

# Entwicklung und Aufbau eines Slow Control Systems für die Pierre Auger Fluoreszenzdetektoren

Diplomarbeit von  
Christian Bethge

Universität Karlsruhe (TH)  
Institut für experimentelle Kernphysik  
und  
Forschungszentrum Karlsruhe  
- In der Helmholtz Gemeinschaft -  
Institut für Kernphysik

Juli 2003



## Zusammenfassung

Das Pierre Auger Observatorium in Argentinien ist ein Experiment zur Messung von ausgedehnten Luftschauern, welche durch Wechselwirkung der primären kosmischen Strahlung mit der Erdatmosphäre entstehen. Ziel des Experimentes ist es, Art und Ursprung der höchstenergetischen kosmischen Strahlung im Energiebereich oberhalb von  $10^{18}$  eV zu verstehen. Dazu wird mit 24 Fluoreszenzteleskopen das Fluoreszenzlicht von angeregten Stickstoffmolekülen in der Atmosphäre gemessen, um die Entwicklung des Luftschauers entlang der Schauerachse zu untersuchen. Zusätzlich sollen 1600 Reinstwasser-Čerenkov-Detektoren Auskunft über die Lateralverteilung der Luftschauerteilchen geben.

Zur Gewährleistung eines sicheren und stabilen Betriebes der Fluoreszenzdetektoren wurde im Rahmen dieser Arbeit ein sogenanntes *Slow Control System* entwickelt. Slow Control Systeme arbeiten autonom und übernehmen die Überwachung sicherheitsrelevanter Parameter, die sich im Vergleich zur den beobachteten physikalischen Größen nur langsam ändern. Bei Verstößen gegen zuvor festgelegte Sicherheitsregeln werden von Slow Control Systemen entsprechende Schutzmaßnahmen ergriffen. Beim Auger-Experiment muss das Slow Control System sowohl in Fällen der direkten Gefährdung der Teleskope (z.B. durch Sonnenlicht) als auch bei allgemeineren Fehlfunktionen wie Stromausfall oder einer Kommunikationsstörung dafür Sorge tragen, dass das Experiment in einen definierten Zustand gebracht wird, um nach dem Wegfall der Störbedingungen den Messbetrieb möglichst schnell wieder aufnehmen zu können.

Bei der Entwicklung dieses Slow Control Systems führten Anforderungen wie Stabilität, Flexibilität und Fernsteuerbarkeit zu einem auf Industriekomponenten (PROFIBUS) basierenden System, welches sich zusätzlich durch seine Einfachheit und leichte Erweiterbarkeit auszeichnet. Das zugrundeliegende Sicherheitskonzept wurde so ausgearbeitet, dass selbst im Falle eines totalen Versagens aller Komponenten die Sicherheit der Fluoreszenzdetektoren nicht gefährdet ist. Es wurde außerdem ein möglichst detailgetreuer Teststand des Slow Control Systems aufgebaut, der die Simulation und das Erkennen von Fehlern erlaubt sowie die lokale Entwicklung und den gefahrlosen Test der Steuerungssoftware.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Die kosmische Strahlung</b>	<b>1</b>
1.1 Geschichtliches . . . . .	1
1.2 Energiespektrum . . . . .	2
1.3 Elementhäufigkeiten . . . . .	4
1.4 Quellen, Beschleunigung und Propagation . . . . .	5
1.4.1 Bottom-Up-Modelle . . . . .	5
1.4.1.1 Quellen . . . . .	5
1.4.1.2 Beschleunigung . . . . .	6
1.4.2 Top-Down-Modelle . . . . .	8
1.4.2.1 Topologische Defekte . . . . .	8
1.4.2.2 Magnetische Monopole . . . . .	8
1.4.2.3 Primordiale schwarze Löcher . . . . .	9
1.4.3 Propagation . . . . .	10
<b>2 Ausgedehnte Luftschauer</b>	<b>12</b>
2.1 Phänomenologie . . . . .	12
2.2 Zusammensetzung . . . . .	13
2.2.1 Hadronen . . . . .	13
2.2.2 Elektronen, Positronen und Gammastrahlung . . . . .	14
2.2.3 Myonen . . . . .	14
2.3 Schauerentwicklung . . . . .	16
2.4 Nachweis von Luftschauern . . . . .	16
2.4.1 Direkter Nachweis der Sekundärteilchen . . . . .	17
2.4.2 Indirekter Nachweis der Sekundärteilchen . . . . .	17
2.4.2.1 Čerenkov-Teleskope . . . . .	17
2.4.2.2 Fluoreszenz-Teleskope . . . . .	18
2.4.2.3 Radio-Messungen . . . . .	18
<b>3 Das Pierre Auger Observatorium</b>	<b>19</b>
3.1 Das Detektorarray . . . . .	21
3.2 Die Fluoreszenzdetektoren . . . . .	22
3.2.1 Physikalische Aspekte bei der Fluoreszenzlichtmessung . . . . .	22
3.2.2 Anordnung der Teleskope . . . . .	24
3.2.3 Optik . . . . .	24
3.2.4 Kamera . . . . .	27
<b>4 Das Slow Control System</b>	<b>29</b>
4.1 Einführung . . . . .	29
4.2 Anforderungen . . . . .	30
4.3 Hardware . . . . .	32
4.3.1 Allgemeines über PROFIBUS . . . . .	32

---

4.3.2	Das Beckhoff PROFIBUS-System . . . . .	33
4.3.3	Der Field-PC . . . . .	33
4.4	Software . . . . .	34
4.4.1	4Control . . . . .	34
4.4.1.1	Überblick . . . . .	35
4.4.1.2	ST - Structured Text . . . . .	35
4.4.1.3	SFC - Sequential Function Chart . . . . .	35
4.4.2	OPC-Server und -Client . . . . .	36
4.4.3	HTTP-Server und Java-VM . . . . .	36
4.4.4	Datenfluss . . . . .	39
4.5	Berücksichtigte Parameter . . . . .	40
4.5.1	Zentrale Bay . . . . .	40
4.5.1.1	Sensoren . . . . .	40
4.5.1.2	Aktuatoren . . . . .	43
4.5.2	Bay 1-6 . . . . .	45
4.5.2.1	Sensoren . . . . .	45
4.5.2.2	Aktuatoren . . . . .	46
4.5.3	Per OPC überwachte Parameter . . . . .	47
4.5.4	Eventuelle Erweiterungen . . . . .	48
<b>5</b>	<b>Teststand</b>	<b>49</b>
5.1	Vorteile eines Teststandes . . . . .	49
5.2	Aufbau des Teststandes . . . . .	50
<b>6</b>	<b>Sicherheits- und Softwarekonzept</b>	<b>54</b>
6.1	Einführung in das Sicherheitskonzept . . . . .	54
6.2	Einführung in das Softwarekonzept . . . . .	55
6.3	Normaler Betrieb - <i>auto mode</i> . . . . .	55
6.3.1	Software-Ansatz . . . . .	55
6.3.2	Sicherheitsregeln . . . . .	59
6.4	Manueller Modus - <i>manual mode</i> . . . . .	61
6.4.1	Software-Ansatz . . . . .	61
6.4.2	Sicherheitsregeln . . . . .	62
6.5	Störfälle . . . . .	63
<b>7</b>	<b>Status und Ausblick</b>	<b>65</b>
	<b>Anhang</b>	<b>67</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>69</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>71</b>

# 1 Die kosmische Strahlung

Unter der klassischen kosmischen Strahlung versteht man geladene Teilchen, die in einem Energiebereich von ca.  $10^7$  eV bis  $\geq 10^{20}$  eV auf die Erdatmosphäre treffen. Die Zusammensetzung besteht zu etwa 89% aus Protonen, 9% Helium-Kernen und zu jeweils etwa 1% aus schwereren Elementen und Elektronen.

Als neutrale Teilchen zählen Photonen und Neutrinos im eigentlichen Sinn nicht zur klassischen kosmischen Strahlung. Gamma- und Neutrino-Astronomie machen jedoch heutzutage einen beträchtlichen Teil der Forschung im Bereich der Astroteilchenphysik aus. Ungeladene Teilchen haben den entscheidenden Vorteil, dass sie von elektromagnetischen Feldern unbeeinflusst bleiben und sich deshalb sehr gut zur Suche nach den Quellen ‚kosmischer Strahlung‘ eignen.

## 1.1 Geschichtliches

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurde zunächst eine von der Erde ausgehende ionisierende Strahlung vermutet, als man die Entladung von Elektroskopen trotz Abschirmung beobachtete. Bei Versuchen auf dem Eiffelturm nahm die Entladung pro Zeiteinheit mit der Höhe auch tatsächlich ab, allerdings viel schwächer als erwartet. Im Jahr 1912 beobachtete Viktor Hess bei Ballonflügen bis in ca. 5000 m Höhe, dass die ionisierende Strahlung nach einem geringen Rückgang bis ca. 1200 m zu großen Höhen hin stark zunimmt. Er folgerte daraus auf einen extraterrestrischen Ursprung der Strahlung und erhielt dafür 1936 den Nobelpreis [Hess12].

Ging man anfangs noch von harter Gammastrahlung aus, so zeigten Kohlhörster und Bothe 1929 durch koinzidente Signale in übereinander liegenden Geiger-Müller-Zählrohren, dass es zumindest einen geladenen Anteil in dieser ionisierenden Strahlung gibt, der zudem noch sehr durchdringend ist. Dies sollte sich später als das *Myon* herausstellen.

Ebenfalls koinzidente Signale wurden 1938 von Pierre Auger gemessen, dieses Mal allerdings in Zählrohren, die in *horizontaler* Richtung einige hundert Meter voneinander entfernt waren. Seine Schlußfolgerung war: Die Teilchen am Boden sind keine direkten kosmischen Teilchen, sondern Sekundärprodukte aus Wechselwirkungen mit der Atmosphäre. Damit wurde Pierre Auger zum Entdecker der ausgedehnten Luftschauer [Auger38].

Nach und nach konnten verschiedene (Elementar-)Teilchen in ausgedehnten Luftschauern nachgewiesen werden [Longair81]. Die bekanntesten sind:

- 1932: Entdeckung des Positrons durch Anderson
- 1937: Entdeckung des Myons durch Anderson und Neddermeyer
- 1947: Entdeckung des Pions durch Powell und des  $K^0$  durch Rochester und Butler
- 1949: Entdeckung des  $K^+$  durch Powell

Durch die Verlagerung des Teilchennachweises an die großen Beschleuniger wie das CERN oder das Fermilab verlor man in der darauffolgenden Zeit etwas das Interesse an der kosmischen Strahlung, was sich dann aber durch die Beobachtung von Luftschauern, die von Primärteilchen mit Energien  $> 10^{19}$  eV ausgelöst wurden, wieder grundlegend geändert hat. Heutige Beschleuniger sind nicht in der Lage, solch hohe Energien zu erreichen. Daher ist die Untersuchung der kosmischen Strahlung derzeit die einzige Möglichkeit zu erfahren, ob sich bei diesen Energien Hinweise auf eine Physik jenseits des Standardmodells zeigen.

## 1.2 Energiespektrum

Die Energie der kosmischen Strahlung deckt einen Bereich von ca. 15 Größenordnungen ab. Zu hohen Energien hin nimmt der Fluss der kosmischen Strahlung stark ab. Traditionell wird die Einteilung in folgende Energiebereiche vorgenommen:

Bezeichnung	Energiebereich	Beschreibung
High Energy (HE)	$10^7 - 10^{11}$ eV	Starke Ablenkung der Teilchen durch das Erdmagnetfeld und den Sonnenwind. Teilchen mit einer Energie von weniger als 10 MeV erreichen den Erdboden nicht. Direkter Nachweis über Satelliten- und Ballon-Experimente.
Very High Energy (VHE)	$10^{11} - 10^{14}$ eV	Beginn der Auslösung von Luftschauern. Direkter Nachweis über Satelliten- und Ballon-Experimente.
Ultra High Energy (UHE)	$10^{14} - 10^{18}$ eV	Direkter Nachweis wegen des zu geringen Flusses nicht mehr möglich. Daher indirekter Nachweis über großflächige Detektorarrays und Čerenkov-Detektoren.
Extreme High Energy (EHE)	$\geq 10^{18}$ eV	Ebenfalls kein direkter Nachweis möglich. Indirekter Nachweis über großflächige Detektorarrays und Fluoreszenzdetektoren.

Die Energie und der Fluss der Primärteilchen der kosmischen Strahlung hängen über ein Potenzgesetz zusammen:

$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-\gamma}$$



Auffällig dabei ist, dass das Spektrum bei etwa  $3 \cdot 10^{15}$  eV abknickt. Bei diesem Knick, dem sogenannten *Knief der kosmischen Strahlung*, springt der Index  $\gamma$  von  $\sim 2,7$  auf  $\sim 3,0$  (siehe Abb. 1.1).

Die Gründe für diese plötzliche Änderung des spektralen Index liegen noch größtenteils im Dunkeln. Ein mögliches Szenario wäre zum Beispiel das Erreichen der Maximalenergie kosmischer Beschleuniger bei  $3 \cdot 10^{15}$  eV. Dieser Wert könnte aber auch die maximale „Bindungsenergie“ der galaktischen Magnetfelder darstellen. Teilchen mit höherer Energie würden dann aus der Milchstraße entweichen. Denkbar wäre auch, dass bei diesen Energien teilchenphysikalische Effekte eine Rolle spielen und neue Wechselwirkungen der kosmischen Teilchen in der Galaxis oder in der Atmosphäre stattfinden.

Eine weitere Auffälligkeit des Energiespektrums ist die Abflachung im Energiebereich  $> 10^{19}$  eV, was als *Knöchel* bezeichnet wird. Möglicherweise ist hierfür der *Greisen-Zatsepin-Kuz'min-Cutoff* ([Greisen66], [Zatsepin66]) verantwortlich: Für Protonen oberhalb dieser Energie wird die 3 K-Hintergrundstrahlung undurchsichtig (siehe Abb. 1.3). Ein Photon der kosmischen Hintergrundstrahlung besitzt dann im Ruhesystem des Protons eine Energie von  $\sim 300$  MeV, was der Schwellenenergie für die inelastische Pion-Produktion entspricht. Daher erwartet man eine Anhäufung im Energiespektrum bei dieser Schwellenenergie. Ob dieser Effekt tatsächlich für die Abflachung verantwortlich ist, ist aufgrund der geringen Statistik bei diesen Energien jedoch noch umstritten. Das Auger-Projekt wird hierbei zu einer wesentlichen Verbesserung der Statistik beitragen.

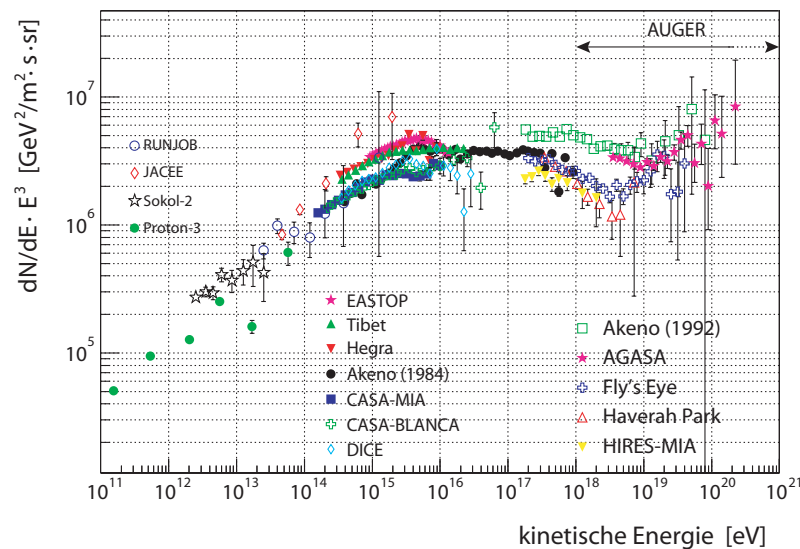


Abb. 1.1: Differentielles Energiespektrum der kosmischen Strahlung. Zur besseren Darstellung wurden die Ordinatenwerte mit  $E^3$  multipliziert. Der Messbereich des Auger-Experimentes ist rechts oben angedeutet (entnommen aus [Ulrich03], Referenzen siehe dort).

### 1.3 Elementhäufigkeiten

Eine zuverlässige Aussage über die Elementhäufigkeiten lässt sich nur im HE- und VHE-Bereich machen, also unterhalb von  $10^{14}$  eV. Dort sind direkte Messungen der Primärteilchen der kosmischen Strahlung möglich. Sobald man auf ausgedehnte Luftschauer als indirekte Nachweismethode angewiesen ist, sind die Aussagen über die Natur des Primärteilchens vom jeweils für die Luftschauersimulationen verwendeten Wechselwirkungsmodell abhängig und variieren dementsprechend.

Vergleicht man die Elementhäufigkeiten der kosmischen Strahlung mit denen unseres Sonnensystems (aus Meteoriten, Mondgestein, Spektroskopie etc.), so stellt man eine weitgehende Übereinstimmung fest. Dies deutet auf einen ähnlichen Entstehungsprozeß hin: die stellare Produktion. Allerdings gibt es in der kosmischen Strahlung ein Defizit bei Wasserstoff und Helium, während Elemente wie Li, Be, B und die Kerne direkt unterhalb von Eisen einen deutlichen Überschuss zeigen (siehe Abb. 1.2).

Da in kosmischen Beschleunigern geladene Teilchen einfacher und damit häufiger beschleunigt werden können, ist die hohe Ionisierungsenergie von Wasserstoff und Helium möglicherweise der Grund für das Defizit in der kosmischen Strahlung.

Sogenannte *Spallationsreaktionen* könnten den Überschuss von Li, Be, usw. erklären. Bei der Propagation durch das interstellare Medium (ISM) der galaktischen Scheibe ( $\sim 1$  H-Atom/cm<sup>3</sup>) kollidieren Kerne wie Kohlenstoff oder Stickstoff bzw. Eisen bei den schwereren Elementen mit den H-Atomen des ISM und erzeugen dabei leichtere Kerne. Aus C, N oder O entsteht so Li, Be oder B [Silberberg90]. Die Unterschiede in den Elementhäufigkeiten können aber auch auf eine andere Zusammensetzung der Quelle hindeuten.

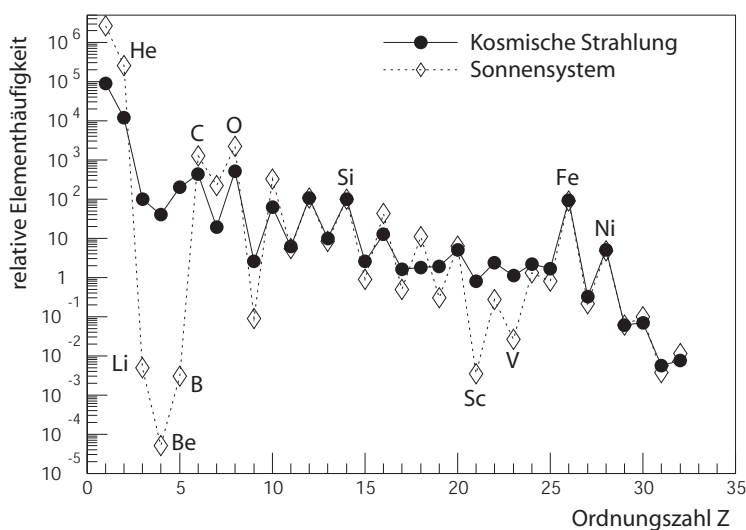


Abb. 1.2: Relative Elementhäufigkeiten in der kosmischen Strahlung und in unserem Sonnensystem. Normiert wurde auf Silizium = 100. [Wefel91]

## 1.4 Quellen, Beschleunigung und Propagation

Für die Quellen der kosmischen Strahlung bzw. für die Art, wie diese ihre Energie erhält, unterscheidet man zwei Ansätze: *Bottom-Up*- und *Top-Down-Modelle*.

Bei ersteren ist mit *Bottom-Up* gemeint, dass die Teilchen mit einer niedrigeren Energie erzeugt werden, als sie hier auf der Erde ankommen. Sie erfahren also eine Beschleunigung, die in vielen Szenarien nahe bei der Quelle stattfindet, aber auch in Etappen auf dem Weg zur Erde ihren Lauf nehmen kann.

Bei *Top-Down-Modellen* sind die Teilchen ein Zerfallsprodukt von extrem schweren Objekten, die unterschiedlicher Natur und Herkunft sein können. Sie haben also eine niedrigere Energie als das ursprüngliche Objekt, daher der Name *Top-Down*.

### 1.4.1 Bottom-Up-Modelle

#### 1.4.1.1 Quellen

Für Bottom-Up-Modelle kommen als Quellen der kosmischen Strahlung beispielsweise Supernovae, Pulsare, Doppelsternsysteme oder aktive galaktische Kerne (AGN) in Frage. Allerdings würden bereits die Supernovae alleine ausreichen, um die Energiedichte der kosmischen Strahlung von ungefähr  $1 \text{ eV/cm}^3$  innerhalb der Milchstraße zu erklären: Bei einer Dicke der Milchstraße von 300 pc und einem Radius von 15 kpc benötigt man eine Leistung von  $L \approx 5 \cdot 10^{40} \text{ erg/s}$ , um die obige Energiedichte zu erhalten. Bei einer Supernova werden etwa  $10^{51} \text{ erg}$  an Energie frei, was bei einer mittleren Rate von einer Supernova alle 30 Jahre zu einer Leistung von  $L \approx 5 \cdot 10^{42} \text{ erg/s}$  führt. Es muss also mit einer Effektivität von 10 % Energie auf die Teilchen der kosmischen Strahlung übertragen werden, was eine durchaus sinnvolle physikalische Annahme ist.

Bei Energien kleiner als  $10^{19} \text{ eV}$  gibt es starke Indizien für Quellen innerhalb unserer Galaxis. Die von hochenergetischen Elektronen erzeugte Synchrotronstrahlung folgt bis zu dieser Energie einem Potenzgesetz, welches experimentell auch beobachtet wurde. Diese Elektronen besitzen eine Reichweite von ca. 300 kpc, da sie Energieverluste durch Comptonstreuung an der kosmischen Hintergrundstrahlung erfahren. Größere Abstände würden die Potenzgesetz-Abhängigkeit zerstören [Klapdor97].

Bei den für das Pierre Auger Observatorium interessanten Energien oberhalb von  $10^{19} \text{ eV}$  lässt sich die Frage nach der Herkunft dieser Teilchen nicht so einfach beantworten. Vor allem der bereits erwähnte Greisen-Zatsepin-Kuz'min-Cutoff (GZK) gibt Rätsel auf. Wie in Abb. 1.3 dargestellt, sinkt durch ihn die Energie von Protonen, aber auch von schwereren Teilchen, nach einer Wegstrecke von ca. 100 Mpc auf unter  $10^{20} \text{ eV}$ , nahezu unabhängig vom anfänglichen Energiebetrag. Innerhalb dieses Radius kennt man keine genügend starken kosmischen Quellen oder Beschleuniger, trotzdem werden Teilchen mit Energien bis zu  $3 \cdot 10^{20} \text{ eV}$  beobachtet [Bird95].

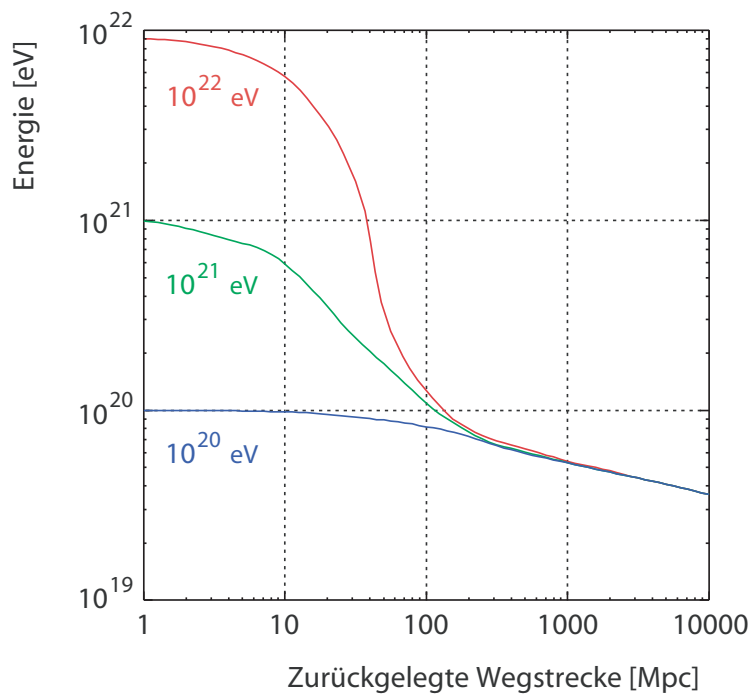


Abb. 1.3: GZK-Effekt. Dargestellt ist die Energie von Protonen mit unterschiedlicher Anfangsenergie in Abhängigkeit von der zurückgelegten Strecke [Cronin97].

#### 1.4.1.2 Beschleunigung

Aufgrund der beobachteten höchstenergetischen Teilchen müssen Modelle für Beschleunigungsmechanismen in unserer Galaxie Energien von  $10^{20}$  eV und mehr erlauben. Denkbar sind Mechanismen wie die Beschleunigung in Plasmaturbulenzen, in der Magnetosphäre von Pulsaren oder bei Kollisionen von Teilchen der kosmischen Strahlung mit Plasmawolken oder Schockfronten, auf welche hier stellvertretend eingegangen werden soll (Näheres unter [Longair81]). Fermi machte erstmals auf diese Möglichkeiten der Beschleunigung durch Kollisionen aufmerksam, daher trägt dieses Prinzip den Namen *Fermi-Beschleunigung 1. und 2. Ordnung*. Mit Ordnung ist hierbei die Potenz von  $v/c$  gemeint, die in den mittleren Energiegewinn pro Kollision eingeht, wobei  $v$  die Geschwindigkeit der Plasmawolke oder der Schockfront ist.

##### Fermi-Beschleunigung 2. Ordnung

Die Grundidee der Fermi-Beschleunigung 2. Ordnung ist die Kollision von Teilchen der kosmischen Strahlung mit magnetischen Plasmawolken. Dabei kann das Teilchen Energie *gewinnen*, wenn sich die Wolke auf das Teilchen zubewegt, und Energie *verlieren*, wenn sich beide in dieselbe Richtung bewegen. Im Endeffekt kommt es aber zu einer Beschleunigung der Teilchen, weil im Mittel mehr gegenläufige als gleichsinnige Kollisionen stattfinden und außerdem der Energieverlust bei einer gleich-

sinnigen Kollision geringer ist als der Energiegewinn bei einer gegenläufigen. Berechnet man den mittleren Energiegewinn pro Kollision ([Longair81]), so ist dieser proportional zu  $(v_{\text{Plasma}}/c)^2$ . Betrachtet man nun die mittlere freie Weglänge der kosmischen Strahlung im ISM und berechnet daraus schließlich die Dauer einer Beschleunigung über sechs Größenordnungen hinweg, so sieht man, dass diese Art der Beschleunigung dafür etwa eine halbe Milliarde Jahre benötigen würde. Da sich die kosmische Strahlung aber nur einige Millionen Jahre lang in unserer Galaxie aufhält (siehe Kap. 1.4.3), kann dieser Mechanismus die heute auf der Erde beobachteten hochenergetischen Teilchen nicht erklären. Man benötigt also einen Mechanismus, der die Teilchen in kürzerer Zeit beschleunigt und/oder der pro Kollision einen höheren Energiebetrag auf das Teilchen überträgt.

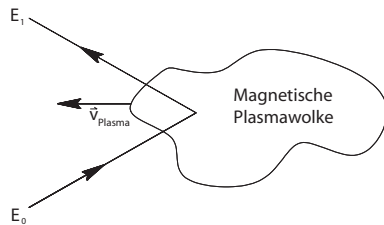


Abb. 1.4: Fermi-Beschleunigung 2. Ordnung

Die Fermi-Beschleunigung 1. Ordnung ist die Beschleunigung an Schockfronten, die sich mit Überschallgeschwindigkeit durch das interstellare Medium (ISM) bewegen und beispielsweise bei Supernovae entstehen können. Bewegt sich ein Teilchen aus dem ungeschockten ISM auf eine Schockfront zu, die sich mit der Geschwindigkeit  $\vec{v}_{\text{Schock}}$  bewegt, so kann es diese mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit durchdringen und dahinter am geschockten ISM reflektiert werden, welches sich mit  $3/4 \cdot \vec{v}_{\text{Schock}}$  bewegt. Betrachtet man nun das Ruhesystem des geschockten ISM, so entfernt sich die Schockfront zwar mit  $1/4 \cdot \vec{v}_{\text{Schock}}$ , das ungeschockte ISM bewegt sich jedoch mit  $3/4 \cdot \vec{v}_{\text{Schock}}$  auf das Teilchen zu und kann dieses wiederum reflektieren. Vor und hinter der Schockfront bietet sich also für das Teilchen bzgl. des ISM dasselbe Bild, sodass bei diesem Prozeß innerhalb kurzer Zeit viele gegenläufige Kollisionen stattfinden. Der mittlere Energiegewinn pro Kollision ist bei dieser Art der Beschleunigung proportional zu  $v_{\text{Schock}}/c$ , d.h. dieser Mechanismus erfüllt das obige Kriterium einer schnelleren und effektiveren Beschleunigung und könnte damit für die beobachteten hochenergetischen Teilchen verantwortlich sein.

Mechanismus, der die Teilchen in kürzerer Zeit beschleunigt und/oder der pro Kollision einen höheren Energiebetrag auf das Teilchen überträgt.

### Fermi-Beschleunigung 1. Ordnung

Die Fermi-Beschleunigung 1. Ordnung ist die Beschleunigung an Schockfronten, die sich mit Überschallgeschwindigkeit durch das interstellare Medium (ISM) bewegen und beispielsweise bei Supernovae entstehen können. Bewegt sich ein Teilchen aus dem ungeschockten ISM auf eine Schockfront zu, die sich mit der Geschwindigkeit  $\vec{v}_{\text{Schock}}$  bewegt, so kann es diese mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit durchdringen und dahinter am geschockten ISM reflektiert werden, welches sich mit  $3/4 \cdot \vec{v}_{\text{Schock}}$  bewegt. Betrachtet man nun das Ruhesystem des geschockten ISM, so entfernt sich die Schockfront zwar mit  $1/4 \cdot \vec{v}_{\text{Schock}}$ , das ungeschockte ISM bewegt sich jedoch mit  $3/4 \cdot \vec{v}_{\text{Schock}}$  auf das Teilchen zu und kann dieses wiederum reflektieren. Vor und hinter der Schockfront bietet sich also für das Teilchen bzgl. des ISM dasselbe Bild, sodass bei diesem Prozeß innerhalb kurzer Zeit viele gegenläufige Kollisionen stattfinden. Der mittlere Energiegewinn pro Kollision ist bei dieser Art der Beschleunigung proportional zu  $v_{\text{Schock}}/c$ , d.h. dieser Mechanismus erfüllt das obige Kriterium einer schnelleren und effektiveren Beschleunigung und könnte damit für die beobachteten hochenergetischen Teilchen verantwortlich sein.

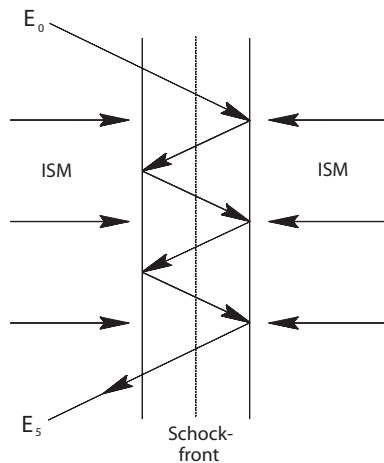


Abb. 1.5: Fermi-Beschleunigung 1. Ordnung

der Beschleunigung proportional zu  $v_{\text{Schock}}/c$ , d.h. dieser Mechanismus erfüllt das obige Kriterium einer schnelleren und effektiveren Beschleunigung und könnte damit für die beobachteten hochenergetischen Teilchen verantwortlich sein.

der Beschleunigung proportional zu  $v_{\text{Schock}}/c$ , d.h. dieser Mechanismus erfüllt das obige Kriterium einer schnelleren und effektiveren Beschleunigung und könnte damit für die beobachteten hochenergetischen Teilchen verantwortlich sein.

### 1.4.2 Top-Down-Modelle

Top-Down-Modelle befassen sich mit schweren Objekten, die bei ihrem Zerfall hochenergetische Teilchen erzeugen können. Bei den meisten geht man davon aus, dass sie im sehr frühen Universum unter sehr extremen Bedingungen entstanden sind. Man spricht von der sog. *Planck-Skala*; hier kommen der

$$\text{Schwarzschildradius } R = \frac{2Gm}{c^2} \quad \text{und die Comptonwellenlänge } \lambda = \frac{h}{mc}$$

eines Objektes in dieselbe Größenordnung. Löst man dies nach der Masse auf, so erhält man die sog. *Planck-Masse* mit  $M_{Planck} \sim 10^{19} \text{ GeV}/c^2$ , die sich nur aus Naturkonstanten berechnet. Solche Bedingungen haben im frühen Universum bei einer Zeit von  $t < 10^{-43} \text{ s}$  nach dem Urknall geherrscht. Zur Beschreibung der physikalischen Prozesse in diesem Bereich wäre eigentlich eine Quantentheorie der Gravitation nötig, daher sind die Annahmen über die Eigenschaften dieser Objekte sehr spekulativ. Top-Down-Modelle haben jedoch den Vorteil, dass das bei Bottom-Up-Modellen auftretende Dilemma des GZK-Effektes keine Rolle mehr spielt, weil sich die betrachteten Objekte auch in unserer Nähe, also innerhalb eines Radius von  $r < 50 \text{ Mpc}$ , aufhalten können. Im folgenden sollen drei dieser Objekte kurz angesprochen werden.

#### 1.4.2.1 Topologische Defekte

Der Begriff „Topologischer Defekt“ steht für eine ganze Reihe von möglichen Objekten bzw. für deren Entstehung. Allgemein kann es bei Phasenübergängen zu solchen Defekten kommen; die hier betrachteten Objekte sind topologische Defekte der Raumzeit, die als Produkt der spontanen Symmetriebrechung des GUT<sup>1</sup>-Phasenübergangs im frühen Universum entstanden sein könnten. Eine genaue Erklärung ist sehr schwierig, daher soll hier eine Analogie zum besseren Verständnis genügen: Bei einem Ferromagneten richten sich beim Unterschreiten der Curie-Temperatur die sog. *Weiss'schen Bezirke* aus. Die ‚Trennwände‘ zwischen diesen Bezirken sind topologische Defekte.

Trotz ihrer hohen Energie von ca.  $10^{24} \text{ eV}$  können diese als topologische Defekte entstandenen Objekte sehr stabil sein und sich zum heutigen Zeitpunkt in unserer Nähe aufhalten. Zerfallen sie, so kann dabei kosmische Strahlung entstehen, die eine Energie deutlich oberhalb von  $10^{20} \text{ eV}$  besitzt [Klapdor97].

#### 1.4.2.2 Magnetische Monopole

Die *normalen* Maxwellgleichungen lassen keine magnetischen Monopole zu ( $\text{div } \vec{B} = 0$ ). Allerdings kann man mit der Einführung einer magnetischen Ladung die Maxwellgleichungen symmetrisieren [Jackson82]. Dies muss nicht zwangsläufig

---

<sup>1</sup>GUT: Grand Unified Theory

zu einem messbaren physikalischen Effekt führen. Nimmt man an, dass alle Teilchen dasselbe Verhältnis von elektrischer zu magnetischer Ladung besitzen, so kann man Transformationen vornehmen, die die Elektrodynamik unverändert lassen. Ein angenehmer Nebeneffekt davon wäre, dass bereits die Existenz eines einzigen magnetischen Monopols die Quantisierung der elektrischen Ladung nach sich ziehen und damit erklären würde [Dirac31].

Eine grobe Massenabschätzung der so eingeführten *Dirac-Monopole* ergibt einige  $\text{GeV}/c^2$ , was sich mit heutigen Beschleunigern erreichen lässt. Denkbare Prozesse zum Nachweis dieser Monopole sind:

$$\begin{aligned} e^+ + e^- &\longrightarrow M + \bar{M} \\ p + \bar{p} &\longrightarrow M + \bar{M} \\ p + p &\longrightarrow M + \bar{M} + p + p \end{aligned}$$

Es wurde jedoch kein solches Ereignis gemessen.

Eine andere Form der magnetischen Monopole sind sog. GUT-Monopole, die 1974 von t'Hooft und Polyakov vorgeschlagen wurden [t'Hooft74], [Polyakov74]. Diese könnten als topologischer Defekt beim GUT-Phasenübergang im frühen Universum entstanden sein. GUT-Monopole besitzen eine schalenförmige Struktur. Ganz innen ist noch die ungebrochene GUT-Symmetrie vorhanden, weiter außen sitzen die Regionen der elektroschwachen Vereinigung und der Fermion-Antifermion-Kondensate. Durch diese Struktur kann von GUT-Monopolen der Nukleonenzerfall katalysiert werden, worauf hier allerdings nicht näher eingegangen werden soll.

Eine Abschätzung des Flusses der magnetischen Monopole gibt das sog. *Parker-Limit* [Parker70]. Das galaktische Magnetfeld von  $2\text{-}3\ \mu\text{G}$  würde durch die Beschleunigung dieser magnetischen Monopole im Laufe der Zeit abgeschwächt oder zerstört werden, weshalb aus dem Vorhandensein dieses Magnetfeldes auf einen maximalen Fluss der Monopole von  $\Phi_m < 1,3 \cdot 10^{-15}\ \text{cm}^{-2}\ \text{s}^{-1}\ \text{sr}^{-1}$  geschlossen werden kann.

#### 1.4.2.3 Primordiale schwarze Löcher

Nimmt man an, dass es nach dem Urknall Dichtefluktuationen gegeben hat, so könnten dabei sog. *Primordiale Schwarze Löcher* (PSL) entstanden sein. Eine andere Möglichkeit der Entstehung dieser PSL ist wie schon bei den magnetischen Monopolen die Entstehung als topologischer Defekt bei Phasenübergängen (siehe oben). Je nach ihrem Entstehungszeitpunkt und -mechanismus können diese Primordialen Schwarzen Löcher praktisch den gesamten Massenbereich abdecken. Wirklich interessant ist allerdings nur der Bereich zwischen  $M \sim 5 \cdot 10^{14}\ \text{g}$  und  $M \sim 5 \cdot 10^{16}\ \text{g}$ . Die PSL mit einer kleineren Masse sind bis heute über die Hawking-Strahlung verdampft, während die Strahlung von PSL mit größerer Masse vom  $100\ \text{MeV}$ - $\gamma$ -Hintergrund überdeckt wird. Der Nachweis der PSL innerhalb dieses Massenbereichs kann durch einen Überschuss im Positronen- und Antiprotonen-Anteil der kosmischen Strahlung

erfolgen, der durch die Hawking-Strahlung dieser Objekte entstehen sollte. Bisher gelang eine eindeutige Klassifizierung der beobachteten Überschüsse aber nicht.

### 1.4.3 Propagation

Die bereits erwähnten Spallationsreaktionen liefern Hinweise auf die durchlaufene Materiedicke und die Verweildauer der kosmischen Strahlung in der Galaxis. Über im Labor gewonnene Wirkungsquerschnitte und durch Untersuchen des Verhältnisses von Spallationsprodukten (Li, Be, B) zu ihren Primärkernen (C, N) lässt sich eine durchlaufene Materiedicke von 5-10 g/cm<sup>2</sup> errechnen. Aus der Dichte der galaktischen Scheibe von  $\sim 1$  H-Atom/cm<sup>3</sup> und einem Durchmesser von  $\sim 30$  kpc folgt dann, dass jedes Teilchen die galaktische Scheibe ca. 100 mal durchlaufen haben muss, bevor es aus der Galaxis entweicht oder nachgewiesen wird. Schwere Kerne haben dabei aufgrund ihrer kürzeren Wechselwirkungslänge eine höhere Anzahl von Wechselwirkungen als Protonen. Nimmt man nun noch die Lichtgeschwindigkeit als maximale Geschwindigkeit der Teilchen an, so ergibt sich als Untergrenze für die Verweildauer der kosmischen Strahlung in unserer Galaxis ein Wert von ca. 6 Millionen Jahren.

Die Verweildauer lässt sich auch über radioaktive Isotope bestimmen, die bei Spallationsreaktionen entstehen. Ein Beispiel ist <sup>10</sup>Be, das mit einer Halbwertszeit von  $\tau_{\frac{1}{2}} = 1,6 \cdot 10^6$  a über die Reaktion  $^{10}\text{Be} \rightarrow ^{10}\text{B} + \beta^- + \bar{\nu}_e$  zerfällt. Vergleicht man den Wert des Verhältnisses  $^{10}\text{Be}/(^7\text{Be} + ^9\text{Be} + ^{14}\text{Be})$  aus dem Labor und aus der kosmischen Strahlung, so zeigt sich, dass ein wesentlicher Anteil der <sup>10</sup>Be-Isotope seit der Produktion in Spallationsreaktionen zerfallen ist. Aus diesen Untersuchungen wurde die Verweildauer der kosmischen Strahlung in der Galaxis zu  $\tau \sim 20 \cdot 10^6$  a bestimmt. Um die obige Materiedicke in dieser Zeit zu durchlaufen, müssen sich die Teilchen eine wesentliche Zeit außerhalb der dichten galaktischen Scheibe bewegen, im sog. *Halo* der Galaxis.

Die Propagation der kosmischen Strahlung wird durch folgende Transportgleichung beschrieben [Gaisser90]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_i(E, x, t)}{\partial t} &= \vec{\nabla} \cdot (D \vec{\nabla} N_i) && \text{(Diffusion)} \\ &- \frac{\partial}{\partial E} \left( \frac{dE}{dt} \cdot N_i(E) \right) && \text{(mittl. Energieänderung)} \\ &- \vec{\nabla} \cdot \vec{u} N_i && \text{(Konvektion)} \\ &+ Q_i(E, t) && \text{(Quellstärke)} \\ &- p_i \cdot N_i && \text{(Kollision und Zerfall)} \\ &+ \frac{v_i \rho}{m} \sum_{k \geq i} \int \frac{d\sigma_{ij}(E, E')}{dE} N_j(E') dE' && \text{(Kaskaden-Term)} \end{aligned}$$

$N_i$  : Teilchendichte der Sorte i



Dies ist eine Diffusionsgleichung mit ergänzenden Termen zur Energie- und Teilchenzahländerung. Der Kaskaden-Term beschreibt die Produktion von Teilchen der Sorte  $i$  aus Teilchen der Sorte  $j$ .

Ein einfaches Beispiel ist das sog. *Leaky-Box-Modell*. Man betrachtet hierbei die freie Ausbreitung von Teilchen in einem abgeschlossenen Volumen, aus dem sie mit einer energieabhängigen, aber zeitlich konstanten Wahrscheinlichkeit  $P_{\text{esc}}$  entkommen können. Der Diffusionsterm in der Transportgleichung vereinfacht sich dann zu  $-N_i/\tau_{\text{esc}}$ . Daraus erhält man unter Vernachlässigung der anderen Terme in der Transportgleichung ein Exponentialgesetz, welches für die Verweildauer der kosmischen Strahlung in der Galaxis einen Wert von  $\tau \sim 22 \cdot 10^6$  a liefert. Allerdings wird bei diesem Modell weder eine Aussage über die Größe des abgeschlossenen Volumens gemacht, noch über den physikalischen Prozeß des Entweichens.

Weitere Modelle sind das *Nested-Leaky-Box-Modell*, bei dem eine energieabhängige Wahrscheinlichkeit des Entkommens aus dem eigentlichen Quellgebiet angenommen wird, und das *Diffusionsmodell*, bei welchem der Diffusionsterm nicht konstant ist und das im Gegensatz zum *Leaky-Box-Modell* Gradienten und Anisotropien erzeugen kann [Klapdor97].

## 2 Ausgedehnte Luftschauer

### 2.1 Phänomenologie

Ausgedehnte Luftschauer wurden erstmals 1938 von dem Franzosen Pierre Auger entdeckt. Sie entstehen, wenn ein hochenergetisches Teilchen der kosmischen Strahlung mit Molekülen der Erdatmosphäre wechselwirkt. Dabei werden Sekundärteilchen produziert, welche ihrerseits wieder mit der Atmosphäre wechselwirken und neue Teilchen erzeugen. So entsteht eine Kaskade, die bis zum Erreichen des Erdbodens aus mehreren Millionen Teilchen besteht. Der Luftschauer setzt sich dort aus ungefähr 80 % Photonen, 18 % Elektronen und Positronen, 1,7 % Myonen und 0,3 % Hadronen zusammen. Da sich alle Teilchen mit annähernd Lichtgeschwindigkeit bewegen, ist der Luftschauer im Zentrum nur ca. einen Meter dick, außen kann die Dicke allerdings je nach Energie mehrere hundert Meter (bei  $E = 10^{17}$  eV) bis mehrere Kilometer (bei  $E = 10^{20}$  eV) betragen. Auch lateral können Luftschauer bis zu mehreren Kilometern ausgedehnt sein (ca. 10 km bei  $E = 10^{20}$  eV).

Bei einer Energie des Primärteilchens im Bereich des Knies, also bei etwa  $10^{15}$  eV, beträgt der Fluß etwa 1 Teilchen pro Quadratmeter und Jahr. Spätestens ab hier sind indirekte Messungen der kosmischen Strahlung über ausgedehnte Luftschauer unverzichtbar, weil der Fluß für direkte Messungen viel zu gering ist.

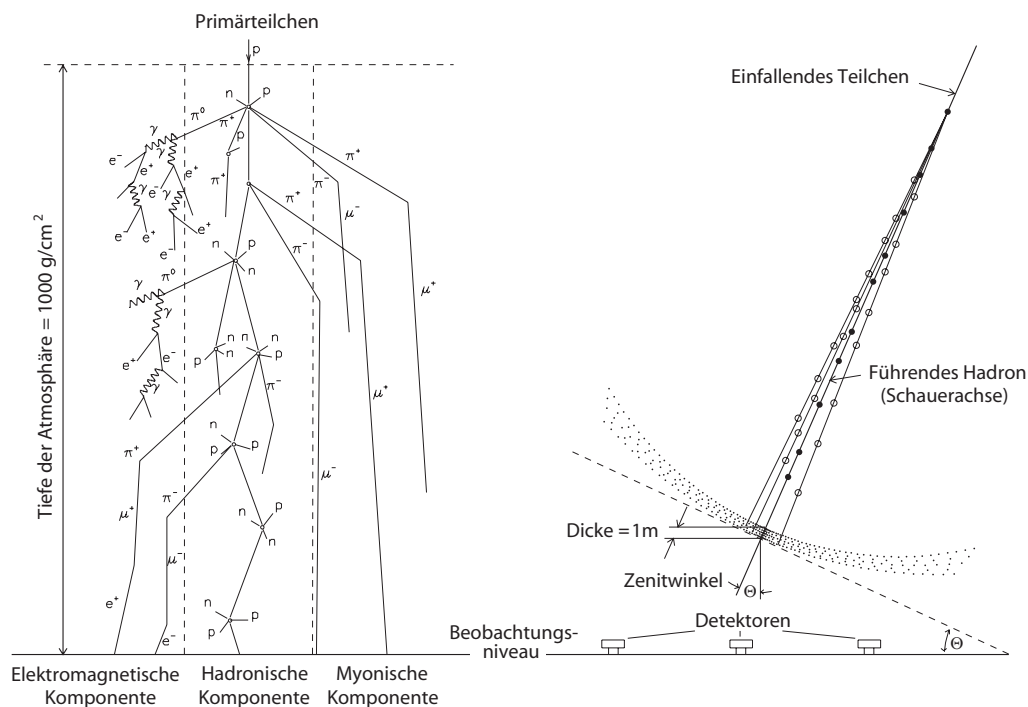


Abb. 2.1: Links die schematische Entwicklung, rechts die Seitenansicht eines ausgedehnten Luftschauers. [Alkhofer75]

Um sinnvolle Aussagen über Art und Energie des Primärteilchens machen zu können, müssen die Messwerte mit umfangreichen Simulationen verglichen werden. Bekannte Luftschauer-Simulationsprogramme sind CORSIKA [Heck98] und MOCCA [Hillas81]. Die Simulation von Luftschauern ist nicht unproblematisch, weil Schwerpunktsenergien, wie sie bei Primärteilchen mit Energien von  $10^{17}$  eV und mehr auftreten, in bisherigen Beschleunigerexperimenten noch nicht erreicht werden können. Daher ist man darauf angewiesen, die gewonnenen Erkenntnisse über die Wechselwirkungen von niedrigeren Energien nach oben zu extrapolieren. Außerdem können bei Beschleunigerexperimenten die energiereichsten Teilchen nicht nachgewiesen werden, da sie einen sehr kleinen Transversalimpuls haben und sich sehr nahe an der Strahlachse bewegen, wo man keine Detektoren hat. Gerade diese Teilchen spielen aber in Luftschauern eine wichtige Rolle, da sie maßgeblich für die Entwicklung des Schauers verantwortlich sind.

## 2.2 Zusammensetzung

Bei Luftschauern unterscheidet man die hadronische, die elektromagnetische und die myonische Komponente. Im äußeren Bereich des Schauers findet man hauptsächlich die beiden letzteren, wohingegen sich die meisten Hadronen aufgrund ihres geringen Transversalimpulses in einem engen Bereich um die Schauerachse befinden ( $\sim$  Richtung des Primärteilchens). Im folgenden soll kurz auf jede dieser Komponenten und die dabei relevanten physikalischen Prozesse eingegangen werden.

### 2.2.1 Hadronen

Die Hadronen im Luftschauer entstehen durch Kern-Kern-Wechselwirkungen. Dabei kommt es zur Fragmentation der beteiligten Kerne, außerdem entstehen weitere Hadronen wie Pionen, Kaonen, Protonen und Neutronen. Im Mittel werden ca. 50-60 % der Energie zur Teilchenproduktion verwendet. Das höchstenergetische Teilchen nach der Wechselwirkung nennt man „leading particle“, es trägt im Mittel ca. 50 % der ursprünglichen Energie. Die Pionen machen mit ca. 65 % den größten Teil der hadronischen Komponente aus, wobei  $\pi^+$ ,  $\pi^-$  und  $\pi^0$  ungefähr zu gleichen Teilen vertreten sind. Sie bilden über ihre Zerfallskanäle die Grundlage für die elektromagnetische und die myonische Komponente.

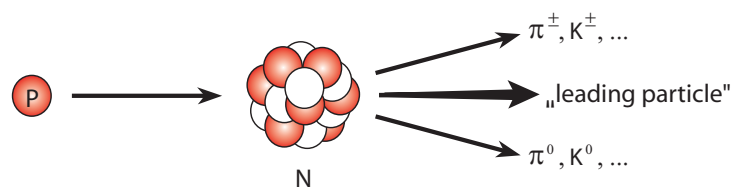


Abb. 2.2: Schematische Darstellung einer Proton-Kern-Wechselwirkung.

### 2.2.2 Elektronen, Positronen und Gammastrahlung

Die elektromagnetische Komponente findet ihren Anfang im  $\pi^0$ -Zerfall:

$$\pi^0 \longrightarrow \gamma + \gamma$$

Die Halbwertszeit ist  $\tau_0 = 0,8 \cdot 10^{-16}$  s. Die mittlere Weglänge bis zum Zerfall dieser Pionen beträgt somit  $R \approx \gamma \cdot c \cdot \tau_0 \approx \gamma \cdot 25,1$  nm, d.h. sie zerfallen im Wesentlichen am Ort ihrer Entstehung. Die Gammaquanten initiieren anschließend über die Prozesse

$$\begin{array}{l} \text{Paarbildung} \quad \gamma + Z \longrightarrow Z + e^+ + e^- \\ \text{und Bremsstrahlung} \quad e^\pm \longrightarrow \gamma + e^\pm \end{array}$$

eine elektromagnetische Kaskade, die ihre Teilchenzahl im Mittel in jeder Generation verdoppelt. Gleichzeitig erleiden die Teilchen aber auch Energieverluste durch Ionisation der Luftmoleküle. Daher nimmt die Teilchenzahl unterhalb einer kritischen Energie von ca. 83 MeV wieder ab, dort überwiegt der Teilchenverlust durch Ionisation den Gewinn durch Bremsstrahlung.

Im Gegensatz zur hadronischen Komponente findet sich die elektromagnetische auch noch im äußeren Bereich des Luftschauers, was durch die Coulomb-Vielfachstreuung an Hüllenelektronen und Kernen in der Atmosphäre zu erklären ist.

### 2.2.3 Myonen

Die Grundlage der myonischen Komponente bildet der Zerfall der geladenen Pionen:

$$\begin{array}{l} \pi^- \longrightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \\ \pi^+ \longrightarrow \mu^+ + \nu_\mu \end{array}$$

Da dieser jedoch eine Halbwertszeit von  $\tau_0 = 1,8 \cdot 10^{-8}$  s besitzt und die Pionen somit eine mittlere Weglänge von  $R \approx \gamma \cdot c \cdot \tau_0 \approx \gamma \cdot 7,8$  m haben (also  $R \sim 55$  km bei  $E_{\text{Pion}} = 1$  TeV), ist die Wahrscheinlichkeit einer weiteren Wechselwirkung viel größer als die des Zerfalls. Myonen entstehen also nur bei niederenergetischen Pionen, die vor der nächsten Wechselwirkung bereits zerfallen sind.

Eine weitere Möglichkeit der Entstehung von Myonen bieten die Kaonen-Zerfälle. Am häufigsten sind

$$\begin{array}{l} K^- \longrightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \\ K^+ \longrightarrow \mu^+ + \nu_\mu . \end{array}$$

Die Anzahl der Kaonen im Luftschauer steigt mit der Energie des Primärteilchens, sodass diese Zerfälle nur bei hohen Primärenergien und den ersten Wechselwirkungen im Schauer wichtig sind.

Die Anzahl der am Boden ankommenden Myonen ist von der Energie der Myonen abhängig. Ionisationsverluste führen bei niederenergetischen Myonen zum Zerfall über

$$\begin{aligned}\mu^- &\longrightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \\ \mu^+ &\longrightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu.\end{aligned}$$

Die Halbwertszeit bei diesen Zerfällen beträgt  $\tau_0 = 2,2 \cdot 10^{-6}$  s, d.h. Myonen haben eine mittlere freie Weglänge von  $R \approx \gamma \cdot c \cdot \tau_0 \approx \gamma \cdot 660$  m. Die meisten Myonen zerfallen also nicht und erreichen den Erdboden.

Das Verhältnis von Myonen zu Elektronen ist ein wichtiges Instrument, um Rückschlüsse auf die Natur des Primärteilchens ziehen zu können. Vergleicht man in Simulationen beispielsweise von Protonen ausgelöste Luftschauer mit denen von Eisen, so haben die Pionen bei Eisen im Mittel eine niedrigere Energie, d.h. es zerfallen mehr Pionen und es werden dadurch mehr Myonen produziert. Außerdem findet bei Eisen aufgrund der höheren Wechselwirkungswahrscheinlichkeit die erste Wechselwirkung früher in der Atmosphäre statt, daher sind die Elektronen am Erdboden schon stärker ausgestorben als bei einem protoninduzierten Schauer (siehe Abb. 2.3).

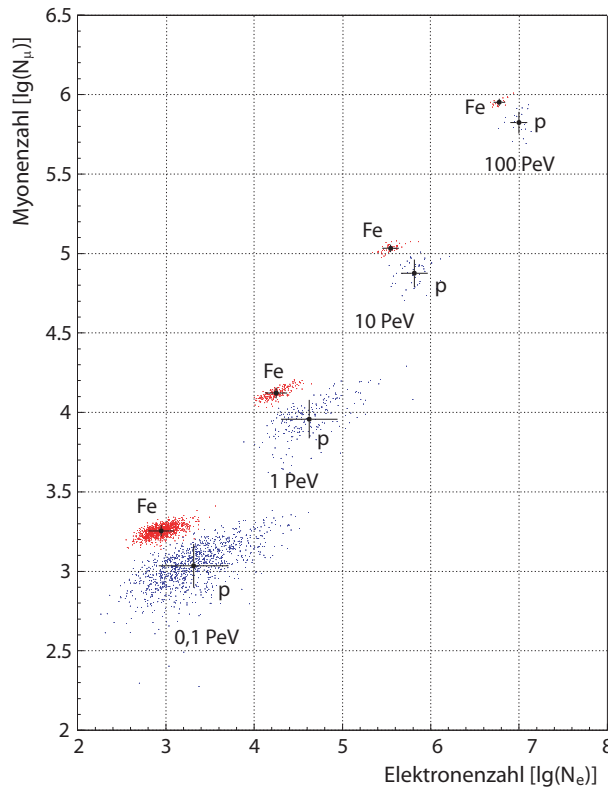


Abb. 2.3: Vergleich des  $N_\mu/N_e$ -Verhältnisses bei proton- und eiseninduzierten Luftschauern bei verschiedenen Energien (22°-Schauer, simuliert mit CORSIKA V. 6.014, QGSJET). Die Fehlerbalken geben die Streubreiten der einzelnen Ereignisse an.

## 2.3 Schauerentwicklung

Abhängig von Art und Energie des Primärteilchens und dem Punkt der ersten Wechselwirkung, der bei Protonen etwa 20-25 km und bei Eisen ca. 35-40 km über dem Meeresniveau liegt, gibt es in einer bestimmten Höhe der Atmosphäre ein Teilchenzahlmaximum. Ab dieser Höhe ist die Energie der meisten Sekundärteilchen zu gering, um neue Teilchen zu erzeugen, sodass ab hier die Teilchenzahl durch Zerfälle, Ionisation und Absorption in der Atmosphäre exponentiell abnimmt. Wie in Abb. 2.4 zu sehen ist, entwickeln sich die verschiedenen Schauerkomponenten unterschiedlich. Am Erdboden kann mit Detektorarrays also nur noch ein geringer Teil der im Luftschauer entstandenen Teilchen nachgewiesen werden (siehe nächstes Kapitel). Daher ist es ein entscheidender Vorteil der Fluoreszenzdetektoren des Auger-Experimentes, die Luftschauer im Bereich des Maximums beobachten zu können.

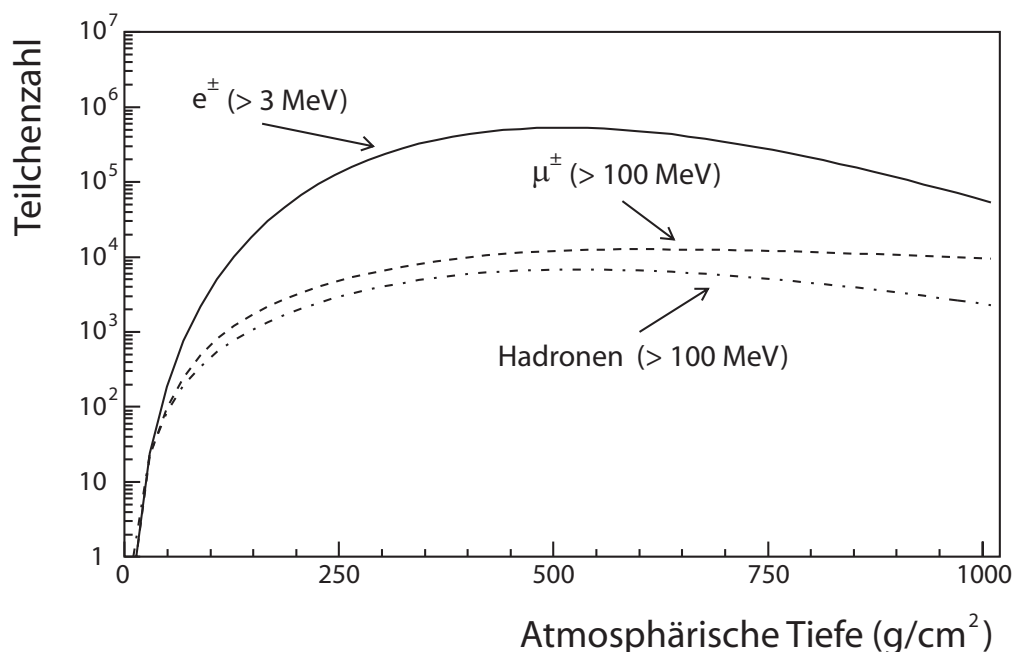


Abb. 2.4: Nach Komponenten unterteilte Teilchenzahlentwicklung (nur geladene Teilchen) eines protoneninduzierten  $10^{15}$  eV-Luftschauers, logarithmische Skala, simuliert mit CORSIKA [Maier2000].

## 2.4 Nachweis von Luftschauern

Wie in Kap. 1.2 bereits erwähnt, deckt die kosmische Strahlung einen Energiebereich von ca. 15 Größenordnungen ab. Ab einer Energie von ca.  $10^{11}$  eV werden in der Atmosphäre Luftschauer ausgelöst, deren Sekundärteilchen aber erst ab Energien von  $> 10^{13}$  eV in signifikanter Anzahl den Erdboden erreichen. Für den Nachweis von

Luftschauern kommen unterschiedliche Techniken zum Einsatz, die sich miteinander kombiniert auch sehr gut ergänzen können, z.B. durch die verteilte Messung der verschiedenen Komponenten eines Luftschauers oder die Beobachtung des Schauers in unterschiedlichen Höhen.

Im folgenden soll kurz auf die bekanntesten Nachweismethoden eingegangen werden. Dabei wird zwischen dem direkten und dem indirekten Nachweis der Sekundärteilchen unterschieden.

### 2.4.1 Direkter Nachweis der Sekundärteilchen

Der direkte Nachweis der Sekundärteilchen erfolgt über großflächige Detektorarrays, welche meist aus einer großen Anzahl von Szintillationsdetektoren bestehen, die am Erdboden in einiger Entfernung voneinander aufgestellt werden. In vertikaler Richtung wechseln sich dabei im Detektor Szintillations- und Absorber-Schichten ab, um Elektronen von Myonen unterscheiden zu können bzw. um in einem Hadron-Kalorimeter die Energie von Hadronen zu bestimmen. Die Aufgabe dieser Arrays ist es, einen repräsentativen Anteil der Sekundärteilchen eines Luftschauers am Erdboden zu messen, um hinterher den kompletten Schauer rekonstruieren zu können. Dabei wird mittels eines engen Zeitfensters gewährleistet, dass die gemessenen Sekundärteilchen wirklich „gleichzeitig“ angekommen sind und zum selben Luftschauer gehören.

Beim Auger-Experiment werden für das Detektorarray keine Szintillationsdetektoren verwendet, sondern Wasser-Čerenkov-Detektoren. Auf diesen Detektor-typ wird in Kap. 3.1 näher eingegangen.

Großflächige Detektorarrays werden benötigt, um etwas über die Lateralverteilung der Teilchen im Schauer zu erfahren. Diese Nachweismethode kann bei allen Primärenergien eingesetzt werden. Zu niedrigen Energien hin müssen die Detektorarrays allerdings wie z.B. das EAS-TOP-Experiment [Aglietta89] in größeren Höhen aufgestellt werden, da die Sekundärteilchen dieser Luftschauer aufgrund ihres frühen Aussterbens in der Atmosphäre das Detektorarray sonst nicht mehr in signifikanter Anzahl erreichen. Die Ausdehnung der benötigten Fläche steigt mit der Primärenergie, da einerseits die Ausdehnung der Luftschauer zunimmt und andererseits der Fluss zu höheren Energien hin stark abnimmt. Beispiele sind AGASA [Takeda03], CASA-MIA [Borione94], KASCADE [Doll90] und das Auger-Experiment.

### 2.4.2 Indirekter Nachweis der Sekundärteilchen

#### 2.4.2.1 Čerenkov-Teleskope

Bewegen sich geladene Teilchen in einem durchsichtigen, polarisierbaren Medium schneller als das Licht (also mit  $v > \frac{c}{n}$ ), emittieren sie sog. Čerenkov-Licht. Dies passiert auch bei den geladenen Teilchen eines Luftschauers, hauptsächlich bei den Elektronen. Allerdings muss hierbei beachtet werden, dass der Brechungsindex von

Luft von der Höhe abhängig ist ( $n = n(h)$ ). Damit ist auch die Schwellenenergie von der Höhe abhängig, liegt aber für die meisten Elektronen so niedrig (im Bereich um 25 MeV), dass praktisch alle Elektronen an diesem Prozess beteiligt sind. Das Čerenkov-Licht wird in etwa in Richtung der geladenen Teilchen emittiert; man erhält daher einen Lichtkegel in Richtung des Luftschauers. Die Gesamtzahl der Čerenkov-Photonen ist dabei ein Maß für die Energie des Primärteilchens. Man unterscheidet zwischen *abbildenden* und *nicht-abbildenden* Čerenkov-Teleskopen. Erstere sind insbesondere zum Nachweis von  $\gamma$ -induzierten Luftschauern geeignet, da sie eine gute Trennung von hadron- und  $\gamma$ -induzierten Luftschauern erlauben, während die nicht-abbildenden Teleskope nur die Anzahl der Photonen pro  $\text{m}^2$  messen. Beispiele für abbildende Čerenkov-Teleskope sind HEGRA [Pühlhofer03] und das momentan im Aufbau befindliche H.E.S.S. [Hofmann02].

#### 2.4.2.2 Fluoreszenz-Teleskope

Die Sekundärteilchen eines Luftschauers lösen ein Fluoreszenzleuchten durch Anregung von  $\text{N}_2$ -Atomen in der Atmosphäre aus, welches allerdings erst bei Primärenergien von  $> 10^{18}$  eV nachweisbar ist. Unterhalb dieser Energie ist das Leuchten zu schwach, um es vom Untergrund durch Sternen-, Mond- oder Zivilisationslicht trennen zu können. Das Fluoreszenzlicht wird im Gegensatz zum Čerenkov-Licht isotrop emittiert. Es wird mit sehr empfindlichen Teleskopen gemessen, die seitlich auf den Luftschauer blicken. Dadurch kann man Rückschlüsse auf die longitudinale Entwicklung des Schauers ziehen. Mit dieser Methode wurde beim Fly's Eye-Experiment [Bird95] das bisher höchstenergetische Teilchen ( $E \sim 3 \cdot 10^{20}$  eV) nachgewiesen. Auch beim Auger-Experiment wird dieser Detektortyp verwendet (siehe Kap. 3.2).

#### 2.4.2.3 Radio-Messungen

Eine relativ neuartige Methode, die zur Zeit entwickelt wird und beispielsweise im LOFAR-Experiment [Lonsdale02] zum Einsatz kommen soll, ist die Messung von Radioemissionen in Luftschauern. Im Frequenzbereich von ca. 10-250 MHz wird mit Antennen Radiostrahlung aufgefangen, die vermutlich von kohärenter Synchrotronstrahlung der Schauerteilchen im Erdmagnetfeld erzeugt wird. Die Physik der Radioemission von Luftschauern ist jedoch noch kaum verstanden, daher kann über die erwarteten Signale derzeit noch keine konkrete Aussage gemacht werden.



### 3 Das Pierre Auger Observatorium

Das Pierre Auger Observatorium ist ein zur Zeit im Aufbau befindliches Experiment zur Messung von ausgedehnten Luftschauern, die durch die höchstenergetischen Teilchen der kosmischen Strahlung mit einer Energie  $\geq 10^{18}$  eV erzeugt werden. Bis zum Jahr 2004 soll in internationaler Zusammenarbeit von 16 Nationen<sup>2</sup> das mit einer Fläche von ca. 3000 km<sup>2</sup> weltgrößte Experiment zur Untersuchung der kosmischen Strahlung entstehen. Standort ist die Pampa Amarilla in der argentinischen Provinz Mendoza, die sich durch besonders viel freie Fläche und besonders wenig Streulicht von umgebenden Städten auszeichnet. Zudem findet man dort eine Atmosphäre, die eine sehr geringe Belastung durch Schmutzpartikel aufweist. Dies erleichtert die Fluoreszenzlichtmessung erheblich, weil die auftretende Mie-Streuung keine große Rolle spielt. Ein weiterer Grund für die Wahl dieses Standortes ist die Tatsache, dass es nur an wenigen Tagen im Jahr bewölkt ist. An den anderen Tagen findet man dort eine klare Atmosphäre, in der sich das Fluoreszenzlicht weitgehend ungestört ausbreiten kann.

Das Pierre Auger Experiment besteht aus einem hybriden Detektorsystem, d.h. die Luftschauber werden gleichzeitig von zwei verschiedenen Detektortypen gemessen. Ein großflächiges Detektorarray mit insgesamt 1600 Detektoren gibt Auskunft über die Lateralverteilung der Teilchen im Luftschauber, während 24 Fluoreszenzteleskope in 4 Gebäuden am Rande des Detektorarrays die longitudinale Entwicklung des Schauers untersuchen.

Eine Anordnung als Hybrid-Detektor bringt gegenüber der Verwendung von nur einem Detektortypen mehrere Vorteile:

- Minimierung von Fehlern:

Die Daten eines der beiden Detektortypen alleine erlauben bereits die Rekonstruktion der Richtung, Art und Energie des Primärteilchens. Durch die Messung mit zwei völlig unterschiedlichen Techniken lassen sich die Daten gegenseitig überprüfen und somit Fehler minimieren. Auch systematische Fehler bei einem der beiden Detektortypen werden damit erkannt.

- Gegenseitige Ergänzung der Daten:

Mit dem Detektorarray erhält man Informationen über die *laterale* Verteilung der Teilchen im Schauer, mit den Fluoreszenzdetektoren über die *longitudinale* Entwicklung des Schauers. Beide Informationen erlauben Rückschlüsse auf die Art des Primärteilchens, wobei aber statistische Schwankungen der Teilchenzahl eine genaue Identifizierung erschweren. Durch die Kombination beider Informationen ist man diesen Fluktuationen gegenüber weniger anfällig und es lässt sich eine präzisere Aussage über die Art des Primärteilchens machen.

---

<sup>2</sup>Argentinien, Armenien, Australien, Bolivien, Brasilien, Deutschland, Frankreich, Großbritannien, Italien, Mexico, Polen, Slovenien, Spanien, Tschechische Republik, USA, Vietnam

Auch bei der Richtungsrekonstruktion des Schauers erreicht man durch eine Kombination der Daten eine höhere Genauigkeit.

Beide Detektortypen ergänzen sich zudem bei der Beobachtung von sog. *horizontalen Luftschauern*, die von hochenergetischen Neutrinos ausgelöst werden und die sich anders als normale Luftschauer in horizontaler Richtung oder von unten nach oben ausbilden können. Das Detektorarray bietet eine große Messfläche und eine Datenaufnahme rund um die Uhr, während die Teleskope nur nachts und bei wenig Mondlicht eingesetzt werden können. Dafür erkennen die Teleskope auch nach oben laufende Schauer, die vom Detektorarray eventuell nicht gesehen werden können.

Im folgenden soll auf die beiden Detektortypen näher eingegangen werden.

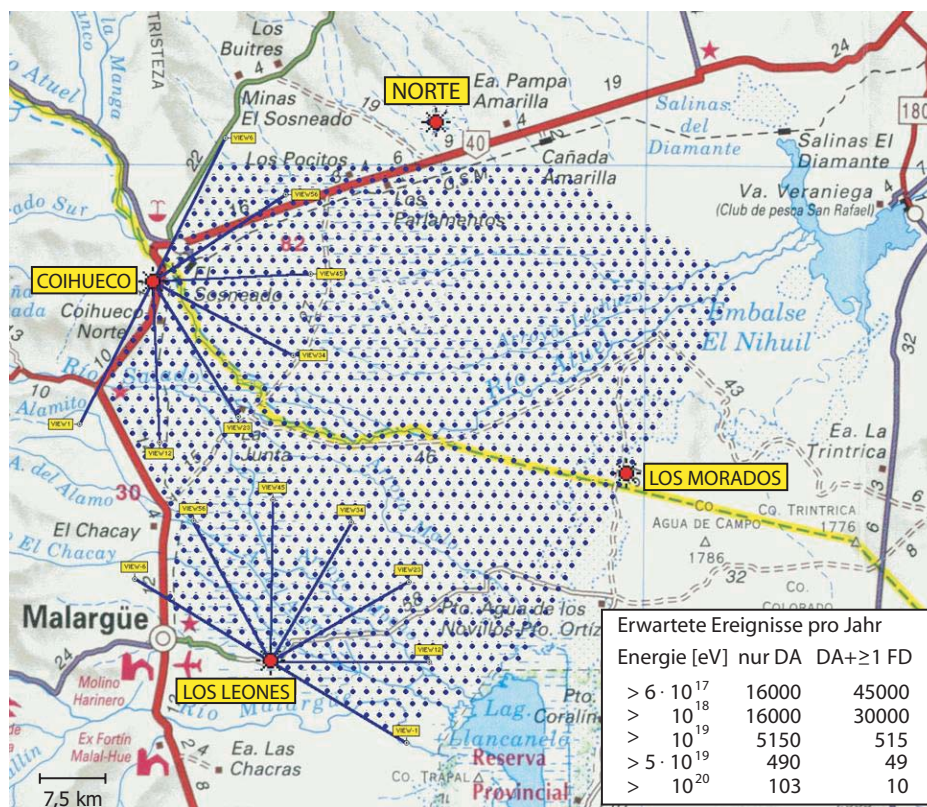


Abb. 3.1: Lageplan des Pierre Auger Observatoriums in Argentinien. Die Punkte repräsentieren die Wasser-Čerenkov-Detektoren des Detektorarrays (DA). An den Orten LOS LEONES, LOS MORADOS, COIHUECO und NORTE befinden sich die Gebäude mit den Fluoreszenzdetektoren (FD), teilweise sind die Blickwinkel der Teleskope angedeutet. Rechts unten die pro Jahr erwarteten Ereignisse bei verschiedenen Energien, basierend auf dem AGASA-Energiespektrum. [Blümer03]

### 3.1 Das Detektorarray

Das Detektorarray des Auger-Experimentes erstreckt sich über eine Gesamtfläche von ca. 3000 km<sup>2</sup> auf einer Höhe zwischen ca. 1400 und 1700 Metern üNN. Die 1600 Detektorstationen sind in einem Abstand von 1,5 km voneinander auf einem hexagonalen Gitter aufgestellt. Dieser Abstand ergab sich durch die Forderung, dass bei einem 10<sup>19</sup> eV-Luftschauder mindestens vier Detektorstationen die Triggerschwelle überschreiten sollten. Jede der Stationen besteht aus einem zylinderförmigen Tank, der mit hochreinem Wasser gefüllt ist. Bewegen sich die geladenen Teilchen eines Luftschauders mit einer Geschwindigkeit  $v > \frac{c}{n}$  durch das Wasser im Tank, so entsteht Čerenkov-Licht, das mit drei Photomultipliern gemessen wird. Die Schwellenenergie beträgt hierbei für Elektronen 0,25 MeV, für Myonen 73 MeV. Um eine hohe Lichtausbeute zu erreichen, wurden die Tanks mit reflektivem Tyvec-Material ausgekleidet. Die Ausrüstung mit Solar- und Speicherzellen gewährleistet eine autonome Stromversorgung jeder Station. Über ein GPS-Signal werden die Detektorstationen synchronisiert. Später erhält jedes Ereignis eine Zeitmarke, sodass über deren Differenzen eine Richtungsrekonstruktion des Schauders durchgeführt werden kann. Dazu muss die Zeitauflösung im Nanosekunden-Bereich liegen. Die Daten jeder Station werden über Funk zu einer Datenerfassungsstation in Malargüe gesendet.

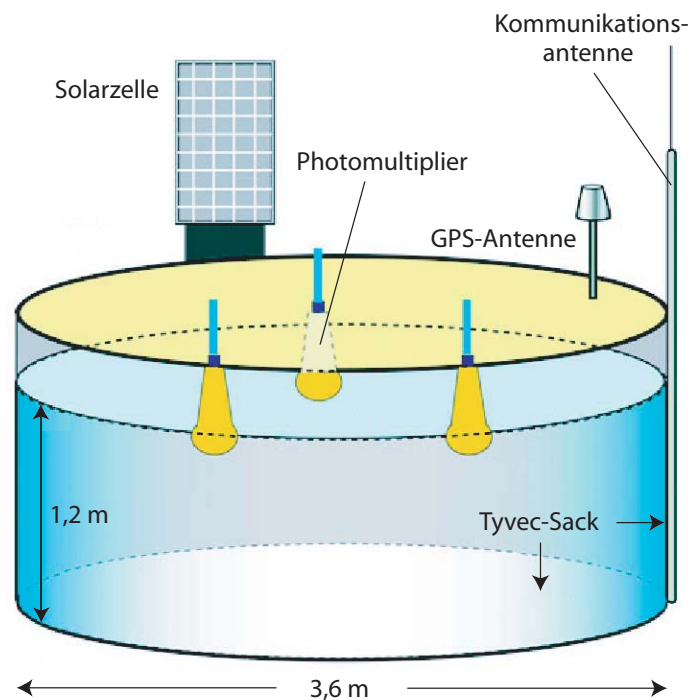


Abb. 3.2: Schema des Oberflächen-Detektors beim Auger-Experiment.

## 3.2 Die Fluoreszenzdetektoren

### 3.2.1 Physikalische Aspekte bei der Fluoreszenzlichtmessung

Wenn die geladenen Sekundärteilchen eines Luftschauers die Atmosphäre durchqueren, so ionisieren sie Stickstoffmoleküle oder regen diese an. Kehren diese angeregten oder ionisierten Moleküle wieder in den Grundzustand zurück, so emittieren sie Fluoreszenzlicht, dessen Hauptanteil der Intensität (ca. 80 %) im Wellenlängenbereich von 300-450 nm liegt (siehe Abb. 3.3). Aus diesem Grund befindet sich vor den Auger-Fluoreszenzdetektoren ein Filter, der Wellenlängen über 400 nm absorbiert. Somit wird das störende Streulicht auf ein Minimum reduziert.

Die Anzahl der Fluoreszenzphotonen, die von  $N_e$  geladenen Teilchen pro durchlaufener Strecke  $dl$  erzeugt werden, ist gegeben durch

$$\frac{dN_\gamma}{dl} = N_f N_e .$$

$N_f$  gibt an, wieviele Photonen pro geladenem Teilchen und Meter entstehen. Dies kann in den meisten Fällen als eine Konstante betrachtet werden, es sind jedoch umfangreiche Messungen im Gange, die z.B. den Einfluss auf diese Größe von Druck (bzw. Höhe) und Temperatur in der Atmosphäre eingehend untersuchen.

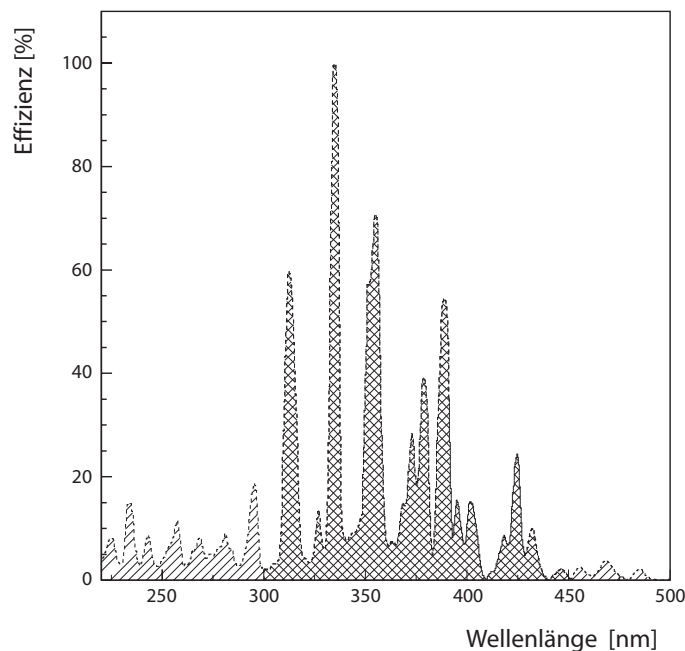


Abb. 3.3: Emissionsspektrum des Fluoreszenzlichtes, welches aus dem 2P-Band von molekularem Stickstoff und aus dem 1N-Band des Stickstoff-Ions  $N_2^+$  emittiert wird. Die Effizienz ist der Quotient aus abgestrahlter und im Medium absorbiertes Energie [Cronin97].

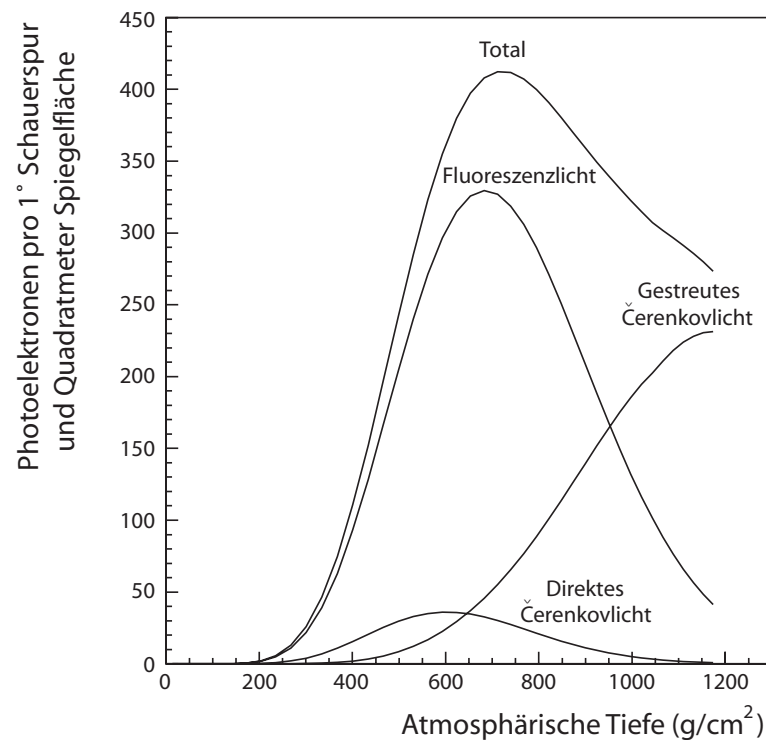


Abb. 3.4: Erwartetes Signal bei den Fluoreszenzdetektoren, unterteilt nach Komponenten [Cronin97].

Wie in Kap. 2.4 bereits erwähnt, entsteht bei Luftschauern auch Čerenkov-Licht, welches aber hauptsächlich entlang der Schauerachse emittiert wird (ca. 1 Grad Öffnungswinkel, abhängig von der Höhe). Aufgrund der isotropen Emission des Fluoreszenzlichtes ist das *direkte Čerenkov-Licht* daher für die Fluoreszenzlicht-Messung nicht weiter störend. In Abb. 3.4 ist das erwartete Signal bei den Fluoreszenzdetektoren aufgetragen, unterteilt nach den einzelnen Komponenten. Aufgetragen über der atmosphärischen Tiefe ist die Anzahl der Photoelektronen im Detektor pro Grad beobachteter Schauerspur und Quadratmeter Spiegelfläche. Der Luftschauer wird dabei als Linie betrachtet. Simuliert wurde ein protoninduzierter Schauer mit einer Primärenergie von  $10^{19}$  eV, der den Erdboden in einer Entfernung von 10 km vom Detektor unter den Winkeln  $\theta = 45^\circ$  und  $\phi = 0^\circ$  trifft. Dabei wurde bereits berücksichtigt, dass durch die Filter nur Licht der Wellenlänge zwischen 300 und 400 nm passieren kann. Wie zu erkennen ist, kann das direkte Čerenkov-Licht zwar vernachlässigt werden, das Rayleigh- und Mie-gestreute Čerenkov-Licht kann aber zu größerer atmosphärischer Tiefe hin zu einer Beeinträchtigung der Fluoreszenzlichtmessung führen. Die Beobachtung der Schauer mit Fluoreszenzteleskopen findet jedoch zum größten Teil in einem Bereich unterhalb von  $1000 \text{ g/cm}^2$  statt. Erst bei größeren atmosphärischen Tiefen beginnt der Anteil des gestreuten Čerenkov-Lichtes den des Fluoreszenzlichtes zu übersteigen.

### 3.2.2 Anordnung der Teleskope

In den vier Gebäuden am Rande des Detektorarrays befinden sich jeweils 6 der insgesamt 24 Teleskope. Die Entfernung zwischen zwei benachbarten Detektorgebäuden beträgt ca. 45 km Luftlinie. Die Gebäude sind in sechs Bereiche unterteilt (sog. *Bays*), in denen die Teleskope untergebracht sind (siehe Abb. 3.5). Zusätzlich existiert ein Zentralraum, in welchem unter anderem die zentrale Instanz des Slow Control Systems, der sog. *Field-PC*, seinen Platz findet.

Jedes Teleskop besitzt ein Blickfeld von  $30^\circ \times 30^\circ$ , d.h. pro Gebäude hat man ein Blickfeld von  $180^\circ \times 30^\circ$ . Die Ausrichtung der Teleskope bzw. der Gebäude ist so gewählt, dass sich mit den 24 Teleskopen das gesamte Detektorarray überblicken lässt (siehe Abb. 3.1). Durch die gleichzeitige Beobachtung von mehreren Gebäuden aus ist eine dreidimensionale Rekonstruktion des Schauers möglich. Das Ziel der Messungen mit den Fluoreszenzteleskopen ist es, mit den Informationen über die longitudinale Entwicklung der Luftschaer die Art und die Energie des Primärteilchens zu bestimmen.

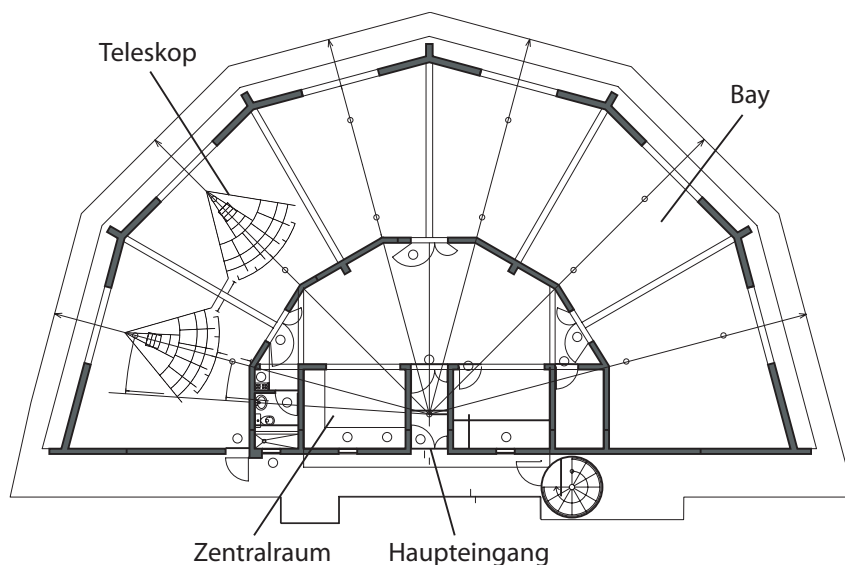


Abb. 3.5: Skizze eines Fluoreszenzdetektor-Gebäudes.

### 3.2.3 Optik

Die Fluoreszenzteleskope bestehen aus einem segmentierten sphärischen Spiegel mit einer Fläche von ca.  $12\text{ m}^2$ . Für die Spiegelemente gibt es zwei verschiedene Typen. Die in Karlsruhe gefertigten Modelle bestehen aus diamantgefrästen Aluminiumsegmenten, die eine trapezförmige Gestalt haben. Die tschechischen Spiegel sind aus sechseckigen Glaskörpern gefertigt, die poliert und mit einer Aluminiumschicht

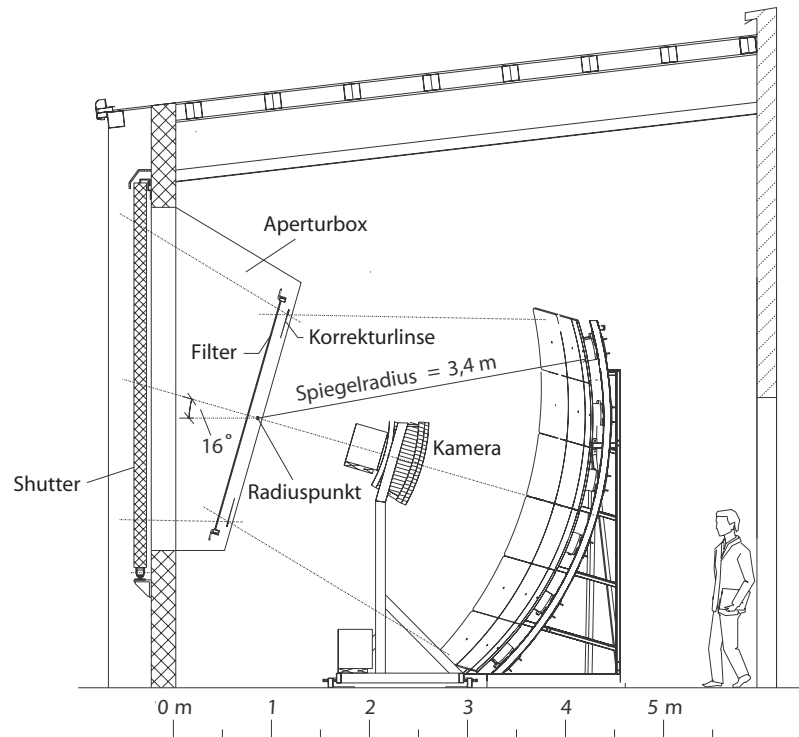


Abb. 3.6: Skizze eines Fluoreszenzteleskopes.

bedampft werden. In der Fokalebene der Spiegel befindet sich eine Pixelkamera mit  $20 \times 22$  Photomultipliern. Sphärische Spiegel sind symmetrisch bezüglich ihres Radiuspunktes und bündeln parallel eintreffendes Licht auf einen Punkt endlicher Ausdehnung, was sich geometriebedingt nicht vermeiden lässt. Die verspiegelte Innenseite einer Kugel vereinigt nicht alle Strahlen in einem Punkt, sondern in einem Fleck (*Spot*), dessen Ausdehnung vom maximalen Abstand der Strahlen zum Hauptstrahl abhängt. Dieser Effekt wird als *sphärische Aberration* bezeichnet. Der Hauptstrahl ist derjenige, der in der jeweiligen Richtung durch den Radiuspunkt geht. Der maximale Abstand der Strahlen zum Hauptstrahl ist normalerweise durch die Spiegelabmessungen vorgegeben. Der Spot darf allerdings eine gewisse Ausdehnung nicht überschreiten, welche durch die Pixelgröße der Kamera vorgegeben wird. Angestrebt wird eine Spotgröße, die einem Drittel der Pixelgröße entspricht. Die Öffnung vor dem Spiegel muss daher durch eine sog. Aperturblende begrenzt werden. Von der so vorgegebenen Aperturfläche hängt die Lichtausbeute in den Photomultipliern der Kamera ab sowie das Verhältnis von Signal zu Untergrund.

Bei den für die Auger-Teleskope gewählten Spiegelabmessungen wäre eine Beobachtung des Fluoreszenzlichtes normalerweise nur in mondlosen Nächten möglich. Um auch in Nächten mit schwachem Streulicht noch messen zu können (d.h. das

Signal vom Untergrund trennen zu können), muss man die Aperturfläche vergrößern, was jedoch auch eine Erhöhung der sphärischen Aberration zur Folge hätte und mit einer Vergrößerung des Spots einhergehen würde. Dies wird durch den Einsatz einer ringförmigen Korrekturlinse unterdrückt, welche die weit vom Hauptstrahl entfernten Strahlen nach außen ablenkt und sie auf den von den inneren Strahlen vorgegebenen Spot abbildet (siehe Abb. 3.7). Man erreicht damit eine Vergrößerung der Aperturfläche ohne vergrößerte sphärische Aberration. Eine solche Anordnung wird nach ihrem Erfinder *Schmidt-Optik* genannt.

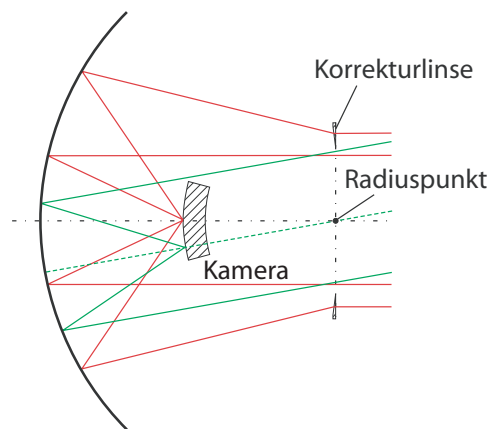


Abb. 3.7: Strahlengang bei der Schmidt-Optik [Waldenmaier01].

Der Untergrund beträgt am Standort des Auger-Experimentes in klaren, mondlosen Nächten ca.  $40 \text{ Photonen}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{s})$ , was durch den UV-Filter vor dem Teleskop auf ca.  $27 \text{ Photonen}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{s})$  verringert wird [Argirò2000]. Er entsteht hauptsächlich durch gestreutes Sternenlicht, diffuse Strahlung aus der Galaxie und Licht aus angrenzenden Gemeinden. Um eine Richtungsrekonstruktion des Schauers durchführen zu können, muss das Signal deutlich vom Untergrund zu trennen sein. Das Signal zu Untergrund-Verhältnis ist proportional zur Wurzel der Spiegelfläche (bzw. zur Wurzel der Aperturfläche), daher kann man durch eine Vergrößerung dieser Fläche ein besseres Signal erhalten. Für die Anforderungen des Auger-Experiments haben sich somit folgende Abmessungen für das Teleskop ergeben:

- Spiegelfläche  $\approx 12 \text{ m}^2$
- Spiegelradius = 3,4 m
- Aperturfläche =  $3,8 \text{ m}^2$ , d.h. Aperturradius (mit Korrekturlinse) = 1,1 m

Für detailliertere Informationen bzgl. der Spiegeloptik siehe [Waldenmaier01].



### 3.2.4 Kamera

Die Kamera in der Brennsphäre des Spiegels ist aus 440 Photomultipliern (PMTs) zusammengesetzt, jeweils 20 in horizontaler und 22 in vertikaler Richtung (siehe Abb. 3.8). Die PMTs haben eine hexagonale Form und bilden eine sphärische Oberfläche, die mit einem Radius von 1743 mm den Abbildungseigenschaften des Spiegels angepasst ist. Um zu verhindern, dass die PMTs an ihren Rändern blind sind, werden dort sog. *Mercedes-Sterne* angebracht. Dies sind aluminiumbeschichtete Kunststoffreflektoren, deren drei Arme einen dreieckigen Querschnitt besitzen und in einem Winkel von  $120^\circ$  zueinander angebracht sind. Sie reflektieren das am Rand eintreffende Fluoreszenzlicht in die Photomultiplier, sodass man von Pixel zu Pixel einen glatten Übergang hat.

Die Photomultiplier der Kamera können durch eine zu hohe Lichtintensität leicht zerstört werden. Zum einen unterliegen die Photokathoden in den Photomultipliern einem Alterungsprozess, da das Kathodenmaterial mit der Zeit abnimmt, und zwar umso schneller, je mehr Photoelektronen dort ausgelöst werden. Trifft nun z.B. von den Spiegeln gebündeltes Sonnenlicht auf sich im Betrieb befindliche Photomultiplier, so altern diese in einem sehr kurzen Zeitraum, d.h. die Photokathode verdampft fast komplett und die Photomultiplier lassen sich nicht mehr verwenden. Zum anderen besteht die Gefahr eines „Brennglaseffektes“: Falls Sonnenlicht in die Bays eintritt, so wird es von den Spiegeln auf die Kamera gebündelt. Die dabei entstehende Hitze auf der Oberfläche der Kamera kann die Photomultiplier zum Schmelzen bringen. Aus diesen Gründen kommt den Photomultipliern der Kamera beim Aufbau des Slow Control Systems besondere Aufmerksamkeit zu.

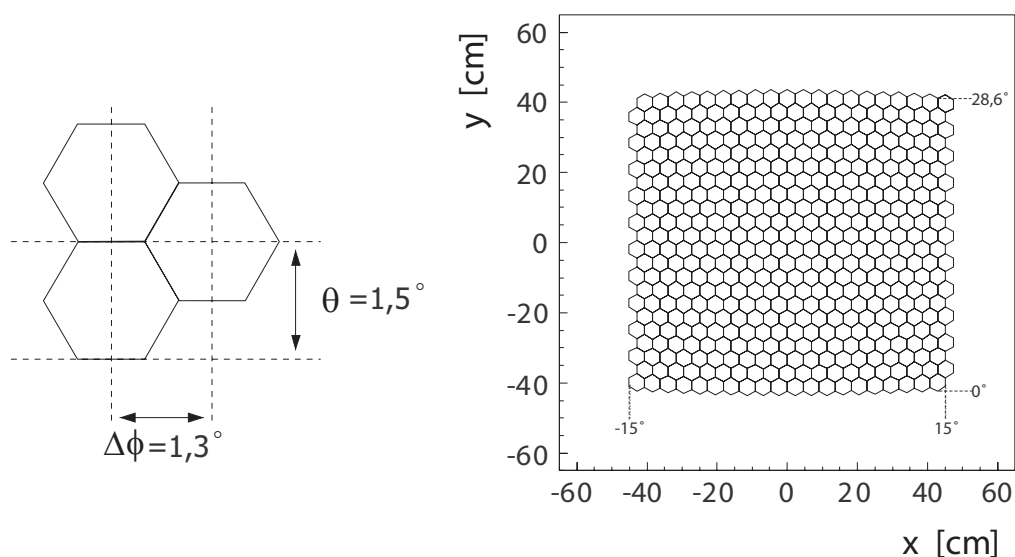


Abb. 3.8: Die Pixelmatrix der PMT-Kamera [Argirò2000].

In den Kameras werden mittels Flash-ADCs die Pulshöhen der einzelnen Pixel gemessen. Abb. 3.9 zeigt ein Ereignis im Event-Display des Auger-Experimentes. Links oben sieht man die Spur in den Pixeln der Kamera bzw. in denjenigen Flash-ADCs, deren Triggerbedingung erfüllt ist. Die einzelnen Pixel lassen sich markieren, rechts oben wird dann die Pulsform der markierten Pixel angezeigt. In diesem Bild lässt sich dann auch erkennen, in welcher zeitlichen Reihenfolge die einzelnen Pixel angesprochen haben.

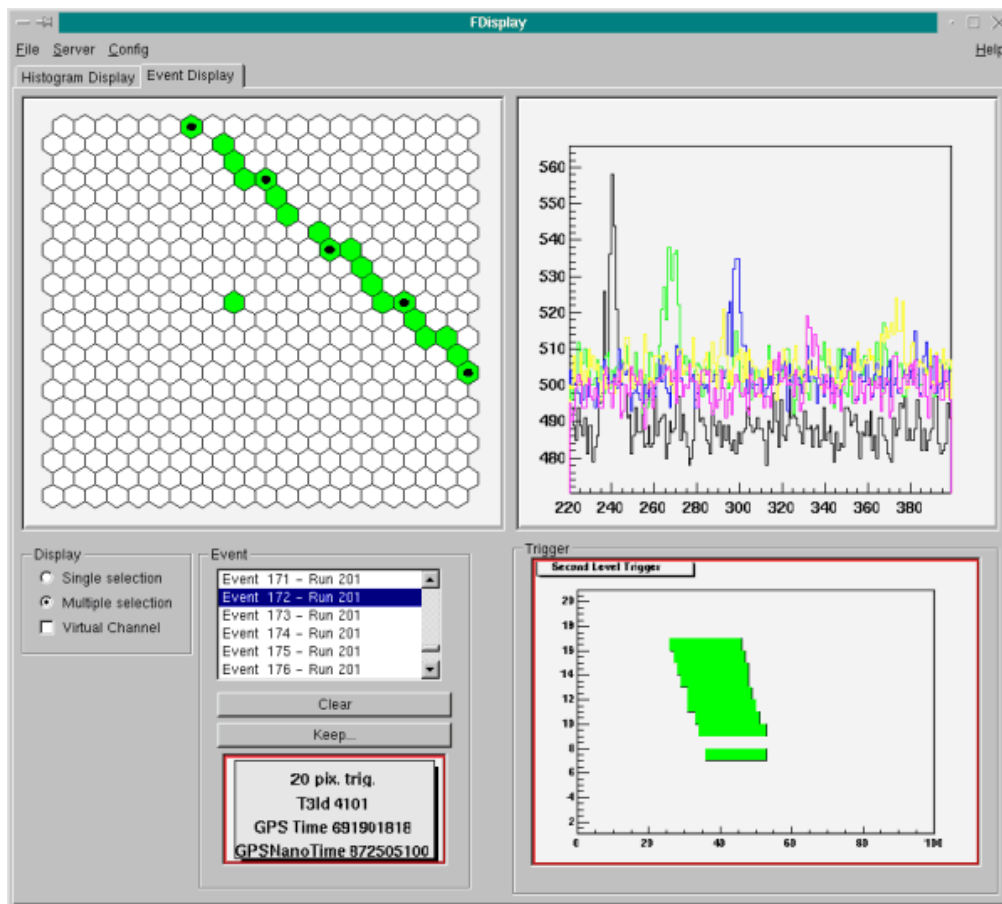


Abb. 3.9: Ereignis im Event-Display des Auger-Experimentes.

## 4 Das Slow Control System

In den folgenden Kapiteln wird das Slow Control System der Fluoreszenzdetektoren des Pierre Auger-Experimentes vorgestellt. Dabei wird näher auf die verwendete Hard- und Software eingegangen sowie auf die Anforderungen, die zur Auswahl des verwendeten Systems geführt haben. Außerdem wird das zugrundeliegende Sicherheitskonzept erläutert, welches sowohl einen optimalen Schutz der Detektoren als auch eine möglichst lange Messzeit gewährleisten soll. Ist im folgenden Kontext des Slow Control Systems vom Auger-Experiment die Rede, so sind damit nur die Fluoreszenzdetektoren gemeint, nicht das Detektorarray.

### 4.1 Einführung

Angesichts der Komplexität und des daraus resultierenden finanziellen Aufwandes heutiger physikalischer Experimente ist es zu einer Notwendigkeit geworden, für einen stabilen und vor allem sicheren Ablauf zu sorgen. Dies ist die Aufgabe von sogenannten Slow Control Systemen. Sie sollen die permanente Überwachung von Parametern übernehmen, die zu einer Beschädigung der Detektoren oder zu einer Beeinträchtigung oder Beeinflussung des Messbetriebes führen könnten. Dazu gehört beispielsweise die Überwachung von Temperaturen, des Gasflusses in Streamertubes oder der Spannungen von Photomultipliern. Im Bedarfsfall müssen vom Slow Control System entsprechende Maßnahmen ergriffen werden, was z.B. die automatische Abschaltung von Photomultipliern bei einer zu hohen Lichtintensität sein könnte. Eine weitere Aufgabe ist es, jederzeit über den aktuellen (Fehler-)Status des Experimentes informiert zu sein und diese Informationen den Komponenten zur Verfügung zu stellen, die davon betroffen sind. Zusätzlich müssen diese Informationen für den Operator visualisiert werden und es müssen von diesem Anweisungen entgegengenommen werden können, um die Ausfallzeit bei einem Fehler möglichst gering zu halten.

Der Name *Slow Control* rührt daher, dass sich die überwachten Parameter zeitlich nur langsam ändern, d.h. langsam im Vergleich zur Datenerfassung. Die kürzeste Zeit zwischen zwei Wertabfragen liegt beim hier verwendeten System im Bereich von Millisekunden.

Slow Control Systeme sind im allgemeinen so konzipiert, dass sie eine übergeordnete Kontrollinstanz bilden. Das bedeutet unter anderem, dass sie als erste gestartet und als letzte beendet werden, damit eine vollständige Überwachung gewährleistet ist. Um ihrer Aufgabe eines sicheren und stabilen Experimentbetriebes gerecht werden zu können, müssen Slow Control Systeme „das letzte Wort“ haben: Bei Befehlen vom Operator oder von bestimmten Komponenten (z.B. der Datenerfassung) sind **sie** es, die im Rahmen der festgelegten Sicherheitsbedingungen entscheiden müssen, ob diese Befehle zum gegenwärtigen Zeitpunkt ausführbar sind oder nicht.

Die Messzeit („duty cycle“) der Fluoreszenzdetektoren bei Auger ist alleine schon dadurch begrenzt, dass nur nachts gemessen werden kann, und selbst nachts ist eine Messung nicht immer möglich, weil das Licht des Mondes an vielen Tagen zu hell ist, um noch Fluoreszenzmessungen zu erlauben. Die effektive Messzeit der Fluoreszenzdetektoren beträgt durch diese Beeinträchtigungen ca. 10%. Obwohl der Schutz der Teleskope oberste Priorität besitzt, darf je nach Art eines auftretenden Fehlers nicht zu restriktiv vorgegangen werden, da man die Messzeit nach Möglichkeit nicht noch zusätzlich einschränken möchte. Es muss also softwareseitig festgelegt werden, wie im jeweiligen Fehlerfall angemessen zu reagieren ist. Das Problem dabei ist, dass das gesamte Spektrum der möglichen auftretenden Fehler im Vorhinein meist nur unvollständig erfasst werden kann. Daher wurde im Rahmen dieser Diplomarbeit ein möglichst detailgetreues Hardware-Modell aufgebaut (siehe Kap. 5), um vorhergesehene Fehler simulieren und unvorhergesehene Fehler erkennen zu können, damit im wirklichen Experiment richtig reagiert werden kann. Dies bezieht sich nicht nur auf Hardware-Defekte, sondern auch auf die Entwicklung der Steuerungssoftware, die an diesem Testsystem gefahrlos ausprobiert werden kann.

## 4.2 Anforderungen

Vor der Entscheidung, ob für das Slow Control System des Auger-Experimentes ein kommerzielles Produkt, eine Modifikation eines bereits existierenden Slow Control Systems eines anderen Experimentes oder selbst entworfene Hard- und Software am geeignetsten ist, mussten zunächst die Anforderungen an das System formuliert werden. Diese sind:

### 1. Einfachheit

Ein möglichst einfacher Aufbau macht es leichter, den Gesamtüberblick über die Slow Control und die einzelnen Teile der Detektorgebäude zu bewahren. Außerdem fällt dadurch die Einarbeitung in das System leichter, das Know-How zur Bedienung und Wartung lässt sich relativ einfach weitergeben.

### 2. Stabilität

Das System muss in der Lage sein, über Jahre hinweg und ohne größere Wartungsarbeiten zu funktionieren. Während des Betriebes darf es sich nicht „aus dem Tritt“ bringen lassen, da sonst die Detektoren gefährdet werden, die Datenerfassung nicht möglich ist oder die erfassten Daten möglicherweise unbrauchbar werden.

### 3. Flexibilität

Bei dem mehrjährigen Entwicklungsprozess eines Experimentes kann sich das Design im Laufe der Zeit verändern, beispielsweise durch die Einführung zusätzlicher oder aktuellerer Komponenten. Daher können sich auch die Bedürfnisse an das Slow Control System mehr oder weniger kurzfristig ändern, weshalb es ohne großen Aufwand anpassbar bzw. erweiterbar sein muss.

### 4. Fernsteuerbarkeit

Aufgrund der Entfernung der vier Detektorgebäude voneinander entstand der Wunsch nach einer Möglichkeit zur Fernsteuerung des kompletten Systems. Vor Ort soll das Experiment weitestgehend selbständig arbeiten. Der Status aller Teleskope sowie der sonstigen Parameter muss jederzeit aus der Ferne abrufbar sein. Außerdem müssen Kommandos zur Fernsteuerung des Experimentes entgegenommen werden können.

### 5. Kommunikation

Die geplante Fernsteuerung macht es notwendig, dass die vier Detektorgebäude mit einer Zentralstation kommunizieren können, dem sog. *Central Campus* in Malargüe, wo die Steuerung der vier Stationen unter einer grafischen Benutzeroberfläche zusammengefasst werden können muss. Außerdem muss das System eine standardisierte Schnittstelle zur Verfügung stellen, über die z.B. die Kommunikation mit der Datenaufnahme oder mit Komponenten ermöglicht wird, die nicht direkt an das Slow Control System angeschlossen werden können.

### 6. Kosten und ‚Manpower‘

Die Kosten für das Slow Control System sollten in einer sinnvollen Relation zu denen der zu schützenden Hardware stehen. Zu diesen Kosten zählt auch die Anzahl der Personen, die zur Entwicklung des Systems und zur Aufrechterhaltung des Betriebes erforderlich sind, was ein weiteres Argument dafür ist, das System so einfach wie möglich zu halten.

Diese Anforderungen führten letztendlich zu einem kommerziellen System aus industriellen Komponenten, einem sog. *PROFIBUS-System* (**PRO**cessing **FI**eld **BUS**), dessen Ansteuerung und Programmierung mit einer ebenfalls kommerziellen Entwicklungsumgebung vorgenommen wird. Mehr Informationen hierzu finden sich in den folgenden Kapiteln.

## 4.3 Hardware

### 4.3.1 Allgemeines über PROFIBUS

PROFIBUS ist ein Feldbus-Kommunikationssystem, das vor 15 Jahren als Initiative deutscher Automatisierungs-Hersteller ins Leben gerufen wurde. War es ursprünglich unter der Bezeichnung PROFIBUS FMS (Fieldbus Message Specification) zur Vernetzung von Steuerungen konzipiert, so folgte bald die Variante PROFIBUS DP (Decentralized Peripherals), die es ermöglichte, Steuerungen mit dezentraler Peripherie (z.B. Eingabe-/Ausgabe-Baugruppen) zu verbinden. Unter dem Begriff „DP/V1“ wurde das DP-Protokoll um einen azyklischen Datenaustausch und ein Alarmmodell erweitert [Profibus02].

Die PROFIBUS-Protokolle sind in internationalen Normen (IEC 61158 und IEC 61784) festgelegt. Damit wird eine herstellerunabhängige Kommunikation von Geräten garantiert, die dieser Norm entsprechen.

In Europa ist PROFIBUS das am weitesten verbreitete Feldbus-System. Es wird normalerweise in industriellen Umgebungen eingesetzt, hauptsächlich in der Fertigungs- und Prozessautomatisierung. Es bietet sich aber auch für den Aufbau eines Slow Control Systems an, weil es alle in Kap. 4.2 genannten Anforderungen erfüllt.

Die Kommunikation erfolgt im Master-Slave-Verfahren mit einer Datentransferate von bis zu 12 MBit/s. Mehrere Master kommunizieren über einen sog. *Token Ring* (siehe Abb. 4.1). Bei diesem Verfahren zirkuliert ein Token (dt.: „Spielstein“) zwischen den Mastern. Der Besitz des Tokens gewährt die Erlaubnis, Daten zu übertragen. Sind gerade keine Daten zu übertragen, so wird der Token an den nächsten Master weitergegeben. Jeder Master darf den Token nur für eine gewisse Zeitspanne behalten. Dieser Mechanismus gewährleistet, dass es zu keinen Kollisionen im Netzwerk kommt. Für nähere Informationen zu Token Ring-Netzwerken siehe [Cisco].

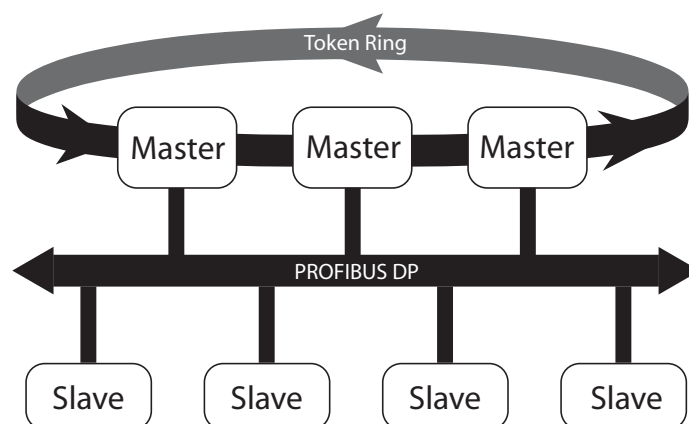


Abb. 4.1: Kommunikation bei PROFIBUS [Profibus02].

### 4.3.2 Das Beckhoff PROFIBUS-System

Das PROFIBUS-System des Auger-Experimentes wird aus Komponenten der Firma Beckhoff aufgebaut. An einen sog. *Bus-Koppler* werden hintereinander Klemmen mit verschiedenen Funktionen gesteckt. Abb. 4.2 zeigt einen solchen Bus-Koppler und eine repräsentative Klemme. Pro Bus-Koppler lassen sich maximal 64 Klemmen betreiben, die maximal mögliche Anzahl von Bus-Kopplern ist 100. Die Bus-Koppler werden untereinander und mit dem Steuerungs-PC ( $\rightarrow$  Field-PC, siehe Kap. 4.3.3) mit einem zweiadrigen PROFIBUS-Kabel seriell verbunden.

Bei den zusammengesteckten Klemmen werden intern sechs Kontakte („K-Bus“) weitergereicht, sodass ein Bussystem entsteht und sich die Klemmen später einzeln adressieren lassen. Bei Klemmen mit ähnlicher Funktionsweise greifen intern zusätzlich noch Powerkontakte ineinander. Über diese Kontakte wird die Versorgungsspannung weitergegeben. Dadurch verringert sich der Verkabelungsaufwand, da die Versorgungsspannung nur einmal angelegt werden muss. Alle Klemmen besitzen Status-LEDs, um eine Diagnose im Fehlerfall zu erleichtern (siehe Abb. 4.2).

Die beim Auger-Experiment benötigten Klemmen lassen sich in ihrer Funktionsweise in vier Gruppen unterteilen:

- **Sensor-Klemmen:** Digitale und analoge Eingabe-Klemmen.
- **Aktuator-Klemmen:** Digitale Ausgabe- und Relais-Klemmen.
- **Versorgungs-Klemmen:** Spannungswandler- und Sicherungs-Klemmen.
- **System-Klemmen:** Bus-Koppler, Unterbrechungs- und End-Klemmen.

Durch dieses Konzept eines modularen Aufbaus des PROFIBUS-Systems wird eine genaue Anpassung an die Bedürfnisse des Experimentes ermöglicht. Eine detailliertere Beschreibung dieser Anpassung folgt in Kap. 4.5.

### 4.3.3 Der Field-PC

Der Field-PC ist die zentrale Instanz des Slow Control Systems. Er basiert auf einer normalen x86-PC-Architektur und übernimmt mittels einer PROFIBUS-Schnittstelle und der entsprechenden Software (siehe Kap. 4.4.1) die Ansteuerung der eben erwähnten Klemmen. Der Field-PC besitzt keinen Prozessorlüfter, der in jedem normalen PC ein Verschleißteil darstellt. Stattdessen ist die gesamte Oberseite des Gehäuses mit Kühlrippen versehen und direkt auf den Prozessor geschraubt. Beim Netzteil kommt ebenfalls eine passive Kühlung zum Einsatz, sodass auch kein Gehäuselüfter verwendet werden muss. Der Betrieb ohne Kühler macht es möglich, ein staubdichtes Gehäuse zu verwenden. Der Field-PC ist also ein sehr wartungsarmes Gerät, das für einen sehr langen und stabilen Betrieb ausgelegt ist.

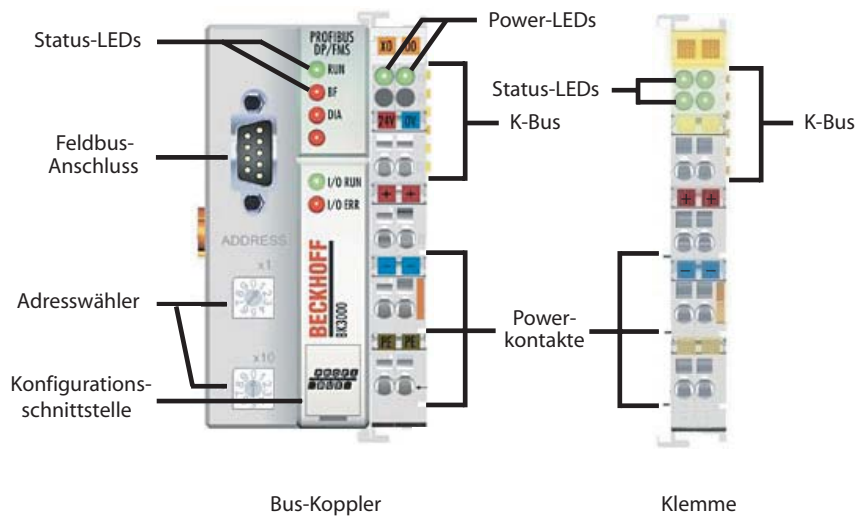


Abb. 4.2: Aufsicht auf einen Bus-Koppler und eine typische Busklemme von Beckhoff.

Auch softwareseitig wurde auf Überflüssiges verzichtet, es läuft nur das auf das notwendige Minimum beschränkte Betriebssystem (Windows NT 4.0) und die Software, die für das Slow Control System benötigt wird (siehe Kap. 4.4). Einzige Zusatzsoftware ist ein VNC<sup>3</sup>-Server, der eine Fernsteuerung des PCs über TCP/IP ermöglicht. Ein Betrieb mit Tastatur und Monitor ist durch vorhandene Schnittstellen zwar möglich, konzeptionell allerdings nicht vorgesehen. Der Field-PC soll - einmal fertig verkabelt und im Gebäude montiert - seinen Dienst ohne weitere Benutzerinterventionen verrichten. Sollten doch einmal Konfigurationsänderungen vonnöten sein, so lassen sich diese über das Netzwerk vornehmen.

## 4.4 Software

### 4.4.1 4Control

Das von der Firma Softing vertriebene Software-Paket *4Control* ist eine Entwicklungsumgebung zur Programmierung des PROFIBUS-Systems. Das „4C“ im Namen steht dabei für *Configuration*, *Control*, *Console* und *Connectivity*. Diese Software wird sowohl auf einem Entwicklungsrechner als auch auf dem Field-PC verwendet. Die jeweils aktuelle Version des entwickelten Steuerungsprogramms wird auf den Field-PC übertragen, der an das PROFIBUS-System angekoppelt ist. 4Control übernimmt neben der PROFIBUS-Steuerung auch die Visualisierung des Experiment-Status für den Benutzer und die Kommunikation mit anderen Experimentteilen über eine standardisierte Software-Schnittstelle (→ OPC, siehe Kap. 4.4.2).

<sup>3</sup>VNC: Virtual Network Computing



#### 4.4.1.1 Überblick

4Control unterscheidet zwischen Programmen, Funktionsblöcken und Funktionen. Die Hierarchie erfolgt in genau dieser Reihenfolge: Innerhalb von Programmen lassen sich Funktionsblöcke und Funktionen aufrufen, in Funktionsblöcken nur Funktionen. Der Unterschied zwischen den beiden letzteren besteht darin, dass sich Funktionsblöcke in Programmen instanziierten lassen und ihre Werte behalten, sofern man sie nicht explizit ändert. Funktionen hingegen werden lediglich aufgerufen und liefern Werte zurück, die dann weiterverwendet werden können.

Programme lassen sich in sog. *Tasks* zusammenfassen. Diesen Tasks wird ein Wert mitgegeben, wie oft sie ausgeführt werden sollen. Die niedrigste Zykluszeit beträgt dabei 10 ms. Außerdem lässt man mit acht Prioritätsstufen festlegen, wie wichtig die Ausführung eines Tasks gegenüber anderen Tasks ist.

Zur Programmierung stehen drei Möglichkeiten zur Verfügung, eine textbasierte und zwei grafische. Die beiden grafischen Programmiersprachen ähneln sich sehr stark; bei der Programmierung des Slow Control Systems von Auger wird nur eine der beiden Sprachen verwendet. Diese und die textbasierte Programmiersprache werden im folgenden kurz vorgestellt.

#### 4.4.1.2 ST - Structured Text

ST lehnt sich in ihrer Syntax sehr stark an Sprachen wie Fortran oder Pascal an. Sie ist keine objektorientierte Sprache, dafür aber sehr einfach zu erlernen. Sie eignet sich gut zur „schnellen“ Programmierung, d.h. Abläufe und Abfragen sind schnell formuliert. Im Gegensatz zu den grafisch programmierten Funktionsblöcken oder Programmen werden in ST geschriebene pro Aufruf immer komplett durchlaufen, was es in einigen Fällen unverzichtbar macht, textbasiert zu programmieren. Ein Nachteil ist, dass der Quelltext schnell zur Unübersichtlichkeit neigt und größere Veränderungen dadurch schwerer von der Hand gehen als bei der grafischen Programmierung. Zur Illustration ist in Anhang A ein Beispielprogramm aus der aktuellen Slow Control Software abgedruckt, das die Überprüfung der Notfall-Stromversorgung übernehmen soll.

#### 4.4.1.3 SFC - Sequential Function Chart

Die grafische Programmierung mit SFC eignet sich in erster Linie zum Erstellen von sog. „State Machines“, bei denen die Kommandos, die erteilt werden können, vom jeweiligen Zustand abhängen, in dem sich das System befindet. In einer baumartigen Struktur lassen sich einzelne Schritte festlegen, die nacheinander durchlaufen werden und damit einen bestimmten Ablauf vorgeben. Normalerweise springt das Programm pro Aufruf einen Schritt weiter, es kann aber auch bei einem Schritt verweilen, bis z.B. eine bestimmte Bedingung erfüllt ist. Innerhalb eines Schrittes ist dabei die Ausführung mehrerer Aktionen möglich. Relativ einfach und übersichtlich

ist die Erstellung von Alternativ-Verzweigungen, die in ST einer if-then-else-Abfrage entsprechen. Auch Schleifen sind in einer sehr übersichtlichen Art und Weise programmierbar, sodass der große Vorteil bei in SFC erstellten Programmen ist, sich schnell im Quell„text“ zurechtfinden zu können. Für die Programmierung eines Slow Control Systems ist diese grafische Erstellung von Ablaufplänen sehr von Vorteil, weil sich Überlegungen der Art „Wenn es zu hell ist, soll die Hochspannung für die Photomultiplier abgeschaltet werden“ quasi direkt übersetzen lassen. Auch hier ist zur Illustration in Anhang B ein Beispiel aus der aktuellen Slow Control Software abgedruckt, das die Windgeschwindigkeit überprüfen soll.

#### 4.4.2 OPC-Server und -Client

Wie in Kap. 4.2 erwähnt, ist zur Kommunikation mit anderen Experimentteilen eine standardisierte Software-Schnittstelle erforderlich. Diese bringt 4Control in Form eines OPC-Servers und -Clients mit. OPC (OLE for Process Control) ist ein vor allem in der Automatisierungstechnik etablierter Standard. Er definiert Schnittstellen, welche die Interoperabilität zwischen Anwendungen und Kommunikationssystemen verschiedener Hersteller ermöglichen. OPC liegt das von Microsoft stammende Komponentenmodell DCOM zugrunde. Es lassen sich nicht nur Daten zwischen verschiedenen Programmen austauschen, sondern es stehen einem OPC-Client alle Daten von allen Servern des Netzwerkes zur Verfügung.

Beim Slow Control System wird dies beispielsweise dazu verwendet, um über einen auf dem Field-PC betriebenen OPC-Server die Hoch- und Niederspannungswerte der Spannungsversorgung für die Photomultiplier und die Kamera-Elektronik auszulesen sowie die entsprechenden Spannungsmodule zu steuern. Mit Hilfe von OPC lassen sich also auch Komponenten in die Überwachung bzw. Steuerung mit einbeziehen, die nicht direkt über die Aktuator-Klemmen gesteuert werden bzw. deren Sensoren-Werte nicht mit den Sensor-Klemmen des PROFIBUS-Systems ausgelesen werden können.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Kommunikation mit anderen PCs des Experimentes. Außer dem Field-PC, der mit Windows NT 4.0 betrieben wird, laufen alle anderen Rechner des Experimentes unter Linux, weshalb eine plattformunabhängige Kommunikation ermöglicht werden muss. Beispielsweise muss die Datenaufnahme mit dem Slow Control System kommunizieren können, um die Messung einzuleiten oder um Informationen über die Messbedingungen zu erhalten (siehe Abb. 4.4).

#### 4.4.3 HTTP-Server und Java-VM

Ebenfalls innerhalb von 4Control findet die Programmierung der Visualisierung des Slow Control Systems statt. Hierfür steht ein HTTP-Server zur Verfügung, der mittels Microsoft ASP (Active Server Pages) und Microsoft Java-VM (Virtual Machine) dynamische HTML-Seiten generieren kann. Über JavaScript wird der Schreib- und

Lesezugriff auf 4Control-interne Variablen per Browser ermöglicht. Mit diesen Werkzeugen, der sog. *4Console*, lässt sich also nicht nur die Visualisierung vornehmen, sondern es können über den Browser auch Benutzereingaben erfolgen. Somit kann also die komplette oder je nach Bedarf auch nur eine eingeschränkte Fernsteuerung des Experimentes ermöglicht werden.

Vorteile der 4Console sind, dass von 4Control schon bei der Programmierung von Programmen oder Funktionsblöcken automatisch die entsprechende grafische Benutzeroberfläche zur Kontrolle der Variablen und in begrenztem Umfang auch zur Steuerung erstellt wird. Diese lässt sich in einem gewissen Rahmen auch den Bedürfnissen des Experimentes anpassen, sodass mit der 4Console eine schnelle, aber sehr spartanische Benutzeroberfläche zur Verfügung gestellt wird (siehe Bild 4.3), die vor allem während der Programmentwicklung ihre Vorteile hat. Ein großer Nachteil ist jedoch, dass mit der 4Console die Kontrolle der vier Detektorgebäude nicht zusammengefasst werden kann. Pro Gebäude muss ein Browserfenster benutzt werden, worunter die Bedienerfreundlichkeit in erheblichem Maße leidet. Aus diesem Grund und weil sich die Programmierung der 4Console als zu unflexibel und zu aufwändig erwiesen hat, ist der Umstieg auf eine Linux-basierte Lösung geplant. Mittels einer kommerziellen OPC-Bibliothek kann unter Linux ein OPC-Client entworfen werden, der genau an die Bedürfnisse des Experimentes angepasst werden kann und zudem noch die Kontrolle aller vier Detektorgebäude unter **einer** grafischen Benutzeroberfläche erlaubt.

Die 4Console wird allerdings während der Programmentwicklung weiterhin eingesetzt. Abb. 4.3 zeigt ein Bild der aktuellen 4Console. Links sieht man eine Auswahl der Tasks und der verwendeten Funktionsblöcke. Weiter rechts ist die Status-Anzeige des Experimentes. In diesem Feld kann auch der Übergang zwischen den States und zwischen *auto mode* und *manual mode* initiiert werden (siehe Kap. 6.3 und 6.4). In den beiden rechten Fenstern kann dann im *manual mode* die Steuerung der Shutter und des Notfallvorhangs erfolgen. Im unteren Fenster werden aktuelle Informationen über das Experiment angezeigt.

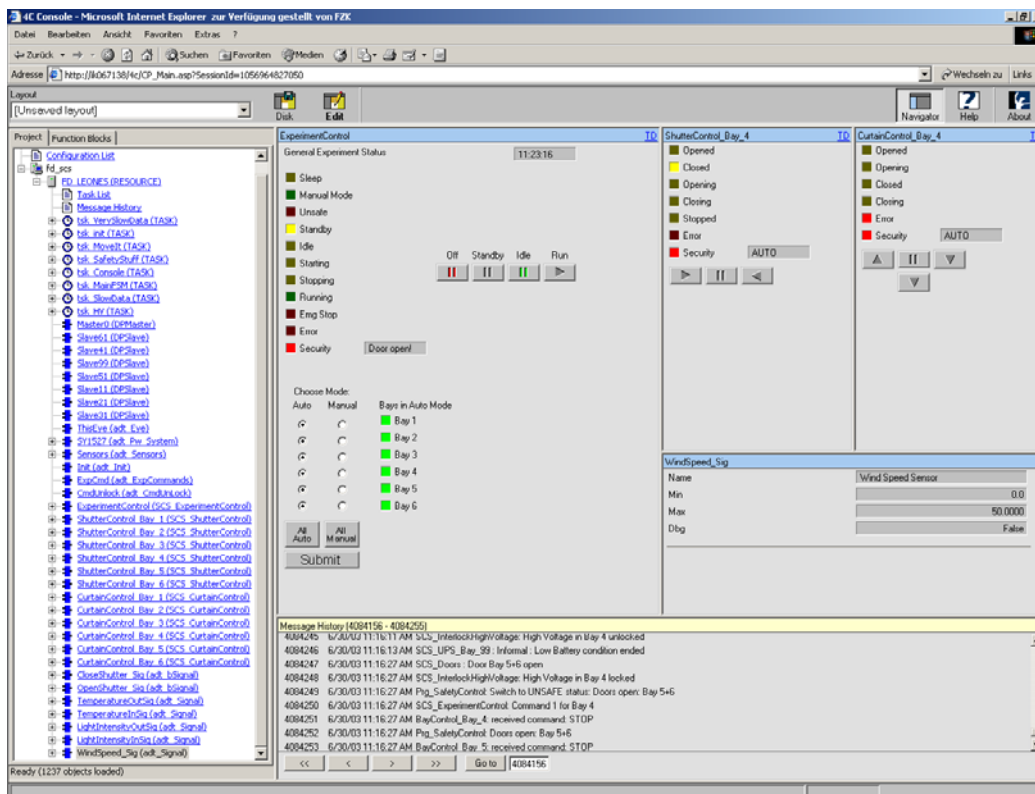


Abb. 4.3: Bild der aktuellen 4Console.

#### 4.4.4 Datenfluss

Abb. 4.4 zeigt den Datenfluss beim Auger-Experiment. Die Slow Control Systeme der vier Gebäude werden über OPC an eine zentrale grafische Benutzeroberfläche (GUI) angebunden. Ebenfalls über OPC erfolgt die Kommunikation des Slow Control Systems mit der Datenerfassung (DAQ), welche mit der grafischen Benutzeroberfläche der DAQ über TCP/IP kommuniziert. Die Protokollierung des Slow Control Systems erfolgt über Log-Dateien im XML-Format, welche über einen Samba-Server einer Datenbank zugänglich gemacht werden. Von der Slow Control GUI aus kann dann einerseits die aktuelle Situation des Experimentes angezeigt werden, andererseits kann über SQL der Zugriff auf ältere Daten in der Datenbank erfolgen.

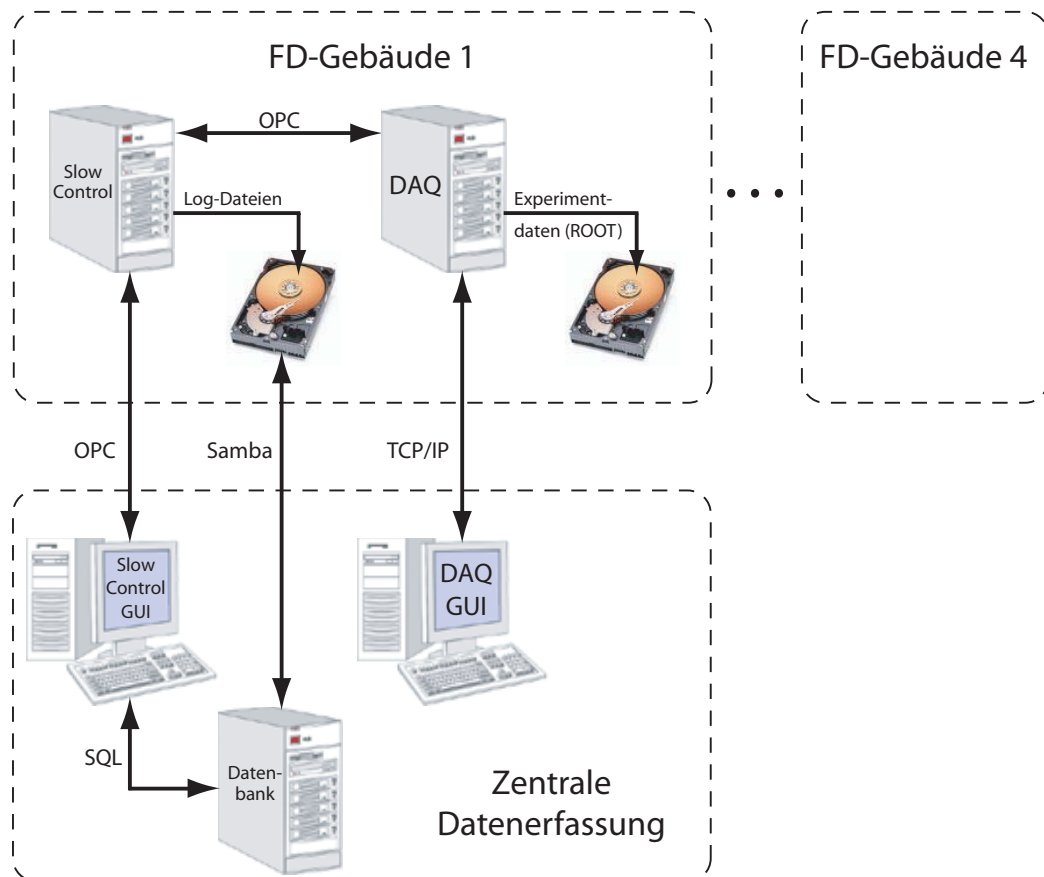


Abb. 4.4: Datenfluss beim Auger-Experiment [Wiebusch03].

## 4.5 Berücksichtigte Parameter

Im folgenden wird erläutert, welche Hardware sich im Detektorgebäude der Fluoreszenzteleskope befindet und welche Parameter vom Slow Control System überwacht oder gesteuert werden. Dabei wird näher auf den Zweck der vorhandenen Hardware eingegangen bzw. aus welchem Grund die genannten Parameter vom Slow Control System berücksichtigt werden müssen.

Das PROFIBUS-System wurde beim Zusammenstecken der Klemmen so eingeteilt, dass folgende Parameter unterschieden werden:

- Parameter, die in allen sechs Bays identisch sind und deren Steuerung oder Überwachung für jede Bay separat erfolgt.
- Parameter, deren Steuerung und Überwachung für alle sechs Bays zusammen bzw. einmal pro Gebäude erfolgen kann.

Pro Gebäude gibt es also sieben Klemmen-Anordnungen: sechs identische ( $\rightarrow$  „Bay 1-6“) und eine für das gesamte Gebäude ( $\rightarrow$  „Zentrale Bay“). Letztere findet sich im Zentralraum, wo auch der Field-PC und der sog. *Eye-PC* untergebracht sind, bei dem die erfassten Daten der einzelnen Bays zusammenlaufen. Für einen Gesamtüberblick der überwachten und gesteuerten Größen siehe Abb. 4.5.

### 4.5.1 Zentrale Bay

#### 4.5.1.1 Sensoren

##### 1. Helligkeit außen

Eine zu hohe Lichtintensität ist aus den in Kap. 3.2.4 genannten Gründen besonders gefährlich für die Photomultiplier der Kamera, daher sind die äußeren Helligkeits-Sensoren in doppelter Ausführung vorhanden.

Die Helligkeitsmessung außerhalb des Gebäudes erfolgt durch Photodioden, vor denen eine Selbsttest-LED angebracht ist, mit der zu Beginn einer jeden Messung die Funktionstüchtigkeit der Lichtsensoren überprüft werden soll. Sie sind in einem durchsichtigen, wetterfesten Gehäuse untergebracht und liefern ihr Signal in Form einer variablen Spannung an eine analoge Eingangsklemme.

##### 2. Wind

Die Windgeschwindigkeit muss gemessen werden, weil der UV-Filter vor dem Teleskop eine große Angriffsfläche bietet und er bei zu viel Wind zerstört werden könnte. Außerdem kann Wind Schmutz- und Staubpartikel mit sich führen. Sind die UV-Filter diesem Schmutz längere Zeit ausgesetzt, so führt dies zu einer drastischen Herabsetzung der Lichtausbeute der Teleskope.

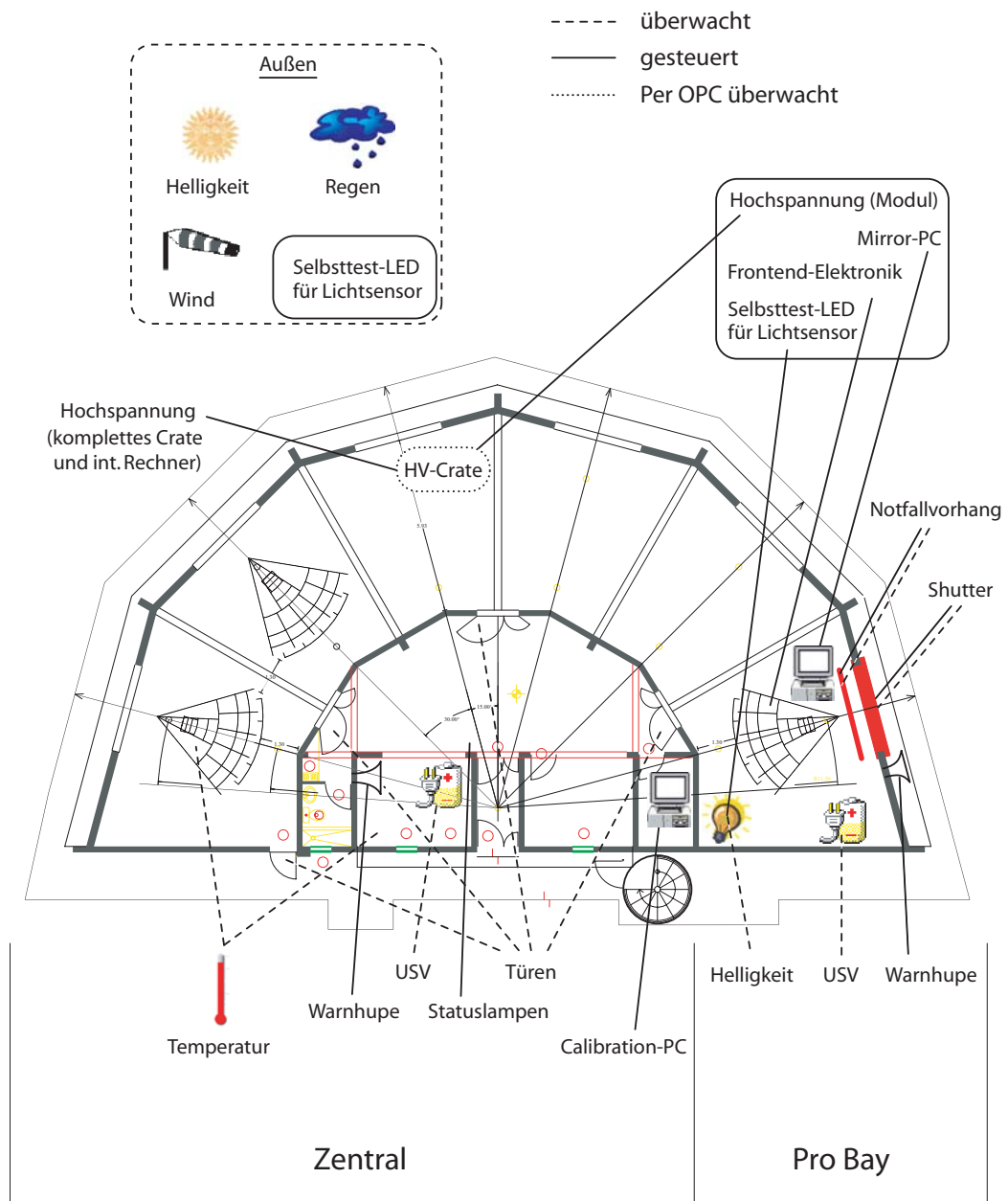


Abb. 4.5: Übersicht der überwachten und gesteuerten Parameter.

Der verwendete Windsensor der Firma „Thies Clima“ besteht aus einem kugelgelagerten Schalenstern, an dessen drei Armen Halbkugeln angebracht sind. Er wird auf dem Dach des Detektorgebäudes montiert. Das Gehäuse des Windsensors ist mit einer Heizung ausgestattet, um ein Einfrieren im Winter zu vermeiden. Das Signal wird an einer analogen Stromeingangsklemme gemessen. Die Werte liegen im Bereich von 4-20 mA, was Windgeschwindigkeiten von 0-50 m/s entspricht. Da bei Windstille immer noch ein Reststrom von 4 mA fließt, wird ein Ausfall des Detektors von der Slow Control sofort bemerkt.

### 3. Regen

Die Regenmessung findet statt, weil Regen ebenfalls die UV-Filter auf Dauer verschmutzen kann. Außerdem kann er die Sichtweite der Teleskope stark einschränken und damit die Fluoreszenzlichtmessung unmöglich machen. Bei der Auswertung der Messdaten kann es unter Umständen sinnvoll sein, zu wissen, ob es zu einem bestimmten Zeitpunkt geregnet hat und sich dadurch die Messwerte verändert haben.

Der Regensensor, welcher ebenfalls von der Firma „Thies Clima“ gefertigt wurde, hat ein U-förmiges Gehäuse, in dessen beiden Armen eine Infrarot-Lichtschranke untergebracht ist. Mit dieser Lichtschranke werden die zwischen den Armen durchfallenden Tropfen gezählt. Bei einer bestimmten Tropfenrate, die zuvor eingestellt werden kann, wird ein Relais betätigt, dessen Ausgang mit einer digitalen Eingangsklemme des PROFIBUS-Systems verbunden ist.

### 4. Temperatur

Die Temperatur wird von Sensoren des Typs PT100 gemessen, die ihr Signal direkt in speziell dafür vorgesehene Busklemmen einspeisen. Welche Temperaturen gemessen werden, steht zur Zeit noch nicht genau fest. Denkbar ist eine Temperaturüberwachung des Zentralraums und der Bays, die mit Klimaanlage ausgestattet sind, um Temperatureffekte in der Elektronik zu vermeiden. Da die Klimaanlage derzeit nicht direkt überwacht werden, kann dies mit Sensoren in den Räumen geschehen. Zusätzlich oder alternativ dazu kann auch eine direkte Überwachung der Temperatur in den Elektronik-Racks erfolgen.

### 5. Türen

Zu den Bays kann man durch insgesamt vier Türen gelangen. Drei befinden sich jeweils am Übergang zwischen zwei Bays, die vierte ist der Notausgang in Bay 6. Ob diese Türen offen oder geschlossen sind, wird für das Slow Control System mittels induktiver Sensoren am Türrahmen festgestellt. Bei diesen wird ein Stromkreis geschlossen, sobald die Tür ins Schloss fällt. Die Sensoren werden wie schon beim Regensensor an eine digitale Eingangsklemme angeschlossen.



Die Überwachung der Türen ist deshalb nötig, da ein Messbetrieb in Anwesenheit von Personen sicherheitstechnisch nicht möglich sein wird, weil das plötzliche Herunterfallen des Notfallvorhangs zu Verletzungen führen kann und das in die Bays eintretende Streulicht aus anderen Räumen den Messbetrieb empfindlich stören würde.

#### 6. USV (Unterbrechungsfreie Strom-Versorgung)

Insgesamt befinden sich sieben USV-Geräte im Detektorgebäude: eines in jeder Bay sowie eines im Zentralraum. Vom Slow Control System wird mittels einer digitalen Eingangsklemme überprüft, ob die Stromversorgung ausgefallen ist und die USV benötigt wird. Außerdem wird überprüft, ob der Batteriestand des USV-Gerätes ober- oder unterhalb eines bestimmten Schwellenwertes liegt.

Die Notfall-Stromversorgung dient dazu, um die PCs (Field-PC, Eye-PC), das Netzwerk (Router, Switches etc.) und den PROFIBUS bei einem Stromausfall zu sichern. Das Sichern der PCs gewährleistet unter anderem die Fortführung der Steuerung und der Überwachung und gewährt die Möglichkeit, dem Aufsichtspersonal über den Stromausfall Mitteilung zu geben. Außerdem kann so dem Experiment genügend Zeit gegeben werden, um vom Slow Control System in einen sicheren Zustand gebracht werden zu können. Dazu gehört beispielsweise das Schließen der Shutter, was ohne Strom nicht möglich ist.

#### 4.5.1.2 Aktuatoren

##### 1. Hochspannungs-Crate

Die Spannungsversorgung der Photomultiplier übernimmt ein HV-Crate von CAEN, in welches sich Hoch- und Niederspannungsmodule einsetzen lassen. Es kann über das Anlegen von Steuerspannungen, die von Relais-Klemmen des PROFIBUS-Systems geschaltet werden, an- oder abgeschaltet werden. Auch ein Neustart des Crate-internen Rechners und ein Interlock<sup>4</sup> des Crates ist auf diese Weise möglich. Mit Hilfe des auf dem Crate integrierten Rechners kann ein auf dem Field-PC betriebener OPC-Server auf Variablen zugreifen, die dem Slow Control System die Überwachung der Spannungen und auch anderer relevanter Größen ermöglichen. Näheres dazu findet sich in Kap. 4.5.3.

Die schnelle Abschaltung des kompletten Crates ist beispielsweise bei einer zu hohen Lichtintensität notwendig, damit die Photomultiplier keinen Schaden nehmen. Ein Neustart des Crate-internen PCs kann im laufenden Betrieb erfolgen, ohne dass die Spannungen dafür heruntergefahren werden müssen. Dies ist z.B. erforderlich, falls der OPC-Server nicht mehr reagiert und keine Auskünfte mehr über die Spannungen erteilt.

---

<sup>4</sup>Interlock: Abschalten der Spannungen im Crate, ohne das Crate selbst auszuschalten

## 2. Calibration-PC

Vor der Messung muss eine Kalibrierung der Photomultiplier der Kamera durchgeführt werden. Dies ist die Aufgabe des Calibration-PCs, der mehrere Lichtquellen mit vorschaltbaren Filtern steuert, welche wie der Calibration-PC selbst in einem Nebenraum untergebracht sind. Diese Lichtquellen strahlen in Lichtleiter, die direkt vor die Kamera führen und so eine Kalibrierung der Photomultiplier ermöglichen.

Der PC wird über eine Relais-Klemme des PROFIBUS mit seiner Betriebsspannung versorgt. Das BIOS des Calibration-PCs ist so konfiguriert, dass er nach dem Anlegen der Betriebsspannung automatisch bootet und den Betrieb aufnimmt. Gesteuert wird er von der Datenaufnahme, die im Normalfall auch das Herunterfahren des Rechners veranlasst. Über die Relais-Klemme kann der Calibration-PC vom Slow Control System ebenfalls an- oder abgeschaltet werden, falls er auf die Anweisungen der Datenaufnahme nicht mehr reagieren sollte.

## 3. Selbsttest-LED für den Lichtsensor

Wie bereits erwähnt sind die Lichtsensoren mit einer Selbsttest-LED ausgestattet, welche über eine digitale Ausgangsklemme ein- und ausgeschaltet werden kann. Zu Beginn einer jeden Messung muss gewährleistet werden, dass die Lichtsensoren noch funktionieren. Dazu werden sie von der LED kurz mit Licht bestrahlt. Falls dabei kein Signal zurückkommt, kann das Experiment nicht gestartet werden.

## 4. Status-Lampen

Die Status-Lampen befinden an einer Wand außerhalb des Zentralraumes und sollen mittels unterschiedlicher Farben eine schnelle Information über den generellen Status des Experimentes oder bestimmter Teile davon ermöglichen. Insbesondere sollen sie im Vorraum befindlichen Personen mitteilen, ob die Bays betreten werden dürfen oder ob gerade eine Messung stattfindet.

## 5. Warnhupe

Mit der Warnhupe kann generell auf Fehler während des Betriebes aufmerksam gemacht werden. Außerdem soll sie bei Messungen den Benutzer im Zentralraum über Aktivitäten von Shattern oder Notfallvorhängen informieren, da dieser die Bewegungen in den Bays sonst evtl. nicht bemerken würde.

## 4.5.2 Bay 1-6

### 4.5.2.1 Sensoren

#### 1. Helligkeit innen

Auch innerhalb des Gebäudes werden Lichtsensoren eingesetzt. Sie sollen die Photomultiplier vor Licht aus dem Inneren des Gebäudes schützen. Auch sollen sie der Datenerfassung Auskunft darüber geben, ob während der Datenaufnahme bei einem oder mehreren Teleskopen eine Beeinträchtigung der Messung durch Streulicht stattgefunden hat.

Teilweise müssen außerhalb des Messbetriebes Hochspannungs-Kalibrationen durchgeführt werden, die auch tagsüber stattfinden können. In solchen Fällen muss das Einschalten des HV-Crates möglich sein, auch wenn die Lichtsensoren außerhalb des Gebäudes eine zu hohe Lichtintensität anzeigen. Die Lichtsensoren in jeder Bay machen es möglich, sicherzustellen, dass es in den Bays dunkel ist und die Hochspannung gefahrlos eingeschaltet werden kann.

#### 2. USV

Genau wie der Zentralraum ist auch jede Bay mit einem USV-Gerät ausgestattet. Auch hier wird vom Slow Control System überwacht, ob die normale Stromversorgung über das Netz noch verfügbar ist oder ob die USV benötigt wird.

Die Hauptaufgabe der USV in den Bays ist es, bei einem Stromausfall die Spannung zum Schließen der Shutter zur Verfügung zu stellen. Außerdem versorgen sie wie schon in der zentralen Bay die PCs (Mirror-PCs), das Netzwerk und den PROFIBUS mit Strom, damit diese noch für eine gewisse Zeit betriebsbereit bleiben.

#### 3. Shutter (Status)

Vor jeder Bay sind am Gebäude zwei Schiebetüren zum Schutz der Teleskope angebracht. Dies sind die sog. *Shutter*. Sie sollen sich nur während der Messung öffnen und sich sofort schließen, falls eine Gefährdung der Teleskope vorliegt.

Jeder Shutter ist mit zwei induktiven Sensoren ausgestattet, welcher der Slow Control die Abfrage erlaubt, ob der Shutter geöffnet oder geschlossen ist.

#### 4. Notfallvorhang (Status)

Direkt vor jedem Teleskop ist ein Notfallvorhang aufgehängt, welcher wiederum den Zweck hat, die Photomultiplier vor zu viel Licht zu schützen. Da die Shutter bei einem schnellen Helligkeitswechsel zu langsam sind, um die Photomultiplier wirkungsvoll zu schützen, soll dieser Vorhang innerhalb von weniger

als einer Sekunde herunterfallen und damit verhindern, dass der Spiegel das Licht auf die Kamera bündelt. Der Vorhang ist so verkabelt, dass er beim Ausfall der Stromversorgung (d.h. Netzausfall *und* Versagen der USV) nach unten fällt, sodass durch ihn ein Schutz der Teleskope auch bei einem totalen Versagen des Sicherheitssystems gewährleistet ist.

Die Notfallvorhänge sind mit Schaltern ausgestattet, die über den Status des Vorhangs Auskunft geben.

#### 4.5.2.2 Aktuatoren

##### 1. Shutter

Die Elektromotoren zum Bewegen der Shutter sind an Schalter-Klemmen des PROFIBUS angeschlossen. Durch eine entsprechende Verschaltung wird sichergestellt, dass nicht gleichzeitig die Signale zum Öffnen und Schließen des Shutters angelegt werden können, falls dies durch einen Software-Fehler versehentlich vorkommen sollte.

##### 2. Notfallvorhang

Die Verschaltung der Notfallvorhänge ist im Prinzip dieselbe wie bei den Shuttern. Zusätzlich wird allerdings noch durch eine digitale Ausgangsklemme ein Elektromagnet geschaltet, der wenn nötig den Elektromotor am Vorhang abkuppelt, sodass dieser schnell nach unten fällt. Anschließend lässt sich das Getriebe wieder ankoppeln, um den Vorhang nach oben zu fahren.

##### 3. Hochspannung (einzelnes Modul)

Genau wie das komplette Crate lassen sich auch einzelne Spannungsmodule über das Anlegen einer Steuerspannung an- oder abschalten. Pro Bay wird ein Modul verwendet, sodass in Fehlerfällen während des Messbetriebes einzelne Teleskope abgeschaltet werden können und nicht der gesamte Messbetrieb stillgelegt werden muss. Das Abschalten der Module kann zwar auch über OPC erfolgen, der Vorteil eines Interlocks über die PROFIBUS-Klemmen ist jedoch, dass dieser schnell und zuverlässig gesetzt werden kann, während die OPC-Kommunikation auch ausfallen kann, womit ein Abschalten der Spannungen nicht mehr möglich wäre.

##### 4. Frontend-Elektronik

Die Frontend-Elektronik befindet sich in einem VME-Crate direkt neben der Kamera, liest mit bestimmten Triggerbedingungen die Daten der Photomultiplier aus und gibt diese dann an die Mirror-PCs (s.u.) weiter. Das Crate lässt sich über eine Relais-Klemme von der Slow Control an- oder abschalten.

#### 5. Mirror-PC

Neben der Frontend-Elektronik befindet sich ein sog. *Mirror-PC*, der die Daten von dieser entgegennimmt und sie dann an einen Zentralrechner („Eye-PC“) weiterleitet. Genau wie der Calibration-PC und die Frontend-Elektronik kann er von der Slow Control an- oder abgeschaltet werden, falls ein Neustart des PCs erforderlich ist.

#### 6. Warnhupe

Die Warnhupe für die Bays ist in der Nähe der Shutter angebracht. Sie soll bei Wartungsarbeiten mit einer gewissen Vorlaufzeit auf eine Bewegung des Shutters oder des Notfallvorhangs vor den Teleskopen aufmerksam machen, damit dort keine Personen verletzt werden. Während der Messung ist dies nicht möglich, weil dort die Sicherheitsmaßnahmen sehr schnell ergriffen werden müssen und daher keine Vorlaufzeit für die Hupe gewährt werden kann.

#### 7. Selbsttest-LED für den Lichtsensor

Wie die Sensoren für die Außenhelligkeit (siehe Kap. 4.5.1.2) sind auch die Lichtsensoren in den Bays mit Selbsttest-LEDs ausgestattet, um ihre Funktion vor der Inbetriebnahme zu überprüfen.

### 4.5.3 Per OPC überwachte Parameter

#### 1. HV-Crate

Die Hochspannungen für die Photomultiplier, die Niederspannungen für die Elektronik der Kamera sowie die aktuell fließenden Ströme werden per OPC-Server auf dem Field-PC überwacht, der mit einem im HV-Crate integrierten Rechner kommuniziert. Hierüber werden auch noch diverse andere Parameter des HV-Crates ausgelesen wie z.B. Informationen über die Lüfterdrehzahl und die Temperatur der einzelnen Module.

#### 2. Datenerfassung (DAQ)

Über OPC erfolgt auch die Kommunikation der Datenaufnahme mit dem Slow Control System. Die DAQ-PCs werden mit Linux betrieben, der Field-PC jedoch mit Windows NT, daher ist eine standardisierte Schnittstelle in Form von OPC zur Kommunikation notwendig. Momentan erfolgen die Befehle des Benutzers separat an die DAQ und das Slow Control System. In einem automatisierten Betrieb des Experimentes sollen die Befehle nur noch der Datenaufnahme erteilt werden, diese kommuniziert dann mit dem Slow Control System und gibt die notwendigen Anweisungen.

#### 4.5.4 Eventuelle Erweiterungen

Die in den vorhergehenden Kapiteln vorgestellten Parameter repräsentieren den aktuellen Stand der an das Slow Control System angebotenen Größen, die der Sicherheit des *Experimentes* dienen. Es gibt Überlegungen, noch andere Parameter in die Überwachung und Steuerung mit einzubeziehen, die der Sicherheit des *Gebäudes* dienen sollen. Dazu gehören:

- ein Einbrecher-Alarm
- ein Rauch-Sensor
- ein Sprinkler-System
- eine Klimaanlage

Diese Parameter könnten in das bisher bestehende System integriert werden. Der momentan favorisierte Ansatz ist jedoch der Einsatz eines separaten Systems, das auf den gleichen Komponenten wie das Slow Control System basiert. Das Know-How für den Aufbau eines solchen Systems ist bereits vorhanden, der Aufwand des Einrichtens eines separaten Systems würde sich daher auf ein Minimum beschränken. Ein separates System hätte den Vorteil der größeren Übersichtlichkeit und der geringeren Fehleranfälligkeit, da die Einbindung der Gebäudesicherheit die Komplexität des bereits bestehenden Softwarekonzeptes deutlich erhöhen würde. Die Kommunikation der beiden Systeme wird über OPC ermöglicht.

## 5 Teststand

### 5.1 Vorteile eines Teststandes

Bei der Entwicklung der Steuerungssoftware für das Slow Control System in Karlsruhe entstand schnell der Wunsch nach einem lokalen Testsystem, um nicht in Zeitabständen von 5-6 Wochen nach Argentinien fliegen zu müssen und dort am realen Experiment die jeweils aktuelle Version der Steuerungssoftware zu testen. Daher wurde mit den in den vorherigen Kapiteln erwähnten Komponenten ein Teststand aufgebaut, der außer der lokalen Entwicklung der Steuerungssoftware noch viele weitere Vorteile mit sich bringt:

- Gefahrlose Tests

Am Teststand wird nur diejenige Hardware aufgebaut, die dem Schutz des Experimentes dient, nicht die zu schützende Hardware selbst. Dadurch werden teure Komponenten wie die Photomultiplier-Kamera nicht gefährdet, falls beim Test der Steuerungssoftware, der Sensoren oder der Aktuatoren Fehler auftreten.

- Vorab-Tests zusätzlicher oder aktuellerer Komponenten

Falls im Laufe der Entwicklung des Auger-Experimentes zusätzliche oder aktuellere Sensoren oder Aktuatoren eingesetzt werden sollen, so kann am Teststand zunächst überprüft werden, ob diese für das reale Experiment überhaupt geeignet sind und ihren Zweck erfüllen.

- Häufige Tests der Steuerungssoftware

Da der Teststand vor Ort beim Entwickler der Steuerungssoftware aufgebaut ist, kann der Entwickler selbst nach kleinen Änderungen sofort die Funktion der Software überprüfen. Dies hat den Vorteil, dass Schritt für Schritt vorgegangen werden kann. Gibt es nämlich nur alle paar Monate eine Gelegenheit zum Test der Software, so müssen unter Umständen größere Softwareteile verworfen werden, falls diese aufeinander aufbauen und einer der Teile fehlerhaft ist.

- Systematische Simulation von Fehlern

Am Teststand kann - wiederum gefahrlos - durch das systematische Erzeugen von Fehlern überprüft werden, ob das in Kap. 6 erwähnte Sicherheits- und Softwarekonzept korrekt ist und alle vorhergesehenen Fehler und Störfälle richtig abgefangen werden. Das ist besonders wichtig und interessant beim gleichzeitigen Auftreten mehrerer Fehler, weil dies eventuell Nebeneffekte zur Folge haben könnte, die man zuvor nicht berücksichtigt hat (siehe auch nächster Punkt).

- Aufspüren von unvorhergesehenen Fehlern

Aufgrund der Komplexität des Systems ist es schwierig, im Vorhinein alle möglicherweise auftretenden Fehler und Störungen vollständig zu erkennen und zu formulieren. Der Teststand dient daher auch zum Aufspüren von unvorhergesehenen Komplikationen, die z.B. durch unglückliche Interferenzen zweier Komponenten auftreten können. Diese können dann - nach dem Erkennen der Ursache der Komplikationen - im echten Experiment ausgeschlossen werden. Um die Wahrscheinlichkeit des Auftretens solcher Komplikationen beim Teststand zu erhöhen, wird er nach Möglichkeit ohne größere Unterbrechungen betrieben.

## 5.2 Aufbau des Teststandes

Es wurde versucht, den im Rahmen dieser Arbeit aufgebauten Teststand so detailgetreu wie möglich zu halten, damit beim Übergang vom Teststand zum Experiment nicht neue Fehler durch unterschiedliche Hardware entstehen. Unterschiede zum realen Experiment waren jedoch nicht immer zu vermeiden, sie haben sich vor allem aus räumlichen Gegebenheiten und finanziellen Gründen ergeben. In diesem Kapitel soll auf diese Unterschiede und die daraus resultierenden Konsequenzen näher eingegangen werden. Im folgenden nicht explizit erwähnte Komponenten (Field-PC, PROFIBUS-Komponenten, Spannungsversorgungen, Statuslampen, Warnhupe, Temperatur-, Wind- und Regensensor) entsprechen exakt der im realen Experiment eingesetzten Hardware, die bereits in Kap. 4.3 vorgestellt wurde.

### 1. Das PROFIBUS-System

Die Klemmenanordnung entspricht genau der des Experimentes, also pro Bay (bzw. Zentralraum) ein Bus-Koppler mit den benötigten Klemmen. Allerdings existieren beim Teststand momentan nur die Zentrale Bay und die Bay 1, die restlichen fünf werden von der Software künstlich erzeugt, indem alle Adressen auf diejenigen der ersten Bay gesetzt werden. Außer der Tatsache, dass sich alle Bays immer im selben Zustand befinden, ergibt sich für die Steuerung aber kein wesentlicher Unterschied. Um jedoch unvorhergesehene Fehler durch diese Art der Adressierung zu vermeiden und um den Teststand realistischer zu gestalten, wird in Kürze eine weitere „reale“ Bay in die Steuerung miteinbezogen.

### 2. Teleskop und Datenaufnahme

Aus Platz- sowie finanziellen Gründen wurde auf ein Teleskopmodell verzichtet, ebenso auf die zugehörige Datenaufnahme-Elektronik. Dies betrifft die



Frontend-Elektronik, den Mirror-PC und den Calibration-PC. Diese Komponenten können jedoch vom Slow Control System nur an- oder abgeschaltet werden, die restliche Ansteuerung und Überwachung übernimmt die Software der Datenaufnahme. Daher stellt der Verzicht darauf keine wesentliche Einschränkung dar, das An- oder Abschalten kann beim Teststand durch Lampen signalisiert werden.

Mittelfristig ist geplant, eine TCP/IP-Verbindung mit dem Datenaufnahmesystem aufzubauen, das sich in einem anderen Gebäude als der Slow Control-Teststand befindet. Sobald diese Anbindung besteht, können Tests zur OPC-Kommunikation und zur Steuerung des Slow Control Systems durch die Datenaufnahme durchgeführt werden.

### 3. Shutter und Notfallvorhang

Aus denselben Gründen wie beim Teleskop war auch der Aufbau eines Shutters und eines Notfallvorhangs nicht originalgetreu durchführbar. Um trotzdem das Zeitverhalten sowie die induktiven Sensoren testen zu können, wurden diese Komponenten im kleineren Maßstab als Modell aufgebaut. Die Wahl fiel dabei auf Fischertechnik, was sowohl günstig als auch flexibel genug für den Aufbau eines von der Funktion her originalgetreuen Modelles ist. Durch eine Anpassung der Drehgeschwindigkeit der Elektromotoren wurde versucht, das Zeitverhalten der Originale möglichst authentisch abzubilden.

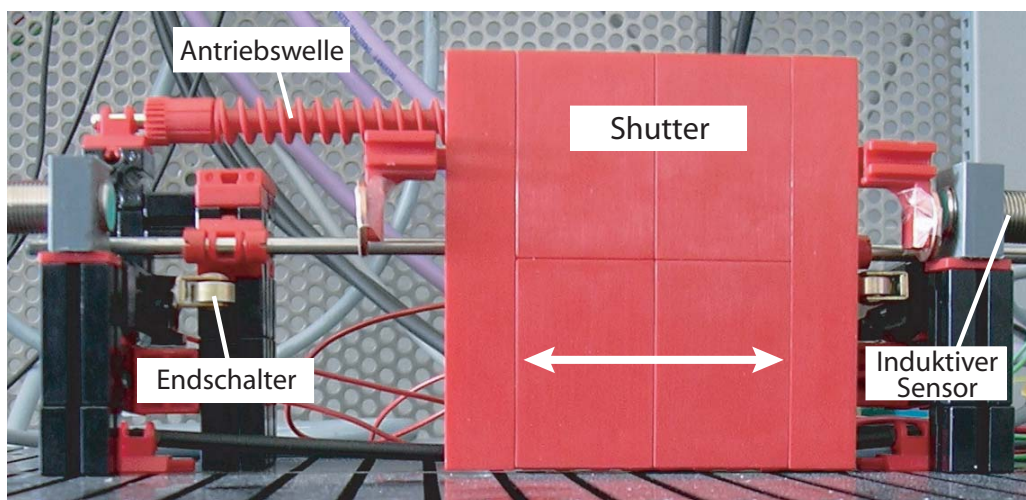


Abb. 5.1: Fischertechnik-Shutter des Teststandes.

#### 4. Türen

Die geöffneten oder geschlossenen Türen werden beim Teststand durch Öffnen und Schließen von Schaltern simuliert. Ein größerer Aufwand wäre hier überflüssig gewesen, da die induktiven Sensoren schon bei Shutter und Notfallvorhang getestet werden.

#### 5. Lichtsensoren

Bei den Lichtsensoren gab es zum Zeitpunkt des Aufbaus des Teststandes noch keine Originale aus dem realen Experiment. Am Teststand wurden mehrere unterschiedlich lichtempfindliche Modelle getestet; wobei der im Experiment verwendete Typ festgelegt wurde. Das Streulicht am Teststand ist durch die Statuslampen, die LEDs der Klemmen und das umgebende Bürolicht jedoch viel zu groß, um die dunkle Umgebung des Detektorgebäudes wiedergeben zu können. Aus diesem Grund wird beim Teststand die in der Software festgelegte Intensitätsschwelle auf einen höheren Wert gesetzt, damit es auch dort „dunkel genug“ werden kann.

#### 6. USV

Der Ausfall des Stromnetzes sowie das Erreichen eines kritischen Wertes des Batteriestandes wird zur Zeit noch durch Schalter simuliert. Dies wird sich jedoch bald durch den Einsatz eines USV-Gerätes ändern, das über eine RS232-Klemme an das PROFIBUS-System angeschlossen wird. Darüber lassen sich detaillierte Informationen über den Zustand des Gerätes auslesen lassen, beispielsweise der genaue Batteriestand in Prozent oder die geschätzte Zeitspanne, nach der das USV-Gerät bei der momentan abgegebenen Leistung ausfällt.

#### 7. Sonstiges

Zur Simulation von Kabelbrüchen sind zusätzliche Schalter in die Verkabelung der Sensoren und Aktuatoren eingebracht. Damit kann die Reaktion der Steuerungssoftware auf den Verlust von Sensoren oder Aktuatoren, sowohl in der Initialisierungsphase als auch während des Messbetriebes, getestet werden.

Unter Verwendung dieses Teststandes wurde die Entwicklung des im folgenden vorgestellten Sicherheits- und Softwarekonzeptes vorgenommen, welcher sich dabei als sehr nützlich herausgestellt hat.

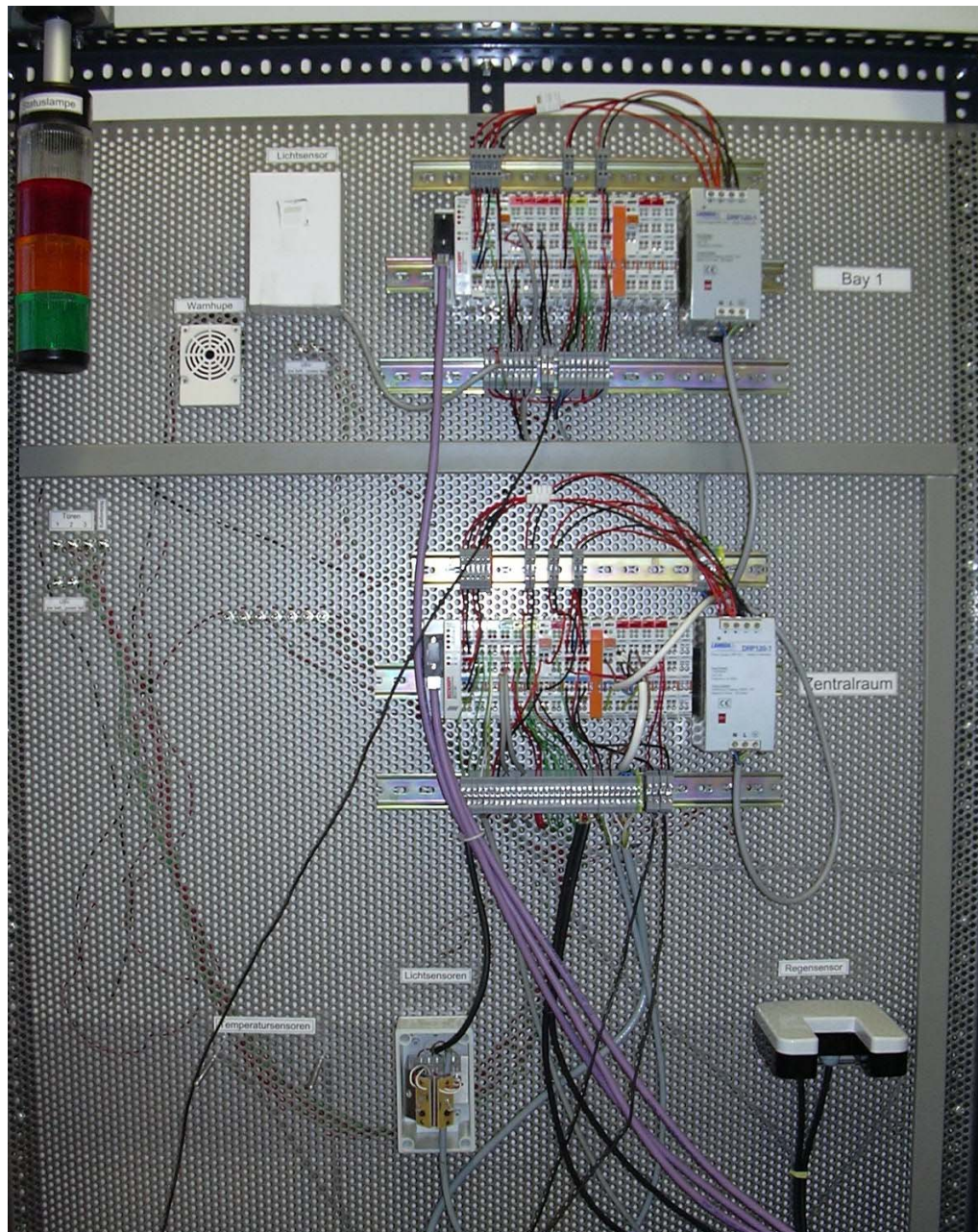


Abb. 5.2: Bild des Teststandes in Karlsruhe. In der Mitte sieht man die PROFIBUS-Komponenten des Zentralraums und der Bay 1, unten sind der Regen- und die Lichtsensoren zu erkennen. Links befinden sich die Status-Lampen, die Warnhupe und die Schalter zum Unterbrechen der Stromkreise.

## 6 Sicherheits- und Softwarekonzept

### 6.1 Einführung in das Sicherheitskonzept

Das Sicherheitskonzept im normalen Betrieb, also bei voll funktionsfähiger Hard- und Software des Slow Control Systems, sieht vor, dass bei gefährdenden Umständen für die Teleskope zwar sichernde Maßnahmen ergriffen werden müssen, diese aber nicht zu restriktiv erfolgen dürfen, sondern je nach Fehler angemessen reagiert werden sollte. Es soll eine möglichst lange Messzeit für möglichst viele Teleskope gewährleistet werden, weshalb eine Beurteilung der Fehler und die Festlegung der entsprechenden Reaktionen des Systems erfolgen muss. Dies führt zu einer Art *Sicherheitsmatrix*, deren Erstellung die Beachtung folgender Fragen erforderlich macht:

- Sind von einem auftretenden Fehler nur einzelne Bays betroffen oder das gesamte Gebäude?
- Wie schwer wiegt der Fehler? Besteht eine konkrete Gefahr für die Teleskope oder für andere Komponenten?
- Müssen Maßnahmen ergriffen werden oder ist eine Benachrichtigung des Aufsichtspersonals zunächst ausreichend?
- Falls Maßnahmen erforderlich sind, welche sind diese, welche Komponenten sind betroffen und lässt sich evtl. ein Abbruch des Messbetriebes vermeiden?

*Fehler* bedeutet hierbei ganz allgemein die Abweichung von einem sicheren Betrieb. Damit sind sowohl Gefahrenmeldungen der Sensoren gemeint als auch ein Ausfall der Sensoren oder Aktuatoren selbst. Ein Ausfall von Komponenten wird stets als unsicherer Zustand bewertet. So führt z.B. ein defekter Lichtsensor im Inneren einer Bay dazu, dass mit dem Teleskop in dieser Bay nicht gemessen werden darf, selbst wenn es in der Bay dunkel sein sollte. Eine Ausnahme stellen doppelt vorhandene Sensoren dar (z.B. die Außenlichtsensoren). Fällt dort einer der Sensoren aus, so führt dies zunächst nur zu einer Warnmeldung an das Aufsichtspersonal, während das Signal des anderen Sensors als gültig gewertet wird. Liefern die beiden Sensoren jedoch unterschiedliche Meldungen (Lichtsensor 1: „Lichtintensität OK“, Lichtsensor 2: „Zu hell“), so wird vom unsicheren Zustand ausgegangen.

Die Reaktion von einzelnen Komponenten auf verschiedene Fehler hängt im entscheidenden Maße davon ab, in welchem Zustand sich andere Komponenten befinden. Beispielsweise ist es unnötig, die Notfallvorhänge bei einer Gefahrenmeldung der äußeren Lichtsensoren fallen zu lassen, solange die Shutter geschlossen sind und deswegen kein Licht in die Bays eintreten kann. Das folgende Softwaremodell arbeitet daher mit Zuständen und Übergängen zwischen diesen. Das zugrundeliegende Konzept sowie die verschiedenen Zustände sollen im folgenden erläutert werden.

## 6.2 Einführung in das Softwarekonzept

Das für das Slow Control System erstellte Softwarekonzept basiert auf einer sog. *State Machine*. Dabei werden Zustände und Übergänge zwischen diesen Zuständen festgelegt (im folgenden wird ein Zustand innerhalb der Software *State* genannt, um Verwechslungen mit realen Zuständen, z.B. „Shutter offen“, zu vermeiden). Ob Übergänge zwischen diesen States erlaubt sind oder nicht, hängt von Bedingungen ab, die in jedem State unterschiedlich sind. Da in jedem State festgelegt ist, in welchem Zustand sich jede einzelne Komponente befindet, ergeben sich beim Übergang von einem State in den anderen Aktionen, die durchgeführt werden müssen. Ein großer Vorteil von State Machines ist es, dass bei veränderten Anforderungen die existierenden States schnell modifiziert werden können bzw. neue States eingeführt werden können, ohne dass das Programmierkonzept aufgrund der dadurch hervorgerufenen Änderungen zur Unübersichtlichkeit neigt.

Das System darf sich zu keiner Zeit außerhalb eines zuvor definierten States befinden, daher muss bei der Programmierung darauf geachtet werden, dass keine „Sackgassen“ auftreten können. Außerdem dürfen im normalen Betrieb sowohl die Benutzer, die das Experiment fernsteuern, als auch die Datenaufnahme nur **Wechsel zwischen States** initiieren und keine einzelnen Komponenten steuern. Die erforderlichen Aktionen bei einem State-Wechsel führt die Steuerungssoftware eigenständig durch. Dies geht zwar mit einem Verlust an Flexibilität einher, gewährleistet jedoch, dass keine undefinierten Zustände auftreten können, die eventuell sicherheitsgefährdend sind. Der normale Betrieb findet in der Steuerungssoftware innerhalb des Betriebsmodus *auto mode* statt, der Name soll andeuten, dass sämtliche Komponenten automatisch gesteuert werden.

Es ist allerdings nicht immer wünschenswert, die komplette Steuerung automatisch ablaufen zu lassen, beispielsweise bei Wartungsarbeiten, während der Aufbau- oder während Kalibrationsmessungen. Für diesen Zweck gibt es den Modus *manual mode*, in welchem die einzelnen Komponenten vom Benutzer gesteuert werden können. Dies darf aber ebenfalls nur innerhalb festgelegter Sicherheitsgrenzen geschehen, damit die Teleskope auch hierbei nicht beschädigt werden können. Dieser Modus sollte jedoch trotzdem die Ausnahme bleiben.

## 6.3 Normaler Betrieb - *auto mode*

### 6.3.1 Software-Ansatz

Im normalen Betrieb, also innerhalb von *auto mode*, können von den Bays die States *INITIAL*, *SLEEP STANDBY*, *IDLE* und *RUN* angenommen werden. Falls keine Fehler auftreten, so befinden sich immer alle Bays eines Fluoreszenzdetektor-Gebäudes im selben State. Dies bleibt auch dann der Fall, wenn Fehler auftreten, von denen alle Bays im selben Maß betroffen sind, wie beispielsweise eine zu hohe Außenlicht-Intensität. Treten Fehler auf, von denen nur einzelne Bays betroffen sind,

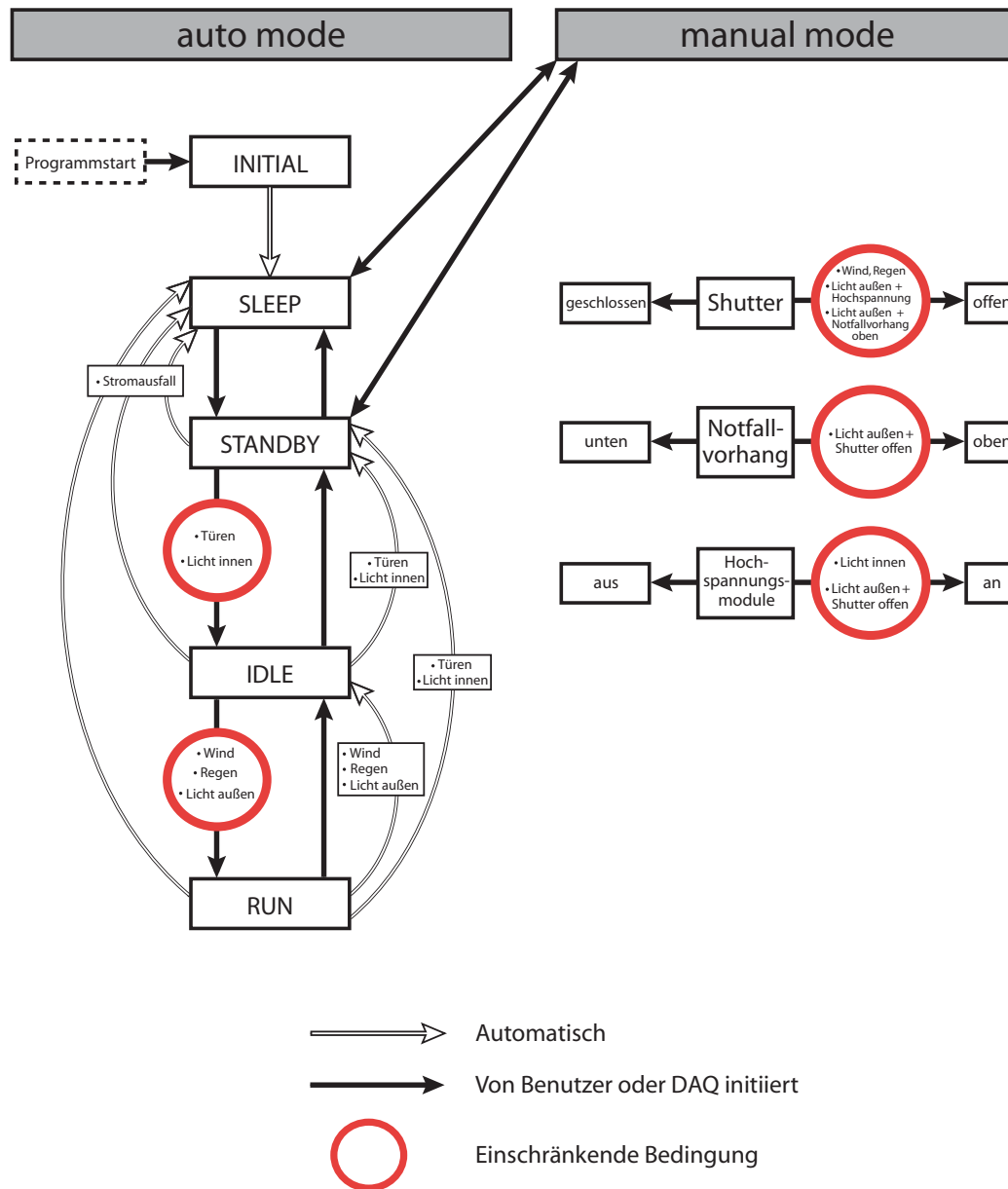


Abb. 6.1: Schema des Steuerungssoftware-Konzeptes.

so führt dies dazu, dass sich die Bays in unterschiedlichen States befinden. Fällt die Fehlerbedingung bei den betroffenen Bays weg, so können sie vom Benutzer oder der Datenerfassung per expliziter Anweisung wieder in den vorherigen Zustand gebracht werden, falls dies erwünscht ist. Dadurch wird ein „Eigenleben“ des Systems verhindert, das zur Unübersichtlichkeit führen würde.

Im folgenden werden die eben genannten States näher beschrieben. Außerdem wird tabellarisch angegeben, welche Komponenten sich im jeweiligen State in wel-

chem Zustand befinden. So muss später, ausgehend vom aktuellen State der Bay, beim Auftreten eines Fehlers neben der Protokollierung und einer Meldung an den Benutzer nur die Angabe gemacht werden, in welchen State gewechselt werden soll. Die von der Steuerungssoftware auszuführenden Aktionen sind dadurch eindeutig festgelegt. Wie diese Aktionen genau erfolgen sollen, muss bei der Programmierung der Übergänge näher spezifiziert werden.

## 1. INITIAL

**Beschreibung:** Nach dem Programmstart findet in diesem State die Initialisierung des Slow Control Systems statt. Es werden alle Sensoren auf ihre Funktionstüchtigkeit überprüft. Dabei sollten sich alle Komponenten bereits in den in Tabelle 4.1 abgedruckten Zuständen befinden. Falls nicht, werden sie vom System in diese Zustände gebracht. In INITIAL werden auch alle Konstanten eingelesen, die zuvor festgelegt wurden und die für den Betrieb des Systems notwendig sind. Dazu gehören unter anderem Timeout-Werte für die Bewegung der Shutter und Notfallvorhänge, Adressvariablen zur Ansteuerung des PROFIBUS-Systems und Angaben über die Maximalwerte der Sensoren (z.B. ab welchem Wert es „zu hell“ oder „zu viel Wind“ ist).

Treten während der Initialisierung Fehler auf, so verbleibt das System in diesem State, bis die Fehler behoben sind. Falls keine Fehler auftreten, geht das System ohne weitere Benutzeranweisungen automatisch in den SLEEP-State.

Bay 1-6		Zentrale Bay	
Notfallvorhang	unten	Hochspannungs-Crate	aus
Shutter	geschlossen	Calibration-PC	aus
Hochspannung (Modul)	aus	Selbsttest-LED	an
Mirror-PC	aus	für Lichtsensor	(ca. 2 s)
Frontend-Elektronik	aus		
Selbsttest-LED für Lichtsensor	an (ca. 2 s)		

Tabelle 6.1: Komponenten und ihre Zustände im INITIAL-State.

## 2. SLEEP

**Beschreibung:** In SLEEP wird das System gebracht, wenn für längere Zeit keine Messung erfolgen soll, z.B. während der Tage um Vollmond, wenn es für eine Messung auch nachts zu hell ist. Auch bei einem Stromausfall geht das System in diesen State, solange die USV-Geräte noch Spannung liefern. In SLEEP sind alle Komponenten abgeschaltet, auf die das Slow Control System Zugriff hat.

Bay 1-6		Zentrale Bay	
Notfallvorhang	unten	Hochspannungs-Crate	aus
Shutter	geschlossen	Calibration-PC	aus
Hochspannung (Modul)	aus	Selbsttest-LED für Lichtsensor	aus
Mirror-PC	aus		
Frontend-Elektronik	aus		
Selbsttest-LED für Lichtsensor	aus		

Tabelle 6.2: Komponenten und ihre Zustände im SLEEP-State.

### 3. STANDBY

**Beschreibung:** STANDBY ist sozusagen der „Normalzustand“ der Bays, aus dem heraus der Übergang zum Messbetrieb erfolgen kann. Aus den beiden höheren States IDLE und RUN wird in STANDBY gewechselt, falls dort Fehler auftreten.

Bay 1-6		Zentrale Bay	
Notfallvorhang	unten	Hochspannungs-Crate	an
Shutter	geschlossen	Calibration-PC	an
Hochspannung (Modul)	aus	Selbsttest-LED für Lichtsensor	aus
Mirror-PC	an		
Frontend-Elektronik	an		
Selbsttest-LED für Lichtsensor	aus		

Tabelle 6.3: Komponenten und ihre Zustände im STANDBY-State.

### 4. IDLE

**Beschreibung:** Der IDLE-State dient zur Vorbereitung aller Komponenten auf die Messung. Die gesamte Elektronik ist aktiviert, die Notfallvorhänge sind oben. Nur die Shutter sind noch geschlossen, was zum einen den Grund hat, dass dadurch nach wie vor kein Außenlicht in die Bays eintreten kann. Zum anderen sind auf den Rückseiten der Shutter Reflektoren zur Kalibration der Teleskope angebracht. Durch die geschlossenen Shutter können in IDLE also Kalibrationen stattfinden, auch wenn es draußen noch hell ist. Dadurch erreicht man eine optimale Ausnutzung der Dunkelperiode, da sofort mit der Messung begonnen werden kann, sobald es dunkel genug ist.



Bay 1-6		Zentrale Bay	
Notfallvorhang	oben	Hochspannungs-Crate	an
Shutter	geschlossen	Calibration-PC	an
Hochspannung (Modul)	an	Selbsttest-LED für Lichtsensor	aus
Mirror-PC	an		
Frontend-Elektronik	an		
Selbsttest-LED für Lichtsensor	aus		

Tabelle 6.4: Komponenten und ihre Zustände im IDLE-State.

## 5. RUN

**Beschreibung:** In diesem State finden die Messungen mit den Teleskopen statt. Es ist der einzige State, in dem die Shutter geöffnet und die Komponenten in den Bays Einflüssen von außerhalb des Gebäudes ausgesetzt sind. Das Auftreten von zu viel Licht führt für die betroffenen Bays zum unmittelbaren Übergang in STANDBY, wo die Hochspannung deaktiviert ist. Zu viel Wind und Regen führen in IDLE, dort ist die Hochspannung noch aktiviert. Damit soll verhindert werden, dass unnötig viele Kalibrationen des optischen und elektrischen Signalwegs stattfinden, die nach jedem Aus- und Wiedereinschalten der Hochspannung durchgeführt werden müssen.

Bay 1-6		Zentrale Bay	
Notfallvorhang	oben	Hochspannungs-Crate	an
Shutter	geöffnet	Calibration-PC	an
Hochspannung (Modul)	an	Selbsttest-LED für Lichtsensor	aus
Mirror-PC	an		
Frontend-Elektronik	an		
Selbsttest-LED für Lichtsensor	aus		

Tabelle 6.5: Komponenten und ihre Zustände im RUN-State.

## 6.3.2 Sicherheitsregeln

In diesem Kapitel werden in tabellarischer Form die Sicherheitsregeln angegeben, bei denen das System automatisch in einen anderen State wechselt und unter welchen Bedingungen State-Wechsel verboten sind. Automatische Wechsel dürfen nur in Fehlerfällen und nur von höheren in niedrigere States erfolgen (Ausnahme: INITIAL),

Übergänge in höherliegende States müssen vom Benutzer oder der DAQ initiiert werden. Bei automatisch eingeleiteten State-Wechseln in Fehlerfällen dürfen States übersprungen werden, ansonsten ist dies nicht möglich. Ein Überblick wird in Abb. 6.1 gegeben.

1. State Wechsel aus dem INITIAL-State:

Aus dem INITIAL-State erfolgt ein automatischer Übergang in SLEEP, falls während der Initialisierung keine Fehler aufgetreten sind. Da INITIAL der niedrigste State ist, können nur Übergänge in höhere States erfolgen.

2. State-Wechsel aus dem SLEEP-State

- Automatische Wechsel in niedrigere States:

Aus SLEEP heraus kann nicht in INITIAL übergegangen werden. Für eine Initialisierung des Systems muss das Programm neu gestartet werden.

- Ein Wechsel in STANDBY ist nicht erlaubt bei:
  - Stromausfall

3. State Wechsel aus dem STANDBY-State:

- Automatische Wechsel in niedrigere States:

Wechsel in	findet statt bei
SLEEP	Stromausfall

- Ein Wechsel in IDLE ist nicht erlaubt bei:
  - Geöffneten Türen
  - Licht im Inneren der Bays

4. State Wechsel aus dem IDLE-State:

- Automatische Wechsel in niedrigere States:

Wechsel in	findet statt bei
SLEEP	Stromausfall
STANDBY	Geöffneten Türen Licht im Inneren der Bays

- Ein Wechsel in RUN ist nicht erlaubt bei:
  - Regen
  - Zu viel Wind
  - Zu hoher Außenlicht-Intensität

## 5. State Wechsel aus dem RUN-State:

- Automatische Wechsel in niedrigere States:

Wechsel in	findet statt bei
SLEEP	Stromausfall
STANDBY	Geöffneten Türen Licht im Inneren der Bays Zu hoher Außenlicht-Intensität
IDLE	Regen Zu viel Wind

- Wechsel in höhere States:

RUN ist der höchste State, es können also keine Wechsel in höhere States erfolgen.

## 6.4 Manueller Modus - *manual mode*

### 6.4.1 Software-Ansatz

Im *manual mode* kann der Benutzer einzelne Komponenten steuern und ist nicht mehr auf die Initiierung von State-Wechseln beschränkt. Dieser Modus ist für Wartungsarbeiten, die Aufbauphase und Kalibrationsmessungen vorgesehen. In diesen Fällen kann es beispielsweise notwendig sein, die Shutter auch tagsüber zu öffnen. Dann muss allerdings gewährleistet sein, dass andere Komponenten die davon ausgehende Gefahr für die Teleskope abwenden, beispielsweise *muss* bei Tageslicht und geöffneten Shuttern der Notfallvorhallvorhang unten sein und die Hochspannung darf unter keinen Umständen aktiviert werden.

Im *manual mode* gibt es keine definierten States, stattdessen wurde für die Steuerung jeder Komponente ein eigener Funktionsblock angelegt, innerhalb dessen überprüft wird, ob die vom Benutzer angeforderte Aktion zum gegenwärtigen Zeitpunkt in Abhängigkeit des Zustandes der anderen Komponenten ausgeführt werden darf oder nicht (Beispiel: Hochfahren des Notfallvorhangs darf *nicht* erfolgen bei geöffnetem Shutter *und* einer zu hohen Außenlicht-Intensität). Trotz dieser Sicherheitsvorkehrungen sollte sich der jeweilige Benutzer bei der Steuerung der einzelnen Komponenten jederzeit im Klaren über die Konsequenzen seiner Aktionen sein. Unter anderem ist eine sog. *Drum-Kalibration* vorgesehen, bei der bei geöffnetem Shutter eine Trommel zur optischen Kalibration vor einem Teleskop angebracht wird. Diese Drum-Kalibration findet im *manual mode* statt. Da das Slow Control System keine Sensoren für diese Trommel besitzt, kann der Benutzer den Befehl zum Schließen der Shutter geben, was zur Zerstörung dieser Trommel durch die Shutter führen würde. Es ist zwar ein Schalter zur manuellen Unterbrechung des Stromkreises der Shutter-Motoren vorgesehen, aber die Betätigung dieses Schalters kann von

einem Mitarbeiter auch vergessen werden. Daher müssen die Benutzer des Steuerungsprogramms im *manual mode* trotz der implementierten Schutzmechanismen mit äußerster Vorsicht vorgehen.

### 6.4.2 Sicherheitsregeln

In diesem Abschnitt folgt eine Auflistung, unter welchen Umständen die manuelle Betätigung einzelner Komponenten **nicht** erlaubt ist. Ein Übergang in den für das Experiment sicheren Zustand (beispielsweise das Schließen der Shutter) ist immer erlaubt, nur der Übergang in die gefährdenden Zustände ist Restriktionen unterworfen.

#### 1. Öffnen der Shutter

Das Öffnen der Shutter ist nicht möglich unter folgenden Bedingungen:

- Regen
- Zu viel Wind
- Zu hohe Außenlicht-Intensität bei gleichzeitig aktivierter Hochspannung
- Zu hohe Außenlicht-Intensität bei gleichzeitig hochgefahrenem Notfallvorhang

#### 2. Hochfahren des Notfallvorhangs

Das Hochfahren des Notfallvorhangs ist nicht erlaubt bei:

- Zu hohe Außenlicht-Intensität bei gleichzeitig geöffnetem Shutter

#### 3. Aktivieren der Hochspannungs-Module

Das Aktivieren der Hochspannungs-Module ist nicht möglich, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

- Zu hohe Außenlicht-Intensität bei gleichzeitig geöffnetem Shutter
- Zu hohe Lichtintensität im Inneren der Bay
- Geöffnete Türen

Die restlichen Komponenten dürfen ohne Einschränkung gesteuert werden, da sie die Sicherheit des Experimentes nicht beeinträchtigen können. Für einen Überblick über die Sicherheitsregeln siehe Abb. 6.1.

## 6.5 Störfälle

Das Sicherheitskonzept bei Störfällen besteht aus mehreren Stufen, die so angeordnet sind, dass ein Ausfall von Komponenten jeglicher Art immer erkannt wird und darauf auch reagiert werden kann. Im folgenden wird dieses Sicherheitskonzept anhand seiner zugrundeliegenden Hierarchie erläutert, wobei von vergleichsweise leichten zu schweren Fehlern übergegangen wird.

### 1. Stufe: Abbruch der lokalen OPC-Kommunikation

Mit der lokalen OPC-Kommunikation ist die Verbindung des Slow Control Systems mit der Datenaufnahme und dem Hochspannungs-Crate gemeint.

Von jeder OPC-Variable lässt sich nicht nur ihr Wert auslesen, sondern auch eine „Variablenqualität“, deren Beurteilung durch eine (nicht) erfolgreiche Abfrage festgelegt wird, sowie eine Zeitmarke, wann die letzte erfolgreiche Abfrage stattgefunden hat. Darüber ist für die Steuerungssoftware erkennbar, ob die Kommunikation noch besteht oder ob evtl. ein Neustart des jeweiligen OPC-Servers erforderlich ist, welcher ebenfalls von der Steuerungssoftware initiiert werden kann. Hilft dies nicht, so muss z.B. bei der Hochspannung das komplette Crate vorübergehend abgeschaltet werden, was in der Hierarchie allerdings als schwerer Fehler eingestuft werden müsste. Ein kurzfristiger Kommunikationsausfall kann dagegen leicht behoben werden und hat für den Rest des Experimentes keine größeren Auswirkungen.

### 2. Stufe: Ausfall von Sensoren oder Aktuatoren

Ein Ausfall von Sensoren oder Aktuatoren wird vom PROFIBUS bzw. der Steuerungssoftware bemerkt. Bei den Licht- und Temperatursensoren sollte immer ein Signal ausgelesen werden können, ein Wert von Null deutet auf einen Fehler hin. Der Windsensor liefert selbst bei Windstille einen Reststrom von 4 mA, sodass auch hier ein Wert von Null einen Ausfall des Sensors bedeutet. Die digitalen Sensoren (Türen, Shutter, Notfallvorhang, USV, Regen), bei denen es nur die Zustände „an“ oder „aus“ gibt, wurden an den Klemmen so angeschlossen, dass diese im sicheren Zustand (z.B. Türen zu) immer eine *aktive* Rückmeldung in Form einer Spannung an die Klemme zurückgeben. Fallen diese Sensoren aus (d.h. die Spannung geht auf Null zurück), so bemerkt die Steuerungssoftware den Ausfall zwar nicht direkt als solchen, sie geht aber vom unsicheren Zustand aus und trifft die erforderlichen Sicherheitsmaßnahmen.

Bei den Aktuatoren wie Shutter oder Notfallvorhang bemerkt man eine Fehlfunktion durch das Setzen eines Zeitfensters. Nach dem Startbefehl zum Bewegen eines Shutters oder Vorhangs müssen die jeweiligen Sensoren innerhalb einer gewissen Zeit das Signal geben, dass der Shutter oder der Vorhang auch

wirklich angekommen ist. Tun sie dies nicht, liegt eine Fehlfunktion der Aktuatoren oder der Sensoren vor.

### 3. Stufe: Stromausfall

Ein Stromausfall wird von den USV-Geräten erkannt und zumindest für eine gewisse Zeit abgefangen. Diese Information wird dann per USV-Server und -Client allen Rechnern mitgeteilt (siehe Kap. 4.5.1.1), sodass diese die entsprechenden Maßnahmen ergreifen können. Das Slow Control System hat somit genügend Zeit, um alle Komponenten in einen sicheren und definierten Zustand zu bringen.

### 4. Stufe: Abbruch der externen Kommunikation

Sollte ein Abbruch der Kommunikation einer oder mehrerer Detektorgebäude mit dem Central Campus eintreten, so kann bei den betreffenden Gebäuden weder der Status abgerufen werden noch eine Fernsteuerung erfolgen. Die Sicherheit der einzelnen Gebäude ist jedoch unabhängig davon, ob der Benutzer im Central Campus mit diesen verbunden ist, da der Benutzer selbst keine sichernden Maßnahmen ergreift. Daher wird in einem solchen Fall mehrere Minuten abgewartet, ob sich die Kommunikation wieder etabliert. Falls nicht, gehen die Bays des betroffenen Gebäudes automatisch in den SLEEP-State, danach muss ein Techniker die Störung vor Ort beseitigen.

### 5. Stufe: Ausfall des PROFIBUS-Systems oder des Field-PCs

Ein Ausfall des Field-PCs oder (Teilen) des PROFIBUS-Systems stellt den schlimmstmöglichen Fehlerfall dar, da von diesen die Überwachung und Steuerung der anderen Komponenten ausgeht. Sollte dieser Fall eintreten, so ist durch eine entsprechende Verkabelung der Klemmen trotzdem eine Absicherung der Teleskope gewährleistet. Die Klemmen der Aktuatoren gehen bei einem totalen Ausfall in den Grundzustand. Der Grundzustand ist so gewählt und verschaltet, dass dort die jeweils *sichernde* Maßnahme ausgeführt wird. Ein Beispiel sind die Shutter: Bei deren Klemmen wird bei einem Wegfall der Steuerspannung für das Relais ein Stromkreis geschlossen, der zum Schließen der Shutter führt.

Das vorgestellte Sicherheits- und Softwarekonzept sorgt also dafür, dass die Teleskope sowohl im normalen Betrieb als auch bei Störfällen zu keiner Zeit beschädigt werden können. Die Möglichkeit der Überprüfung dieses Konzeptes an einem Teststand hat in entscheidendem Maße dazu beigetragen, dass dies nicht nur in der Theorie der Fall ist, sondern auch in der Praxis.

## 7 Status und Ausblick

Der aufgebaute Teststand ist voll funktionsfähig. Aufgebaut sind zurzeit die zentrale Bay und die Bay 1 mit allen relevanten Sensoren und Aktuatoren. Während der Programmentwicklung hat sich der Teststand als äußerst wertvoll erwiesen. Durch die Möglichkeit eines sofortigen Tests der Steuerungssoftware nach erfolgten Änderungen konnten Fehler in der Software schnell erkannt und beseitigt werden, wodurch die Entwicklung der Software deutlich beschleunigt wurde.

Auch die Steuerungssoftware ist einsatzbereit. Die Signale aller Sensoren werden korrekt ausgelesen, die Aktuatoren werden korrekt gesteuert. Fehler werden zuverlässig erkannt, die Sicherheitsfunktionen und die State Machine im *auto mode* sowie die Steuerung der einzelnen Komponenten im *manual mode* funktionieren stabil und zuverlässig. Außer einem Abbruch der externen Kommunikation wurden die erwähnten Störfälle am Teststand simuliert, auch diese werden korrekt abgefangen. Das System ist zurzeit im realen Experiment in einem Detektorgebäude mit zwei funktionsbereiten Bays im Einsatz.

Zur Visualisierung wird momentan noch die 4Console eingesetzt, die sich aber aufgrund der angesprochenen Einschränkungen nicht für das voll ausgebaute Experiment eignet. Während der Programmentwicklung wird jedoch weiterhin die 4Console verwendet werden.

Beim Teststand wird in den nächsten Wochen die Anbindung einer weiteren Bay vorgenommen, um noch realistischere Tests zu ermöglichen.

Bei der Steuerungssoftware muss in Zukunft die Protokollierung und die generelle Benutzerfreundlichkeit verbessert werden, da diese zurzeit noch keine sehr detaillierten Meldungen liefert und die Fehlersuche dadurch noch zu lange dauert. Außerdem wird momentan nur in Log-Dateien protokolliert, die Protokollierung in eine Datenbank wird in den nächsten Monaten erfolgen.

Das nächste Ziel ist die Anbindung des Datenerfassungssystems per OPC an das Slow Control System, damit in Zukunft die Steuerung des Experimentes über die Datenerfassung erfolgen kann, d.h. dass das Slow Control System die notwendigen Anweisungen von der Datenerfassung erhalten kann.

Softwareseitig steht die Entwicklung einer Linux-basierten grafischen Oberfläche mit OPC-Schnittstelle an, um möglichst bald die simultane Steuerung und Überwachung aller vier Detektorgebäude testen zu können.





## Anhang

### A Programmbeispiel für ST

```
PROGRAM prg_CheckUPS

VAR_EXTERNAL
    Sensors      : adt_Sensors;
END_VAR

VAR
    UPSCentral : SCS_UPS := (Bay := 99, PWFail_Timeout := T#5s);
    UPSBays    : SCS_UPS := (PWFail_Timeout := T#5s);
    BayCounter : DINT := 1;
END_VAR

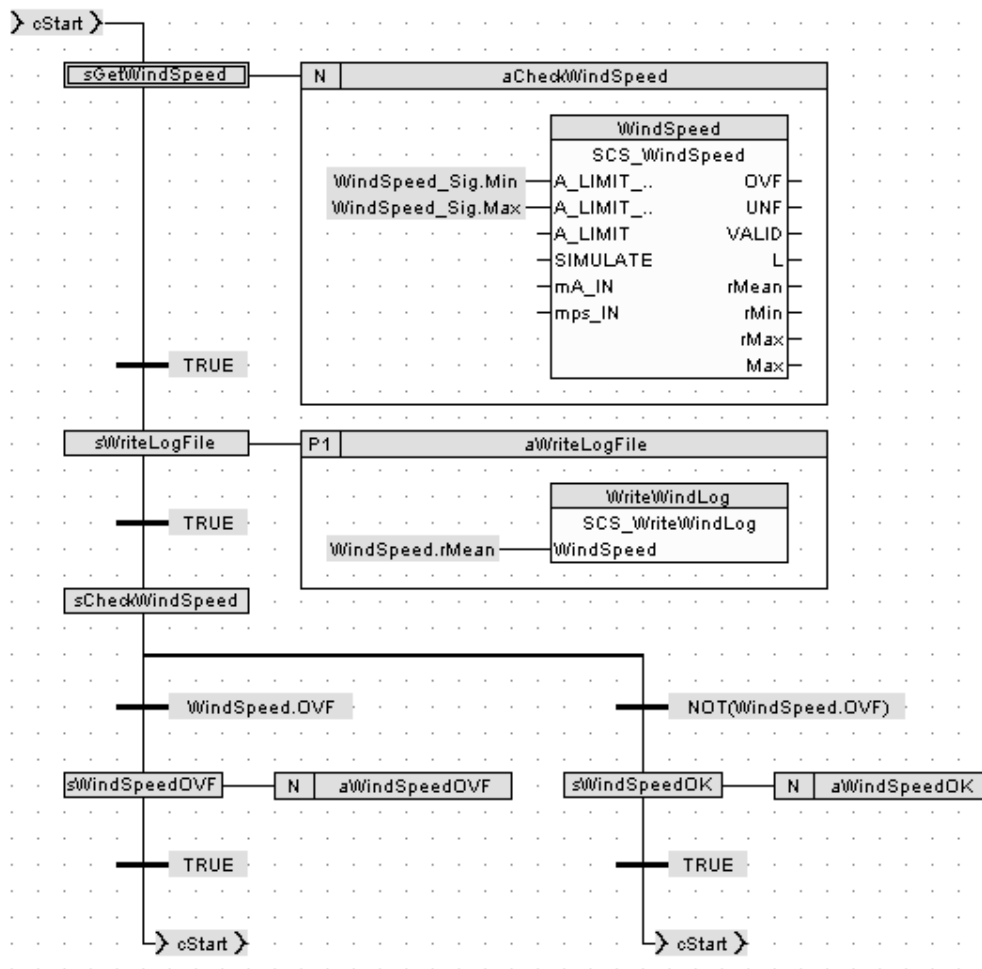
UPSCentral();
Sensors.UpsCentral.Valid := UPSCentral.Valid;
Sensors.UpsCentral.PwFail := UPSCentral.PwFail;

FOR BayCounter := 1 TO 6 BY 1 DO
    UPSBays(Bay := BayCounter);
    Sensors.UpsBay[BayCounter].Valid := UPSBays.Valid;
    Sensors.UpsBay[BayCounter].PwFail := UPSBays.PwFail;
END_FOR;

BayCounter := 1;

END_PROGRAM
```

## B Programmbeispiel für SFC



## Literatur

- [Aglietta89] M. Aglietta et al., *The EAS-TOP Array at  $E_0=10^{14}$ - $10^{16}$  eV: Stability and Resolutions*, NIM A277, 23 (1989)
- [Alkhofer75] O.C. Alkhofer, *Introduction to Cosmic Radiation*, Verlag Carl Thiemig, München (1975)
- [Argirò2000] Stefano Argirò, *The Fluorescence Detector of the Pierre Auger Cosmic Ray Observatory and its Readout Electronics*, Universit degli Studi di Milano (2000)
- [Auger38] Comptes rendus, Académie des Sciences **206** (1938) 1721;  
Comptes rendus, Académie des Sciences **207** (1938) 228
- [Bird95] D.J. Bird et al., (Fly's Eye Kollaboration), *Astrophys. J.* **441** (1995) 144
- [Blümer03] J. Blümer, (Pierre Auger Kollaboration), *Status, Performance and Perspectives of the Pierre Auger Observatory*, Proc. 28<sup>th</sup> Int. Cosmic Ray Conference, Tsukuba (2003)
- [Borione94] A. Borione et al., (CASA-MIA-Kollaboration), *Nucl. Instr. and Meth. A* **346** (1994) 329
- [Cisco] Cisco Systems, *Token Ring Basics*,  
[http://www.cisco.com/univercd/cc/td/doc/cisintwk/ito\\_doc/tokenrng.htm](http://www.cisco.com/univercd/cc/td/doc/cisintwk/ito_doc/tokenrng.htm)
- [Cronin97] J.W. Cronin et al., (Pierre Auger Kollaboration), *The Pierre Auger Observatory Design Report*, Second Edition (1997)
- [Dirac31] P.A.M. Dirac, *Proc. Roy. Soc. A* **133** (1931) 60
- [Doll90] P. Doll et al., (KASCADE Kollaboration), *The Karlsruhe Cosmic Ray Project KASCADE*, KfK-Report 4686, Kernforschungszentrum Karlsruhe (1990)
- [Gaisser90] T.K. Gaisser, *Cosmic Rays and Particle Physics*, Cambridge University Press (1990)
- [Greisen66] K. Greisen, *Phys. Rev. Lett.* **16** (1966) 748
- [Heck98] D. Heck, J. Knapp, J.N. Capdevielle, G. Schatz, T. Thouw, Report FZKA, 6019 (1998), Forschungszentrum Karlsruhe
- [Hess12] V. Hess, *Physikalische Zeitschrift* **13** (1912) 1084
- [Hillas81] A.M. Hillas, Proc. 17<sup>th</sup> Int. Cosmic Ray Conference, Paris, 8 (1981) 193
- [Hofmann02] W. Hofmann, (H.E.S.S. Kollaboration), *The H.E.S.S. Project*, Int. Symposium: The Universe viewed in Gamma Rays, Tokyo (2002)

- [Jackson82] J.D. Jackson, *Klassische Elektrodynamik*, de Gruyter (1982)
- [Klapdor97] H.V. Klapdor-Kleingrothaus, K. Zuber, *Teilchenastrophysik*, Teubner (1997)
- [Lonsdale02] C. Lonsdale, *LOFAR Design Summary*,  
[http://web.haystack.mit.edu/lofar/pdf/design\\_summary.pdf](http://web.haystack.mit.edu/lofar/pdf/design_summary.pdf)
- [Longair81] M.S. Longair, *High energy astrophysics*, Cambridge University Press (1981)
- [Maier2000] G. Maier, *Untersuchung von atmosphärischen Einflüssen auf ausgedehnte Luftschauer und Bestimmung von Abschwächlängen*, Diplomarbeit Universität Karlsruhe (2000)
- [Parker70] E.N. Parker, *Astrophys. J.* **160** (1970) 383
- [Polyakov74] A. Polyakov, *JETP Lett.* **20** (1974) 194
- [Profibus02] PROFIBUS Systembeschreibung, Version Oktober 2002,  
[http://www.profibus.com/imperia/md/content/pisc/technicaldescription/4001\\_vOktober2002-German.pdf](http://www.profibus.com/imperia/md/content/pisc/technicaldescription/4001_vOktober2002-German.pdf)
- [Pühlhofer03] G. Pühlhofer, O. Bolz, N. Götting et al., (HEGRA Kollaboration), *The Technical Performance of the HEGRA System of Imaging Air Cherenkov Telescopes*, Preprint astro-ph/0306123 (2003)
- [Silberberg90] R. Silberberg, C.H.T. sao, *Physics Reports* 191, No.6 (1990) 351-410
- [Takeda03] M. Takeda et al., *Astropart. Phys.* **19** (2003) 447-462
- [t'Hooft74] G. t'Hooft, *Nucl. Phys. B* **79** (1974) 276
- [Ulrich03] H. Ulrich, Dissertation, Universität Karlsruhe (2003)
- [Waldenmaier01] Tilo Waldenmaier, *Untersuchung der Abbildungseigenschaften eines Schmidt-Teleskopes für das Pierre-Auger-Projekt*, Diplomarbeit Universität Karlsruhe (2001)
- [Wefel91] J. Wefel, *Cosmic Rays, Supernovae and the Interstellar Medium*, eds. M.M.Shapiro et al., NATO ASI Series 337C (1991) 29
- [Wiebusch03] C. Wiebusch, *Status of the FD Slow Control System*, Auger Collaboration Meeting, Mai 2003
- [Zatsepin66] G.T. Zatsepin, V.A. Kuz'min, *JETP Lett.* **4** (1966)

## Abbildungsverzeichnis

1.1	Differentielles Energiespektrum der kosmischen Strahlung . . . . .	3
1.2	Relative Elementhäufigkeiten in der kosmischen Strahlung und in unserem Sonnensystem . . . . .	4
1.3	GZK-Effekt . . . . .	6
1.4	Fermi-Beschleunigung 2. Ordnung . . . . .	7
1.5	Fermi-Beschleunigung 1. Ordnung . . . . .	7
2.1	Schematische Entwicklung und Seitenansicht eines ausgedehnten Luftschauers . . . . .	12
2.2	Schematische Darstellung einer Proton-Kern-Wechselwirkung. . . . .	13
2.3	Vergleich des $N_\mu/N_e$ -Verhältnisses bei proton- und eiseninduzierten Luftschauern . . . . .	15
2.4	Nach Komponenten unterteilte Teilchenzahlentwicklung eines protoninduzierten $10^{15}$ eV-Luftschauers . . . . .	16
3.1	Lageplan des Pierre Auger Observatoriums . . . . .	20
3.2	Schema des Oberflächen-Detektors beim Auger-Experiment. . . . .	21
3.3	Emissionsspektrum des Fluoreszenzlichtes . . . . .	22
3.4	Erwartetes Signal bei den Fluoreszenzdetektoren . . . . .	23
3.5	Skizze eines Fluoreszenzdetektor-Gebäudes. . . . .	24
3.6	Skizze eines Fluoreszenzteleskopes. . . . .	25
3.7	Strahlengang bei der Schmidt-Optik . . . . .	26
3.8	Die Pixelmatrix der PMT-Kamera . . . . .	27
3.9	Ereignis im Event-Display des Auger-Experimentes . . . . .	28
4.1	Kommunikation bei PROFIBUS . . . . .	32
4.2	Bus-Koppler und Klemme . . . . .	34
4.3	Bild der aktuellen 4Console. . . . .	38
4.4	Datenfluss beim Auger-Experiment [Wiebusch03]. . . . .	39
4.5	Übersicht der überwachten und gesteuerten Parameter . . . . .	41
5.1	Fischertechnik-Shutter des Teststandes. . . . .	51
5.2	Bild des Teststandes in Karlsruhe . . . . .	53
6.1	Schema des Steuerungssoftware-Konzeptes . . . . .	56



## Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen der Auger-Kollaboration am Institut für Kernphysik des Forschungszentrums Karlsruhe und am Institut für experimentelle Kernphysik der Universität Karlsruhe.

Bedanken möchte ich mich bei:

- Herrn Prof. Dr. K.-H. Kampert für die Übernahme des Referats und die Förderung dieser Arbeit.
- Herrn Prof. Dr. H. Blümer für die Übernahme des Koreferats und die Ermöglichung dieser Arbeit am Institut für Kernphysik.
- Herrn H.O. Klages und Herrn K. Daumiller für die Betreuung dieser Arbeit, die Einführung in das wissenschaftliche Arbeiten und für entscheidende Anregungen.
- Den Mitgliedern der Karlsruher Auger-Gruppe für Ihre Unterstützung und die gute Zusammenarbeit.
- Den Herren R. Glasstetter, G. Maier und H. Ulrich für die stets vorhandene Hilfs- und Diskussionsbereitschaft und die angenehme Atmosphäre.
- Frau G. Dresel für ihre Hilfe bei organisatorischen Fragen.

Ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mit ihrem Verständnis und ihrer persönlichen und finanziellen Unterstützung mein Studium und diese Arbeit erst ermöglicht haben.





Ich versichere, dass ich diese Arbeit nur unter Zuhilfenahme der angegebenen Quellen und Hilfsmittel selbständig angefertigt habe.

Karlsruhe, 1. Juli 2003

Christian Bethge