4.1 Das CRT-Projekt

K. Bernlöhr, S. Gamp, C. Harries, G. Hermann, W. Hofmann, T. Kihm, J. Knöppler, G. Leffers, V. Matheis, M. Panter, M. Rosales, M. Ulrich, T. Wolf, R. Zink;
in Zusammenarbeit mit dem Physikalischen Institut der Universität Heidelberg und dem II. Institut für Experimentalphysik der Universität Hamburg.

In the Cosmic Ray Tracking (CRT) project, tracking detectors for secondary particles in cosmic-ray initiated air showers and the read-out system for these detectors have been developed. All the different electronics modules needed for the operation of an array of CRT detectors were designed at the Max Planck Institute and are now available. While measurements with prototype detectors were completed during 1993, a total of 15 CRT detectors have been built and put into operation. Eight of these detectors were shipped to La Palma, Canary Islands, and installed at the HEGRA experiment at an altitude of 2200 m. The main reasons for testing the detector performance there are the high altitude with less attenuation of air showers than at Heidelberg and the data from the HEGRA scintillator array. The shower directions reconstructed from these data are used for comparison by CRT. The angular distributions of secondary particles, in particular muons, in air showers are examined with combined data from CRT and HEGRA. Different methods for reconstructing air showers from CRT data are under investigation.

4.1.1 Stand des Projekts

Da das Spektrum der kosmischen Teilchenstrahlung mit zunehmender Energie sehr stark abfällt, kommen bei sehr hohen Energien (oberhalb einiger 100 GeV pro Teilchen) praktisch nur bodengebundene Beobachtungsverfahren in Frage, die die Atmosphäre als Target-Medium benutzen und Sekundärteilchen oder Tscherenkow-Licht der Teilchenkaskaden (*Luftschauer*) nachweisen. Das Cosmic-Ray-Tracking-Projekt nutzt die Tatsache, daß die Ankunftsrichtung der Sekundärteilchen am Boden meist nur wenige Grad von der der Primärteilchen oberhalb der Atmosphäre abweicht. Die Primärteilchenrichtung kann daher mit weit weniger Sekundärteilchen rekonstruiert werden, als dies bei der klassischen Szintillator-Array-Methode der Fall ist [1][2][3].

Nachdem die CRT-Detektoren und die zugehörige Elektronik zur Einsatzreife entwickelt waren, wurde 1992 mit der Produktion einer Vorserie von 10 Detektoren begonnen. Vier Detektoren wurden 1992 in Betrieb genommen, die weiteren sechs in der ersten Hälfte des Jahres 1993. Weitere fünf von Mitarbeitern des Physikalischen Instituts der Universität Heidelberg am MPIK gebaute Detektoren, mit anderem Detektor-Behälter und anderer Ausleseelektronik, wurden 1993 am Physikalischen Institut aufgebaut und in Betrieb genommen. Nach Abschluß der Messungen wurden diese zum MPIK zurückgebracht und sollen nun für dieselbe Ausleseelektronik wie die anderen 10 Detektoren umgerüstet werden.

Die Untersuchungen mit zwei verschiedenen Prototyp-Detektoren wurden 1993 abgeschlossen. Dabei hatte der eine, bestehend aus einer Driftkammer und einem elektromagnetischen Kalorimeter vor allem der kombinierten Energie- und Winkelmessung der Elektron-Positron-Komponente unter den Sekundärteilchen gedient. Der große Prototyp mit den Dimensionen der späteren CRT-Detektoren unterschied sich von diesen durch andere Kathodenstreifen und andere Ausleseelektronik. Er diente vor allem zum Test des alternativen DL 401 FADC-Systems und in Verbindung mit der Szintillator-Anlage auf dem Gelände des MPIK zur Untersuchung der Myonkomponente von Luftschauern.

Acht der 10 Detektoren des MPIK wurden im Laufe des Jahres 1993 nach La Palma (Kanarische Inseln) verschifft und in einer Höhe von 2200 m im Gelände des HEGRA-Experiments [4] aufgestellt und in Betrieb genommen. Alle Detektoren haben den Transport schadlos überstanden und Aufstellung, Anschluß und Inbetriebnahme konnten in ein bis zwei Tagen pro Detektor durchgeführt werden.

Einer der beiden in Heidelberg am MPIK verbliebenen Detektoren wurde fest in einen Behälter eingeschweißt. Dasselbe ist für den zweiten zu Beginn des Jahres 1994 geplant. Danach sollen auch diese beiden Detektoren zum HEGRA-Experiment verschickt werden.

Der Vorteil des Standorts La Palma gegenüber Heidelberg ist zum einen die größere Höhe und damit die geringere Abschwächung der Luftschauer in der Atmosphäre. Zum anderen liefert das HEGRA-Szintillator-Array die beim Test weniger CRT-Detekoren wichtige Schauerkernposition und zum Vergleich die Schauerrichtung, und zwar erheblich genauer als das kleine Heidelberger Szintillator-Array. Leider wurde im laufenden Jahr das gesamte Datenerfassungssystems des HEGRA-Experiments umgebaut, mit der Konsequenz, daß etwa 6 Monate lang keine gemeinsame Datennahme möglich war. Seit Oktober 1993 werden wieder gemeinsam Daten genommen, wobei auf CRT-Seite etwa 500 000 Ereignisse pro Tag aufgezeichnet werden, um später mit den getrennt verarbeiteten HEGRA-Daten kombiniert zu werden. Auch sind Verfahren zur optimalen Rekonstruktion von Luftschauern aus den CRT-Daten in Entwicklung.

4.1.2 Detektoren und Elektronik

Die CRT-Detektoren bestehen aus zwei runden Driftkammern von 1,8 m Durchmesser mit einer 10 cm dicken Eisenplatte als Myonfilter dazwischen. Jede Driftkammer ist aus zwei D-förmigen Driftkästen aus glasfaserverstärktem Kunststoff mit Kupferbahnen als Äquipotentiallinien und einer Proportionalkammer aus Aluminiumprofilen mit 6 Nachweisdrähten aufgebaut. Ein Teil der Drähte ist zusätzlich mit segmentierten Kathodenstreifen (*Pads*) zur genauen Ortsmessung in Drahtrichtung ausgestattet. Während bei den Detektoren des Physikalischen Instituts und den ersten vier des MPIK jeweils 3 Drähte pro Proportionalkammer mit Pads bestückt sind, sind es bei den 1993 gebauten sechs Detektoren jeweils 4 Drähte, um die Rekonstruktion in Ereignissen mit vielen Spuren noch weiter zu verbessern. Als Behälter dienen Edelstahlbehälter von 2,1 m Durchmesser und 1,57 m Höhe für die vom MPIK gebauten Detektoren und Aluminiumkugeln von 2,1 m Durchmesser für die des Physikalischen Instituts.

Das von der Elektronikabteilung des MPIK entwickelte Elektroniksystem für die CRT-Detektoren wurde 1993 komplettiert. Es besteht aus ladungsempfindlichen Vorverstärkern (im Detektorbehälter direkt an den Proportionalkammern), Pulsformern, Flash-ADC-System, Triggerkarte, Monitorkarte und Event-Grader-System (alle im VME-Überrahmen in einem separaten Elektronikschrank). Als Online-Rechner werden Motorola-68040-CPUs unter dem Betriebssystem OS-9 ohne Plattenlaufwerke an den Detektorstationen eingesetzt. Von der Universität Hamburg wurde ein VME-Digitial-Input-Output- (*VDIO-*) Modul zur Verfügung gestellt, das im zentralen OS-9 System auf La Palma zum Empfang einer auf 16 Bit verkürzten HEGRA-Ereignisnummer vom CAMAC-Digital-Input-Output- (*CADIO-*) Modul am HEGRA-Datenerfassungsrechner dient.

Als Neuentwicklung kam 1993 das sog. Event-Grader-System hinzu. Dieses System besteht aus einem zentralen Sender (*Master*), der direkt oder über einen oder mehrere *Repeater* mit den Empfängern (*Slaves*) in den Elektronikschränken der CRT-Detektoren verbunden ist. Zur Verbindung dienen Koaxialkabel; die Repeater können für große Distanzen auch über Glasfaserkabel miteinander verbunden werden. Das System dient zum einen zur Übertragung von zentralen Triggersignalen einschließlich zugehöriger Ereignisnummer an die Detektorstationen, zum anderen zur gleichzeitigen Übertragung von zusätzlichen Statusbits an alle Stationen oder an eine einzelne Station. Diese Statusbits stehen auch als logische Signale an Lemo-Ausgängen der Empfängermodule zur Verfügung. Außerdem kann die Laufzeit von der Zentrale zu jeder Station sehr genau gemessen werden. Das Event-Grader-System ist seit Oktober 1993 auf La Palma im Einsatz.

Die Pulsformer (*Shaper*), die die von den Vorverstärkern im Detektorbehälter kommenden Pulse auf eine für das Flash-ADC-System angepaßte Breite und Höhe formen, wurden zu einem kompakteren System weiterentwickelt, das lediglich einen VME-Einschub doppelter Breite für 48 Kanäle erfordert. Die neuen Shaper werden an den sechs 1993 gebauten Detektoren eingesetzt.

Eine spezielle Entwicklung für den Einsatz auf La Palma ist ein Modul zum Lesen der Daten einer Rubidium-Uhr einschließlich 5-MHz-Signal, das zusätzlich zum VDIO der späteren Zuordnung von CRT- und HEGRA-Daten dienen soll. Zusätzlich kann dieses Modul bei Ereignissen mit einem Trigger aus einer Koinzidenz von CRT-Detektoren eine sehr genaue Uhrzeit liefern, etwa bei der Suche nach periodischen Quellen oder Gamma-Ray-Bursts.

4.1.3 Abschluß der Untersuchungen mit den Prototyp-Detektoren und weitere Detektortests in Heidelberg

Die Untersuchungen mit den Prototyp-Detektoren, d.h. dem kleinen Detektor mit elektromagnetischem Kalorimeter und dem großen mit DL 401 FADC-System wurden im Laufe des Jahres abgeschlossen. Beide Prototypen waren zusammen mit dem Heidelberger Szintillator-Array betrieben worden.

Mit dem kleinen Prototypen mit einer Driftkammer der Abmessungen $62\times 60\times 27\,\mathrm{cm}^3$ und einem segmentierten Kalorimeter von 5,8 Strahlungslängen Dicke hinter einem Eintrittsfenster von $30\times 24\,\mathrm{cm}^2$ in einer Bleiabschirmung diente zu kombinierten Energie- und Winkelmessungen der Elektron-Positron-Komponente unter den Schauersekundärteilchen (G. Hermann [5]). Sowohl die gemessene Abnahme der mittleren Energie der e^+/e^- mit zunehmendem Abstand zum Schauerzentrum als auch die Abnahme der mittleren Energie mit zunehmendem Winkelabstand zur Schauerachse werden gut durch das Luftschauer-Simulationsprogramm CORSIKA [6] beschrieben.

Mit dem großen Prototypdetektor, der in Driftkammern, Eisenplatte und Behälter mit den späteren CRT-Detektoren übereinstimmt, nicht aber in den Kathodenstreifen und der gesamten Auslese-Elektronikkette, wurde die Effizienz und Genauigkeit der Spurrekonstruktion und der Myonselektion quantitativ untersucht (J. Knöppler [7]). Zudem wurden die gemessenen Orts- und Winkelverteilungen von Myonspuren mit den erwarteten Verteilungen verglichen. Orts- und Winkelauflösung des Prototyp-Detektors sind mit den späteren Detektoren vergleichbar, jedoch sind die Rekonstruktionseffizienzen wegen der unterschiedlichen Elektronik, unterschiedlichen Pulsbestimmungsverfahren und mehrerer technischer Mängel des Prototyps nicht direkt auf die späteren Detektoren übertragbar. Die Untersuchungen unterstreichen zudem die Bedeutung regelmäßig aktualisierter Kalibrationsdaten für die Effizienz der Myonidentifikation.

Ebenfalls 1993 wurde eine Arbeit über die Kalibration der CRT-Detektoren abgeschlossen (M. Ulrich [8]). Diese Arbeit führte zu Detailverbesserungen an verschiedenen Elektronikkomponenten (z.B. der Spannungsversorgung der FADCs und den HV-Entkoppelkondensatoren der Drähte) und zu einer genauen Untersuchung der lokal an den CRT-Stationen durchgeführten Selbstkalibration. Diese Selbstkalibration basiert allein auf Cosmic-Ray-Daten im normalen Detektorbetrieb, ohne die Datennahme zu unterbrechen.

Zur Untersuchung möglicher Driftfeldverzerrungen und daraus resultierenden systematischen Winkelfehlern wurden der kleine Prototyp-Detektor und zwei großflächige Szintillationszähler auf einem fahrbaren Wagen oberhalb eines CRT-Detektors angebracht. Bei Spuren durch beide Detektoren können dabei die rekonstruierten Spurwinkel mit dem aus den Durchstoßorten abgeleiteten Winkel verglichen werden. Die Auswertung dieser Daten ist noch nicht abgeschlossen.

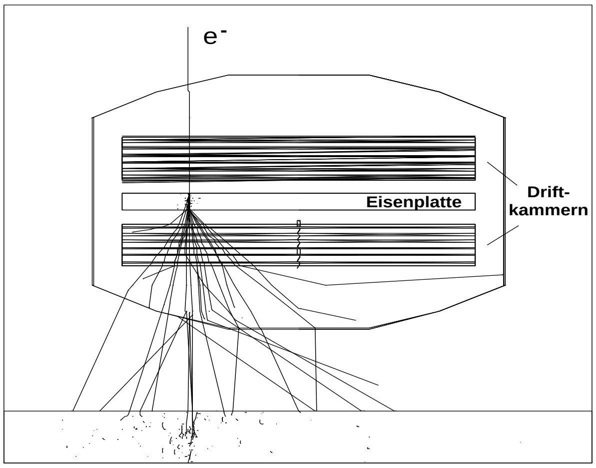

Abb. 1: *Simulation eines Elektrons von 5 GeV Energie mit GEANT. Das Elektron schauert in der Eisenplatte auf. Elektronen niedrigerer Energie werden dagegen in der Eisenplatte gestoppt.*

Detaillierte Monte-Carlo-Studien vertieften das Verständnis der Detektoren. Dazu wurden die physikalischen Prozesse simuliert, denen die verschiedenen Teilchen beim Durchgang durch den Detektor unterliegen. Hierzu wurde der Detektor in das GEANT-Programm implementiert. Abbildung 1 zeigt ein Beispiel einer solchen Simulation. Die spezifischen Eigenschaften des CRT-Detektors und Prozesse wie Ladungsfluktuationen bei der Ionisation im Gas, longitudinale und transversale Diffusion entlang der Driftstrecke, Prozesse bei der Gasverstärkung, Übertragungsfunktionen und Rauschen der Elektronik sowie das Abtasten und Digitalisieren der Signale wurden berücksichtigt. Die Detektoreigenschaften werden durch diese Studien ausgezeichnet beschrieben. Außerdem dienen die Simulationsdaten zu weiteren Optimierungen der Auslese- und Analysesoftware.

4.1.4 Aufbau und Betrieb von CRT-Detektoren auf La Palma

Der erste Detektor verließ Heidelberg im Dezember 1992 in Richtung La Palma, betriebsbereit mit Gasfüllung und mit Elektronik und den Rechnern für den zentralen CRT-Meßcontainer. Der Detektor wurde Ende Januar 1993 im Gelände des HEGRA-Experiments auf einem Fundament aus 3 Betonsockeln aufgestellt. UNIX-Workstation und OS-9ServerSystem wurden im Meßcontainer in Betrieb genommen und auf die dortige Netzwerkumgebung angepaßt. Schließlich wurde der Detektorelektronikschrank einerseits an den Detektor angeschlossen, andererseits an die Elektronik und die Rechner im Meßcontainer. Der Detektor und die gesamte Elektronik waren unmittelbar nach der Installation funktionstüchtig. Ähnlich problemlos verliefen die Installationen des zweiten Detektors im Februar, von zwei weiteren im Juni und nochmals vier Detektoren im September 1993.

Um Ereignisse mit dem Trigger des HEGRA-Szintillator-Arrays aufzeichnen und die Daten von CRT und HEGRA später verknüpfen zu können, wurden Triggersignale sowie Ereignis- und Run-Nummern von HEGRA für CRT verfügbar gemacht. Da das Event-Grader-System anfangs noch nicht zur Verfügung stand, wurden die ersten beiden CRT-Detektoren durch Software über Ethernet synchronisiert.

Kurze Zeit nach Installation des zweiten CRT-Detektors auf La Palma und dem Beginn der gemeinsamen Datennahme wurde das HEGRA-Array wegen der Umstellung des HEGRA-Datenerfassungssystems von CAMAC/MacIntosh auf Fastbus außer Betrieb genommen. Diese Umstellung dauerte erheblich länger als vorgesehen. In der Zwischenzeit wurden die Detektoren selbsttriggernd und selbstkalibrierend betrieben und meist nur Kalibrationsdaten aufgezeichnet. Dabei wurden die Detektoren bis zu 6 Wochen ohne Unterbrechung der Datennahme betrieben. Dieser Betriebsmodus wurde auch nach Installation der beiden weiteren Detektoren im Juni aufrechterhalten.

Erst nach Installation von vier weiteren CRT-Detektoren Ende September und des Event-Grader-Systems, sowie der Einbindung des CADIO-Moduls in die neue HEGRA-Datenerfassungssoftware konnte die gemeinsame Datennahme Anfang Oktober wieder aufgenommen werden. Mit dem Event-Grader-System liegt bei einer HEGRA-Triggerrate von 7–8 Hz nun die Totzeit der Zentralstation bei unter 1 Promille, die der CRT-Detektoren bei etwa 1-2 Prozent. Nach knapp 500 000 Ereignissen (15 Stunden) ist jeweils ein Backup einer Datenplatte (900 MByte) auf Exabyte-Band erforderlich. Um auch diesen Prozess ohne Bediener vor Ort durchführen zu können, soll im Februar 1994 ein Exabyte 8500 C Laufwerk mit Kassettenwechsler installiert werden.

Im November wurde an den vier zuerst auf La Palma installierten Detektoren erstmals die Ar-CH_4-Gasfüllung ausgetauscht. Zusätzlich wurden an zwei Detektoren je eine fehlerhafte Lötstelle nachgelötet. Dies war bisher die einzige Reparatur an Detektoren auf La Palma. Ansonsten sind seit Oktober keine nennenswerten Ausfälle zu verzeichnen. Detektoren und Elektronik arbeiten trotz großer Witterungsschwankungen schon seit bis zu einem Jahr einwandfrei.

4.1.5 Winkelverteilungen von Teilchen in Luftschauern

Bei Messungen von Winkelverteilungen von Teilchen in Luftschauern mit CRT-Detektoren wurde auf La Palma die aus den Daten des HEGRA-Szintillator-Arrays rekonstruierte Schauerrichtung benutzt, ähnlich wie dies auch bei den Messungen mit den Prototyp-Detektoren und dem Heidelberger Szintillator-Array getan wurde. Die Winkelauflösung von HEGRA ist jedoch etwa 3 mal besser als die des Heidelberger Arrays.

Bei der Betrachtung solcher Winkelverteilungen ist zu beachten, daß nicht nur die intrinsische Winkelverteilung durch Vielfachstreuung und Wechselwirkungen verbreitert wird, sondern auch, daß die Sekundärteilchen im Mittel von der Schauerachse wegfliegen. Die Untersuchungen werden daher zweckmäßig in einem Koordinatensystem durchgeführt, das in jedem Ereignis durch die Schauerachse bzw. deren Durchstoßpunkt durch die Beobachtungsebene, den Schauerkern, und den Detektorstandort festgelegt ist.

Winkel zwischen Teilchenspuren und Schauerrichtung können in diesem System in eine 'radiale' (positiv hin zur bzw. negativ weg von der Schauerachse) und eine 'tangentiale' Richtung (senkrecht zur Schauerachse und zur Verbindungsline Detektor-Schauerachse) zerlegt werden. Während die symmetrische tangentiale Verteilung nur die Erzeugungsorte der Teilchen

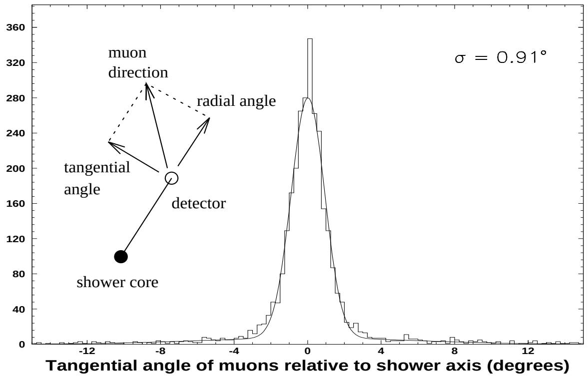

Abb. 2: *Verteilung der tangentialen Winkeldifferenz zwischen Myonspuren in CRT-Detektoren und den aus Daten des HEGRA-Szintillator-Arrays rekonstruierten Schauerachsen.*

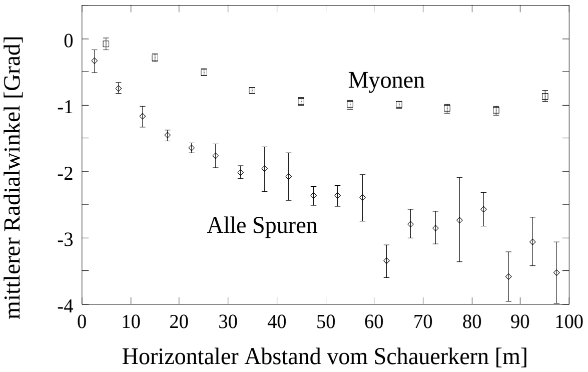

Abb. 3: *Mittlerer Radialwinkel als Funktion des horizontalen Abstands zwischen Schauerkern und Detektor für alle Teilchen (überwiegend e^+/e^-) und für selektierte Myonen.*

und die Vielfachstreuung widerspiegelt, ist die radiale Verteilung asymmetrisch und hängt vom Abstand zum Schauerkern ab.

Da Elektronen und Myonen nicht nur ganz unterschiedliche mittlere Energien und unterschiedliche mittlere Erzeugungshöhen haben, ergeben sich für diese beiden Klassen von Teilchen auch unterschiedliche Winkelverteilungen. Die auf La Palma gemessenen Verteilungen für alle Teilchen zusammen (überwiegend e^+/e^-) unterscheiden sich nur wenig von den in Heidelberg gemessenen [9]. Ihre Breiten sind im wesentlichen die intrinsischen Breiten, die gegenüber der CRT- und der HEGRA-Auflösung dominieren. Die intrinsischen Breiten der Myon-Verteilungen sind dagegen erheblich geringer, nur 0.2–0.3°, so daß die Myon-Tangentialverteilung (siehe Abb. 2) zum Test der Auflösung geeignet ist. Nach Korrektur für die intrinsische Breite und die mittlere HEGRA-Auflösung zeigt sich, daß die Auflösung eines CRT-Detektors von 0.75° für ein einzelnes Myon vergleichbar mit der des HEGRA-Arrays von 0.5° für den gesamten Schauer ist.

Abbildung 3 zeigt die Abhängigkeit des mittleren Radialwinkels vom Abstand zum Schauerkern. Statt dieser Abhängigkeit kann auch eine scheinbare Höhe der Teilchenproduktion als Funktion des Abstands angegeben werden. Dabei ist die scheinbare Höhe der Schnittpunkt von Teilchenspur und Schauerachse in der radial-vertikalen Projektion. Für die Myonen zeigen Monte-Carlo-Simulationen mit dem Program CORSIKA [6], daß der Median der scheinbaren Ursprungshöhe bei ausreichendem Abstand vom Schauerkern nicht nur recht gut den Median der tatsächlichen Ursprungshöhe wiedergibt, sondern auch, daß diese von der Zusammensetzung der Primärteilchen der kosmischen Strahlung abhängt. So ist die Median-Ursprungshöhe von Myonen in Schauern, die durch Eisenkerne ausgelöst wurden, um etwa 2000 m tiefer als in Proton-induzierten Schauern.

Zwar kann nicht im Einzelfall der Typ des Primärteilchens festgestellt werden, aber die Simulationen unter Einbeziehung der unterschiedlichen Triggerschwellen des HEGRA-Arrays für verschiedene Primärteilchensorten lassen erwarten, daß mit den ab Oktober 1993 und im Laufe des Jahres 1994 gewonnenen Daten Aussagen über die Zusammensetzung der kosmischen Strahlung gemacht werden können. Dazu wurden zwei der acht CRT-Detektoren auf La Palma außerhalb des HEGRA-Arrays aufgestellt, da nur so Myonen mit Schauerkernabständen über 200 m beobachtet werden können.

4.1.6 Arbeiten zur Rekonstruktion von Schauern aus den Teilchenspuren

Im Hinblick auf den Plan eines großen Arrays von CRT-Detektoren (384 im ursprünglichen Projekt-Vorschlag [1]) werden konkrete Verfahren zur Rekonstruktion der Luftschauer aus den mit den Detektoren gefundenen Teilchenspuren entwickelt. Dabei sind bisher drei Verfahren in der näheren Betrachtung: Mittelung der Spurwinkel mit geeigneten Gewichtungsverfah-

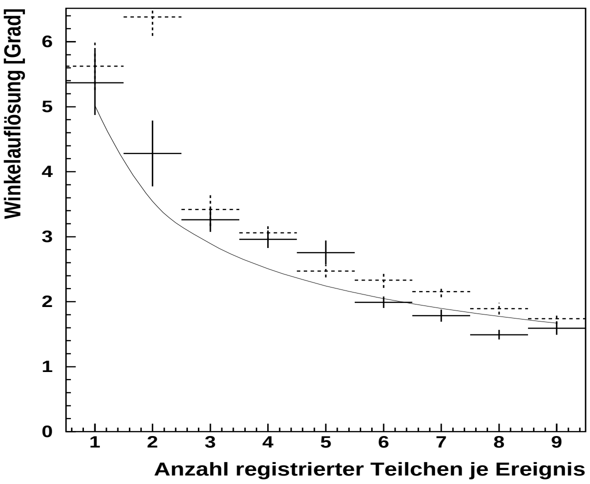

Abb. 4: *Winkelauflösung für Modelldaten bei Schauerkernabständen bis zu 60 m mit einem Mittelungsverfahren (gestrichelte Kreuze) und mit einem Maximum-Likelihood-Anpassungsverfahren (durchgezogene Kreuze) bei geringer Anzahl registrierter Spuren. Die durchgezogene Linie verdeutlicht die $1/\sqrt{N}$-Abhängigkeit der Auflösung, wobei N die Zahl der Spuren je Ereignis ist.*

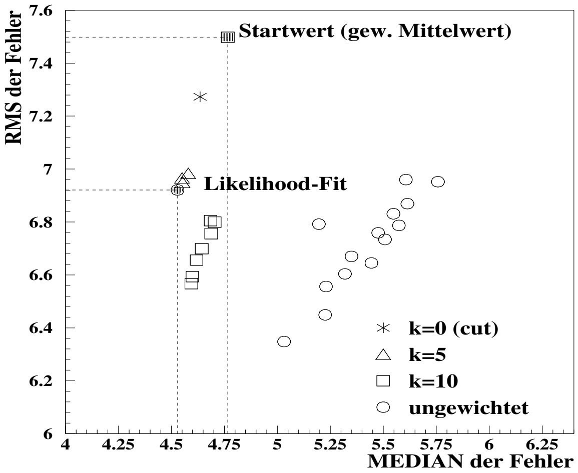

Abb. 5: *Ein Vergleich der mit verschiedenen neuronalen Netzen (mit verschiedener Anzahl von Neuronen und verschiedenen Gewichtungsparametern k im Lernprozess), einem gewichteten Mittelwert-Verfahren und mit Maximum-Likelihood-Anpassung erzielbaren Werten des mittleren quadratischen Fehlers und des Median-Fehlers der rekonstruierten Richtung (in Grad).*

ren, Maximum-Likelihood-Fits, und neuronale Netze trainiert mit Modelldaten.

Während mit Mittelungsverfahren relativ leicht und mit geringem Rechenaufwand die Schauerrichtungen rekonstruiert werden können, nutzen diese Verfahren nicht die vollen Informationen der Spurdaten und erreichen daher nicht die optimale Auflösung. Bessere Auflösungswerte können mit Anpassungsverfahren nach der Maximum-Likelihood-Methode erzielt werden (siehe Abb. 4). Der Nachteil dieser Methode ist jedoch der weitaus größere Rechenaufwand und die Notwendigkeit, daß erst aus Simulationen eine mehrdimensionale Wahrscheinlichkeitsfunktion gefunden werden muß, die zu einer optimalen Auflösung führen sollte.

Ein weitaus geringerer Rechenaufwand pro Ereignis und dennoch optimale Auflösungswerte sollten mit sorgfältig konzipierten und trainierten neuronale Netzen zu erzielen sein. Dazu wurden verschiedene Netze vom *Multilayered-Feed-Forward*-Typ mit dem Programmpaket JETNET 2.0 darauf trainiert, aus nach einer Modellverteilung gewürfelten 'Spurdaten' von Schauerteilchen den Einfallswinkel des Primärteilchens zu ermitteln. Dabei wurde bisher noch nicht die systematische Abhängigkeit der Winkelverteilungen vom Schauerkernabstand berücksichtigt. Die Netze wurden mit einigen 10 000 'Ereignissen' jeweils für eine feste Zahl registrierter Spuren trainiert. Als Eingangsparameter dienten die in das System des gewichteten Mittelwerts transformierten Spurwinkel, als Ausgangsparameter die Winkel des Primärteilchens im selben System. Ein dreilagiges Netz (d.h. eine verborgene Lage) hat sich hierbei als angebracht erwiesen.

Bei einer reinen Verwendung der mittleren quadratischen Abweichung für die Fehlerfunktion des *Error-Back-Propagation*-Algorithmus wurden die Netze besonders durch solche Ereignisse mit einem sehr schlechten Mittelwert trainiert, während Ereignisse mit gutem Mittelwert wenig berücksichtigt wurden. Um diesem Effekt gegenzusteuern, wurde im Training eine Gewichtung eingeführt, die mit zunehmender Differenz zwischen Sollwert und Mittelwert abnimmt. Auf diese Weise wird ein ausgewogenerer Lernprozess erreicht, wie Abb. 5 zeigt. D.h. daß zur Verringerung des 'typischen' Fehlers ein etwas längerer Schwanz der Fehlerverteilung akzeptiert wird. Die neuronalen Netze erreichen dabei die mit dem Maximum-Likelihood-Verfahren für die gegebene Modellfunktion erzielte Auflösung. Die Anwendung der neuronalen Netze auf die volle multidimensionale Wahrscheinlichkeitsfunktion (einschließlich radialer Abhängigkeit) steht aber noch aus.

4.1.7 Suche nach Gamma Ray Bursts

Im Rahmen einer weiteren Arbeit wird untersucht, ob koinzident mit den vom BATSE-Detektor an Bord des Compton Gamma Ray Observatory (CGRO) beobachteten Gammastrahlungsausbrüchen auch erhöhte Ereignisraten bei sehr hohen Energien auftreten. Die Gamma Ray Bursts sind eines der rätselhaftesten Phänomene in der Astrophysik. Sie sind isotrop über den Himmel verteilt und die Natur der Quellen ist völlig unklar. Während das BATSE-Experiment sensitiv bis zu Energien von etwa 2 MeV ist, können mit dem HEGRA-Szintillator-Array Gammaschauer ab Energien von etwa 30 TeV nachgewiesen werden. Mit einem kompakten Array aus CRT-Detektoren könnte diese Nachweisschwelle auf einige TeV gesenkt werden.

Bisher wird in Zusammenarbeit mit der HEGRA-Kollaboration anhand der HEGRA-Szintillator-Daten nach Ereignissen gesucht, die in das Zeitfenster (typischerweise einige Sekunden) und in einen Fehlerkreis (4–20°) um die Position von den durch BATSE beobachteten Bursts fallen. Der erwartete Untergrund im jeweiligen BATSE-Fenster wird aus den HEGRA-Daten abgeschätzt, wobei auch mögliche Schwankungen der HEGRA-Triggerrate berücksichtigt werden. Die Analyse der Daten ist noch nicht abgeschlossen.

4.1.8 Zusammenfassung und Ausblick

Die CRT-Gruppe hat sich 1993 vor allem mit dem Bau weiterer CRT-Detektoren, der Installation von Detektoren am HEGRA-Experiment auf La Palma und dem Betrieb der Detektoren dort, sowie mit Rekonstruktionsverfahren für Luftschauer aus Daten eines CRT-Arrays und mit zusätzlichen Detektortests befaßt. Die Entwicklung der zum Betrieb eines solchen Arrays erforderlichen Elektronik ist einstweilen weitgehend abgeschlossen. Für den Umbau der fünf vom Physikalischen Institut gebauten Detektoren sind noch weitere Entwicklungen im Bereich Vorverstärker und Shaper vorgesehen. Ob diese fünf Detektoren auch auf La Palma installiert werden sollen, ist noch offen.

Beim Betrieb der CRT-Detektoren auf La Palma wurden trotz der langen Pause durch die Umstellung der HEGRA-Datenerfassung insgesamt sehr positive Erfahrungen gemacht. Neben der Reparatur von zwei Detektoren waren nur einige kleinere Ausfälle von Elektronik-Komponenten zu beklagen. Die Datennahme soll 1994 wie in den letzten Monaten des Jahres 1993 fortgeführt werden. Steuerung und Überwachung der Datennahme werden auch weiterhin überwiegend über Netzwerk von Heidelberg aus erfolgen. Zumindest zwei weitere Detektoren sollen 1994 noch auf La Palma hinzukommen. Schwerpunkte der Datenauswertung werden voraussichtlich die Schauerrekonstruktionsverfahren und Implikationen aus der Myonwinkelverteilung auf die Zusammensetzung der kosmischen Teilchenstrahlung sein.

Für eine längerfristige Perspektive für ein Array von CRT-Detektoren soll 1994 die Zusammenarbeit mit der Universität von Merida, Venezuela, und dem Astronomischen Forschungszentrum (CIDA) in Merida intensiviert werden, da dort ein Standort auf 3700 m Höhe bei mildem Klima und existierender Infrastruktur vorhanden ist. Ein solch hochgelegener Standort wäre für jedes Teilchen-Array zum Nachweis kosmischer Strahlung, gleichgültig ob mit Spurdetektoren oder Szintillatoren, von Vorteil. Ganz besonders wichtig ist die Höhe aber für ein Array, das bereits aus einer geringen Zahl von Sekundärteilchen die Schauerrichtung bestimmen kann, wie das projektierte CRT-Array mit mehreren hundert Spurdetektoren.

[1] J. Heintze et al. 1988, Cosmic Ray Tracking – ein neuer Weg für die γ-Astronomie bei hohen Energien, Proposal an das BMFT;
M. Feuerstack et al. 1990, Addendum to the proposal "Cosmic Ray Tracking – A New Approach to High-Energy γ-Astronomy"

[2] J. Heintze et al. 1989, Nucl. Instr. and Meth. A277, 29

[3] J. Heintze et al. 1989, Exp. Astron. 1, 21

[4] F. Aharonian et al. 1993, XXIII ICRC, Calgary, Contributed Papers Vol. 4, 291

[5] G. Hermann, Diplomarbeit, Heidelberg 1993

[6] J. N. Capdevielle et al. 1992, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Report KfK 4998

[7] J. Knöppler, Doktorarbeit, Heidelberg 1993

[8] M. Ulrich, Diplomarbeit, Heidelberg 1993

[9] S. Gamp et al. 1992, Phys. Rev. D46, 2831