

Das Pierre-Auger-Observatorium in Argentinien

H. O. Klages, IK; M. Kleifges, IPE

Einleitung

Die Pierre-Auger-Kollaboration besteht aus etwa 350 Wissenschaftlern, die 83 Institutionen in 17 Ländern angehören. Sie hat sich die Untersuchung der kosmischen Strahlung zum Ziel gesetzt, die die allerhöchsten Energien im Universum (oberhalb von 10^{19} eV) aufweist. Dazu sind auf Grund des sehr geringen Teilchenflusses von weniger als einem Teilchen pro Jahrhundert und Quadratkilometer sehr großflächige Experimente und lange Messzeiten erforderlich [1].

Zur vollständigen Himmelsdurchmusterung ist je ein Detektorfeld auf der Nord- und auf der Südhalbkugel der Erde geplant. Für das Nordexperiment des Pierre-Auger-Observatoriums (PAO), das ab 2009 installiert werden soll, ist ein Standort in Colorado, USA, vorgesehen.

Das Südexperiment des PAO wird nach extensiven Prototyptests der Detektorkomponenten seit Anfang 2003 in der argentinischen Pampa nahe der Stadt Malargüe aufgebaut, die etwa 1000 km westlich von Buenos Aires direkt am Fuße der Anden liegt [2].

Seit Anfang 2004 werden mit den jeweils fertig gestellten Detektoren und Teleskopen kontinuierlich Daten von hochenergetischen Luftschauern registriert. Erste Ergebnisse dieser Messungen wurden bereits publiziert und diese sowie neuere Resultate sind in einem separaten Beitrag von M. Roth in diesem Heft der „Nachrichten“ erläutert.

Wegen wirtschaftlicher Probleme einiger südamerikanischer Mitgliedsländer und schwieriger Ver-

tragsverhandlungen mit Landeigentümern hat sich der Aufbau in Argentinien verzögert. Die vollständige Inbetriebnahme des Südexperiments wird für das Jahresende 2007 erwartet.

Das PAO Hybridexperiment in Argentinien

Die Messung von höchstenergetischen Teilchen der kosmischen Strahlung erfolgt indirekt durch Nachweis der von ihnen in der Erdatmosphäre ausgelösten Sekundärteilchenlawinen, der „ausgedehnten Luftschauer“. Dabei kommen zwei Methoden zum Einsatz: Erstens die stichprobenartige Messung der Sekundärteilchen durch weitverteilte Detektoren am Erdboden und zweitens die Beob-

achtung des Fluoreszenzlichtes, das die bis zu 100 Milliarden Sekundärteilchen durch Wechselwirkung mit Stickstoffmolekülen im Luftraum über dem Detektorfeld erzeugen. Beide Methoden haben Stärken und Schwächen, ergänzen sich aber vorzüglich. Die Daten, die von den Teilchendetektoren über die Sekundärteilchen in den Schauern geliefert werden, müssen aber noch mit sehr komplexen Ereignis-Simulationen verglichen werden, woraus sich schließlich die gesuchten Parameter des Primärteilchens ergeben. Wesentlich unabhängiger von Modellannahmen sind Ergebnisse, die aus den Daten der Fluoreszenzteleskope ableitbar sind. Allerdings können die Teleskope nur nachts bei klarem Himmel erfolgreich messen.

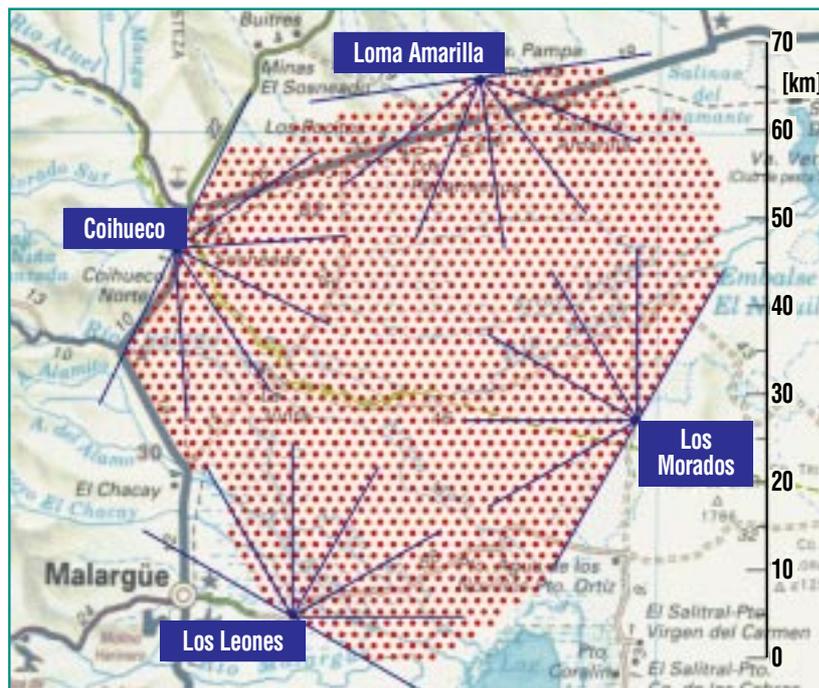


Abb. 1: Das Detektor-Array nahe Malargüe mit den vier Teleskopgebäuden. Die 1600 Punkte zeigen die geplanten Positionen der Wassertanks. Bei den Teleskopgebäuden sind die Gesichtsfelder der einzelnen Fluoreszenzteleskope angedeutet.

Das Detektorfeld des PAO in Argentinien vereint diese beiden Messtechniken in einem Hybridansatz. 1600 Wassertanks mit jeweils 1,5 km Abstand bilden ein dreieckiges Gitter, das eine Fläche von etwa 3000 km² überdeckt, größer als das Gebiet des Saarlands.

24 Fluoreszenzteleskope in vier Gebäuden am Rande des Areals messen nachts die Leuchtspuren der Schauer über dem Detektorfeld. In seinem Endzustand wird das Südexperiment des PAO in Argentinien über 30 mal mehr Akzeptanz haben als das bisher weltweit größte Luftschauerexperiment AGASA [3] in Japan.

Die simultane Beobachtung einerseits der räumlichen und zeitlichen Verteilungen der Sekundärteilchen am Erdboden und andererseits der Schauerentwicklung, die sich als Leuchtspur am Himmel zeigt, erlaubt für einen signifikanten Teil

aller Luftschauer eine Energiekalibrierung. Mit Hilfe der Hybridtechnik werden bei Teilchenenergien, die weit oberhalb derer irdischer Beschleuniger liegen, systematische Unsicherheiten der Messungen erheblich reduziert.

Das Detektorfeld

Das Detektor-Array besteht aus 1600 Wassertanks, die eine Grundfläche von je 10 m² haben. Jeder Tank ist mit 12 Tonnen ultrareinem Wasser gefüllt. Energiereiche Sekundärteilchen, die aus den Luftschauern stammen, lösen im Wasser kurze Lichtblitze aus. Grund dafür ist der sogenannte Cherenkov-Effekt.

Er beruht darauf, dass eine typische elektromagnetische Strahlung entsteht, wenn sich geladene Teilchen durch ein Medium mit einer größeren Geschwindigkeit bewegen, als die Lichtgeschwindigkeit

im betreffenden Medium beträgt (im Wasser: 2/3 der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum). Drei empfindliche Photosensoren pro Tank registrieren die Lichtblitze und die angeschlossene Elektronik digitalisiert die Daten mit einer Abtastrate von 40 MHz.

Die Detektortanks sind vollständig autonome Stationen mit eigener Energieversorgung über Solarzellen und Autobatterien. Die Kommunikation mit der Datenerfassungszentrale im „Central Campus“ in Malargüe erfolgt über Mikrowellen-Funkstrecken.

Die Kalibration der Detektordaten erfolgt über bekannte Werte von Signalen, die durch sehr häufig vorkommende unkorrelierte Myonen der kosmischen Strahlung in den Tanks erzeugt werden. Hochenergetische ausgedehnte Luftschauer werden am räumlich und zeitlich koinzidenten Auftreten in mehreren Tanks erkannt. Die Identifikation erfolgt über eine von GPS-Signalen gesteuerte Uhr in jedem Detektor. Registriert die zentrale Datenerfassung eine Koinzidenz mehrerer benachbarter Detektoren, wird die Auslese der Daten eingeleitet. Die zeitliche Abfolge der Detektorsignale ermöglicht die Rekonstruktion der Ankunftsrichtung der Schauer. Die Berechnung der Position des Schauerzentrums am Erdboden erfolgt aus der Verteilung der gemessenen Teilchendichten.

Durch die gute Zeitauflösung der Detektorsignale kann auch der zeitliche Verlauf des Luftschauers als Funktion des Abstands von der Schauerachse studiert werden. Dies erlaubt bis zu einem gewissen Grade die Identifizierung von My-



Abb. 2: Der Pierre Auger Central Campus in Malargüe enthält die zentrale Datenerfassung sowie Büroräume. Im Hintergrund der Turm für die Kommunikation mit den vier Teleskopgebäuden und den 1600 Wassertanks.

onen, die gleichzeitig mit einer vielfachen Menge von Elektronen im Luftschauer gebildet werden. Das Verhältnis von Myonen zu Elektronen ist ein Indikator für die Masse des Primärteilchens. Da erste Analysen gezeigt haben, dass über 90 % aller Primärteilchen Atomkerne sind, wird zunächst nur sehr grob in leichte Teilchen (Protonen) und schwere Teilchen (Eisenkerne) klassifiziert. Ein von einem Eisenkern als Primärteilchen ausgelöster Schauer enthält am Erdboden mehr Myonen als ein von einem Proton gleicher Energie ausgelöster Schauer.

Das Detektorfeld des Pierre-Auger-Observatoriums in Argentinien registriert Ereignisse für Zenitwinkel von 0 Grad (senkrecht) bis 90 Grad (horizontal). Das führt dazu, dass die Sekundärteilchen der Luftschauer in sehr unterschiedlichen Entwicklungsstadien der Schauer gemessen werden: Bei senkrechtem Einfall muss die Teilchenlawine eine Luftschichtdicke (ausgedrückt als Masse pro Flächeneinheit) von etwa 850 g/cm^2 durchdringen, während bei 60 Grad Zenitwinkel bereits die doppelte Schichtdicke und bei horizontalen Schauern sogar die 30-fache Schichtdicke durchdrungen werden muss. Systematische Unsicherheiten in der Berechnung der Schauerentwicklung wirken sich für Schauer mit großen Zenitwinkeln daher wesentlich stärker aus. Daher werden bei der Rekonstruktion und Datenanalyse nur Ereignisse bis 60 Grad routinemäßig verarbeitet, während die „flachen“ oder gar fast horizontalen Schauer mit speziellen Programmen separat analysiert werden.



Abb. 3: Ein mit zwölf Tonnen ultrareinem Wasser gefüllter Detektor-tank. Im Hintergrund auf dem Hügel das erste Teleskopgebäude „Los Leones“.

Die Fluoreszenz-teleskope

In vier Gebäuden auf Hügeln am Rande des Detektorfeldes beobachten jeweils sechs Fluoreszenz-teleskope in klaren Nächten (10 % bis 15 % der Messzeit) den Himmel über dem gesamten Detektorfeld.

Diese Teleskope haben eine Schmidt-Optik mit einer effektiven Öffnung von ca. 3 m^2 , einer ring-

förmigen Korrekturlinse und einem 14 m^2 großen sphärischen Spiegel mit $3,4 \text{ m}$ Radius. Dieses Design zeichnet sich durch ein großes Gesichtsfeld von 30×30 Grad pro Teleskop aus mit einer hinreichend guten optischen Abbildungsqualität.

Ein Pixel-Array mit 440 Photosensoren (PMTs) registriert die Leuchtspuren der Schauer mit einer Bildfolgefrequenz von 10 Millionen Bil-

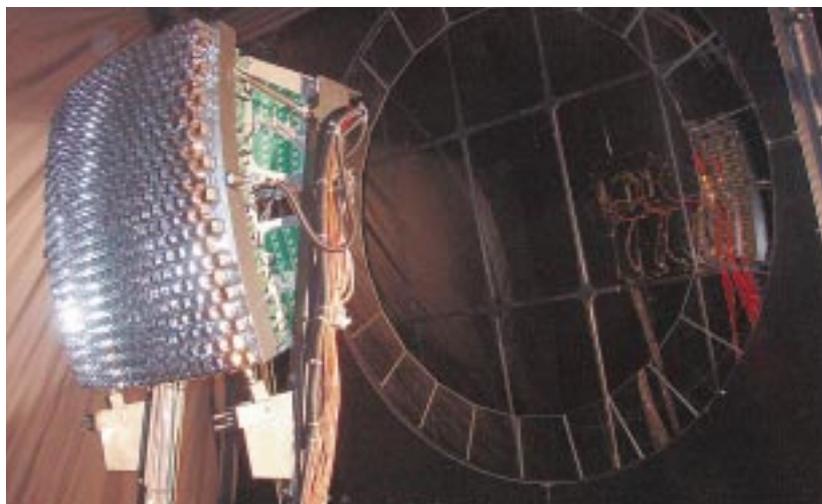


Abb. 4: Blick auf eine Pixelkamera mit 440 PMTs und die ringförmige Korrekturlinse. Die Rückseite der Kamera spiegelt sich in der UV-Filterscheibe.

der pro Sekunde. Ein Eintrittsfenster aus UV-transparentem Filterglas verbessert das Signal-zu-Rausch-Verhältnis durch Reduzierung des langwelligen Streulichts von Sternen und künstlichen Lichtquellen.

Die Pixelmuster der PMT-Kameras werden mit Hilfe einer schnellen Triggerelektronik online nach typischen Schauerspuren durchsucht und beim Vorliegen von eindeutigen Schauereignissen ausgelesen. Die Daten der Teleskope werden nach schneller (Online-)Vorauswertung an die Zentrale übertragen und dort mit den Daten der Wassertanks korreliert. Dazu ist es notwendig, auch in den Teleskopgebäuden die gleichen GPS-Empfänger wie bei den Wassertanks zu verwenden und den Mess-

daten die entsprechenden Zeitmarken zu geben. Die allermeisten von den Teleskopen aufgenommenen hochenergetischen Schauer werden auch im Detektorfeld registriert (Hybrid-Ereignisse).

Die hohe Empfindlichkeit der Fluoreszenzteleskope ermöglicht die präzise Messung hochenergetischer Luftschauer bis zu einer Entfernung von mehr als 40 km. Dadurch können mit zwei oder mehr Teleskopen in den jeweils ca. 45 km von einander entfernten Fluoreszenz-Stationen diese Schauereignisse im „Stereo-Modus“ beobachtet werden. Dieser ermöglicht eine genauere Festlegung der Schauergeometrie und eine Überprüfung der in der Ereignis-Rekonstruktion angenommenen Transparenz der Atmosphäre.

Zur Kalibration der Fluoreszenzteleskope werden regelmäßig UV-Laserpulse bekannter Intensität von einer zentralen Stelle im Detektorfeld in den Nachthimmel geschossen und das gestreute Laserlicht in den Teleskopen nachgewiesen. Die direkte Messung der Empfindlichkeit der Teleskope erfolgt im Teleskopgebäude selbst durch eine großflächige, homogene und isotrope, absolut geeichte Lichtquelle, die in regelmäßigen Zeitabständen auf die Eintrittsöffnung der Teleskope aufgesetzt wird, wodurch die PMT-Kamera kalibriert wird.

Zwischen diesen Absoluteichungen wird die relative Änderung der Kameraempfindlichkeit täglich mit gepulsten UV-Lichtquellen im Zentrum der Spiegel gemessen. Die Stabilität dieser Lichtquellen wird von kalibrierten Photodioden überwacht.

Wegen der großen Entfernungen zu den vier Teleskopgebäuden und den damit verbundenen sehr langen Anfahrtszeiten von der Zentrale in Malargüe erfolgt der Betrieb der Teleskope nahezu vollautomatisch, mit einer sehr sicheren Methode ferngesteuert und überwacht.

Dazu dient ein Slow-Control-System auf Profibus-Basis, wie es weltweit auch zur Steuerung und Überwachung von Industrieanlagen eingesetzt wird. Es ermöglicht die Zustandsdiagnose und den Betrieb der Teleskope sowie die Überwachung vieler Parameter der gesamten Messanordnungen und ihrer Umgebung wie Wetterdaten, Lichtpegel, etc. über das Internet.

Da in dieser Region Argentiniens Stromausfälle nicht selten sind, muss z. B. sichergestellt sein, dass alle Systeme dabei ordnungsgemäß ihren Betrieb beenden und nach dem Ausfall auch selbstständig wieder in normalen Betrieb übergehen.

Die Atmosphäre über Malargüe

Vergleicht man die Untersuchung der höchstenergetischen kosmischen Strahlung durch den Nachweis von ausgedehnten Luftschauern mit einem Experiment an einem Beschleuniger, so wird deutlich, dass die Atmosphäre ein wichtiger Bestandteil des Experiments ist. Anders als an einem Beschleuniger zeigt dieses „Target“ starke Dichtevariationen zum Beispiel im Tagesgang und im jahreszeitlichen Verlauf. Diese beeinflussen die Entwicklung der Luftschauer sowie die Streuung und räumliche Verteilung der Sekundärteilchen. Auch kurzzeitige Wetterereignisse ver-



Abb. 5: Die PMT-Kameras stehen in der Brennebene der sphärischen Spiegel. An der Rückseite und am Fuß der Kamera ist die Elektronik zur schnellen Bildverarbeitung zu sehen.

ändern sowohl die Dichte der Luft als auch ihre Transparenz für das Fluoreszenzlicht. Um die Eigenschaften der Primärstrahlung mit hoher Genauigkeit rekonstruieren zu können, muss neben den Detektoren auch der Zustand der Atmosphäre vor Ort zu jeder Zeit gut bekannt sein.

Zu diesem Zweck betreibt die Pierre-Auger-Kollaboration eine Vielzahl von Messgeräten. Wolkencameras auf jedem Teleskopgebäude überwachen den Himmel im Infrarotbereich. Sternmonitore (Weitwinkel-CCD-Kameras) messen die Lichtintensität vieler bekannter Sterne und schließen daraus auf die Klarheit der Atmosphäre in vertikaler Richtung. Ähnliche Zwecke verfolgen horizontale Monitore, die über Strecken von etwa 50 km bei mehreren Wellenlängen die Lichtabschwächung messen. Die Dichte und Art von Aerosolen in der bodennahen Atmosphäre werden durch Messung der winkelabhängigen Streuung von UV-Licht bestimmt. Die aufwändigste und leistungsfähigste Methode zur Messung der optischen Eigenschaften der Atmosphäre ist der Einsatz von LIDAR-Systemen bei jedem Teleskopgebäude. Dabei wird ein gepulster Laserstrahl in eine bestimmte Richtung emittiert und das in der Atmosphäre zurückgestreute Licht zeitaufgelöst mit einem kleinen Spiegelteleskop gemessen. Durch die gezielte Winkelsteuerung des LIDAR-Strahls ist es möglich, nach einem von den Fluoreszenzteleskopen aufgenommenen Schauerereignis genau den Bereich der Atmosphäre optisch zu vermessen, in dem der Schauer sich entwickelt hat.

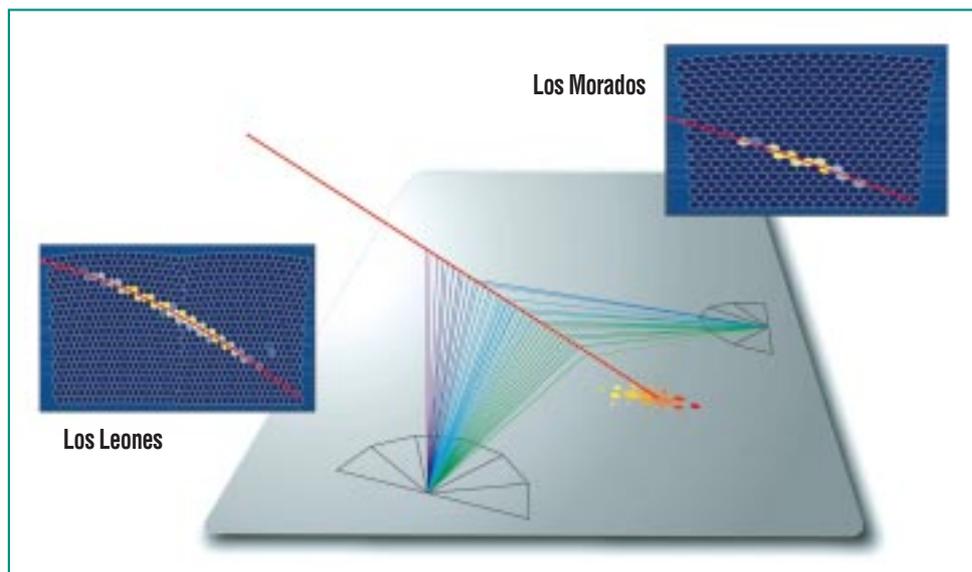


Abb. 6: Ein mit drei Kameras in zwei Teleskopgebäuden und den Detektortanks gemessenes Stereo-Hybrid-Ereignis mit einer Energie von ca. 2×10^{19} eV. Die roten Linien zeigen die rekonstruierten Schauer-Trajektorien.

Alle diese Methoden liefern jedoch die für das Experiment wichtigen Dichte- und Temperaturprofile der lokalen Atmosphäre nur auf indirektem Weg. Daher werden über dem Detektorfeld regelmäßig Aufstiege von Wetterballonen durchgeführt, die mit Radiosonden bestückt sind. Diese messen Druck, Temperatur und Feuchte unmittelbar als Funktion der Höhe; aus der Abdrift der Sonden, die mit GPS gemessen werden kann, lässt sich auch die Windgeschwindigkeit bestimmen. Mit einer Vielzahl solcher gemessener Profile können mittlere monatliche Atmosphärenprofile für den Ort des Experiments konstruiert werden, die näher an der Realität sind als die allgemein verwendete Standardatmosphäre. Die Fluktuationen der realen Atmosphäre sind aber so groß, dass in der Kollaboration erwogen wird, nach jedem der sehr seltenen höchstenergetischen Ereignisse möglichst bald eine Radiosondie-

rung vorzunehmen, um die Rekonstruktion der Luftschauer zu optimieren.

Ausblick

Der weitere Aufbau des Observatoriums wird kontinuierlich fortgesetzt. Anfang März 2007 waren bereits ca. 1300 Wassertanks installiert. Etwa 1100 davon waren in die Datenaufnahme integriert. Diese Zahlen erhöhen sich von Woche zu Woche. Wegen der großen Entfernungen und schwierigen Zufahrten zu den Standorten ist die Anzahl der Detektoren, die installiert und mit hochreinem Wasser gefüllt werden können, auf etwa 10 Tanks pro Woche beschränkt. Daher wird das Detektorfeld erst im Spätjahr 2007 vollständig bestückt und in Betrieb sein.

Drei der Teleskopgebäude mit 18 Teleskopen sind bereits seit mehreren Jahren voll in das Experiment integriert. Das vierte Gebäu-

de wurde im September 2006 fertig gestellt und anschließend mit Teleskopen ausgerüstet. Die Installationsarbeiten zur Experimentkontrolle wurden im Februar 2007 erfolgreich abgeschlossen. Seither nehmen diese 6 Teleskope ebenfalls an der Datenaufnahme teil.

Die Pierre-Auger-Kollaboration hat beschlossen, das PAO-Südexperiment in den nächsten Jahren um ein verdichtetes Detektorfeld (25 km²) auszubauen, das mit weiteren, neuartigen Myonen-Detektoren ausgestattet wird. Drei zusätzliche spezielle Fluoreszenzteleskope sollen dieses Messfeld

beobachten. Mit diesem Ausbau soll im Energiebereich zwischen 10¹⁷ und 10¹⁸ eV ein weiterer Überlapp zum Messbereich des KASCADE-Grande-Experiments [4] erreicht werden, um den Übergang von galaktischer zu extragalaktischer kosmischer Strahlung mit unerreichter Präzision untersuchen zu können.

Im Jahr 2007 wird die Pierre-Auger-Kollaboration einen Design-Report und ein Proposal für das in den USA (Colorado) geplante Nord-Observatorium vorlegen, basierend auf den technischen Erfahrungen und den hervorragenden Daten des Süd-Experiments.

Die ersten wissenschaftlichen Ergebnisse des PAO in Argentinien werden in einem separaten Beitrag von M. Roth in dieser Ausgabe der „Nachrichten“ vorgestellt.

Literatur

[1] J. Blümer,
J. Phys. G 29 (2003) 867

[2] J. Abraham et al.,
Nucl. Instr. Meth. A 523 (2004) 50

[3] M. Nagano, A.A. Watson,
Rev. Mod. Phys. 72 (2000) 689

[4] A. Haungs,
*Forschungszentrum Karlsruhe –
Nachrichten, diese Ausgabe*