dekorrelationsenergie berechnet wird. Aber auch bei der Referenzenergie ist die Korrelation zwischen Index und Fluss sehr schwach, was man daran sehen kann, dass die Koordinatenachsen fast parallel zu den Hauptachsen der Ellipsen verlaufen.

In der zugehörige Kovarianzmatrix können somit in guter Näherung $cov(\Phi)$ und $cov(\Gamma)$ gleich Null gesetzt werden und es ergibt sich

$$\mathbf{cov}(\Phi, \Gamma) = \begin{pmatrix} \sigma_{\Phi}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{\Gamma}^2 \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

¹ Die für die Graphiken in diesem Kapitel verwendeten Zahlenwerte beziehen sich jeweils auf die im kommenden noch definierte Teilregion 1

Daraus resultiert eine zweidimensionale Gaußverteilung der Form

$$p(x, y) = \frac{1}{2\pi \cdot \sigma_\Gamma \sigma_\Phi} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot \left(\left(\frac{\Gamma - x}{\sigma_\Gamma}\right)^2 + \left(\frac{\Phi - y}{\sigma_\Phi}\right)^2\right)\right) \quad (2.3)$$

Graphisch dargestellt sieht diese Verteilung wie folgt aus:

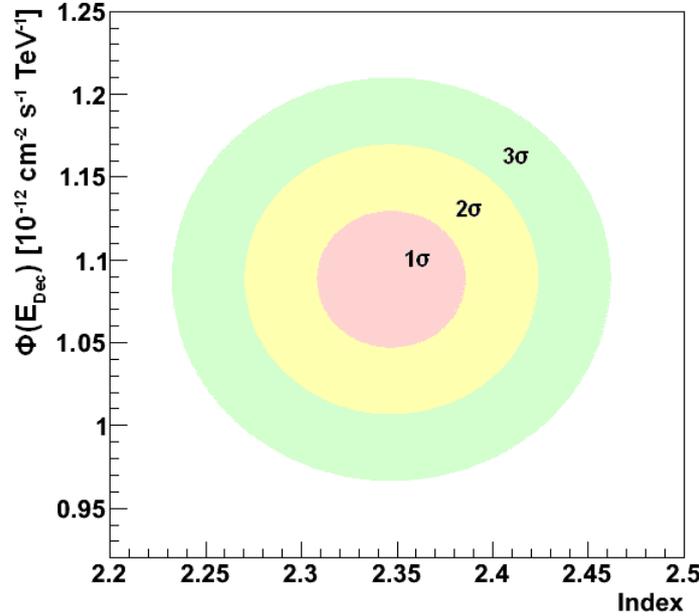


Abbildung 5: Konfidenz-Bereiche unkorrelierter Größen. Aufgetragen ist hierbei der spektrale Index Γ gegen den Fluss Φ an der Stelle der Dekorrelationsenergie.

Neben der Beziehung zwischen Fluss und dem spektralen Index ist aber auch der integrierte Fluss interessant.

In dem betrachteten Energiebereich kann für das Spektrum ein reines Potenzgesetz

$$\frac{dN}{dE} = \Phi_0 \left(\frac{E}{E_0}\right)^{-\Gamma} \quad (2.4)$$

angenommen werden. Diese Form hat den Vorteil, dass sich der Bezugspunkt beliebig verschieben lässt. Für E_0 kann statt der Referenzenergie auch die Dekorrelationsenergie eingesetzt werden, solange der Fluss Φ_0 ebenfalls entsprechend gewählt wird.

Der integrierte Fluss ergibt sich dann durch Integration von Gleichung 2.4:

$$F(\Phi_0, \Gamma) = \int_{E_1}^{E_2} \frac{dN}{dE} dE = \frac{\Phi_0 (E_2^{-\Gamma+1} - E_1^{-\Gamma+1})}{E_0^{-\Gamma} (-\Gamma + 1)} \quad (2.5)$$

Da der integrierte Fluss also eindeutig vom spektralen Index Γ abhängt, müssen die Größen von nun an als korreliert angenommen werden. Um ausgehend von $\mathbf{cov}(\Phi_0, \Gamma)$ die Kovarianzmatrix $\mathbf{cov}(F(\Phi_0, \Gamma), \Gamma)$ der korrelierten Größen zu bestimmen, muss zunächst die Transportmatrix \mathbf{A} aufgestellt werden.

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \Gamma}{\partial \Gamma} & \frac{\partial \Gamma}{\partial \Phi_0} \\ \frac{\partial F}{\partial \Gamma} & \frac{\partial F}{\partial \Phi_0} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{F}{-\Gamma+1} + \frac{\Phi_0}{E_0^{-\Gamma}(-\Gamma+1)} \left[E_2^{-\Gamma+1} \ln\left(\frac{E_2}{E_0}\right) - E_1^{-\Gamma+1} \ln\left(\frac{E_1}{E_0}\right) \right] & \frac{F}{\Phi_0} \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

Über die Beziehung $\mathbf{cov}(F(\Phi_0, \Gamma), \Gamma) = \begin{pmatrix} \sigma_{\Phi_0}^2 & \sigma_{\Phi_0, F} \\ \sigma_{\Phi_0, F} & \sigma_F^2 \end{pmatrix} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{cov}(\Phi_0, \Gamma) \cdot \mathbf{A}^T$ ergeben sich

$$\begin{aligned} \sigma_{\Phi_0, F} &= -\frac{\sigma_{\Gamma}^2 \cdot F}{-\Gamma+1} + \frac{\sigma_{\Gamma}^2 \cdot \Phi_0}{E_0^{-\Gamma}(-\Gamma+1)} \left[E_2^{-\Gamma+1} \ln\left(\frac{E_2}{E_0}\right) - E_1^{-\Gamma+1} \ln\left(\frac{E_1}{E_0}\right) \right] \\ \sigma_F^2 &= \sigma_{\Phi_0, F}^2 + F^2 \sigma_{\Phi}^2 \end{aligned} \quad (2.7)$$

Die zugehörige Gaußverteilung errechnet sich aus der Formel

$$p(x, y) = \frac{1}{2\pi \sqrt{\mathbf{cov}(F, \Gamma)}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot \begin{pmatrix} \Gamma - x & F - y \end{pmatrix} \mathbf{cov}^{-1}(F, \Gamma) \begin{pmatrix} \Gamma - x \\ F - y \end{pmatrix}\right) \quad (2.8)$$

Diese Verteilung kann graphisch wie folgt veranschaulicht werden:

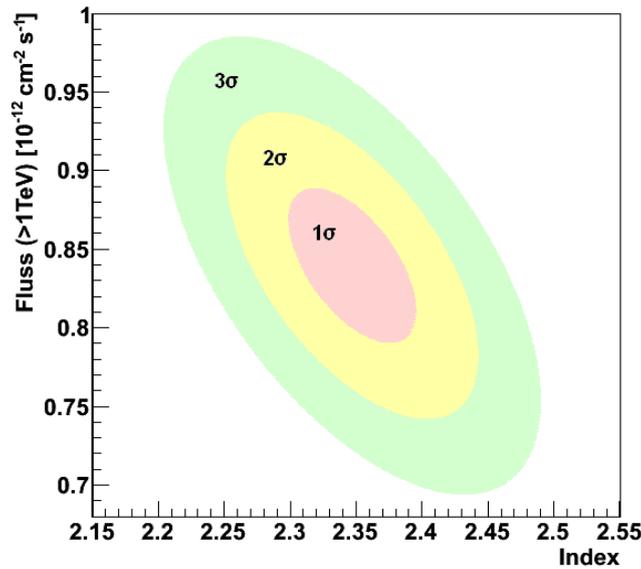


Abbildung 6: Konfidenz-Bereiche korrelierter Größen. Aufgetragen ist hierbei der spektrale Index Γ gegen den integrierten Fluss $F(> 1 \text{ TeV})$.

Die Korrelation der Größen ist deutlich an der Drehung der Hauptachsen der Ellipsen zu erkennen. Dabei ist der Wertebereich der Korrelation $\sigma_{\Phi_0, F} \in [-1; +1]$, anschaulich entspricht dies einem Drehwinkelbereich von $\varphi \in [-45^\circ; +45^\circ]$.

3 Energiespektrum der Gesamtquelle

Für das Spektrum der gesamten Quelle wurden Model++ Analysen für verschiedene Quellgrößen und Exclusion Regions durchgeführt. Dabei wurden Standard-Cuts verwendet, sowie alle 224 verfügbaren Observation-Runs für RX J1713.7–3946 .

Im Nachfolgenden sind die Ergebnisse der Analysen mit einer Quellgröße von $0,65^\circ$ aufgeführt, da sich diese gut mit den Ergebnissen von *Aharonian, F. et al. (2006)* vergleichen lassen.

Dabei ergab sich für die Analyse mit einer Exclusion Region von $0,69^\circ$ eine live time von 61,6 h (43,2 h acc. corrected). Für die Exclusion Region von $0,8^\circ$ konnten entsprechend weniger Runs berücksichtigt werden, da die Runs im Wobble-Mode wegfallen, die komplet innerhalb der Exclusion Region verliefen. Daraus resultierte eine live time von 18,9 h (6,1 h acc. corrected).

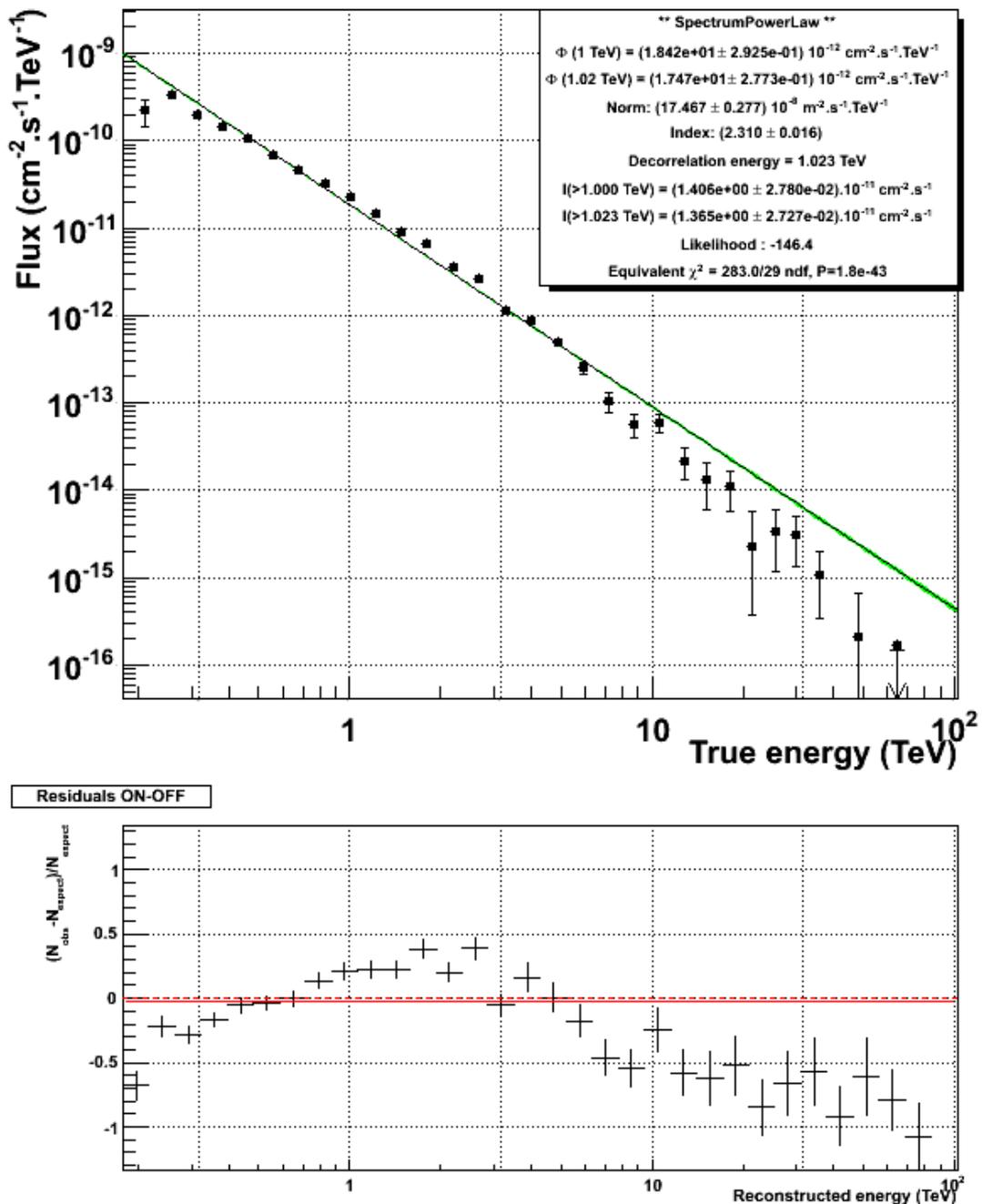


Abbildung 7: Energiespektrum von RX J1713.7-3946 mit gefittetem Powerlaw-Spektrum. Für die Quelle wurde eine Größe von $0,65^\circ$ gewählt und eine Exclusion Region von $0,69^\circ$.

Wie sich an Abbildung 7 erkennen lässt, ist das reine Potenzgesetz-Spektrum nur für einen begrenzten Energiebereich eine gute Näherung. Deshalb wurden neben einem Powerlaw auch noch andere spektrale Energieverteilungen betrachtet, die das Spektrum besser beschreiben. Diese Verteilungen sind von folgender Gestalt:

Powerlaw

$$\frac{dN}{dE} = \Phi_0 \left(\frac{E}{E_0} \right)^{-\Gamma}$$

Broken Powerlaw

$$\frac{dN}{dE} = \Phi_0 \begin{cases} \left(\frac{E}{E_0} \right)^{-\Gamma_1} & \text{für } E \leq E_{cut} \\ \left(\frac{E_{cut}}{E_0} \right)^{-\Gamma_1+\Gamma_2} \left(\frac{E}{E_0} \right)^{-\Gamma_2} & \text{für } E > E_{cut} \end{cases}$$

Curved Powerlaw

$$\frac{dN}{dE} = \Phi_0 \left(\frac{E}{E_0} \right)^{-\Gamma - \beta \log(E/E_0)}$$

Exponential Cutoff

$$\frac{dN}{dE} = \Phi_0 \left(\frac{E}{E_0} \right)^{-\Gamma} \cdot \exp\left(\frac{-E}{E_{cut}}\right)$$

Abbildungen der Spektren für diese Formen finden sich in Anhang B, jeweils für eine Exclusion Region von $0,69^\circ$ und $0,8^\circ$. Eine Auflistung der Werte in den Tabellen 1 und 2.

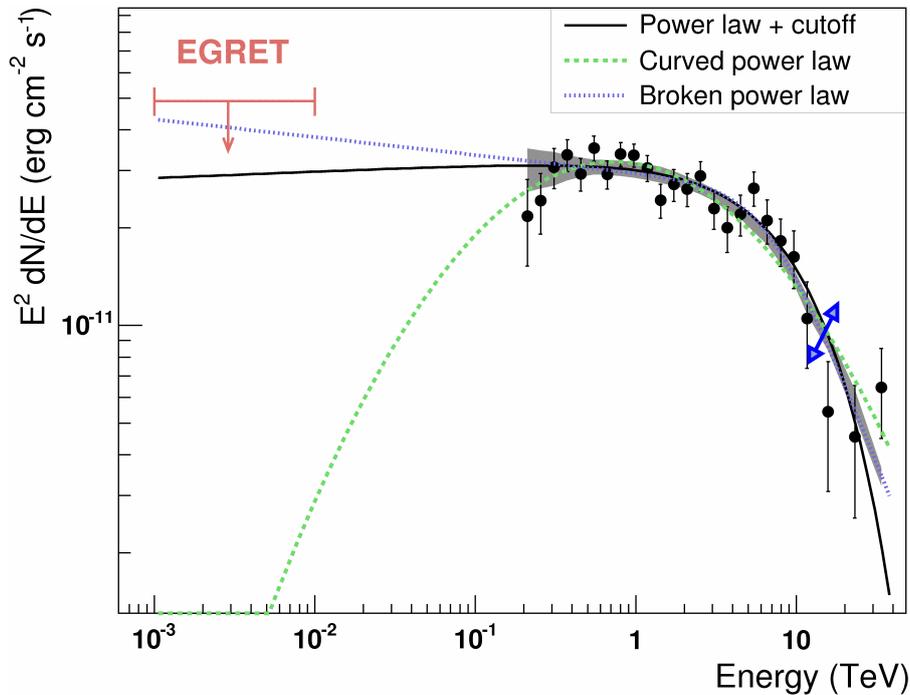


Abbildung 8: Energiespektrum von RX J1713.7-3946 mit verschiedenen Formen des Spektrums [Aharonian, F. et al. (2006)]

Tabelle 1: Fit-Ergebnisse für verschiedene Spektralformen von RX J1713.7-3946. $\Phi_0(1 \text{ TeV})$ ist in $10^{-12} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ TeV}^{-1}$ angegeben, $F(> 1 \text{ TeV})$ in $10^{-12} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ und E_{cut} in TeV. Für die Quelle wurde eine Größe von $0,65^\circ$ gewählt und eine Exclusion Region von $0,69^\circ$.

Form	Φ_0	Γ	χ^2 (d.o.f.)	$F(> 1 \text{ TeV})$
Powerlaw	$18,4 \pm 0,3$	$2,31 \pm 0,02$	283,0 (29)	$14,1 \pm 0,3$
Curved Powerlaw	$22,5 \pm 0,4$	$2,00 \pm 0,03$	$\beta = 0,22 \pm 0,02$ 35,6 (28)	$16,1 \pm 0,5$
Exponential Cutoff	$21,6 \pm 0,4$	$1,81 \pm 0,04$	$E_{cut} = 4,1 \pm 0,4$ 42,6 (28)	$16,1 \pm 0,9$

Tabelle 2: Fit-Ergebnisse für verschiedene Spektralformen von RX J1713.7-3946. $\Phi_0(1 \text{ TeV})$ ist in $10^{-12} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ TeV}^{-1}$ angegeben, $F(> 1 \text{ TeV})$ in $10^{-12} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ und E_{cut} in TeV. Für die Quelle wurde eine Größe von $0,65^\circ$ gewählt und eine Exclusion Region von $0,8^\circ$.

Form	Φ_0	Γ	χ^2 (d.o.f.)	$F(> 1 \text{ TeV})$
Powerlaw	$17,1 \pm 0,5$	$2,26 \pm 0,04$	78,9 (29)	$13,5 \pm 0,6$
Curved Powerlaw	$20,5 \pm 0,8$	$1,92 \pm 0,06$	$\beta = 0,23 \pm 0,04$ 32,2 (28)	$14,8 \pm 1,0$
Exponential Cutoff	$20,1 \pm 0,7$	$1,71 \pm 0,10$	$E_{cut} = 3,3 \pm 0,7$ 28,6 (28)	$14,9 \pm 1,9$

Tabelle 3: Fit-Ergebnisse von *Aharonian, F. et al. (2006)* für verschiedene Spektralformen von RX J1713.7-3946. Φ_0 ist in $10^{-12} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ TeV}^{-1}$ angegeben, $F(> 1 \text{ TeV})$ in $10^{-12} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ und E_{cut} in TeV. Für die Quelle wurde ebenfalls eine Größe von $0,65^\circ$ gewählt

Form	Φ_0	Γ	χ^2 (d.o.f.)	$F(> 1 \text{ TeV})$
Powerlaw	$17,1 \pm 0,5$	$2,26 \pm 0,02$	85,6 (23)	$13,5 \pm 0,4$
Curved Powerlaw	$19,7 \pm 0,6$	$2,08 \pm 0,04$	$\beta = 0,30 \pm 0,04$ 25,5 (22)	$15,6 \pm 0,7$
Exponential Cutoff	$20,4 \pm 0,8$	$1,98 \pm 0,05$	$E_{cut} = 12 \pm 2$ 27,4 (22)	$15,5 \pm 1,1$

Die Ergebnisse der Analyse mit einer Exclusion Region von $0,8^\circ$ entsprechen, insbesondere beim Powerlaw-Spektrum, im Rahmen der Fehlerbereiche ganz gut den Resultaten von *Aharonian, F. et al. (2006)*. Dies ist der Verwendung der Model++ Analyse zu verdanken, da hierbei selbst mit der geringeren live time Ergebnisse mit einer vergleichbaren Genauigkeit erreichbar sind. Für die Analysen der im Folgenden definierten einzelnen Teilbereiche wurde eine Exclusion Region von $0,69^\circ$ für RX J1713.7–3946 verwendet, so dass, bedingt durch die größere Anzahl an berücksichtigten Runs und damit höhere live time, die Fehlerbereiche deutlich verringert werden konnten.

4 Räumlich aufgelöste Spektren

Nach der Betrachtung des Spektrums der gesamten Quelle soll im folgenden untersucht werden, wie sich das Spektrum in Teilbereiche verhält. Dabei ist vor allen interessant ob sich eventuell eine Tendenz für den spektralen Index Γ ergibt.

4.1 Zirkulare Teilregionen

Analog zu *Naumann-Godo, M. (2010)* wurden 11 zirkulare Teilregionen mit einen Radius von je $0,1^\circ$ von RX J1713.7–3946 betrachtet, die sich wie in Abbildung 9 dargestellt in die Karte einfügen.

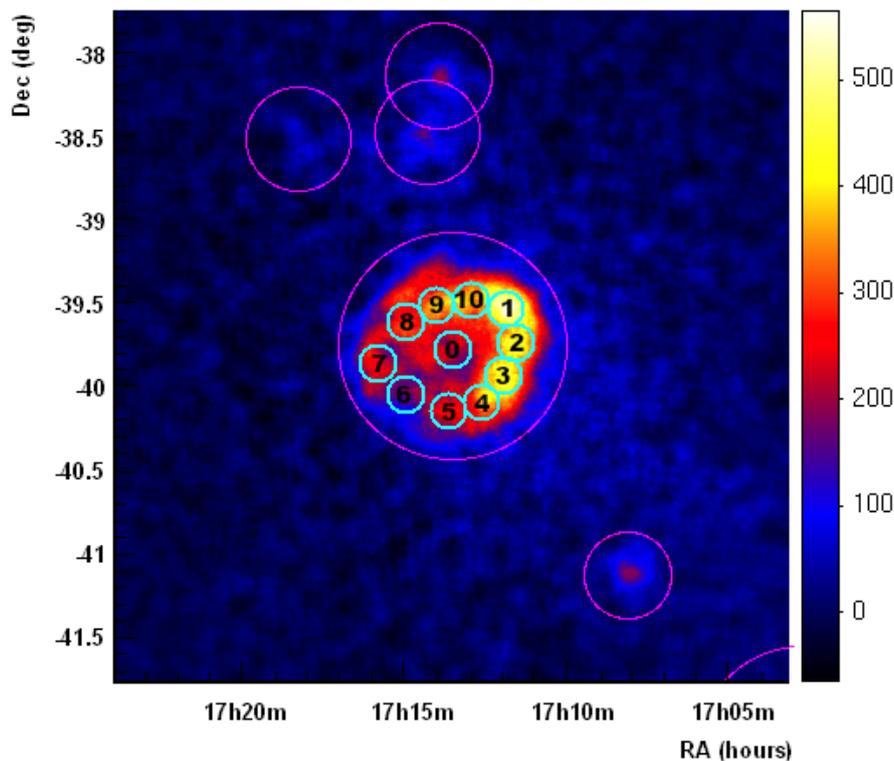


Abbildung 9: Teilregionen in die Schale des SNR RX J1713.7–3946 eingepasst. Jede Region hat einen Radius von $0,1^\circ$, für RX J1713.7–3946 wurde eine Exclusion Region von $0,69^\circ$ angenommen.

Wie schon bei der Analyse des gesamten Supernovaüberrests wurden für die einzelnen Teilregionen Model++ Analysen durchgeführt, bei denen Standard-Cuts verwendet wurden, sowie alle 224 verfügbaren Runs für RX J1713.7–3946, auf den in der Analyse eine Exclusion Region von $0,69^\circ$ angewandt wurde.

Des Weiteren wurden auch Analysen mit einer Exclusion Region von $0,8^\circ$ für RX J1713.7–3946 durchgeführt, aus denen tendenziell die gleichen Ergebnisse folgen, aber wie nach der Analyse der Gesamtspektren zu erwarten, mit etwas größeren Fehlerbereichen, weshalb im Folgenden die Ergebnisse der $0,69^\circ$ -Analysen dargestellt werden.

Für die durchgeführten Analysen hat der Vergleich zwischen Radial Acceptance und 2D Model Acceptance in diesem Fall keinen signifikanten Unterschied ergeben, die Resultate sind im Rahmen der gültigen Stellen identisch. Die dargestellten Ergebnisse wurden mit 2D Model Acceptance erstellt.

In einem ersten Schritt wurde an die Daten ein Powerlaw im Bereich von 0,02–125 TeV gefittet. Die Ergebnisse davon sind in Abbildung 10 bzw. Tabelle 5 (siehe Anhang A) dargestellt:

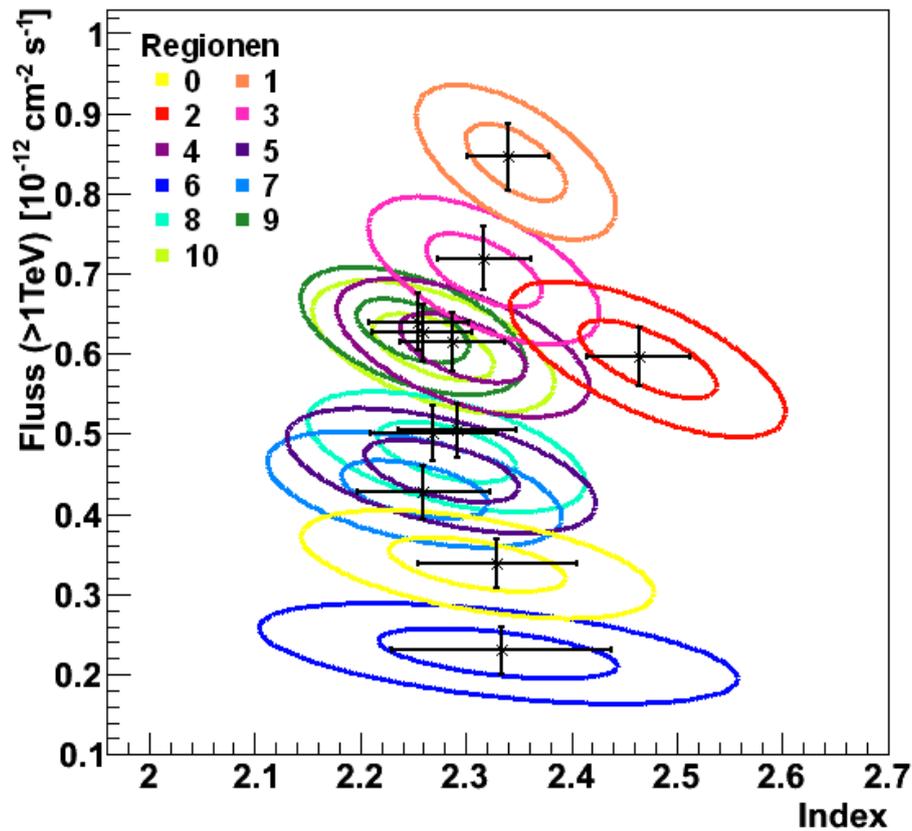


Abbildung 10: Der integrierte Fluss $F(> 1 \text{ TeV})$ gegen den spektralen Index Γ . Jeder Ring kennzeichnet hierbei ein 1σ -Intervall. Schwarz darüber die Ergebnisse von *Naumann-Godo, M. (2010)*.

Es ist ersichtlich, dass die Ergebnisse von *Naumann-Godo, M. (2010)* gut zu den nun ermittelten Konfidenz-Bereichen passen.

Auffallend ist außerdem, dass die Korrelation zwischen integriertem Fluss und spektralem Index mit steigendem Fluss zunimmt. Die lässt sich dadurch erklären, dass wie in Gleichung 2.7 gezeigt, die Korrelation der Größen stark von Φ_0 abhängt.

Allerdings ist ein Powerlaw nicht über den gesamten Energiebereich eine geeignete Näherung. Wie man beispielsweise an Abbildung 11 erkennen kann, fällt das Spektrum vor allem bei hohen Energien wesentlich schneller ab, als der Powerlawfit.

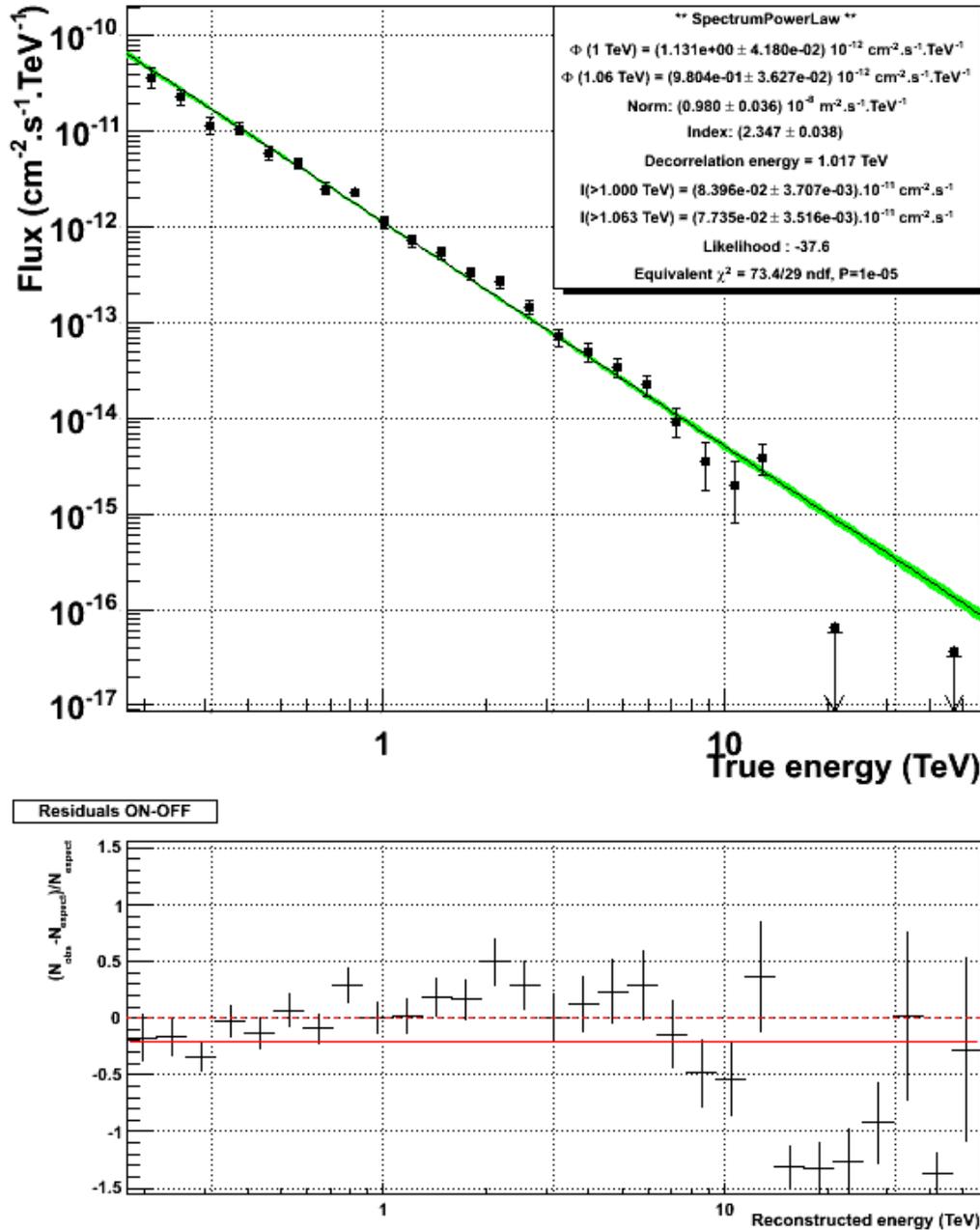


Abbildung 11: Spektrum von Teilregion 1 mit einem gefitteten Powerlaw von 0,02 – 125 TeV. Bei hohen Energien ist deutlich die Diskrepanz zwischen dem Fit und den Messwerten zu erkennen

Um dieses Problem abzumildern wird im Folgenden der Fitbereich für das Spektrum eingeschränkt. Als untere Grenze wurde hierzu 0,5 TeV gewählt um Schwankungen bei niedersten Energien auszublenden. Für die Obergrenze wurden an die Daten zunächst Broken-Powerlaw-Spektren gefittet. Unter Berücksichtigung der jeweiligen Fehler ändert sich der spektrale Index im Mittel bei $E_{cut} = 1,4 \pm 0,2 \text{ TeV}$.

In dem so entstandenen Energiebereich $E \in [0,5; 1,4]$ TeV ist ein Powerlaw eine vernünftige Näherung des Spektrums. Die Ergebnisse davon sind in Abbildung 12 bzw. Tabelle 6 (siehe Anhang A) dargestellt:

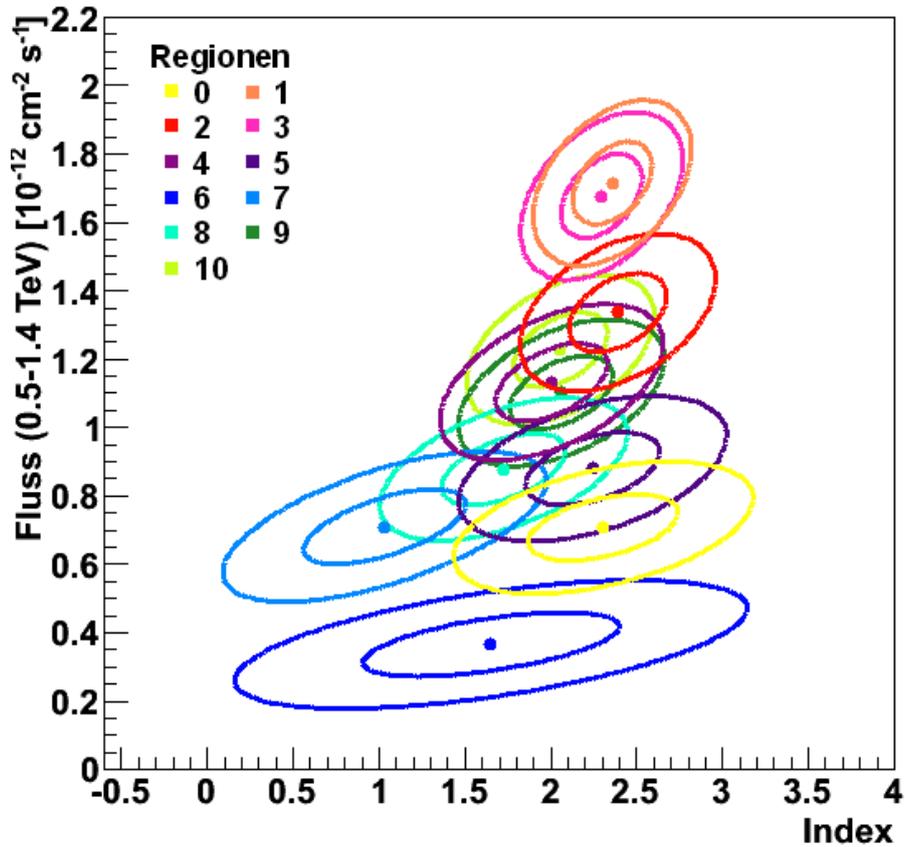


Abbildung 12: Der integrierte Fluss $F(0,5 - 1,4 \text{ TeV})$ gegen den spektralen Index Γ . Jeder Ring kennzeichnet hierbei ein 1σ -Intervall.

Aus den so gewonnenen Ergebnissen lässt sich noch keine befriedigende Aussage extrahieren. Die Konfidenz-Bereiche sind noch sehr groß im Vergleich zu den evtl. Unterschieden der spektralen Indizes. Dieses Problem kann hoffentlich durch eine verbesserte Statistik aufgrund größerer Teilregionen verbessert werden.

4.2 Teilregionen nach Schalenstruktur

Die Analyse der 11 zirkularen Teilregionen wäre mit kleineren Fehlerbereichen deutlich aussagekräftiger. Eine Möglichkeit ist die Vergrößerung der Teilregionen um durch den höheren Fluss eine bessere Statistik zu erreichen.

Dazu wurden neue Teilregionen definiert, die zunächst Regionen mit ähnlichen Werten für Index und Fluss zusammenfassen. Zusätzlich wurde versucht Größe und Form an die Schalenstruktur des Supernovaüberrests anzupassen.

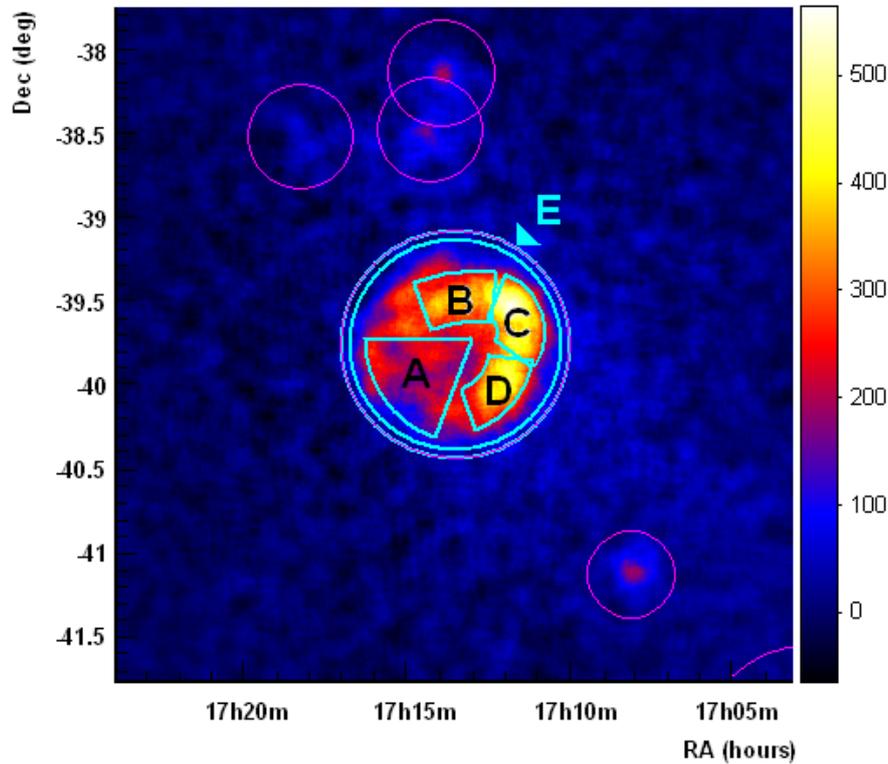


Abbildung 13: Neue, an SNR-Schale angepasste Teilregionen durch Zusammenfassung benachbarter zirkulärer Teilregionen.

Tabelle 4: Position und Form der Teilregionen A-E. Die angegebenen Parameter definieren jeweils ein Bogensegment. Für Θ wurde jeweils ein Kreis angenommen, in den die Region eingeschrieben werden kann. Der Skalierungsfaktor S skaliert die Fläche der jeweiligen Teilregion auf die Größe der zirkulären Teilregionen des letzten Kapitels.

<i>Region</i>	<i>RA</i>	<i>DEC</i>	Φ_1	Φ_2	r_1	r_2	Θ	S
A (0 + 5 + 6 + 7)	258, 27°	-39, 73°	290°	0°	0°	0, 6°	0, 37°	1/7
B (9 + 10)	258, 22°	-40, 40°	69°	95°	0, 77°	1, 06°	0, 26°	6000/22997
C (1 + 2)	258, 18°	-39, 69°	110°	215°	0, 08°	0, 35°	0, 28°	800/2709
D (3 + 4)	258, 46°	-39, 79°	187°	250°	0, 25°	0, 5°	0, 28°	32/105
E	258, 39°	-39, 76°	0°	360°	0, 6°	0, 65°	0, 65°	4/25

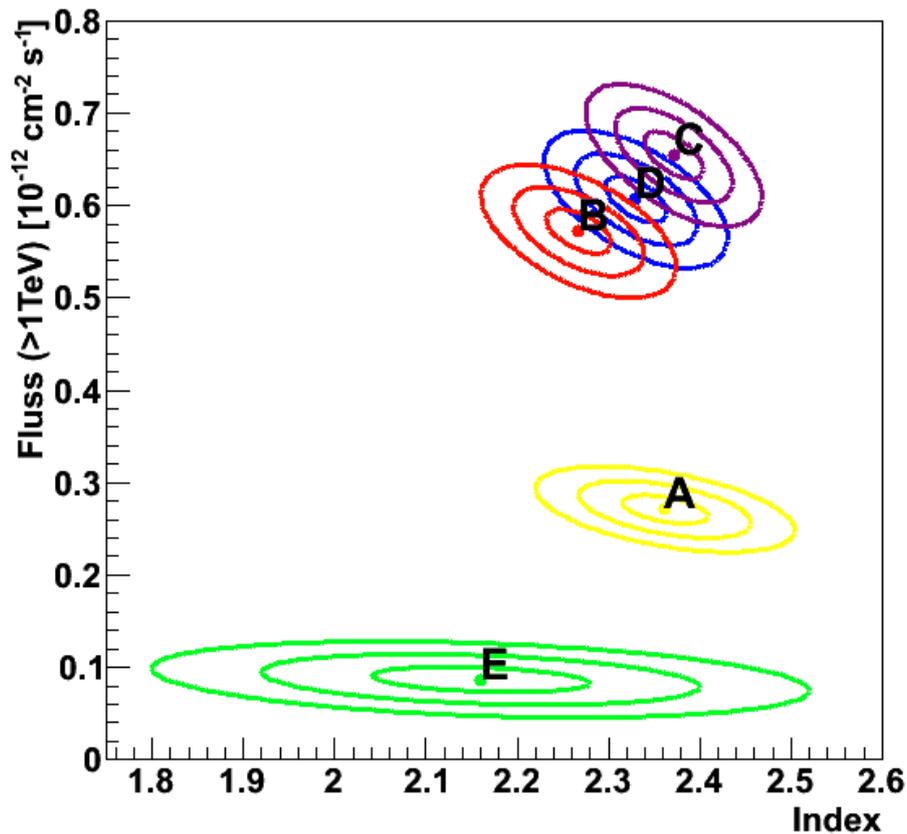


Abbildung 14: Der integrierte Fluss $F(> 1 \text{ TeV})$ gegen den spektralen Index Γ . Regionen entsprechend Tabelle 4. Das Spektrum wurde von 0,02 – 125 TeV gefittet. Eine Übersicht der Werte findet sich in Tabelle 7 (siehe Anhang A).

Ein Vergleich dieser Ergebnisse mit Abbildung 10 ergibt zunächst, dass die Teilregionen an den erwarteten Positionen liegen. Zum Beispiel wird die zuvor mit Abstand hellste Teilregion 1 von ihrem neuen Partner näher an die anderen Teilregionen herangezogen und so liegt der integrierte Fluss von Teilregion C nun ziemlich mittig zwischen den Werten von Teilregion 1 und 2.

Für definitive Aussagen sind die Ergebnisse leider noch nicht geeignet, man kann aber sehen, dass sich z.B. bei den Regionen B und C nur noch die 2σ -Bereiche berühren.

In Abbildung 14 muss natürlich noch bedacht werden, dass sich der Spektrumsfit über den gesamten Energiebereich erstreckt hat. Darum sind im Folgenden noch die Ergebnisse für ein Spektrum zwischen 0,5–1,4 TeV angegeben. Diese Einschränkung führt allerdings unweigerlich zu größeren Fehlerbereichen.

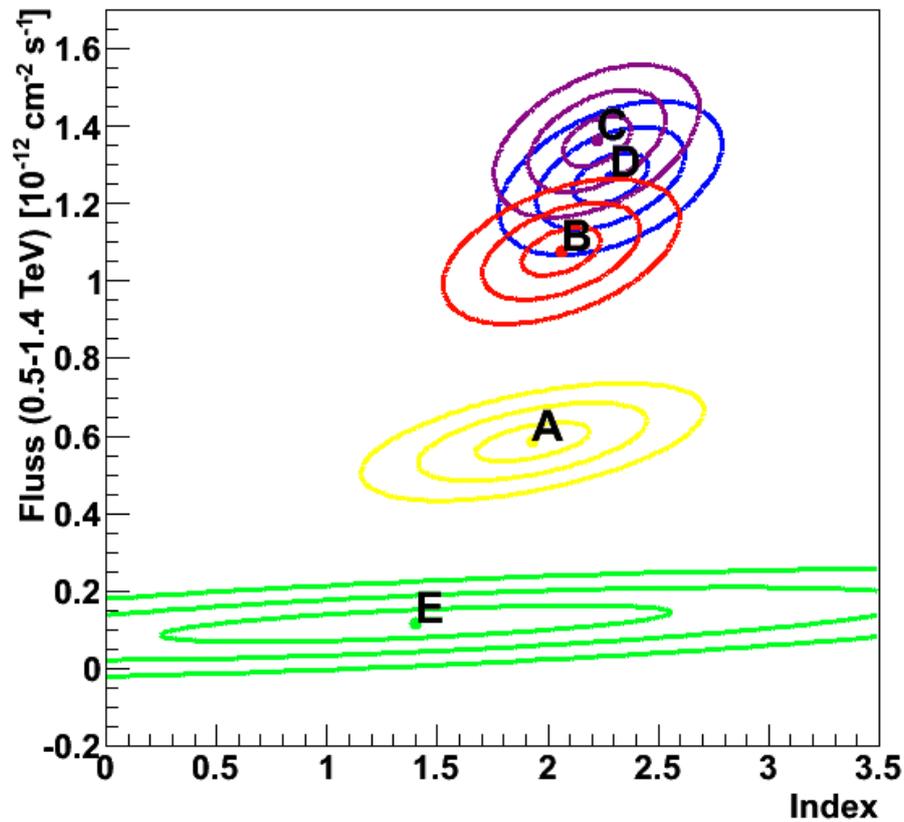


Abbildung 15: Der integrierte Fluss $F(0,5-1,4 \text{ TeV})$ gegen den spektralen Index Γ . Regionen entsprechend Tabelle 4. Das Spektrum wurde von 0,5 – 1,4 TeV gefittet. Eine Übersicht der Werte findet sich in Tabelle 8 (siehe Anhang A).

Durch die starke Einschränkung des Energiebereichs für den Spektrum-Fit vergrößerten sich die Fehlerbereiche signifikant, so dass auch aus dieser Untersuchung noch keine eindeutigen Schlüsse gezogen werden können.

Ein anderer Ansatz um die Schalenstruktur von RX J1713.7–3946 besser beschreiben zu können, wäre der Blick über den Tellerand hin zu anderen Wellenlängenbereichen.

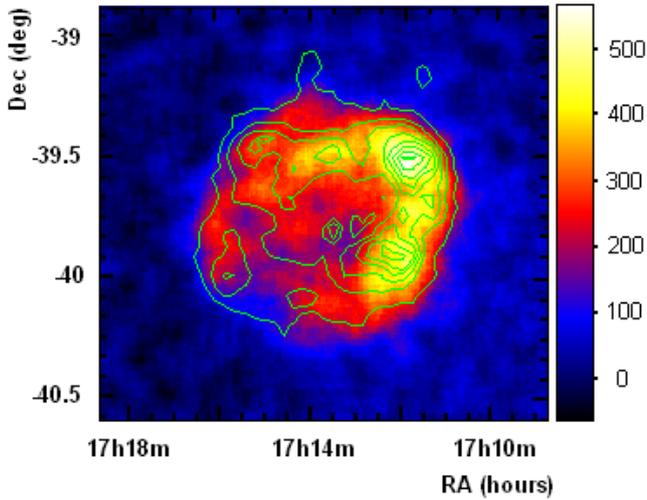


Abbildung 17: Gamma-Excessmap von RX J1713.7–3946. Darüber in grün die Röntgenkonturen, aufgenommen vom ASCA-Satelliten im Energiebereich 1 – 3 keV.

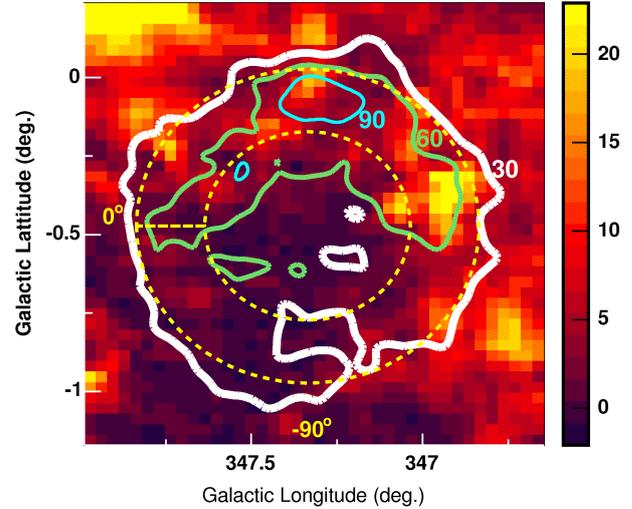


Abbildung 18: Intensitätsverteilung von CO ($J = 1 - 0$) Emission in galaktischen Koordinaten. Entstanden durch Integration des CO-Spektrums in einem Geschwindigkeitsbereich von -11 km/s bis -3 km/s (was einer Entfernung von 0,4 kpc bis 1,5 kpc entspricht). Darüber die Konturen einer H.E.S.S. Excessmap. [Aharonian, F. et al. (2006)]

In Abbildung 17 sind Gammadaten mit Konturen einer Röntgenmessung des ASCA-Satelliten dargestellt. Mit den Röntgendaten könnte man z.B. die in Kapitel 4.2 definierten Teilregionen besser an die Schalenstruktur anpassen und testen, ob daraus Änderungen der Ergebnissen resultieren.

Auch könnte man die Materieverteilung im Supernovaüberrest untersuchen, wozu CO-Messungen herangezogen werden können, wie sie z.B. von Fukui et al. 2003 durchgeführt wurden. Für die Verwendung der CO-Messungen muss man sich allerdings im Klaren darüber sein, dass deren Ergebnisse stark entfernungsabhängig sind. In Abbildung 18 sind die Ergebnisse für eine Entfernung von ca. 1 kpc dargestellt, einer der beiden für RX J1713.7–3946 diskutierten Entfernungen.

Bei den vielfältigen Möglichkeiten für eine Modifikation der Untersuchung sollte aber genau die jeweilige Systematik der Anpassungen betrachtet werden. Ansonsten würde unter Umständen die Gefahr bestehen, die Analyse so lange zu verändern, bis die gewünschten Resultate herauskommen.

Anhang

Anhang A

Tabellen

Tabelle 5: Fit-Ergebnisse für zirkulare Teilregionen mit einem Radius von je $0,1^\circ$. Für die Exclusion Region von RX J1713.7–3946 wurde ein Radius von $0,69^\circ$ angenommen und das Spektrum von $0,02–125$ TeV gefittet. E_{Dec} ist in TeV angegeben, Φ_{Dec} in $10^{-12} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ TeV}^{-1}$ und $F(> 1 \text{ TeV})$ in $10^{-12} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

<i>Region</i>	<i>RA</i>	<i>DEC</i>	E_{Dec}	Φ_{Dec}	Γ	χ^2 (d.o.f.)	$F(> 1 \text{ TeV})$
0	$258,39^\circ$	$-39,78^\circ$	1,15	$0,32 \pm 0,02$	$2,31 \pm 0,07$	36,0 (29)	$0,34 \pm 0,03$
1	$258,99^\circ$	$-39,54^\circ$	1,02	$1,09 \pm 0,04$	$2,35 \pm 0,04$	73,4 (29)	$0,84 \pm 0,04$
2	$258,93^\circ$	$-39,74^\circ$	0,85	$1,32 \pm 0,06$	$2,47 \pm 0,05$	40,9 (28)	$0,59 \pm 0,03$
3	$258,02^\circ$	$-39,93^\circ$	1,07	$0,80 \pm 0,03$	$2,32 \pm 0,04$	72,4 (29)	$0,70 \pm 0,04$
4	$258,17^\circ$	$-40,09^\circ$	1,11	$0,62 \pm 0,03$	$2,30 \pm 0,05$	54,0 (29)	$0,61 \pm 0,04$
5	$258,42^\circ$	$-40,14^\circ$	1,18	$0,40 \pm 0,02$	$2,28 \pm 0,06$	51,0 (29)	$0,45 \pm 0,03$
6	$258,74^\circ$	$-40,04^\circ$	1,15	$0,22 \pm 0,02$	$2,33 \pm 0,10$	42,7 (29)	$0,23 \pm 0,03$
7	$258,95^\circ$	$-39,86^\circ$	1,26	$0,32 \pm 0,02$	$2,25 \pm 0,06$	55,6 (29)	$0,43 \pm 0,03$
8	$258,74^\circ$	$-39,62^\circ$	1,17	$0,43 \pm 0,02$	$2,28 \pm 0,06$	44,8 (29)	$0,48 \pm 0,03$
9	$258,51^\circ$	$-39,53^\circ$	1,22	$0,51 \pm 0,02$	$2,25 \pm 0,05$	51,7 (29)	$0,63 \pm 0,03$
10	$258,25^\circ$	$-39,50^\circ$	1,16	$0,55 \pm 0,03$	$2,27 \pm 0,05$	71,1 (29)	$0,61 \pm 0,03$

Tabelle 6: Fit-Ergebnisse für zirkulare Teilregionen mit einem Radius von je $0,1^\circ$. Für die Exclusion Region von RX J1713.7–3946 wurde ein Radius von $0,69^\circ$ angenommen und das Spektrum von $0,5–1,4$ TeV gefittet. E_{Dec} ist in TeV angegeben, Φ_{Dec} in $10^{-12} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ TeV}^{-1}$ und $F(0,5–1,4 \text{ TeV})$ in $10^{-12} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

<i>Region</i>	<i>RA</i>	<i>DEC</i>	E_{Dec}	Φ_{Dec}	Γ	χ^2 (d.o.f.)	$F(0,5–1,4 \text{ TeV})$
0	$258,39^\circ$	$-39,78^\circ$	0,86	$0,71 \pm 0,08$	$2,31 \pm 0,39$	3,6 (3)	$0,71 \pm 0,09$
1	$258,99^\circ$	$-39,54^\circ$	0,84	$1,80 \pm 0,10$	$2,36 \pm 0,21$	10,1 (3)	$1,71 \pm 0,11$
2	$258,93^\circ$	$-39,74^\circ$	0,84	$1,39 \pm 0,10$	$2,39 \pm 0,26$	2,3 (3)	$1,34 \pm 0,10$
3	$258,02^\circ$	$-39,93^\circ$	0,85	$1,73 \pm 0,10$	$2,30 \pm 0,21$	1,6 (3)	$1,68 \pm 0,11$
4	$258,17^\circ$	$-40,09^\circ$	0,89	$1,11 \pm 0,08$	$2,00 \pm 0,28$	3,5 (3)	$1,13 \pm 0,10$
5	$258,42^\circ$	$-40,14^\circ$	0,86	$0,89 \pm 0,08$	$2,24 \pm 0,35$	1,7 (3)	$0,88 \pm 0,09$
6	$258,74^\circ$	$-40,04^\circ$	0,96	$0,33 \pm 0,06$	$1,65 \pm 0,61$	2,1 (3)	$0,37 \pm 0,08$
7	$258,95^\circ$	$-39,86^\circ$	1,02	$0,67 \pm 0,07$	$1,03 \pm 0,37$	4,0 (3)	$0,71 \pm 0,09$
8	$258,74^\circ$	$-39,62^\circ$	0,93	$0,83 \pm 0,07$	$1,72 \pm 0,31$	7,4 (3)	$0,88 \pm 0,09$
9	$258,51^\circ$	$-39,53^\circ$	0,89	$1,08 \pm 0,08$	$2,06 \pm 0,27$	4,8 (3)	$1,10 \pm 0,09$
10	$258,25^\circ$	$-39,50^\circ$	0,88	$1,22 \pm 0,09$	$2,06 \pm 0,25$	5,7 (3)	$1,23 \pm 0,10$

Tabelle 7: Fit-Ergebnisse für in Tabelle 4 definierten Teilregionen. Für die Exclusion Region von RX J1713.7–3946 wurde ein Radius von $0,69^\circ$ angenommen und das Spektrum von $0,02 - 125$ TeV gefittet. E_{Dec} ist in TeV angegeben, Φ_{Dec} in $10^{-12} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ TeV}^{-1}$ und $F(> 1 \text{ TeV})$ in $10^{-12} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

<i>Region</i>	E_{Dec}	Φ_{Dec}	Γ	χ^2 (d.o.f.)	$F(> 1 \text{ TeV})$
<i>A</i>	1,16	$0,26 \pm 0,01$	$2,36 \pm 0,04$	98,7 (29)	$0,27 \pm 0,01$
<i>B</i>	1,16	$0,52 \pm 0,02$	$2,27 \pm 0,03$	110,7 (29)	$0,57 \pm 0,02$
<i>C</i>	1,00	$0,90 \pm 0,02$	$2,37 \pm 0,03$	97,1 (29)	$0,65 \pm 0,02$
<i>D</i>	1,06	$0,71 \pm 0,02$	$2,33 \pm 0,03$	94,8 (29)	$0,61 \pm 0,02$
<i>E</i>	1,61	$0,04 \pm 0,01$	$2,16 \pm 0,11$	20,5 (29)	$0,09 \pm 0,01$

Tabelle 8: Fit-Ergebnisse für in Tabelle 4 definierten Teilregionen. Für die Exclusion Region von RX J1713.7–3946 wurde ein Radius von $0,69^\circ$ angenommen und das Spektrum von $0,05 - 1,4$ TeV gefittet. E_{Dec} ist in TeV angegeben, Φ_{Dec} in $10^{-12} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ TeV}^{-1}$ und $F(0,5 - 1,4 \text{ TeV})$ in $10^{-12} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

<i>Region</i>	E_{Dec}	Φ_{Dec}	Γ	χ^2 (d.o.f.)	$F(0,5 - 1,4 \text{ TeV})$
<i>A</i>	0.92	0.54 ± 0.03	1.93 ± 0.22	7,8 (3)	0.59 ± 0.04
<i>B</i>	0.89	1.06 ± 0.05	2.06 ± 0.16	3,8 (3)	1.08 ± 0.06
<i>C</i>	0.86	1.38 ± 0.05	2.22 ± 0.14	8,8 (3)	1.36 ± 0.06
<i>D</i>	0.86	1.28 ± 0.05	2.28 ± 0.15	5,5 (3)	1.27 ± 0.06
<i>E</i>	1.01	0.10 ± 0.02	1.40 ± 0.90	1,7 (3)	0.12 ± 0.04

Anhang B

Spektren der gesamten Quelle

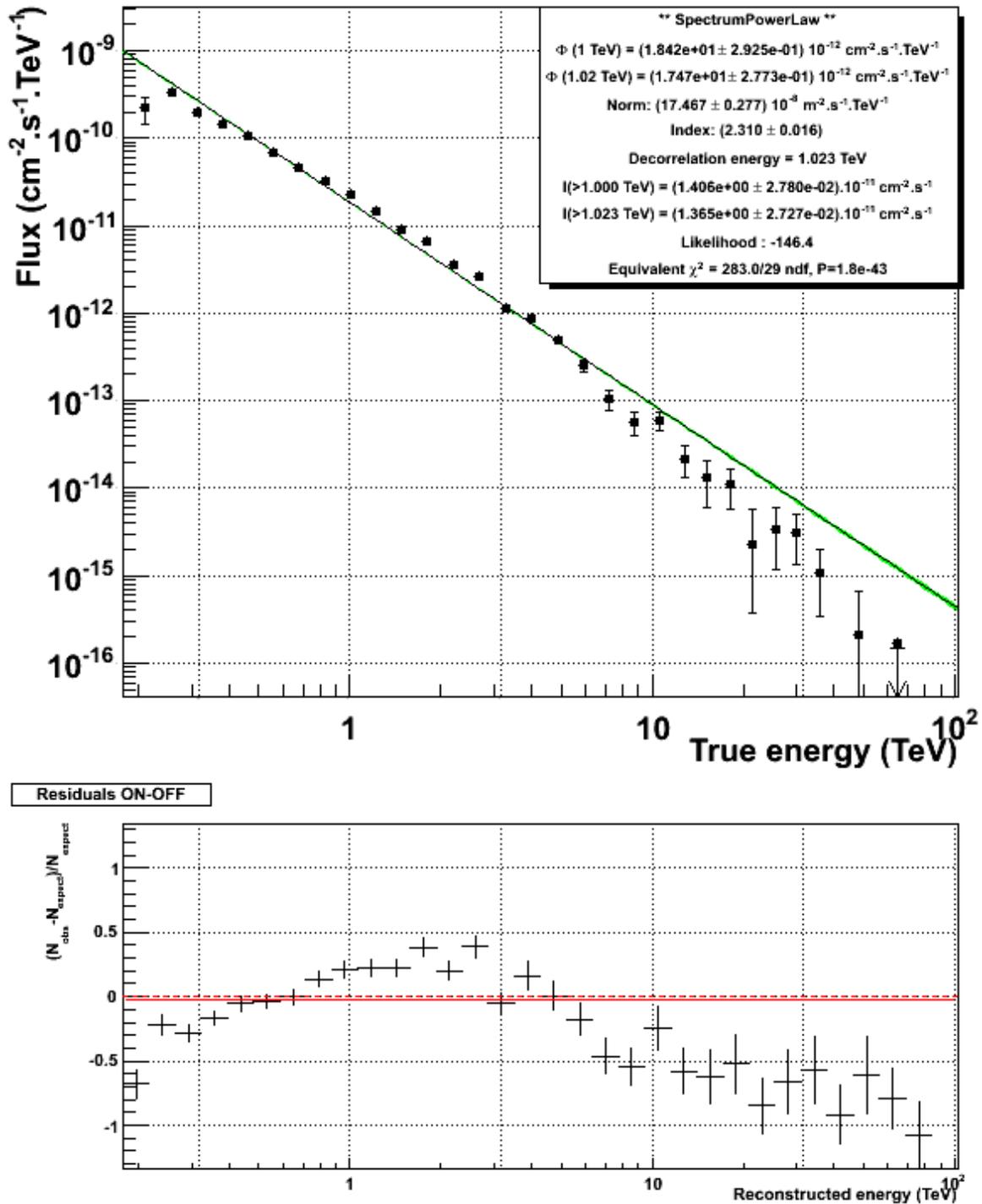


Abbildung 19: Powerlaw-Spektrum der gesamten Quelle. Exclusion Region $0,69^\circ$. Fitbereich für das Spektrum $E \in [0,02; 125]$ TeV.

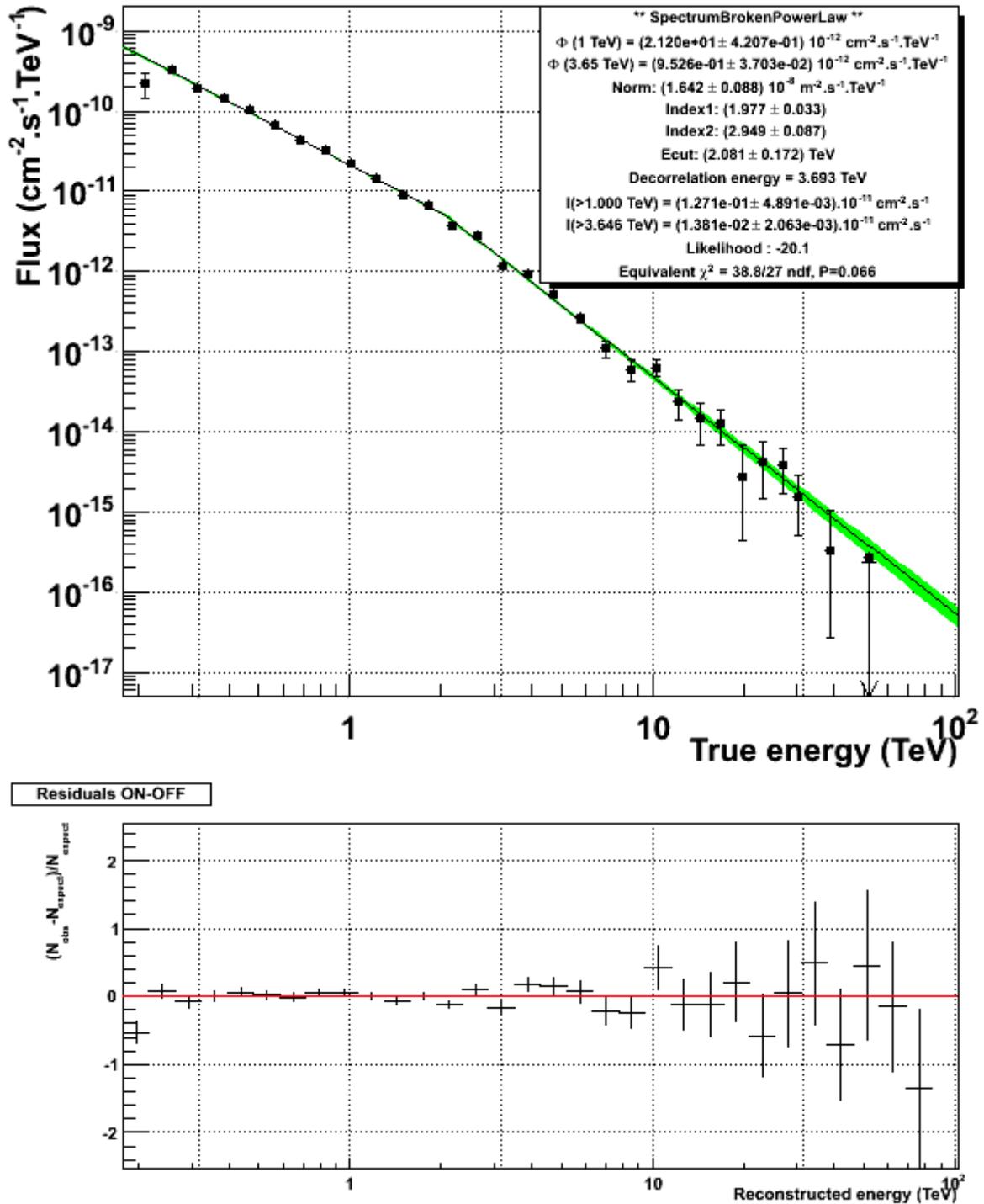


Abbildung 20: Broken-Powerlaw-Spektrum der gesamten Quelle. Exclusion Region $0,69^\circ$. Fitbereich für das Spektrum $E \in [0,02; 125] \text{ TeV}$.

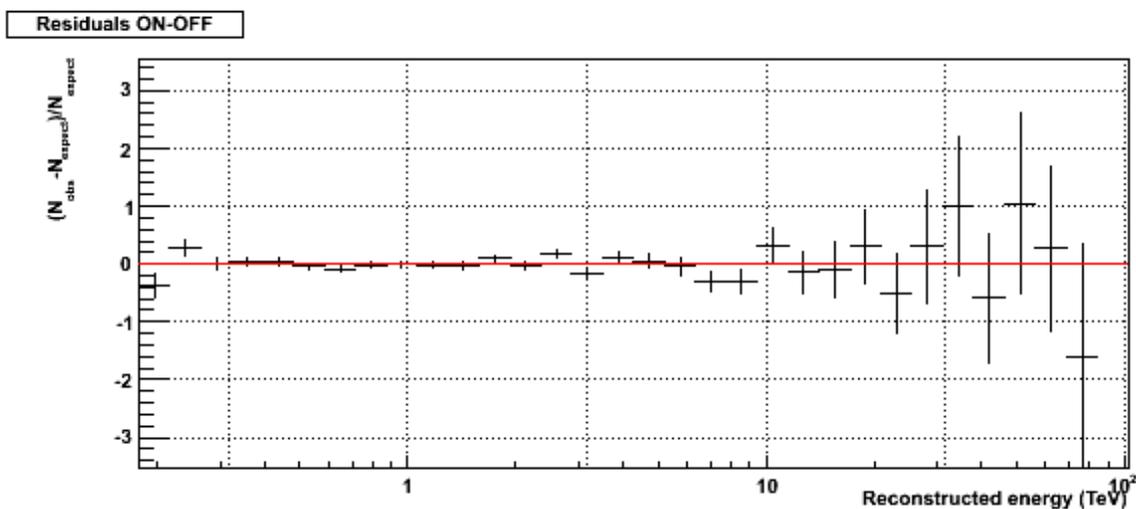
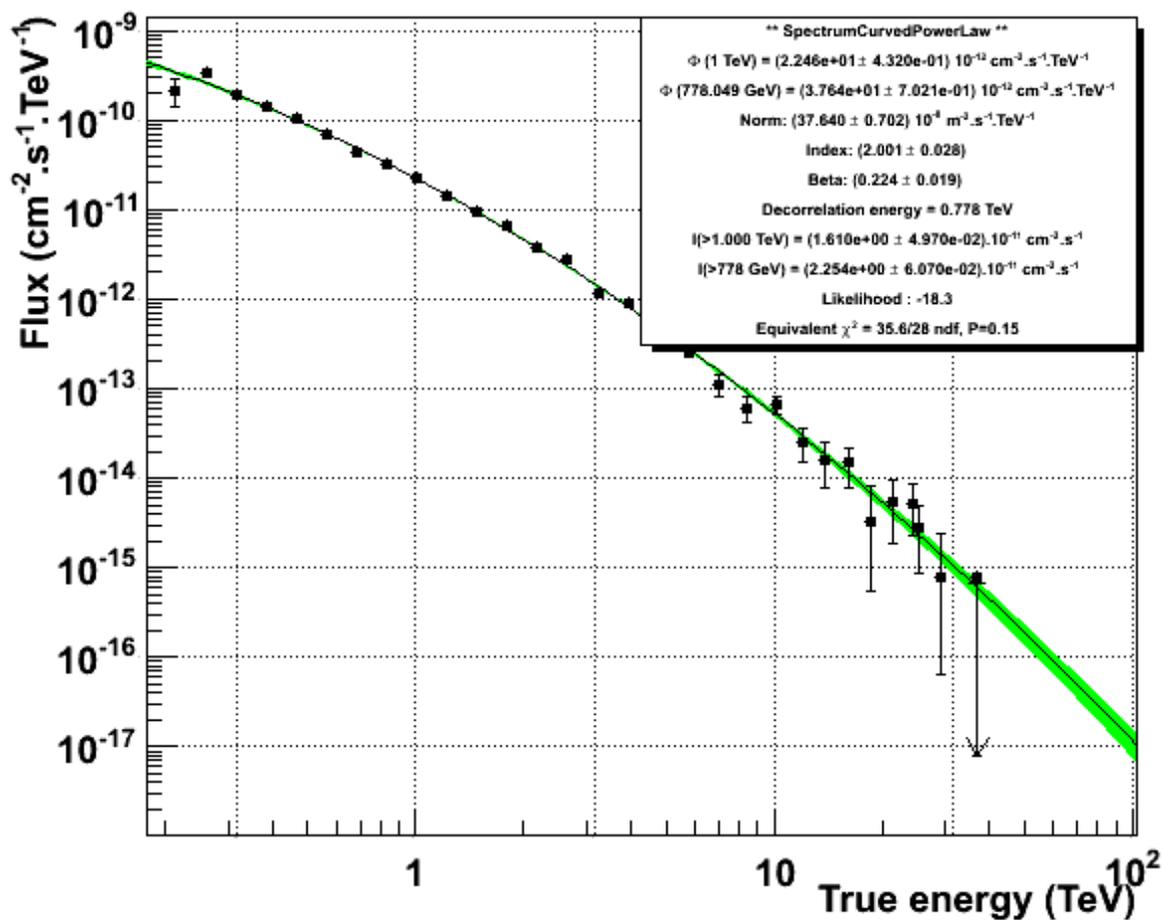
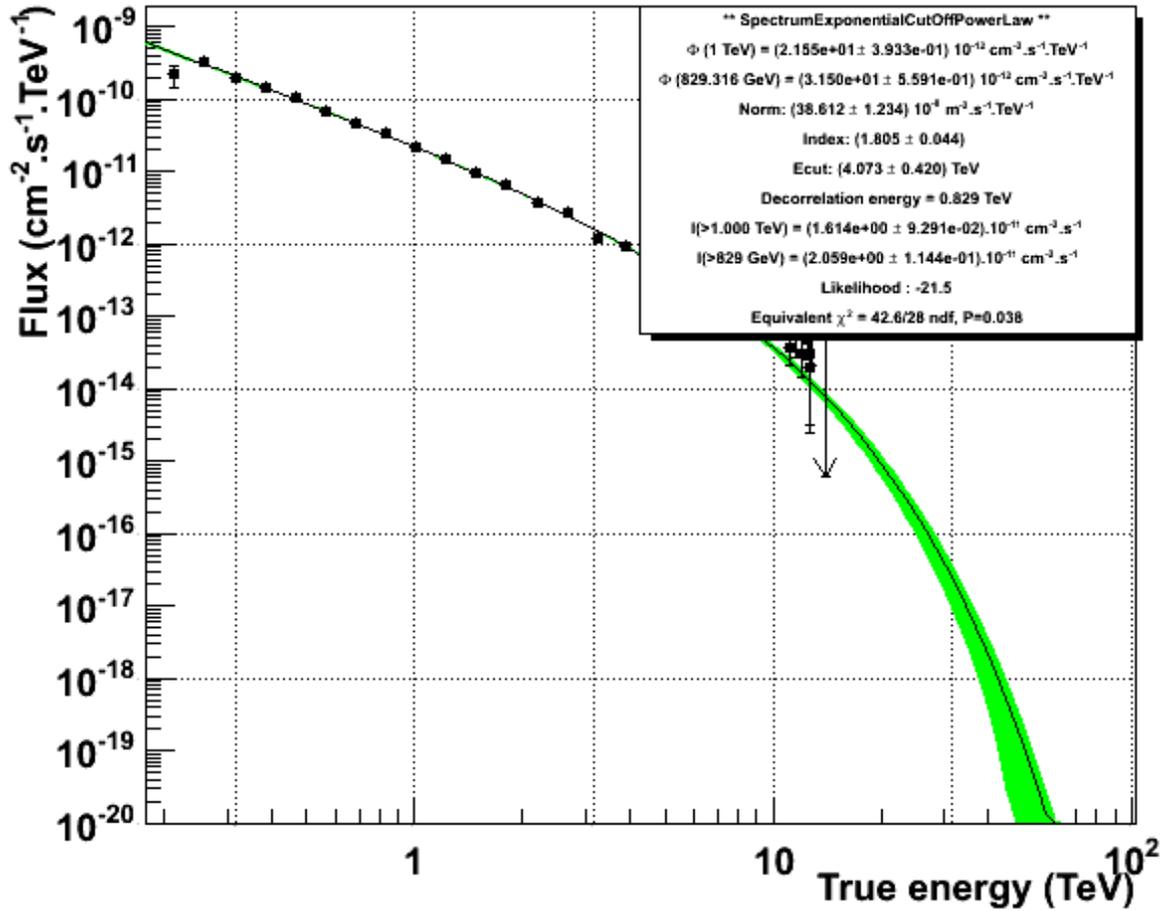


Abbildung 21: Curved-Powerlaw-Spektrum der gesamten Quelle. Exclusion Region $0,69^\circ$. Fitbereich für das Spektrum $E \in [0,02; 125]$ TeV.



Residuals ON-OFF

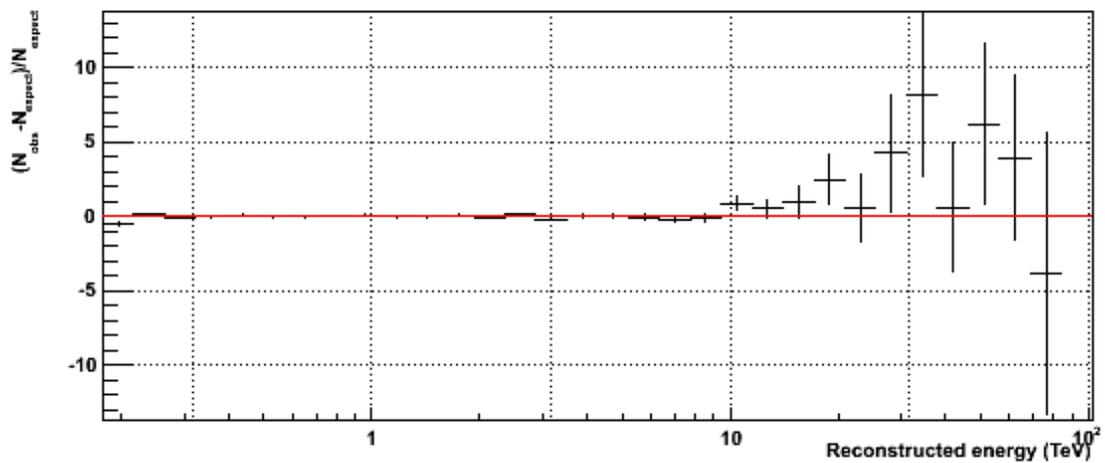


Abbildung 22: Power-Law-Spektrum mit Exponential-Cutoff der gesamten Quelle. Exclusion Region $0,69^\circ$. Fitbereich für das Spektrum $E \in [0,02; 125] \text{ TeV}$.

Anhang C

Spektren der angepassten Teilregionen

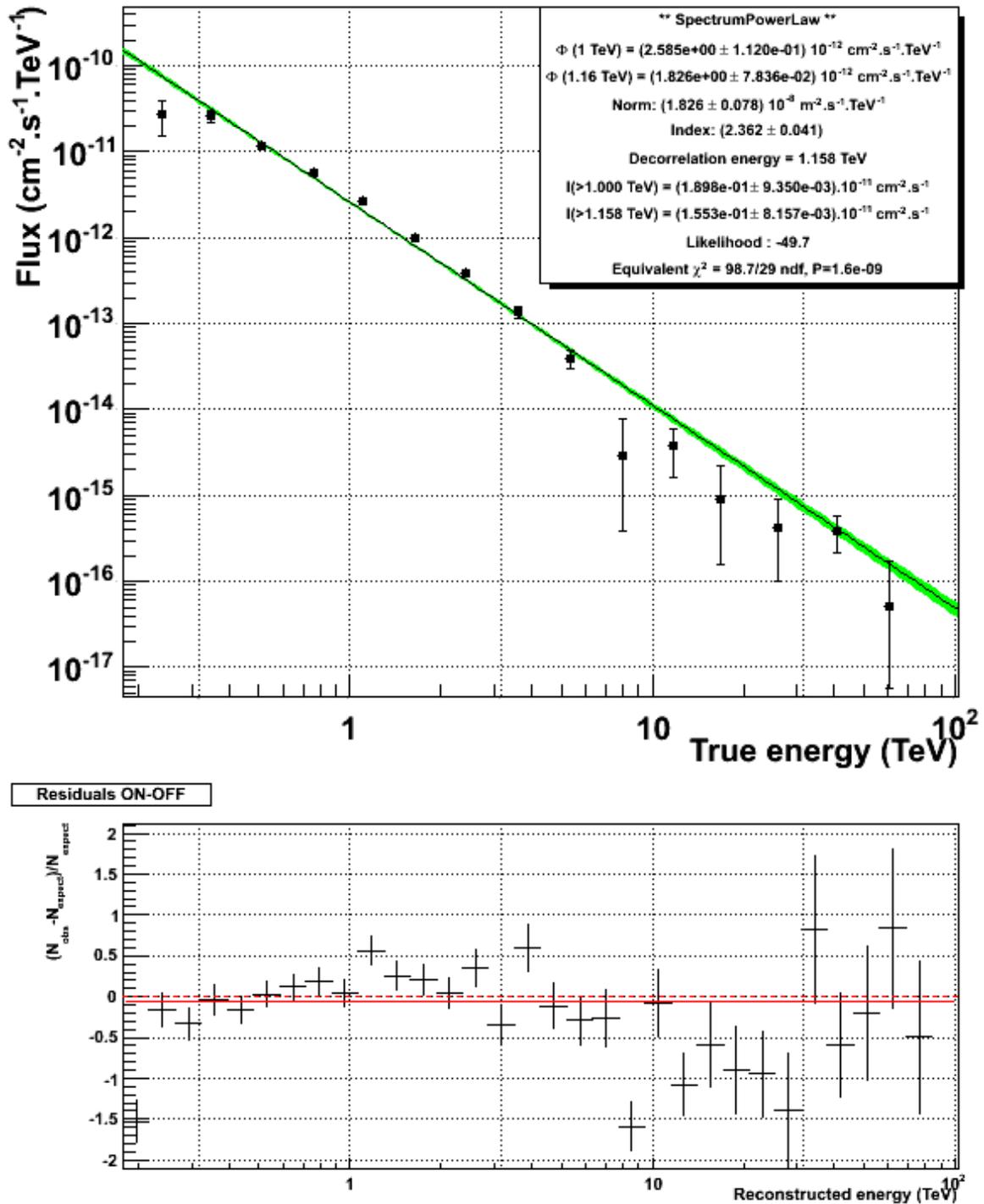


Abbildung 23: Spektrum der Teilregion A. Fitbereich für das Powerlaw-Spektrum $E \in [0, 02; 125]$ TeV.

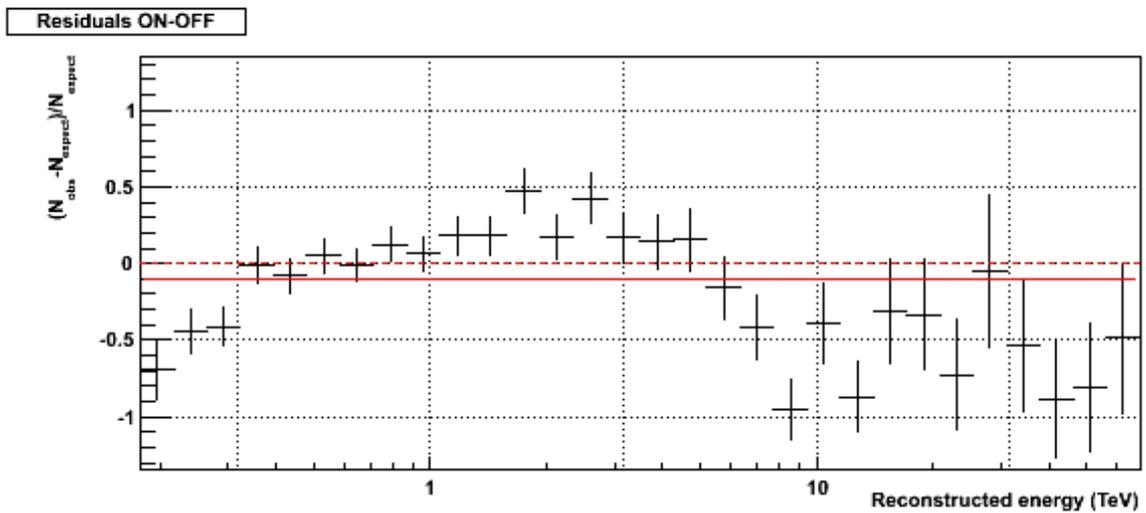
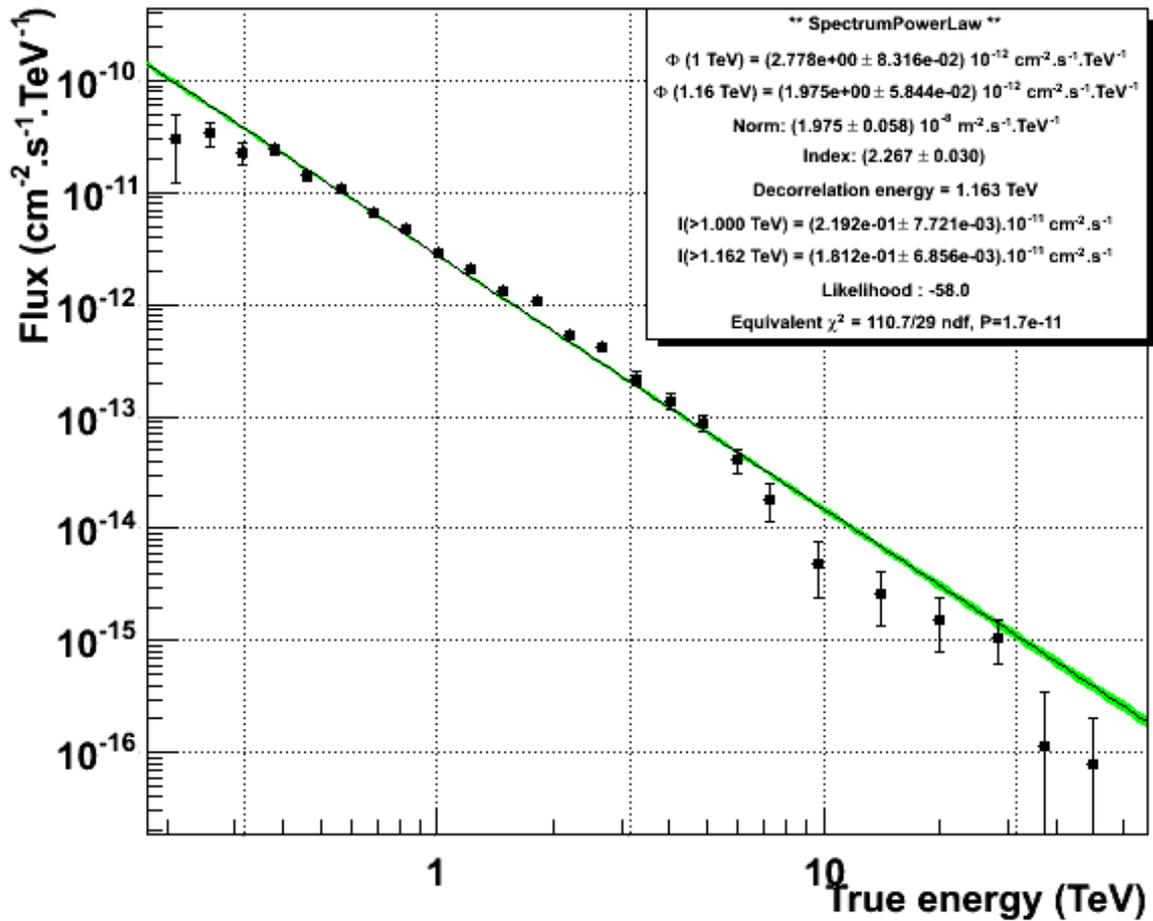


Abbildung 24: Spektrum der Teilregion B. Fitbereich für das Powerlaw-Spektrum $E \in [0, 02; 125]$ TeV.

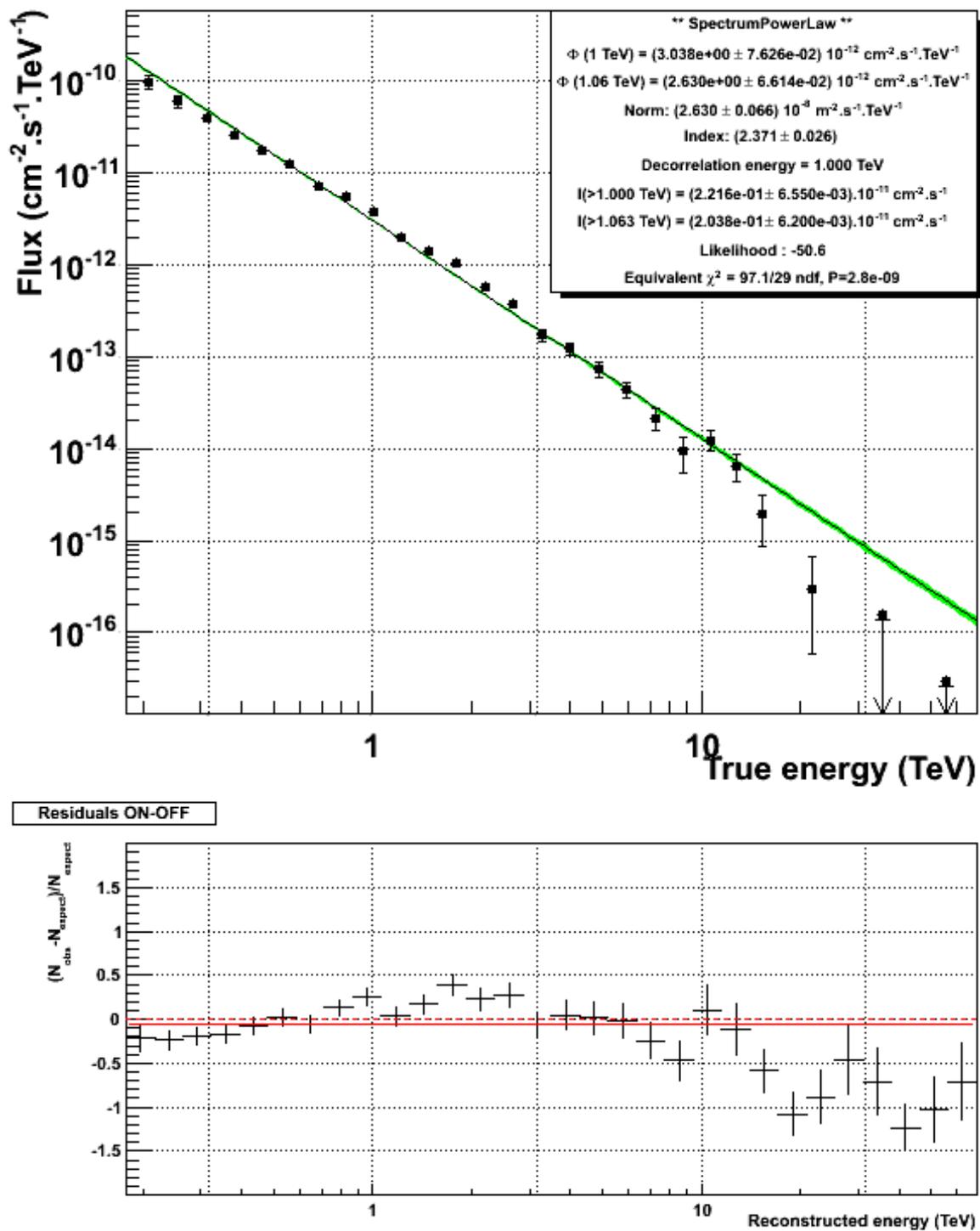


Abbildung 25: Spektrum der Teilregion C. Fitbereich für das Powerlaw-Spektrum $E \in [0, 02; 125]$ TeV.

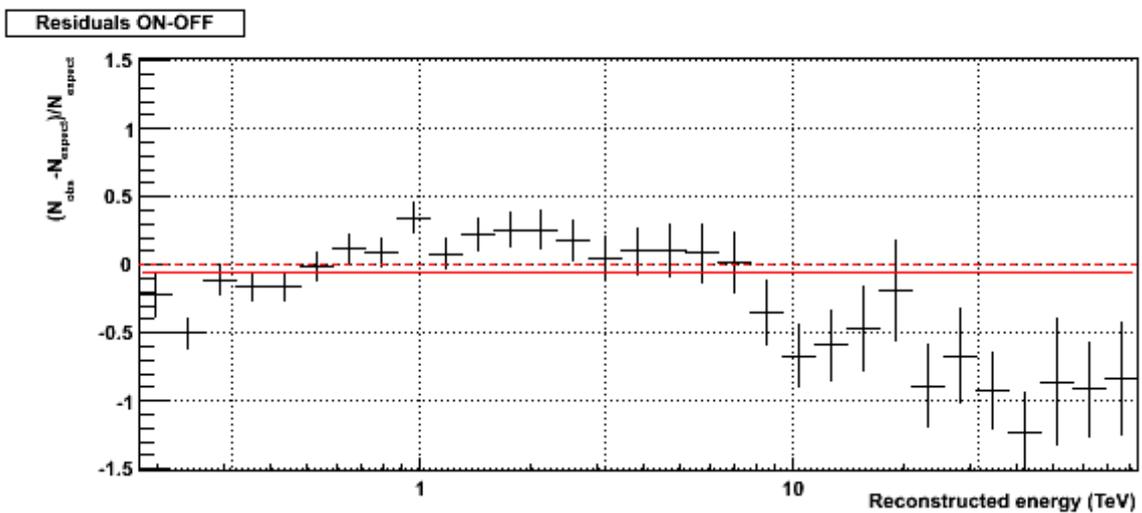
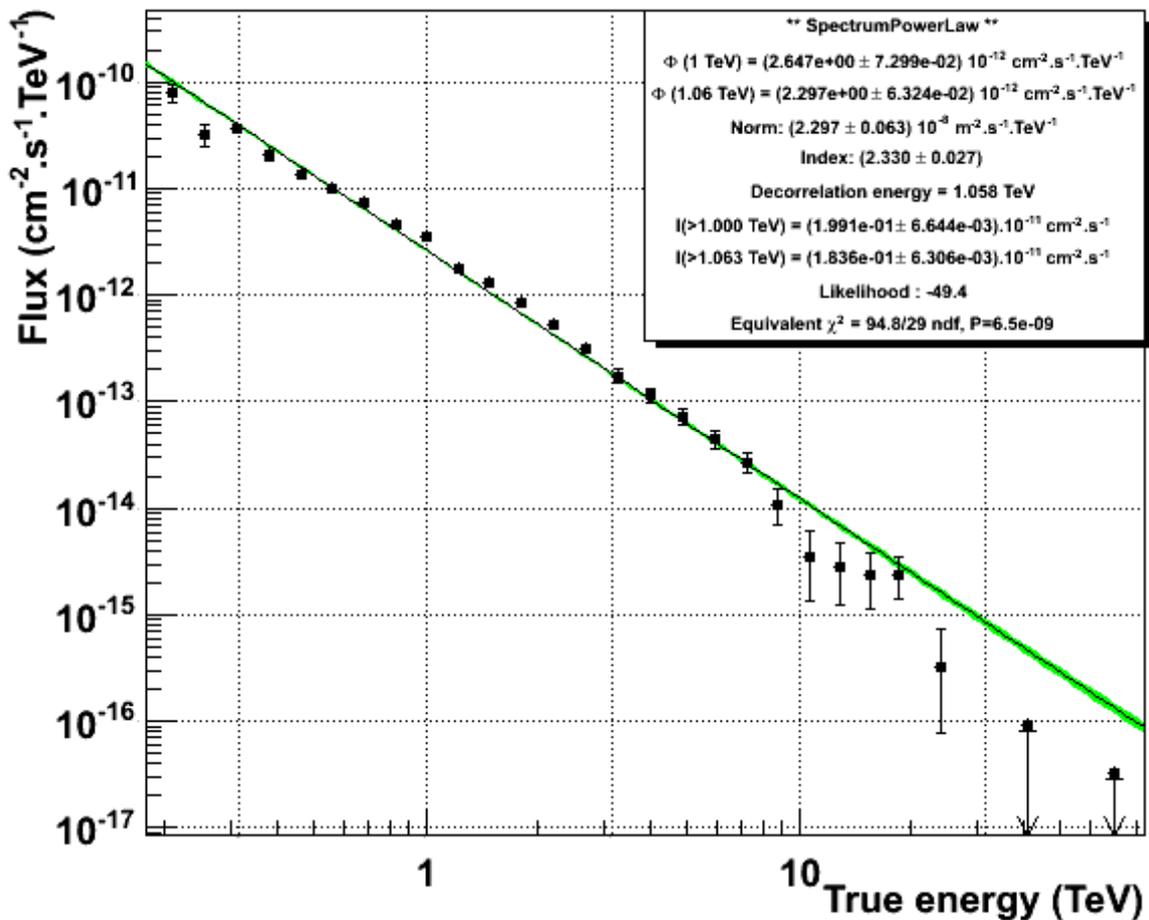


Abbildung 26: Spektrum der Teilregion D. Fitbereich für das Powerlaw-Spektrum $E \in [0, 02; 125]$ TeV.

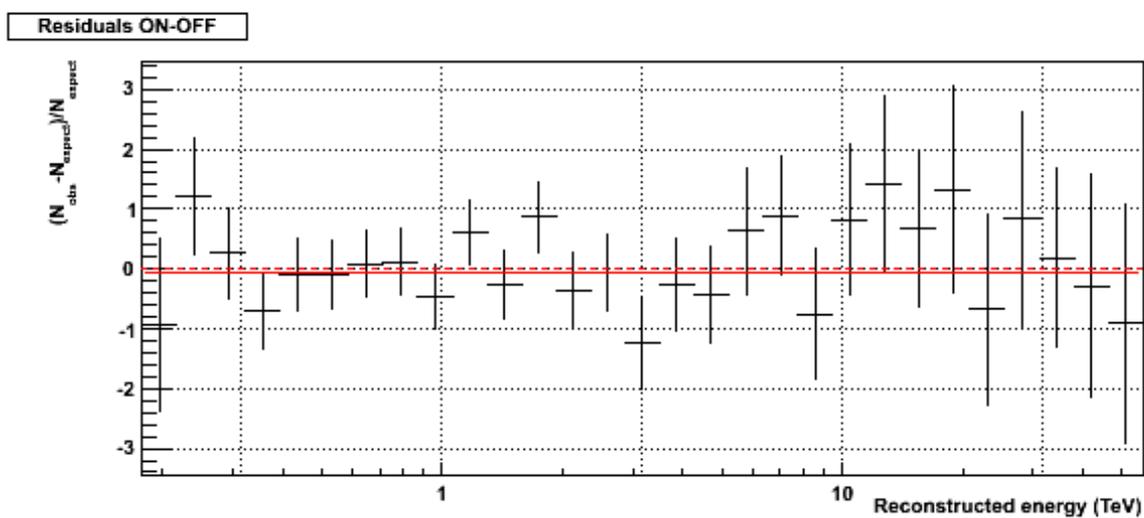
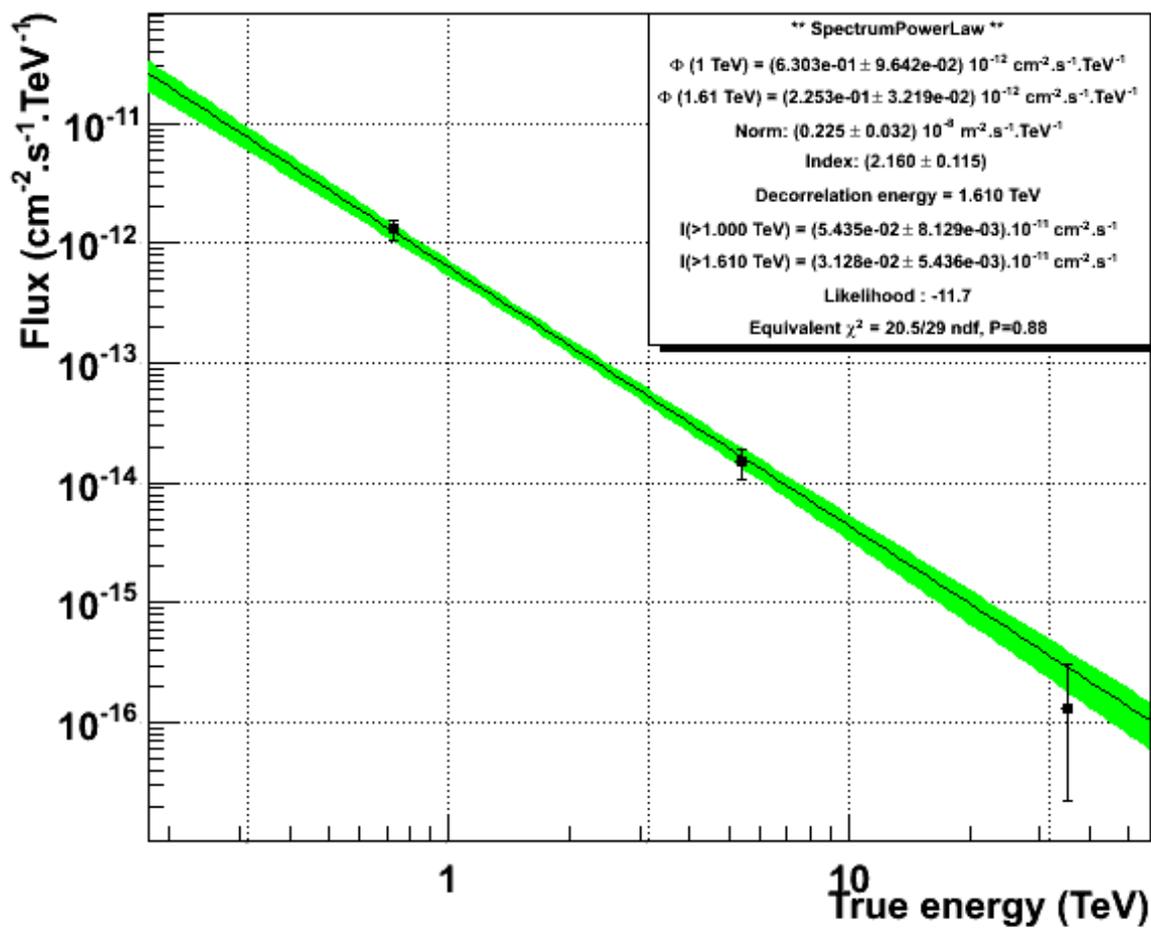


Abbildung 27: Spektrum der Teilregion E. Fitbereich für das Powerlaw-Spektrum $E \in [0, 02; 125]$ TeV.

Anhang D

Literaturverzeichnis

- [1] *Acero, F. et al. (2009)*. A joint spectro-imaging analysis of the XMM-Newton and HESS observations of the supernova remnant RX J1713.7-3946, arXiv:astro-ph/0906.1073.
- [2] *Aharonian, F. et al. [H.E.S.S. Collaboration] (2006)*. A detailed spectral and morphological study of the gamma-ray supernova remnant RX J1713.7-3946 with HESS, arXiv:astro-ph/0511678.
- [3] *Aharonian, F. et al. [H.E.S.S. Collaboration] (2006)*. Observations of the Crab Nebula with H.E.S.S., arXiv:astro-ph/0607333.
- [4] *Berge, D. (2006)*. A detailed study of the gamma-ray supernova remnant RX J1713.7-3946 with H.E.S.S.
- [5] *Berge, D., Funk, S. & Hinton, J. (2006)*. Background Modelling in Very-High-Energy gamma-ray Astronomy, arXiv:astro-ph/0610959.
- [6] *Fukui, Y. et al. (2003)*. Discovery of Interacting Molecular Gas toward the TeV Gamma-Ray Peak of the SNR G 347.3-0.5.
- [7] *Lazendic, J.S. et al. (2004)*. A High-Resolution Study of Nonthermal Radio and X-Ray Emission from SNR G 347.3-0.5.
- [8] *Muraishi, H. et al. (2000)*. Evidence for TeV gamma-ray emission from the shell type SNR RXJ1713.7-3946, arXiv:astro-ph/0001047.
- [9] *de Naurois, M. & Rolland, L. (2009)*. A stereoscopic semi-analytical model reconstruction of gamma-rays for Imaging Atmospheric Cherenkov Telescopes, arXiv:0907.2610.
- [10] *Koyama, K. et al. (1997)*. Discovery of Non Thermal X-Rays from the Northwest Shell of the New SNR RX J1713.7-3946: The Second SN1006? arXiv:astro-ph/9704140.
- [11] *Pfeffermann, E. & Aschenbach, B. (1996)*. ROSAT Observation of a New Supernova Remnant in the Constellation Scorpius.
- [12] *Naumann-Godo, M. (2010)*. Spectral Studies on RX J1713.7-3946, H.E.S.S.-Kollaborationsmeeting Hamburg.
- [13] *Slane, P. et al. (1999)*. X-Ray Emission From the Shell-Type SNR G347.3-0.5, arXiv:astro-ph/9906364.
- [14] *Wang, Z.-R., Qu, Q.-Y. & Chen, Y. (1997)*. Is RX J1713.7–3946 the remnant of the AD393 guest star?

Anhang E

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Leuten herzlich bedanken die mich bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben.

- ✧ Insbesondere möchte ich mich bei Prof. Christian Stegmann für seine Unterstützung und das hochinteressante Thema bedanken.
- ✧ Weiterhin gilt ein großer Dank meinem Betreuer Sebastian Heinz, der geduldig die verwendeten Programme und Analysemethoden erklärte und sich immer Zeit für die kompetente Beantwortung meiner Fragen nahm.
- ✧ Ich danke der ganzen H.E.S.S. Gruppe in Erlangen für eine schöne und angenehme Arbeitsatmosphäre.
- ✧ Des weiteren danke ich meiner Familie und meinen Freunden für ihre großartige Unterstützung und die Geduld, die sie mit mir hatten.

Anhang F

Erklärung

Hiermit bestätige ich, dass ich diese Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe.

Erlangen, den 21. Juli 2010

Susanne Raab