13. September 2001

Untersuchung von Elektronen im TESLA-Luminositätskalorimeter

Gunnar Klämke

Abschlussbericht zur Arbeit als Sommerstudent am
Deutschen Elektronensynchrotron in Zeuthen
vom 17.07. bis 17.09.2001

Zusammenfassung

Am Deutschen Elektronensynchrotron in Hamburg ist der Bau eines Linearcolliders (TESLA) für Elektronen und Positronen mit einer Schwerpunktsenergie von 500 GeV geplant. Der Entwurf des Teilchendetektors beinhaltet ein Kalorimeter in Vorwärts- und Rückwärtsrichtung in unmittelbarer Umgebung des Strahlrohrs, das Luminositätskalorimeter. Es dient zum Nachweis der Beamstrahlung. In dieser Arbeit wurde untersucht, ob trotz der intensiven Beamstrahlung noch einzelne hochenergetische Elektronen und Positronen nachgewiesen werden können.

1 Einleitung

1.1 Was ist TESLA

In internationaler Zusammenarbeit plant das DESY den neuen e^+e^--Linearbeschleuniger TESLA (TeV-Energy Superconducting Linear Accelerator). Auf einer Strecke von insgesamt 33 km Länge werden hier Elektronen und Positronen auf eine Schwerpunktsenergie von 500 GeV beschleunigt und zur Kollision gebracht.

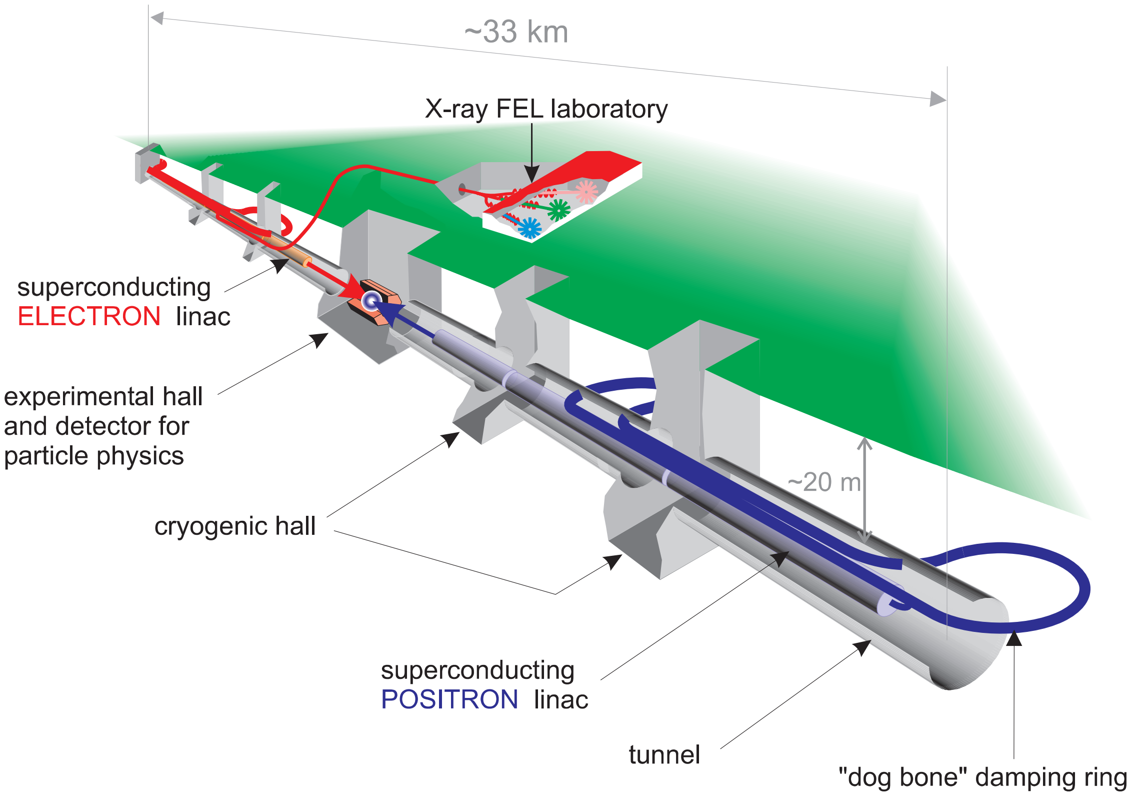

Abbildung 1: *Schema der TESLA - Anlage*

1.2 Das LCAL

In der Mitte der Strecke befindet sich die Experimentierhalle mit dem Detektor. Hier werden die Reaktionen zwischen den Elektronen und Positronen nachgewiesen und vermessen. Eine zentrale Rolle in meiner Arbeit spielt das sogenannte Luminositätskalorimeter (LCAL). Es ist Teil des Detektors und befindet sich 2.20 m vom Vertex entfernt direkt am Strahlrohr. Das LCAL dient im wesentlichen zur Messung der Energie der Beamstrahlung.

1.3 Strahlparameter und Beamstrahlung

Die Elektronen und Positronen werden als Teilchenstrahl in Form von sogenannten Pulszügen beschleunigt. Jeder dieser Züge besteht aus einer Kette von Teilchenpaketen, von denen je-

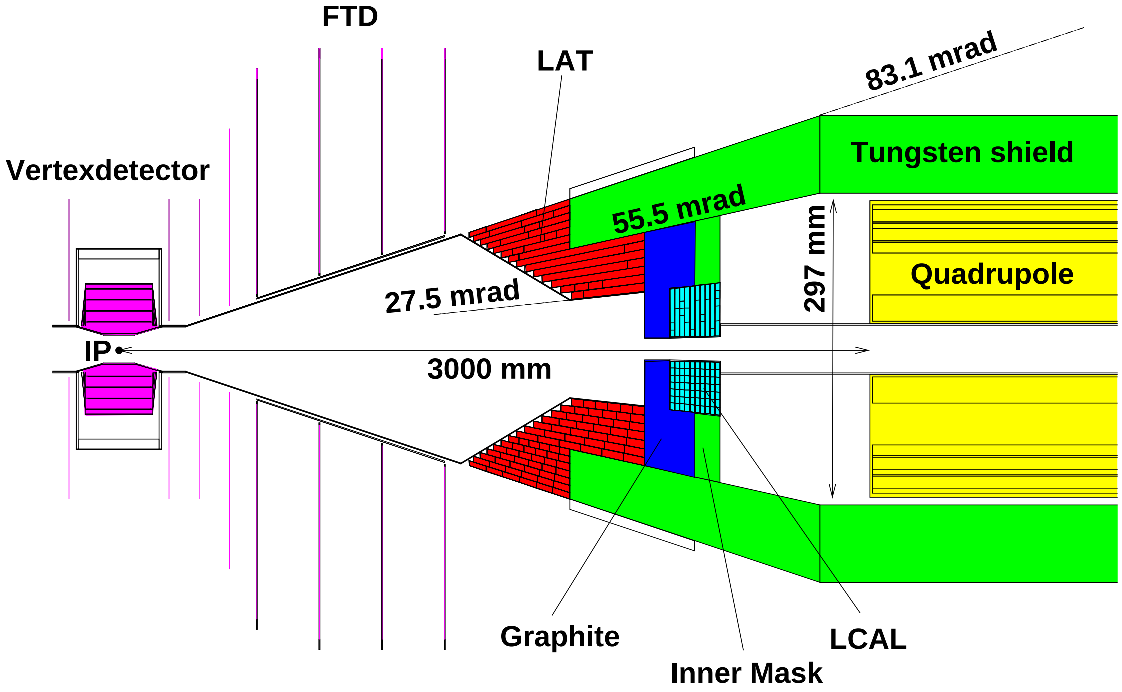

Abbildung 2: *Design des Vorwärtsbereiches mit dem LCAL (Man beachte die unterschiedlichen Skalen horizontal und vertikal.)*

des etwa 20 Milliarden Elektronen bzw. Positronen enthält. Bei der Kollision entsteht nun ein intensiver Untergrund von e^+e^--Paaren, sogenannte Beamstrahlung: Die hohe Ladungsdichte in den Paketen erzeugt starke elektromagnetische Felder, welche die Teilchen des entgegenkommenden Strahls ablenken. Dieser sogenannte Pinch-Effekt bewirkt zwar eine Erhöhung der Luminosität, aber auch die Emission von Beamstrahlungsphotonen. Durch die Wechselwirkung dieser Photonen mit dem Feld des entgegenkommenden Paketes werden dann e^+e^--Paare mit typischen Energien von wenigen GeV erzeugt (etwa 128000 geladene Teilchen pro Kollision). Eine besondere Rolle spielt die Tatsache, dass sich die Beamstrahlung in einem sehr kleinen Winkelbereich um die Strahlachse konzentriert. Der Detekor ist nun so konzipiert, dass das LCAL genau jenen Winkelbereich (den vom Strahlrohr selbst ausgenommen) von 4.6 mrad bis 27.5 mrad abdeckt. (siehe Abb. 2)

Parameter		Wert
Schwerpunktsenergie	[GeV]	500
Luminosität	$[10^{34}\mathrm{cm}^{-2}\mathrm{s}^{-1}]$	3.4
Pulszüge pro Sekunde		5
Pakete pro Pulszug		2820
Paketgröße σ_x/σ_y	[nm]	553 / 5
Paketlänge σ_z	[μm]	300
Anzahl Teilchen pro Paket		$2 \cdot 10^{10}$

Tabelle 1: *Einige Strahlparameter*

2 Einfluß der Strahlparameter auf die Beamstrahlung

Als eine Art Vorbetrachtung habe ich den Einfluss einiger Strahlparameter auf die Verteilung der Beamstrahlung an der LCAL-Front untersucht.

Für die Generierung der Beamstrahlung wurde GUINEA-PIG verwendet. Dieses Programm simuliert die Entstehung von e^+e^--Paaren in Abhängigkeit der Strahlparameter. GUINEA-PIG gibt dabei eine Datei namens 'pairs.dat' aus, in welcher Ort, Impuls und Energie der Beamstrahlungsteilchen abgespeichert sind. Aus diesen Daten lässt sich dann die Verteilung der Beamstrahlung am Ort der LCAL-Front (220 cm vom Vertex entfernt) berechnen und auswerten, wobei noch die Ablenkung der Teilchen im Feld des Magneten berücksichtigt werden muss. Abbildung 3 zeigt die Energieverteilung der Beamstrahlung für die Strahlparamter, wie sie im TDR zu finden sind (siehe Tabelle 1). Im radialen Profil ist deutlich die Kante bei R = 62 mm zu erkennen, welches der äußere Radius des Kalorimeters ist. Im X-Y Profil ist die asymmetrische Verteilung der Beamstrahlung auffällig, was auf den elliptischen Strahlquerschnitt zurückzuführen ist.

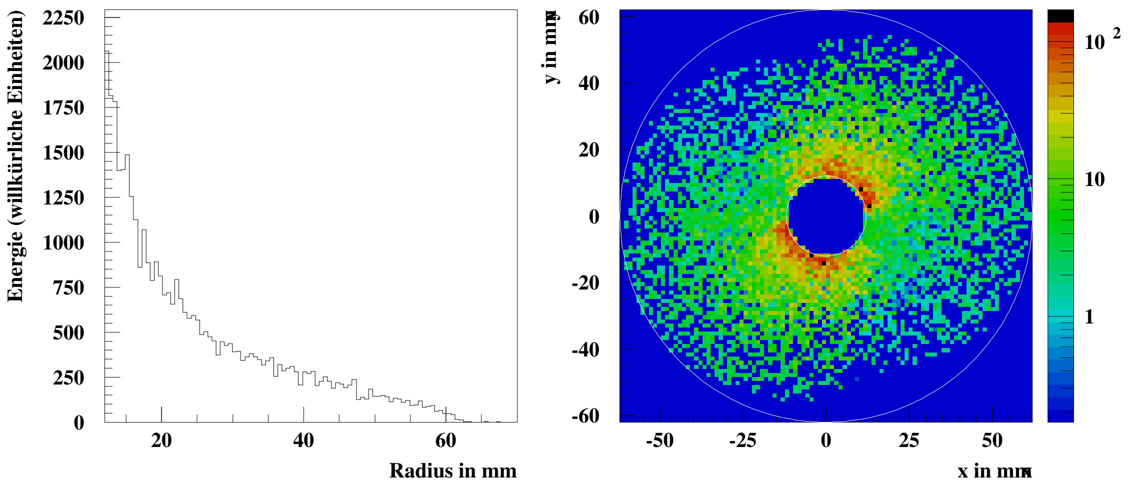

Abbildung 3: *Die Energieverteilung der Beamstrahlung an der Frontfläche des LCAL. links: das radiale Profil; rechts: das XY-Profil, die Kreise markieren den inneren und äußeren Radius des LCAL. (Man beachte die logarithmische Farbskala)*

Bei der Variation der Strahlparameter bin ich auf folgenden interessanten Aspekt gestoßen: Der Radius der Kante im radialen Profil der Energieverteilung ist nicht unabhängig von den Strahlparametern, sondern hängt u.a. von der Anzahl der Teilchen in einem Paket sowie von dessen Größe ab. Abbildung 4 verdeutlicht dies für verschiedene Teilchenzahlen pro Paket. Offensichtlich wird mit zunehmender Teilchenzahl die Kante nach außen hin verschoben. Um dies genauer analysieren zu können, ist es notwendig, den Radius der Kante

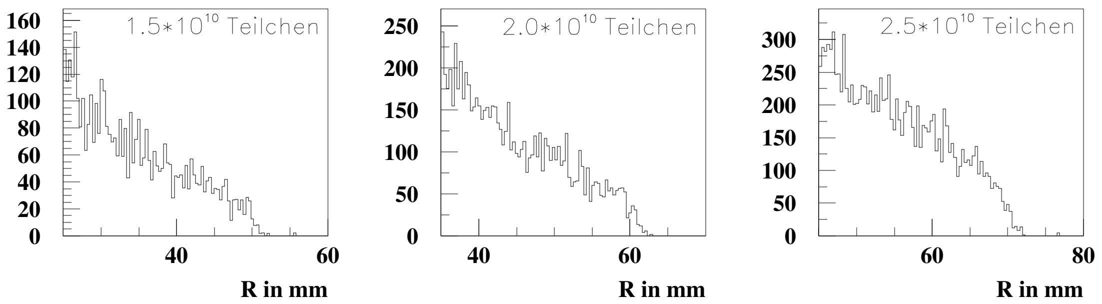

Abbildung 4: *Die Kante der radialen Energieverteilung für verschiedene Teilchenzahlen pro Paket.*

zu bestimmen. Dazu habe ich eine geeignete Stufenfunktion an das Profil in der Umgebung der Kante angepasst. Die Funktion die ich benutzt habe, ist die folgende:

$$\begin{aligned} F(y) &= P(y) \cdot S(y) \\ \text{mit} \qquad y &= b \cdot (R - a) \\ S(y) &= (1 + \mathrm{e}^{y})^{-1} \end{aligned}$$

Dabei ist $P(y)$ ein Polynom dritten Grades und R der Radius. a und b geben die Position und Breite der Stufe an.
Mit Hilfe dieses Verfahrens konnte ich den Stufenradius für verschiedene Einstellungen des Strahls bestimmen. Das Ergebnis ist in den Abbildungen 5, 6 und 7 dargestellt.
Zusammengefasst bewirkt eine Veringerung der Länge σ_z oder der Breite σ_x sowie eine Erhöhung der Teilchenzahl in den Paketen, dass der Radius der Kante größer wird. Eine Veringerung der vertikalen Ausdehnung σ_y hat allerdings keinen Effekt auf den Stufenradius.

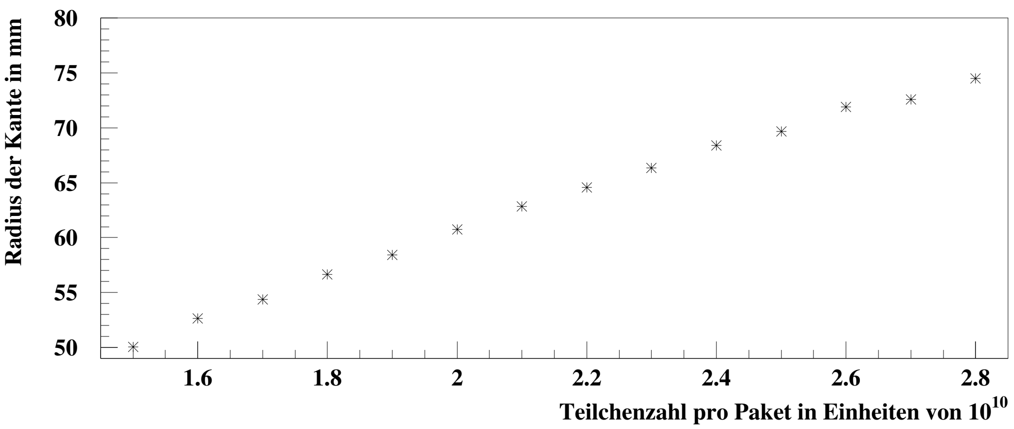

Abbildung 5: *Der Radius der Kante für verschiedene Teilchenzahlen pro Paket.*

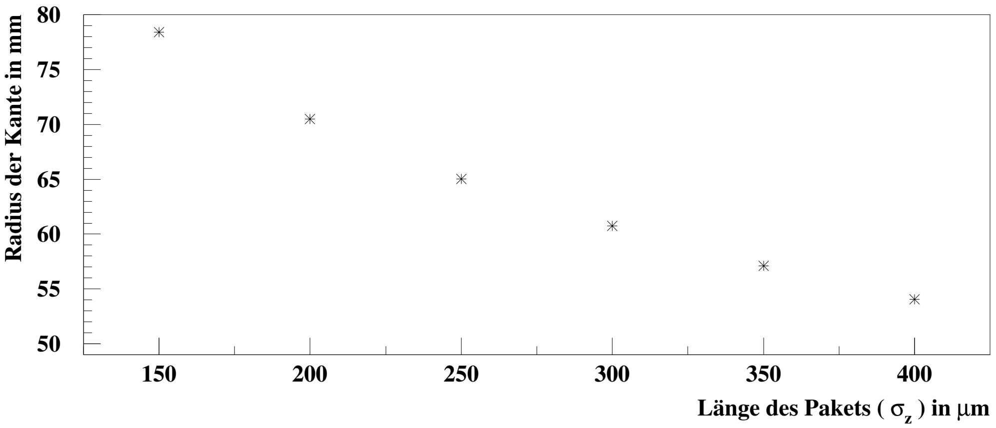

Abbildung 6: *Der Radius der Kante für verschiedene Längen σ_z der Pakete.*

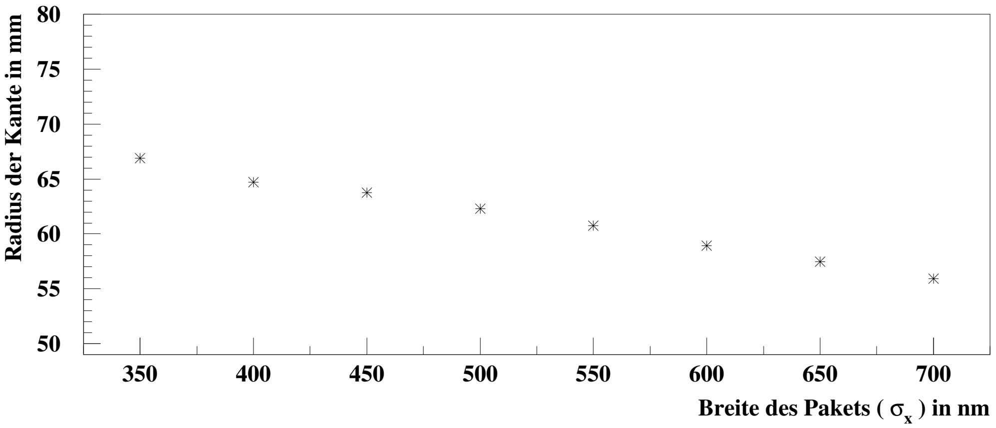

Abbildung 7: *Der Radius der Kante für verschiedene Breiten σ_x der Pakete.*

3 Die Analyse

3.1 Problemstellung

Das Luminositätskalorimeter hat die Aufgabe, den Beamstrahlungsuntergrund zu vermessen. Es stellt sich jedoch die Frage, ob es darüber hinaus möglich ist, einzelne hochenergetische Elektronen und Positronen z.B. aus Zwei-Photon-Streuung zu detektieren. Diese stellen für viele Prozesse mit fehlender Energie einen schwer zu beherrschenden Untergrund dar.
Aufgabenstellung ist es nun, die Verteilung der Energiedepositionen von Beamstrahlung und einzelnen hochenergetischen Elektronen im LCAL zu simulieren. Dabei soll ein homogenes Kristallkalorimeter bestehend aus Bleiwolframat ($PbWO_4$) betrachet, und unterschiedliche Segmentierungen ausprobiert werden. Desweiteren gilt es, Algorithmen zur Identifikation der hochenergetischen Elektronen und Positronen im Beamstrahlungsuntergrund zu entwickeln und zu testen.

3.2 Simulation der Wechselwirkung im LCAL

Die Absorption der Beamstrahlungsteilchen und einzelner hochenergetischer Teilchen im LCAL wurde mit dem auf GEANT basierende Programm BRAHMS simuliert. Dafür müssen in BRAHMS zunächst erst einmal die Geometriedaten des Detektors definiert werden. Die Daten der LCAL-Geometrie, wie sie bei der Simulation verwendet wurden, sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Wie man sieht, wurde die Segmentierung des LCAL sehr fein gewählt. Der Grund dafür ist die lange Rechenzeit, die BRAHMS für die Simulation eines Ereignisses benötigt (etwa 2-3 Tage). Da man aber verschiedene Segmentierungen ausprobieren möchte, ist es sinnvoller bei der Simulation eine feine Segmentierung zu verwenden. So ist es möglich, mit den Daten von nur einer Simulation verschiedene Segmentierungen zu testen, in dem man die Energiedepositionen in den Segmenten geeignet aufsummiert und zusammenfasst.

allgemeine Geometriedaten :	
Abstand der Front zum Vertex	220 cm
abgedeckter Winkelbereich	4.6 mrad bis 27.5 mrad
innerer Radius der Front	12 mm
äußerer Radius der Front	62 mm
Länge	20 cm
Daten zur Segmentierung :	
Anzahl der Segmente in z-Richtung	50
Anzahl der Segmente in radialer Richtung	50
Anzahl der azimutalen Sektoren	100
Daten zum Material $PbWO_4$:	
mittleres Atomgewicht	170.87 u
mittlere Kernladungszahl	68.36
Dichte	$8.30 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$
Strahlungslänge	0.89 cm
Molière Radius	2.19 cm

Tabelle 2: *Daten der Geometrie, der Segmentierung und des Materials des LCAL, wie sie bei der Simulation in BRAHMS verwendet wurden.*

Als Eingabe für die Simulation der Beamstrahlungsteilchen wird die von GUINEA-PIG produzierte 'pairs.dat' - Datei verwendet. Die hochenergetischen Elektronen und Positronen können mit BRAHMS selbst erzeugt werden, so dass man für diese keine extra Eingabedatei benötigt. Das Ergebnis der Simulation wird in einer HBOOK - Datei namens 'histos' ausgegeben.

In einem nächsten Schritt werden aus den Daten der Simulation die Daten berechnet, die einer vorgegebenen Segmentierung entsprechen. Dies geschieht mit Hilfe des Konvertierungsprogrammes 'readhistos.run'. Das Programm fasst dabei die Daten mehrerer Simulationen bzw. Ereignisse (sowohl von Beamstrahlung als auch von hochenergetischen Elektronen/Positronen) zusammen. Es erzeugt daraus eine neue Ausgabedatei, in welcher die konvertierten Daten in Form eines kompakten HBOOK - Ntuples abgelegt sind. Zu dem Programm gehört eine Datei namens 'readhistos.opt', in welcher die gewünschte Segmentierung, sowie die Namen der Eingabedateien spezifiziert werden.

3.3 Algorithmen

Im folgenden sollen kurz zwei mögliche Algorithmen zur Identifikation der hochenergetischen Elektronen bzw. Positronen im Beamstrahlungsuntergrund vorgestellt werden.
Algorithmus 1 : Eine erste Idee ist, die Symmetrie der Beamstrahlungsverteilung (siehe Abbildung 3) auszunutzen. Der Algorithmus besteht darin, von der Energiedeposition in einem Segment den Wert der Energie zu subtrahieren, welche (in Bezug auf die Längsachse des LCAL) im gegenüberliegenden Segment deponiert wurde. Anschließend werden die Energiedepositionen je zweier benachbarter Segmente einer Schicht (d.h. im selben z-Segment) aufaddiert, und mit einem Schwellenwert verglichen. Danach wird geprüft, ob die Verteilung der Segmente, bei denen der Wert über der Schwelle lag, mit dem Signal eines hochenergetischen Elektrons oder Positrons vereinbar ist.
Algorithmus 2 : Da die Form der Energieverteilung der Beamstrahlung im LCAL nur geringen statistischen Schwankungen unterliegt, besteht eine weitere Möglichkeit darin, die Energie eines anderen Beamstrahlungsereingisses abzuziehen. Dabei muss beachtet werden, dass die Gesamtenergiedeposition der Beamstrahlung nicht den gleichen Wert für alle Ereignisse hat. Dies kann man durch eine geeignete Skalierung berücksichtigen. Nach dem Abziehen, wird dann so wie in Algorithmus 1 weiter verfahren.
Weitere Ansätze für Algorithmen wären zum einen das Abziehen der Verteilung des gegenüberliegenden LCALs, sowie eine vollständige Parametrisierung der Energiedeposition der Beamstrahlung im LCAL.

3.4 Vorläufige Resultate

Für die Auswertung und graphische Darstellung der Simulationsergebnisse wurde PAW verwendet. Die Algorithmen zur Identifikation der hochenergetischen Elektronen und Positronen wurden dabei in Form von PAW-Macros implementiert.
Es wurde eine Segmentierung untersucht, die aus 5 Schichten (d.h. Segmente in z-Richtung) und aus 6 Ringen (d.h. Segmente in radialer Richtung) besteht. Die Segmentierung in z-Richtung wurde dabei nicht-äquidistant gewählt: Das letze Segment ist deutlich dicker als die anderen vier (Zahlenwerte siehe Abbildungen 9 - 12), was durch die relativ geringe Energiedeposition im hinteren LCAL-Bereich motiviert ist (siehe Abbildung 8). Unter der Voraussetzung konstanter Strahlparameter, wurden nun die zwei bereits vorgestellten Algorithmen getestet. Dazu wurden mit BRAHMS 20 Beamstrahlungsereignisse, sowie jeweils etwa 150-200 Ereignisse von hochenergetischen Elektronen verschiedener Energien simuliert. In Tabelle 3 ist dargestellt, wieviel Prozent der hochenergetischen Elektronen durch die

Energie	Algorithmus 1	Algorithmus 2
250 GeV	84%	82%
200 GeV	77%	76%
150 GeV	80%	78%
100 GeV	64%	63%

Tabelle 3: *Die Effizienz der beiden untersuchten Algorithmen für ein zufällig gewähltes Beamstrahlungsereignis.*

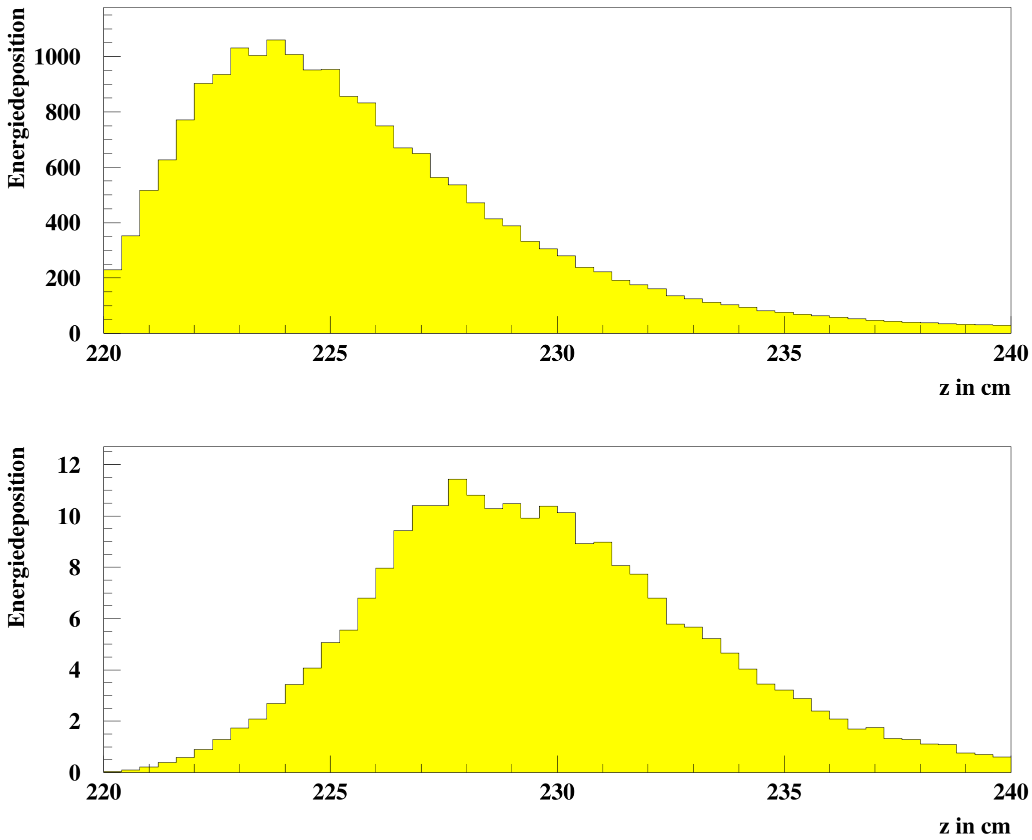

Abbildung 8: *Die longitudinale Verteilung der Energiedeposition im LCAL von Beamstrahlung (oben) und eines einzelnen 250 GeV Elektrons (unten).*

beiden Algorithmen gefunden wurden. Desweiteren wurde getestet, ob die Algorithmen bei Ereignissen ohne hochenergetisches Elektron falsche Ergebnisse liefern. In Bezug auf Algorithmus 1, war dies für die 20 Beamstrahlungsereignisse nicht der Fall. Dies gilt ebenso für Algorithmus 2, hier wurden jedoch alle 380 Kombinationen von je zwei Ereignissen getestet.

Obgleich die Zahl der simulierten Ereignisse noch sehr gering ist und entsprechend wenig Statistik zur Verfügung steht, zeigt die Untersuchung, dass es prinzipiell möglich ist, hochenergetische Elektronen und Positronen im Beamstrahlungsuntergrund zu identifizieren.

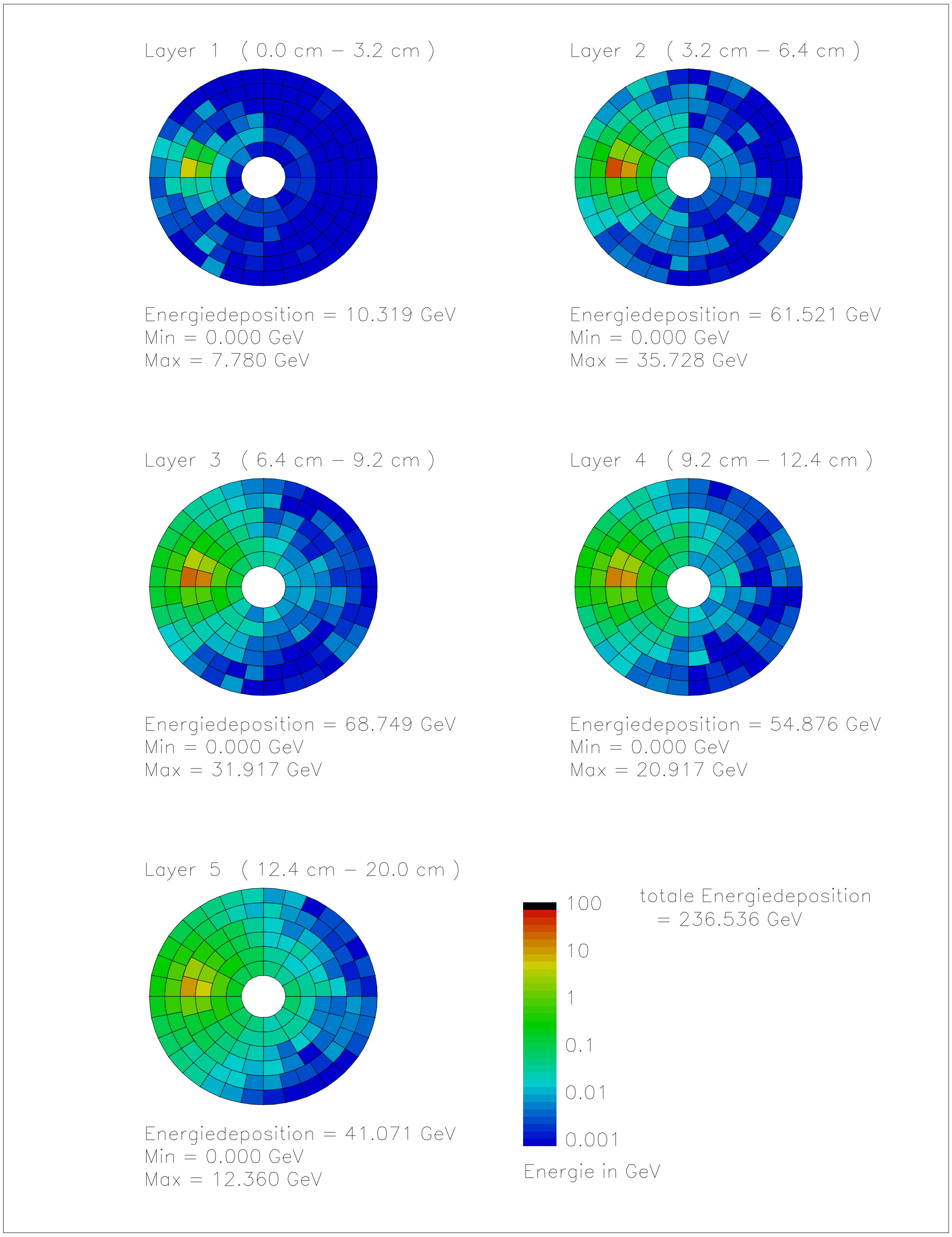

Abbildung 9: *Die Energiedeposition eines einzelnen 250 GeV Elektrons im LCAL (ohne Beamstrahlungsuntergrund).*

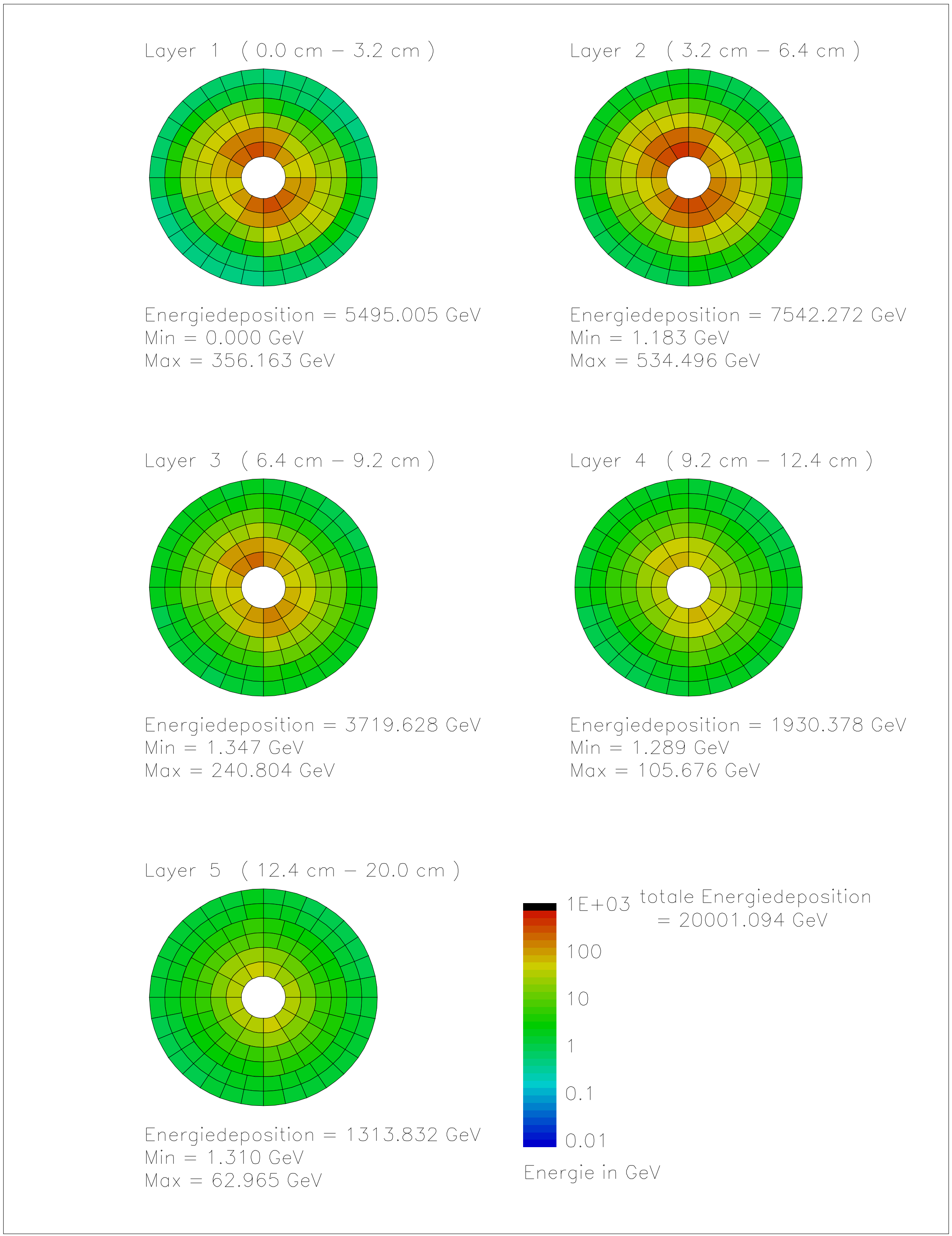

Abbildung 10: *Die Energiedeposition der Beamstrahlung im LCAL. (Man beachte die veränderte Energieskale gegenüber Abb. 9.)*

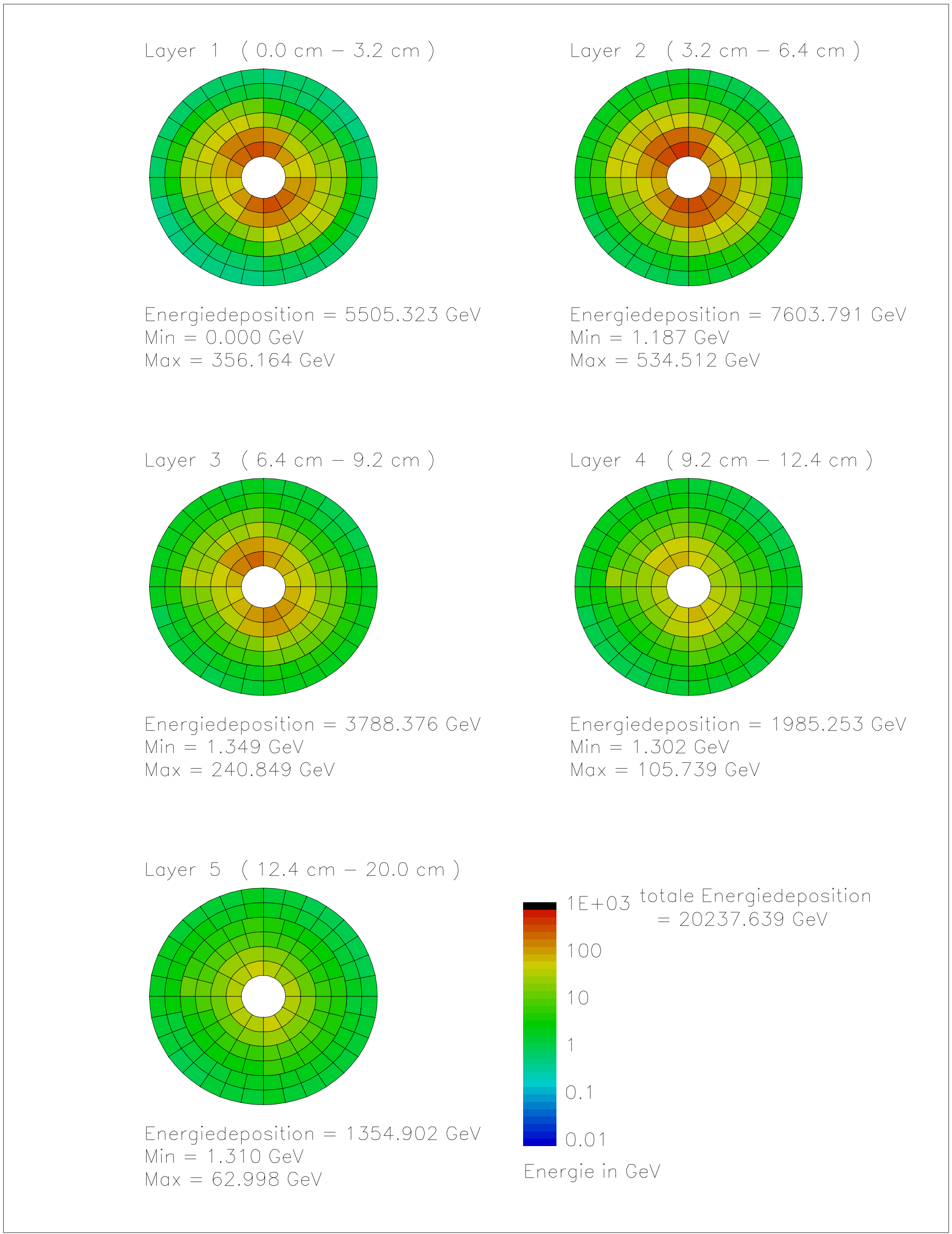

Abbildung 11: *Die Energiedeposition eines einzelnen 250 GeV Elektrons (das gleiche wie in Abb. 9) mit Beamstrahlung.*

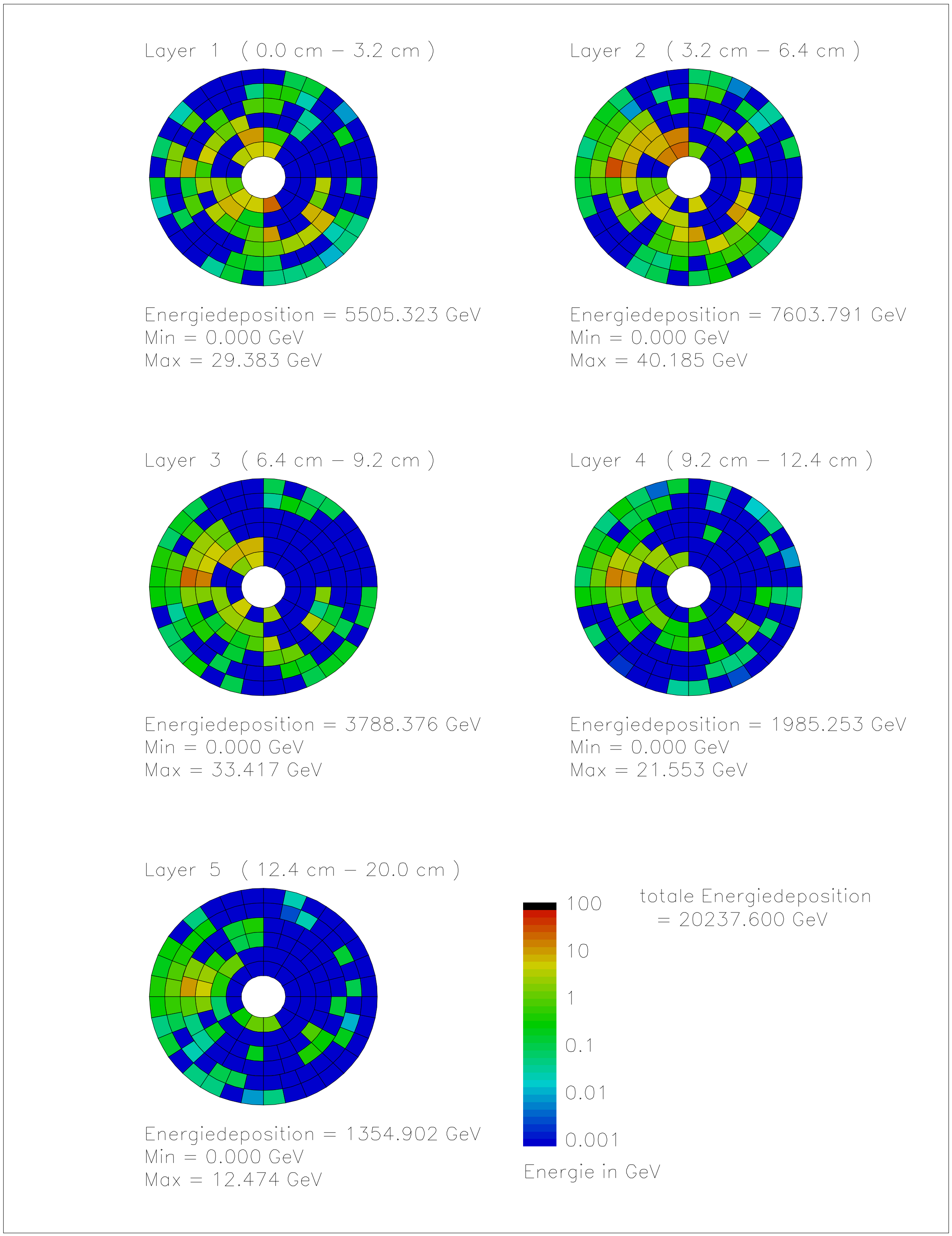

Abbildung 12: *Energieverteilung des 250 GeV Elektrons aus Abb. 9 mit Beamstrahlungsuntergrund nach dem Abziehen eines anderen Beamstrahlungsereignisses. (Algorithmus 2)*