

Studien zu Qualitätsparametern der neuen Oberflächendetektorelektronik des Pierre-Auger-Observatoriums

Bachelor-Arbeit
zur Erlangung des akademischen Grades
Bachelor of Science
(B.Sc.)

der Universität Siegen



Department Physik

Vorgelegt von
Sonja Timmermann

November 2018

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Die kosmische Strahlung	3
2.1. Die Entdeckung der kosmischen Strahlung	3
2.2. Das Spektrum der Primärteilchen	4
2.2.1. Der Ursprung und die Beschleunigungsmechanismen der Primärteilchen	5
2.3. Die Ausbreitung der Schauer in der Atmosphäre	7
2.3.1. Elektromagnetische Schauer	8
2.3.2. Hadronische Schauer	9
2.4. Der Nachweis geladener Teilchen	10
2.4.1. Die Cherenkov-Strahlung	11
2.4.2. Die Fluoreszenz	12
3. Das Pierre-Auger-Observatorium	13
3.1. Das Konzept	13
3.1.1. Der Oberflächendetektor des Pierre-Auger-Observatoriums	13
3.1.2. Der Fluoreszenzdetektor des Pierre-Auger-Observatoriums	15
3.2. Die Ergebnisse bisheriger Messungen am Pierre-Auger-Observatorium	15
3.3. Die Rekonstruktion des Schauers	17
3.3.1. Die Bedeutung der myonischen Schauerkomponente	18
3.4. AugerPrime	18
3.4.1. Die Realisierung des Upgrades	20
4. Das Testsystem	23
4.1. Die Anforderungen an das Testsystem	23
4.2. Das UUB als Testobjekt	23
4.3. Die Funktionsweise des Testsystems	25
4.4. Die Komponenten des Testsystems	25
4.4.1. Die Powerkarte	25
4.4.2. Die DAC-Karte	26
4.4.3. Der Einplatinencomputer	27
4.4.4. Das USB-Messsystem	27
4.5. Die Testabläufe	27
4.6. Das Programm Pulseanalyzer	29
4.6.1. Der grundlegende Aufbau	31
4.6.2. Der Programmablauf	31

4.6.3. Die Entscheidung	41
5. Die Bestimmung der Cut-Parameter-Grenzen anhand eines Dauertests	43
5.1. Die Beschreibung des Datensatzes	43
5.2. Die Festlegung der Cut-Parameter	44
5.3. Die Festlegung der Grenzen für die Cut-Parameter	45
5.3.1. Maximale relative Abweichung der Amplitude	46
5.3.2. Breite der Amplitudenverteilungen	62
5.3.3. Relative Abweichung der FWHM	63
5.3.4. Breite der FWHM-Verteilungen	65
5.3.5. Absolute Abweichung des Pedestals	67
5.3.6. Maximales RMS-Rauschen	68
5.3.7. Maximales Peak to Peak-Rauschen	71
5.3.8. Maximale relative Abweichung des Verstärkungsverhältnisses . . .	73
6. Zusammenfassung und Ausblick	75
A. Auswertungshistogramme UUB Dauertest	77
A.1. Amplitude	77
A.2. Breite	95
A.3. RMS-Rauschen	113
A.4. Peak to Peak-Rauschen	125
A.5. Pedestal	137
A.6. Verstärkungsverhältnis	149
B. Dokumentation der Analysen	153
C. Abkürzungen	159
D. Verwendete Geräte und Programme	161
E. Abbildungsverzeichnis	163
F. Tabellenverzeichnis	169
G. Literaturverzeichnis	171
H. Danksagung	177
I. Erklärung	179

1. Einleitung

Im Jahr 1912 führte der Physiker Victor Hess mehrere Ballonflüge durch, um die Höhenabhängigkeit der ionisierenden Strahlung in der Atmosphäre zu vermessen[1]. Er maß unabhängig von der Tageszeit einen Anstieg der Ionisationsrate mit zunehmender Höhe und kam zu dem Schluss, dass diese ionisierende Strahlung nicht terrestrischen Ursprung sei [2], weshalb sie später „Kosmische Strahlung“ genannt wurde.

Der Physiker Pierre Auger erlangte im Jahr 1938 weitere Erkenntnisse über die kosmische Strahlung, indem er die Spuren von Sekundärteilchen in Nebelkammern aufzeichnete und dabei auch bei großen Distanzen zwischen den Nebelkammern zeitliche Koinzidenzen ihrer Signale registrierte. Er folgerte, dass ein hochenergetisches Primärteilchen eine Kaskade von Sekundärteilchen in der Atmosphäre auslöst, die auf der Erde als Teilchenschauer ankommt[3].

Pierre Auger ist Namensgeber des Pierre-Auger-Observatoriums in der argentinischen Pampa. Dort betreibt eine internationale Kollaboration von Wissenschaftlern über 1600 Wasser-Cherenkov-Detektoren (WCD) auf einer Fläche von 3000 km^2 und 4 Stationen mit je 6 Fluoreszenzteleskopen, mit denen der Himmel über dem Detektor-Feld beobachtet wird [4]. Von besonderem Interesse ist es, Schauer, die von Primärteilchen höchster Energie ausgelöst wurden, aufzuzeichnen, um etwas über die Herkunft und Beschleunigungsmechanismen der Primärteilchen zu erfahren (siehe Abschnitt 2.2.1). Da das Energiespektrum der Primärteilchen steil abfällt, sind diese höchstenergetischen Ereignisse vergleichsweise selten. Aufgrund der großen Fläche des Pierre-Auger-Observatoriums können sie dennoch gemessen werden.

Nachdem bereits über mehrere Jahre erfolgreich Messungen durchgeführt wurden, wird nun ein Szintillations-Detektor (SSD) über jedem WCD angebracht. Da sich die Detektorantworten des SSDs auf die myonische und elektromagnetische Komponente des Schauers von der des WCD unterscheiden, kann damit die Anzahl der Myonen am Erdboden präziser gemessen werden. Diese gibt Aufschluss über die Energie des Primärteilchens (siehe Abschnitt 3.3.1). Darüberhinaus wird die gesamte Datennahmeelektronik jedes WCDs durch eine überarbeitete Version, das Upgraded Unified Board (UUB), ersetzt. Damit wird auch eine Verbesserung der Signalaufzeichnung und -verarbeitung erzielt, wodurch die Rekonstruktion der Schauer verbessert wird (siehe Abschnitt 3.4).

Da die WCDs 1,5 km voneinander entfernt stehen, sind sie sehr schwer zu warten und es ist wichtig, die UUBs bereits vor der Inbetriebnahme im Feld zu testen.

Die Arbeitsgruppe „Experimentelle Teilchenphysik“ der Universität Siegen entwickelt zu diesem Zweck ein Testsystem, das es erlaubt, mit minimaler Laborausstattung die Funktionalität eines UUBs zu testen. Dazu werden die wichtigsten Signale des WCDs emuliert, darunter auch analoge Spannungspulse, die denen eines Photonenvervielfachers des WCDs ähneln. Um die korrekte Signalverarbeitung des UUBs zu überprüfen, wird im

Rahmen einer Testroutine die Antwort der Elektronik mit dem Eingangssignal in das UUB verglichen, indem die gemessenen Pulse durch ausgewählte Parameter charakterisiert werden. Da ein Testdurchlauf aus 100 Pulsen besteht, ergibt sich für jeden Parameter eine Verteilung mit Mittelwert und Breite und zwar für jeden der zehn Kanäle des UUBs. Im Rahmen dieser Arbeit werden anhand der Daten einer Vielzahl von Testdurchläufen mit einem UUB-Prototypen Qualitätsparameter für die Wiedergabe der Pulse studiert. Ausgehend von diesem UUB-Prototypen werden für die Qualitätsparameter Grenzen festgelegt, anhand derer über das fehlerfreie Bestehen des Testdurchlaufs von ähnlichen UUBs entschieden werden kann.

2. Die kosmische Strahlung

Geladene Teilchen, die aus dem Universum die Erde erreichen, werden als kosmische Strahlung bezeichnet. Dabei wird zwischen primärer und sekundärer Strahlung unterschieden. Die primäre Strahlung bilden die hochenergetischen Teilchen, die aus dem Universum auf die Erdatmosphäre treffen. Durch Wechselwirkung mit der Atmosphäre werden weitere Teilchen erzeugt, die ihrerseits wechselwirken oder zerfallen können. Dadurch entsteht eine Kaskade von sekundären Teilchen, die kosmischer Teilchenschauer genannt wird. In diesem Kapitel werden die Entdeckung der kosmischen Strahlung, grundlegende Aspekte der Primärteilchen, sowie die Ausbreitung und der Nachweis der Teilchenschauer eingehender beschrieben.

2.1. Die Entdeckung der kosmischen Strahlung

Bereits Ende des 18. Jahrhunderts entdeckte Charles Coulomb, dass sich ein elektrisch geladener Leiter mit der Zeit entlädt, auch wenn er von Luft umgeben ist, die ein guter Isolator ist. Eine Erklärung dafür lieferte die 1895 von Henri Becquerel entdeckte, ionisierende Strahlung, die von Uransalzen ausgeht [5]. Damit war zunächst unbestritten, dass die Ionisation in der Luft durch Salze im Erdboden hervorgerufen wird.

Im Jahr 1912 vermaß Victor Hess [1] auf mehreren Ballonflügen die Höhenabhängigkeit dieser ionisierenden Strahlung. Er stieg mehrfach in Höhen bis zu fünf Kilometer und maß dort mit Elektrometern die Ionisation der Atmosphäre durch γ -Strahlen [6]. Da er ab einer Höhe von einem Kilometer einen Anstieg der Intensität mit zunehmendem Abstand vom Erdboden registrierte, schloss er, dass es sich um Strahlung aus dem Weltraum handle [2].

Ein auf diesen Messungen aufbauendes, jedoch erdgebundenes Experiment, führte Pierre Auger 1938 auf dem schweizer Jungfrauojoch durch. Er zeichnete mit Nebelkammern die Spuren von Sekundärteilchen auf und registrierte dabei zeitliche Koinzidenzen der Signale verschiedener Kammern. Er maß die Rate der Koinzidenzen in Abhängigkeit vom Abstand der Nebelkammern, den er schrittweise auf bis zu 300 m erhöhte [3]. Aus dem Ergebnis schloss er auf ausgedehnte Teilchenschauer, die durch ein hochenergetisches Primärteilchen ausgelöst werden. Außerdem stellte er Berechnungen der energieabhängigen Rate der Primärteilchen an: Pro Minute treffen auf einen Quadratzentimeter in der oberen Atmosphäre 50 Teilchen mit einer Energie von über 5 GeV.

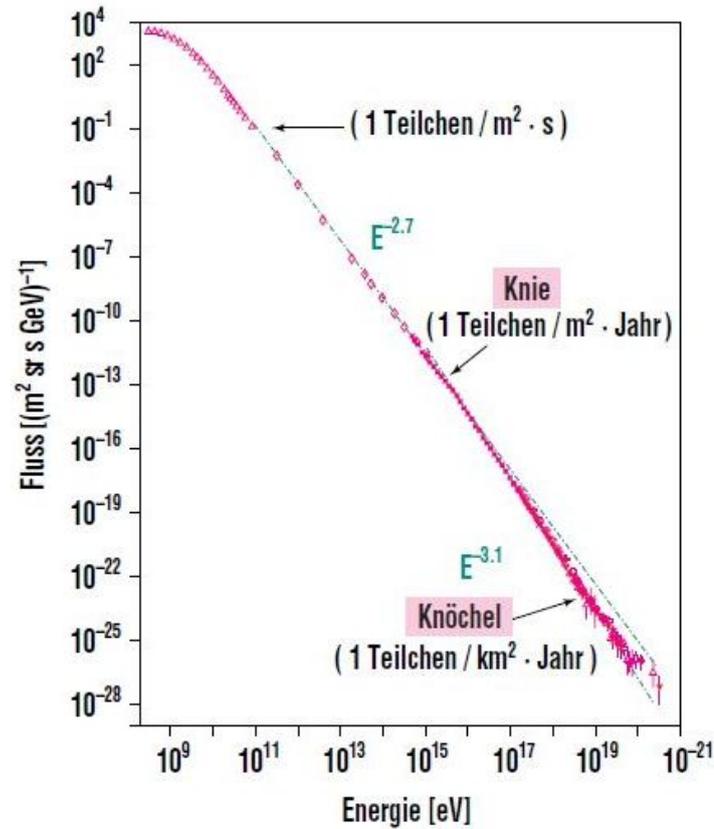


Abbildung 2.1.: Energiespektrum der primären kosmischen Strahlung. Die angegebenen Raten entlang der Kurve entsprechen dem integralen Fluss der Teilchen höherer Energie. Außerdem sind die Linien für die Potenzgesetze eingezeichnet [8].

2.2. Das Spektrum der Primärteilchen

Ein Maß für die Häufigkeit, mit der die kosmischen Teilchen auftreten, ist der differentielle Fluss φ . Er beschreibt die Anzahl dN der Teilchen, die auf einer Fläche dA in einem Zeitintervall dt im Raumwinkel $d\Omega$ mit einer Energie dE auftreten:

$$\varphi = \frac{dN}{dA dt d\Omega dE}. \quad (2.1)$$

Das Energiespektrum der kosmischen Strahlung ist in Abb. 2.1 dargestellt. Es lässt sich durch ein Potenzgesetz:

$$\varphi(E) \propto E^\gamma \quad (2.2)$$

beschreiben. Dabei müssen für verschiedene Abschnitte unterschiedliche Spektralindizes γ angesetzt werden. Das gesamte Spektrum erstreckt sich bis zu Energien von 3×10^{21} eV.

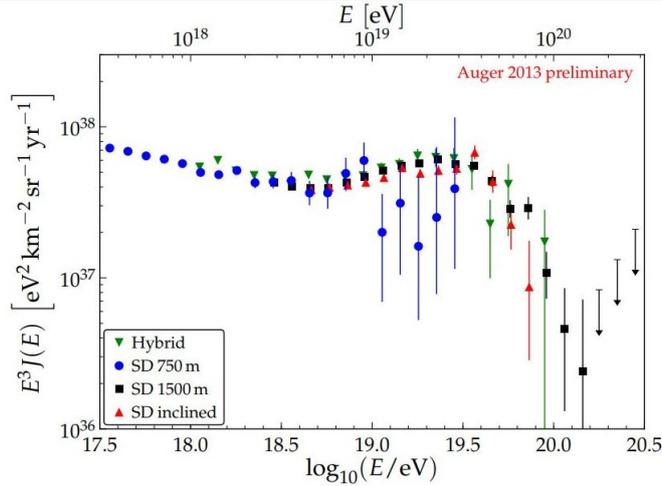


Abbildung 2.2.: Verlauf des oberen Endes des Energiespektrums multipliziert mit E^3 [9].

Bei einer Energie von $E_k = 4 \times 10^{15}$ eV, dem „Knie“ des Spektrums, knickt der Verlauf erstmals ab. Bis dahin hat der Spektralindex einen Wert von $\gamma \approx -2,7$. Danach fällt der Fluss steiler ab und es gilt $\gamma \approx -3,1$. Ein weiteres Mal ändert sich die Steigung am „Knöchel“ bei einer Energie von ca. 4×10^{18} eV, wo der Verlauf wieder zu $\gamma \approx 2,7$ abflacht. Im Energiebereich jenseits 4×10^{19} eV nimmt der Fluss wiederum sehr schnell ab (Abb. 2.2).

Bis zu Energien von 10^{14} eV können die Primärteilchen direkt mit satellitengestützten Experimenten vermessen werden (z.B [10]) und sind daher bereits gut beschrieben. Am LHC (Large Hadron Collider) werden derzeit Schwerpunktsenergien von $\sqrt{s} = 14$ TeV erreicht. Das entspricht einem kosmischen Teilchen, das mit einer Energie von $E_{CR} \approx 10^{17}$ eV auf ein ruhendes Proton trifft [11]. Für Energien darüber hinaus können die Schauereigenschaften nur durch Extrapolationen ermittelt werden.

2.2.1. Der Ursprung und die Beschleunigungsmechanismen der Primärteilchen

Aus dem oben beschriebenen Verlauf des Spektrums können Rückschlüsse auf den Ursprung und die Beschleunigungsmechanismen der Primärteilchen gemacht werden. Da der Teilchenfluss einem Potenzgesetz folgt, können ausschließlich thermische Beschleunigungsmechanismen ausgeschlossen werden. Nimmt man dagegen an, dass das Teilchen von einer Anfangsenergie E_0 an mehrmals beschleunigt wird und bei jedem Zyklus die Energie um einen Faktor $(1 + \epsilon)$ zunimmt, dann erhält man ein Potenzgesetz für die Teilchenanzahl N , deren Energie den Wert E übersteigt (z.B. [12]):

$$N(> E) \propto \frac{1}{P} \left(\frac{E}{E_0} \right)^{-\gamma} \propto E^{-\gamma}. \quad (2.3)$$

Hierbei ist P die Wahrscheinlichkeit, dass das Teilchen zwischen zwei Beschleunigungen entkommt, und γ der Spektralindex, der durch:

$$\gamma = \frac{\ln\left(\frac{1}{1-P}\right)}{\ln(1+\epsilon)} \quad (2.4)$$

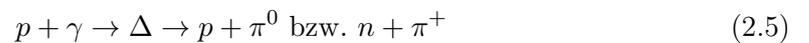
gegeben ist. Ein solches Verhalten ließe sich bei der Reflektion zwischen zwei Schockfronten, wie sie bei Supernovae entstehen, beobachten. Dieser Beschleunigungsmechanismus wurde 1948 von Fermi beschrieben [13].

Im folgenden Abschnitt werden einige Forschungsergebnisse und Modelle vorgestellt, die den Verlauf des Teilchenflussspektrums insbesondere an den markanten Punkten, Knie und Knöchel, sowie das obere Ende erklären.

Die Sonne beschleunigt bei Eruptionen Teilchen bis in den GeV-Bereich [14]. Teilchen mit höherer Energie werden zum Beispiel in Supernovae emittiert, was bereits 1934 von Baade und Zwicky entdeckt wurde [15]. Eine Erklärung für den Knick am Knie ist dann, dass dieses die Maximalenergie markiert, bis zu der die Supernovae Teilchen beschleunigen können [16]. Da die Maximalenergie proportional zur Kernladungszahl des Teilchens ist, ergibt sich daraus eine Überlagerung von „Knien“ für unterschiedlich geladene Primärteilchen. Ein anderer Ansatz ist, dass Teilchen mit Energien oberhalb des Knies weniger stark an die Galaxis gebunden sind und diese verlassen können [17].

Die Region des Knöchels wurde mit den bisherigen Daten des Pierre-Auger-Observatoriums genauer studiert. Betrachtet man die Tiefe des Schauermaximums in der Atmosphäre (siehe Abschnitt 2.3.1) ist zu sehen, dass sie sich im Bereich des Knöchels von einer Übereinstimmung mit dem Schauermaximum eines durch ein Proton ausgelösten Schauers zu dem eines Schauers mit Eisen als Primärteilchen verschiebt. Dies kann ein Hinweis auf neue Eigenschaften hadronischer Wechselwirkungen auf dieser Energieskala sein [18]. Weitere Erklärungen für den Knöchel sind ein Szenario maximaler Beschleunigungsenergie proportional zur Ladungszahl [19], ähnlich wie beim Knie, und die Photodesintegration von schweren Nukliden durch hochenergetische Gamma-Strahlen [20]. Bei letzterer sind die Energien von leichten Nukliden um das Verhältnis der Massenzahlen von Tochter- und Mutternukliden verschoben.

Die Unterdrückung des Teilchenflusses bei den größten gemessenen Energien ist ebenfalls Gegenstand aktueller Forschung. Eine Erklärung liefern Greisen, Zatsepin und Kuz'min mit dem nach ihnen benannten „GZK-Cutoff“. Dabei verliert das Proton bei der Propagation durch das Universum Energie bei der Reaktion:



mit den Photonen der kosmischen Hintergrundstrahlung. In Abb. 2.3 ist die Energie eines Protons in Abhängigkeit von der im Universum zurückgelegten Entfernung dargestellt. Die Protonen werden trotz unterschiedlicher Anfangsenergien nach etwa 100 Mpc auf die Schwellenenergie von 5×10^{19} eV abgebremst. Dennoch geben einige Messungen Hinweise darauf, dass auch Protonen mit Energien über dieser Schwelle als Primärteilchen vorkommen. Dies deutet auf eine nahe (<100 Mpc), hochenergetische Quelle kosmischer Teilchen, junge Neutronensterne[23], die sehr große Beschleunigungen bewirken können,

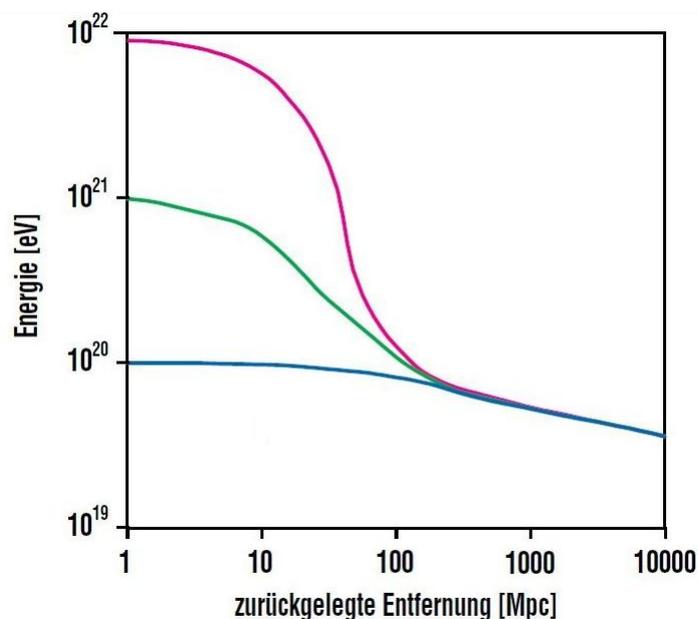


Abbildung 2.3.: Greisen-Zatsepin-Kuz'min-Effekt simuliert für Protonen mit drei verschiedenen Anfangsenergien [22]

oder sogar eine Verletzung der Lorentz-Invarianz [24] hin. Das sind Fragestellungen, die im Rahmen eines Upgrades des Pierre-Auger-Observatoriums genauer untersucht werden sollen (siehe Kap. 3.4).

2.3. Die Ausbreitung der Schauer in der Atmosphäre

Um zu verstehen, wie aus einem ausgedehnten Teilchenschauer das Primärteilchen rekonstruiert werden kann, ist es wichtig zu verstehen, wie der Schauer sich in der Atmosphäre ausbreitet. Dabei wird die Position nicht in Metern über dem Erdboden angegeben, sondern üblicherweise als Massenbelegung X . Um diese zu berechnen, wird die höhenabhängige Dichte $\rho(h)$ entlang der Schauerachse über die Strecke l integriert:

$$X = \int_{l(h)}^{\infty} \rho(h) dl'(h). \quad (2.6)$$

Ein Schauer lässt sich in vier Komponenten unterteilen:

- die hadronische Komponente,
- die elektromagnetische Komponente,
- die myonische Komponente,
- die Neutrino-Komponente.

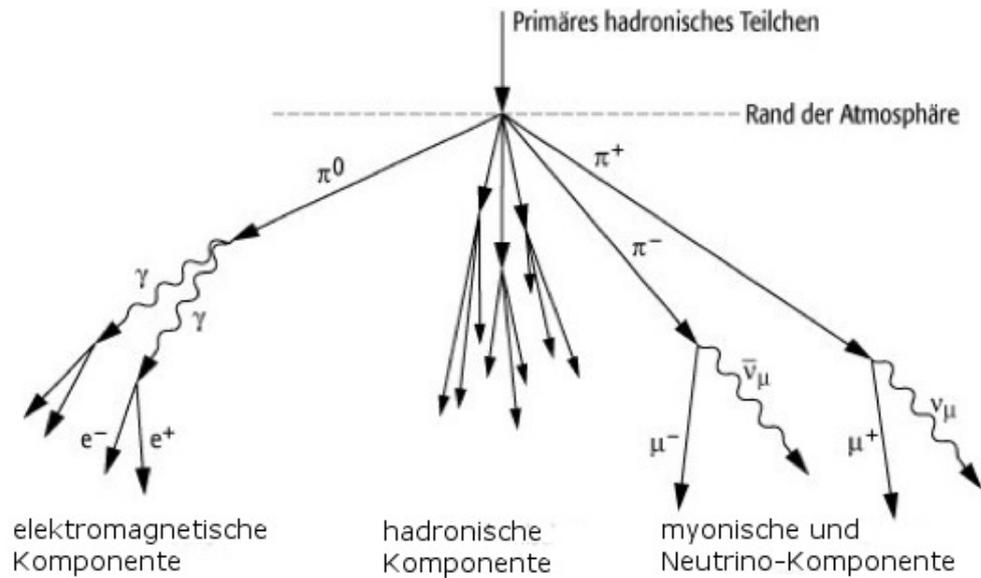


Abbildung 2.4.: Schematische Darstellung der verschiedenen Komponenten eines hadronischen Schauers (Adaptiert nach [26])

Eine Darstellung der einzelnen Komponenten ist in Abb. 2.4 zu sehen. Für Berechnungen ist es am einfachsten, zunächst nur rein elektromagnetische Schauer zu betrachten.

2.3.1. Elektromagnetische Schauer

Ein Modell für die Ausbreitung elektromagnetischer Schauer stellte Rossi 1952 vor [25]. Dabei wird bei beteiligten Elektronen und Positronen nur Bremsstrahlung berücksichtigt und die dabei entstehenden Photonen gehen durch Paarbildung wieder in Elektronen und Positronen über. Dies ergibt eine Abschätzung für die longitudinale Schauerentwicklung. Das Modell wurde von Heitler dahingehend weiter vereinfacht, dass diese Prozesse immer nach einer Strahlungslänge X_0 auftreten und dass die entstehenden Teilchen nur solange weiter abstrahlen bzw. in Paare zerfallen, bis die Energie pro Teilchen den kritischen Wert E_k erreicht hat. Die Strahlungslänge X_0 gibt den relativen Energieverlust von Elektronen pro Weglänge an:

$$\frac{dE}{E} = \frac{dx}{X_0}. \quad (2.7)$$

Wenn sich die Energie bei jedem Prozess auf beide Teilchen gleichmäßig verteilt, erhält man für die Energie pro Teilchen nach einer Weglänge von $s = n \cdot X_0$ die Anzahl der Teilchen durch:

$$N = 2^n \quad (2.8)$$

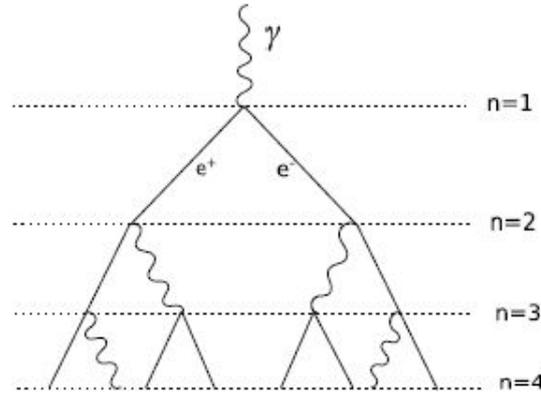


Abbildung 2.5.: Schematische Darstellung des Schauermodells nach Heitler [27]

wobei jedes eine Energie von:

$$E = \frac{E_0}{2^n} \quad (2.9)$$

trägt. Diese Entwicklung ist auch in Abb. 2.5 veranschaulicht und setzt sich fort, bis die kritische Energie E_k nach n_k Strahlungslängen erreicht ist:

$$E_k = \frac{E_0}{2^{n_k}} \Rightarrow n_k = \frac{\ln\left(\frac{E_0}{E_k}\right)}{\ln(2)}. \quad (2.10)$$

Ab dieser Stelle verlieren die Teilchen Energie nur noch durch Ionisation. Die Teilchenanzahl N_{max} und die Tiefe des Schauermaximums X_{max} sind dann gegeben durch:

$$N_{max} = 2^{n_k} = \frac{E_0}{E_k} \propto E_0, \quad (2.11)$$

$$X_{max} = n_k \cdot X_0 = X_0 \frac{\ln\left(\frac{E_0}{E_k}\right)}{\ln(2)} \propto \ln E_0. \quad (2.12)$$

Die Anzahl der Teilchen ist also proportional zur Energie des Primärteilchens, während die Tiefe des Schauermaximums proportional zum Logarithmus der Energie ist (z.B. [10]). Das Modell liefert einen ersten Ansatz dafür, wie aus den Daten der Sekundärteilchen Informationen über das Primärteilchen gewonnen werden können (siehe auch Kap. 3.3)

2.3.2. Hadronische Schauer

Schauer, die durch Hadronen ausgelöst werden, sind im Gegensatz zu den oben beschriebenen elektromagnetischen Schauern komplizierter zu beschreiben, da es sich bei Hadronen nicht um Elementarteilchen handelt und sie zudem stark wechselwirken können. Dadurch sind die Schauerfluktuationen zwischen hadronischen Schauern größer, als bei elektromagnetischen.

Während elektromagnetische Schauer durch die Strahlungslänge X_0 charakterisiert werden, ist die charakteristische Länge für hadronische Prozesse die Wechselwirkungslänge λ . Sie ist proportional zur Massenzahl A und zum Inversen der Dichte ρ und des Wirkungsquerschnitts mit Materie σ :

$$\lambda = \frac{A}{N_A \cdot \rho \cdot \sigma}. \quad (2.13)$$

N_A ist die Avogadro-Konstante.

Bei Energien unterhalb des Knöchels des Teilchenflussspektrums (Kapitel 2.2) stellen Protonen mit 85 % den größten Anteil der Primärteilchen. Ihre Wechselwirkungslänge beträgt $90 \frac{g}{cm^2}$. Die von einem Proton erzeugten Sekundärteilchen sind zu etwa 90% Pionen (z.B. [12]). Das neutrale Pion zerfällt in zwei Photonen und initiiert damit eine elektromagnetische Kaskade. Die geladenen Pionen zerfallen in ein Myon und das entsprechende Myon-Neutrino:

$$\begin{aligned} \pi^0 &\rightarrow 2\gamma, \\ \pi^+ &\rightarrow \mu^+ + \nu_\mu, \\ \pi^- &\rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu. \end{aligned}$$

Um den Schauer ähnlich wie mit dem Heitler-Modell beschreiben zu können, müssen einige Modifikationen gemacht werden [27]: Ein Teilchen der Energie E produziert in jedem Prozess m Teilchen mit Energien $\frac{E}{m}$. Zwei Drittel dieser Sekundärteilchen seien geladen, ein Drittel ungeladen. Die ungeladenen zerfallen sofort in elektromagnetische Teilchen, während die geladenen weiter wie beschrieben wechselwirken, bis ihre Energie nach n Generationen die kritische Energie $E_k = E_0/(m^n)$ erreicht.

Die Tiefe des Schauermaximums X_{max} ist im Wesentlichen durch die des elektromagnetischen Schauers X_{max}^{em} gegeben (Gl.2.12). In erster Näherung wird dazu die Wechselwirkungslänge des primären Hadrons (Gl. 2.13) addiert:

$$X_{max}(E_0) \approx \lambda + X_{max}^{em} \left(\frac{E_0}{m} \right). \quad (2.14)$$

Sowohl beim elektromagnetischen als auch beim hadronischen Schauer müssen bei hohen Energien quantenmechanische Effekte, wie die Unterdrückung von Paarbildung und Bremsstrahlung durch destruktive Interferenzen, berücksichtigt werden [28].

2.4. Der Nachweis geladener Teilchen

Im Pierre-Auger-Observatorium werden zwei Effekte ausgenutzt, um die Sekundärteilchen nachzuweisen: Ihr Cherenkov-Licht in Wasser und das Fluoreszenz-Licht, das bei ihrem Durchgang durch die Atmosphäre entsteht.

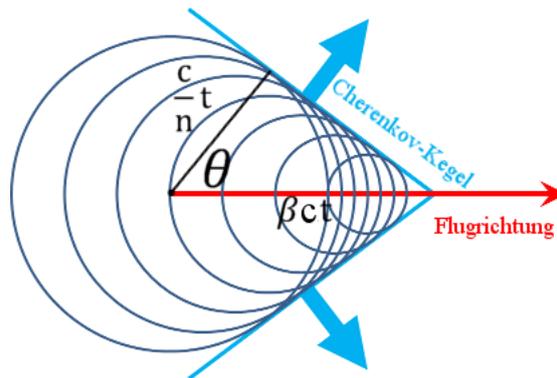


Abbildung 2.6.: Schematische Darstellung der Entstehung des Cherenkov-Lichts

2.4.1. Die Cherenkov-Strahlung

Während ein geladenes Teilchen ein Medium durchquert, werden die Atome des Medium kurzzeitig polarisiert. Bei der Relaxation wird Licht ausgesendet. Für ein Teilchen dessen Geschwindigkeit v die Lichtgeschwindigkeit im Medium mit Brechungsindex n übersteigt (Gl.2.15):

$$v \geq \frac{c}{n}, \quad (2.15)$$

wobei c die Vakuumlichtgeschwindigkeit ist, überlagern sich die elementaren Lichtwellen konstruktiv zu einer Wellenfront (siehe Abb. 2.6). Dieses Licht wird als Cherenkov-Strahlung bezeichnet, da es erstmals von Cherenkov 1934 beschrieben wurde [29].

Der Öffnungswinkel Θ_c , unter dem sich die Wellenfront der Cherenkov-Strahlung entlang eines Kegels ausbreitet, steht mit dem Quotienten aus Teilchen- und Lichtgeschwindigkeit β und dem Brechungsindex n in folgender Beziehung:

$$\cos \Theta_c = \frac{1}{\beta \cdot n}. \quad (2.16)$$

Die Energie E , die dabei pro Wegstrecke dx und Frequenzintervall $d\omega$ abgestrahlt wird, berechnet sich zu [30]:

$$\frac{d^2 E}{d\omega dx} = \frac{Z^2 \cdot e^2}{4\pi\epsilon_0 \cdot c^2} \omega \sin^2 \Theta_c(\omega). \quad (2.17)$$

Hierbei ist Z die Ladung des Teilchens und ϵ_0 die elektrische Feldkonstante. Durch Division durch die Energie eines Photons $E_{ph} = \hbar\omega$ erhält man die Anzahl der Photonen N :

$$\frac{d^2 N}{d\omega dx} = \frac{\alpha}{c} Z^2 \sin^2 \Theta_c(\omega). \quad (2.18)$$

Die auftretenden Konstanten wurden in der Feinstrukturkonstanten α zusammengefasst.

2.4.2. Die Fluoreszenz

Bei der Ausbreitung des Teilchenschauers in der Atmosphäre werden die Stickstoffmoleküle der Luft angeregt. Bei ihrem Übergang in den Grundzustand wird Licht im Wellenlängenbereich von 300 bis 400 nm [31] emittiert. Dieser Effekt wird Fluoreszenz genannt.

3. Das Pierre-Auger-Observatorium

Eine große Herausforderung beim Detektieren von hochenergetischen Teilchen der kosmischen Strahlung ist die steile Abnahme des Flusses mit steigender Energie (Kapitel 2.2). Bei Energien über dem Knöchel des Spektrums liegt die Flussrate nur noch bei einem Teilchen pro Jahr und Quadratkilometer. Um dennoch in absehbarer Zeit hochenergetische Ereignisse mit signifikanter Statistik aufzunehmen, muss ein großes Areal mit Detektoren betrieben werden. Das derzeit größte ist das Pierre-Auger-Observatorium in der argentinischen Provinz Mendoza.

3.1. Das Konzept

Eine Besonderheit des Pierre-Auger-Observatoriums ist das Hybrid-Konzept, bei dem die in Kapitel 2.4 beschriebenen Detektionstechniken für Sekundärteilchen unabhängig voneinander verwendet werden. Einerseits gibt es über 1600 Wasser-Cherenkov-Detektoren (**wcd**!), die den Oberflächendetektor (SD, surface detector) bilden, andererseits 24 Fluoreszenz-Teleskope, aus denen der Fluoreszenz-Detektor (FD) besteht. Der Aufbau des Pierre-Auger-Observatoriums ist in Abb. 3.1 gezeigt. In den folgenden Unterkapiteln werden die Detektoren genauer beschrieben.

3.1.1. Der Oberflächendetektor des Pierre-Auger-Observatoriums

Der SD besteht aus über 1600 WCDs, die jeweils einen Abstand von 1,5 km haben und in einem hexagonalen Gitter angeordnet sind. Aus der Ankunftszeit der Schauerfront an den einzelnen WCDs kann auf die Einfallsrichtung des Schauers geschlossen werden. Da mit dem Surface Detector (SD), im Gegensatz zum FD, unabhängig von der Tageszeit Daten genommen werden können, stammt ein Großteil der Daten des Pierre-Auger-Observatoriums vom SD. Daten von Schauern, die sowohl vom SD als auch vom FD aufgezeichnet wurden, werden als Hybrid-Daten bezeichnet.

Jeder einzelne WCD besteht aus einem zylindrischen Tank mit 3.6 m Durchmesser, der mit 12 m^3 hochreinem Wasser gefüllt ist (siehe Abb. 3.2). Das Messprinzip der WCDs beruht auf dem in Kapitel 2.4.1 beschriebenen Cherenkov-Effekt. Im Inneren des Tanks wird entlang des Weges des Schauerteilchens im Wasser Cherenkov-Licht emittiert. Dieses wird solange an der UV-reflektierenden Innenbeschichtung des Tanks reflektiert, bis es in einen der drei Photovervielfacher (PMT, Photomultiplier Tube) an der Deckelseite des Tanks gelangt. Dort lösen die Photonen Photoelektronen aus, die in der Größenordnung 10^5 verstärkt werden und als elektrisches Signal verarbeitet werden können. Sowohl das Signal der letzten Dynode des PMTs als auch das seiner Anode werden übermittelt. Dadurch erhält man Signale mit zwei unterschiedlichen Verstärkungen (High-Gain und

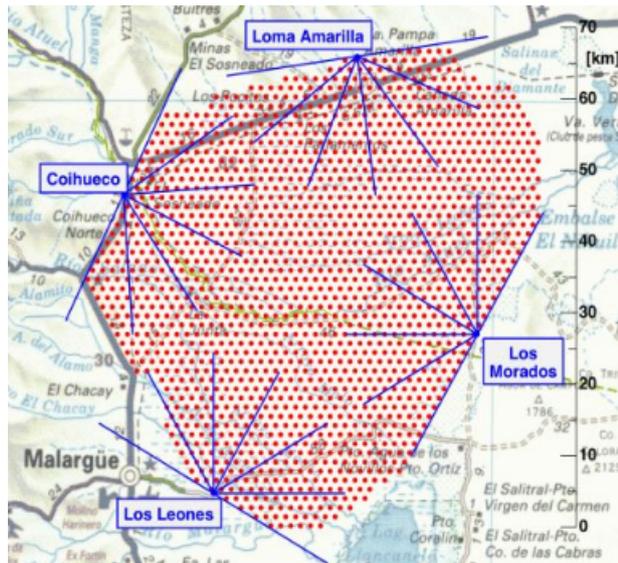


Abbildung 3.1.: Karte des Pierre-Auger-Observatoriums. Die roten Punkte markieren die Positionen der Wasser-Cherenkov-Detektoren. Die Linien, die von den vier FD-Stationen ausgehen, deuten die horizontale Begrenzung des Blickfeldes eines FD-Teleskops an [34].

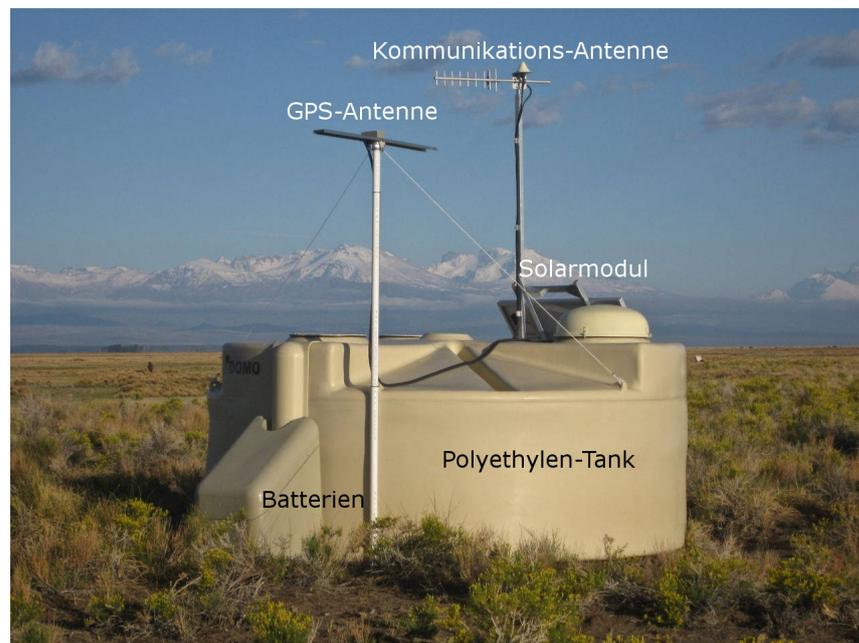


Abbildung 3.2.: Tank des Oberflächendetektors (Adaptiert von [36])

Low-Gain), sodass auch noch Analysen betrieben werden können, wenn das Signal auf der höchsten Verstärkungsstufe saturiert. Die Signale der PMTs werden mit schnellen Analog-Digital-Wandlern (FADC, flash analog digital converter) digitalisiert und über einen Radiosender an die Datenerfassungszentrale (CDAS, Central Data Acquisition System) übermittelt. Die Elektronik des WCDs ist auf einer einzelnen Leiterplatte, dem Unified Board (UB), vereint. Die WCDs sind autonom, da jeder über zwei Solar-Panele mit Strom versorgt wird.

3.1.2. Der Fluoreszenzdetektor des Pierre-Auger-Observatoriums

Wie in Kapitel 2.4.2 beschrieben wird beim Durchgang des Schauers durch die Atmosphäre Licht im nahen UV-Bereich emittiert. Die Anzahl der Photonen ist proportional zum Energieverlust der Sekundärteilchen und kann mit dem FD gemessen werden. Da die elektromagnetische Schauerkomponente ca. 90% der Energie des Schauers trägt, können mit dem FD Aussagen über die Energie und den longitudinalen Schauerverlauf gemacht werden. Ein von einem einzelnen Teleskop aufgezeichnetes Ereignis ist in Abb. 3.3 zu sehen.

Der FD des Pierre-Auger-Observatoriums besteht aus vier separaten Teleskop-Stationen am Rand des SD-Feldes (siehe Abb.3.1). Für die Fluoreszenz-Teleskope wurde das Prinzip der Schmidt-Kamera [35] übernommen. Sie bestehen aus einem 14m^2 großen Spiegel, einer Korrekturlinse zur Verringerung von Aberrationen, einem UV-Filter und einer Kamera. Eine schematische Darstellung ist in Abb. 3.4 zu sehen. Die Kamera besteht aus 440 PMTs. Jedes Teleskop hat ein Blickfeld von $30^\circ \times 30^\circ$, sodass sich das Sichtfenster aller sechs Teleskope in einer Station zu 180° horizontal und 30° vertikal über dem Horizont aufaddieren lässt.

Im Gegensatz zum SD kann der FD nur in klaren Nächten, in denen der Mond höchstens zu 70% beleuchtet wird [31], betrieben werden. Dadurch werden nur in 13% der Zeit Daten mit ihm genommen.

3.2. Die Ergebnisse bisheriger Messungen am Pierre-Auger-Observatorium

Mit den Daten, die bis Ende 2012 am Pierre-Auger-Observatorium aufgenommen wurden, konnte eine Unterdrückung des Teilchenflusses bei Energien über 4×10^{19} eV nachgewiesen werden [37]. Außerdem wurden Grenzen für den Neutrino- [38] und Photon-Fluss [39] bei höchsten Energien gemessen, durch die Szenarien, bei denen Zerfälle superschwerer Teilchen für die Beschleunigung eines großen Anteils der höchstenergetischen Teilchen verantwortlich sind, ausgeschlossen werden können. Auch konnte mit dem FD die Eindringtiefe des Schauers mit großer Präzision vermessen werden. Diese ist eng mit der Masse des Primärteilchens verbunden [40]. Bei Messungen im Bereich des Knöchels ändert sich die Eindringtiefe des Schauers, was darauf hindeutet, dass sich die Zusammensetzung der kosmische Strahlung hin zu schwereren Elementen verschiebt. Die Eindring-

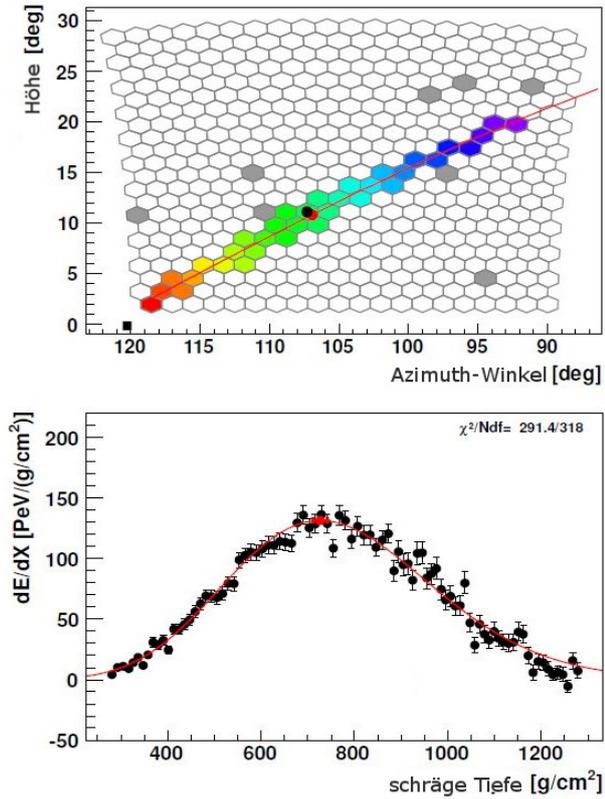


Abbildung 3.3.: Auswertung eines Ereignisses im FD. Oben ist zu sehen, wann die PMTs ansprachen: Violett (dunkel, oben rechts) entspricht einem frühen Zeitpunkt, rot (dunkel, unten links) einem späten. Unten ist die deponierte Energie gegen den Weg, der in der Atmosphäre zurückgelegt wurde, aufgetragen [31].

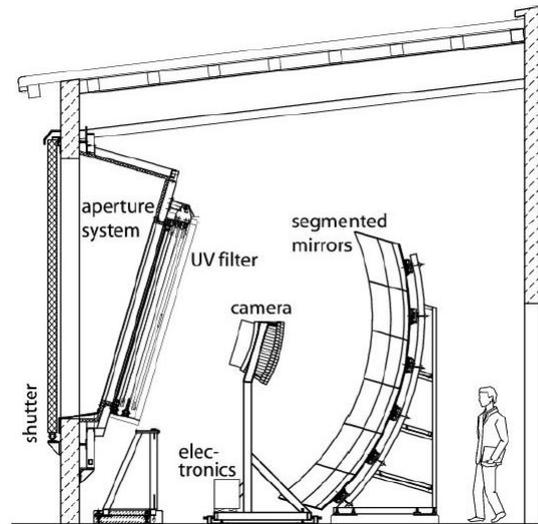


Abbildung 3.4.: Schematischer Aufbau eines Fluoreszenzteleskops [31]

tiefe ist auch direkt mit der Tiefe der ersten Wechselwirkung der kosmischen Strahlung in der Atmosphäre verbunden [41]. Aus diesem Zusammenhang konnte mit Daten von Schauern, die sowohl vom SD als auch vom FD aufgezeichnet wurden, der Proton-Luft-Wirkungsquerschnitt bei 57 TeV gemessen werden [42]. Mit der Glauber-Näherung [43] kann dieser in einen inelastischen Proton-Proton-Wirkungsquerschnitt umgewandelt werden. Dieser Wirkungsquerschnitt ist konsistent mit Modellen, die die Daten am LHC beschreiben.

3.3. Die Rekonstruktion des Schauers

Die Daten des Observatoriums sollen Aufschluss über Richtung, Energie und Masse des Primärteilchens geben. Die Richtung kann direkt aus den Ankunftszeiten der Schauerfront an den einzelnen SD-Stationen rekonstruiert werden (siehe Abb. 3.5), während für Energie und Masse aufwendige Luftschauersimulationen benötigt werden. Mit der Information über den Zenit-Winkel und dem Signal eines WCDs in etwa 1000 m Entfernung (S_{1000}) von der Schauerachse kann die Energie des Primärteilchens rekonstruiert werden. S_{1000} wird deshalb gewählt, weil die Signale näher an der Achse großen Fluktuationen, bedingt durch die erste Wechselwirkung des Primärteilchens, unterliegen und Signale von entfernteren Detektoren größere statistische Unsicherheiten haben [31].

Mit den Daten des FDs erfolgt eine kalorimetrische Messung des Schauers, da das abgestrahlte Fluoreszenz-Licht proportional zum Energieverlust dE/dx ist. An das Integral des Energieverlusts wird eine Gaisser-Hillas-Funktion angepasst [48], mit der auch die maximale Eindringtiefe X_{max} berechnet werden kann. Letztere ist vor allem abhängig von der Masse des Primärteilchens. Die Energie muss noch um die Energie korrigiert werden, die Neutrinos und Myonen tragen, die für den FD unsichtbar sind [49]. Infor-

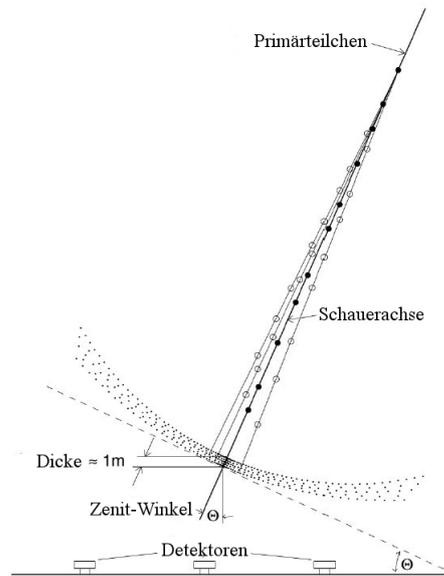


Abbildung 3.5.: Schematische Darstellung eines Teilchenschauers, der auf die Detektoren des SD trifft [32].

mationen über die Eindringtiefe des Schauers und somit die Masse des Primärteilchens können auch aus Analysen der myonischen Komponente des Schauers gewonnen werden.

3.3.1. Die Bedeutung der myonischen Schauerkomponente

Die myonische Schauerkomponente ist sensitiv auf hadronische Teilchenwechselwirkungen in allen Stadien der Schauerentwicklung [31]. Aus ihr kann die Elastizität, der Anteil der neutralen, sekundären Pionen und das Baryon-zu-Pion Verhältnis abgeleitet werden [44][45]. Im Moment kann die Anzahl der Myonen nur indirekt aus den Daten des SDs rekonstruiert werden. Da Myonen im Gegensatz zur elektromagnetischen Komponente nur wenig Energie in weiteren Wechselwirkungen verlieren, kommen sie vergleichsweise früher am Erdboden an und liefern ein schmales, frühes Signal (siehe Abb. 3.6), während das der Elektronen niedriger ist und einen langen Tail hat [46]. Diese Art der Bestimmung ist bislang nur bei schrägen Schauern weit entfernt von der Schauerachse möglich [47]. Die präzisere Bestimmung der myonischen Schauerkomponente ist ein Ziel des Upgrades des Pierre-Auger-Observatoriums.

3.4. AugerPrime

Das Pierre-Auger-Observatorium soll mindestens bis zum Jahr 2025 betrieben werden. Dadurch wird sich die Statistik im Vergleich zum Datensatz der bis Ende 2012 aufgenom-

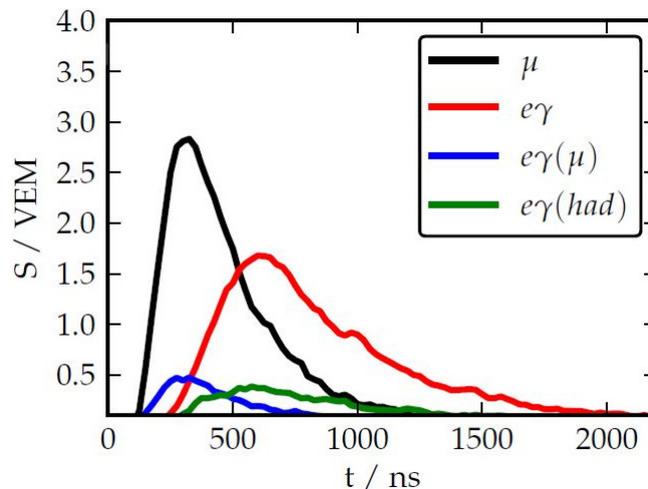


Abbildung 3.6.: Signale im SD in Abhängigkeit von der Zeit nach Komponenten unterteilt. Schwarzes (frühes hohes) Signal: myonische Schauerkomponente; rotes (zweithöchstes) Signal: elektromagnetische Schauerkomponente; blaues (frühes, niedriges) Signal: elektromagnetische Komponente aus Myon-Zerfall; grünes (spätes, niedriges) Signal: elektromagnetische Komponente aus hadronischen Zerfällen [31]. Zu sehen ist, dass das Signal der Myonen früher ankommt, als der Großteil der elektromagnetischen Signale und es außerdem am höchsten ist. Die Höhe wurde in Einheiten des Signals eines vertikalen Myons (VEM) angegeben.

men wurde, verdreifachen [31]. Eine Vergrößerung des Datensatzes allein reicht jedoch nicht aus, um weiterführende Fragestellungen zu beantworten. Deshalb wird ein Upgrade des Pierre-Auger-Observatoriums vorgenommen, das Aufschluss darüber geben soll,

- ob die Unterdrückung am oberen Ende des Spektrums durch den GZK-Effekt oder durch die maximale Energie der kosmischen Quellen verursacht ist,
- wie groß der Anteil der primären Protonen bei höchsten Energien ist,
- welche hadronischen Wechselwirkungen bei Energien jenseits des Knöchels relevant sind.

Um dies zu erreichen ist es wichtig, die Auflösung des SDs in Bezug auf die unterschiedlichen Primärteilchen zu erhöhen. Am vielversprechendsten dafür ist eine bessere Unterscheidung zwischen myonischer und elektromagnetischer Schauerkomponente. Sobald die myonische Komponente für jeden Schauer unabhängig von der Einfallsrichtung bekannt ist, kann auch aus den Daten des Oberflächendetektors die Eindringtiefe des Schauers rekonstruiert werden. Aus ihr kann die Masse des Primärteilchen bestimmt werden. Damit könnte die Kenntnis der Zusammensetzung der primären kosmischen Strahlung

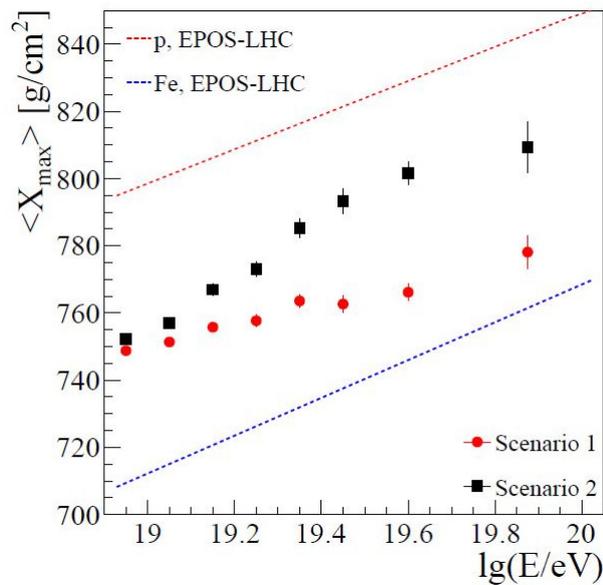


Abbildung 3.7.: Vorhersagen der Schauereindringtiefe für zwei Szenarien zur Beschreibung des Knöchels. Bei Szenario 1 wird er durch die maximale Energie der Quellen der höchstenergetischen Teilchen verursacht, bei Szenario 2 durch Photodesintegration [31]

auf Regionen der Flussunterdrückung ausgedehnt werden. Außerdem treffen die unterschiedlichen hadronischen Wechselwirkungsmodelle verschiedene Vorhersagen über die myonische Komponente und somit die Eindringtiefe des Schauers. Durch eine Messung dieser könnte zwischen den Modellen unterschieden werden [31]. Die Vorhersagen für die Eindringtiefe des Schauers der beiden in Abschnitt 2.2.1 angesprochenen Szenarien für den Knöchel (maximale Energie der Quellen und Photodesintegration) werden in Abb. 3.7 gegenübergestellt. Das Upgrade soll Aufschluss darüber geben, welchen Verlauf das Spektrum tatsächlich nimmt.

3.4.1. Die Realisierung des Upgrades

Alle Änderungen werden unter dem Namen „Auger Prime“ zusammengefasst. Um die gewünschte Information über die Anzahl der Myonen zu erhalten, wird auf jedem Tank des SDs ein Szintillationsdetektor (SSD, Surface Scintillation Detector) angebracht, dessen Antwort auf Myonen sich von der des WCDs unterscheidet.

Bei Energien jenseits von 3×10^{19} eV sind etwa 50% der Signale zumindest in Detektoren nahe der Schauerachse saturiert, weshalb ein weiterer Photomultiplier (SPMT, Small Photomultiplier Tube) eingebaut wird, der die Signale weniger verstärkt. Damit sollen nur noch maximal 2% der Signale bei höchsten Energien saturieren [31]. Die Elektronik der WCDs muss so erweitert werden, dass auch der SSD die Datenübermittlungselektronik mitnutzen kann. Wichtig beim Einbau der neuen Elektronik ist die Kompatibilität

mit den bisherigen Systemen, weshalb das mechanische Design und die Schnittstellen zur SD-Station so weit wie möglich erhalten bleiben. Das Upgrade ist außerdem so ausgelegt, dass die bisherige Stromversorgung ausreicht, um sowohl SSD als auch WCD zu versorgen [51]. Im Rahmen des Upgrades muss auch die Datennahme-Elektronik, das UB, durch eine erweiterte Version, das UUB, ersetzt werden, die Anschlüsse für den SSD bietet und deren Komponenten auf dem neuesten technischen Stand sind.

Darüberhinaus wird die Abtastrate der PMTs von 40 MHz auf 120 MHz erhöht [51], wodurch es möglich ist, schnelle Anstiege im Signal, die durch Myonen verursacht werden, besser aufzulösen. Auch können damit Asymmetrien zwischen den drei Photomultiplier Tubes (PMTs) in einem WCD besser detektiert und so schräg einfallende Schauer mit einer einzigen SD-Station identifiziert werden. Das Licht erreicht durch die Geometrie des Detektors bei schräg einfallenden Schauern die PMTs mit einem Versatz im Bereich von 6 ns. Bisher war die Auflösung der Elektronik 25 ns. Mit den geplanten 8.3 ns kann aus den Daten die Richtungsinformation gewonnen werden [51]. Auch die GPS-Empfänger werden aktualisiert, wodurch die Genauigkeit des Zeitstempels eines Ereignisses von 10 ns auf 4 ns verbessert wird. Die Auflösungen sind dabei so gewählt, dass die Fehler des SDs mit denen des FDs vergleichbar sind. Das bedeutet im Einzelnen:

- Tiefe des Schauermaximums: $\pm(20 - 40) \frac{\text{g}}{\text{cm}^2}$,
- Myonanzahl am Boden: $\pm(15 - 20)\%$,
- Energie des Primärteilchens: $\pm 10\%$,
- Zenit-Winkel: $\pm 1^\circ$.

4. Das Testsystem

Um die Funktionalität des Upgraded Unified Boards (UUB) schon vor der Inbetriebnahme im Oberflächendetektor (SD) zu testen, arbeitet die Arbeitsgruppe „Experimentelle Teilchenphysik“ der Universität Siegen an einem entsprechenden Testsystem (TS). Im ersten Abschnitt (4.1) werden die Anforderungen an das TS erläutert. In Abschnitt 4.2 wird das UUB beschrieben, worauf in Abschnitt 4.3 eine nähere Beschreibung des TSs folgt. Zuletzt (Abschnitt 4.6) wird das Analyseprogramm Pulseanalyzer detailliert behandelt.

4.1. Die Anforderungen an das Testsystem

Insgesamt sollen sechs TS gebaut werden mit denen die ca. 2000 UUB an verschiedenen Orten auf ihre Funktionalität getestet werden können. Jedes TS wird daher so konzipiert, dass es nur minimale zusätzliche Laborinfrastruktur benötigt, nämlich Maus, Monitor und Tastatur. Es wird zusammen mit allen benötigten Kabeln und dem Netzteil ausgeliefert. Das TS bietet drei Testroutinen, mit denen die analoge Front-End-Elektronik, die Kontrollspannungen der Hochspannung, die für die Photomultiplier Tubes (PMT) generiert wird, sowie die Reaktion der Slow-Control auf Spannungen außerhalb des Arbeitsbereichs überprüft werden können. Dabei handelt es sich nicht um einen Leistungstest, sondern um einen Funktionalitätstest. Die graphischen Benutzeroberflächen, über die alle Tests durchgeführt werden, sind so gestaltet, dass die Tests auch ohne Hintergrundwissen über das UUB durchgeführt werden können. Die Ergebnisse der Tests werden zunächst in Siegen gesammelt und analysiert. Einige der Resultate werden in einer zentralen Datenbank gesammelt.

4.2. Das UUB als Testobjekt

Im folgenden Abschnitt werden die Funktionsweise und die wichtigsten Anschlüsse des Upgraded Unified Boards (UUBs) erläutert, um das Testobjekt besser zu verstehen. In Abb. 4.1 ist ein UUB-Prototyp abgebildet. An der Vorderseite befinden sich eine Reihe SMA-Buchsen (koaxiale Steckverbinder für Hochfrequenzanwendungen). Das linke Paar ist für den Anschluss eines externen Triggers, das Paar daneben für die LEDs, die Kalibrationssignale für den Wasser-Cherenkov-Detektor (WCD) liefern. An die nächsten drei SMA-Anschlüsse werden die drei Photomultiplier Tubes (PMTs) angeschlossen. Die letzten vier Buchsen bieten Anschlüsse für die neu installierte Small Photomultiplier Tube (SPMT) und den Surface Scintillation Detector (SSD). Das Signal im vorletzten Anschluss wird dabei über einen Spannungsteiler um einen Faktor 4 reduziert. Die Si-

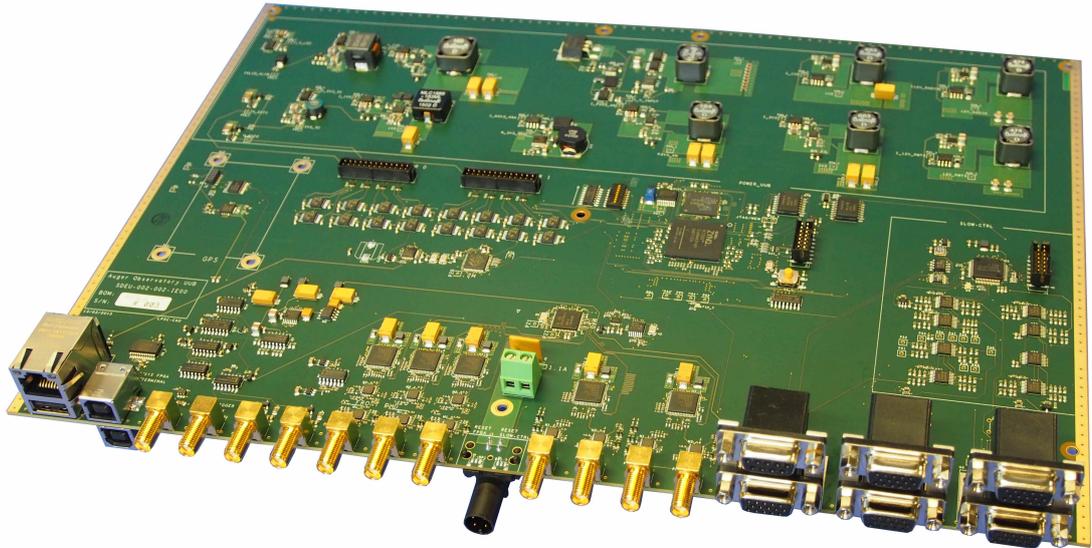


Abbildung 4.1.: Bild eines UUBs, das in Siegen in Betrieb genommen wurde.

gnale der PMTs werden nach der Buchse auf je zwei Kanäle aufgeteilt. Einer wird noch um einen Faktor 32 (High Gain) gegenüber dem anderen Kanal (Low Gain) verstärkt. Dadurch wird der dynamische Bereich des Detektors vergrößert. Die Signale werden gefiltert und mit einer Frequenz von 120 MHz von 12-bit Flash Analog to Digital Converter (FADC)[I] digitalisiert [51]. Die Signale werden an einen Trigger gesendet, der in einem Field Programmable Gate Array (FPGA)[II] implementiert ist. Auch der Algorithmus, der mithilfe des GPS-Systems[III] den Zeitstempel für das Ereignis bestimmt, ist auf dem FPGA[II] realisiert. Auf den Prozessoren wird ein Linux-Betriebssystem [V] genutzt. Auf dem UUB befindet sich außerdem das Slow-Control-System mit einem separaten Mikrocontroller [IV][51]. Es fährt die übrige Elektronik hoch und verfügt über eine Vielzahl von analogen Ein- und Ausgängen, die auch für zusätzliche Sensoren genutzt werden können. Mit der Slow Control werden alle relevanten Spannungen und Sensoren überwacht. Zu ihnen werden im Rahmen des Upgrades noch ein Wassertemperatur- und ein Drucksensor hinzugefügt [51]. Die Slow Control ist in der Lage, bei zu niedriger Stromversorgung Teile des UUBs abzuschalten. Diese Funktion wird im Rahmen des UUB Power Tests (UPT) untersucht. Die Slow-Control gibt über die Sub-D-Buchsen an der rechten Seite des UUBs Kontrollspannungen aus, die direkt proportional zu den Hochspannungen sind, die an den PMTs anliegen [31]. Dies wird im Rahmen des PMT Voltage Tests (PVT) genutzt.

Die gesamte Elektronik der WCDs ist so ausgerichtet, dass der Spitzenverbrauch 16 W nicht übersteigt.

4.3. Die Funktionsweise des Testsystems

Der Aufbau des TS und die Kommunikation mit dem UUB sind in Abb. 4.2 dargestellt.

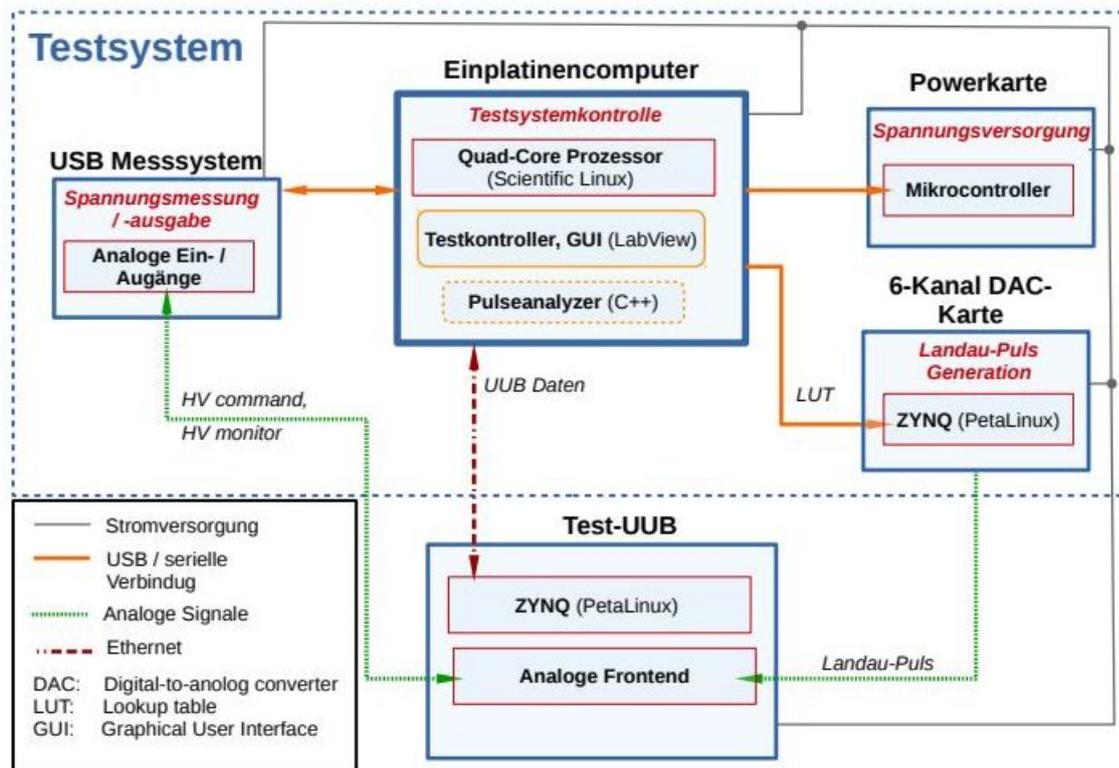


Abbildung 4.2.: Flussdiagramm des Testsystems [50]

4.4. Die Komponenten des Testsystems

4.4.1. Die Powerkarte

Die Powerkarte wurde speziell für das TS im Elektroniklabor des Departments Physik der Universität Siegen entwickelt. Die Karte generiert alle benötigten Spannungen aus einer 12 V-Spannung, die dem TS mit einem kommerziellen Netzteil [VI] zugeführt wird. Darunter ist auch die Spannung, mit der das UUB versorgt wird. Auf der Platine befindet sich zudem ein Mikrocontroller, der die Spannungen ein- und ausschalten kann und der Schwankungen der UUB-Spannung, wie sie auch beim Batteriebetrieb in der Pampa auftreten, im Bereich 18 bis 32 V simulieren kann.



Abbildung 4.3.: Außen- und Innenansicht des Testsystems. Aus Platzgründen wurde die DAC-Karte eine Ebene über der Powerkarte angebracht.

4.4.2. Die DAC-Karte

Die Digital-to-Analog-Converter-Karte (DAC-Karte) wurde ebenfalls im Elektroniklabor des Departments Physik entwickelt. Hier wird das gleiche FPGA[II] wie auf dem UUB verwendet [52], sodass man bei der Entwicklungsarbeit ein besseres Verständnis für das UUB bekommen konnte. Die DAC-Karte verfügt über einen Block Random Access Memory (BRAM), in das über eine serielle Schnittstelle eine Look Up Table (LUT) geladen werden kann. Die Werte werden an drei unabhängige, Zweikanal-DACs weiter geleitet, die eine Abtastfrequenz von 500 MSa/s und eine Auflösung von 12 Bit haben. Auf diese Weise können verschiedene Pulsformen mit Amplituden bis 2 V erzeugt werden [52]. Anhand von mehreren tausend Pulsen wurde das Signal-Rausch-Verhältnis (SRV) eines Prototyps für zwei Amplituden bestimmt [52]. Dieses begrenzt, mit welcher Genauigkeit

Fehler mit dem TS detektiert werden können. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.1 dargestellt. Alle verwendeten Pulse hatten die gleiche Full Width at Half Maximum (FWHM) von 10 ns.

Pulsamplitude	Peak to Peak-Rauschen	RMS-Rauschen	SRV
60 mV	4.8 mV	0.8 mV	75
1800mV	28 mV	4.7 mV	383

Tabelle 4.1.: Rauschmessung am Ausgang der DAC-Karte [52]

4.4.3. Der Einplatinencomputer

Das TS wird von einem Einplatinencomputer [VIII] aus gesteuert, auf welchem ein Linux-Betriebssystem installiert ist. Er ist an zwei Solid State Drive-Festplatten angeschlossen, wobei die größere (1 TB) für die Speicherung von Daten vorgesehen und die kleinere (125 GB) durch das Betriebssystem belegt ist. Die Steuerung des Testablaufs erfolgt über ein Programm, das in einer graphischen Programmiersprache entwickelt wurde und welches die Kommunikation mit der Hardware übernimmt (Testkontroller). Über dessen graphische Benutzeroberfläche können alle Tests von einem Anwender durchgeführt werden.

4.4.4. Das USB-Messsystem

Bei dem verwendeten USB-Messsystem handelt es sich um ein kommerzielles Produkt [X]. Seine acht analogen Ein- und Ausgänge werden im Rahmen des PMT Voltage Test (PVT) genutzt, um die Kontrollspannungen der PMTs abzufragen. Die zusätzlichen 20 digitalen Ein- und Ausgänge werden aktuell nicht genutzt. Die Kommunikation mit dem Einplatinencomputer erfolgt über eine serielle Verbindung [50].

4.5. Die Testabläufe

Nach dem Hochfahren des Einplatinencomputers wird über ein Skript ein File Transfer Protocol (FTP)-Server auf dem TS gestartet, der für den Datentransfer vom UUB aus zuständig ist [53]. Mit dem UUB kann entweder über eine serielle Schnittstelle oder über Ethernet kommuniziert werden. Für die Testabläufe wurde aufgrund der höheren Datentransferrate Ethernet gewählt. Für die Kommunikation kann dabei außerdem der Teletype Network (Telnet)-Server auf dem UUB verwendet werden [53]. Über diese Telnet-Sitzung liest der Testkontroller zunächst die Seriennummer des UUBs aus und legt einen Ordner für die Dokumentation des Tests an. Dann wird über eine USB-Verbindung die LUT mit einer der vier Pulsformen aus Tabelle 4.2 an die DAC-Karte gesendet. Diese hat 8 Slots, in die jeweils 125 Werte geladen werden können. Die LUT für die beiden breiteren Pulsformen wird aufgrund der Vielzahl der Spannungswerte in mehrere Abschnitte unterteilt, die einzeln an die DAC-Karte gesendet werden. Anhand der LUT generiert die DAC-Karte analoge Spannungspulse, die über SMA-Kabel synchron an alle Kanäle des

UUBs geschickt und dort mit den Analog to Digital Convertern (ADC) weiter verarbeitet werden.

	(Amplitude,FWHM)
Pulsform 1	(800 mV, 40ns)
Pulsform 2	(800 mV, 200ns)
Pulsform 3	(50 mV, 40ns)
Pulsform 4	(50mV , 200 ns)

Tabelle 4.2.: Pulsformen des SPTs

Über die Telnet-Verbindung wird eine Applikation auf dem UUB gestartet, die die Daten ausliest, die dann vom Testkontroller in eine Textdatei geschrieben werden. Diese wird über einen Befehl des FTP-Servers auf den Einplatinencomputer transferiert. Die Daten sind noch in einem Format, das sich schlecht einlesen lässt, da es eine Vielzahl von Trennzeichen enthält und deshalb auch mehr Speicherplatz als notwendig beansprucht. Daher wird das Format noch entsprechend angepasst, bevor die gemessenen Pulse von der Analysesoftware (Pulseanalyzer) mit den Eingangspulsen verglichen werden. Im Pulseanalyzer wird entschieden, ob die Pulse hinreichend gut vom UUB verarbeitet wurden, und das Ergebnis wird in eine Textdatei geschrieben, die der Testkontroller ausliest. Dieses wird dem Anwender auf dem Graphical User Interface (GUI) angezeigt. Diese erste Testroutine wird als Single Pulse Test (SPT) bezeichnet.

Danach folgt der PMT Voltage Test (PVT), bei dem die Kontrollspannungen der Hochspannung, die für die PMTs generiert wird, ausgelesen werden.

Zuletzt wird der UUB Power Test (UPT) durchgeführt: Zunächst liest der Testkontroller aus einer Konfigurationsdatei die Spannungen aus, die an das UUB gesendet werden sollen. Diese werden nacheinander an den Mikrocontroller der Powerkarte übermittelt, der die Spannung für das UUB entsprechend regelt. Über die Telnet-Sitzung mit dem UUB versucht der Testkontroller dieses mit dem Ping-Befehl anzusprechen. Es wird gespeichert, ob das UUB erreichbar war. Im Verlauf des UPT werden auch je eine Spannung oberhalb und unterhalb des Arbeitsbereichs des UUBs gesendet, sodass kontrolliert wird, ob die Slow-Control das UUB wie geplant herunterfährt. Der Ausgang des Tests wird dem Anwender wiederum über ein GUI angezeigt.

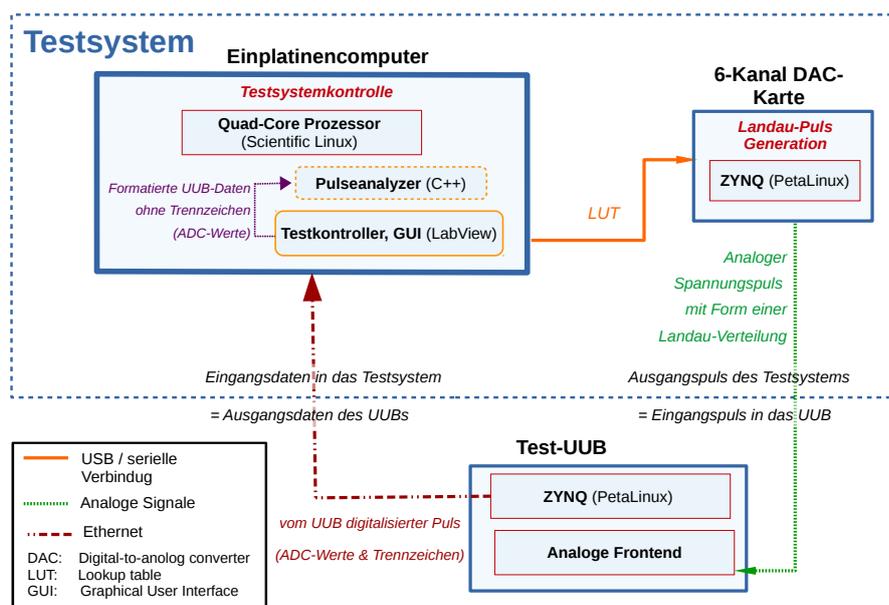


Abbildung 4.4.: Darstellung des Testablaufs mit Schwerpunkt auf der Erzeugung und Verarbeitung der Pulse im Rahmen des SPT

4.6. Das Programm Pulseanalyzer

Ein wichtiger Bestandteil des Testablaufs ist der SPT. Dort wird überprüft, wie das UUB Spannungspulse verarbeitet, die den beim zukünftigen Einsatz im Detektor-Feld von den PMTs erzeugten Signalen entsprechen. Die steil steigende Flanke der Pulse und der flache Abfall lassen sich durch eine Landau-Verteilung [54] beschreiben.

In Abb. 4.4 ist der Ablauf des Tests mit Schwerpunkt auf der Erzeugung und der Verarbeitung der Pulse im SPT dargestellt. Im Programm „Pulseanalyzer“ wird in den Ausgangsdaten des UUBs nach Pulsen gesucht, welche dann durch Parameter wie Pulsamplitude und Pulsbreite (Full Width at Half Maximum, FWHM) charakterisiert werden. Außerdem sind die Amplitude und das FWHM des digitalen Pulses, der in der LUT steht (theoretischer Puls), bekannt. Anhand der LUT generiert die DAC-Karte die Ausgangspulse des Testsystems (die zugleich die Eingangspulse des UUBs sind). Deshalb ist es möglich, mit dem Pulseanalyzer die Ausgangsdaten des UUBs, die die vom UUB digitalisierten Pulse enthalten, mit dem theoretischen Puls anhand von Amplitude und Breite zu vergleichen.

Zudem wird im Pulseanalyzer das Rauschen, das Verstärkungsverhältnis eines Paares von UUB-Kanälen und die Sockelspannung (Pedestal) bestimmt. Auf Grundlage der Werte dieser Parameter wird die Entscheidung getroffen, ob das UUB den SPT bestanden hat oder nicht. Eine Übersicht über den Programmablauf, der im Folgenden detailliert beschrieben ist, ist in Abb. 4.5 dargestellt.

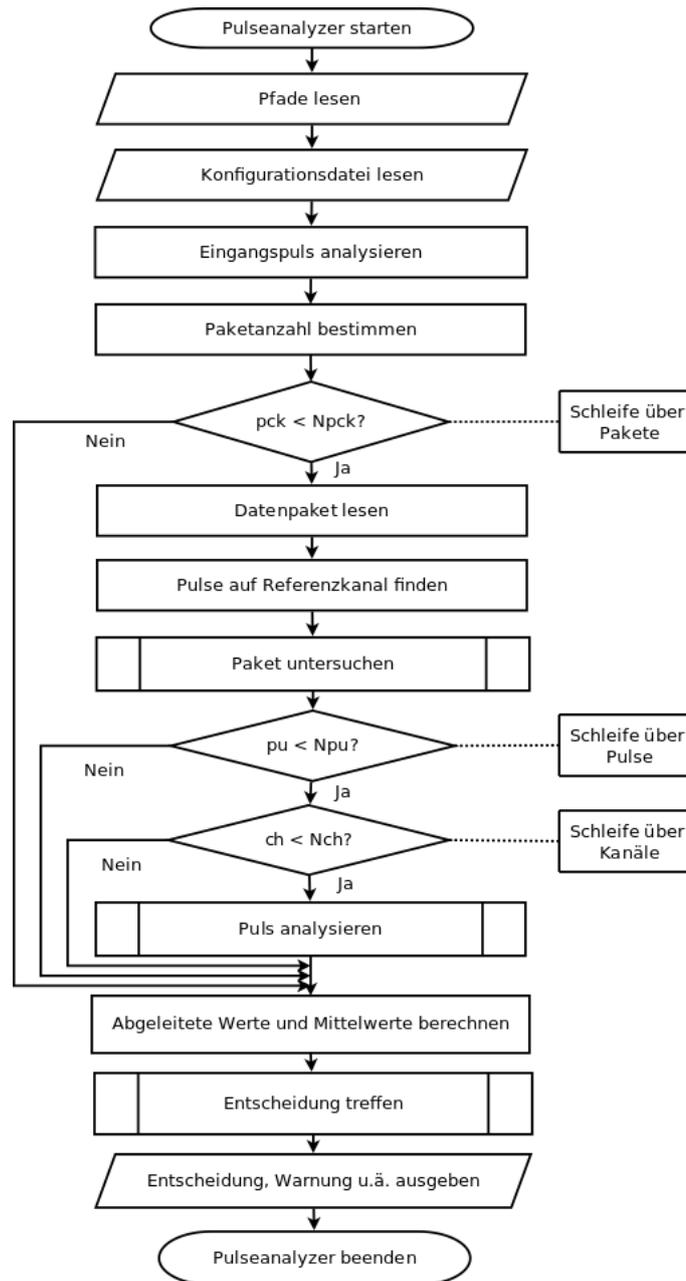


Abbildung 4.5.: Programmablauf des Pulseanalyzers mit:
 pck: Schleifenindex der Pakete,
 Npck : Berechnete Paketanzahl,
 pu: Schleifenindex der Pulse,
 Npu: Anzahl gefundener Pulse,
 ch: Schleifenindex der Kanäle,
 Nch: Anzahl der analysierten Kanäle

4.6.1. Der grundlegende Aufbau

Das Programm Pulseanalyzer wurde objektorientiert geschrieben. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Bestandteile des Programms so modular wie möglich gehalten werden, damit Funktionen wieder verwendet werden können und die Übersichtlichkeit des Programmcodes gewährleistet bleibt.

Die Abläufe und Methoden werden nach ihrem Einsatzgebiet sortiert und dementsprechend auf Klassen aufgeteilt. Eine kurze Beschreibung des Aufgabenbereichs jeder Klasse wird in Tabelle 4.3 gegeben.

Klasse	Aufgabe
ReadFileClass	Konfigurationsdateien und formatierte UUB-Daten einlesen
DividePulseClass	Ein Datenpaket in Ausschnitte unterteilen, die nur einen Puls enthalten
AnalysePulseClass	Einen einzelnen Puls beschreiben
DecisionClass	Anhand der gesammelten Daten eine Entscheidung treffen
OutdatedClass	Methoden aufbewahren, die inzwischen ersetzt wurden

Tabelle 4.3.: Kurze Beschreibung der Aufgaben der einzelnen Klassen

Für die Interaktion mit dem Testkontroller-Programm wurde eine Konfigurationsdatei erstellt, in die das Testkontroller-Programm die Informationen über den durchzuführen den Test schreibt, wie zum Beispiel die Parameter des Landau-Pulses. Im Programmcode selbst befinden sich keine numerischen Werte. Alle benötigten Werte sind in einem separaten Header-File gesammelt, auf das jede Klasse zugreifen kann.

4.6.2. Der Programmablauf

Im SPT wird der Pulseanalyzer viermal aufgerufen (einmal pro Pulsform) und erhält dabei vom Testkontroller-Programm den Pfad zu der zur Pulsform gehörenden Konfigurationsdatei. Außerdem besteht die Möglichkeit anzugeben, wie viele Pulse der Pulseanalyzer maximal analysieren soll. Wird dies nicht genutzt, greift der Pulseanalyzer auf Standardeinstellungen zurück und es werden alle Pulse analysiert. Nach Aufruf des Pulseanalyzers wird zunächst die Konfigurationsdatei geöffnet, in der die wichtigsten Rahmenbedingungen für den Test stehen. Das sind im Einzelnen:

- Die Amplitude und Breite des theoretischen Pulses,
- Unsicherheiten der einzelnen Datenpunkte in Zeitpunkt und Spannung (für den Fit benötigt),
- die Dateipfade der formatierten UUB-Daten und der LUT, mit der verglichen wird,
- die Abtastrate des UUBs und des theoretischen Pulses,
- das theoretische Verstärkungsverhältnis eines Paares von PMT-Kanälen,
- die Angabe, welche der 10 UUB-Kanäle im Test berücksichtigt werden sollen.

4.6.2.1. Die Analyse des theoretischen Pulses

Der theoretische Puls für den Pulseanalyzer wird, wie auch die LUT für die Digital to Analog Converter (DAC)-Karte in einem speziellen Programm [XVI] außerhalb der Testroutinen erstellt. Dort wird eine auf der Landau-Verteilung basierende Funktion abgetastet und diese digitalen Werte in eine Text-Datei geschrieben. Der theoretische Puls unterscheidet sich von der LUT dahingehend, dass die Abtastfrequenz für den theoretischen Puls doppelt so hoch ist, wie für die LUT der DAC-Karte (1 GSa/s statt 0.5 GSa/s). Im Pulseanalyzer werden die Werte des theoretischen Pulses eingelesen, damit er später mit den vom UUB digitalisierten Pulsen in einer Darstellung verglichen werden kann (siehe Abschnitt 4.6.2.6). Außerdem hat es sich im Entwicklungsprozess des Pulseanalyzers als nützlich erwiesen, neue Methoden zur Analyse eines vom UUB digitalisierten Pulses zunächst am theoretischen Puls zu testen, der nicht durch die Elektronik verzerrt wurde.

4.6.2.2. Das Einlesen der Ausgangsdaten des UUBs

Nach der Analyse des theoretischen Pulses erfolgt das Einlesen der formatierten UUB-Daten. Da die Auslesesoftware des UUBs immer eine feste Anzahl von Datenpunkten ausgibt, kopiert das Testkontroller-Programm für einen Testdurchlauf mehrere dieser Datenpakete, die mit zeitlichem Abstand zueinander aufgenommen wurden, hintereinander. Im Pulseanalyzer wird jedes dieser Pakete einzeln analysiert, da sonst Pulse, die am Rand eines Datenpakets aufgezeichnet wurden, als vom UUB abgeschnitten interpretiert werden könnten. Ein Vorteil der paketweisen Analyse ist, dass die Pakete sukzessiv aus den Ausgangsdaten des UUBs eingelesen werden können und so der benötigte Arbeitsspeicher geringer ist.

Beim Einlesen der formatierten UUB-Daten werden diese noch von 12-Bit-ADC-Werten in digitale Spannungswerte umgerechnet. Dazu wird ausgenutzt, dass der gesamte dynamische Bereich der ADCs 2 V entspricht. Zusätzlich bekommt jeder Datenpunkt einen Zeitstempel, der anhand der Abtastrate des UUBs berechnet wird, aus dem jedoch nicht hervorgeht, zu welchem Zeitpunkt die Daten tatsächlich vom UUB aufgezeichnet wurden. Außerdem werden die Spannungswerte und die Zeitstempel mit einem Fehler versehen, der für den Fit benötigt wird (siehe Abschnitt 4.6.2.6). Hierbei besteht die Möglichkeit, jedem Datenpunkt einen gesonderten Fehler zuzuweisen und so zum Beispiel Punkte entlang der steigenden Flanke besonders im Fit zu berücksichtigen. Dies hat sich jedoch als sehr aufwendig und wenig zielführend erwiesen, weshalb jedem Datenpunkt derselben Fehler zugewiesen wurde, der in der Konfigurationsdatei steht. Die so für die Analyse vorbereiteten Daten für ein Paket sind in Abb. 4.6 dargestellt.

4.6.2.3. Die Unterteilung eines Datenpakets in einzelne Pulse

Die Analyse eines Pakets ist in Abb. 4.7 in einem Ablaufdiagramm dargestellt. Ein Paket kann mehrere Pulse enthalten (Abb. 4.6), die jedoch einzeln analysiert werden sollen. Daher ist es nötig, das Paket in Abschnitte zu unterteilen, die nur einen einzigen Puls enthalten. Während des Tests wird das UUB ohne Trigger betrieben, weshalb die Positionen

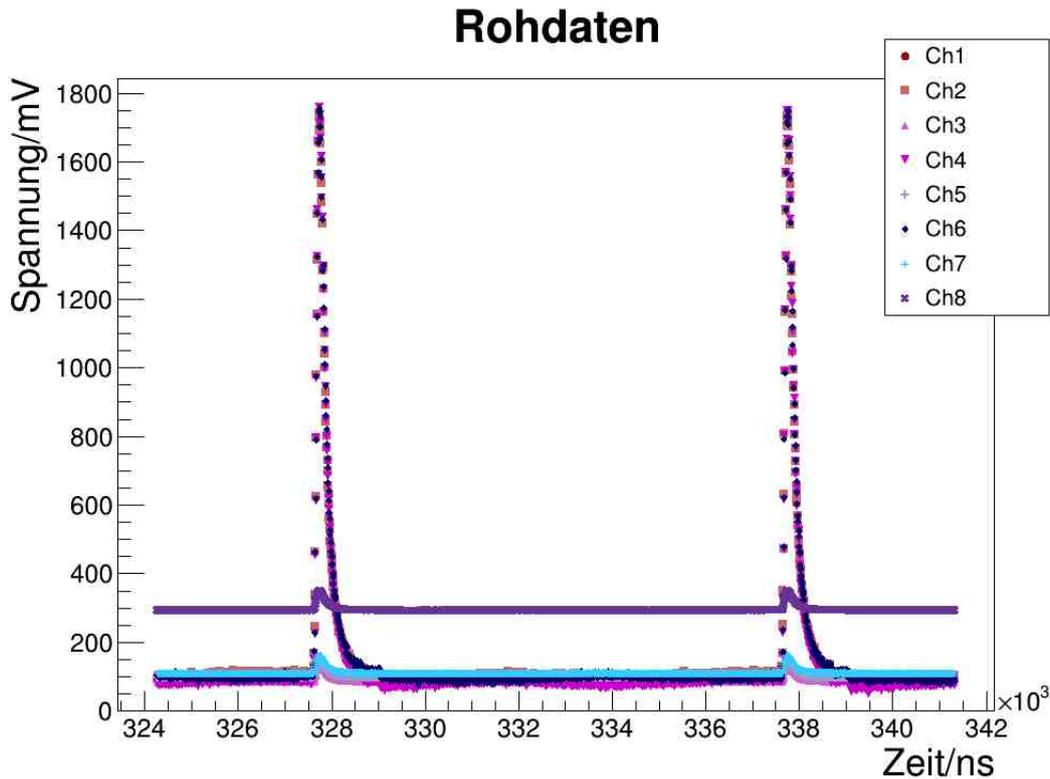


Abbildung 4.6.: Daten eines einzelnen Pakets für die ersten acht UUB-Kanäle nach der Umrechnung in Spannungswerte

der Pulse relativ zum Beginn des Datenpakets unbekannt sind. Die aktuelle Firmware der DAC-Karte sieht vor, dass die Ausgangspulse des Testsystems auf allen sechs Ausgängen synchron an das UUB geschickt werden. Daher reicht es aus, einen Kanal (Referenzkanal) auszuwählen und dort die Positionen der Pulse zu bestimmen. Als Referenzkanäle werden Low-Gain-Kanäle bevorzugt, da die Pulse dort weniger schnell saturieren.

Auf dem Referenzkanal werden alle Positionen in einem Datenpaket markiert, an denen die Spannung eine in Abhängigkeit von der Pulshöhe des theoretischen Pulses festgelegte Schwelle übersteigt. Anschließend wird ausgehend von der theoretischen Pulsbreite berechnet, wie viele Datenpunkte über dieser Schwelle zu erwarten sind. Die Datenpunkte, die die Schwelle übersteigen, werden gezählt und dieser Wert mit dem erwarteten verglichen. Anhand dieses Vergleichs wird entschieden, ob es sich tatsächlich um einen Landaupuls oder eine kurze Spannungsspitze handelt, wobei letztere nicht weiter analysiert wird, sondern zu einer Fehlermeldung im abschließenden Testbericht führt.

Anhand des Zeitpunktes, an dem sich der höchste Punkt des Pulses befindet, wird der Pulsanfang als der Punkt definiert, der eine FWHM vor dem höchsten Datenpunkt liegt. Außerdem wird kontrolliert, ob die Anfänge der Pulse weit genug von den Rändern des Pakets entfernt sind, damit keine abgeschnittenen Pulse analysiert werden und die Ver-

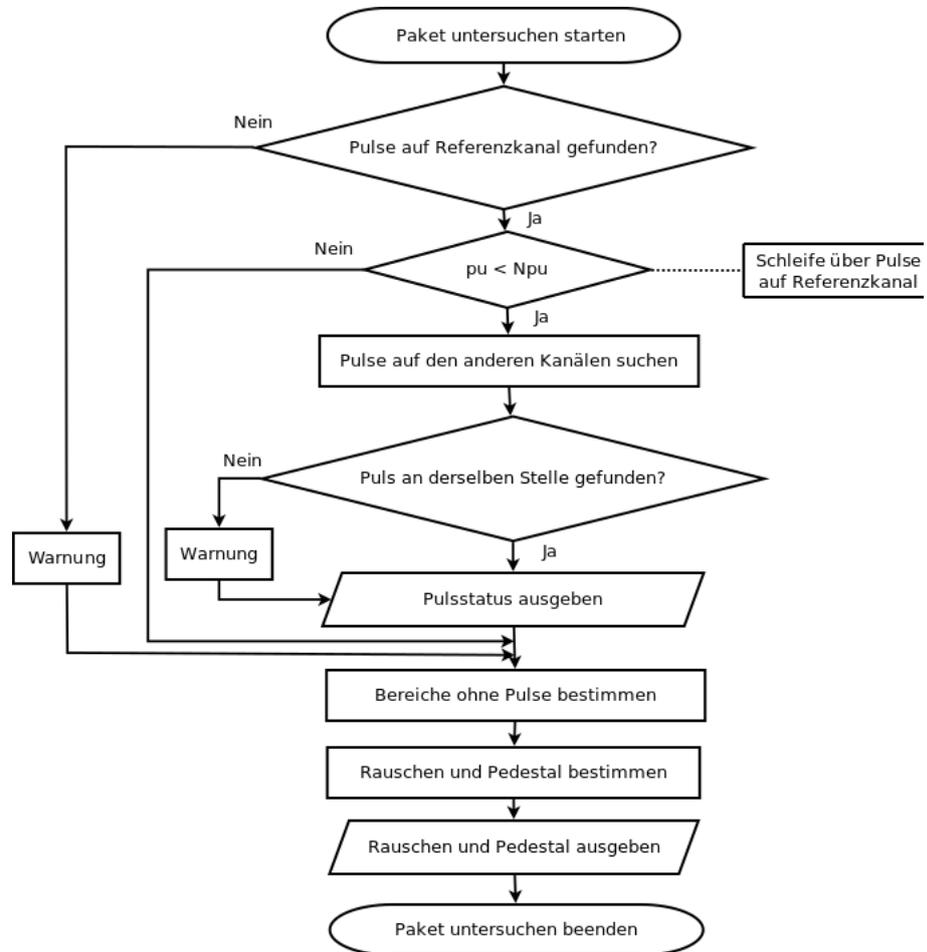


Abbildung 4.7.: Programmablauf der Analyse eines Pakets mit
pu: Schleifenindex für Pulse,
Npu: Anzahl der gefundenen Pulse auf dem Referenzkanal

gleichbarkeit der Pulse gewährleistet bleibt. Pulse, die zu nah am Rand liegen, werden entsprechend gekennzeichnet, haben jedoch keinen weiteren Einfluss auf den Ausgang des Tests.

4.6.2.4. Die Analyse des Datenpakets und die Bestimmung des Rauschens

Im nächsten Schritt wird geprüft, ob die Pulse, die auf dem Referenzkanal als solche identifiziert wurden, ebenfalls auf den übrigen Kanälen des UUBs zu finden sind. Dabei wird jedoch nicht das gesamte Paket erneut durchsucht, sondern nur ein schmales Fenster um den Bereich herum, in dem der Puls auf dem Referenzkanal gefunden wurde. Da es sich bei diesem Ausschnitt auch um den Bereich maximaler Amplitude handelt, wird zugleich überprüft, ob der Puls in die Saturation steigt. Dabei führt ein saturierter Puls nicht unmittelbar zum Nichtbestehen des SPTs, da zum Beispiel die hohen Pulsformen so gewählt wurden, dass alle Bits der Low-Gain-Kanäle angesprochen werden, weshalb die Pulse auf den High-Gain-Kanälen in jedem Fall saturieren sollten. Falls ein Puls jedoch gar nicht erst gefunden wurde, führt dies zu einer Fehlermeldung im abschließenden Testbericht und das UUB besteht den SPT nicht.

Da die Frequenz bekannt ist, mit der die Ausgangspulse des Testsystems an das UUB gesendet werden, kann berechnet werden, wieviele Pulse in einem Paket zu erwarten sind. Liegt die Pulsanzahl in einem Paket außerhalb dieses Bereichs, fällt das UUB ebenfalls durch den Test.

Da die Positionen der Pulse im Datenpaket sowie deren Breite bekannt sind, kann nun das Rauschen in den Abschnitten ohne Puls bestimmt werden. Dabei werden sowohl das Peak to Peak-Rauschen als auch das Root Mean Square (RMS)-Rauschen bestimmt, jedoch in unterschiedlichen Abschnitten: Das Peak to Peak-Rauschen wird im gesamten Bereich, der keine Pulse enthält, bestimmt. Vor jedem Pulsanfang wird ein Bereich von 5σ ausgelassen, da dieser im Rahmen des Fits untersucht wird. Ein σ ist dabei die Standardabweichung, wenn der Puls als Landauverteilung interpretiert wird, und entspricht einem Viertel der FWHM. Nach jedem Pulsanfang wird ein Bereich von 56σ nicht in der Spite-Spitze-Rauschmessung berücksichtigt, was der Pulslänge und dem Bereich, in dem gefittet wird, entspricht. Die Differenz von höchster zu niedrigster gemessener Spannung in diesem Bereich wird als Peak to Peak-Rauschen für jedes Paket gespeichert. Ausreißer in der Spannung, die im Bereich des Pulses auftreten, werden später über die Abweichung der einzelnen Datenpunkte von der Fitkurve (Residuals) erkannt (Abschnitt 4.6.2.6).

Das RMS-Rauschen wird in einem kleineren Bereich vor dem Beginn des letzten Pulses des Pakets bestimmt. Dieser Bereich ist so gewählt, dass die Spannung dort nach dem Unterschneiden des Signals wieder auf dem Wert der Sockelspannung ist, die vor Beginn des vorletzten Pulses gemessen wurde. Der Bereich fängt 120σ nach dem Pulsanfang des vorletzten Pulses an und endet 52σ vor Beginn des letzten Pulses, sodass auch eine fehlerhaft zusammengesetzte LUT keinen Einfluss auf das Rauschen hätte. Liegt nur ein einzelner Puls in dem untersuchten Paket wird der Beginn des „vorletzten“ Pulses anhand der Pulssendefrequenz berechnet. Die Spannungswerte aller Datenpunkte, die in diesem Bereich liegen, werden in ein Histogramm eingetragen. Die Standardabweichung der Verteilung der Spannungen entspricht dem RMS-Rauschen, der Mittelwert dem Pe-

destal. Die Werte für das Rauschen, das Pedestal und die Anzahl der in jedem Paket gefundenen Pulse werden in einer speziellen Datenstruktur [XI] gespeichert, um bei der Auswertung des Tests weiter verarbeitet zu werden.

4.6.2.5. Die Analyse der einzelnen Pulse

Der Programmablauf für die Analyse eines einzelnen Pulses ist in Abb. 4.8 dargestellt. An dieser Stelle wird im Pulseanalyzer eine Schleife über die gefundenen Pulse gestartet. Die Pulse werden nur dann analysiert, falls sie nicht in der vorhergehenden Routine als saturiert oder zu einer Seite abgeschnitten gekennzeichnet wurden. Für die Analyse wird zunächst ein Bereich ausgeschnitten, der nur einen einzelnen Puls enthält. Dabei kann in den Programmeinstellungen festgelegt werden, wie viele Datenpunkte vor dem Pulsanfang berücksichtigt werden, anhand derer der Spannungswert direkt vor Beginn des Pulses (Offset) berechnet wird.

Für das Maximum und die FWHM werden zunächst Abschätzungen anhand der Datenpunkte gemacht, die später als Startwerte für die Fitparameter dienen. Das Maximum ist dabei nicht unbedingt durch den Datenpunkt höchster Spannung bestimmt, sondern es wird zusätzlich das Verhältnis des Spannungswertes zu denen der benachbarten Punkten berechnet, das einen Wert von 60 % nicht unterschreiten darf. Dadurch soll vermieden werden, dass eine Spannungsspitze, die den eigentlichen Puls überlagert, die Amplitude beeinflusst.

Die FWHM wird ermittelt, indem an die beiden Flanken des Pulses auf Höhe der halben Amplitude jeweils eine Gerade durch die beiden nächsten Datenpunkte angepasst wird. Der Abstand der Funktionswerte der Geraden bei halber Amplitude des Pulses ergibt die FWHM (Abb. 4.9).

Der Offset wird durch Anpassen einer Geraden durch die Datenpunkte direkt vor dem Puls bestimmt. Der Funktionswert der Geraden an der Stelle, die den Pulsbeginn kennzeichnet, ergibt den Offset. Die Unterscheidung zwischen Offset und Pedestal wird dann wichtig, wenn die Daten zum Beispiel von langwelligem Rauschen mit Frequenzen im Bereich der Puls-Sendefrequenz überlagert werden. Damit die Pulsamplitude nicht davon abhängt, an welcher Stelle des Rauschen sich der Puls befindet, wird die Amplitude aus der Differenz von Maximum und Offset bestimmt und nicht aus der Differenz von Maximum und Pedestal.

4.6.2.6. Fit und Überlagerung

Bevor die landaubasierte Fitfunktion an den Puls angepasst wird, werden die Datenpunkte entlang der Zeitachse verschoben, sodass die steigende Flanke des gemessenen Pulses an derselben Zeitkoordinate liegt, wie die Flanke des zu Beginn eingelesenen theoretischen Pulses (blaue, gestrichelte Linie in Abb. 4.10). Anschließend wird der theoretische Puls vertikal verschoben, sodass der Offset des vom UUB digitalisierten Puls mit dem des theoretischen Pulses übereinstimmt. Wenn es sich bei dem Puls um den Puls eines High-Gain Kanals handelt, wird der theoretische Puls zudem entsprechend der Verstärkung der High-Gain-Kanäle skaliert.

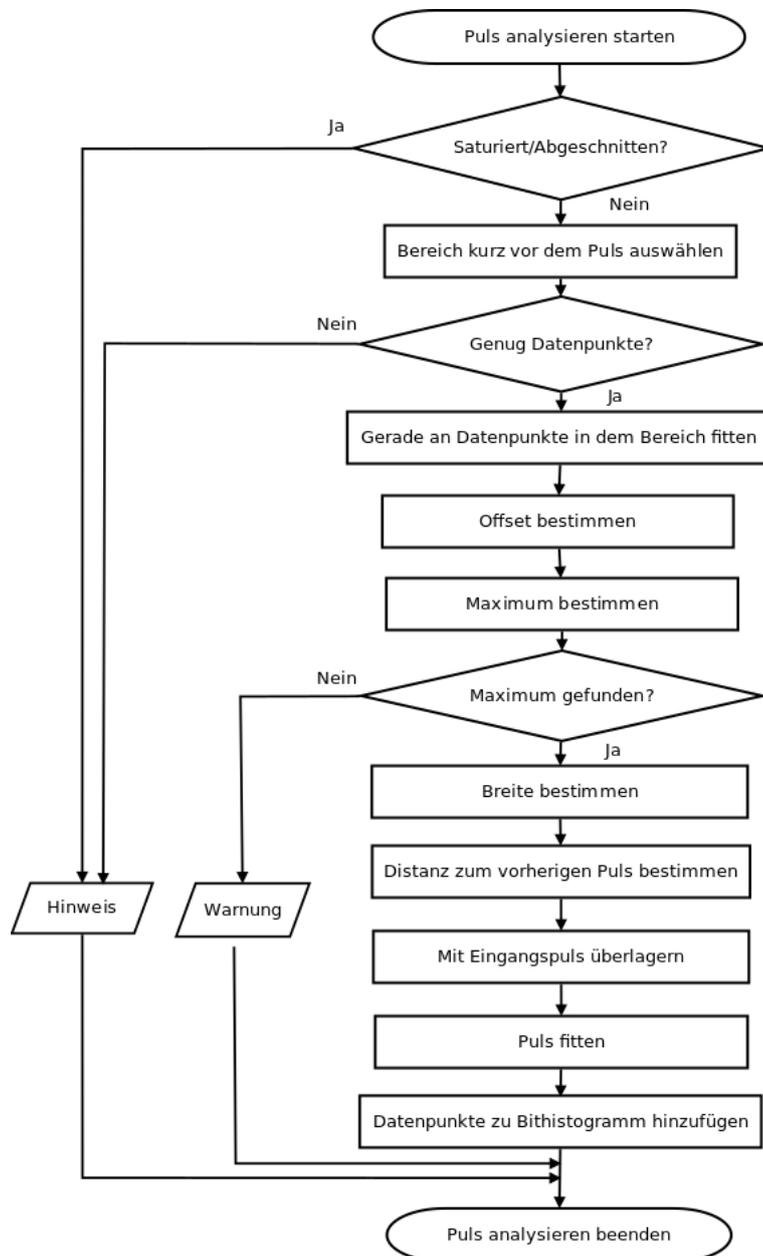


Abbildung 4.8.: Programmablauf der Analyse eines einzelnen Pulses

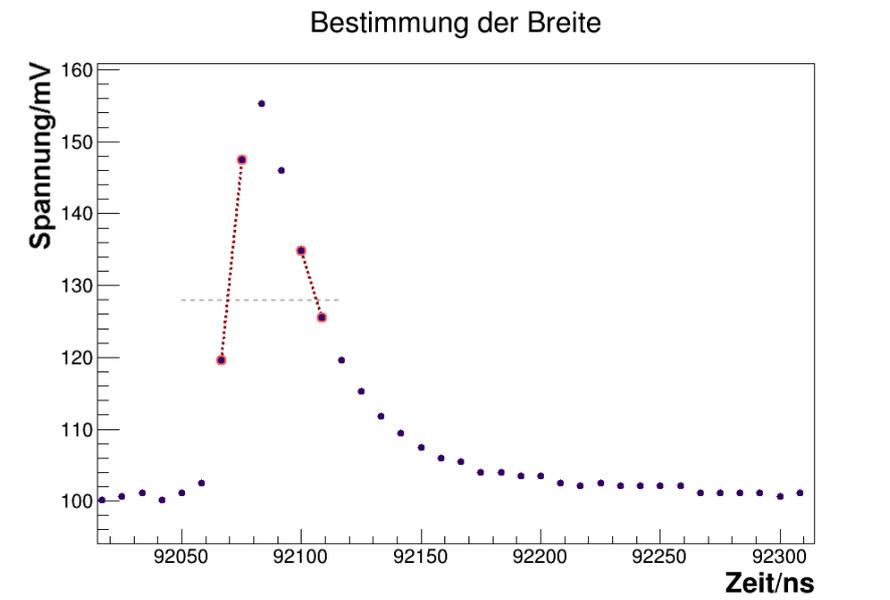


Abbildung 4.9.: Veranschaulichung, wie die FWHM anhand der Datenpunkte bestimmt wird. Rot hinterlegte und größer sind die Datenpunkte, durch die die Geraden gelegt werden. Mit der grauen, waagerechten Linie wird die halbe Amplitude des Pulses angedeutet.

Die Fitgrenzen werden so gesetzt, dass der Puls nicht im Rauschen liegt. Dazu wird der zuvor berechnete Wert für das RMS-Rauschen verwendet. Innerhalb der Fitgrenzen wird an den Puls eine Landau-basierte Fitfunktion angepasst. Bei vorgegebenem Wert für den Offset bleiben noch drei Freiheitsgrade: Die Pulsamplitude, die Breite und die Zeitkoordinate des Maximums. Die Startwerte für diese Parameter sind die zuvor anhand der Datenpunkte bestimmten Werte für Amplitude und FWHM. Weitere Details zum Fit sind [50] zu entnehmen. Die beiden Graphen und die Fitfunktionen sind mit Residuals in Abb. 4.10 dargestellt. Mit den Residuals können Spannungsspitzen in jenem Bereich entdeckt werden, der bei der Peak to Peak-Rauschmessung ausgeschlossen wurde (Abschnitt 4.6.2.4).

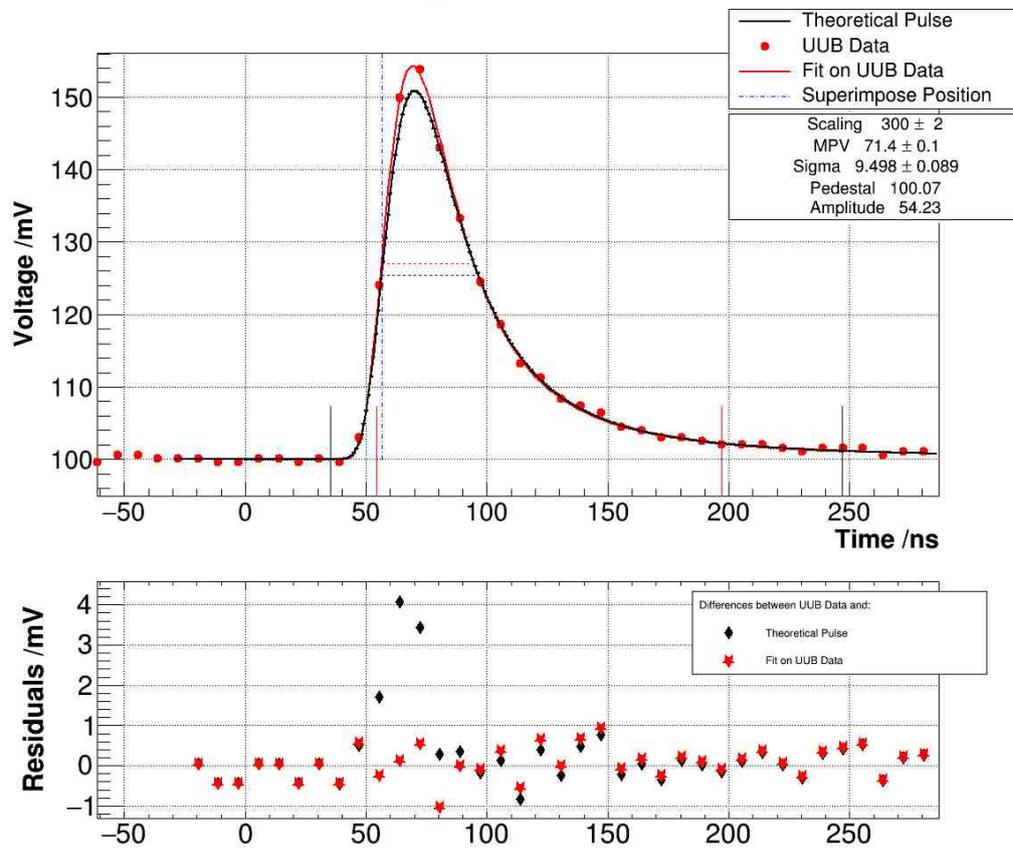


Abbildung 4.10.: Oberes Bild: Überlagerung des gemessenen Pulses (rote Punkte) mit dessen Fitkurve (rote, hohe Linie) und dem theoretischen Eingangspuls (schwarze, flachere Linie). Die vertikalen, kurzen Linien vor und hinter dem Puls markieren die Fitgrenzen für gemessenen (innere beiden Linien) und Eingangspuls (äußere Linien). Unteres Bild: Residuals der gemessenen Datenpunkte zur Fitkurve des gemessenen Pulses (rote Sterne) und zur Fitkurve des Eingangspulses (schwarze Rauten).

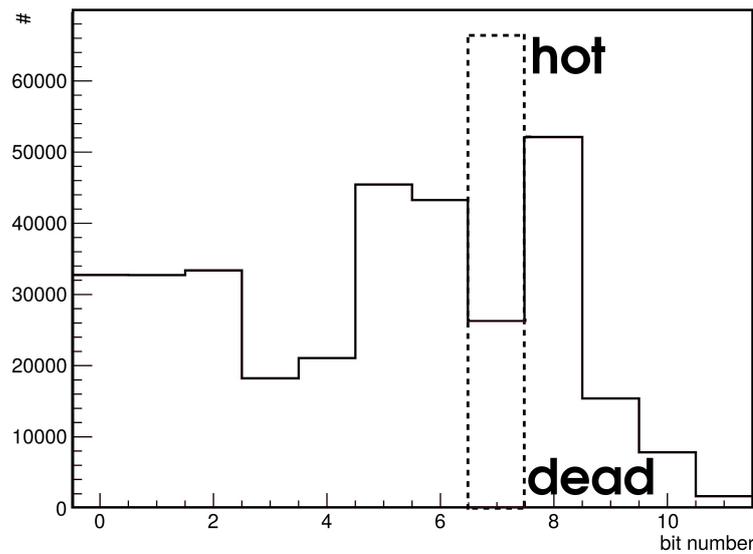


Abbildung 4.11.: Darstellung eines Bithistogramms für 12 Bits. Die gestrichelten Linien zeigen die Zahl der Einträge für die Fälle an, dass das siebte Bit immer (hot) oder nie (tot) angesprochen wurde.

4.6.2.7. Der Bitfehlertest

Eine Anforderung an das TS ist es, das UUB auf Bitfehler zu überprüfen [55]. Dazu wird für jeden Puls eine feste Anzahl von Spannungswerten wieder in Bitwerte umgerechnet. Für jeden UUB-Kanal wird ein Histogramm der 12 Bits erstellt. Bei jedem Datenpunkt eines Pulses erfolgt für jedes angesprochene Bit ein Eintrag. Da die Anzahl der Pulse und die Anzahl der eingetragenen Datenpunkte pro Puls bekannt sind, kann, nachdem alle Pulse analysiert wurden, gezählt werden, ob ein Bit bei jedem Datenpunkt angesprochen wurde („heißes“ Bit) oder ob kein Eintrag vorhanden ist („totes“ Bit). Dies ist in Abb. 4.11 veranschaulicht. Der Bittest kann nur Bitfehler bemerken, die im Test durchgängig auftreten. Die Bithistogramme könnten auch für jeden Puls einzeln ausgewertet werden, allerdings ist die Wahrscheinlichkeit vor allem bei den schmalen Pulsformen dann höher, dass ein Bit zufällig nicht angesprochen wurde, was dann fälschlicherweise als Bitfehler interpretiert würde. Der Bereich zwischen zwei Pulsen wird in diesem Bitfehlertest nicht berücksichtigt, da dort die Bitkonfigurationen wenig Variation zeigen und das Bithistogramm andernfalls wesentlich mehr Arbeitsspeicher benötigt.

Die Pulsamplituden, die im SPT genutzt werden, sind so gewählt, dass sowohl auf den High-Gain-Kanälen als auch auf den Low-Gain-Kanälen jedes Bit getestet werden kann. Auch bei den niedrigen Pulsen auf dem Low-Gain-Kanal wird der Bitfehlertest durchgeführt, dann jedoch nur für die untersten Bits. Das Ergebnis des Bitfehlertests wird im abschließenden Testbericht dargestellt und in die Entscheidung mit einbezogen.

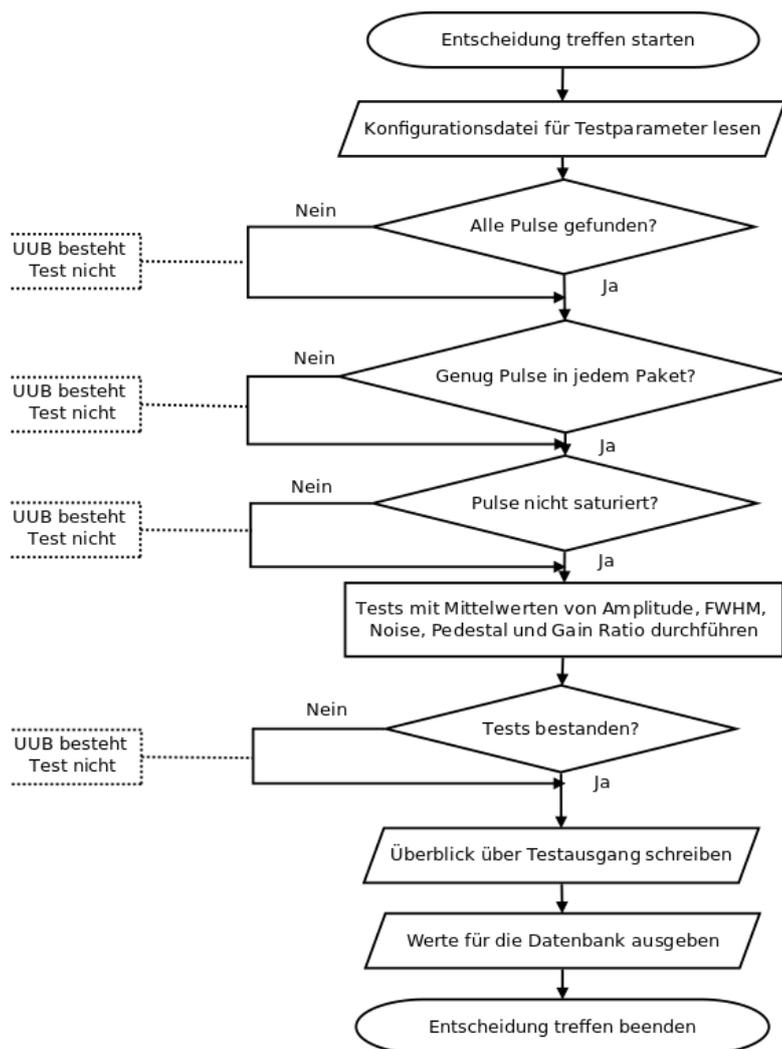


Abbildung 4.12.: Programmablauf für das Treffen der Entscheidung

4.6.3. Die Entscheidung

Bei der Entscheidung wird auch das Verstärkungsverhältnis der PMT-Kanal-Paare berücksichtigt. Dieses wird aus dem Verhältnis der Amplituden der einzelnen Pulse auf den jeweiligen High- und Low-Gain-Kanälen gebildet. Für die Parameter, die für jeden Puls bestimmt wurden, wird außerdem der Mittelwert und die Standardabweichung aller im Test analysierten Pulse gebildet. Die Ergebnisse der Analysen der einzelnen Pulse werden in einer speziellen Datenstruktur [XI] gespeichert, mit der es möglich ist, auch nach Ende des Tests noch Histogramme und Korrelationsdiagramme zu erzeugen. Das Ablaufdiagramm der Entscheidung darüber, ob das UUB den SPT besteht, ist in Abb. 4.12 dargestellt. Um die Entscheidung treffen zu können, wird eine weitere Konfigurationsdatei eingelesen, in der Grenzen für die Entscheidungsparameter definiert sind, die die

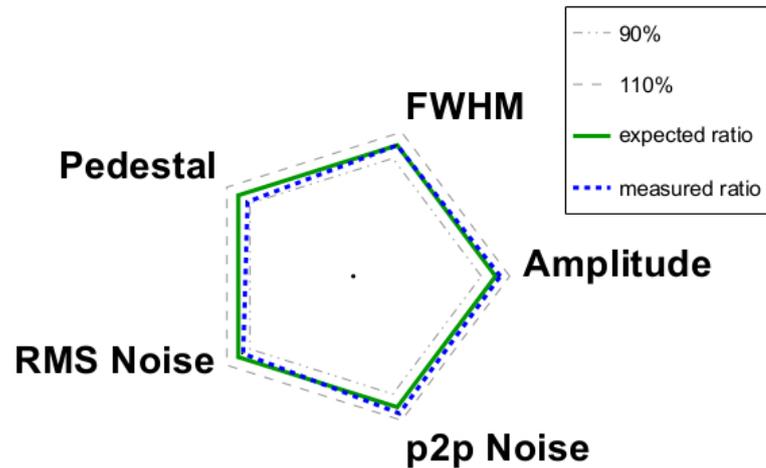


Abbildung 4.13.: Netzplot für den Testausgang eines 50mV200ns-Pulses. Zu beachten ist, dass beim Rauschen kleine Werte besser zu bewerten sind.

Mittelwerte und Standardabweichungen der Verteilungen betreffen. Damit ein UUB den SPT besteht, müssen zunächst folgende Bedingungen erfüllt sein:

- Die Pulse wurden gefunden,
- die Pulse waren nicht saturiert,
- in jedem Paket wurde die erwartete Anzahl an Pulsen gefunden,
- kein Bitfehler trat dauerhaft auf.

Außerdem dürfen die Mittelwerte und Standardabweichungen der Verteilungen von Amplitude, FWHM, Pedestal, Rauschen und Verstärkungsverhältnis die Grenzen, die in dieser Arbeit zunächst anhand eines UUB-Prototyps bestimmt wurden, nicht überschreiten.

Die verschiedenen Testergebnisse werden in den abschließenden Testbericht geschrieben, der vom Testkontroller-Programm ausgewertet wird. Das Ergebnis wird zudem graphisch in einem Netzplot (Abb. 4.13) aufbereitet, in dem das Verhältnis der gemessenen zu den erwarteten Werten dargestellt wird.

5. Die Bestimmung der Cut-Parameter-Grenzen anhand eines Dauertests

Um die Funktion des Testsystems (TS) zu überprüfen und auch Fehler zu finden, die nur mit sehr geringer Wahrscheinlichkeit auftreten, wird die Testroutine regelmäßig automatisch vom Testkontroller-Programm mehrfach hintereinander ausgeführt (Dauertest). Die Ergebnisse werden nach Beendigung des Dauertests von einem speziellen Programm [XII] zusammengeführt und ausgewertet, sodass eine Übersicht entsteht, in welchen der einzelnen Tests Probleme auftraten. Dadurch entstehen große Datensätze, mit denen der Upgraded Unified Board (UUB)-Prototyp mit hoher Statistik beschrieben werden kann.

5.1. Die Beschreibung des Datensatzes

Der Datensatz, mit dem die folgenden Auswertungen exemplarisch durchgeführt wurden, enthält 480 Testdurchläufe. Der Pulseanalyzer verfügt zwar über die Möglichkeit, die Anzahl der zu analysierenden Pulse auf 100 zu beschränken, dies wurde hier jedoch nicht genutzt, sodass insgesamt über 50000 Pulse für jede der vier im Test verwendeten Pulsformen aufgenommen wurden. Die vier verschiedenen Landau-Pulse waren im Einzelnen (Amplitude, Breite): Hoch und schmal (800mV, 40ns), hoch und breit (800mV, 40ns), niedrig und schmal (50mV, 40ns) und niedrig und breit (50mV, 200ns).

Es wurden außerdem nur die ersten acht UUB-Kanäle betrachtet, da die korrekte Beschreibung der letzten beiden Kanäle 9 und 10 aktuell noch untersucht wird. Die beiden Kanäle sind intern gekoppelt und das Signal von Kanal 9 wird über einen Spannungsteiler auf ein Viertel des ursprünglichen Wertes abgeschwächt, um den dynamischen Bereich für den Surface Scintillation Detector (SSD) zu erhöhen. Ein Ausgang der Digital to Analog Converter-Karte (DAC-Karte) muss deshalb mit einem Verstärker versehen werden, um den gesamten dynamischen Bereich von Kanal 9 abdecken zu können. Die Verbindung der DAC-Karte im TS zu den Photomultiplier Tube (PMT)-Eingängen des UUBs ist in Abb. 5.1 dargestellt. Das UUB verarbeitet die Daten insgesamt auf 10 Kanälen weiter, wobei das Signal auf den vier High-Gain-Kanälen (2, 4, 6, 10) 32-fach verstärkt ist [56]. Bei den beiden hohen Pulsformen sind die Pulse auf den High-Gain-Kanälen saturiert, weshalb sie dort nicht in der Entscheidung berücksichtigt werden.

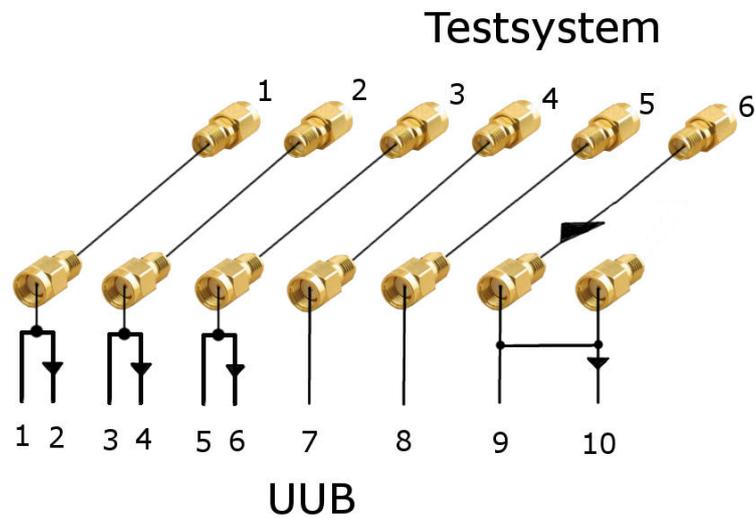


Abbildung 5.1.: Darstellung der Verbindung vom Testsystem zum UUB. Die dreieckigen Verstärkersymbole markieren Stellen im UUB und in der Verbindung zum UUB, an denen das Signal verstärkt wird. Die Signale auf den ersten drei PMT-Kanälen des UUB werden auf einen Low-Gain- ($\times 1$) und einen High-Gain-Kanal ($\times 32$) aufgeteilt. Kanal 9 und 10 sind intern gekoppelt. Der SMA-Anschluss von Kanal 10 wird aktuell auch beim Einsatz im Detektorfeld noch nicht genutzt. Dort könnte zukünftig ein weiterer Detektor angeschlossen werden, für den lediglich die interne Kopplung entfernt werden müsste. (Abb. erstellt unter Verwendung von [57])

5.2. Die Festlegung der Cut-Parameter

Die Arbeitsgruppe der Universität Siegen, die das TS für die UUBs baut, schlägt die folgenden Cut-Parameter für den Single Pulse Test (SPT) vor:

- Die maximale relative Abweichung des vom UUB gemessenen Amplitudenmittels von der Amplitude des Eingangspulses,
- die maximale Standardabweichung der vom UUB gemessenen Amplitudenverteilung,
- die maximale relative Abweichung des vom UUB gemessenen Full Width at Half Maximum (FWHM)-Mittelwerts von der FWHM des Eingangspulses
- die maximale Standardabweichung der vom UUB gemessenen FWHM-Verteilung,
- das maximale Root Mean Square (RMS)-Rauschen,

- das maximale Spitze-Spitze-Rauschen,
- die maximale relative Abweichung des gemessenen Verstärkungsverhältnis vom erwarteten Wert 32.
- die maximale Abweichung des Pedestal-Mittelwerts des UUBs vom erwarteten Wert 200 ADC-Kanäle.

Über die Parameter, die letztlich im TS verwendet werden, wird erst entschieden, wenn genügend UUBs der endgültigen Produktion verfügbar sind. Für die acht oben vorgeschlagenen Parametergrenzen werden in dieser Arbeit konkrete Zahlenwerte festgelegt, die anhand eines Dauertests eines UUB-Prototyps in Siegen bestimmt wurden.

5.3. Die Festlegung der Grenzen für die Cut-Parameter

Die Grenzen für die Cut-Parameter werden unter der Annahme festgelegt, dass es sich bei dem Siegener UUB um ein ideal funktionierendes UUB handelt. Die Front-End-Elektronik dieses UUBs ist jedoch nicht überarbeitet und es ist nicht kalibriert. Die in dieser Arbeit durchgeführten Überlegungen und Analysen können jedoch in gleicher Weise für ein überarbeitetes UUB durchgeführt werden, sodass die Grenzen für die Cut-Parameter entsprechend angepasst werden können.

Jeder der acht Cut-Parameter wird auf jedem der insgesamt zehn UUB-Kanäle getestet. Die sechs Low-Gain-Kanäle werden mit vier verschiedenen Pulsformen getestet, die vier High-Gain-Kanäle nur mit den beiden niedrigen Pulsformen. Dabei wird hier angenommen, dass Kanal 9 und 10 des UUBs in gleicher Weise getestet werden, wie die übrigen acht, die nicht gekoppelt sind. Ob dies aufgrund der internen Kopplung dieser Kanäle tatsächlich der Fall sein wird, steht derzeit noch nicht fest (siehe Abschnitt 5.1). Die Anzahl der Stellen, an denen das UUB einen einzelnen SPT nicht bestehen kann, berechnet sich dann wie folgt:

$$8 \text{ Parameter} \times 10 \text{ UUB-Kanäle} \times \left(\frac{6}{10} \times 4 \text{ Pulsformen} + \frac{4}{10} \times 2 \text{ Pulsformen} \right) = 256. \quad (5.1)$$

Unter der Annahme, dass diese 256 Möglichkeiten den SPT nicht zu bestehen unabhängig voneinander sind, kann berechnet werden, wie viele Standardabweichungen der Schnitt vom Mittelwert entfernt sein muss, damit ein analog zum Siegener UUB funktionierendes UUB den Test mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit besteht. Diese Wahrscheinlichkeit wird ausgehend davon berechnet, dass die Mittelwerte der einzelnen Tests des Dauertests normalverteilt um den wahren Wert des Parameters sind. Daraus folgt, dass die Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein Testergebnis innerhalb eines Bereichs von 4 Standardabweichungen um den wahren Wert (4σ -Bereich) zu finden ist, 99.9936 % ist. Bei einem 5σ -Bereich sind es 99.999912 %. Die Grenzen für die Cut-Parameter werden einseitig anhand der Verteilung mit der größten Abweichung festgelegt. Daher sind die Wahrscheinlichkeiten, dass ein gemessener Wert die jeweilige Grenze nicht über- bzw.

unterschreitet, wie folgt:

$$99.9936\% + \frac{1}{2} \times (100\% - 99.9936\%) = 99.9968\% \text{ (für den } 4\sigma\text{-Bereich)}, \quad (5.2)$$

$$99.999912\% + \frac{1}{2} \times (100\% - 99.999912\%) = 99.999956\% \text{ (für den } 5\sigma\text{-Bereich)}. \quad (5.3)$$

Die Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein UUB diese Grenze aufgrund statistischer Schwankungen bei mindestens einem der 256 Parametern übersteigt, ist dann gegeben durch:

$$1 - (0.999968)^{256} = 0.81\% \text{ (für den } 4\sigma\text{-Bereich)}, \quad (5.4)$$

$$1 - (0.99999956)^{256} = 0.012\% \text{ (für den } 5\sigma\text{-Bereich)}. \quad (5.5)$$

Es werden über 2000 UUBs produziert. Daher wird die Anzahl der mit dem TS durchgeführten Tests mit 3000 nach oben abgeschätzt. Würden die Grenzen anhand der Wahrscheinlichkeiten des 4σ -Bereichs gewählt, fielen etwa 24 UUBs aufgrund statistischer Fluktuationen durch den SPT. Geht man von einem 5σ -Bereich aus, beträfe dies weniger als ein UUB. Auf Grundlage dieser Rechnung wird vorgeschlagen, die Grenzen für die Cut-Parameter so zu wählen, dass der 5σ -Bereich der Verteilungen der Mittelwerte aller Tests in dem Bereich eingeschlossen ist, in dem das UUB für funktionstüchtig erklärt wird (Akzeptanzbereich).

5.3.1. Maximale relative Abweichung der Amplitude

In den Abbildungen 5.2 bis 5.7 sind die Verteilungen der Mittelwerte der Amplitudenverteilungen der 480 Testdurchläufe dargestellt. Jedes Bild entspricht einer der vier Pulsformen, wobei bei den niedrigen Pulsformen zwischen High- und Low-Gain-Kanälen unterschieden wurde. Es reicht dabei aus, die rechte 5σ -Grenze für die Verteilungen zu bestimmen, da die Amplitudenmittelwerte alle nach oben von der Eingangsamplitude abweichen und der Bereich, in dem die UUBs akzeptiert werden, symmetrisch um den Wert des Eingangspulses gewählt wird. In den folgenden Tabellen sind die oberen 5σ -Grenzen für alle Verteilungen aufgeführt. Die 5σ -Grenze wurde abschließend in eine relative Abweichung umgerechnet. Die relative Abweichung berechnet sich durch:

$$\frac{\text{gemessene Amplitude} + 5\sigma - \text{Eingangsamplitude}}{\text{Eingangsamplitude}}. \quad (5.6)$$

In den folgenden Tabellen bezeichnet „Mittelwert“ den Mittelwert der Verteilung der Mittelwerte der Fitamplituden-Verteilungen der 480 durchgeführten Testdurchläufe und σ die Standardabweichung der Verteilung der Mittelwerte der Fitamplituden-Verteilungen der 480 durchgeführten Testdurchläufe. Abweichungen, die als Fehler interpretiert werden und von denen ausgegangen wird, dass sie bei der nächsten UUB-Iteration behoben sind, sind hellgrau hinterlegt. Die größte Abweichung vom erwarteten Wert nach oben ist grün hinterlegt, die größte Abweichung nach unten blau. Außer beim Pedestal ist immer nur ein Fall von beidem markiert, da der jeweils andere irrelevant für den Cut-Parameter ist, wenn die Werte nur in eine Richtung abweichen.

	Mittelwert/mV	σ /mV	5σ -Grenze/mV	relative Abweichung /%
Kanal 1	54.3	0.03	54.45	8.9
Kanal 3	54.9	0.03	55.05	10.1
Kanal 5	54.76	0.03	54.91	9.82
Kanal 7	53.58	0.04	53.78	7.56
Kanal 8	60.03	0.03	60.18	20.36

Tabelle 5.1.: Auswertung der Verteilung der Fitamplituden-Mittelwerte der 50mV40ns-Pulse auf den Low-Gain-Kanälen

	Mittelwert/mV	σ /mV	5σ -Grenze/mV	relative Abweichung /%
Kanal 1	52.58	0.02	52.68	5.36
Kanal 3	53.02	0.02	53.12	6.24
Kanal 5	52.85	0.02	52.95	5.9
Kanal 7	52.82	0.02	52.92	5.84
Kanal 8	58.28	0.02	58.38	16.76

Tabelle 5.2.: Auswertung der Verteilung der Fitamplituden-Mittelwerte der 50mV200ns-Pulse auf den Low-Gain-Kanälen

	Mittelwert/mV	σ /mV	5σ -Grenze/mV	relative Abweichung /%
Kanal 1	871.55	0.09	872	9.0
Kanal 3	882.08	0.09	882.53	10.32
Kanal 5	879.02	0.11	879.57	9.95
Kanal 7	861.08	0.11	861.63	7.7
Kanal 8	961.8	0.12	962.4	20.3

Tabelle 5.3.: Auswertung der Verteilung der Fitamplituden-Mittelwerte der 800mV40ns-Pulse

	Mittelwert/mV	σ /mV	5σ -Grenze/mV	relative Abweichung /%
Kanal 1	846.59	0.06	846.89	5.86
Kanal 3	854.73	0.06	855.03	6.88
Kanal 5	851.78	0.06	852.08	6.51
Kanal 7	845.91	0.09	846.36	5.80
Kanal 8	934.89	0.08	935.29	16.91

Tabelle 5.4.: Auswertung der Verteilung der Fitamplituden-Mittelwerte der 800mV40ns-Pulse

	Mittelwert/mV	σ /mV	5σ -Grenze/mV	relative Abweichung /%
Kanal 2	1684.8	0.4	1686.8	5.43
Kanal 4	1717.8	0.4	1719.8	7.49
Kanal 6	1696.86	0.4	1698.86	6.18

Tabelle 5.5.: Auswertung der Verteilung der Fitamplituden-Mittelwerte der 50mV40ns-Pulse auf den High-Gain-Kanälen

	Mittelwert/mV	σ /mV	5σ -Grenze/mV	relative Abweichung /%
Kanal 2	1635.1	0.3	1636.6	2.29
Kanal 4	1668.1	0.3	1669.6	4.35
Kanal 6	1646	0.3	1647.5	2.97

Tabelle 5.6.: Auswertung der Verteilung der Fitamplituden-Mittelwerte der 50mV200ns-Pulse auf den High-Gain-Kanälen

Aus den Tabellen und den Abbildungen 5.2 bis 5.7 geht hervor, dass die Amplitude auf Kanal 8 stärker von der Eingangsamplitude abweicht als die der anderen Kanäle. Die Amplituden der anderen Low-Gain-Kanäle liegen in einem Bereich, dessen Breite kleiner als 3% der erwarteten Amplitude ist. Bei Kanal 8 ist die Abweichung ca. 10 % größer. Es ist zu erwarten, dass nach Überarbeitung des UUBs auch die Amplitude auf Kanal 8 in diesem Fenster liegt. Deshalb wird Kanal 8 bei der Bestimmung des Cut-Parameters außer Acht gelassen wird. Die nächst größere Abweichung liegt dann bei den 800mV40ns-Pulsen auf Kanal 3 vor und beträgt 10.32 %. Es wird deshalb vorgeschlagen, die Grenze für die maximale relative Abweichung des Mittelwerts der gemessenen Amplitude von der Eingangsamplitude auf 11% zu setzen. Das Histogramm der Mittelwerte der Fitamplituden der 800mV40ns-Pulse ist in Abb. 5.8 mit dem Bereich, in dem die Amplitude akzeptiert wird, dargestellt. Da eine Amplitudenabweichung von bis zu 0.2 % nach oben dem TS zugeschrieben werden kann [50], ist es auch denkbar, den Cut-Parameter relativ zur tatsächlich erwarteten Amplitude zu definieren. Dadurch würde der Akzeptanzbereich für die relative Abweichung der gemessenen mittleren Fitamplitude verkleinert. Dies erfordert jedoch eine Ausmessung der Ausgänge aller Testsysteme.

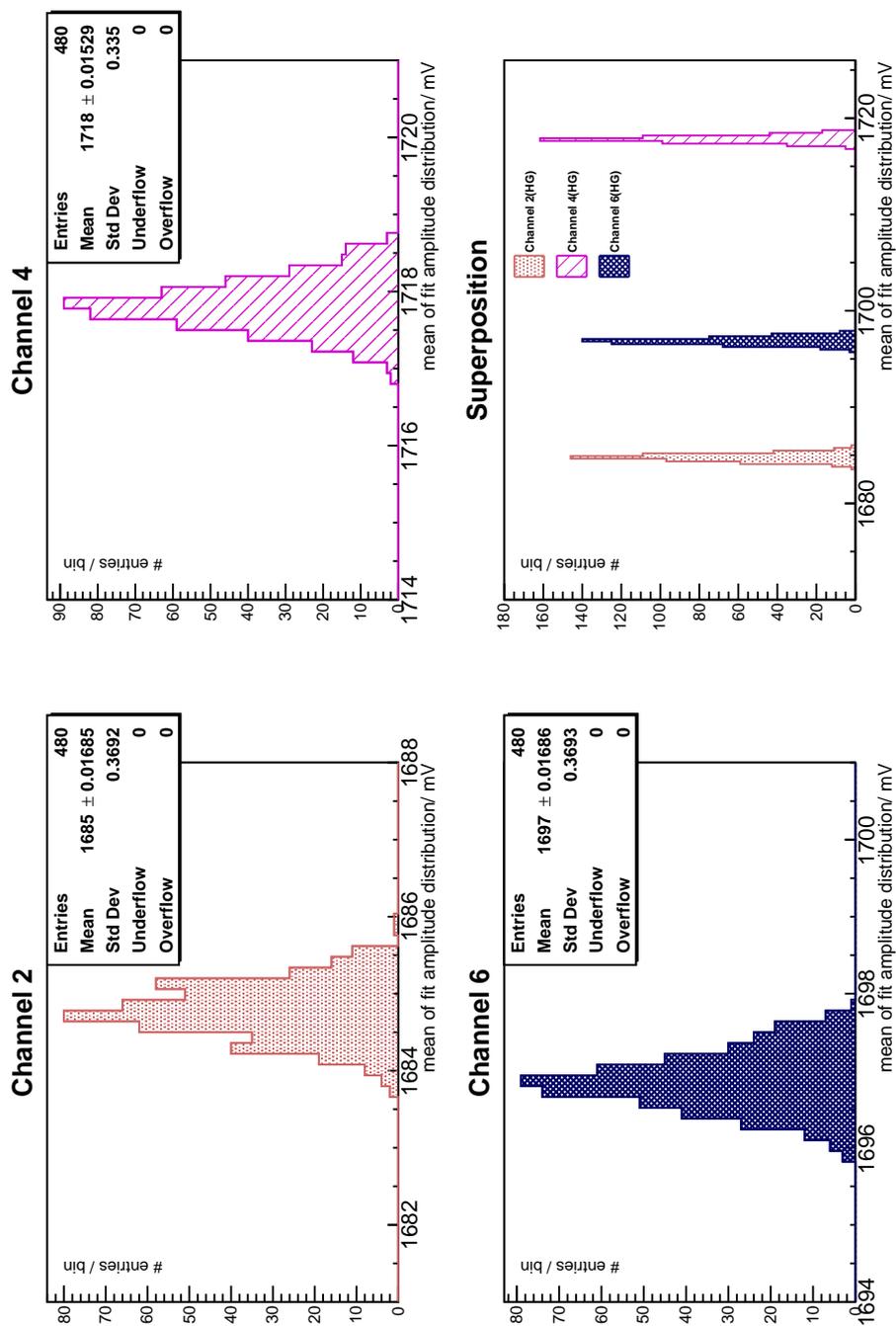


Abbildung 5.2.: Mittelwerte der Amplituden-Verteilungen der 50mV40ns-Pulse des UUB-Dauertests auf den High-Gain-Kanälen

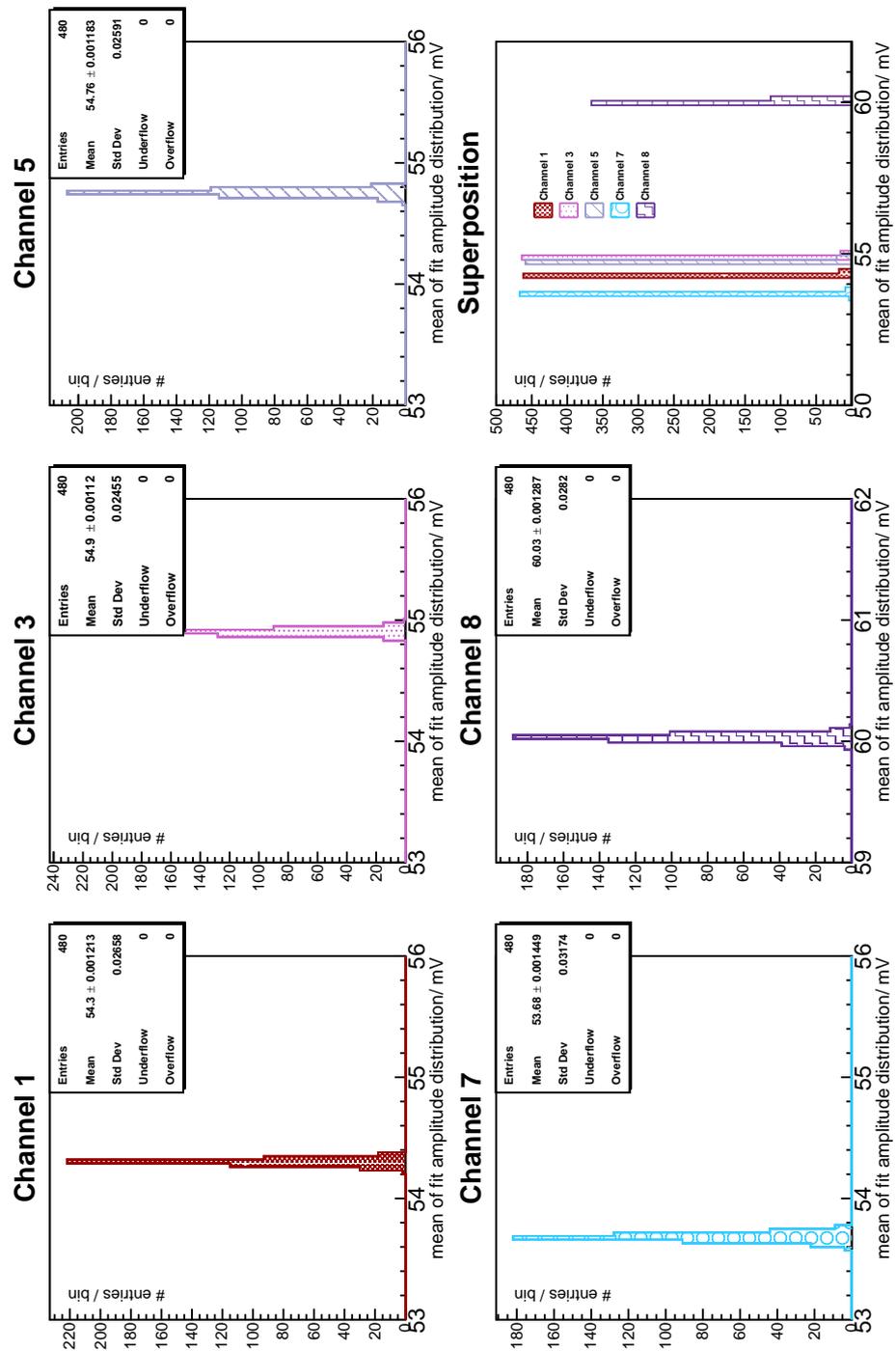


Abbildung 5.3.: Mittelwerte der Amplituden-Verteilungen der 50mV40ns-Pulse des UUB-Dauertests auf den Low-Gain-Kanälen

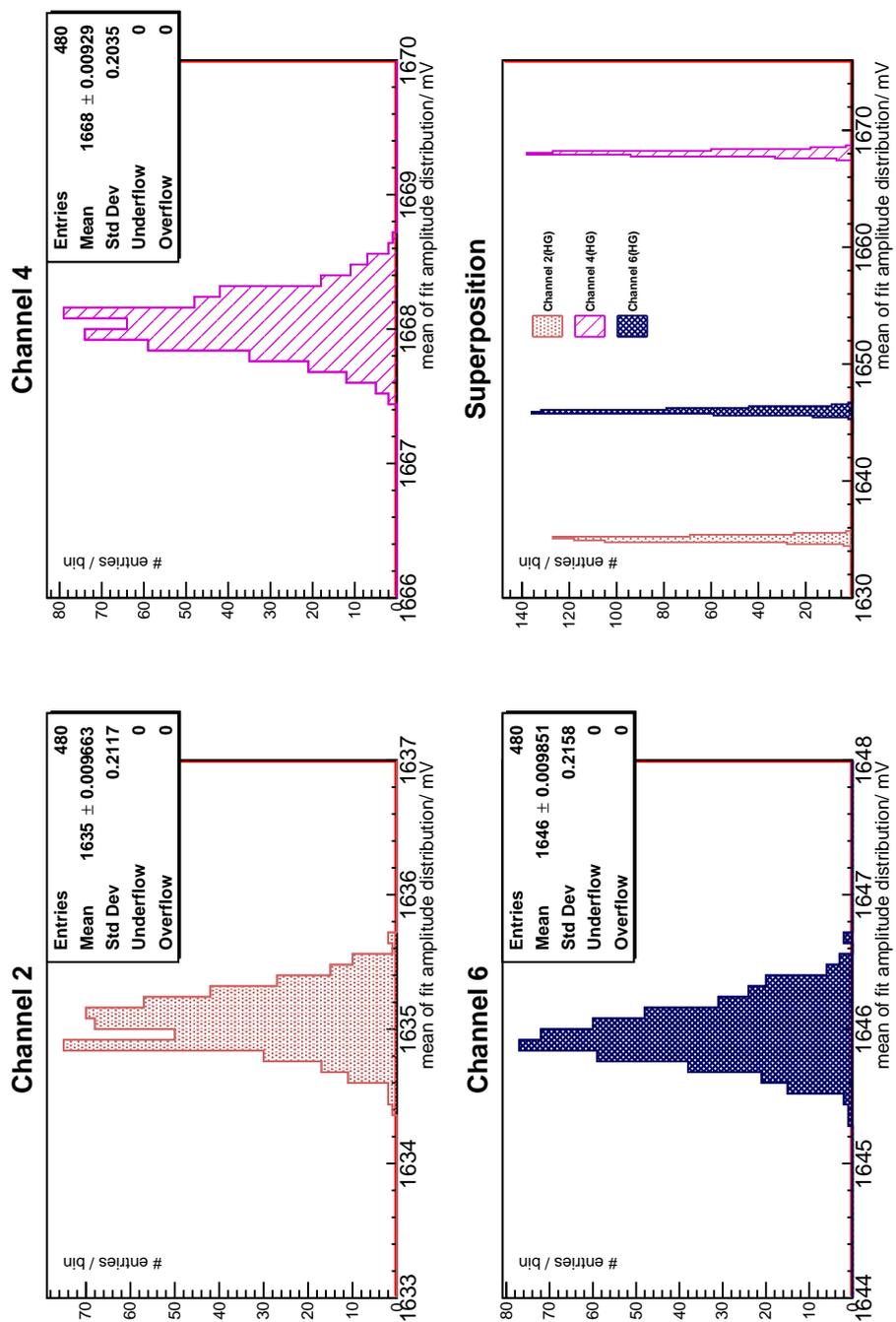


Abbildung 5.4.: Mittelwerte der Amplituden-Verteilungen der 50mV200ns-Pulse des UUB-Dauertests auf den High-Gain-Kanälen

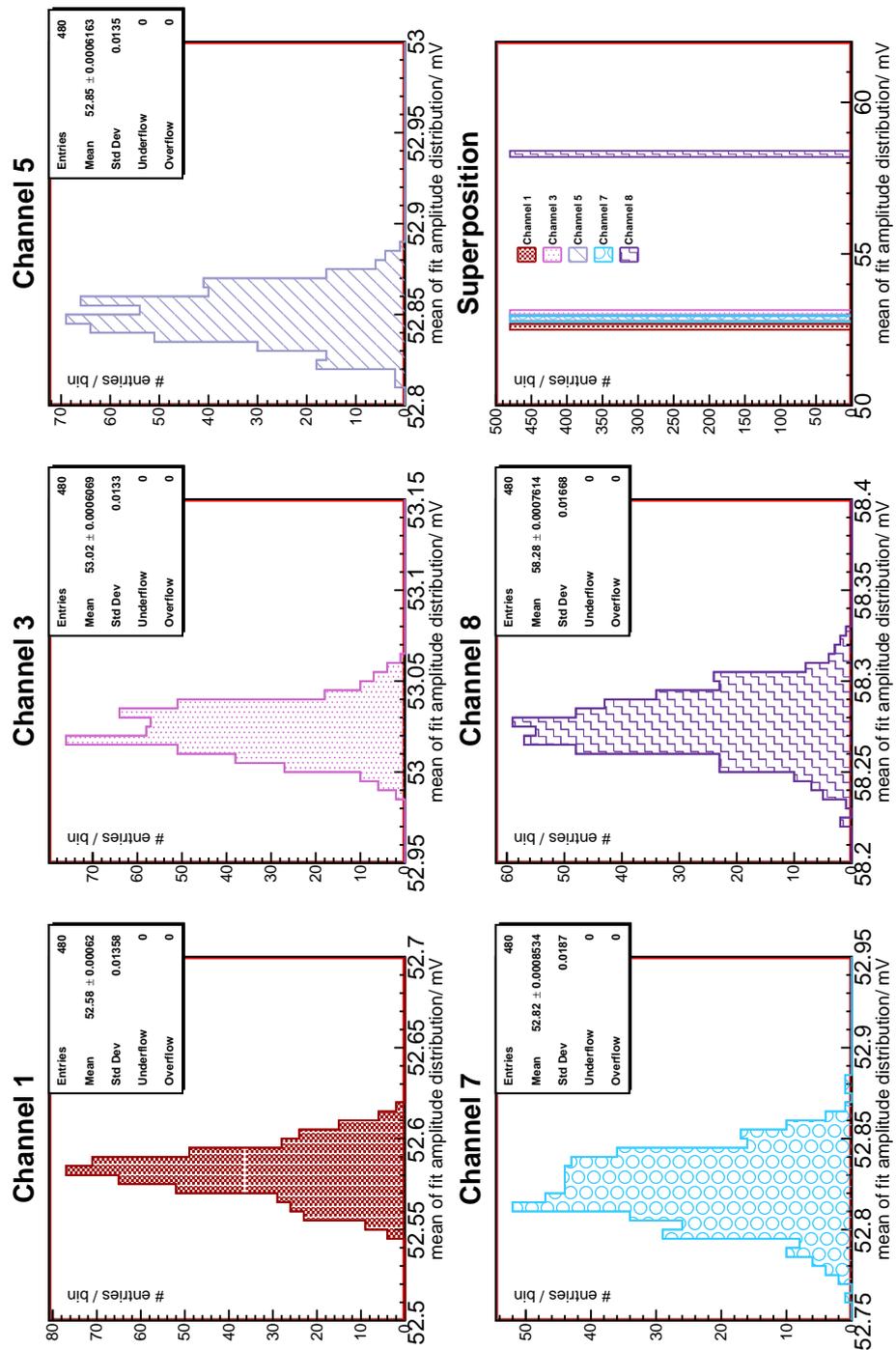


Abbildung 5.5.: Mittelwerte der Amplituden-Verteilungen der 50mV200ns-Pulse des UUB-Dauertests auf den Low-Gain-Kanälen

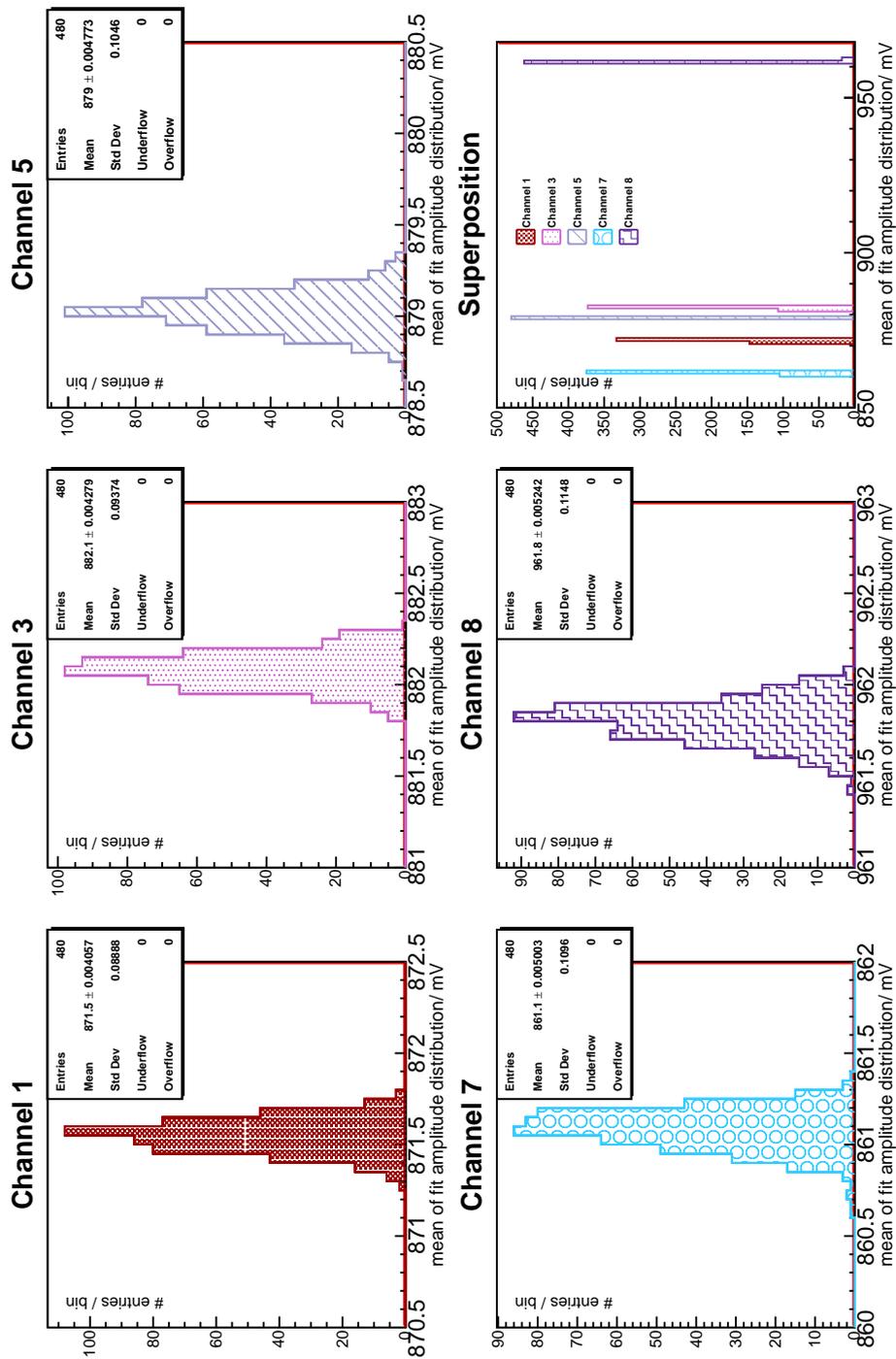


Abbildung 5.6.: Mittelwerte der Amplituden-Verteilungen der 800mV40ns-Pulse des UUB-Dauertests auf den Low-Gain-Kanälen

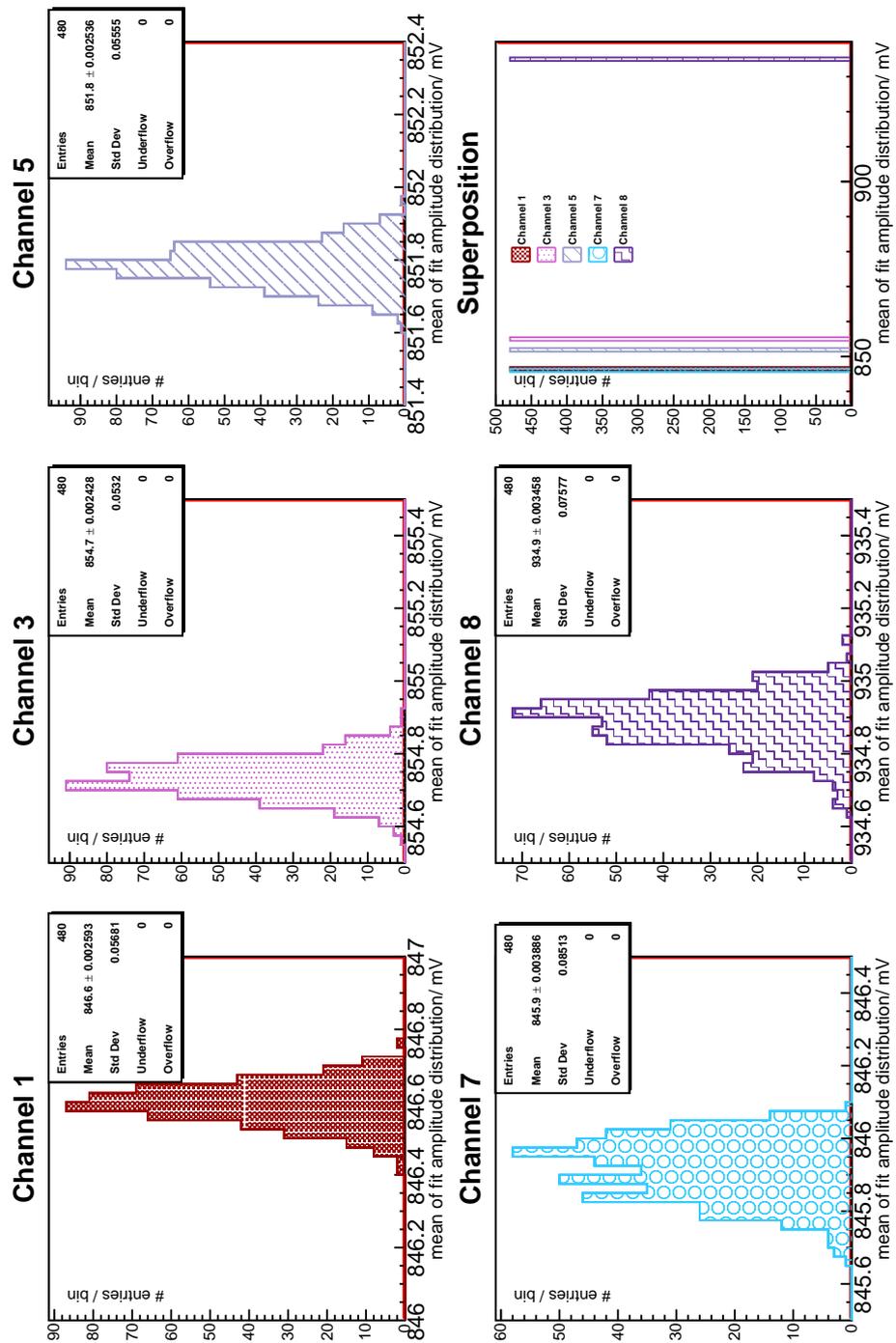


Abbildung 5.7.: Mittelwerte der Amplituden-Verteilungen der 800mV200ns-Pulse des UUB-Dauertests auf den Low-Gain-Kanälen

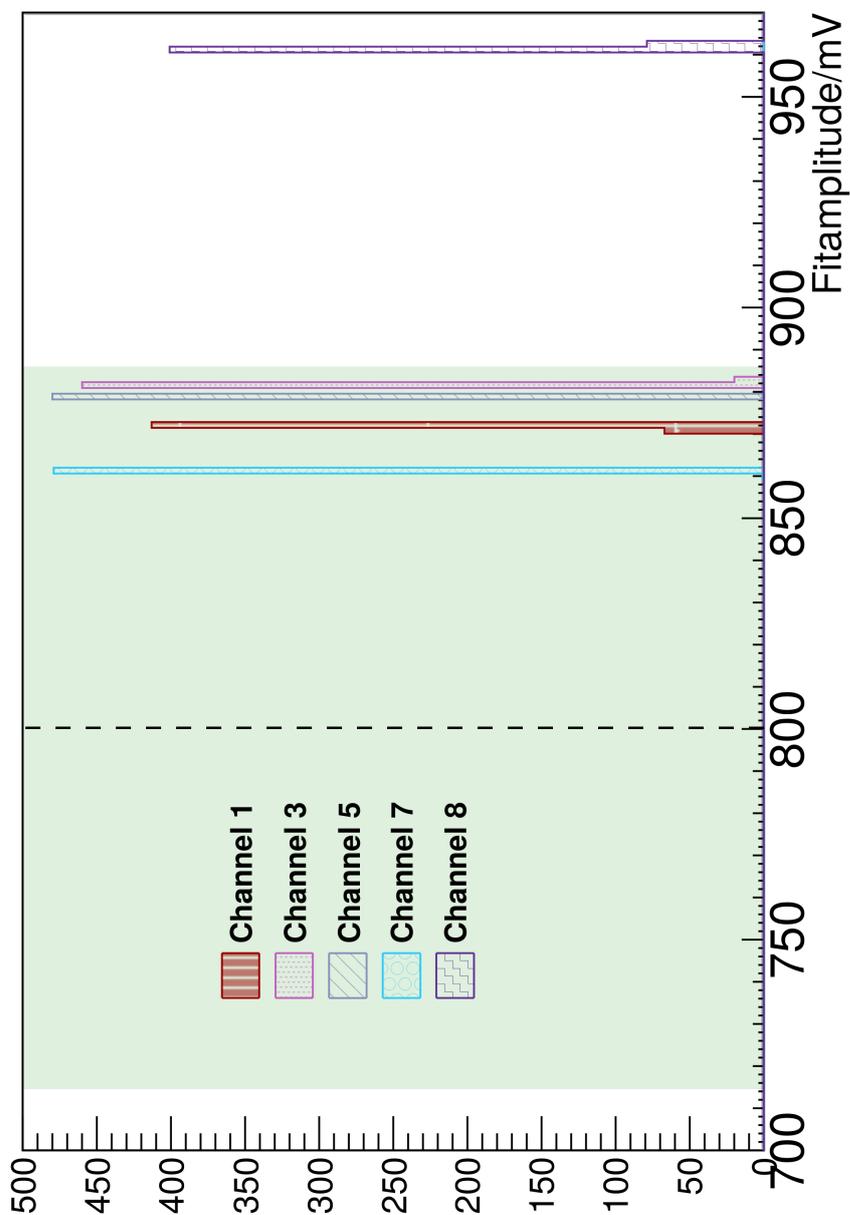


Abbildung 5.8.: Überlagerung der Mittelwerte der Amplituden-Verteilungen der 800mV40ns-Pulse des UUB-Dauertests auf den Low-Gain-Kanälen. Im grün hinterlegten Bereich wird die Amplitude als nicht fehlerhaft interpretiert.

Betrachtet man anstatt der Verteilungen der Mittelwerte der Fitamplituden die Verteilung aller Fitamplituden der 800mV40ns-Pulse im Dauertest, so ist eine Struktur mit zwei Maxima (Doppelpeak-Struktur) zu erkennen (Abb. 5.9). Deren Ursprung wird im folgenden Abschnitt untersucht.

5.3.1.1. Erklärung der Doppelpeak-Struktur der 800mV40ns-Verteilungen

Bei der Erzeugung der analogen Spannungspulse aus der Look Up Table (LUT) werden von der DAC-Karte des Testsystems Stufen im Pulsverlauf erzeugt, da die DACs alle 2 ns zum nächsten digitalen Spannungswert wechseln. Aufgrund des schnellen Anstiegs der Spannung sind diese Stufen an der steigenden Flanke des Pulses besonders ausgeprägt. Bei den 800mV40ns-Pulsen des SPTs ist die Flanke des Pulses am steilsten. Die Messungen der Amplitude und der FWHM werden deshalb dadurch beeinflusst, zu welchen Zeiten die Datenpunkte relativ zu den Stufen aufgenommen wurden. Dies äußert sich in der Doppelpeak-Struktur der Histogramme für Amplitude und Breite der 800mV40ns-Pulse (Abb. 5.9 und 5.10).

Durch Einfärben der beiden Histogrammhälften des Fitamplituden-Histogramms eines einzelnen Testdurchlaufs (Abb. 5.11) und Überlagerung der zugehörigen Datenpunkte der Pulse (Abb. 5.12) wird deutlich, dass sich die beiden Amplitudenmaxima unterschiedlichen Abtastzeitpunkten zuordnen lassen. Als Indikator für den Abtastzeitpunkt kann der zeitliche Abstand zwischen Datenpunktmaximum und Fitmaximum herangezogen werden. Trägt man diesen gegen die FWHM oder die Amplitude des Fits auf, ist eine Korrelation deutlich erkennbar (Abb. 5.13 und 5.14). Bei Verwendung eines Triggers könnte die Breite der beiden Verteilungen auf die Breite des Bandes in den beiden Abbildungen reduziert werden. Um aber bestmöglich den tatsächlichen Aufbau im Detektorfeld zu emulieren, wurde auf einen Hardware-Trigger verzichtet. Erstellt man das Korrelationsdiagramm in Abb. 5.10 in gleicher Weise für die anderen Pulsformen, so ist zu erkennen, dass der Effekt des Abtastzeitpunktes dort aufgrund der flacheren Flanken weniger ausgeprägt ist (Abb. 5.15 und 5.16).

Das Auftreten der Doppelpeak-Struktur ist also kein Fehler des Prototyp-UUBs, sondern eine Folge der Erzeugung der Eingangspulse des UUBs durch das Testsystem (TS).

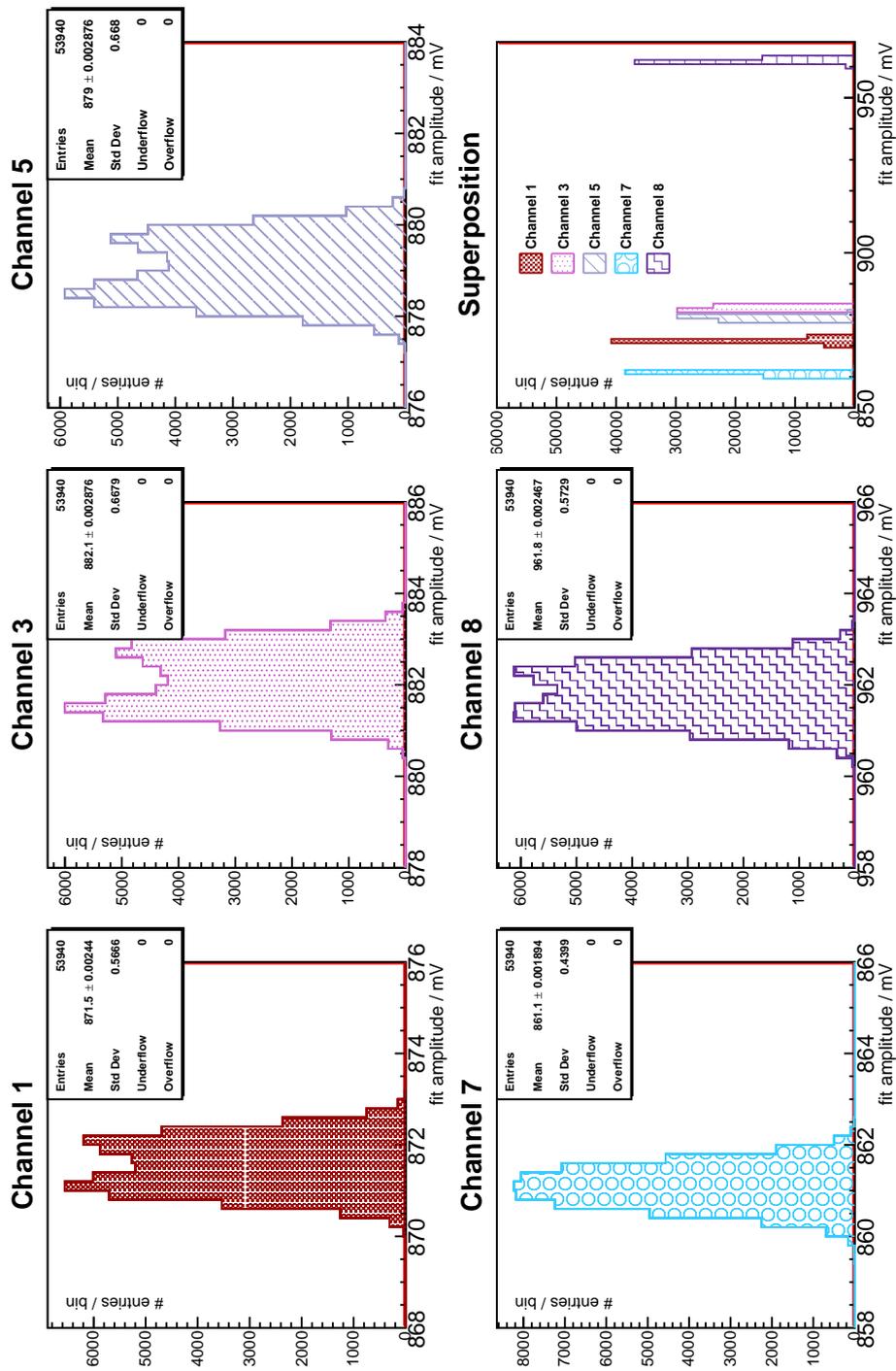


Abbildung 5.9.: Amplituden aller 800mV40ns-Pulse des UUB-Dauertests auf den Low-Gain-Kanälen

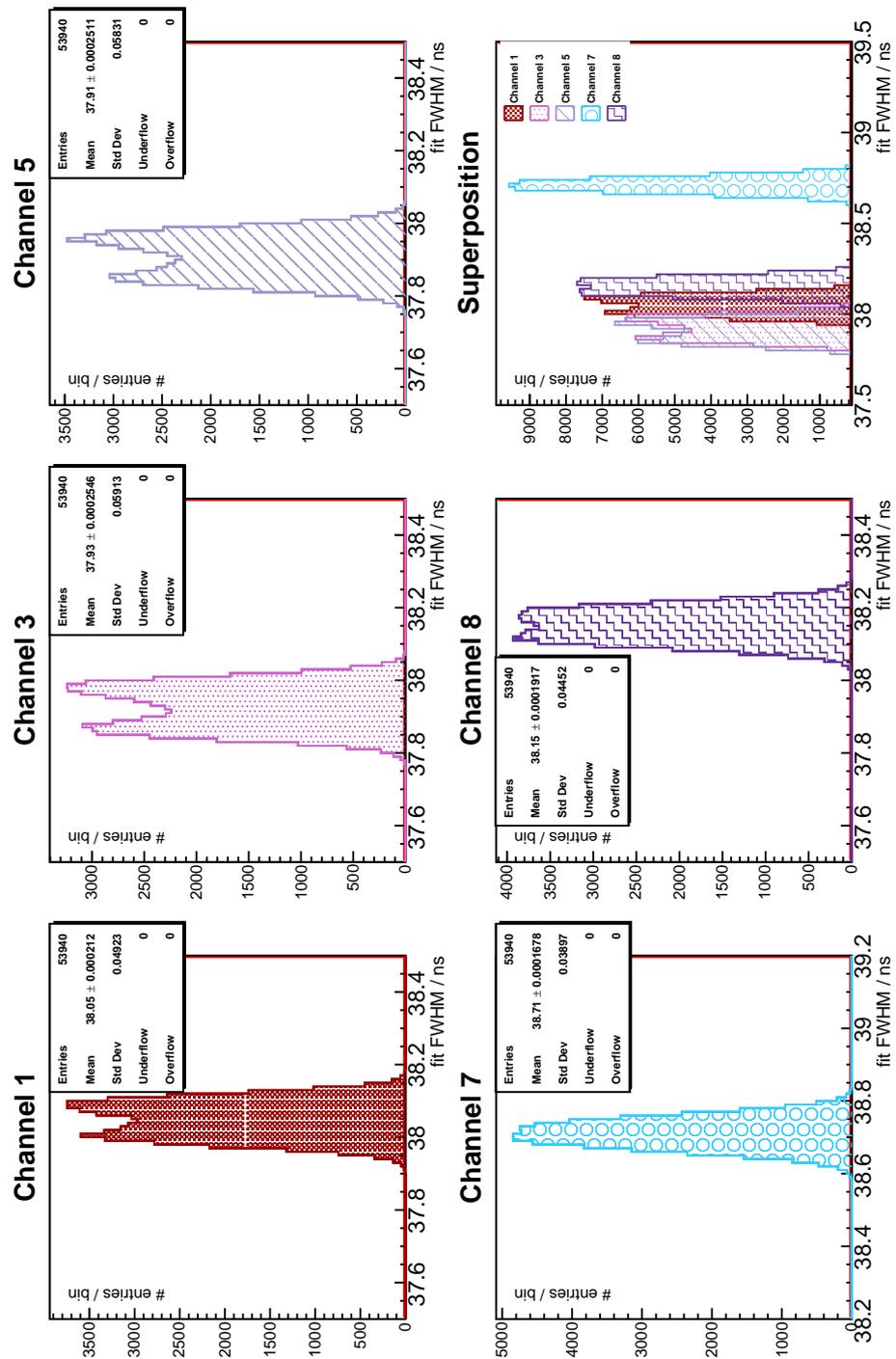


Abbildung 5.10.: FWHM aller 800mV40ns-Pulse des UUB-Dauertests auf den Low-Gain-Kanälen

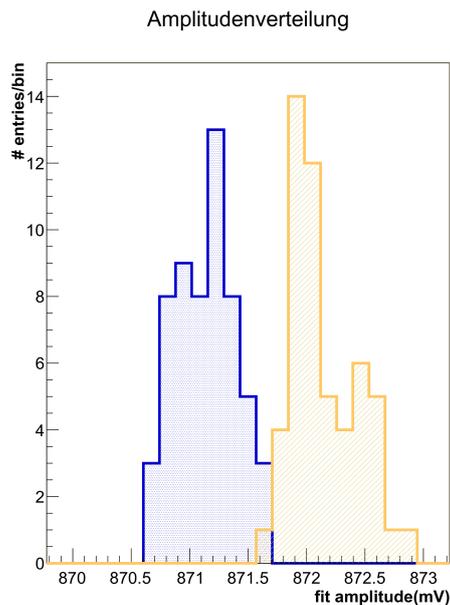


Abbildung 5.11.: Verteilung der Fit-Amplituden für einen einzelnen Test auf Kanal 1. Die beiden Spitzen der Verteilung wurden unterschiedlich eingefärbt, um in nachfolgenden Analysen die Pulse den Spitzen zuzuordnen zu können.

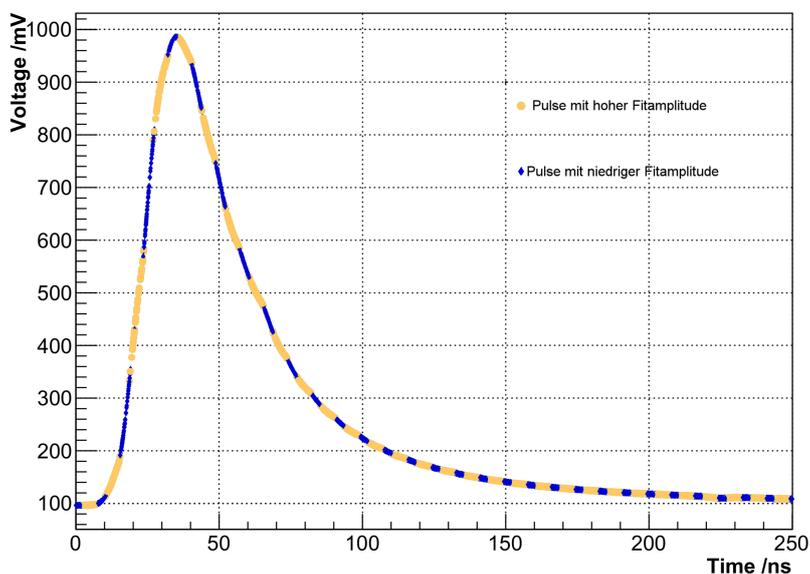


Abbildung 5.12.: Überlagerung aller Pulse eines Testdurchlaufs auf Kanal 1. Die Datenpunkte sind analog zu Abb. 5.11 eingefärbt. Die Fitamplitude der hellblauen Pulse ist größer als die der dunkelblauen Pulse.

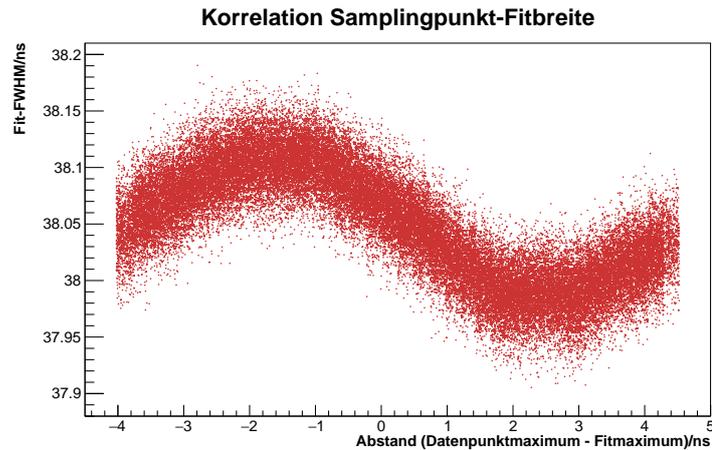


Abbildung 5.13.: Korrelation zwischen Abstand von Datenpunkt- und Fit-Maximum (als Indikator für den Abtastzeitpunkt) und der Breite des Fits der 800mV40ns-Pulse. Die Breite des Bereichs, in dem der Abstand liegen kann, stimmt mit dem zeitlichen Abstand zweier UUB-Datenpunkte (8.33 ns) nahezu überein.

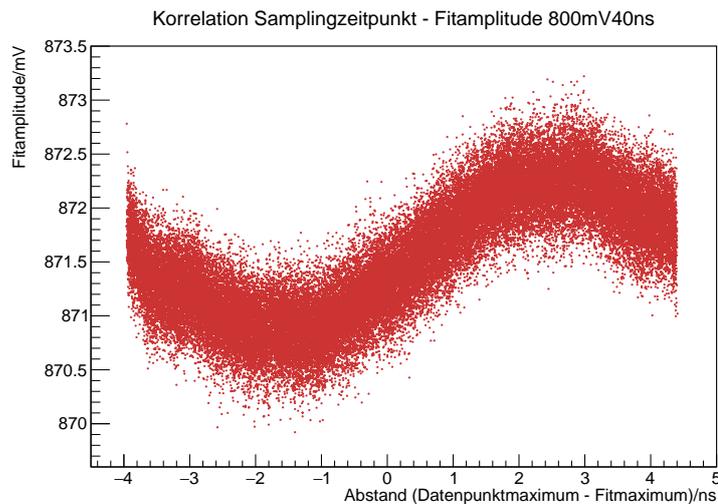


Abbildung 5.14.: Korrelation zwischen Abstand von Datenpunkt- und Fit-Maximum (als Indikator für den Abtastzeitpunkt) und der Amplitude des Fits der 800mV40ns-Pulse. Die Breite des Bereichs, in dem der Abstand liegen kann, stimmt mit dem zeitlichen Abstand zweier UUB-Datenpunkte (8.33 ns) nahezu überein.

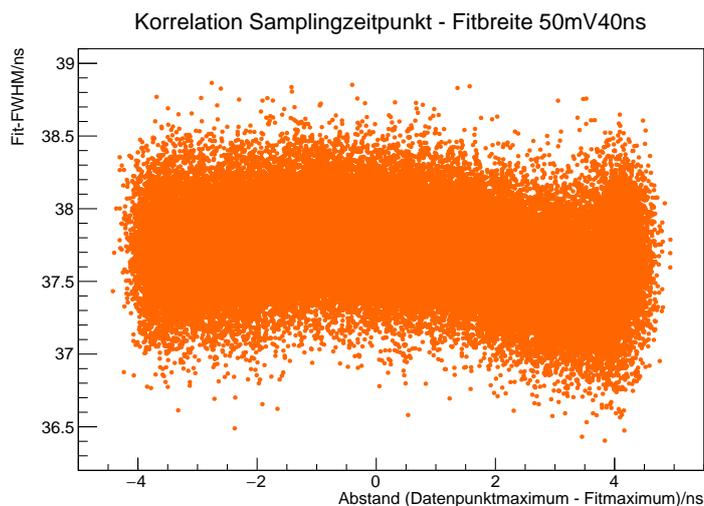


Abbildung 5.15.: Korrelation zwischen Abstand von Datenpunkt- und Fit-Maximum (als Indikator für den Abtastzeitpunkt) und der Breite des Fits der 50mV40ns-Pulse. Die Breite des Bereichs, in der Abstand liegen kann, stimmt mit dem zeitlichen Abstand zweier UUB-Datenpunkte (8.33 ns) nahezu überein.

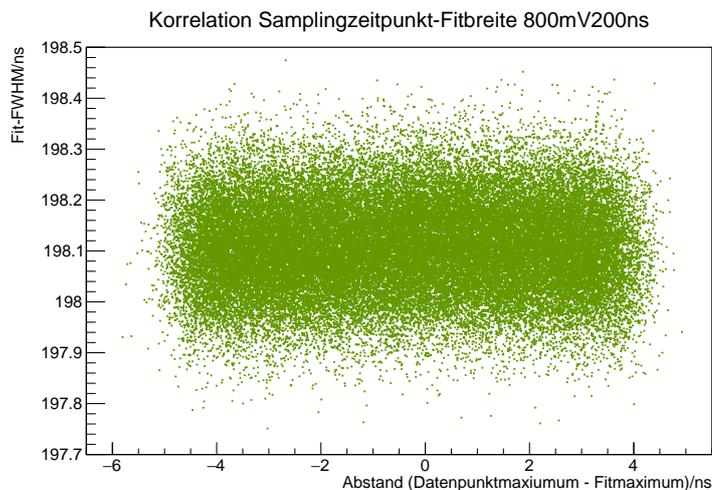


Abbildung 5.16.: Korrelation zwischen Abstand von Datenpunkt- und Fit-Maximum (als Indikator für den Abtastzeitpunkt) und der Breite des Fits der 800mV200ns-Pulse. Die Breite des Bereichs, in dem der Abstand liegen kann, stimmt mit dem zeitlichen Abstand zweier UUB-Datenpunkte (8.33 ns) nahezu überein.

5.3.2. Breite der Amplitudenverteilungen

Analog zu den Histogrammen der Mittelwerte der Fitamplitudenverteilungen der 480 Testdurchläufe wurden die Histogramme der Standardabweichungen der Fitamplitudenverteilungen erstellt. Sie sind im Anhang in den Abbildungen A.5, A.11, A.15 und A.18 zu sehen und wurden in den Tabellen 5.7 bis 5.12 ausgewertet. „Mittelwert“ und σ bezeichnen Mittelwert und Standardabweichung dieser Verteilungen. Bei diesem Cut-Parameter ist eine Unterscheidung zwischen Low-Gain- und High-Gain-Kanälen sinnvoll, da sich die entsprechenden Cut-Parameter-Grenzen etwa um einen Faktor 5 unterscheiden.

	Mittelwert/mV	σ /mV	obere 5σ -Grenze/mV
Kanal 1	0.26	0.02	0.36
Kanal 3	0.26	0.02	0.36
Kanal 5	0.26	0.02	0.36
Kanal 7	0.32	0.03	0.47
Kanal 8	0.29	0.02	0.39

Tabelle 5.7.: Auswertung der Verteilung der Breite der Fitamplitudenverteilungen der 50mV40ns-Pulse auf den Low-Gain-Kanälen (Abb. A.5)

	Mittelwert/mV	σ /mV	obere 5σ -Grenze/mV
Kanal 1	0.13	0.01	0.18
Kanal 3	0.135	0.009	0.18
Kanal 5	0.135	0.009	0.18
Kanal 7	0.172	0.011	0.227
Kanal 8	0.153	0.011	0.208

Tabelle 5.8.: Auswertung der Verteilung der Breite der Fitamplitudenverteilungen der 50mV200ns-Pulse auf den Low-Gain-Kanälen (Abb. A.11)

	Mittelwert/mV	σ /mV	obere 5σ -Grenze/mV
Kanal 1	0.56	0.04	0.76
Kanal 3	0.66	0.04	0.86
Kanal 5	0.66	0.04	0.86
Kanal 7	0.43	0.03	0.58
Kanal 8	0.56	0.04	0.76

Tabelle 5.9.: Auswertung der Verteilung der Breite der Fitamplitudenverteilungen der 800mV40ns-Pulse (Abb. A.15)

	Mittelwert/mV	σ /mV	obere 5σ -Grenze/mV
Kanal 1	0.14	0.01	0.19
Kanal 3	0.14	0.01	0.19
Kanal 5	0.14	0.01	0.19
Kanal 7	0.15	0.011	0.205
Kanal 8	0.146	0.011	0.201

Tabelle 5.10.: Auswertung der Verteilung der Breite der Fitamplitudenverteilungen der 800mV200ns-Pulse (Abb. A.18)

	Mittelwert/mV	σ /mV	obere 5σ -Grenze/mV
Kanal 2	3.5	0.3	5
Kanal 4	3.5	0.3	5
Kanal 6	3.5	0.3	5

Tabelle 5.11.: Auswertung der Verteilung der Breite der Fitamplitudenverteilungen der 50mV40ns-Pulse auf den High-Gain-Kanälen (Abb. A.5)

	Mittelwert/mV	σ /mV	obere 5σ -Grenze/mV
Kanal 2	1.76	0.12	2.36
Kanal 4	1.82	0.12	2.42
Kanal 6	1.76	0.12	2.36

Tabelle 5.12.: Auswertung der Verteilung der Breite der Fitamplitudenverteilungen der 50mV200ns-Pulse auf den High-Gain-Kanälen (Abb. A.11)

Die größte mittlere Breite haben die Fitamplitudenverteilungen auf den Low-Gain-Kanälen 3 und 5 bei den 800mV40ns-Pulsen und auf allen drei High-Gain-Kanälen bei den 50mV40ns-Pulsen. Es wird vorgeschlagen, die Grenzen für die maximale Breite der Fitamplituden-Verteilungen, ausgehend von dieser Auswertung, auf 0.9 mV für Low-Gain-Kanäle und 5 mV für High-Gain-Kanäle festzulegen.

5.3.3. Relative Abweichung der FWHM

In den Tabellen 5.13 bis 5.16 sind die Verteilungen der Mittelwerte der FWHM der Pulse für die 480 Testdurchläufe ausgewertet. „Mittelwert“ und σ bezeichnen Mittelwert und Standardabweichung dieser Verteilungen. Da die FWHM nur nach unten von der FWHM des Eingangspulses abweicht, ist es hier die untere 5σ -Grenze, die die Grenze für den Cut-Parameter bestimmt.

	Mittelwert/ns	Std./ns	untere 5σ -Grenze/ns	rel. Abweichung/%
Kanal 1	37.7	0.04	37.5	-6.3
Kanal 2	37.77	0.02	37.67	-5.8
Kanal 3	37.62	0.03	37.47	-6.3
Kanal 4	37.82	0.02	37.72	-5.7
Kanal 5	37.66	0.04	37.46	-6.4
Kanal 6	37.77	0.02	37.67	-5.8
Kanal 7	38.5	0.04	38.3	-4.3
Kanal 8	37.77	0.04	37.57	-6.1

Tabelle 5.13.: Auswertung der Verteilung der FWHM-Mittelwerte der 50mV40ns-Pulse (Abb. A.21)

	Mittelwert/ns	σ /ns	untere 5σ -Grenze/ns	rel. Abweichung/%
Kanal 1	197.4	0.2	196.4	-1.8
Kanal 2	195.26	0.08	194.86	-2.6
Kanal 3	197.6	0.2	196.6	-1.7
Kanal 4	195.54	0.09	195.09	-2.5
Kanal 5	197.73	0.12	197.13	-1.4
Kanal 6	195.41	0.08	195.01	-2.5
Kanal 7	196.1	0.2	195.1	-2.5
Kanal 8	195.78	0.13	195.13	-2.4

Tabelle 5.14.: Auswertung der Verteilung der FWHM-Mittelwerte der 50mV200ns-Pulse (Abb. A.27)

	Mittelwert/ns	σ /ns	untere 5σ -Grenze/ns	rel. Abweichung/%
Kanal 1	38.048	0.006	38.018	-5.0
Kanal 3	37.926	0.008	37.886	-5.3
Kanal 5	37.908	0.008	37.868	-5.3
Kanal 7	38.711	0.005	38.686	-3.3
Kanal 8	38.151	0.006	38.121	-4.7

Tabelle 5.15.: Auswertung der Verteilung der FWHM-Mittelwerte der 800mV40ns-Pulse (Abb. A.32)

	Mittelwert/ns	σ /ns	untere 5σ -Grenze/ns	rel. Abweichung/%
Kanal 1	198.11	0.01	198.06	-1.0
Kanal 3	198.166	0.011	198.111	-0.9
Kanal 5	198.02	0.01	197.97	-1.0
Kanal 7	198.31	0.012	198.25	-0.9
Kanal 8	198.98	0.011	198.925	-0.5

Tabelle 5.16.: Auswertung der Verteilung der FWHM-Mittelwerte der 800mV200ns-Pulse (Abb. A.35)

Die größte mittlere relative Abweichung liegt auf Kanal 5 bei den 50mV40ns-Pulsen vor. Diese beträgt 6,4%. Daher wird vorgeschlagen, die maximale relative Abweichung der mittleren FWHM auf 7% zu begrenzen.

5.3.4. Breite der FWHM-Verteilungen

In den Tabellen 5.17 bis 5.20 sind die Verteilungen der Standardabweichungen der FWHM der Pulse für die 480 Testdurchläufe ausgewertet. „Mittelwert“ und σ bezeichnen Mittelwert und Standardabweichung dieser Verteilungen. Hier ist nur die obere 5σ -Grenze für den Cut-Parameter relevant.

	Mittelwert/ns	σ /ns	obere 5σ -Grenze/ns
Kanal 1	0.3	0.03	0.45
Kanal 2	0.132	0.009	0.177
Kanal 3	0.3	0.02	0.4
Kanal 4	0.135	0.009	0.18
Kanal 5	0.3	0.03	0.45
Kanal 6	0.131	0.009	0.176
Kanal 7	0.39	0.03	0.54
Kanal 8	0.31	0.03	0.46

Tabelle 5.17.: Auswertung der Verteilung der Breite der FWHM-Verteilungen der 50mV40ns-Pulse (Abb. A.23)

	Mittelwert/ns	σ /ns	obere 5σ -Grenze/ns
Kanal 1	1.16	0.08	1.56
Kanal 2	0.66	0.05	0.91
Kanal 3	1.22	0.09	1.67
Kanal 4	0.74	0.05	0.99
Kanal 5	1.14	0.08	1.54
Kanal 6	0.63	0.05	0.88

Fortsetzung auf der nächsten Seite

	Mittelwert/ns	σ /ns	obere 5σ -Grenze/ns
Kanal 7	1.5	0.1	2
Kanal 8	1.19	0.09	1.64

Tabelle 5.18.: Auswertung der Verteilung der Breite der FWHM-Verteilungen der 50mV200ns-Pulse (Abb. A.30)

	Mittelwert/ns	σ /ns	obere 5σ -Grenze/ns
Kanal 1	0.049	0.003	0.064
Kanal 3	0.059	0.003	0.074
Kanal 5	0.058	0.004	0.078
Kanal 7	0.039	0.003	0.054
Kanal 8	0.044	0.003	0.059

Tabelle 5.19.: Auswertung der Verteilung der Breite der FWHM-Verteilungen der 800mV40ns-Pulse (Abb. A.33)

	Mittelwert/ns	σ /ns	obere 5σ -Grenze/ns
Kanal 1	0.09	0.007	0.125
Kanal 3	0.093	0.007	0.128
Kanal 5	0.089	0.007	0.124
Kanal 7	0.108	0.008	0.148
Kanal 8	0.097	0.007	0.132

Tabelle 5.20.: Auswertung der Verteilung der Breite der FWHM-Verteilungen der 800mV200ns-Pulse (Abb. A.36)

Die mittleren Breiten der FWHM-Verteilungen unterscheiden sich je nach Pulsform. Die größte Breite (2 ns) liegt auf Kanal 7 bei den 50mV200ns vor. Wenn der Cut-Parameter für alle Pulsformen anhand dieser Abweichung gewählt würde, könnte keine sinnvolle Aussage über die Breiten der FWHM-Verteilungen der 800mV40ns-Pulse getroffen werden, deren größte mittlere Breite kleiner als 0.1 ns ist. Es wird daher empfohlen, die Grenzen für die maximale mittlere Breite der FWHM-Verteilungen für jede Pulsform einzeln zu setzen und zwar:

- 0.6 ns bei den 50mV40ns-Pulsen,
- 2 ns bei den 50mV200ns-Pulsen,
- 0.08 ns bei den 800mV40ns-Pulsen,
- 0.2 ns bei den 800mV200ns-Pulsen.

5.3.5. Absolute Abweichung des Pedestals

Der erwartete Wert für das Pedestal ist 200 ADC-counts [59], was umgerechnet einem digitalen Spannungswert von 97.7 mV entspricht.

Bei der Abweichung des Pedestals liegt ein ähnlicher Fall vor, wie bei der Abweichung der Amplitude (Abschnitt 5.3.1). Hier ist nämlich die Abweichung vom erwarteten Wert auf Kanal 8 hoch (siehe Abb. 5.17). Daher wird dieser bei der Festlegung der Grenzen nicht berücksichtigt und ist entsprechend hellgrau hinterlegt. Das Pedestal ist der einzige Parameter, der in beide Richtungen vom erwarteten Wert abweicht, daher wurde sowohl die größte Abweichung nach oben als auch die nach unten markiert.

	Mittelwert/mV	σ /mV	untere 5σ -Grenze/mV	obere 5σ -Grenze/mV
Kanal 1	100.3	0.05	100.05	100.55
Kanal 2	131.9	0.2	130.9	132.90
Kanal 3	86.2	0.03	86.05	86.35
Kanal 4	116.2	0.2	115.2	117.20
Kanal 5	98.62	0.04	98.42	98.82
Kanal 6	132	0.2	131	133.00
Kanal 7	111.52	0.06	111.22	111.82
Kanal 8	295.54	0.04	295.34	295.74

Tabelle 5.21.: Auswertung der Verteilung der Mittelwerte der Pedestal-Verteilungen der 50mV40ns-Pulse (Abb. A.63)

	Mittelwert/mV	σ /mV	untere 5σ -Grenze/mV	obere 5σ -Grenze/mV
Kanal 1	99.21	0.06	98.91	99.51
Kanal 2	100	0.5	97.5	102.50
Kanal 3	85.11	0.04	84.91	85.31
Kanal 4	83.6	0.6	80.6	86.60
Kanal 5	97.5	0.05	97.25	97.75
Kanal 6	99.8	0.4	97.8	101.80
Kanal 7	110.43	0.07	110.08	110.78
Kanal 8	294.32	0.05	294.07	294.57

Tabelle 5.22.: Auswertung der Verteilung der Mittelwerte der Pedestal-Verteilungen der 50mV200ns-Pulse (Abb. A.67)

	Mittelwert/mV	σ /mV	untere 5σ -Grenze/mV	obere 5σ -Grenze/mV
Kanal 1	96.02	0.06	95.72	96.32
Kanal 3	96.02	0.06	95.72	96.32

Fortsetzung auf der nächsten Seite

	Mittelwert/mV	σ /mV	untere 5σ -Grenze/mV	obere 5σ -Grenze/mV
Kanal 5	94.28	0.05	94.03	94.53
Kanal 7	107.12	0.07	106.77	107.47
Kanal 8	290.66	0.05	290.41	290.91

Tabelle 5.23.: Auswertung der Verteilung der Mittelwerte der Pedestal-Verteilungen der 800mV40ns-Pulse (Abb. A.70)

	Mittelwert/mV	σ /mV	untere 5σ -Grenze/mV	obere 5σ -Grenze/mV
Kanal 1	78.41	0.05	78.16	78.66
Kanal 3	64.06	0.04	63.86	64.26
Kanal 5	76.61	0.04	76.41	76.81
Kanal 7	89.58	0.07	89.23	89.93
Kanal 8	270.77	0.05	270.52	271.02

Tabelle 5.24.: Auswertung der Verteilung der Mittelwerte der Pedestal-Verteilungen der 800mV200ns-Pulse (Abb. A.72)

Die größte Abweichung des Pedestal-Mittelwerts nach oben ist:

$$(133 - 97.7)\text{mV} = 35.3 \text{ mV},$$

die größte Abweichung nach unten beträgt:

$$(64.24 - 97.7)\text{mV} = 33.46 \text{ mV}.$$

Damit bestimmt die obere 5σ -Grenze den Akzeptanzbereich. Es wäre daher sinnvoll, die maximale zulässige Abweichung des Pedestals vom erwarteten Wert auf 40 mV ($\equiv 81$ ADC-counts) zu beschränken.

5.3.6. Maximales RMS-Rauschen

In den Tabellen 5.25 bis 5.30 sind die Verteilungen der Mittelwerte des RMS-Rauschens der Pakete der 480 Testdurchläufe ausgewertet. „Mittelwert“ und σ bezeichnen Mittelwert und Standardabweichung dieser Verteilungen.

	Mittelwert/mV	σ /mV	obere 5σ -Grenze/mV
Kanal 1	0.359	0.002	0.369
Kanal 3	0.365	0.003	0.38
Kanal 5	0.358	0.002	0.368
Kanal 7	0.406	0.003	0.421
Kanal 8	0.362	0.003	0.377

Tabelle 5.25.: Auswertung der Verteilung der Mittelwerte der RMS-Rauschen-Verteilungen der 50mV40ns-Pulse auf den Low-Gain-Kanälen (Abb. A.40)

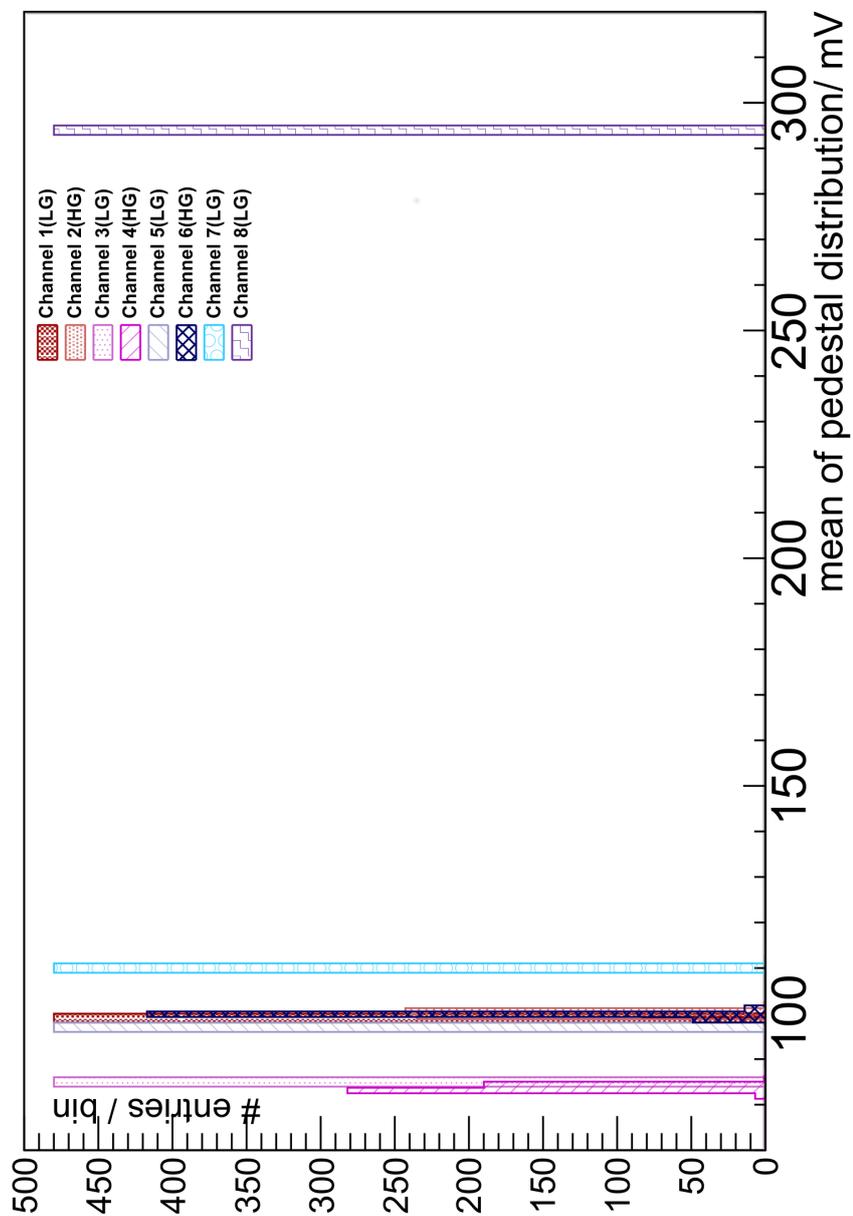


Abbildung 5.17.: Überlagerung der Mittelwerte des Pedestals für den Dauertest der 50mV200ns-Pulse

	Mittelwert/mV	σ /mV	obere 5σ -Grenze/mV
Kanal 1	0.331	0.003	0.346
Kanal 3	0.338	0.003	0.353
Kanal 5	0.334	0.003	0.349
Kanal 7	0.389	0.003	0.404
Kanal 8	0.358	0.003	0.373

Tabelle 5.26.: Auswertung der Verteilung der Mittelwerte der RMS-Rauschen-Verteilungen der 50mV200ns-Pulse auf den Low-Gain-Kanälen (Abb. A.44)

	Mittelwert/mV	σ /mV	obere 5σ -Grenze/mV
Kanal 1	0.378	0.003	0.393
Kanal 3	0.384	0.003	0.399
Kanal 5	0.374	0.003	0.389
Kanal 7	0.403	0.003	0.418
Kanal 8	0.4	0.003	0.415

Tabelle 5.27.: Auswertung der Verteilung der Mittelwerte der RMS-Rauschen-Verteilungen der 800mV40ns-Pulse (Abb. A.46)

	Mittelwert/mV	σ /mV	obere 5σ -Grenze/mV
Kanal 1	0.349	0.004	0.369
Kanal 3	0.353	0.004	0.373
Kanal 5	0.342	0.003	0.357
Kanal 7	0.395	0.004	0.415
Kanal 8	0.37	0.004	0.39

Tabelle 5.28.: Auswertung der Verteilung der Mittelwerte der RMS-Rauschen-Verteilungen der 800mV200ns-Pulse (Abb. A.48)

	Mittelwert/mV	σ /mV	obere 5σ -Grenze/mV
Kanal 2	5.81	0.09	6.26
Kanal 4	6.3	0.11	6.85
Kanal 6	5.67	0.08	6.07

Tabelle 5.29.: Auswertung der Verteilung der Mittelwerte der RMS-Rauschen-Verteilungen der 50mV40ns-Pulse auf den High-Gain-Kanälen (Abb. A.38)

	Mittelwert/mV	σ /mV	obere 5σ -Grenze/mV
Kanal 2	4.79	0.06	5.09
Kanal 4	4.99	0.06	5.29
Kanal 6	4.77	0.06	5.07

Tabelle 5.30.: Auswertung der Verteilung der Mittelwerte der RMS-Rauschen-Verteilungen der 50mV200ns-Pulse auf den High-Gain-Kanälen (Abb. A.42)

Bei dem vorliegenden UUB-Prototypen besteht ein großer Unterschied zwischen dem Rauschen der High-Gain-Kanäle und dem der Low-Gain-Kanäle. Deshalb werden den Kanälen jeweils unterschiedliche Grenzen für das maximale RMS-Rauschen zugeordnet. Eine sinnvolle Begrenzung für das zulässige RMS-Rauschen ist 7 mV auf den High-Gain-Kanälen und 0.5 mV auf den Low-Gain-Kanälen. Der Wert für die Low-Gain-Kanäle stimmt mit dem in den UUB-Spezifikationen gegebenen Wert für das maximale RMS-Rauschen überein [56].

5.3.7. Maximales Peak to Peak-Rauschen

In den Tabellen 5.31 bis 5.36 sind die Verteilungen der Mittelwerte des Peak to Peak-Rauschens der Pakete der 480 Testdurchläufe ausgewertet. „Mittelwert“ und σ bezeichnen Mittelwert und Standardabweichung dieser Verteilungen.

	Mittelwert/mV	σ /mV	obere 5σ -Grenze/mV
Kanal 1	2.36	0.04	2.56
Kanal 3	2.39	0.03	2.54
Kanal 5	2.15	0.05	2.4
Kanal 7	2.6	0.05	2.85
Kanal 8	2.29	0.05	2.54

Tabelle 5.31.: Auswertung der Verteilung der Mittelwerte der Peak to Peak-Rauschen-Verteilungen der 50mV40ns-Pulse auf den Low-Gain-Kanälen (Abb. A.52)

	Mittelwert/mV	σ /mV	obere 5σ -Grenze/mV
Kanal 1	2.14	0.05	2.39
Kanal 3	2.22	0.05	2.47
Kanal 5	2.2	0.05	2.45
Kanal 7	2.55	0.04	2.75
Kanal 8	2.4	0.03	2.55

Tabelle 5.32.: Auswertung der Verteilung der Mittelwerte der Peak to Peak-Rauschen-Verteilungen der 50mV200ns-Pulse auf den Low-Gain-Kanälen (Abb. A.56)

	Mittelwert/mV	σ /mV	obere 5σ -Grenze/mV
Kanal 1	3.09	0.05	3.34
Kanal 3	3.19	0.05	3.44
Kanal 5	3.06	0.05	3.31
Kanal 7	3.21	0.05	3.46
Kanal 8	3.63	0.05	3.88

Tabelle 5.33.: Auswertung der Verteilung der Mittelwerte der Peak to Peak-Rauschen-Verteilungen der 800mV40ns-Pulse (Abb. A.58)

	Mittelwert/mV	σ /mV	obere 5σ -Grenze/mV
Kanal 1	3.44	0.05	3.69
Kanal 3	3.55	0.04	3.75
Kanal 5	3.48	0.04	3.68
Kanal 7	3.84	0.04	4.04
Kanal 8	3.64	0.05	3.89

Tabelle 5.34.: Auswertung der Verteilung der Mittelwerte der Peak to Peak-Rauschen-Verteilungen der 800mV200ns-Pulse (Abb. A.60)

	Mittelwert/mV	σ /mV	obere 5σ -Grenze/mV
Kanal 2	43.1	0.8	47.1
Kanal 4	43.7	0.7	47.2
Kanal 6	42.2	0.7	45.7

Tabelle 5.35.: Auswertung der Verteilung der Mittelwerte der Peak to Peak-Rauschen-Verteilungen der 50mV40ns-Pulse auf den High-Gain-Kanälen (Abb. A.50)

	Mittelwert/mV	σ /mV	obere 5σ -Grenze/mV
Kanal 2	42.8	0.7	46.3
Kanal 4	43.8	0.7	47.3
Kanal 6	42	0.7	45.5

Tabelle 5.36.: Auswertung der Verteilung der Mittelwerte der Peak to Peak-Rauschen-Verteilungen der 50mV200ns-Pulse auf den High-Gain-Kanälen (Abb. A.54)

Beim Peak to Peak-Rauschen ist wie beim RMS-Rauschen eine Unterscheidung zwischen High-Gain- und Low-Gain-Kanälen sinnvoll. Es wird vorgeschlagen, das maximal

zulässige Peak to Peak-Rauschen auf 5 mV auf den Low-Gain-Kanälen und auf 50 mV auf den High-Gain-Kanälen zu begrenzen.

5.3.8. Maximale relative Abweichung des Verstärkungsverhältnisses

Das Verstärkungsverhältnis wird aus dem Quotienten der Fitamplituden eines Kanalpaar der PMT-Kanäle berechnet. Der theoretische Wert für das Verstärkungsverhältnis ist 32 [56]. Die Mittelwerte und Standardabweichungen der Verteilung der Mittelwerte des Verstärkungsverhältnisses der 480 Testdurchläufe sind in den Tabellen 5.37 und 5.38 eingetragen.

	Mittelwert	σ	untere 5σ -Grenze	relative Abweichung/%
Kanal 1+2	31.03	0.02	30.93	-3.3
Kanal 3+4	31.29	0.02	31.19	-2.5
Kanal 5+6	30.99	0.02	30.89	-3.5

Tabelle 5.37.: Auswertung der Verteilung der Mittelwerte der Verstärkungsverhältnis-Verteilungen der 50mV40ns-Pulse (Abb. A.74)

	Mittelwert	σ	untere 5σ -Grenze	relative Abweichung/%
Kanal 1+2	31.099	0.008	31.059	-2.9
Kanal 3+4	31.459	0.008	31.419	-1.8
Kanal 5+6	31.144	0.008	30.744	-3.9

Tabelle 5.38.: Auswertung der Verteilung der Mittelwerte der Verstärkungsverhältnis-Verteilungen der 50mV200ns-Pulse (Abb. A.76)

Die maximale relative Abweichung des Verstärkungsverhältnisses beträgt -3.9%, weshalb die Grenze für diesen Cut-Parameter bei 4% gewählt wird. Dieser Wert wird sich vermutlich bei der nächsten UUB-Iteration stark verkleinern, da die gewünschte relative Abweichung nur 0.1% beträgt [59].

6. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des Upgrades des Pierre-Auger-Observatoriums wird eine neue Ausleseelektronik in alle Detektorstationen des Oberflächendetektors eingebaut. Diese ist auf einer einzigen Platine, dem Upgraded Unified Board (UUB), implementiert. Die Arbeitsgruppe „Experimentelle Teilchenphysik“ der Universität Siegen entwickelt ein Testsystem (TS), mit dem wichtige Funktionen des UUBs schon vor Einbau in der Pampa überprüft werden können. Ein Bestandteil der Testroutine ist der Single Pulse Test (SPT), bei dem vier Pulsformen, die auf der Form einer Landau-Verteilung basieren, mit zwei verschiedenen Breiten (40ns und 200ns) und Höhen (50mV und 800mV) in analoge Spannungspulse umgewandelt und an die Eingänge UUBs gesendet werden. Nachdem die Pulse vom UUB digitalisiert und an einigen Eingängen verstärkt wurden, werden sie mit einem speziellen Analyseprogramm, dem Pulseanalyzer, untersucht. Dieses sucht im Datensatz die einzelnen Pulse und fittet sie mit einer Landaubasierten Funktion. Der Pulseanalyzer bestimmt für alle Pulse Amplitude, Full Width at Half Maximum (FWHM), die Sockelspannung (Pedestal), sowie das Verstärkungsverhältnis von High- und Low-Gain-Kanälen des UUBs. Außerdem wird zwischen den Pulsen das Root Mean Square-Rauschen (RMS-Rauschen) und das Peak to Peak-Rauschen gemessen.

Um die Funktionalität des TSs zu überprüfen und mit hoher Statistik Informationen über das UUB zu erlangen, wurde ein Dauertest bestehend aus 480 Testdurchläufen durchgeführt. Das Ergebnis dieses Test sind Verteilungen für die oben beschriebenen Parameter. Aus den Mittelwerten und Standardabweichungen dieser Verteilungen wurden die Werte der acht Cut-Parameter abgeleitet, mit denen die Entscheidung über das fehlerfreie Bestehen des Testdurchlaufs getroffen wird. Dabei wurden die Grenzwerte anhand des 5σ -Bereichs der größten Abweichung des Parameters vom erwarteten Wert festgelegt. Die Cut-Parameter und ihre Grenzen lauten im Einzelnen:

- maximale relative Abweichung des gemessenen Amplituden-Mittelwertes von der Eingangsamplitude: 11 %,
- maximale Standardabweichung der gemessenen Amplitudenverteilung: 0.9 mV (Low-Gain), 5 mV (High-Gain),
- maximale relative Abweichung des gemessenen FWHM-Mittelwertes vom FWHM des Eingangspulses: 7 %,
- maximale Standardabweichung der gemessenen FWHM-Verteilung:
 - 0.6 ns bei den 50mV40ns-Pulsen,
 - 2 ns bei den 50mV200ns-Pulsen,
 - 0.08 ns bei den 800mV40ns-Pulsen,

– 0.2 ns bei den 800mV200ns-Pulsen,

- maximale absolute Abweichung des gemessenen Pedestals vom erwarteten Wert 97.7 mV: 40 mV,
- maximales RMS-Rauschen: 0.5 mV (Low-Gain), 7 mV (High-Gain),
- maximales Peak to Peak-Rauschen: 5 mV (Low-Gain), 50 mV (High-Gain),
- maximale relative Abweichung des Verstärkungsverhältnisses vom erwarteten Wert 32: 4 %.

Die gesamte Studie wurde mit einem ersten UUB-Prototypen durchgeführt. Die Festlegung der Cut-Parameter-Grenzen muss für die UUBs, die letztendlich im Observatorium eingebaut werden, in gleicher Weise durchgeführt werden, bevor alle produzierten UUBs mit dem TS getestet werden können.

A. Auswertungshistogramme UUB Dauertest

A.1. Amplitude

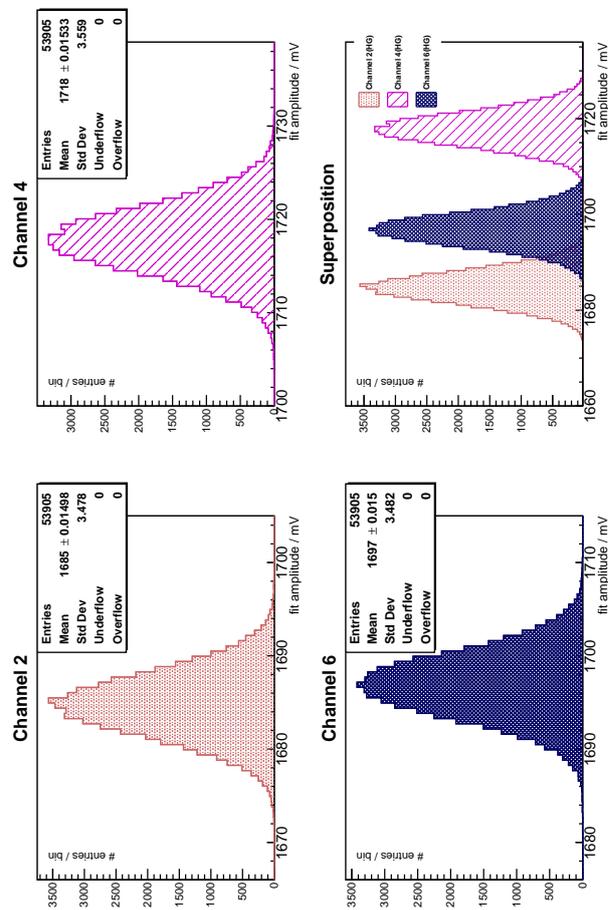


Abbildung A.1.: Amplituden aller 50mV40ns-Pulse des UUB-Dauertests auf den High-Gain-Kanälen

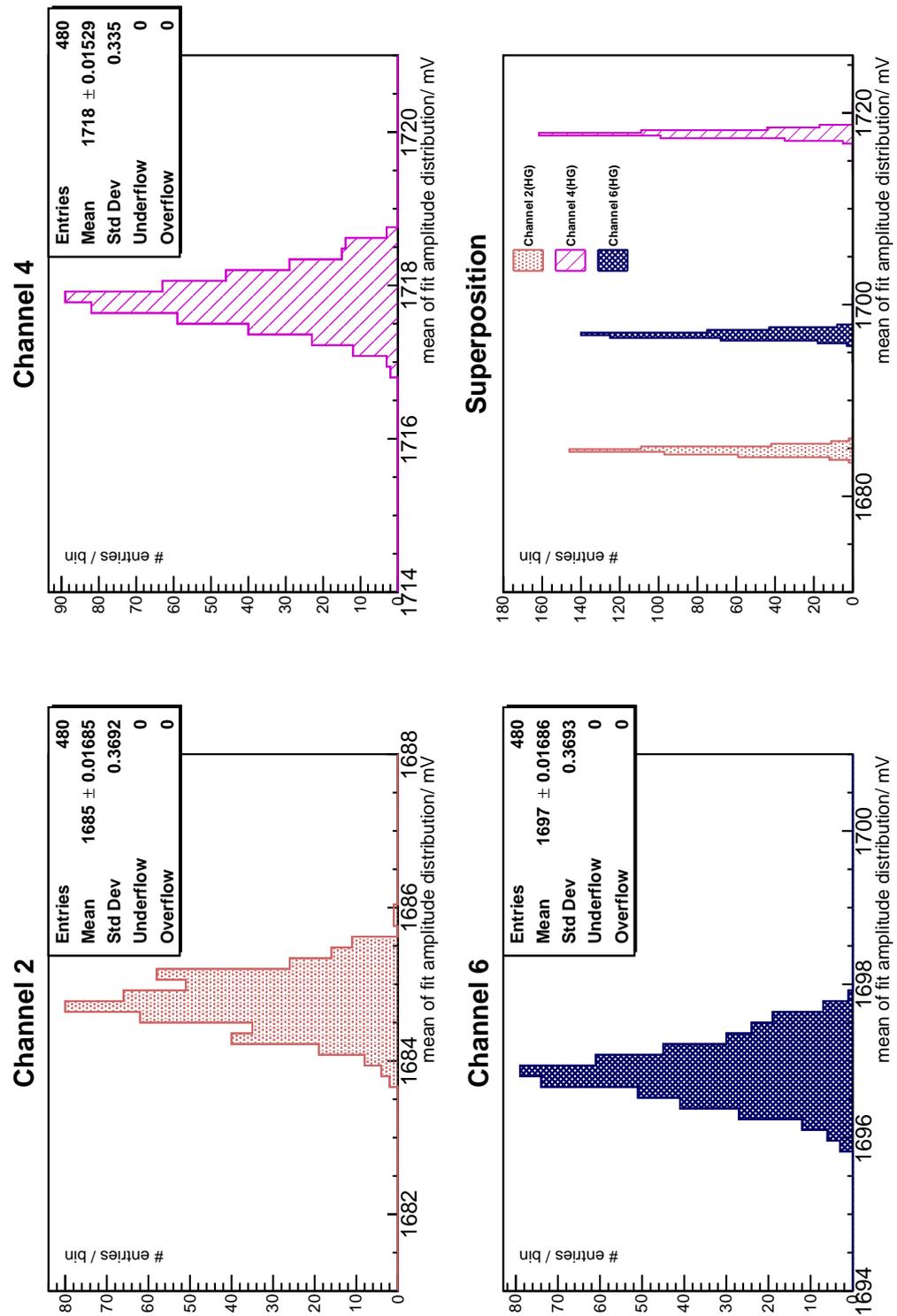


Abbildung A.2.: Mittelwerte der Amplituden-Verteilungen der 50mV40ns-Pulse des UUB-Dauertests auf den High-Gain-Kanälen

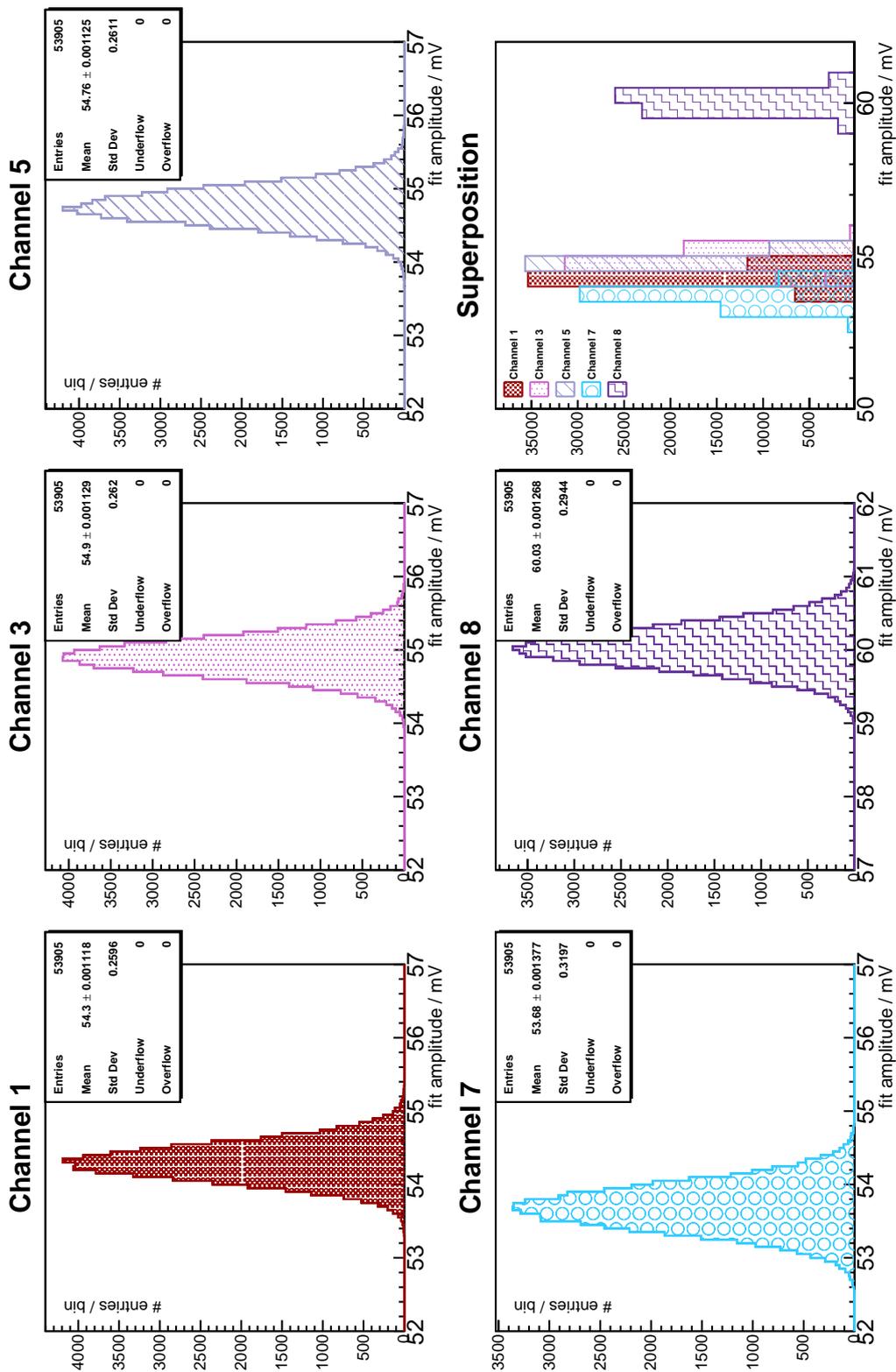


Abbildung A.3.: Amplituden aller 50mV40ns-Pulse des UUB-Dauertests auf den Low-Gain-Kanälen

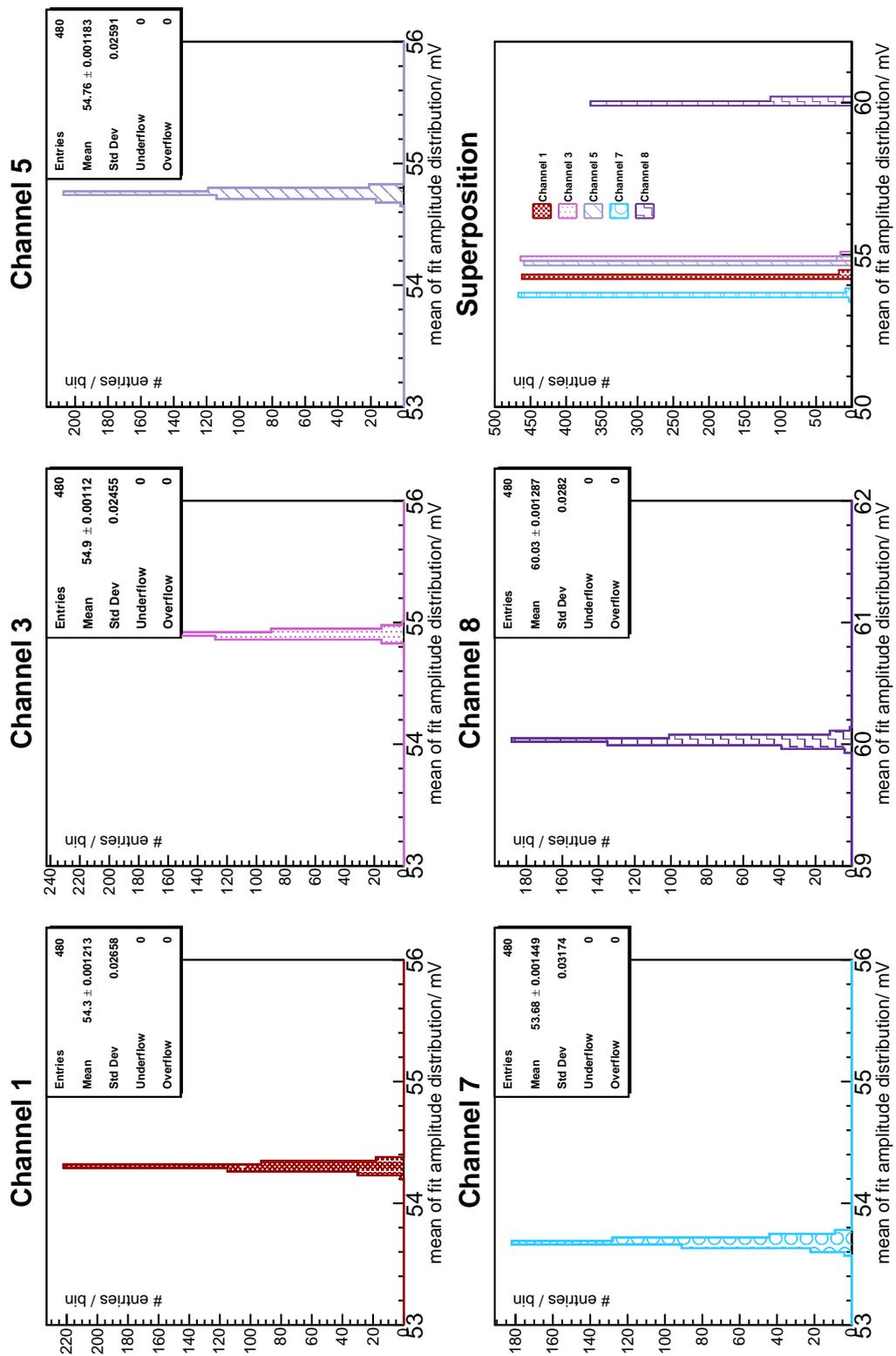


Abbildung A.4.: Mittelwerte der Amplituden-Verteilungen der 50mV40ns-Pulse des UUB-Dauertests auf den Low-Gain-Kanälen

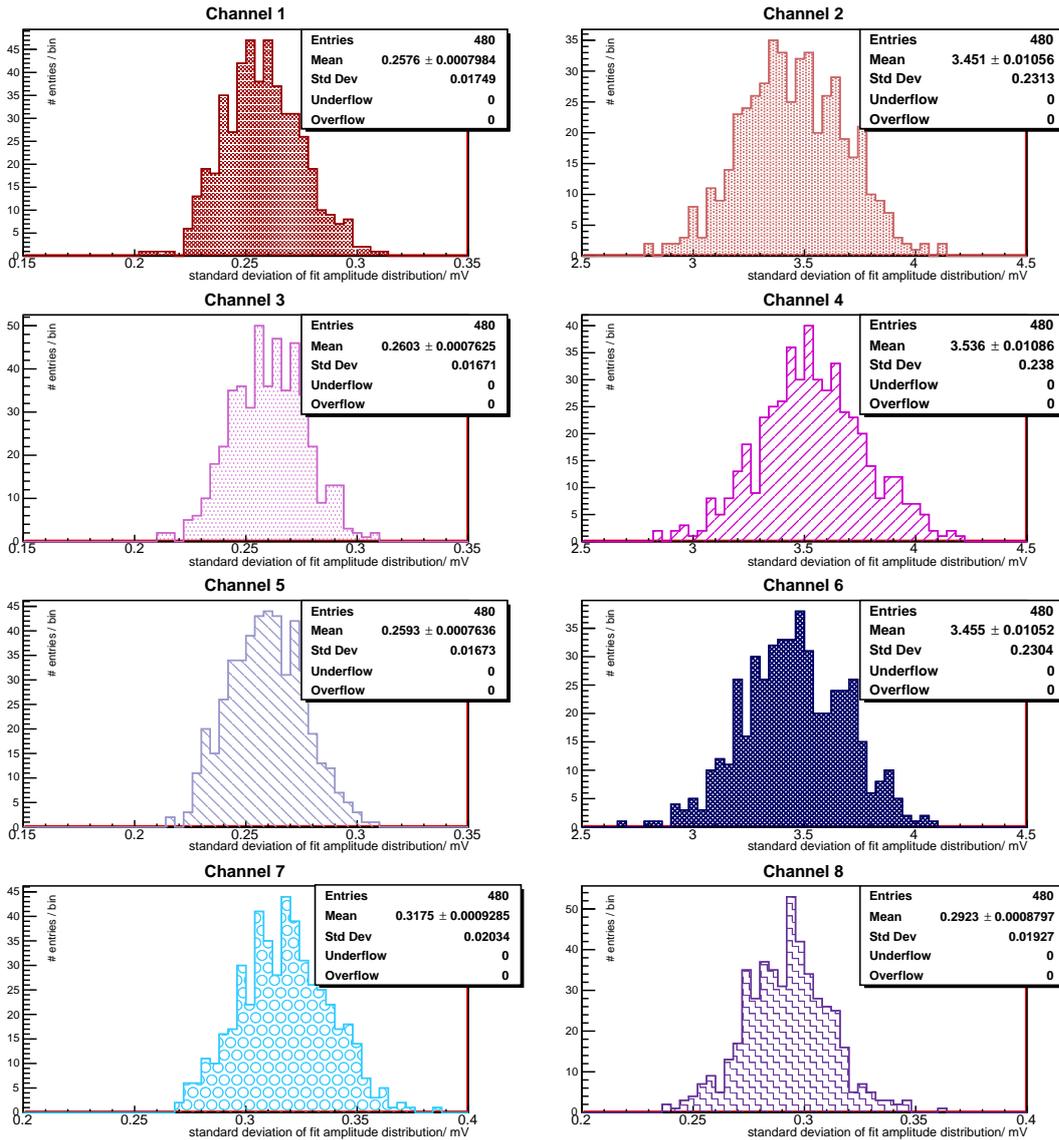


Abbildung A.5.: Standardabweichungen der Amplituden-Verteilungen der 50mV40ns-Pulse des UUB-Dauertests

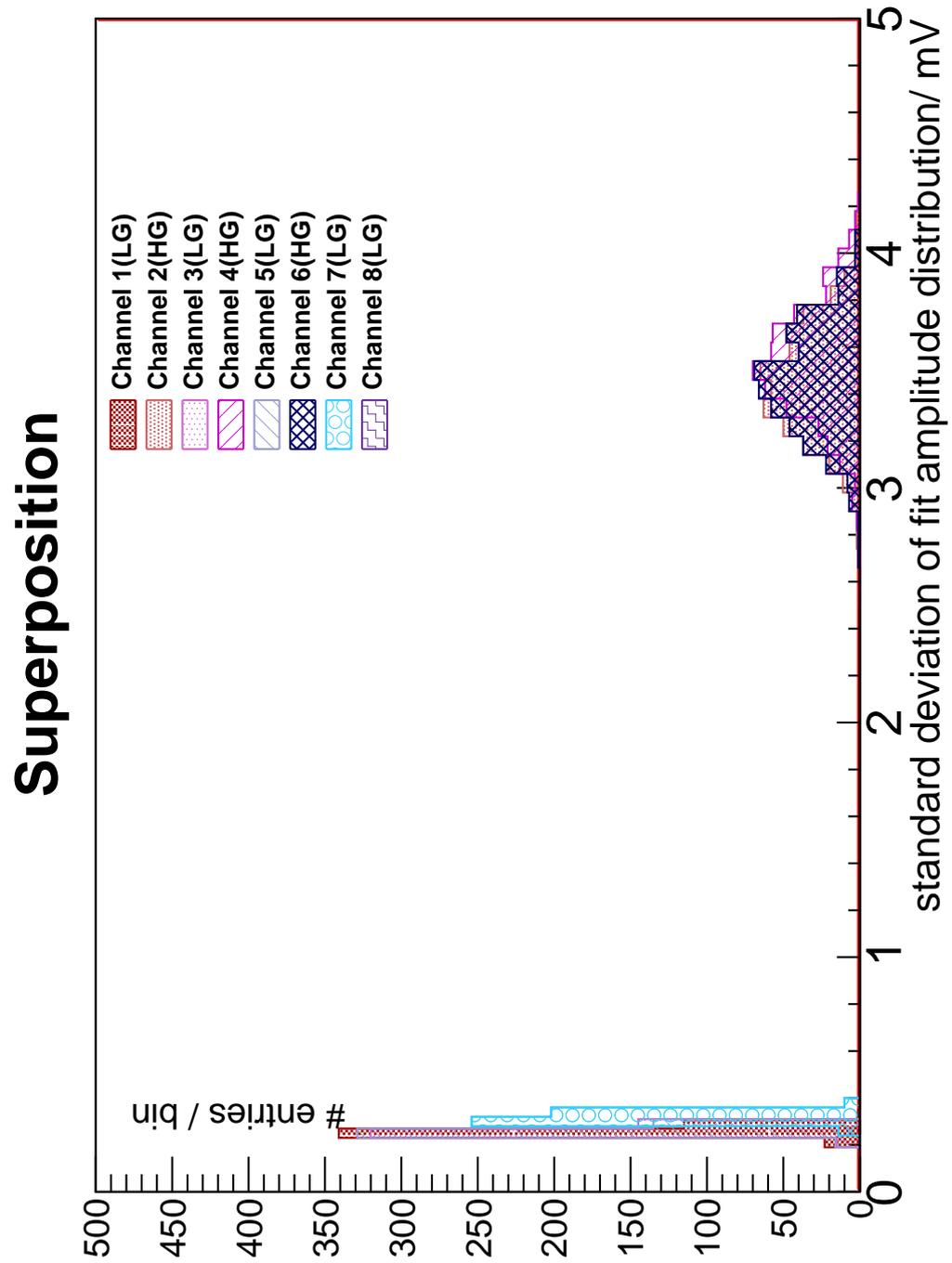


Abbildung A.6.: Überlagerung der Standardabweichungen der Amplituden-Verteilungen der 50mV40ns-Pulse der UUB-Kanäle des UUB-Dauertests

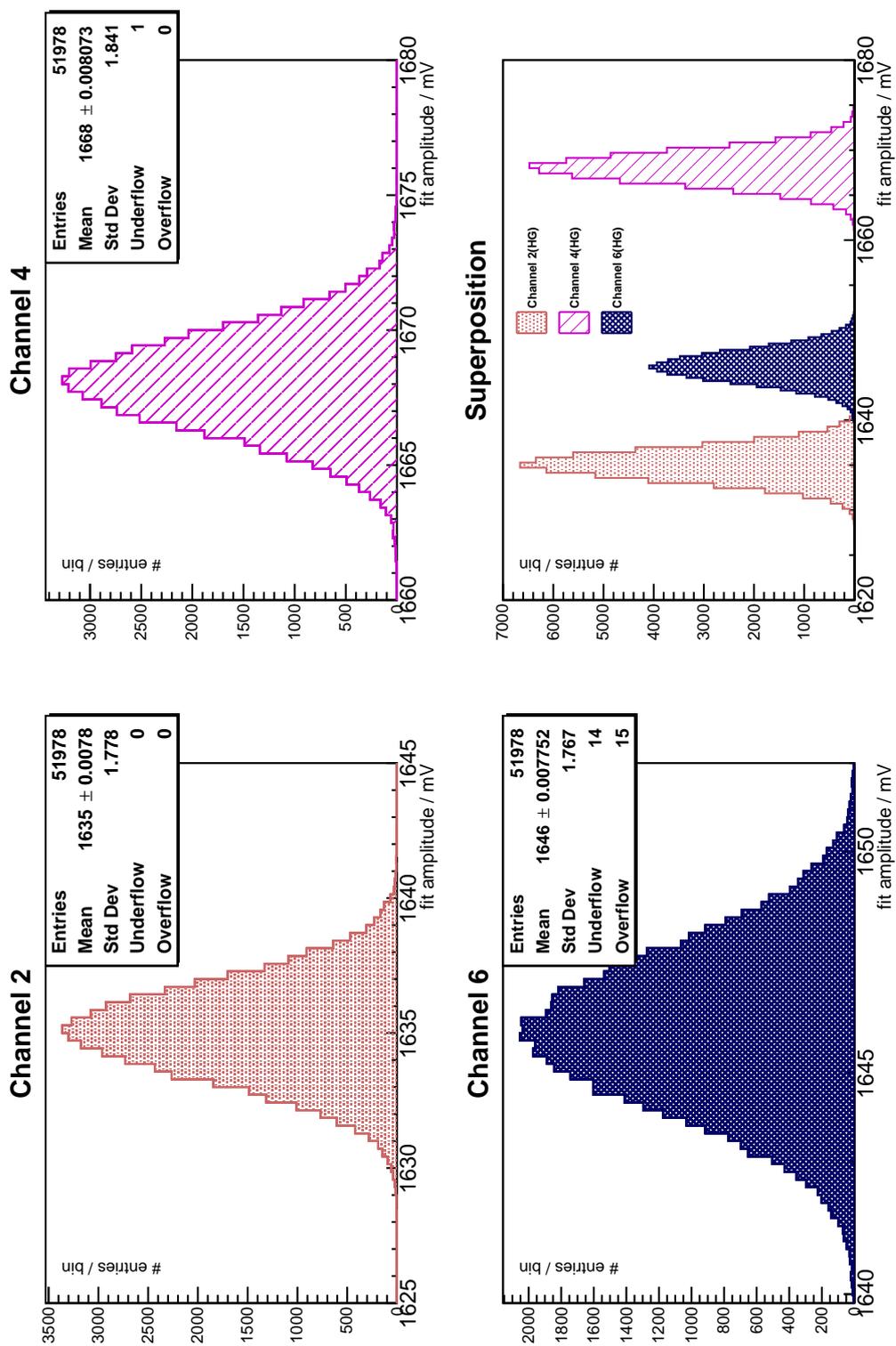


Abbildung A.7.: Amplituden aller 50mV200ns-Pulse des UUB-Dauertests auf den High-Gain-Kanälen

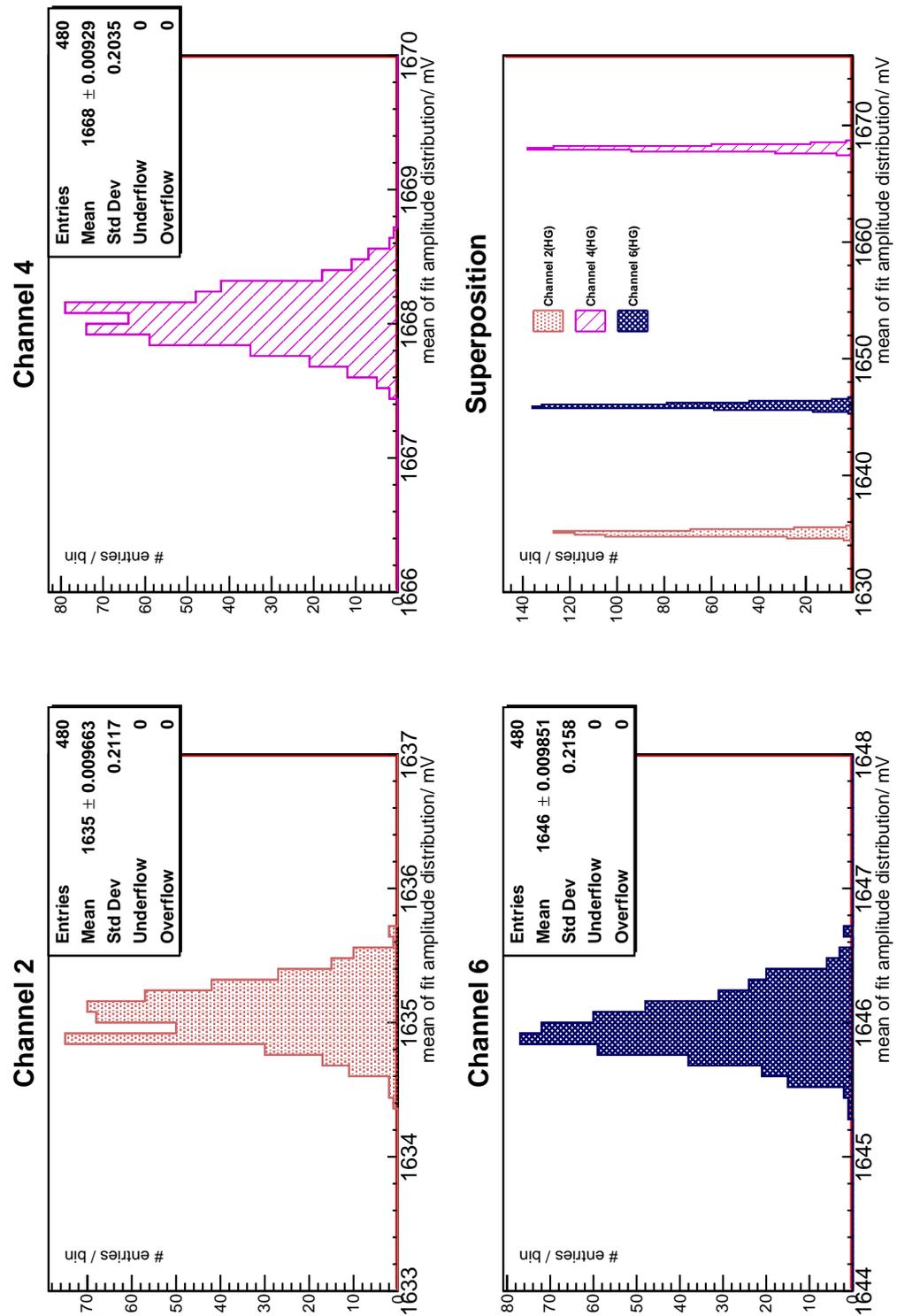


Abbildung A.8.: Mittelwerte der Amplituden-Verteilungen der 50mV200ns-Pulse des UUB-Dauertests auf den High-Gain-Kanälen

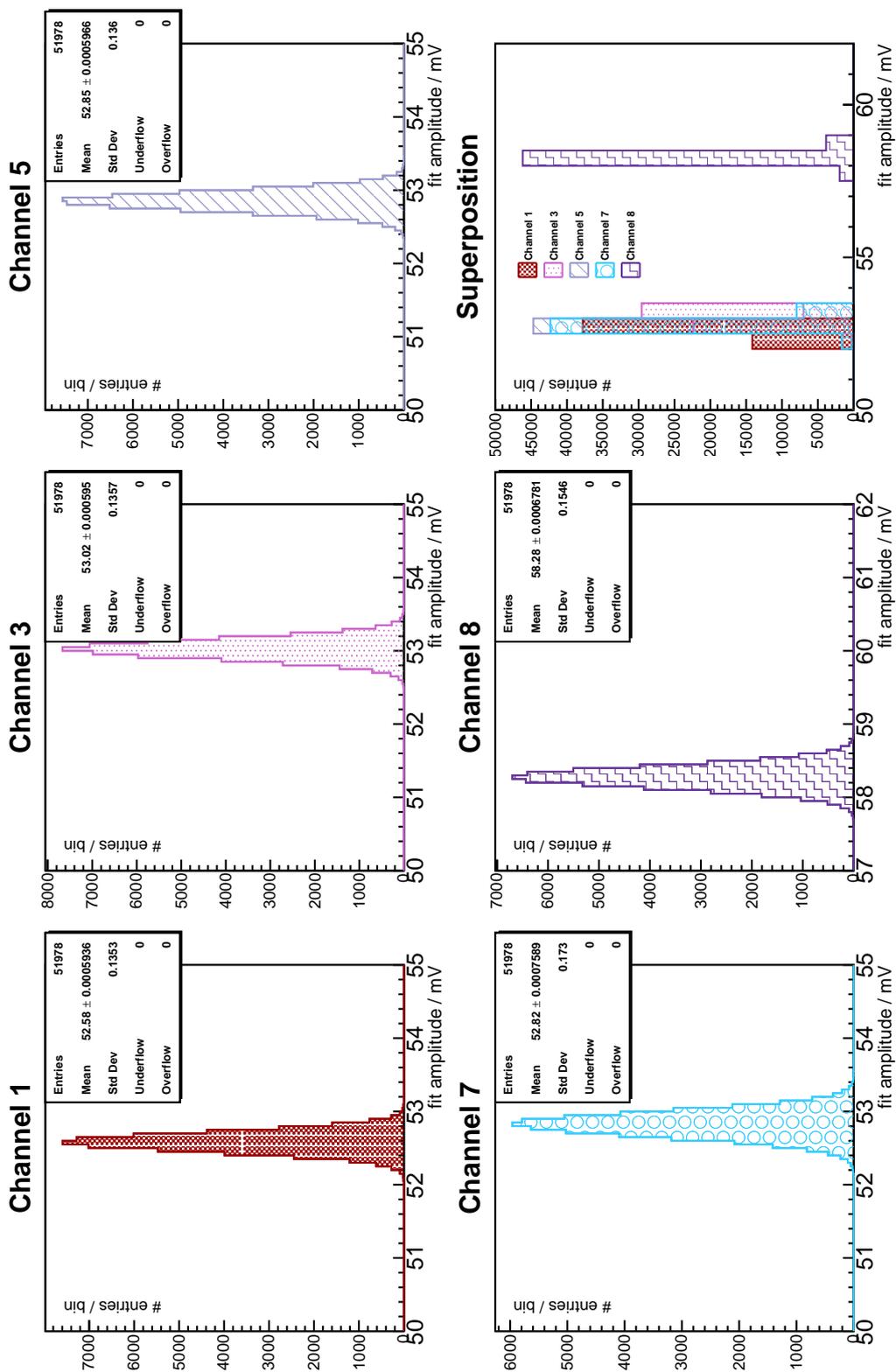


Abbildung A.9.: Amplituden aller 50mV200ns-Pulse des UUB-Dauertests auf den Low-Gain-Kanälen

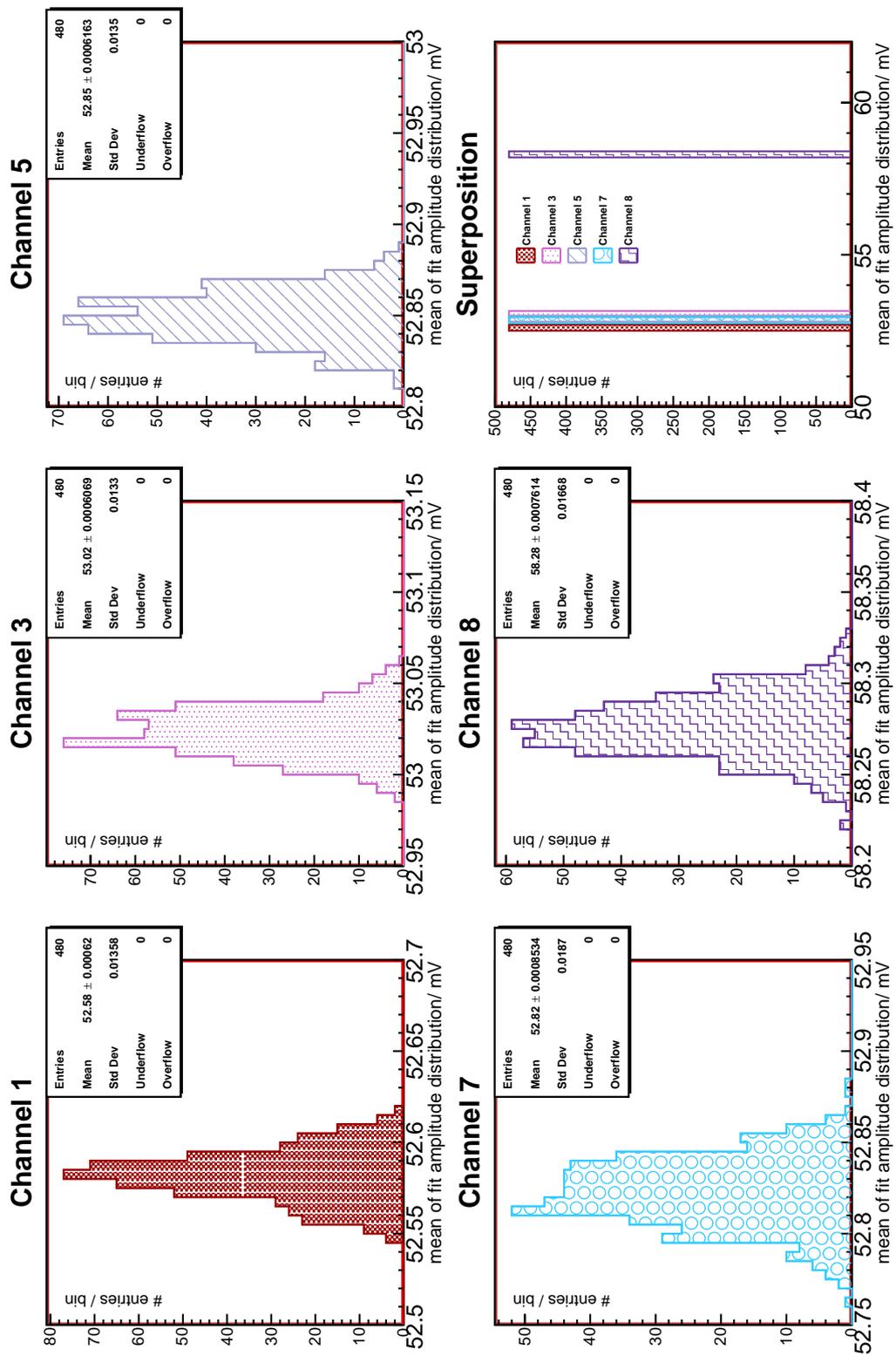


Abbildung A.10.: Mittelwerte der Amplituden-Verteilungen der 50mV200ns-Pulse des UUB-Dauertests auf den Low-Gain-Kanälen

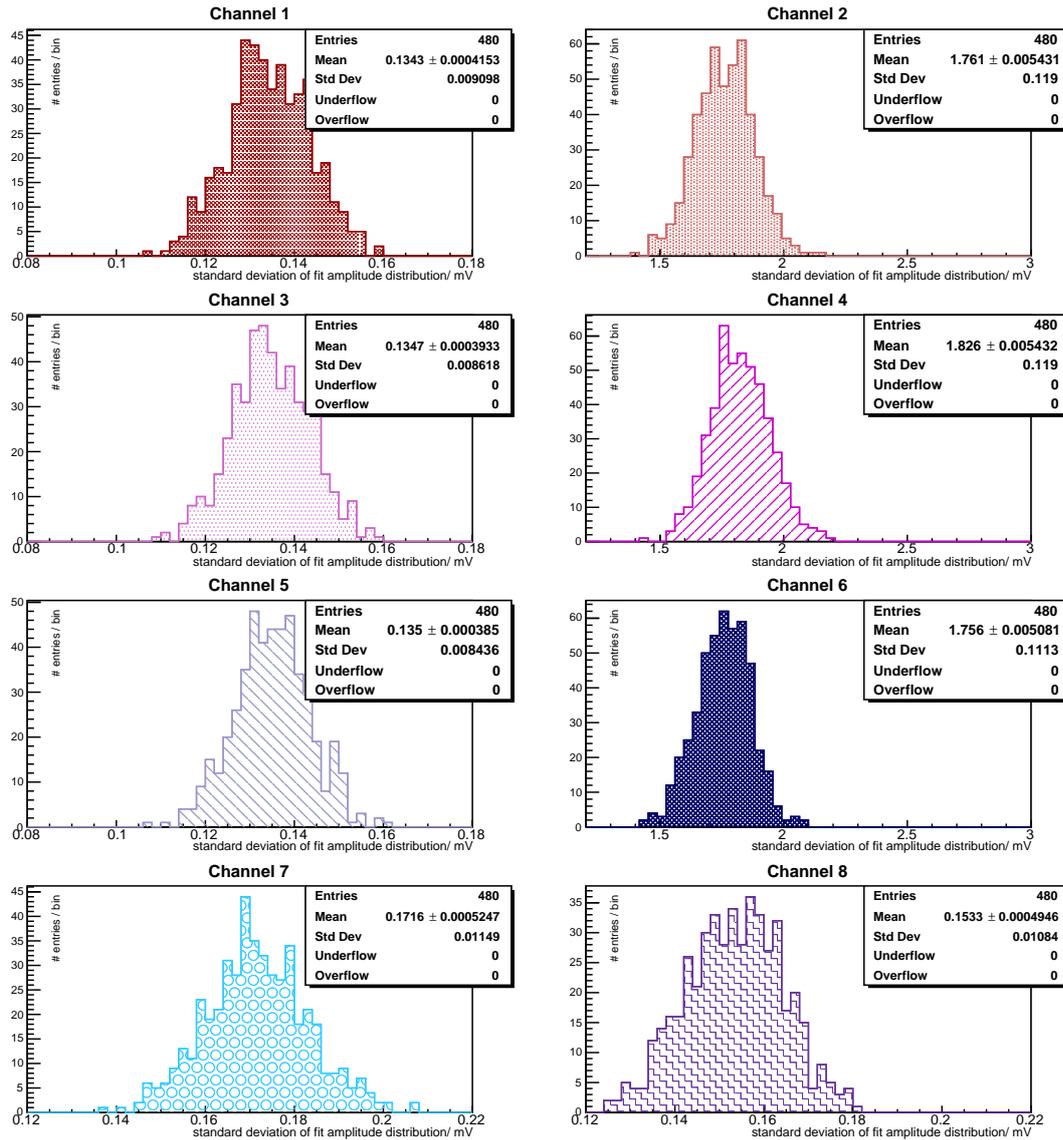


Abbildung A.11.: Standardabweichungen der Amplituden-Verteilungen der 50mV200ns-Pulse des UUB-Dauertests

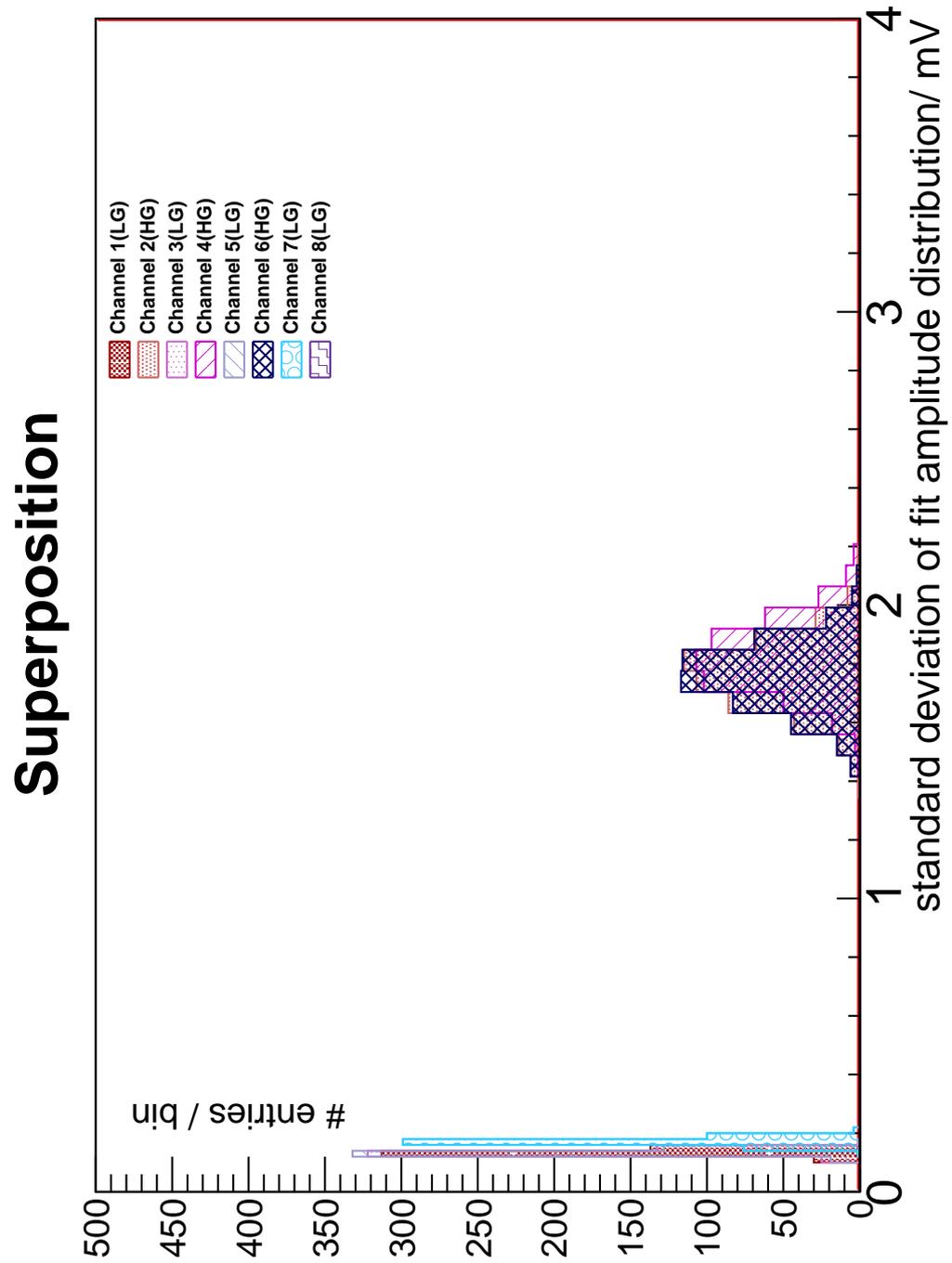


Abbildung A.12.: Überlagerung der Standardabweichungen der Amplituden-Verteilungen der 50mV200ns-Pulse der UUB-Kanäle des UUB-Dauertests

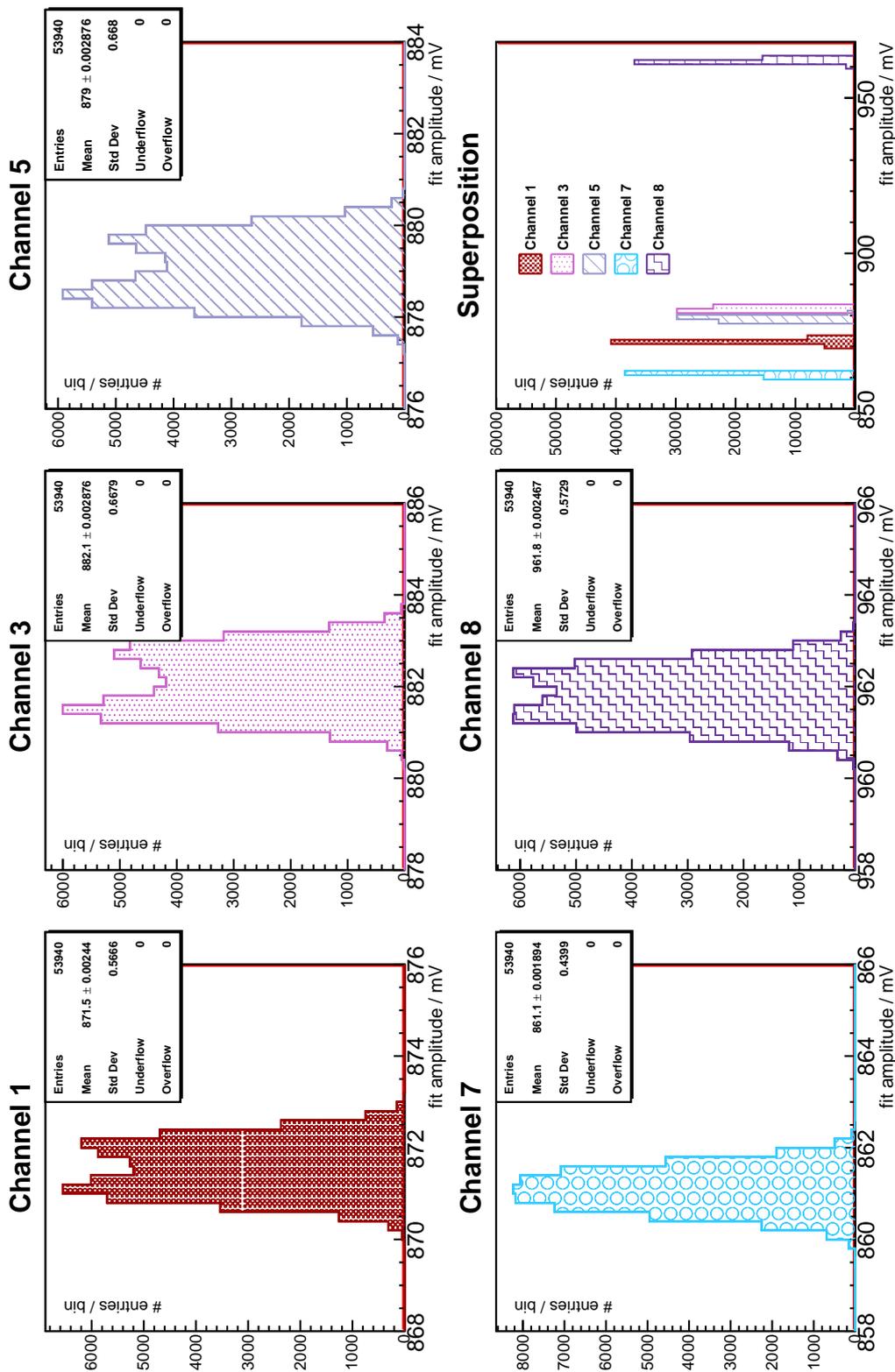


Abbildung A.13.: Amplituden aller 800mV40ns-Pulse des UUB-Dauertests auf den Low-Gain-Kanälen

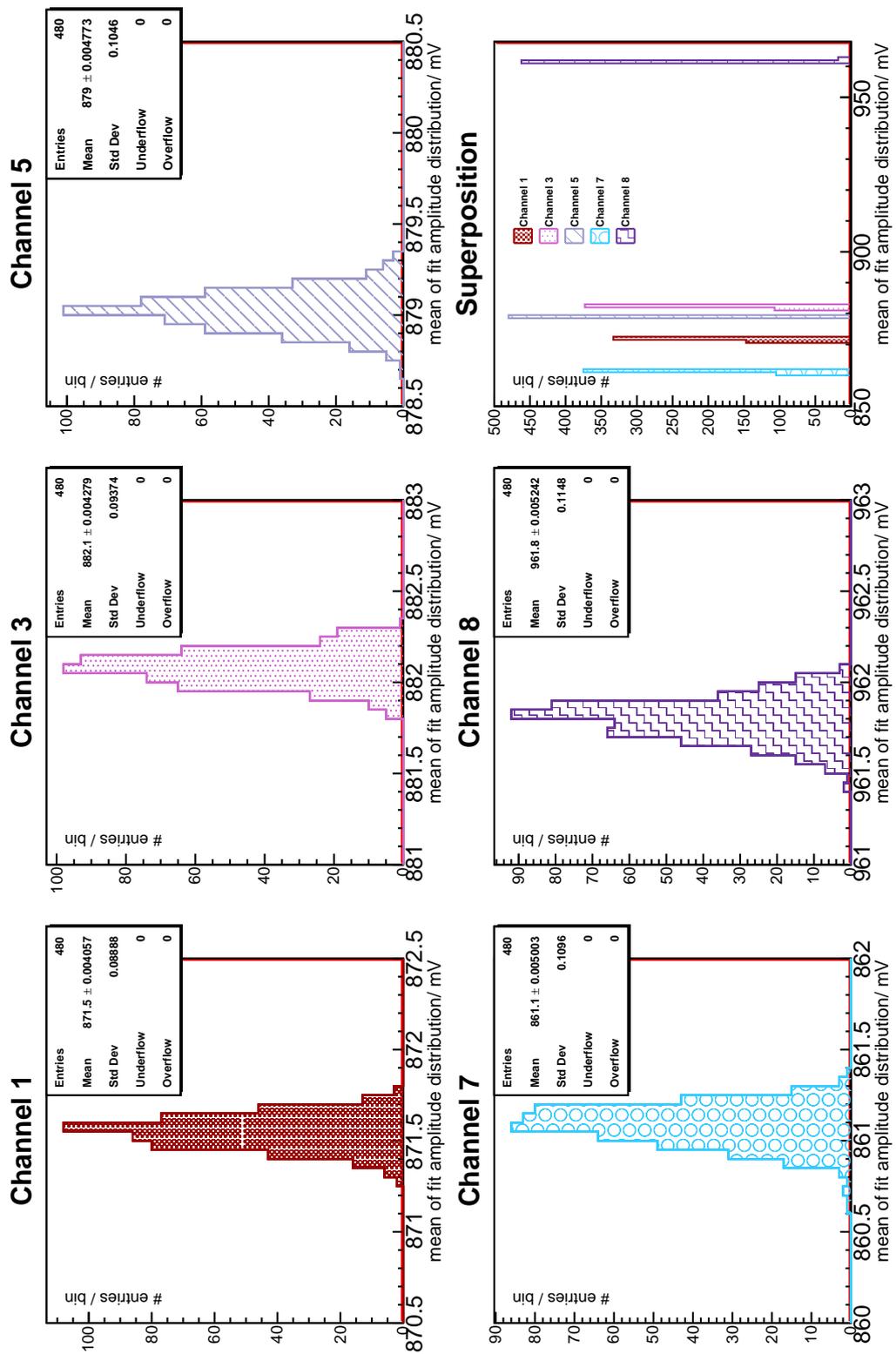


Abbildung A.14.: Mittelwerte der Amplituden-Verteilungen der 800mV40ns-Pulse des UUB-Dauertests auf den Low-Gain-Kanälen

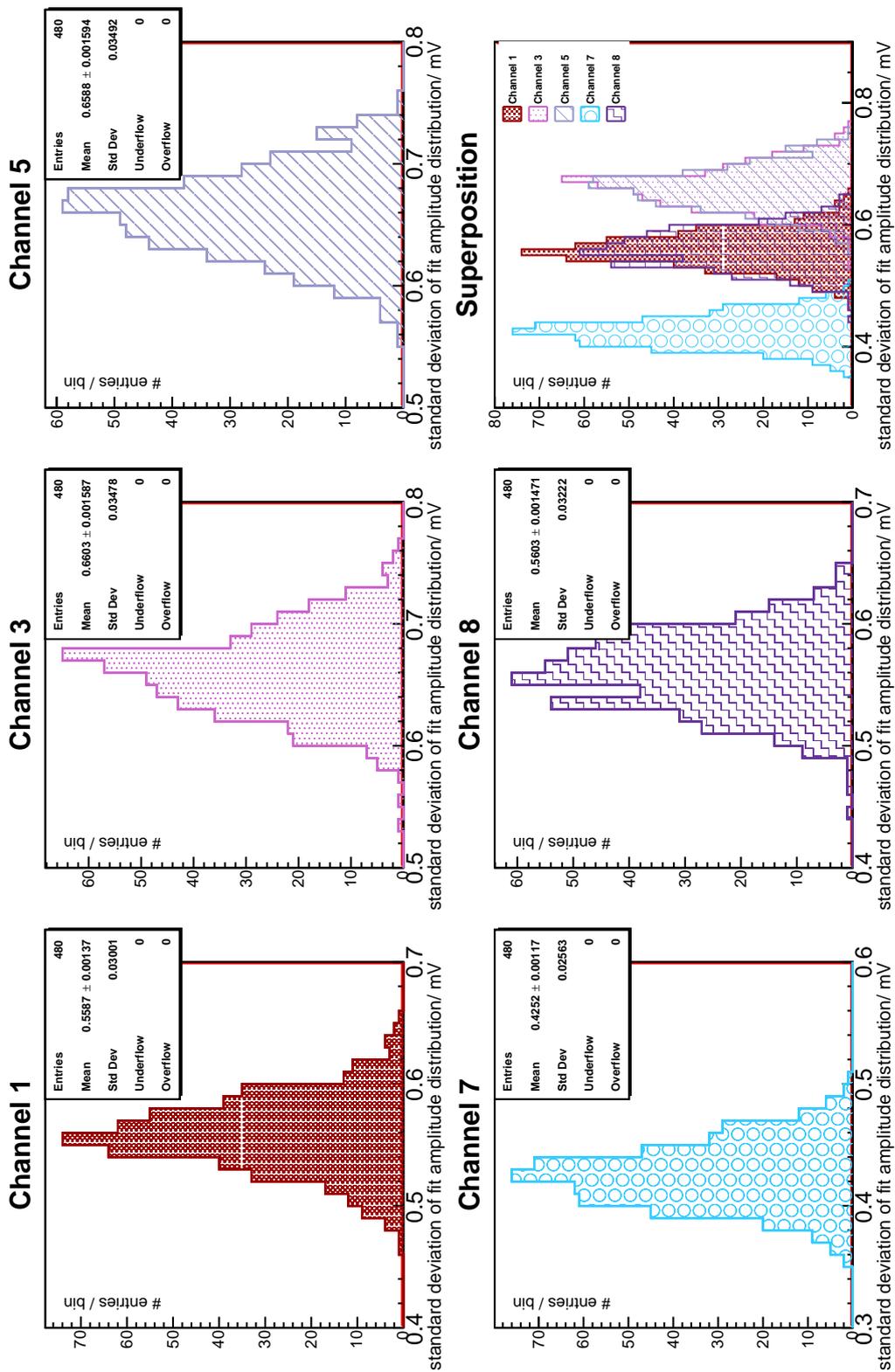


Abbildung A.15.: Standardabweichungen der Amplituden-Verteilungen der 800mV40ns-Pulse des UUB-Dauertests auf den Low-Gain-Kanälen

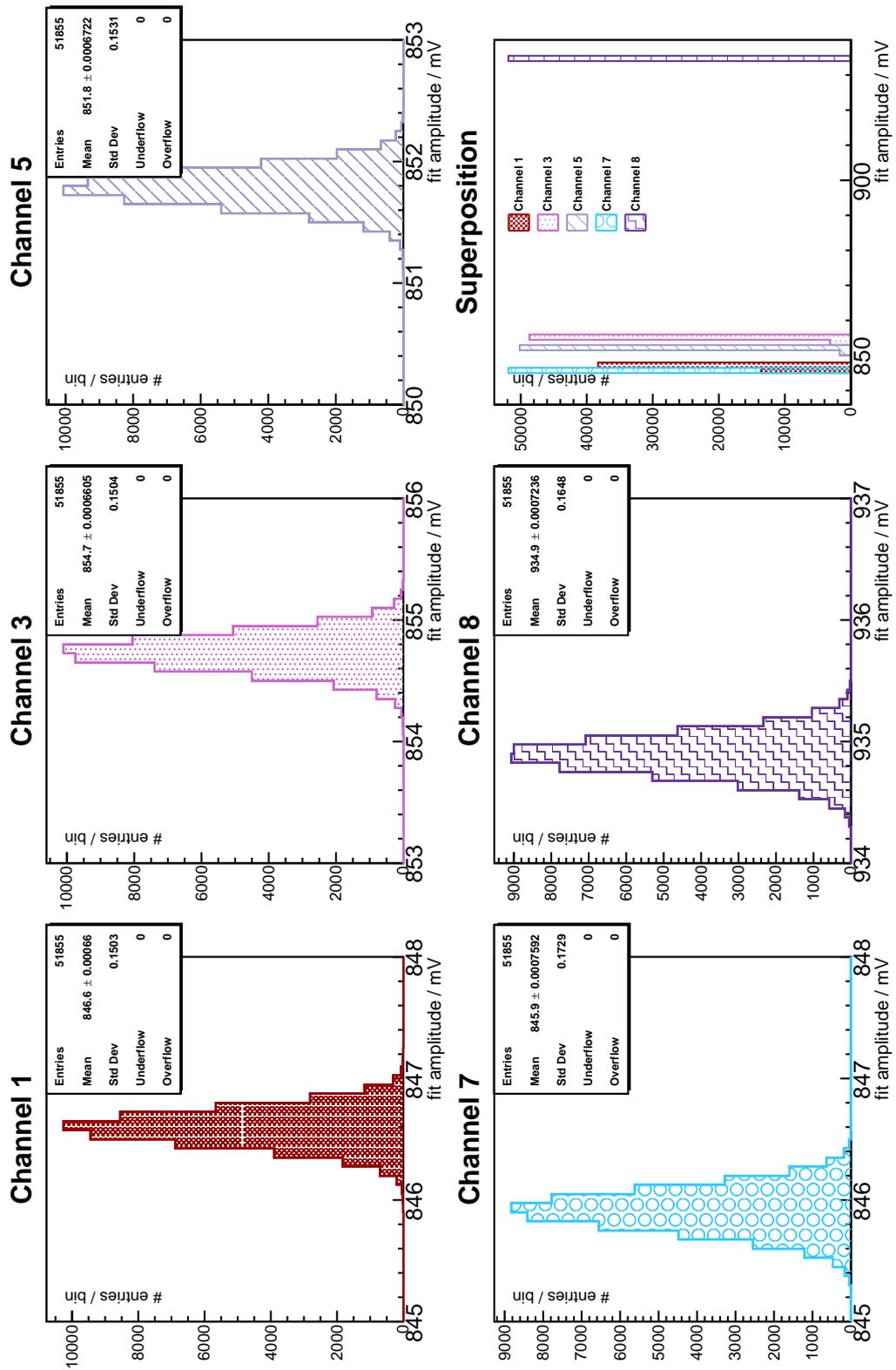


Abbildung A.16.: Amplituden aller 800mV200ns-Pulse des UUB-Dauertests auf den Low-Gain-Kanälen

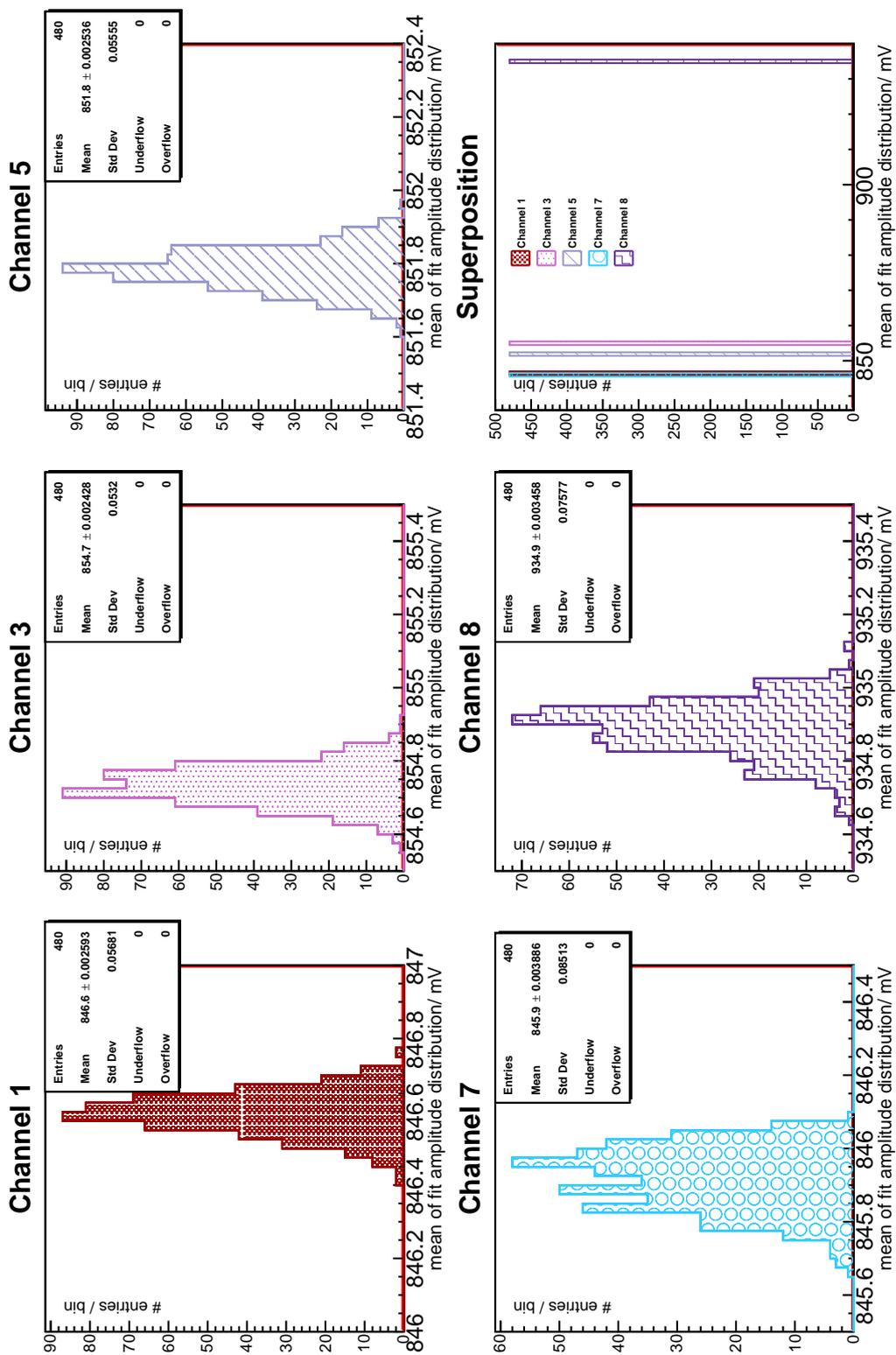


Abbildung A.17.: Mittelwerte der Amplituden-Verteilungen der 800mV200ns-Pulse des UUB-Dauertests auf den Low-Gain-Kanälen

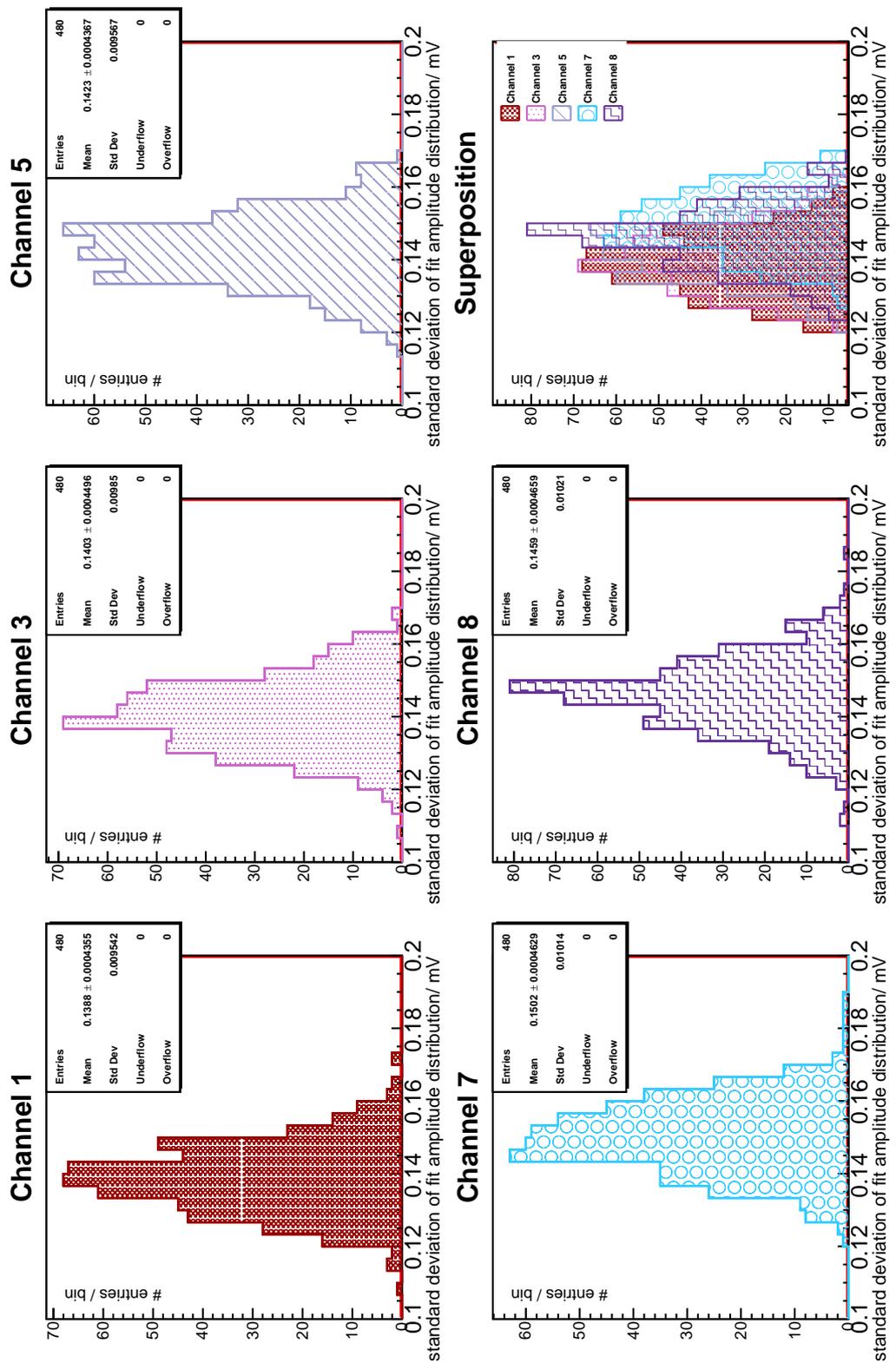


Abbildung A.18.: Standardabweichungen der Amplituden-Verteilungen der 800mV200ns-Pulse des UUB-Dauertests auf den Low-Gain-Kanälen

A.2. Breite

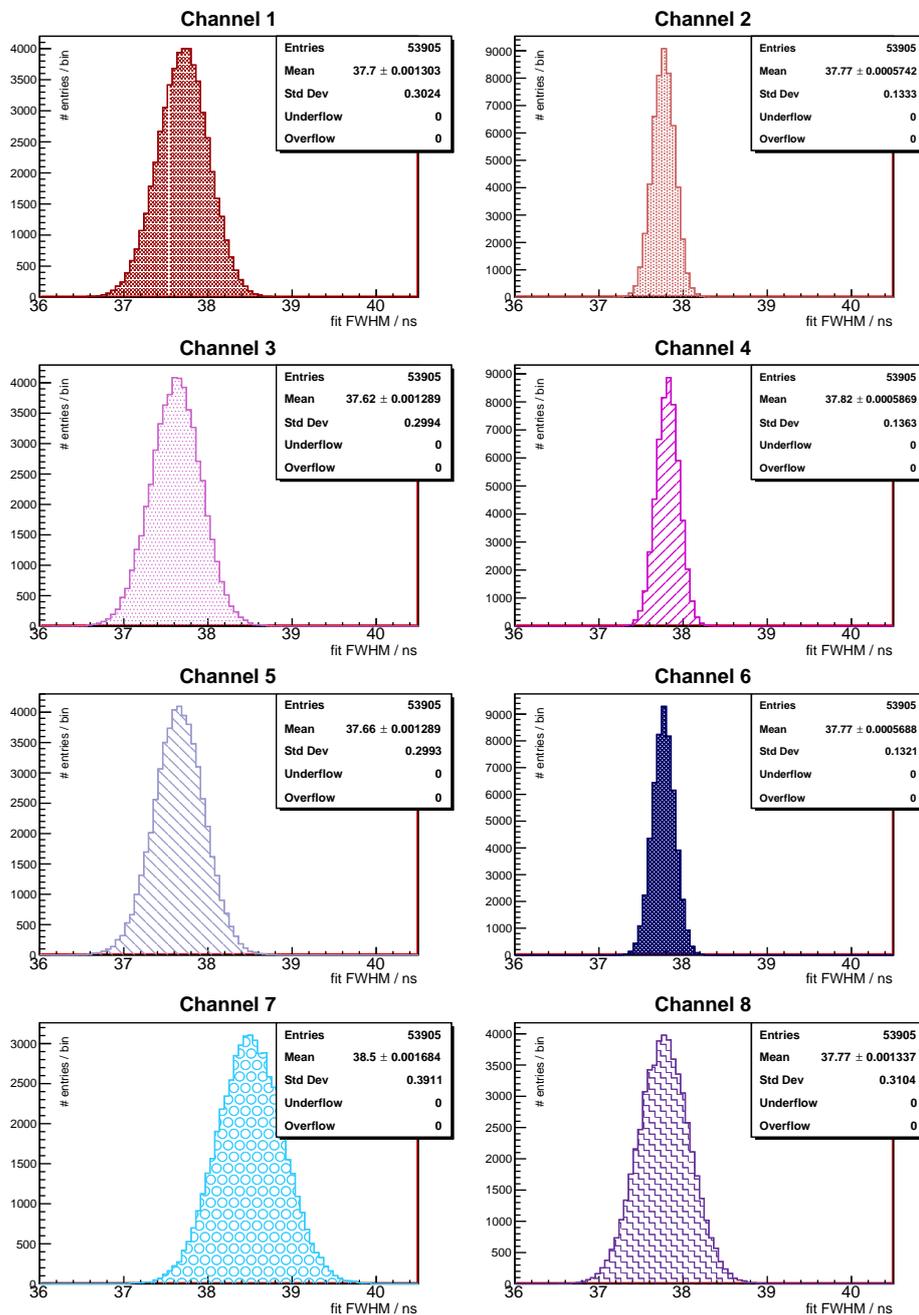


Abbildung A.19.: FWHM aller 50mV40ns-Pulse des Dauertests

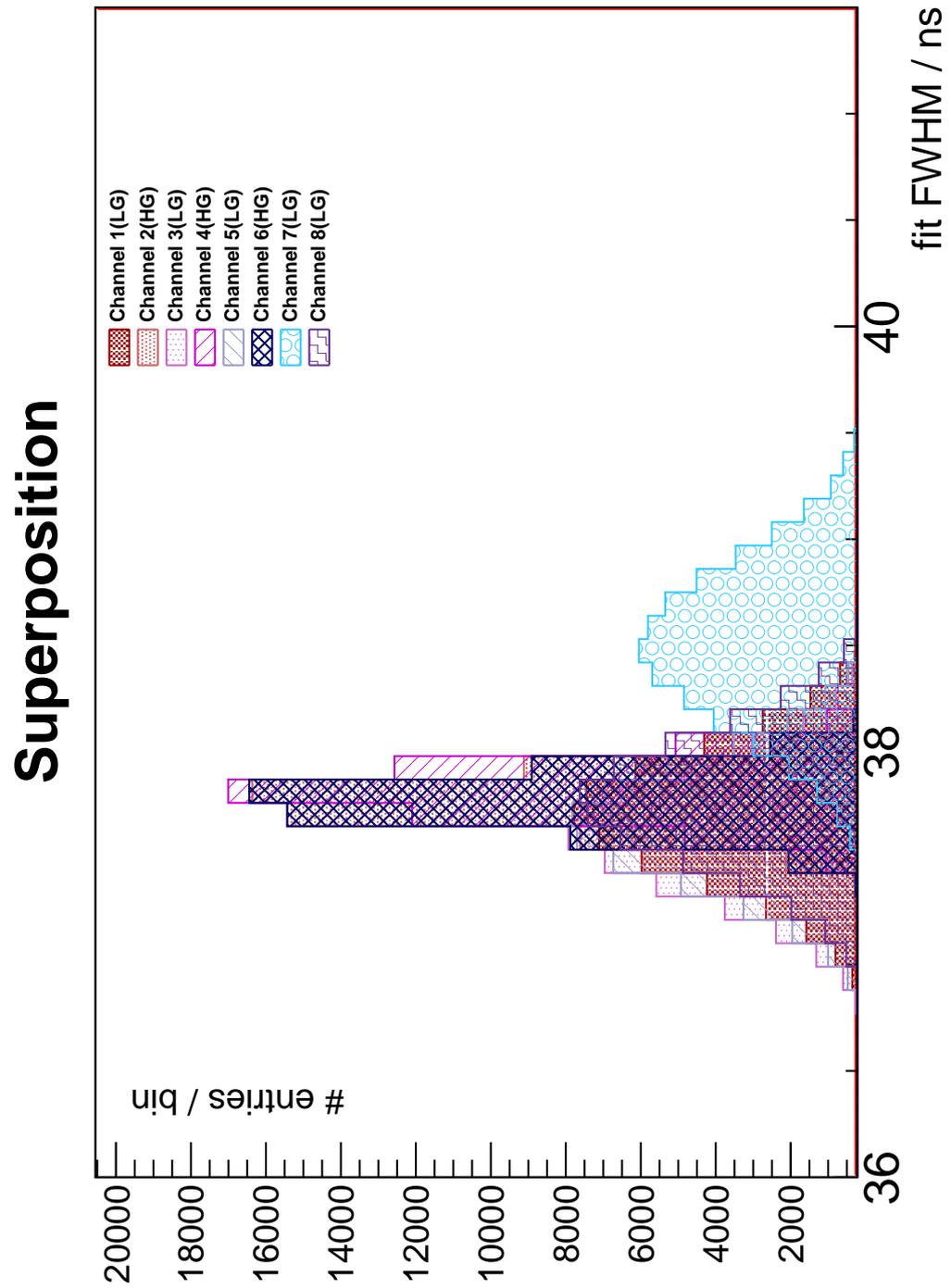


Abbildung A.20.: Überlagerung aller FWHM-Verteilungen der 50mV40ns-Pulse des UUB-Dauertests eingefärbt nach UUB-Kanälen

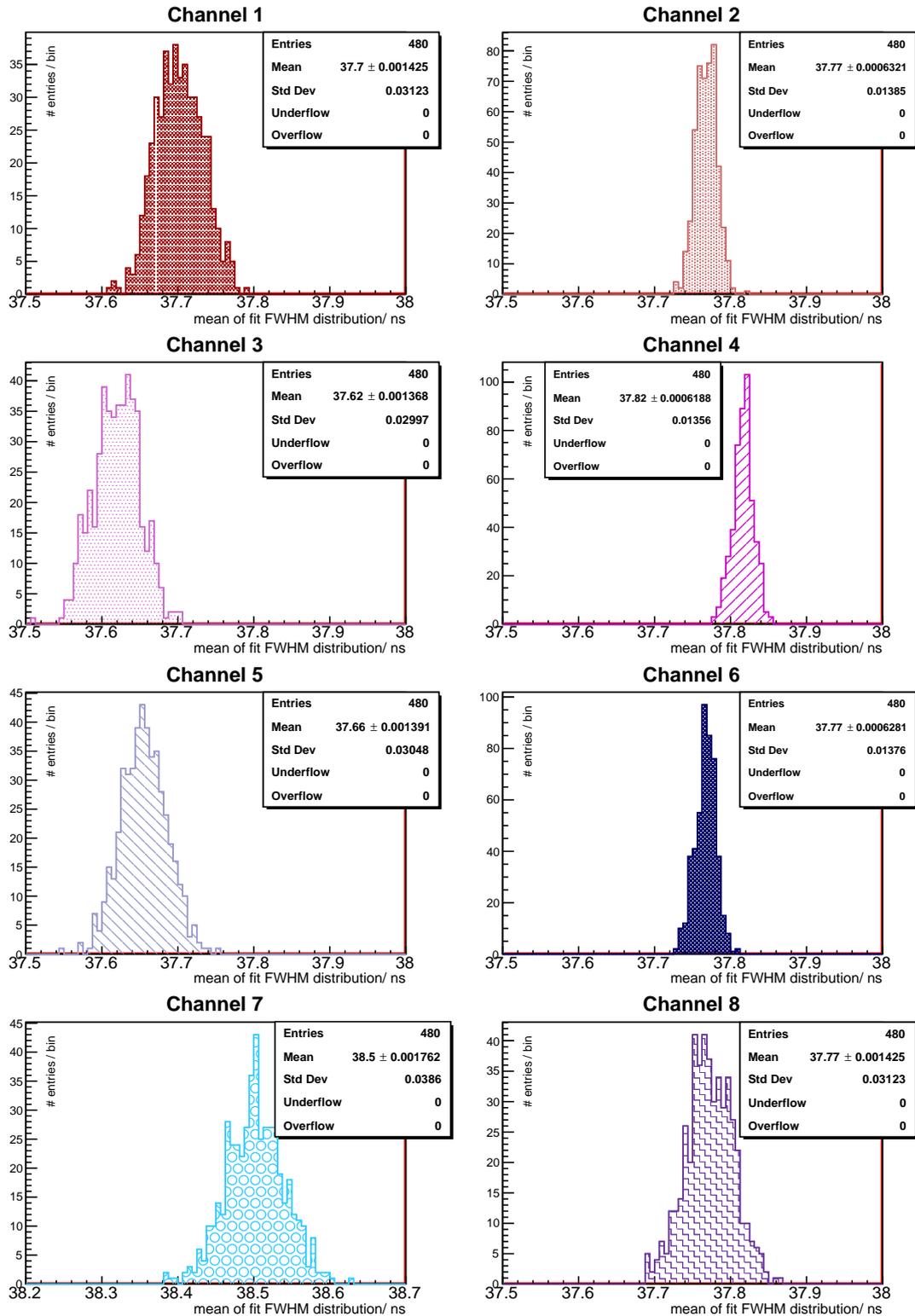


Abbildung A.21.: Mittelwerte der FWHM-Verteilungen der 50mV40ns-Pulse des UUB-Dauertests

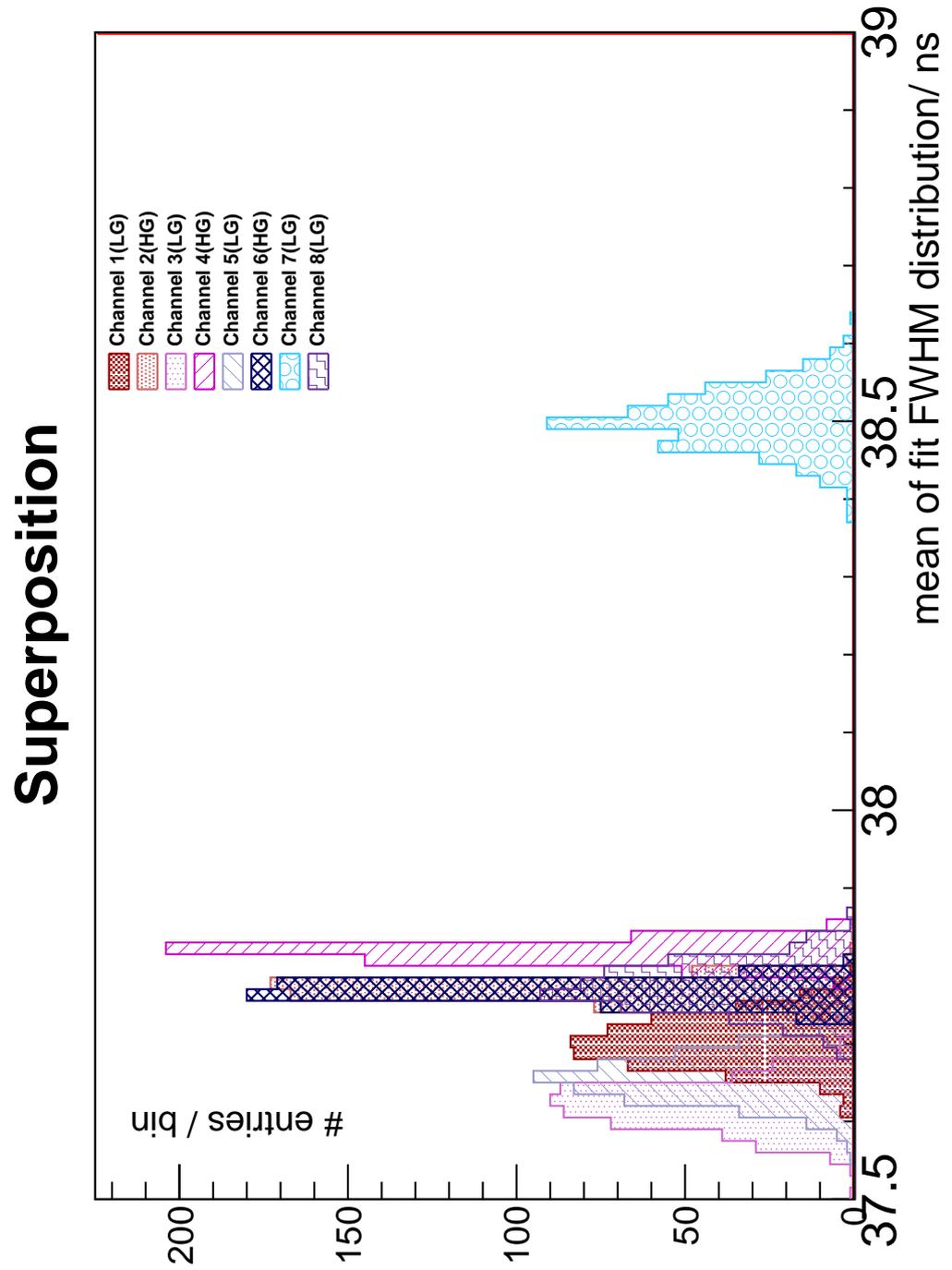


Abbildung A.22.: Überlagerung der Mittelwerte des FWHM für den Dauertest der 50mV40ns-Pulse

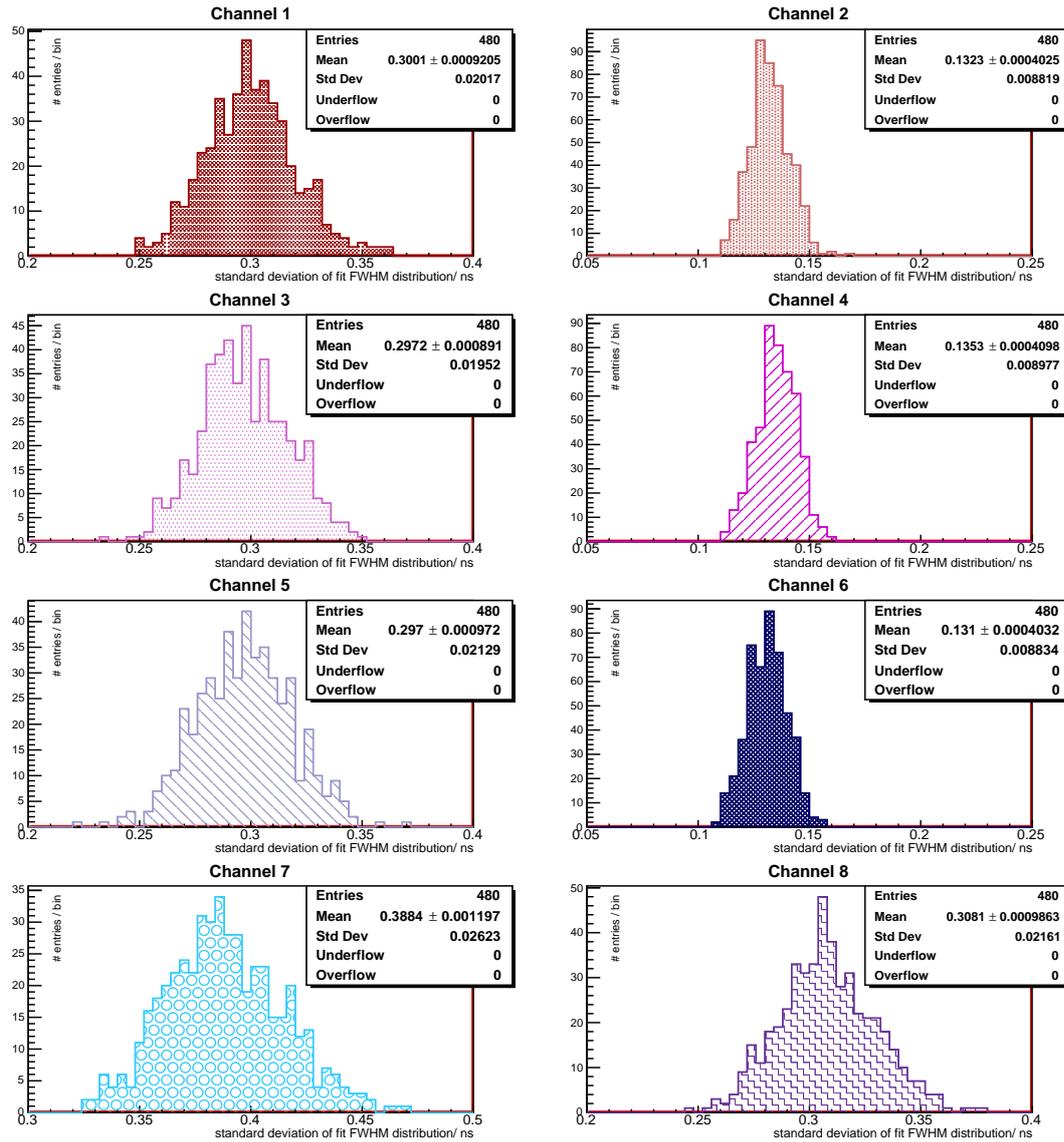


Abbildung A.23.: Standardabweichungen der FWHM-Verteilungen der 50mV40ns-Pulse des UUB-Dauertests

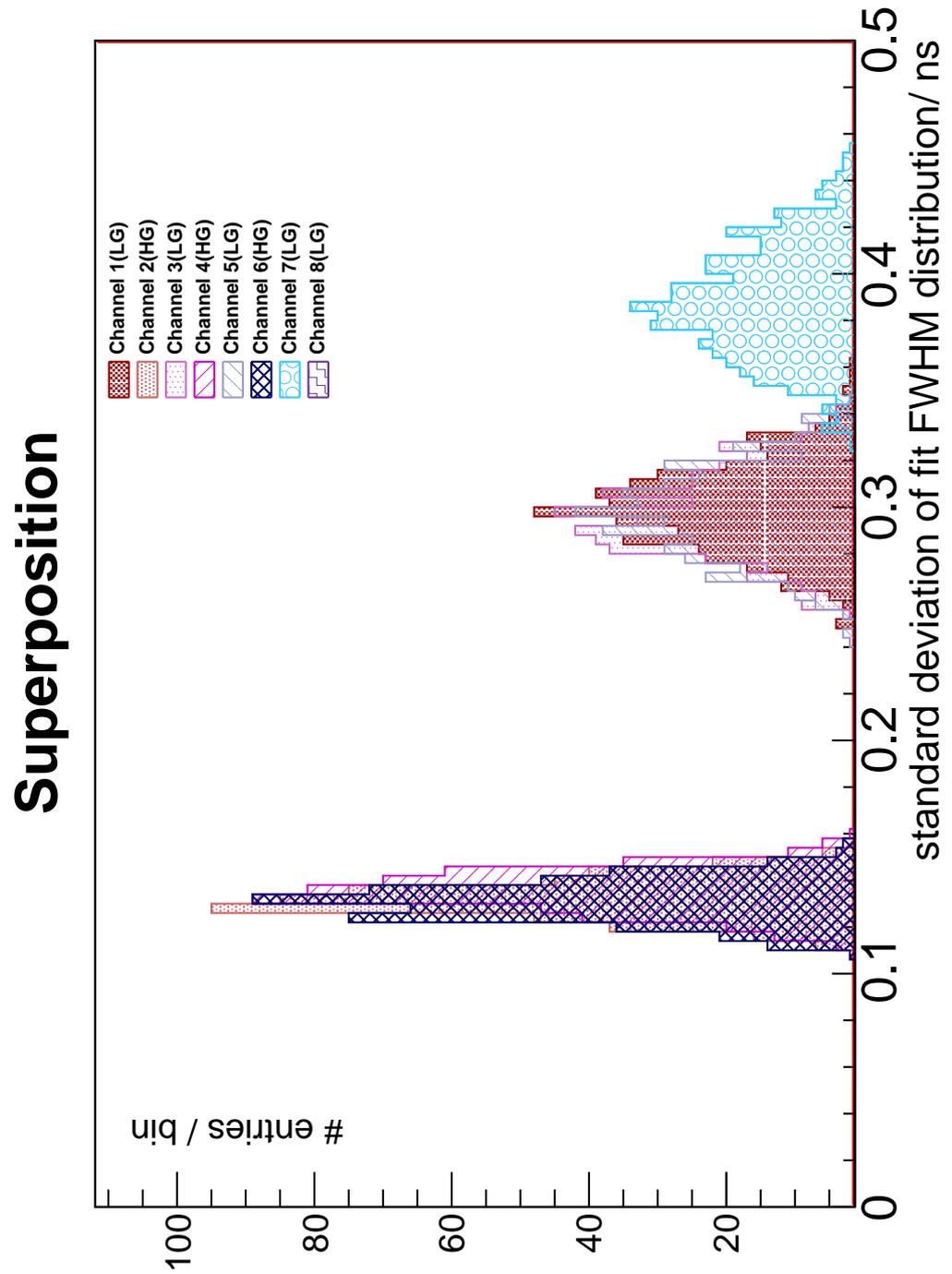


Abbildung A.24.: Überlagerung der Standardabweichungen der FWHM-Verteilungen der 50mV40ns-Pulse der UUB-Kanäle des UUB-Dauertests

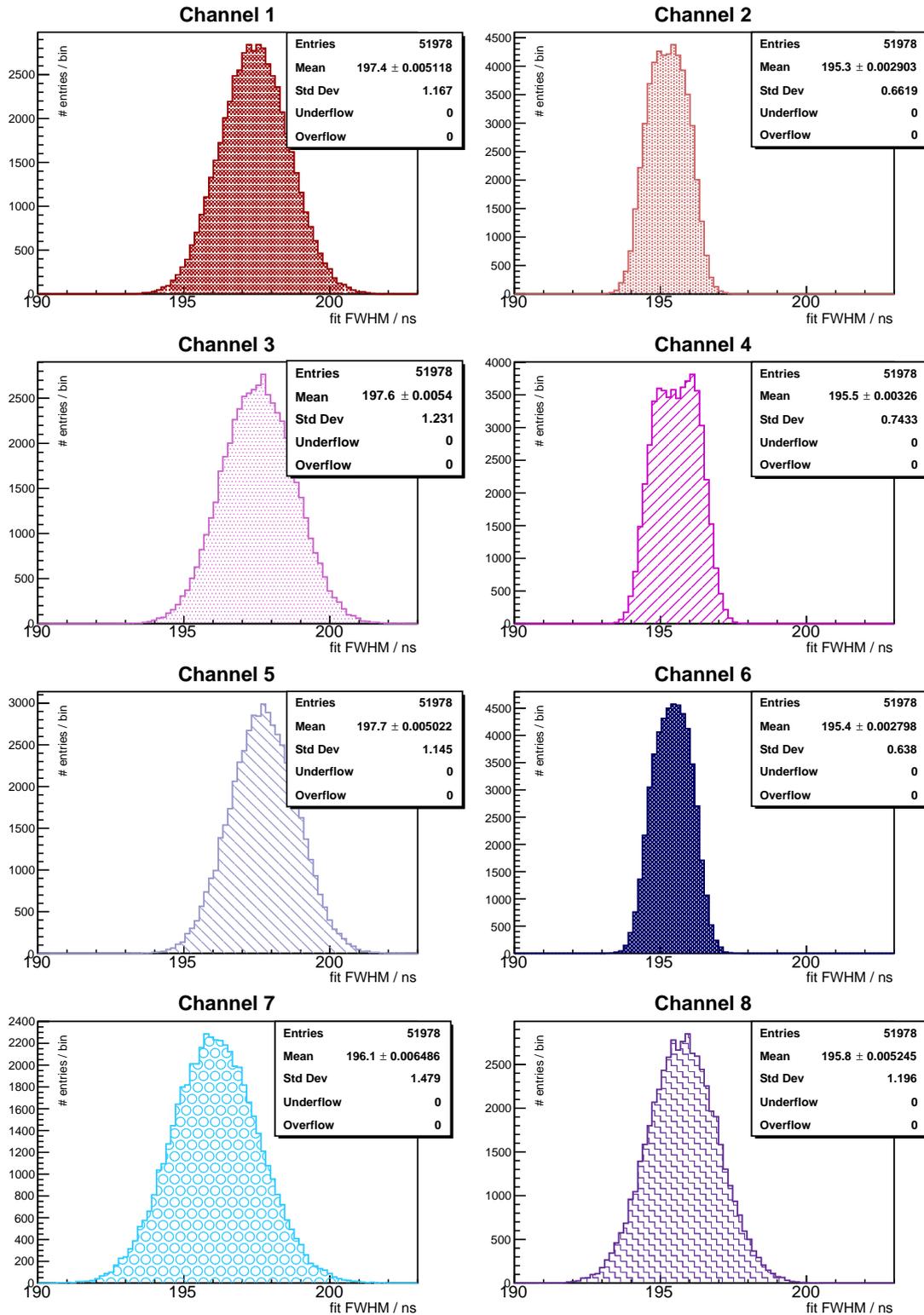


Abbildung A.25.: FWHM aller 50mV200ns-Pulse des Dauertests

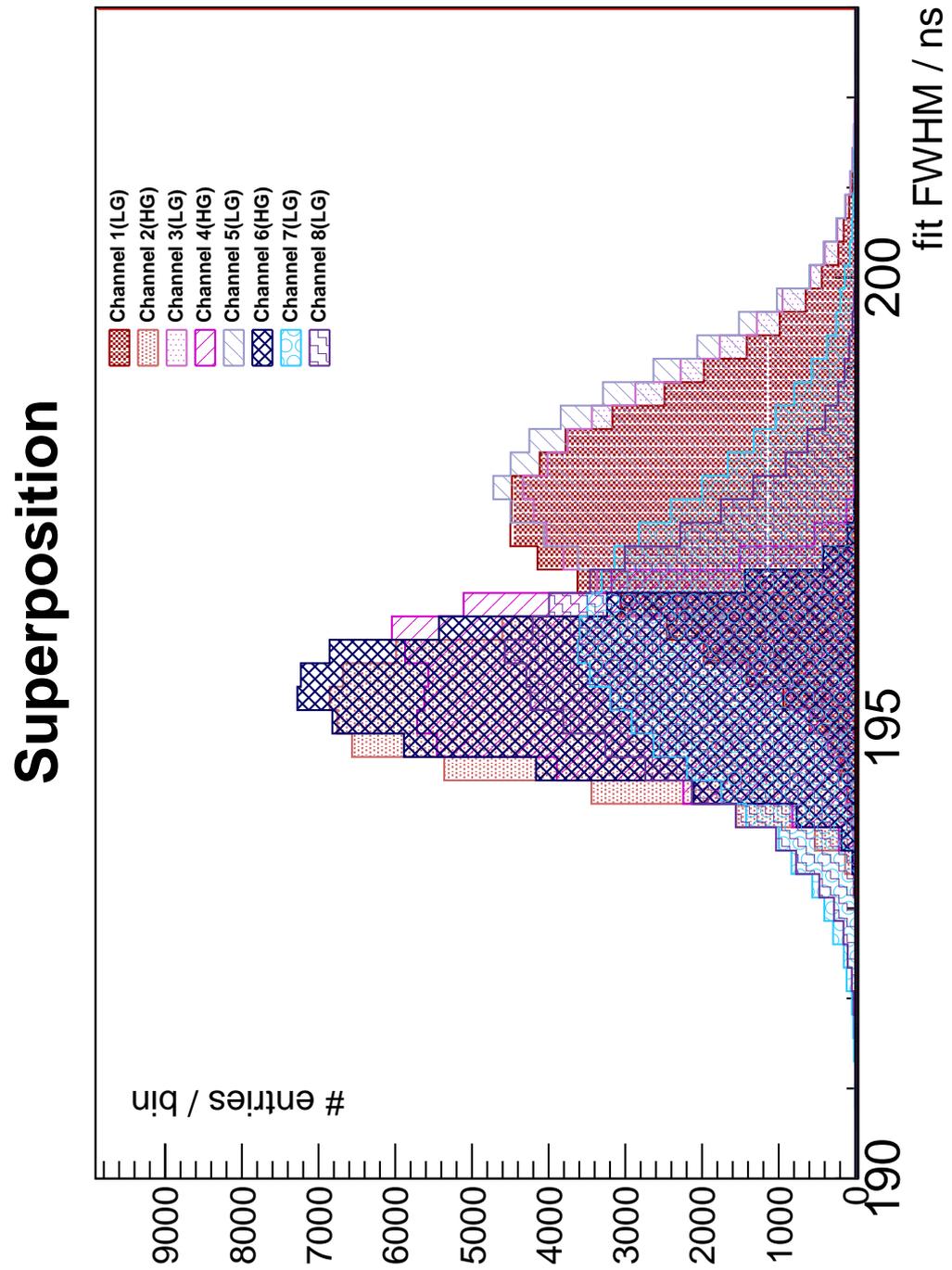


Abbildung A.26.: Überlagerung aller FWHM-Verteilungen der 50mV200ns-Pulse des UUB-Dauertests eingefärbt nach UUB-Kanälen

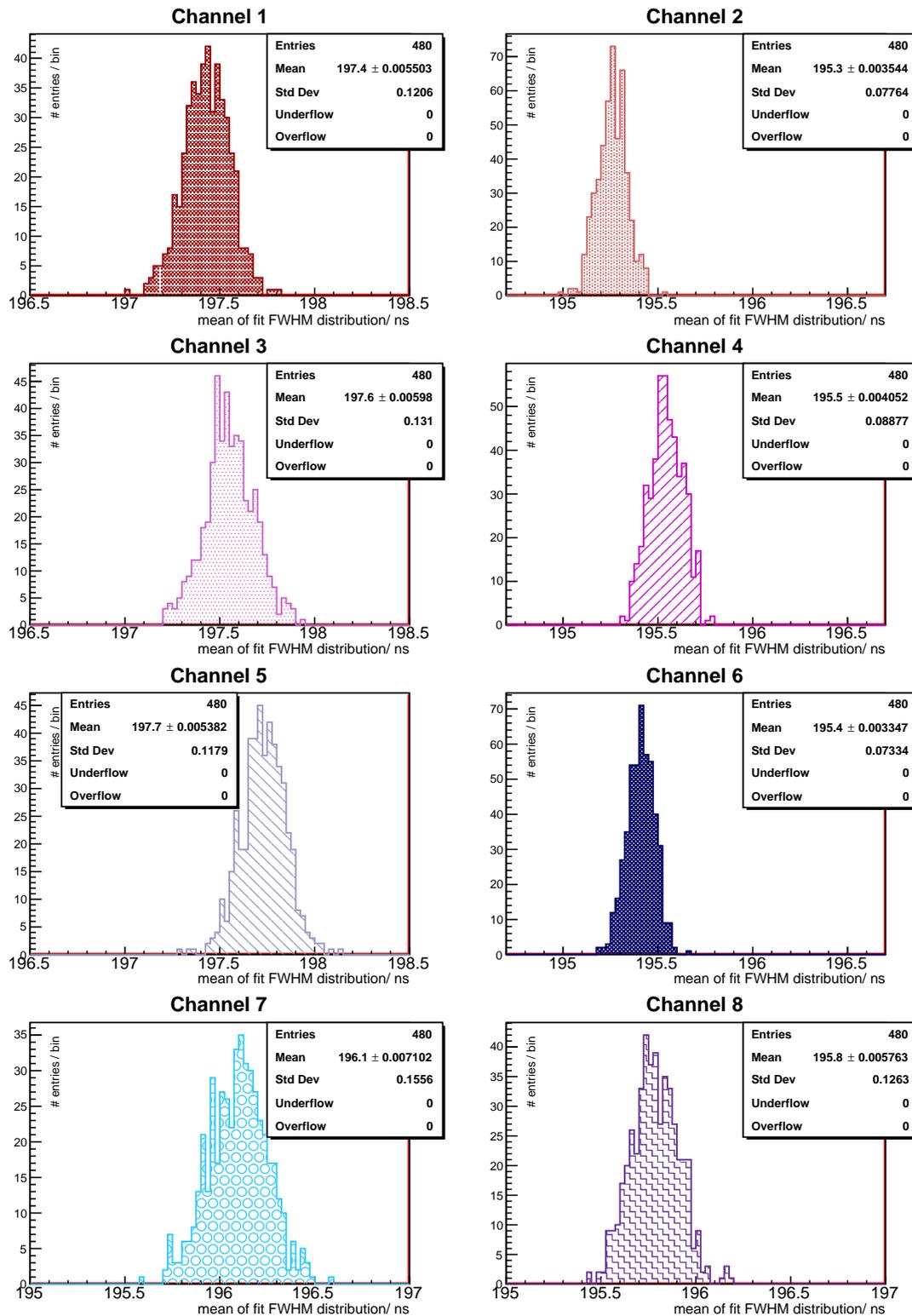


Abbildung A.27.: Mittelwerte der FWHM-Verteilungen der 50mV200ns-Pulse des UUB-Dauertests

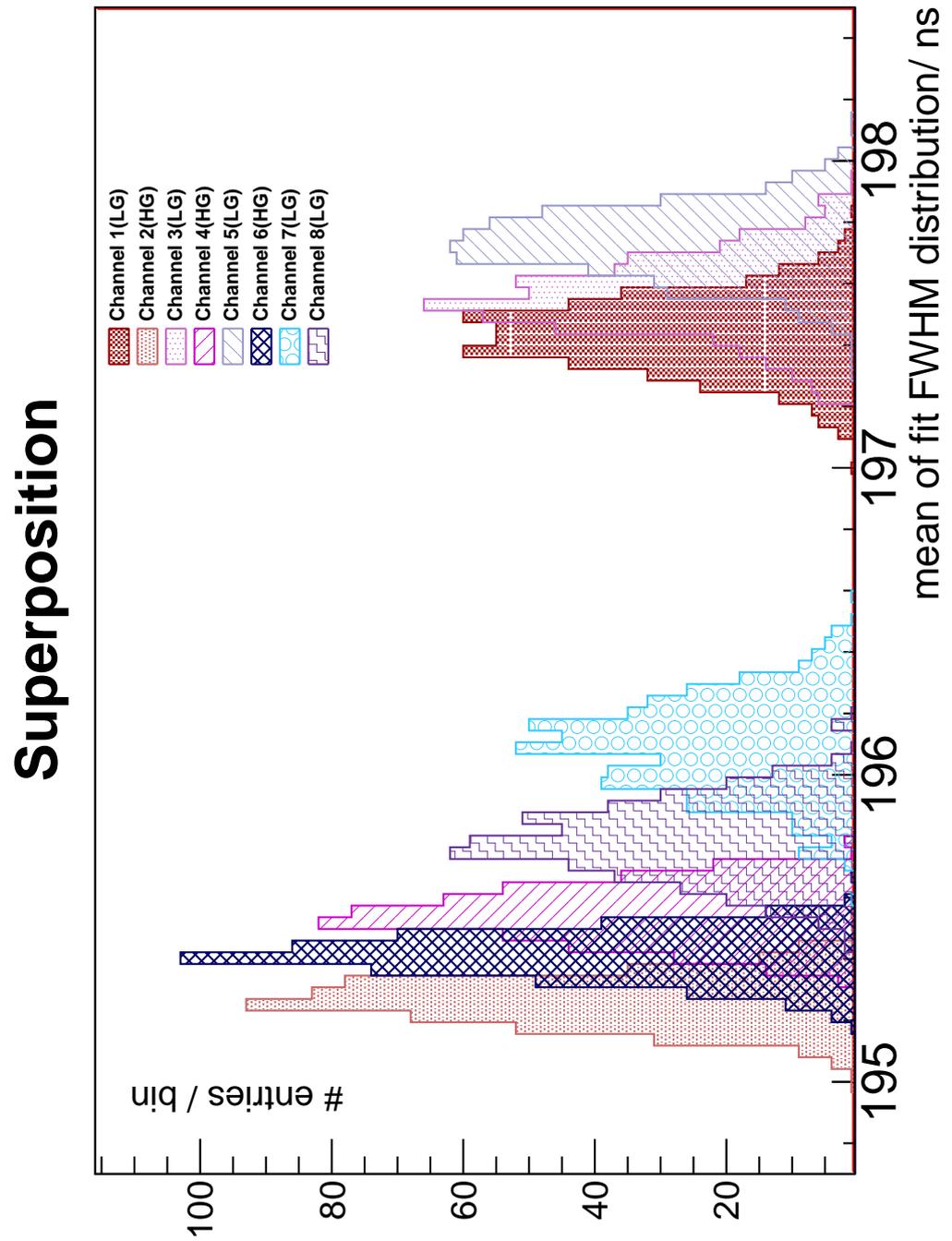


Abbildung A.28.: Überlagerung der Mittelwerte des FWHM für den Dauertest der 50mV200ns-Pulse

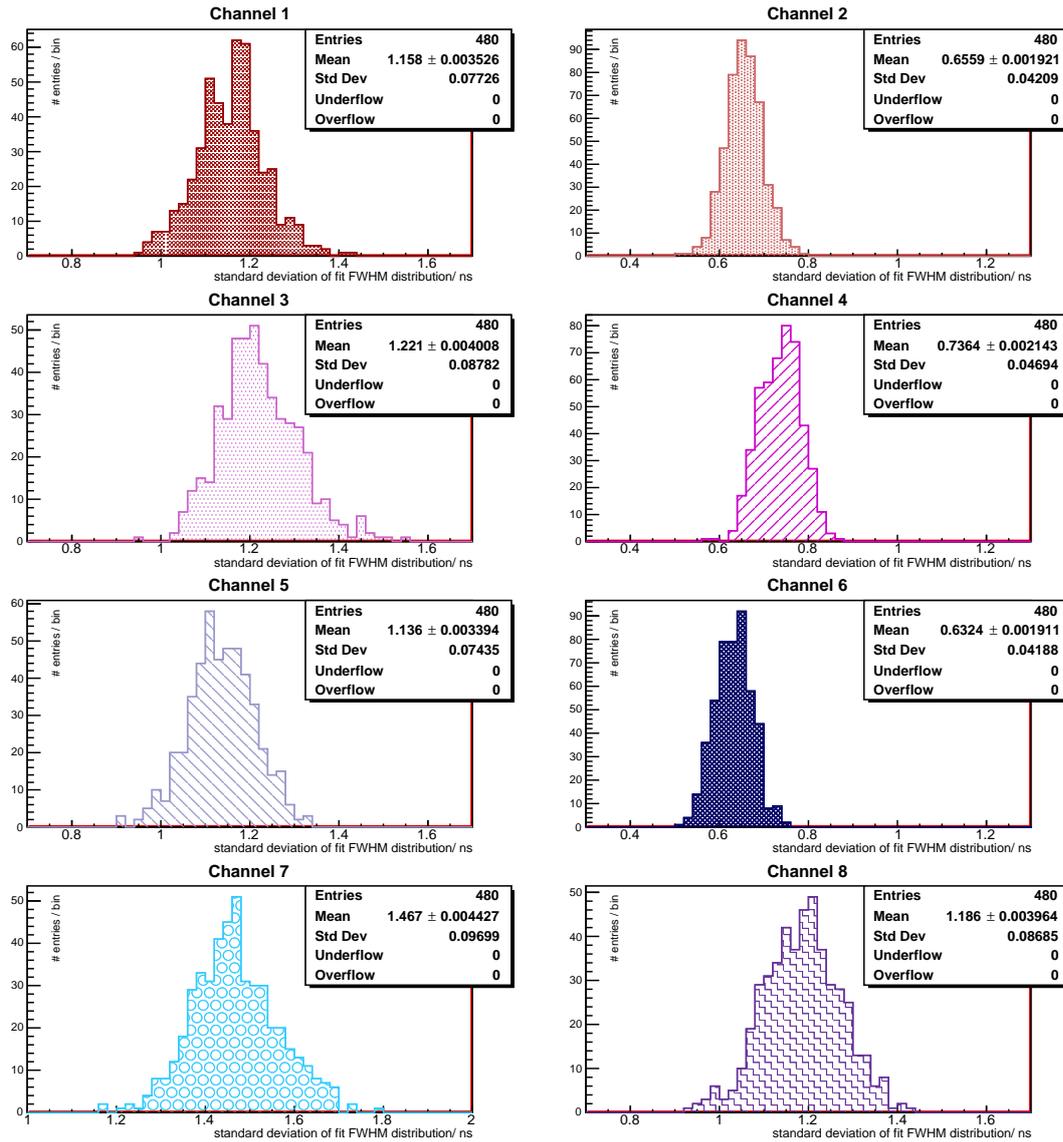


Abbildung A.29.: Standardabweichungen der FWHM-Verteilungen der 50mV200ns-Pulse des UUB-Dauertests

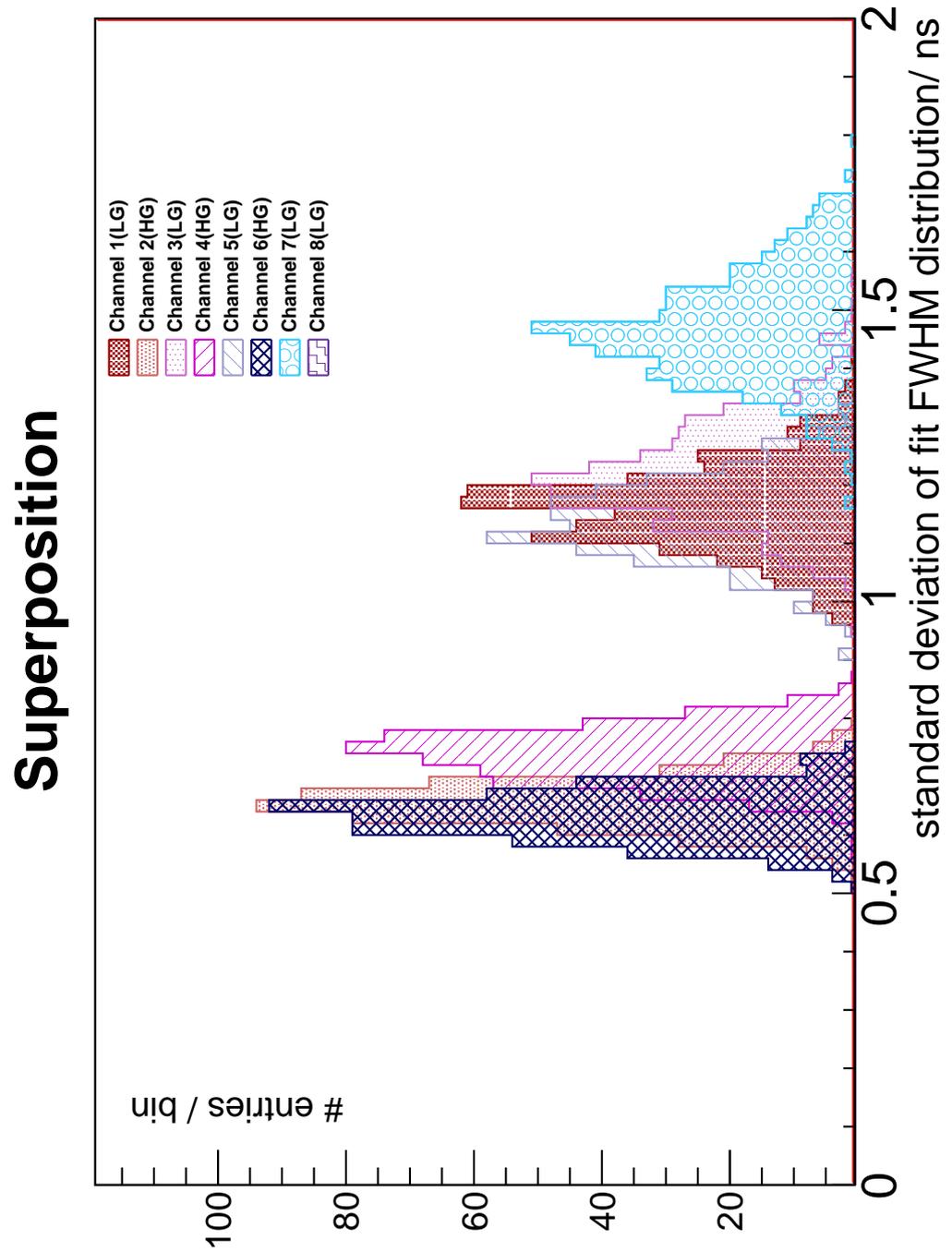


Abbildung A.30.: Überlagerung der Standardabweichungen der FWHM-Verteilungen der 50mV200ns-Pulse der UUB-Kanäle des UUB-Dauertests

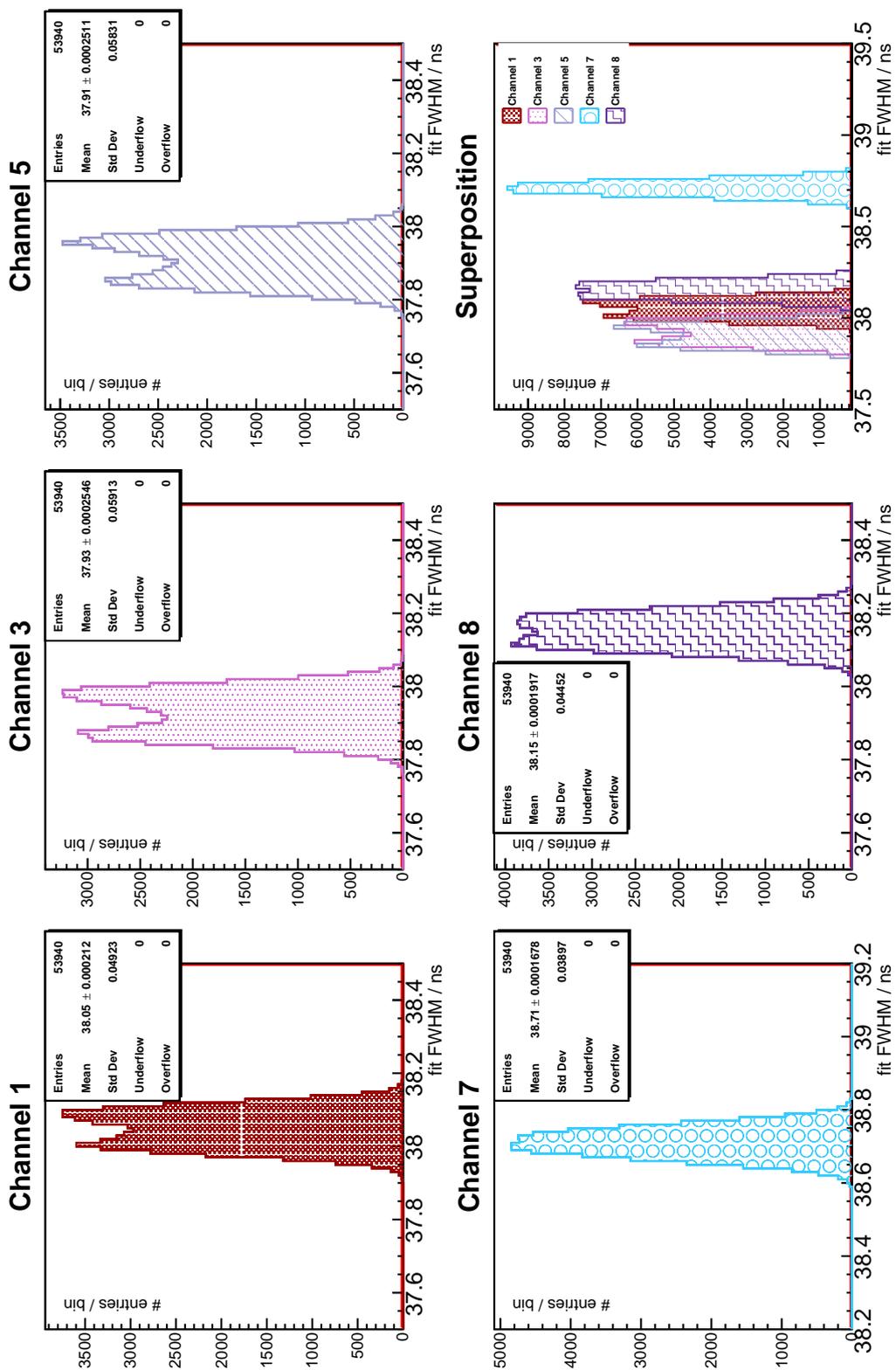


Abbildung A.31.: FWHM aller 800mV40ns-Pulse des UUB-Dauertests auf den Low-Gain-Kanälen

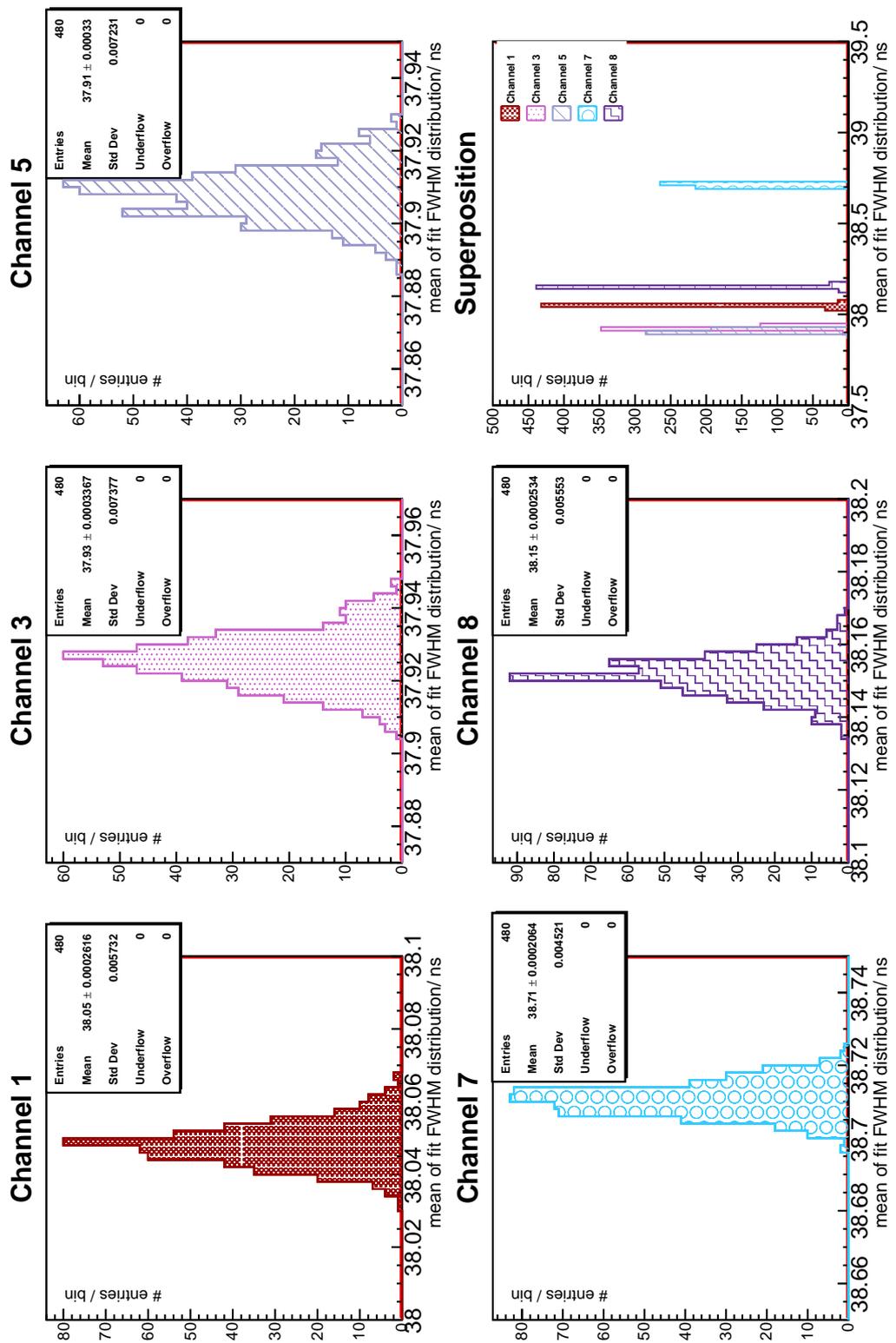


Abbildung A.32.: Mittelwerte der FWHM-Verteilungen der 800mV40ns-Pulse des UUB-Dauertests auf den Low-Gain-Kanälen

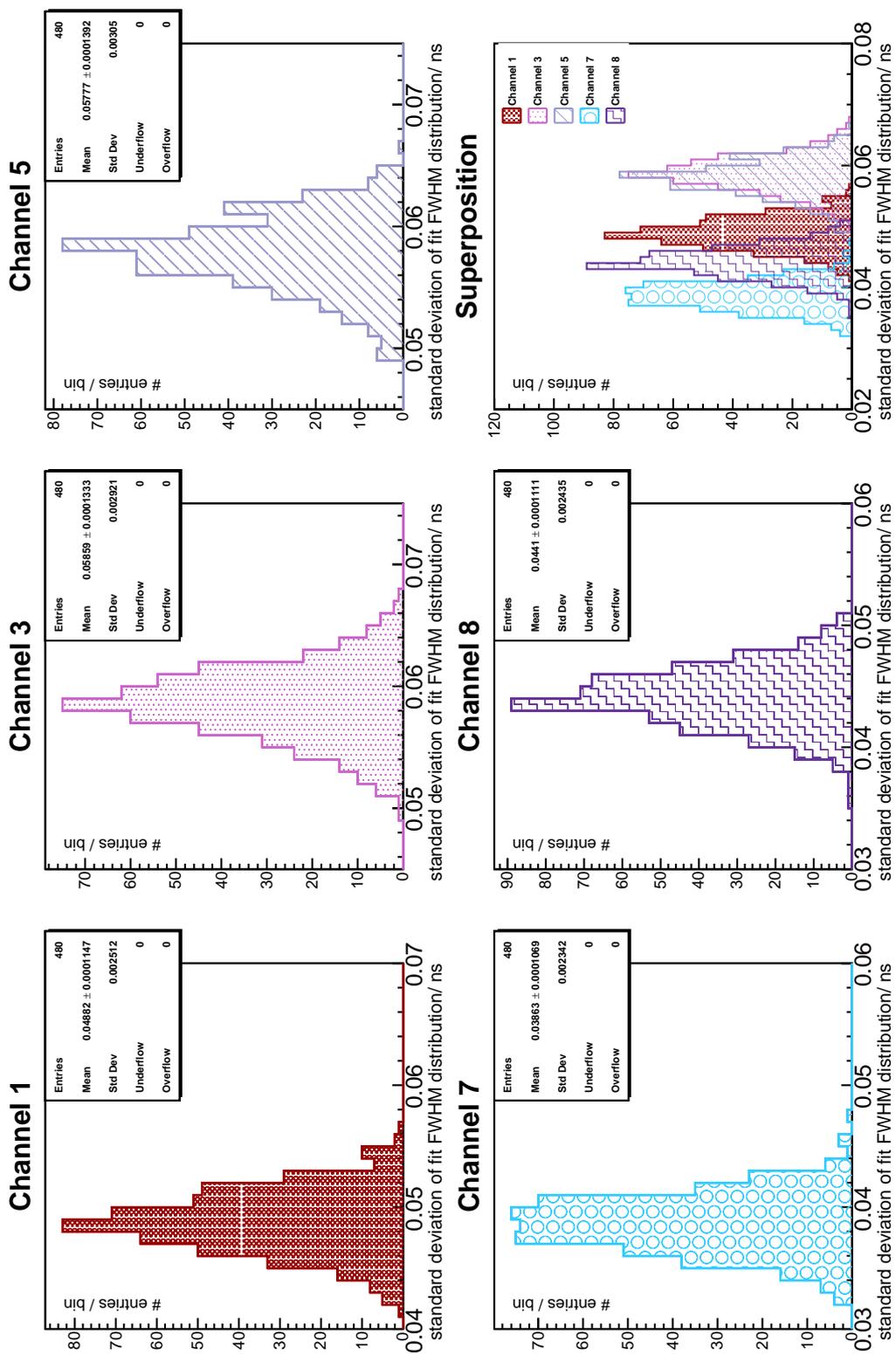


Abbildung A.33.: Standardabweichungen der FWHM-Verteilungen der 800mV40ns-Pulse des UUB-Dauertests auf den Low-Gain-Kanälen

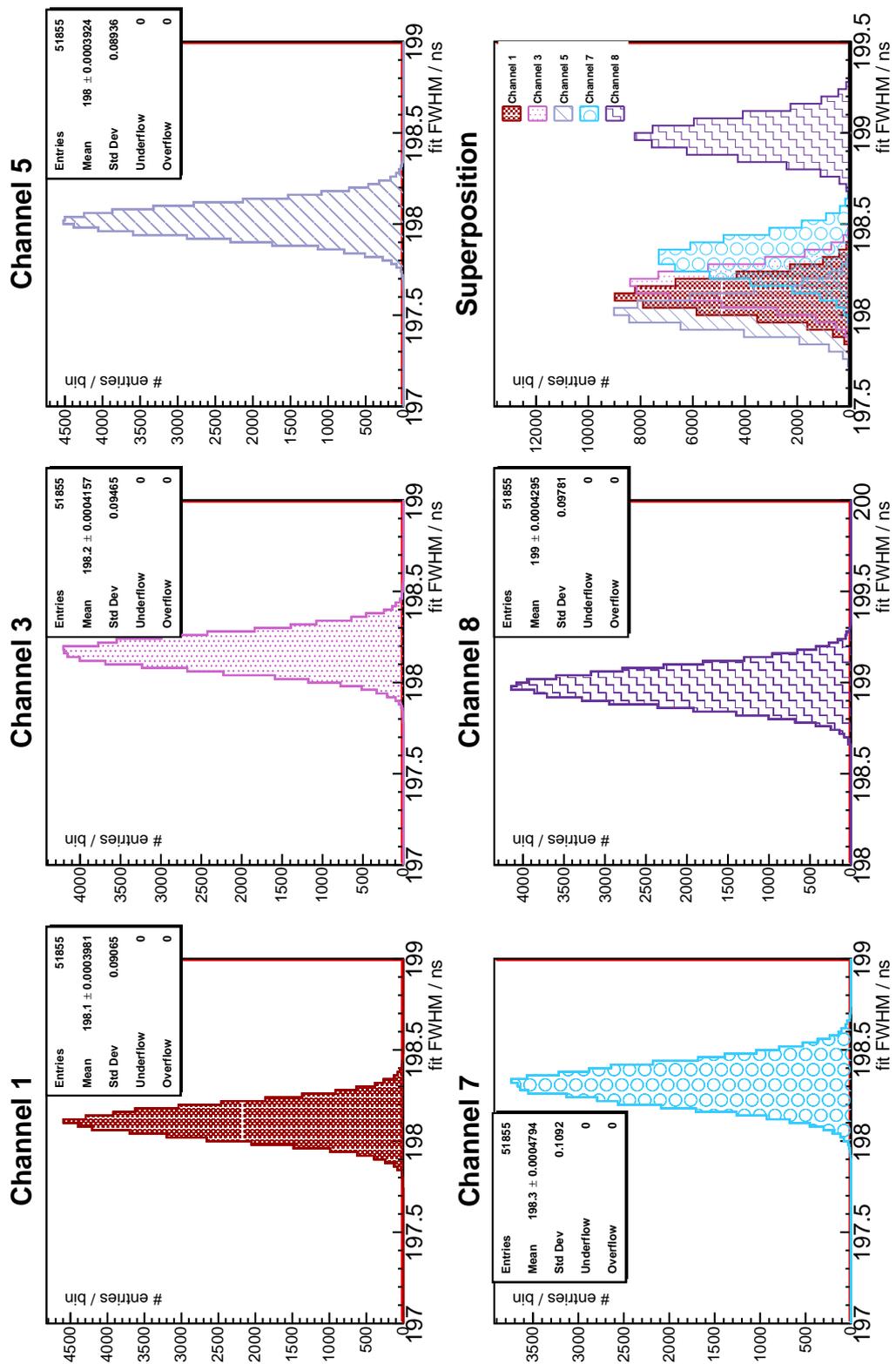


Abbildung A.34.: FWHM aller 800m200Vns-Pulse des UUB-Dauertests auf den Low-Gain-Kanälen

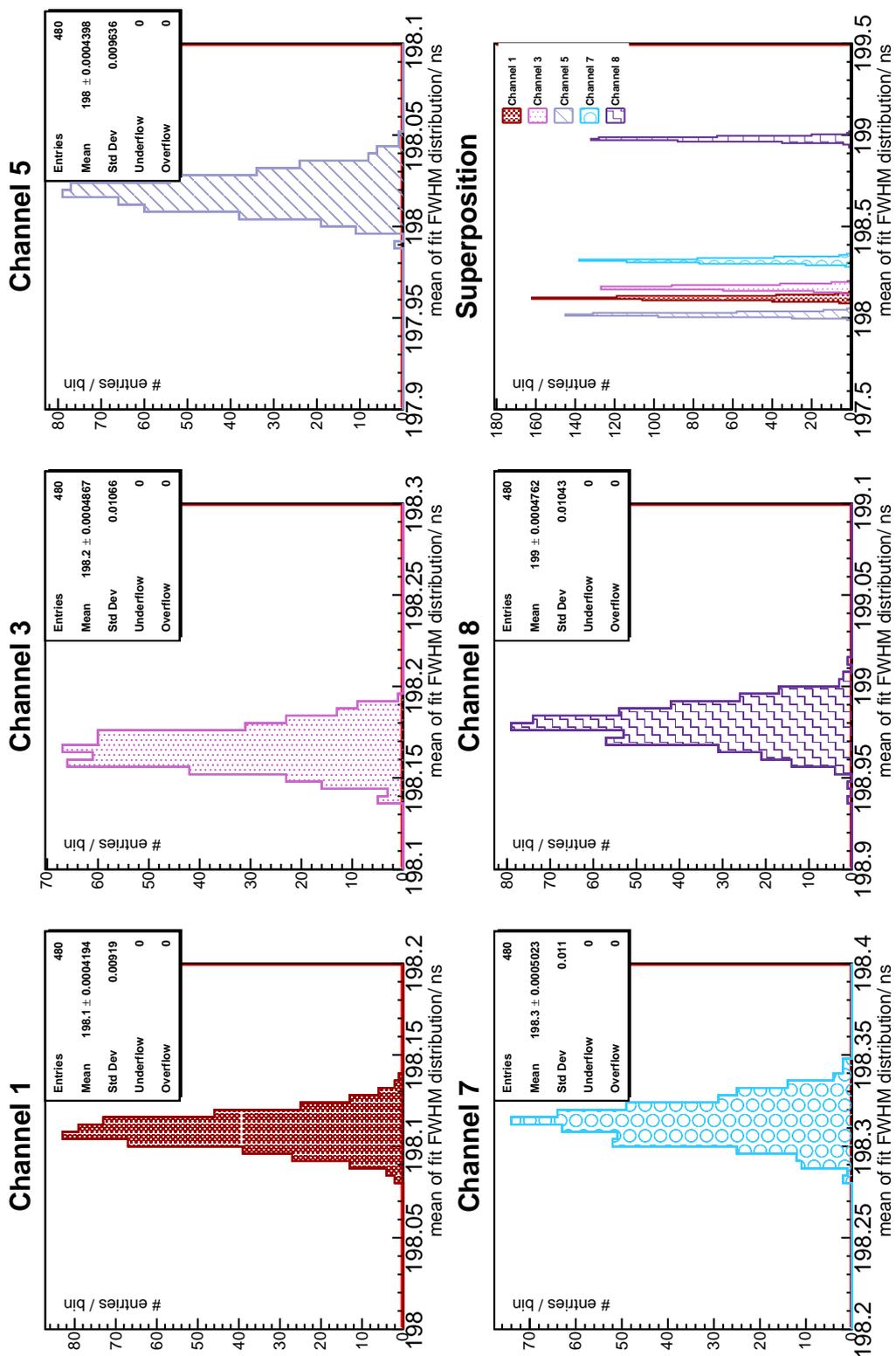


Abbildung A.35.: Mittelwerte der FWHM-Verteilungen der 800mV200ns-Pulse des UUB-Dauertests auf den Low-Gain-Kanälen

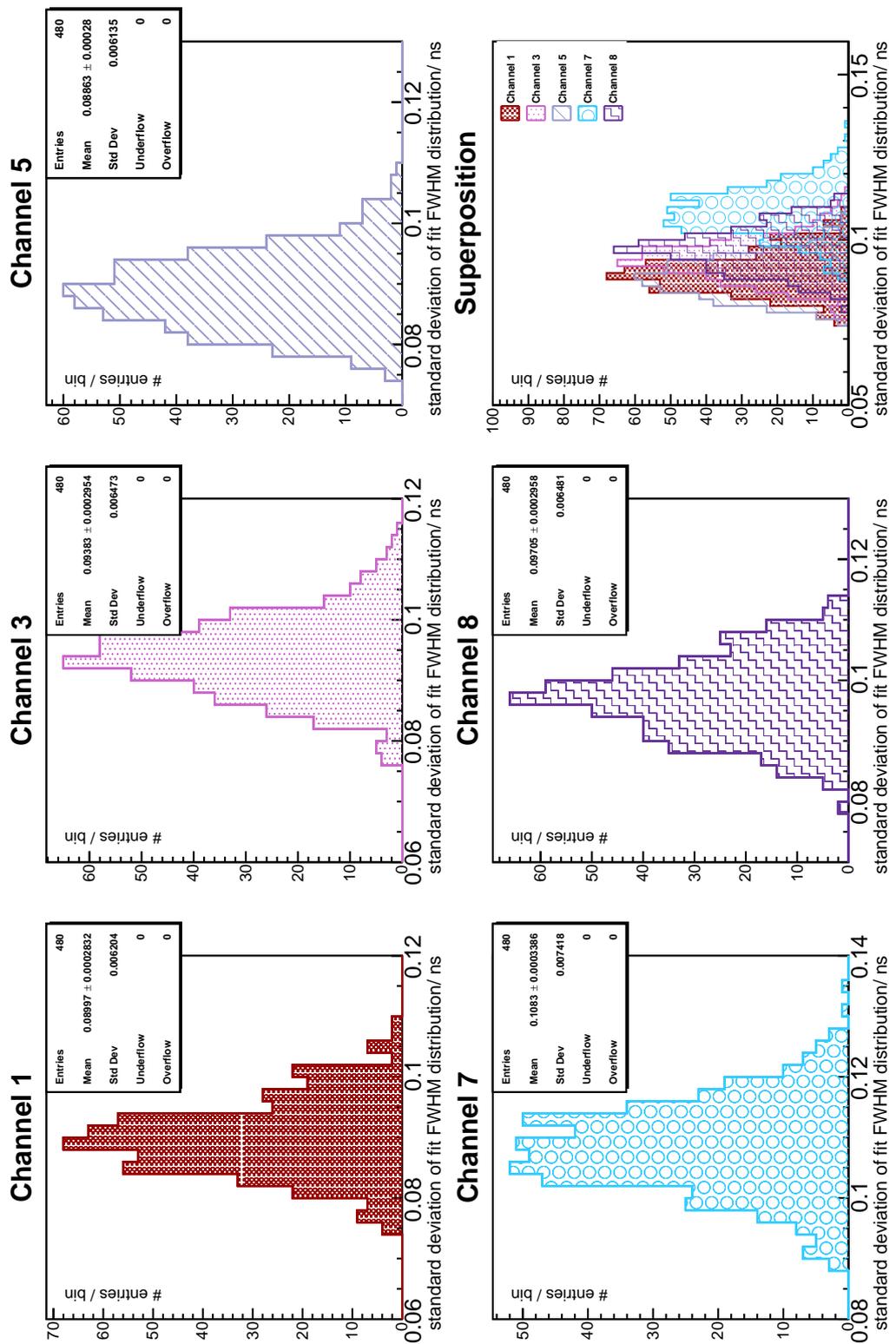


Abbildung A.36.: Standardabweichungen der FWHM-Verteilungen der 800mV200ns-Pulse des UUB-Dauertests auf den Low-Gain-Kanälen

A.3. RMS-Rauschen

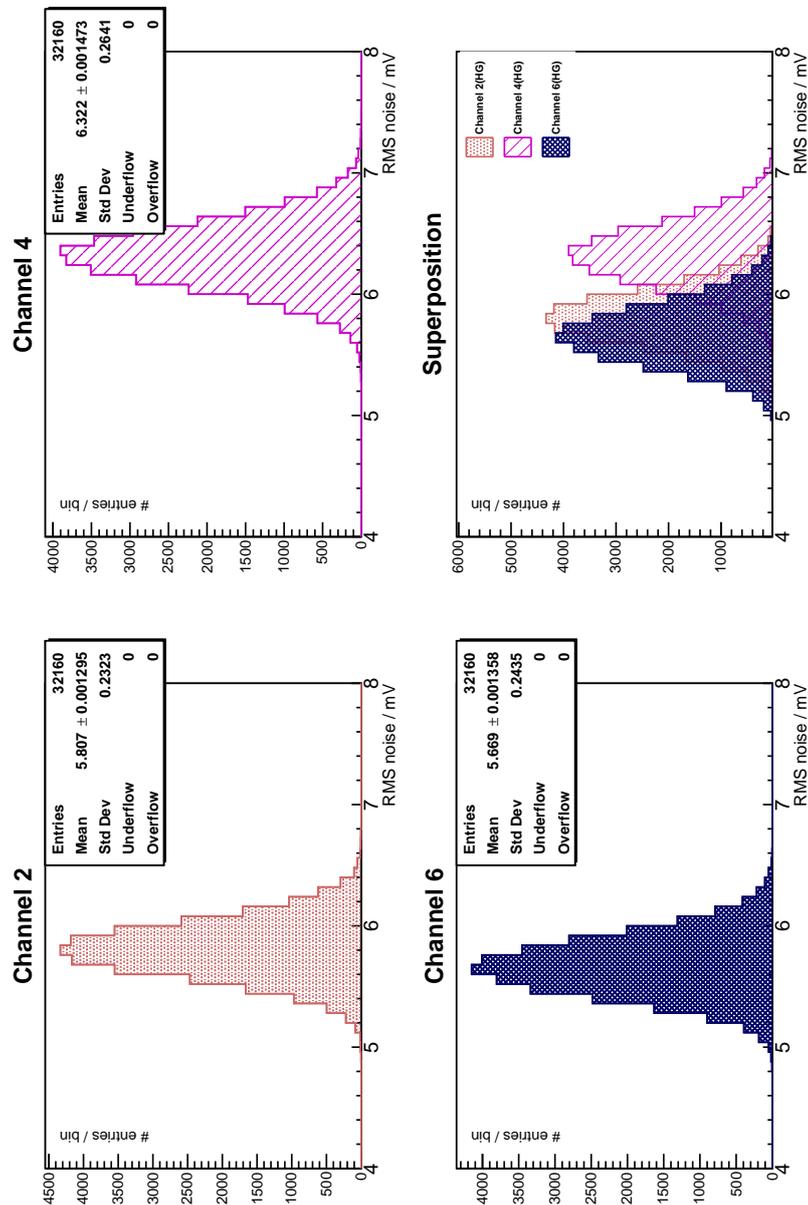


Abbildung A.37.: RMS-Rauschen aller Datenpakete eines Tests mit 50mV40ns-Pulsen auf den High-Gain-Kanälen

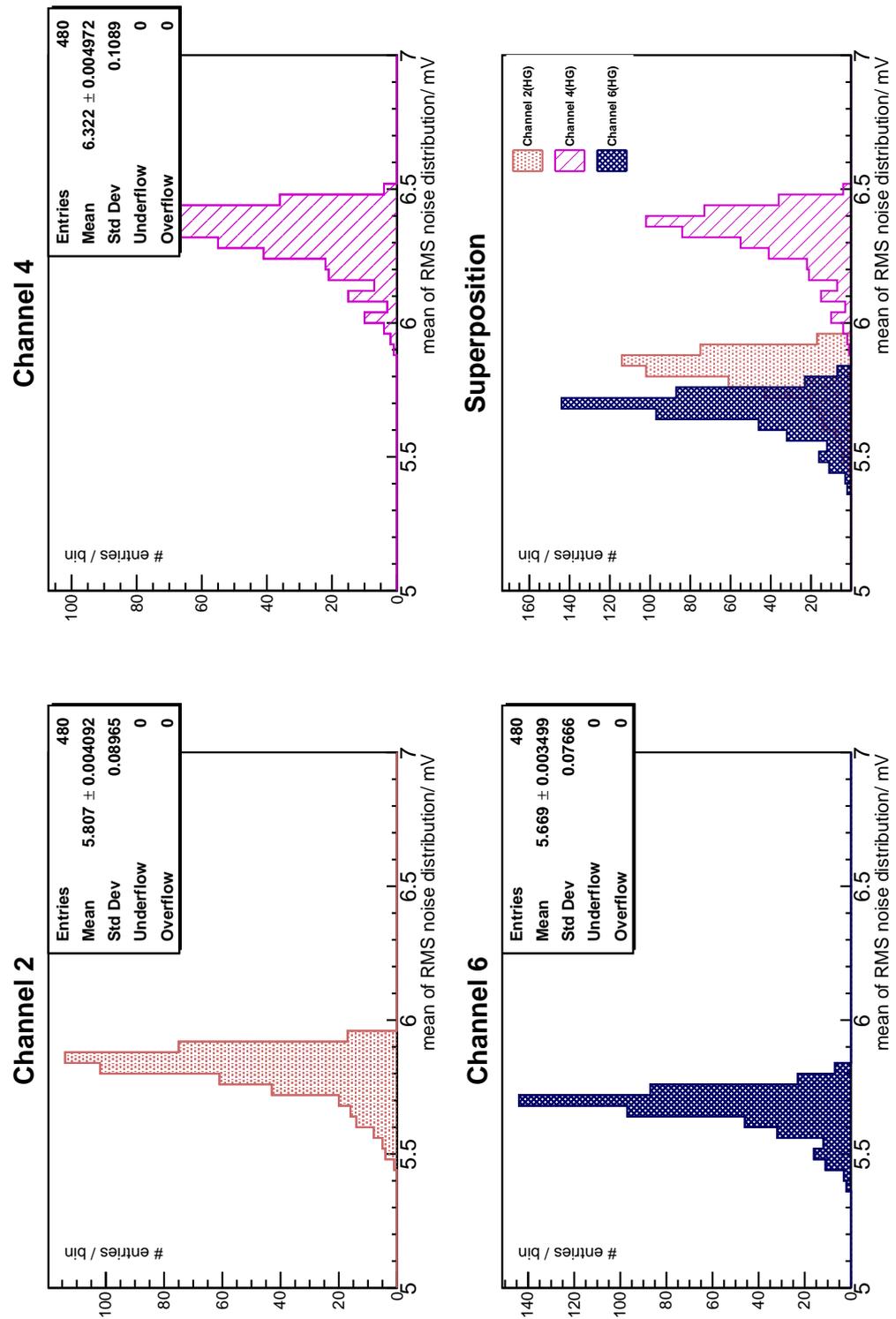


Abbildung A.38.: Mittelwerte der Verteilungen des RMS-Rauschens bei den Tests mit 50mV40ns-Pulsen auf den High-Gain-Kanälen

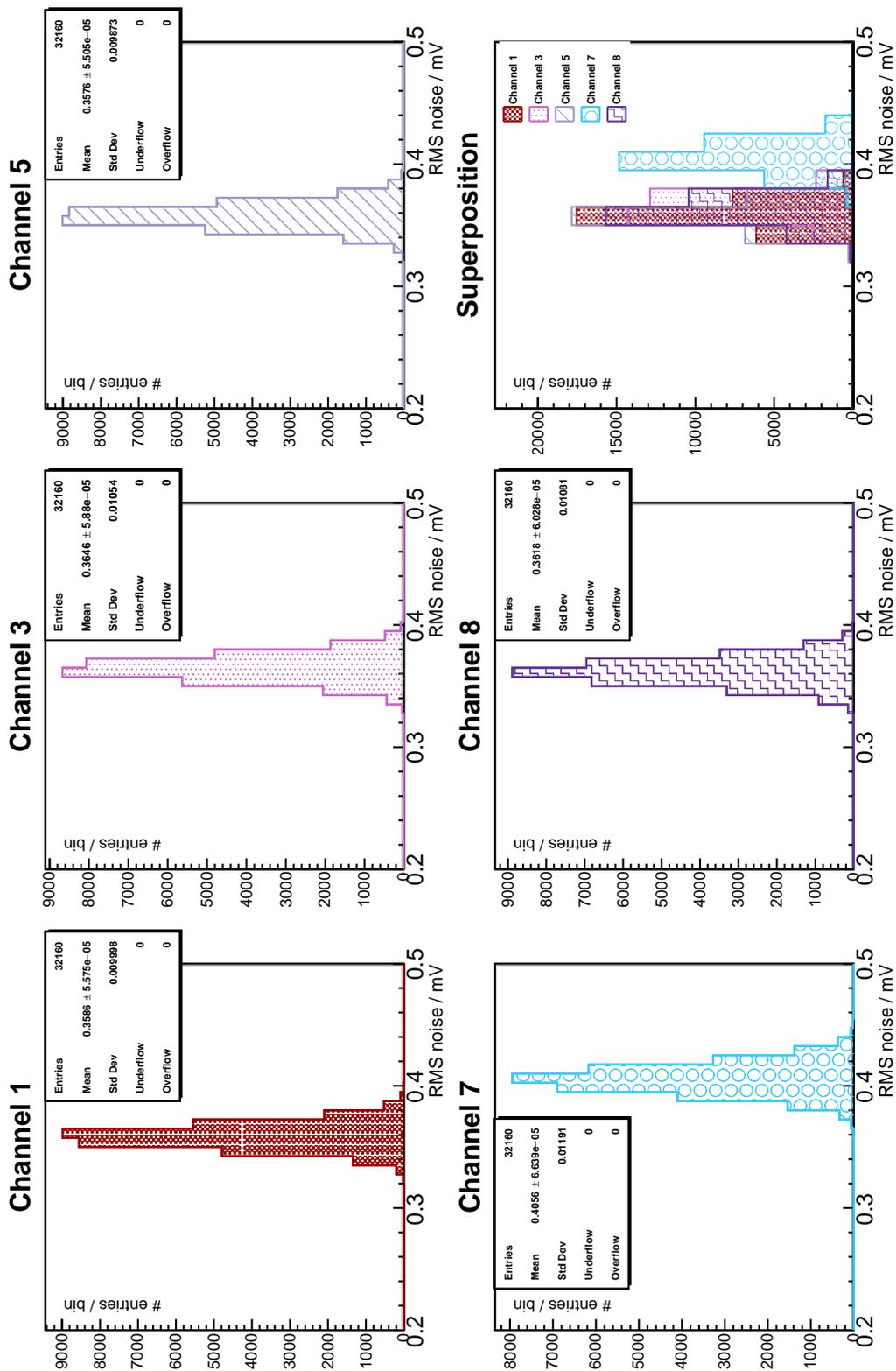


Abbildung A.39.: RMS-Rauschen aller Datenpakete eines Tests mit 50mV40ns-Pulsen auf den Low-Gain-Kanälen

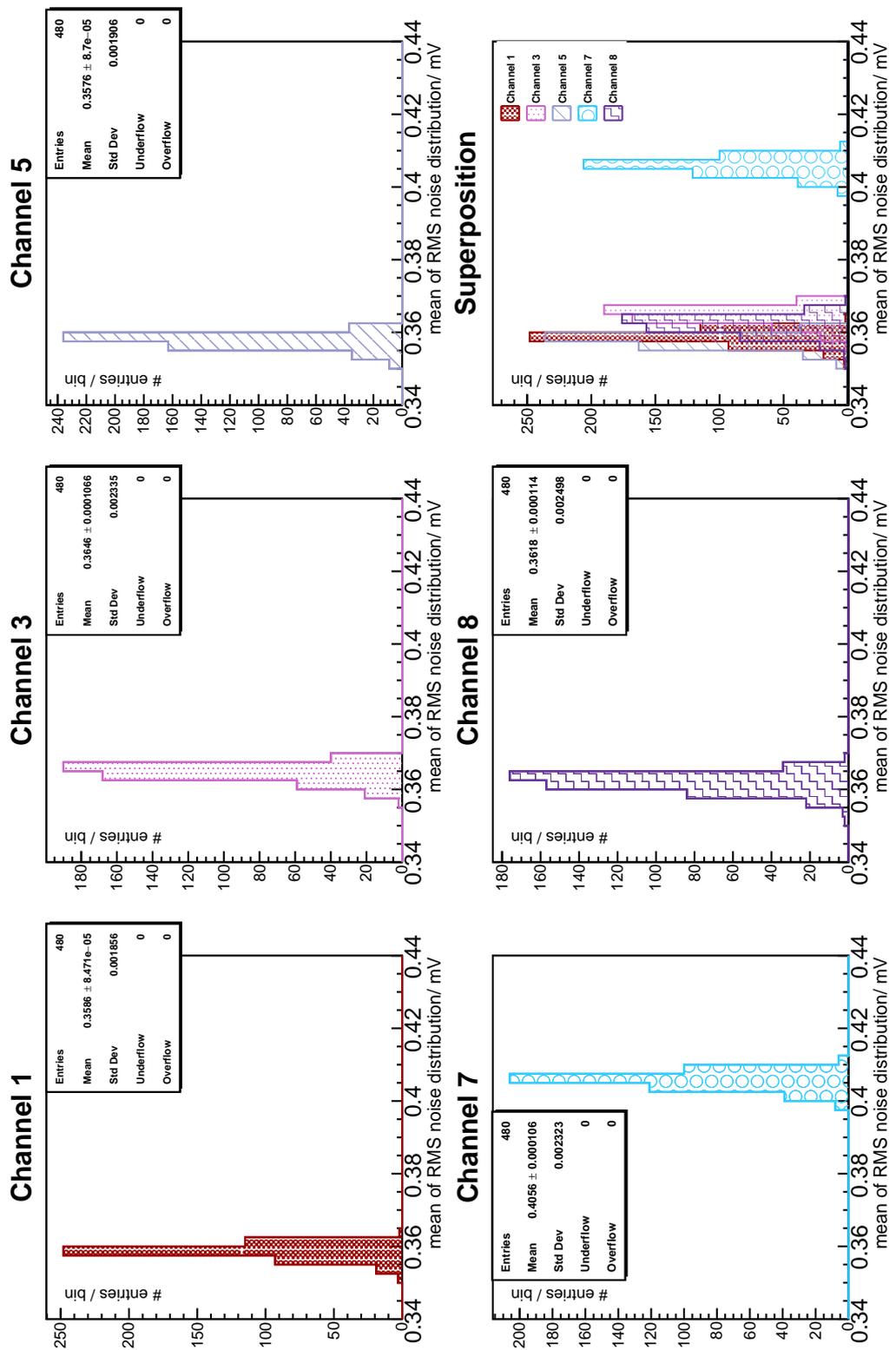


Abbildung A.40.: Mittelwerte der Verteilungen des RMS-Rauschens bei den Tests mit 50mV40ns-Pulsen auf den Low-Gain-Kanälen

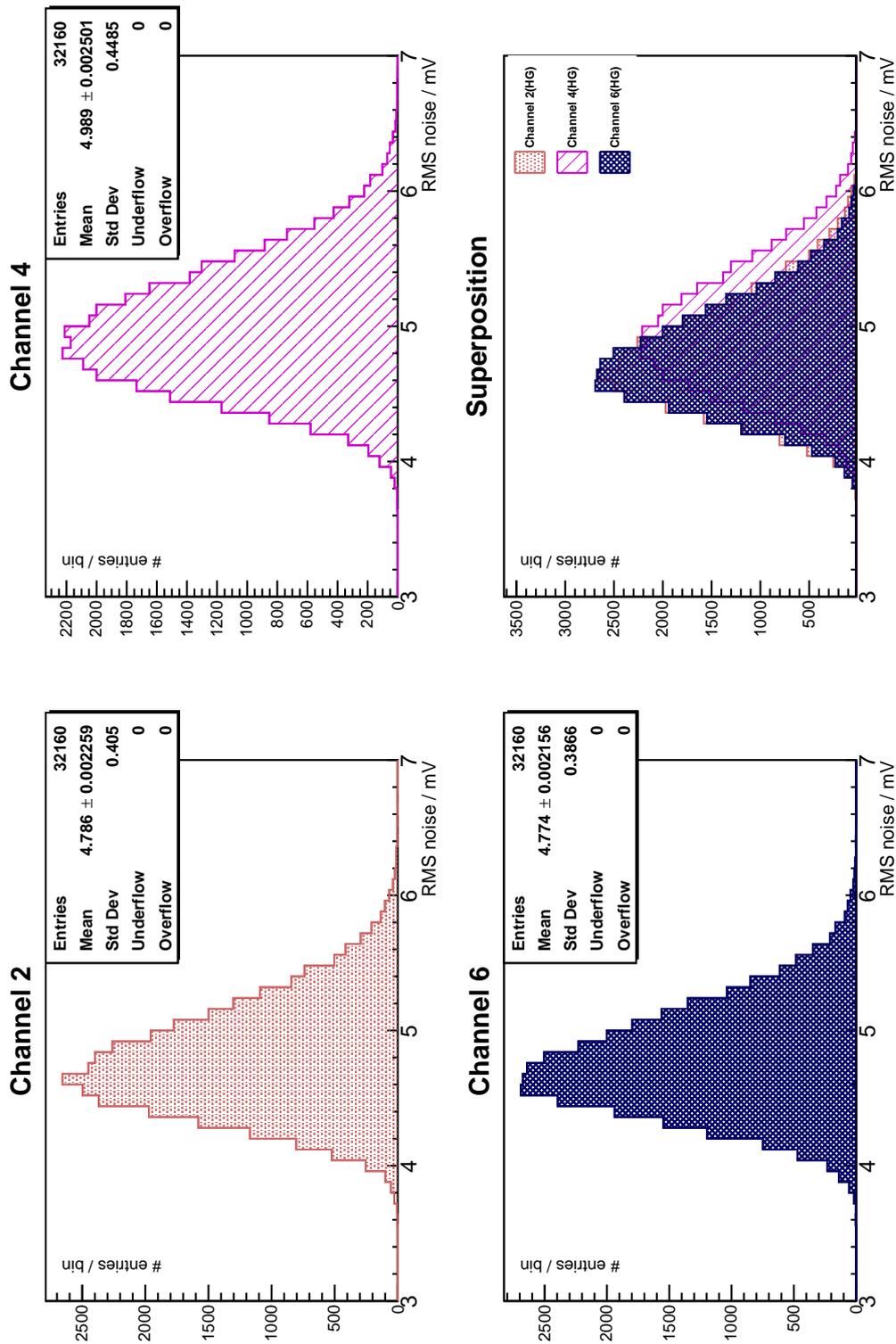


Abbildung A.41.: RMS-Rauschen aller Datenpakete eines Tests mit 50mV200ns-Pulsen auf den High-Gain-Kanälen

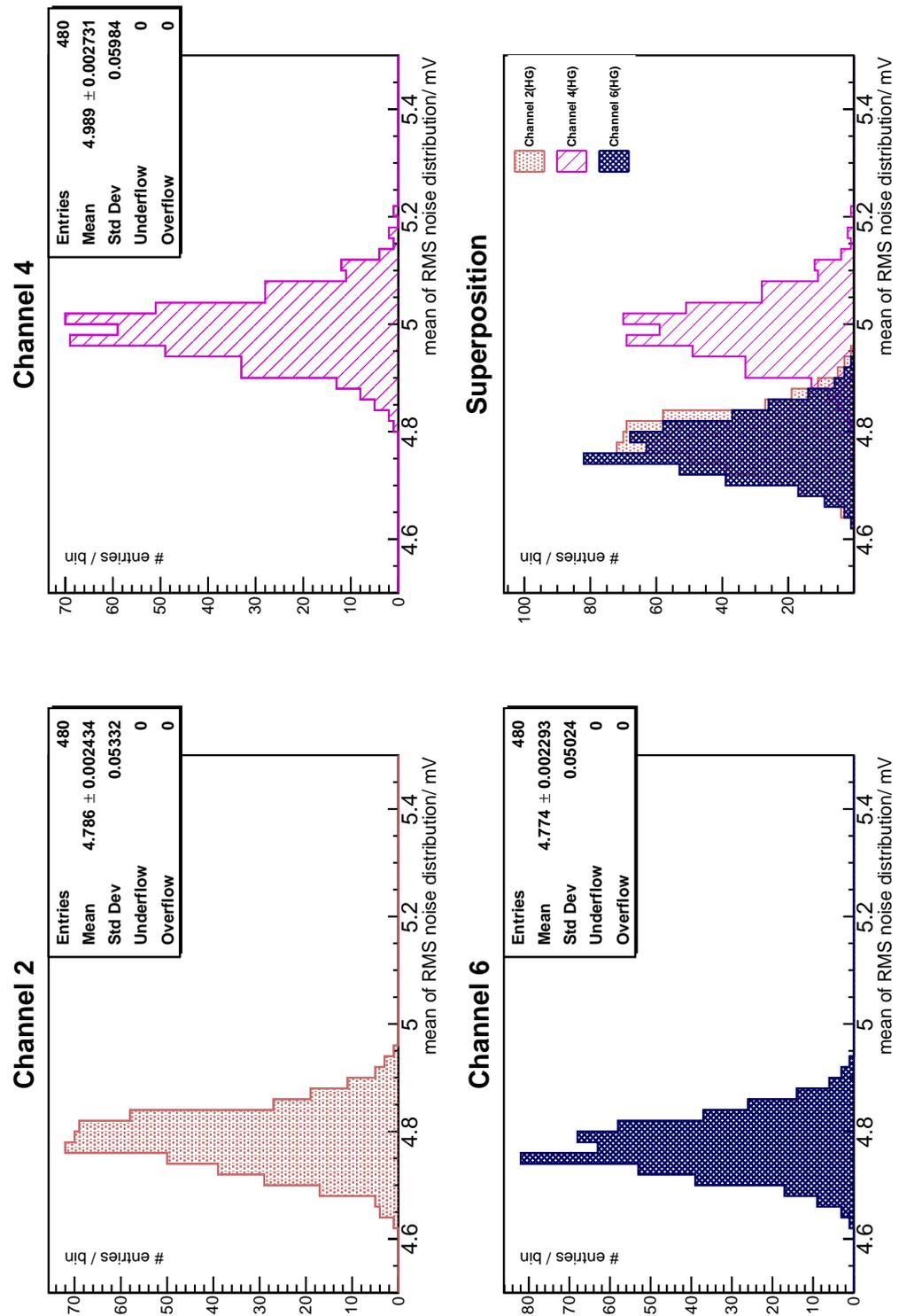


Abbildung A.42.: Mittelwerte der Verteilungen des RMS-Rauschens bei den Tests mit 50mV200ns-Pulsen auf den High-Gain-Kanälen

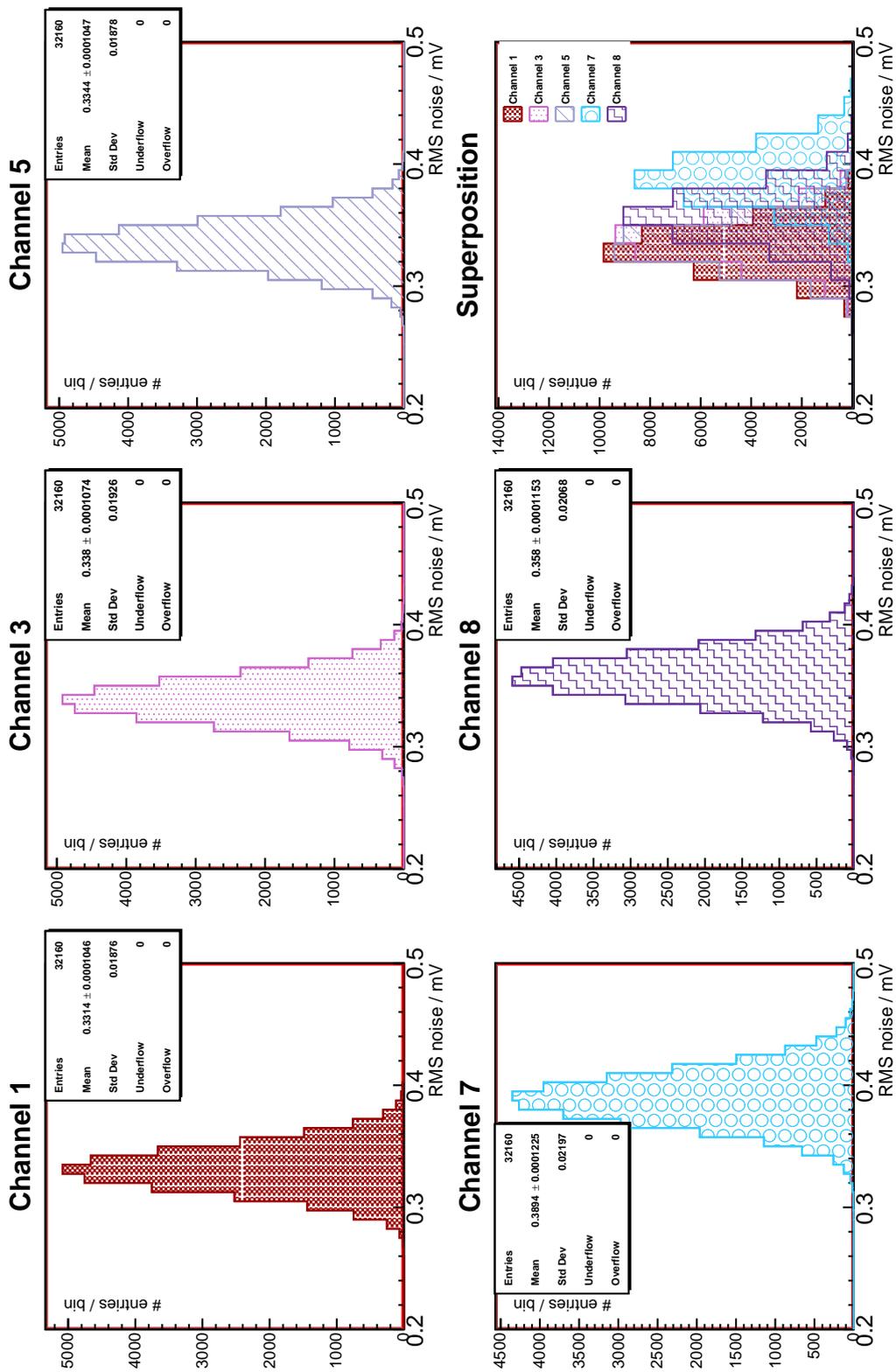


Abbildung A.43.: RMS-Rauschen aller Datenpakete eines Tests mit 50mV200ns-Pulsen auf den Low-Gain-Kanälen

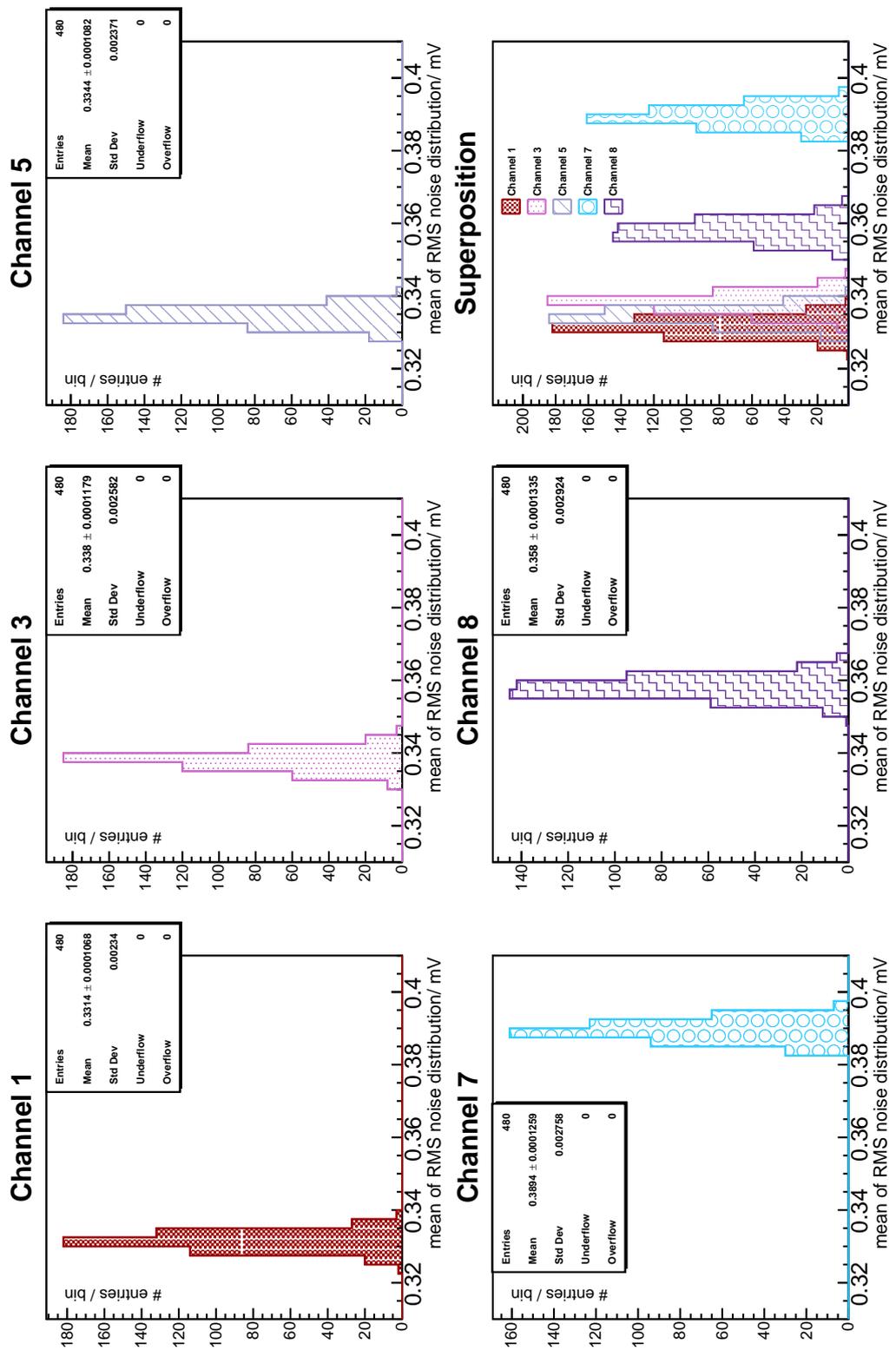


Abbildung A.44.: Mittelwerte der Verteilungen des RMS-Rauschens bei den Tests mit 50mV200ns-Pulsen auf den Low-Gain-Kanälen

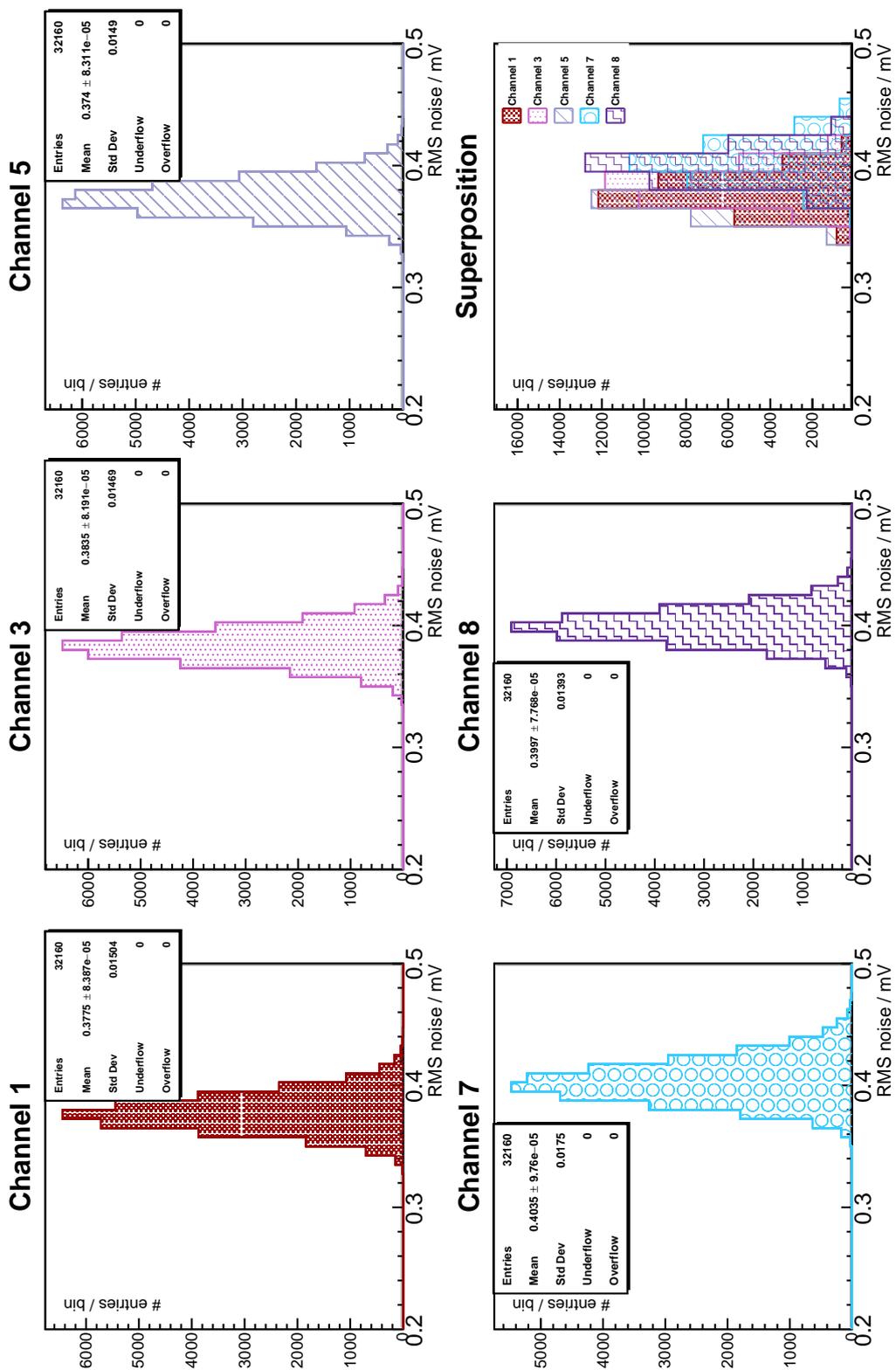


Abbildung A.45.: RMS-Rauschen aller Datenpakete eines Tests mit 800mV40ns-Pulsen auf den Low-Gain-Kanälen

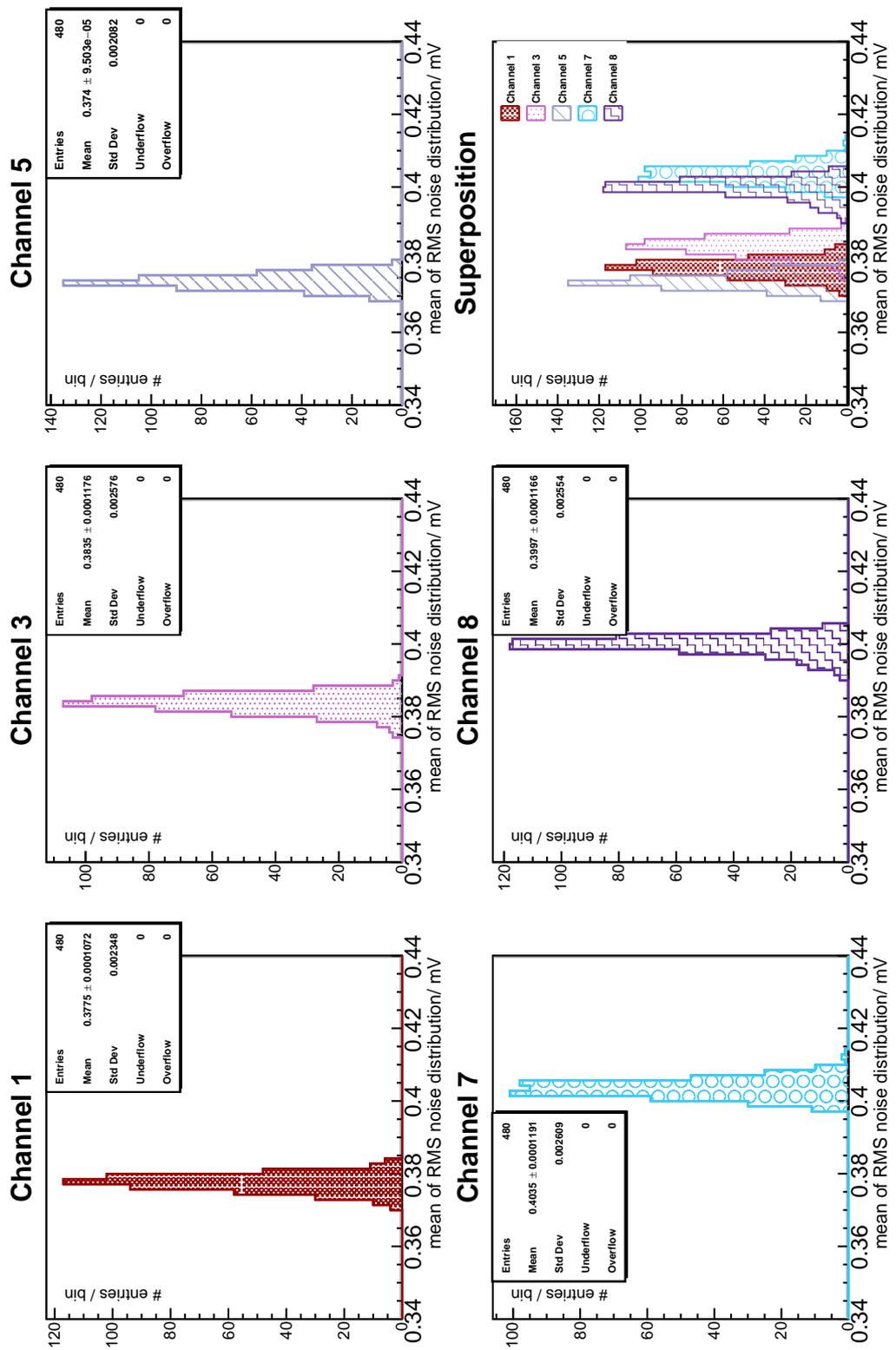


Abbildung A.46.: Mittelwerte der Verteilungen des RMS-Rauschens bei den Tests mit 800mV40ns-Pulsen auf den Low-Gain-Kanälen

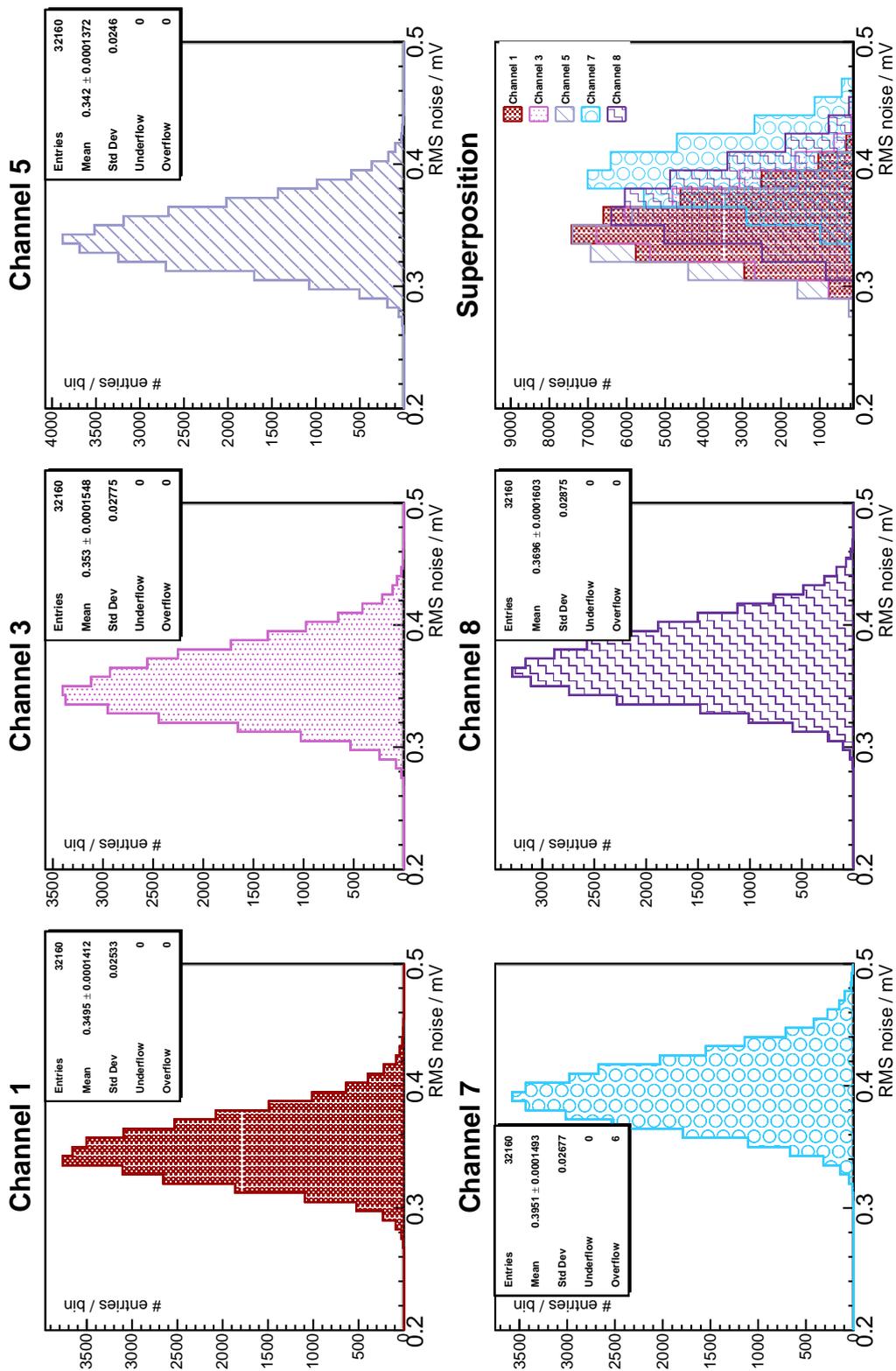


Abbildung A.47.: RMS-Rauschen aller Datenpakete eines Tests mit 800mV200ns-Pulsen auf den Low-Gain-Kanälen

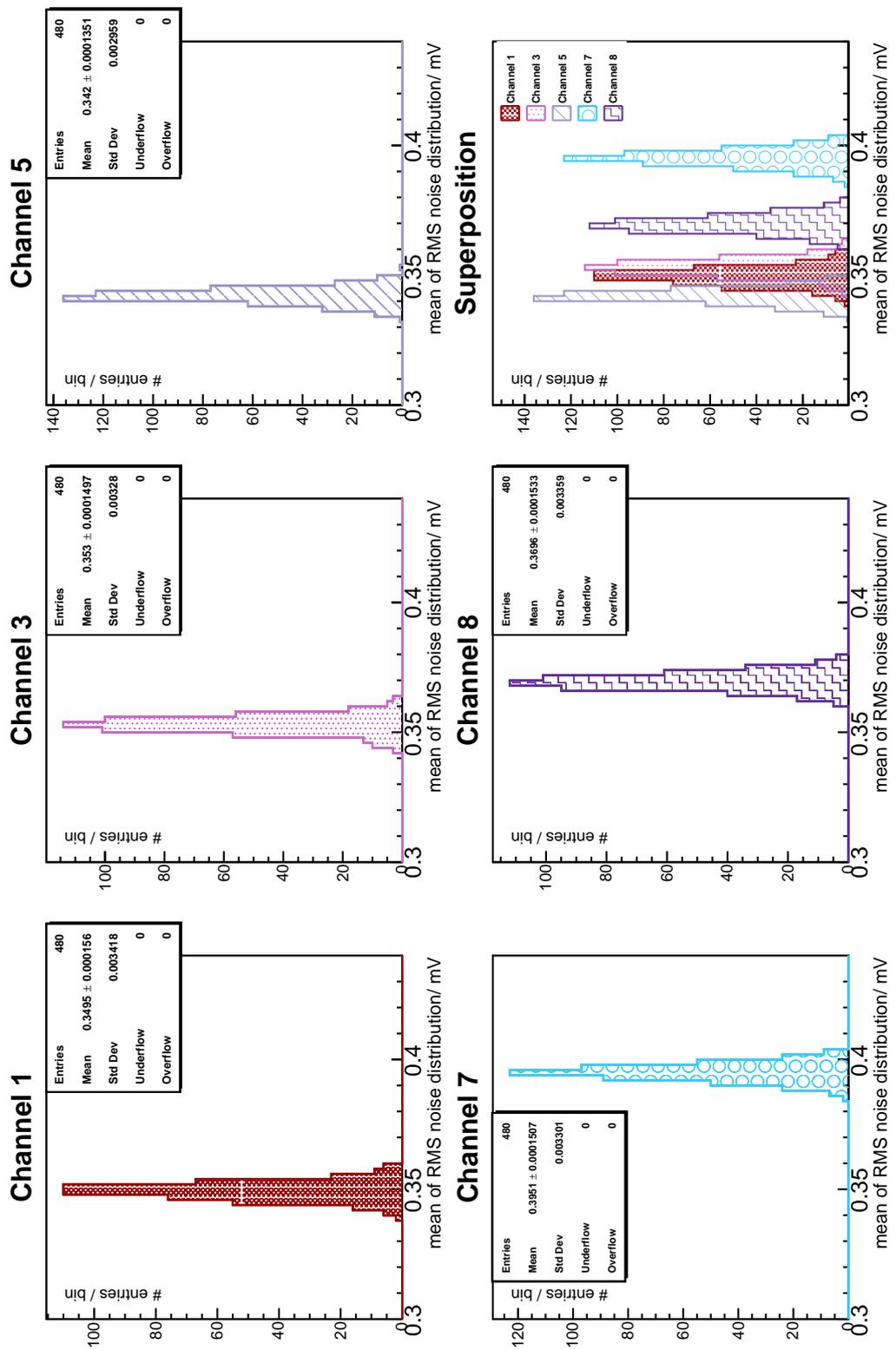


Abbildung A.48.: Mittelwerte der Verteilungen des RMS-Rauschens bei den Tests mit 800mV200ns-Pulsen auf den Low-Gain-Kanälen

A.4. Peak to Peak-Rauschen

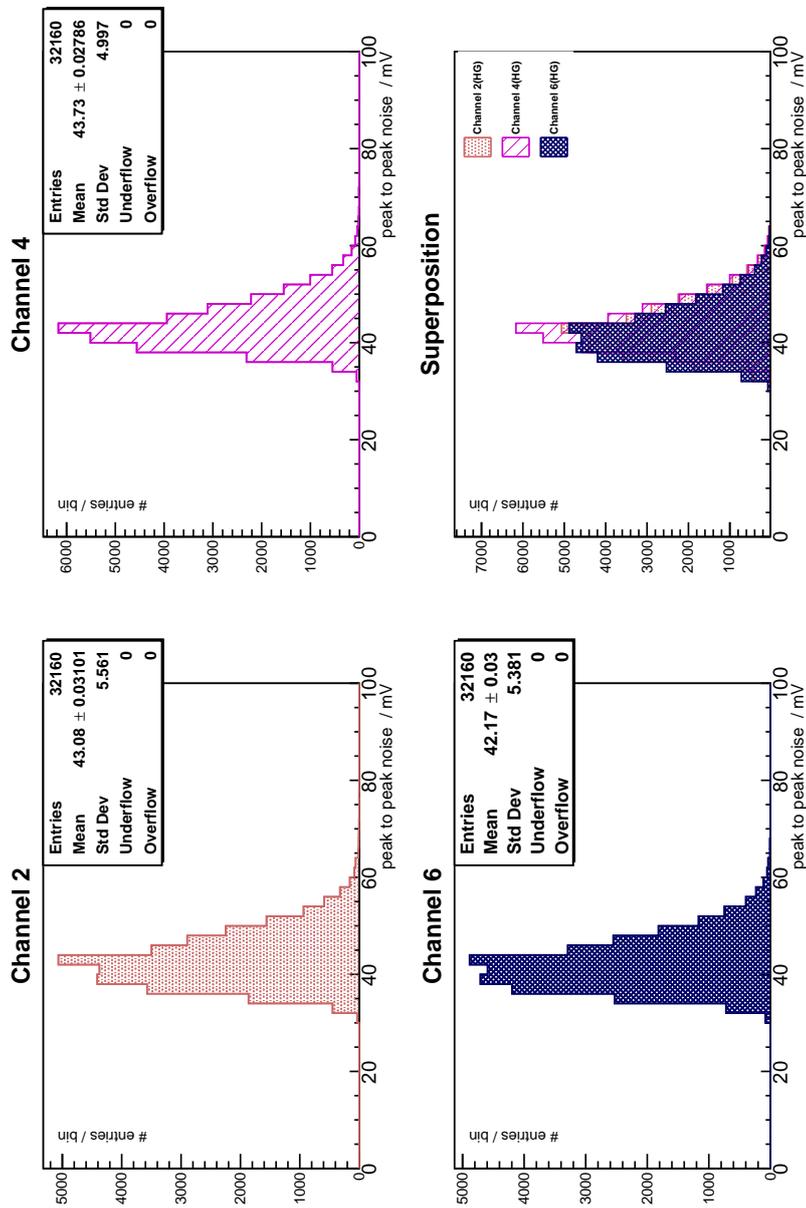


Abbildung A.49.: Peak to Peak-Rauschen aller Datenpakete eines Tests mit 50mV40ns-Pulsen auf den High-Gain-Kanälen

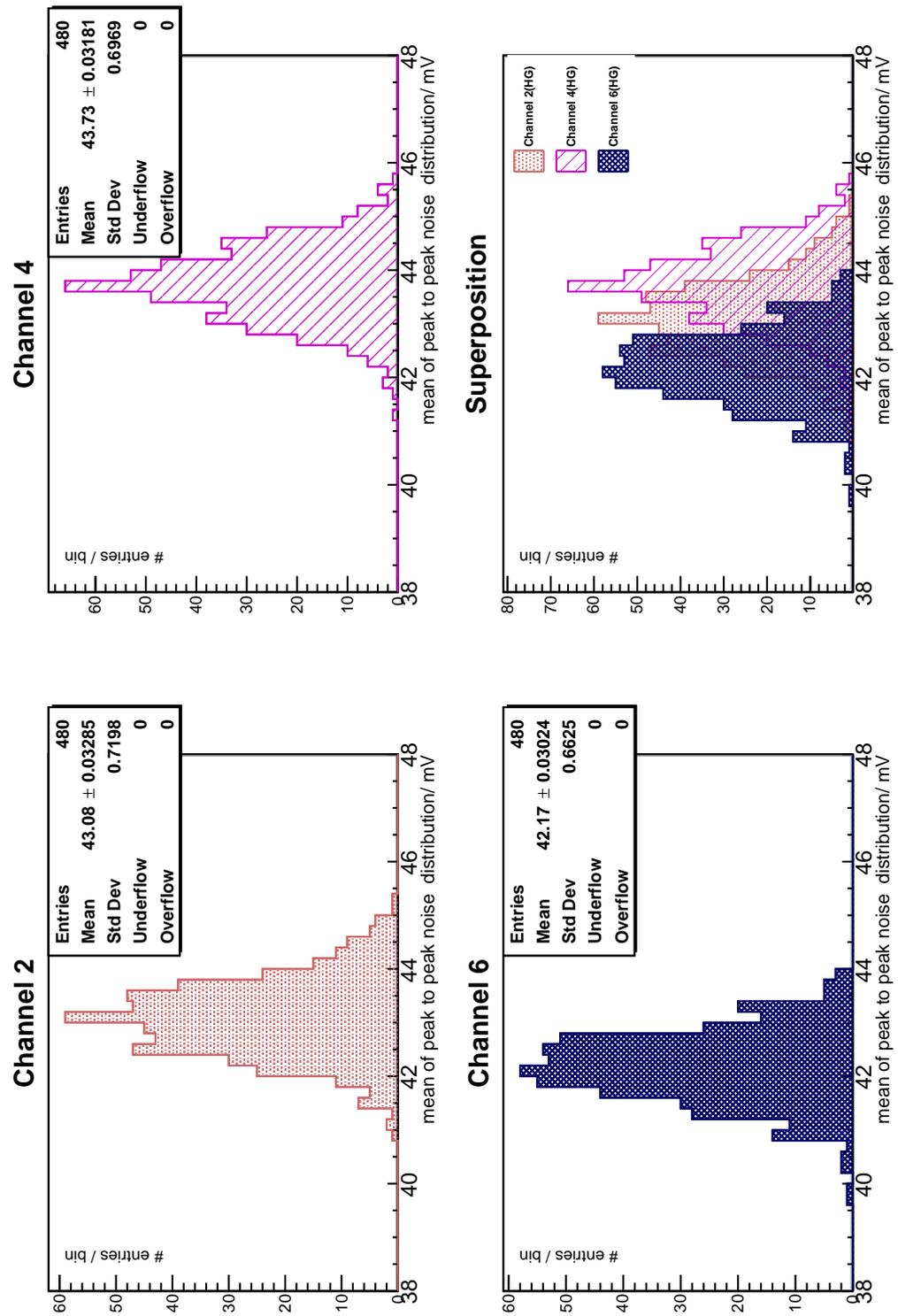


Abbildung A.50.: Mittelwerte der Verteilungen des Peak to Peak-Rauschens bei den Tests mit 50mV40ns-Pulsen auf den High-Gain-Kanälen

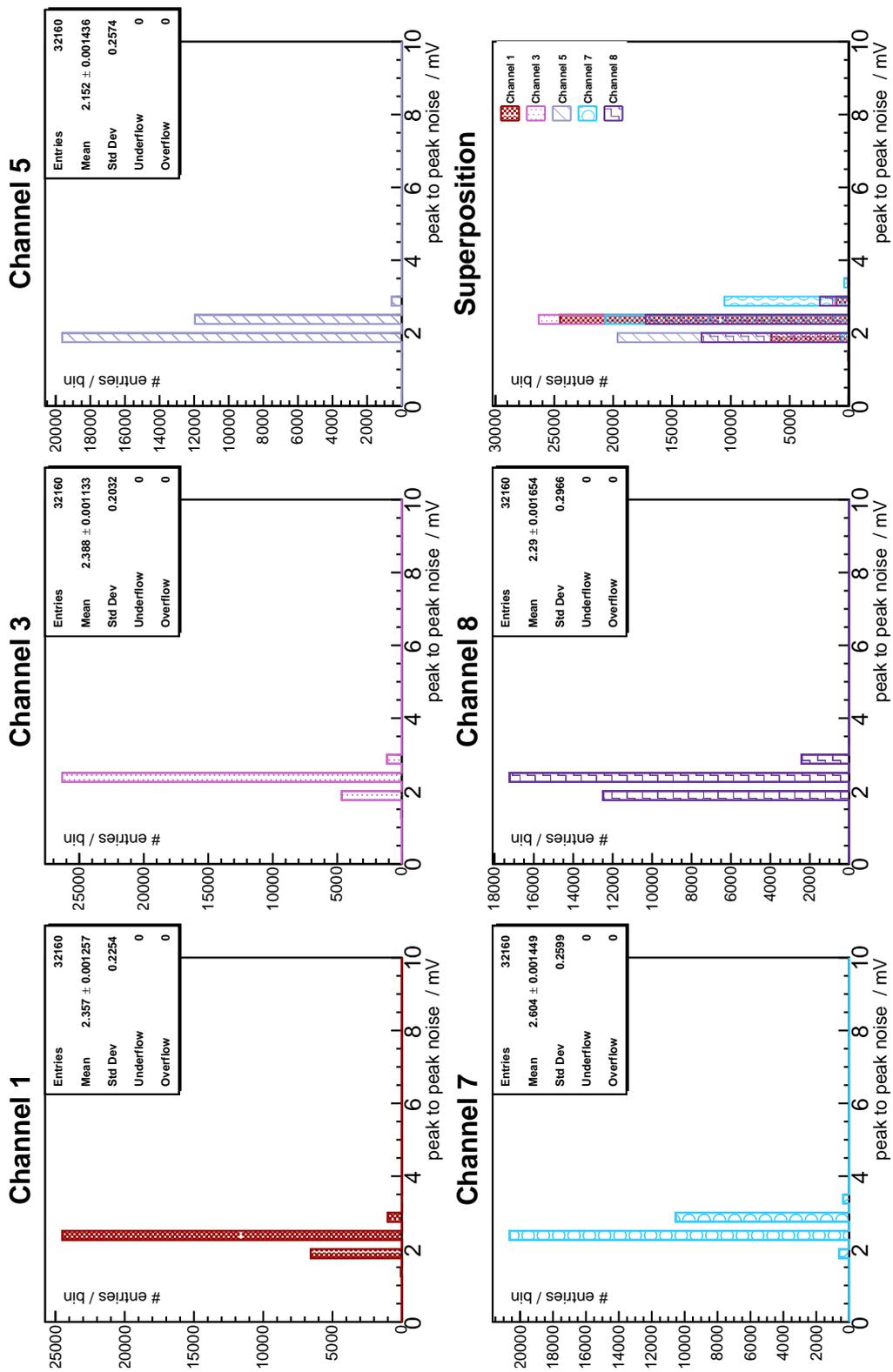


Abbildung A.51.: Peak to Peak-Rauschen aller Datenpakete eines Tests mit 50mV40ns-Pulsen auf den Low-Gain-Kanälen

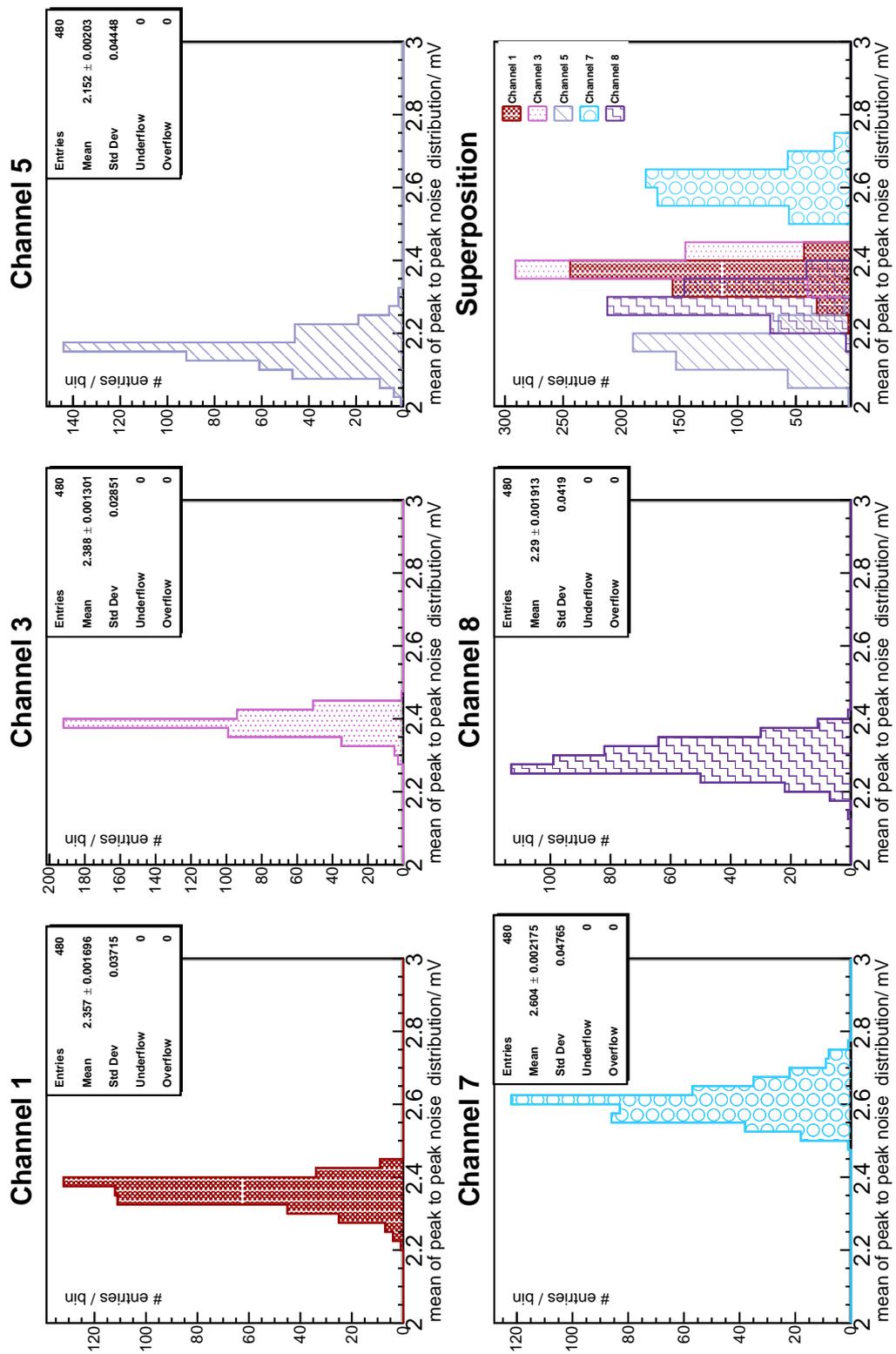


Abbildung A.52.: Mittelwerte der Verteilungen des Peak to Peak-Rauschens bei den Tests mit 50mV40ns-Pulsen auf den Low-Gain-Kanälen

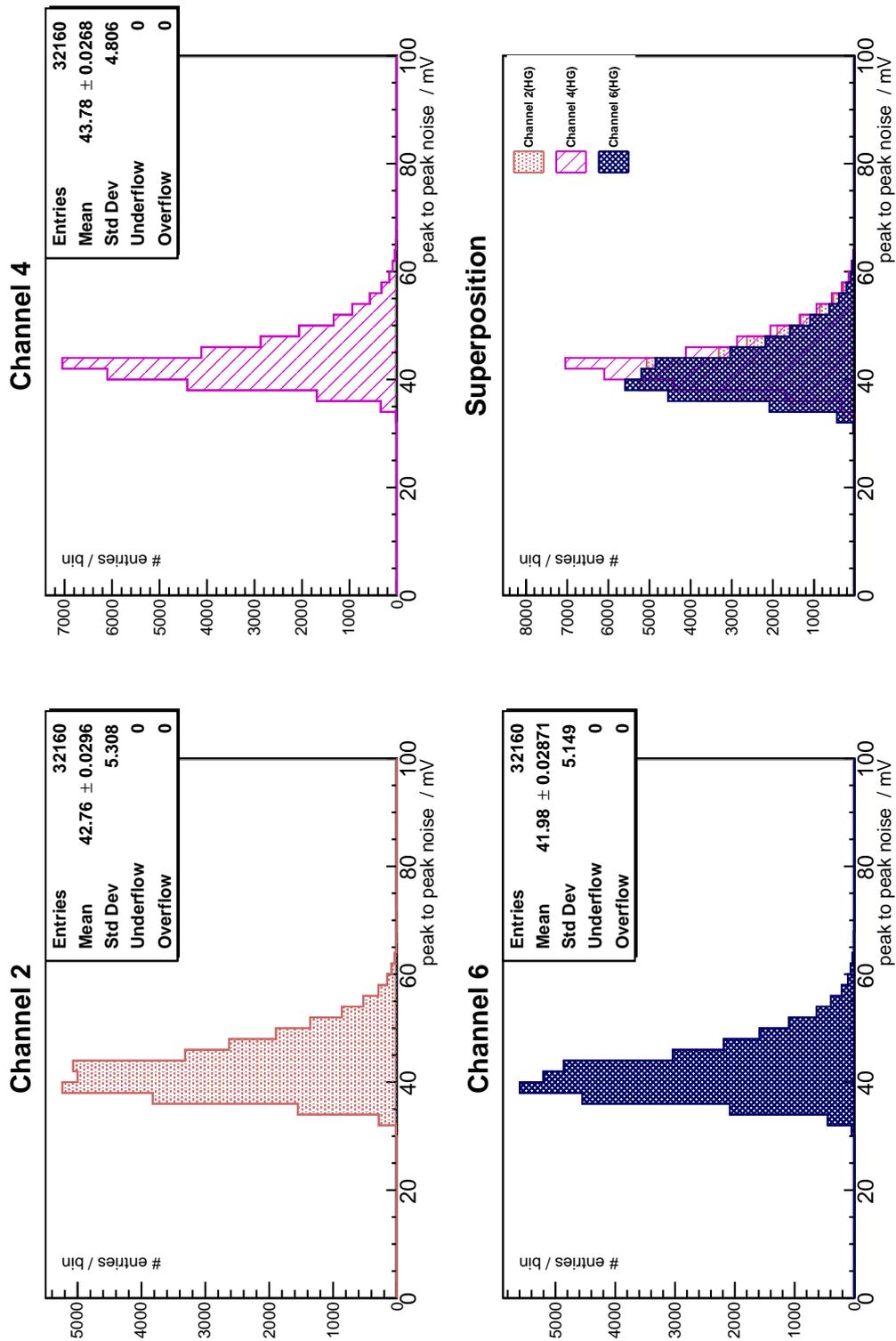


Abbildung A.53.: Peak to Peak-Rauschen aller Datenpakete eines Tests mit 50mV200ns-Pulsen auf den High-Gain-Kanälen

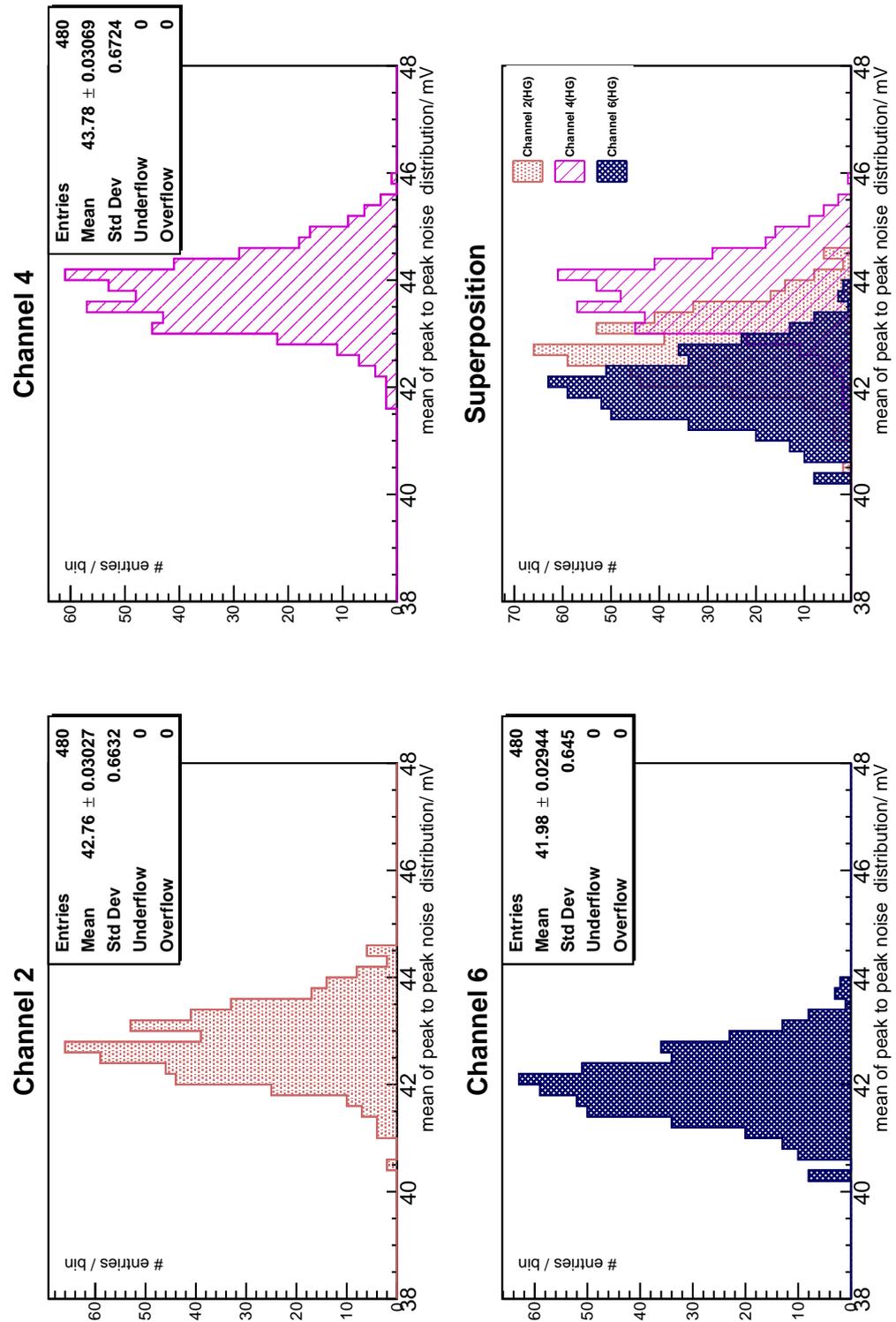


Abbildung A.54.: Mittelwerte der Verteilungen des Peak to Peak-Rauschens bei den Tests mit 50mV200ns-Pulsen auf den High-Gain-Kanälen

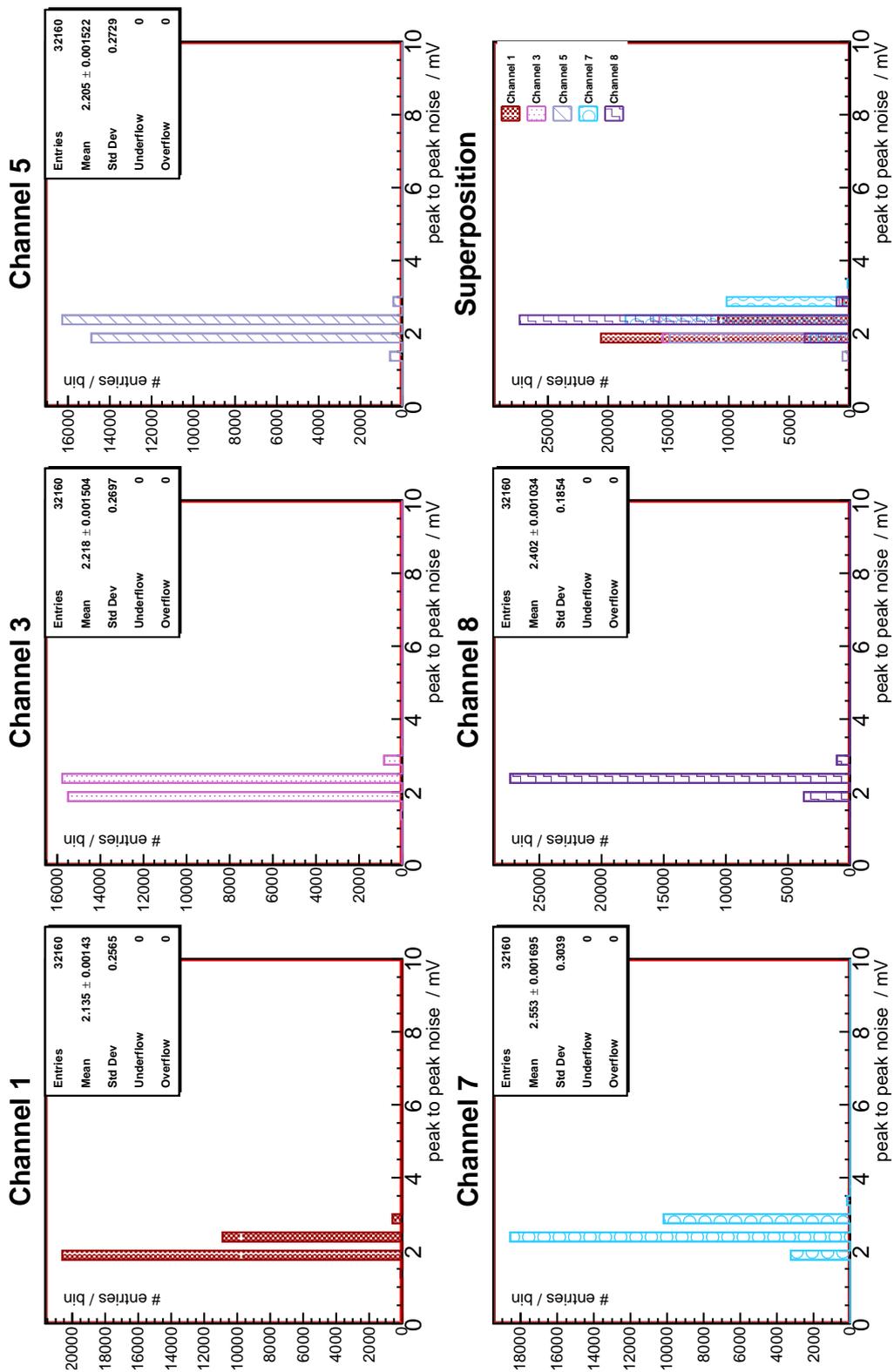


Abbildung A.55.: Peak to Peak-Rauschen aller Datenpakete eines Tests mit 50mV200ns-Pulsen auf den Low-Gain-Kanälen

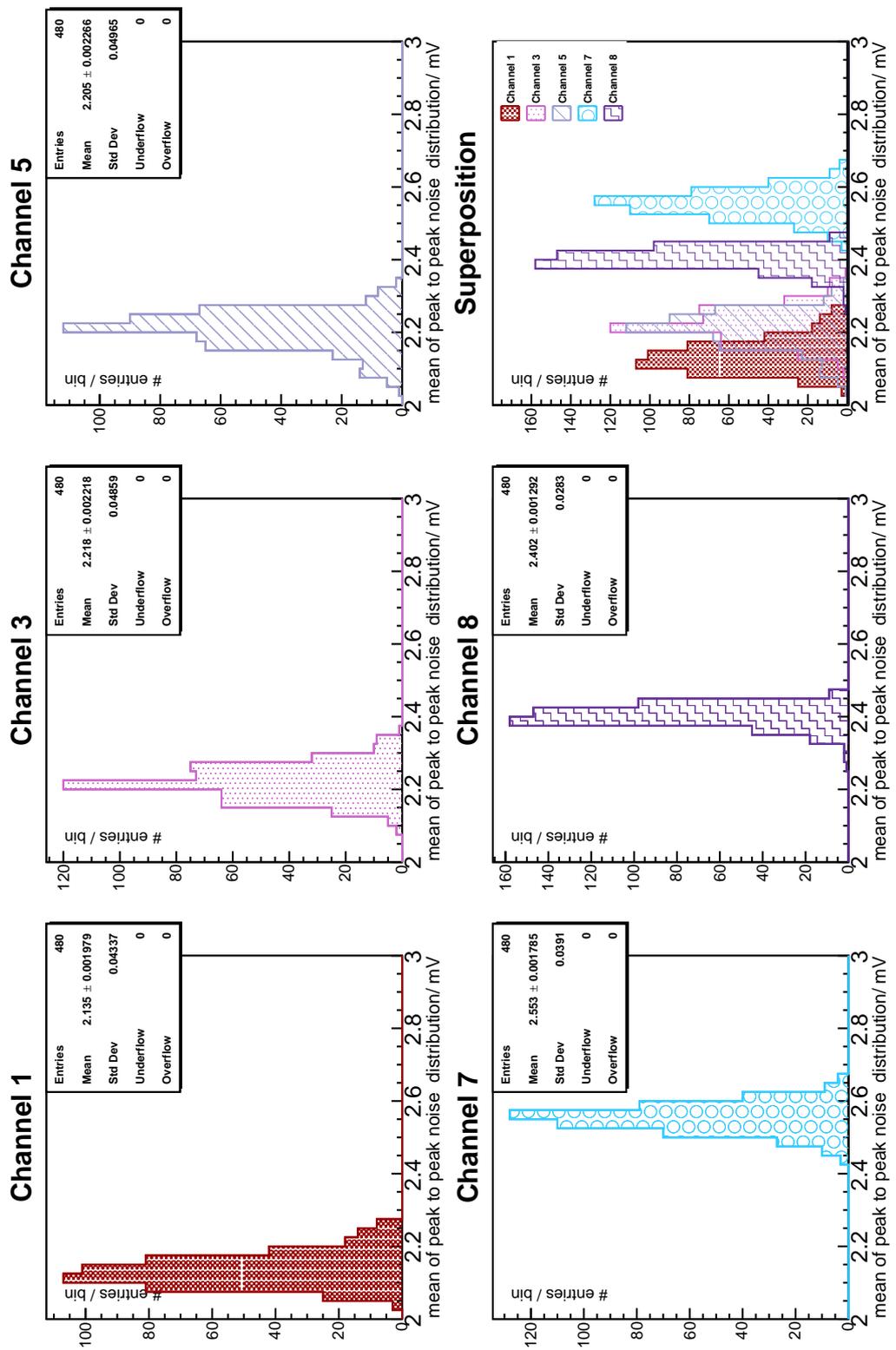


Abbildung A.56.: Mittelwerte der Verteilungen des Peak to Peak-Rauschens bei den Tests mit 50mV200ns-Pulsen auf den Low-Gain-Kanälen

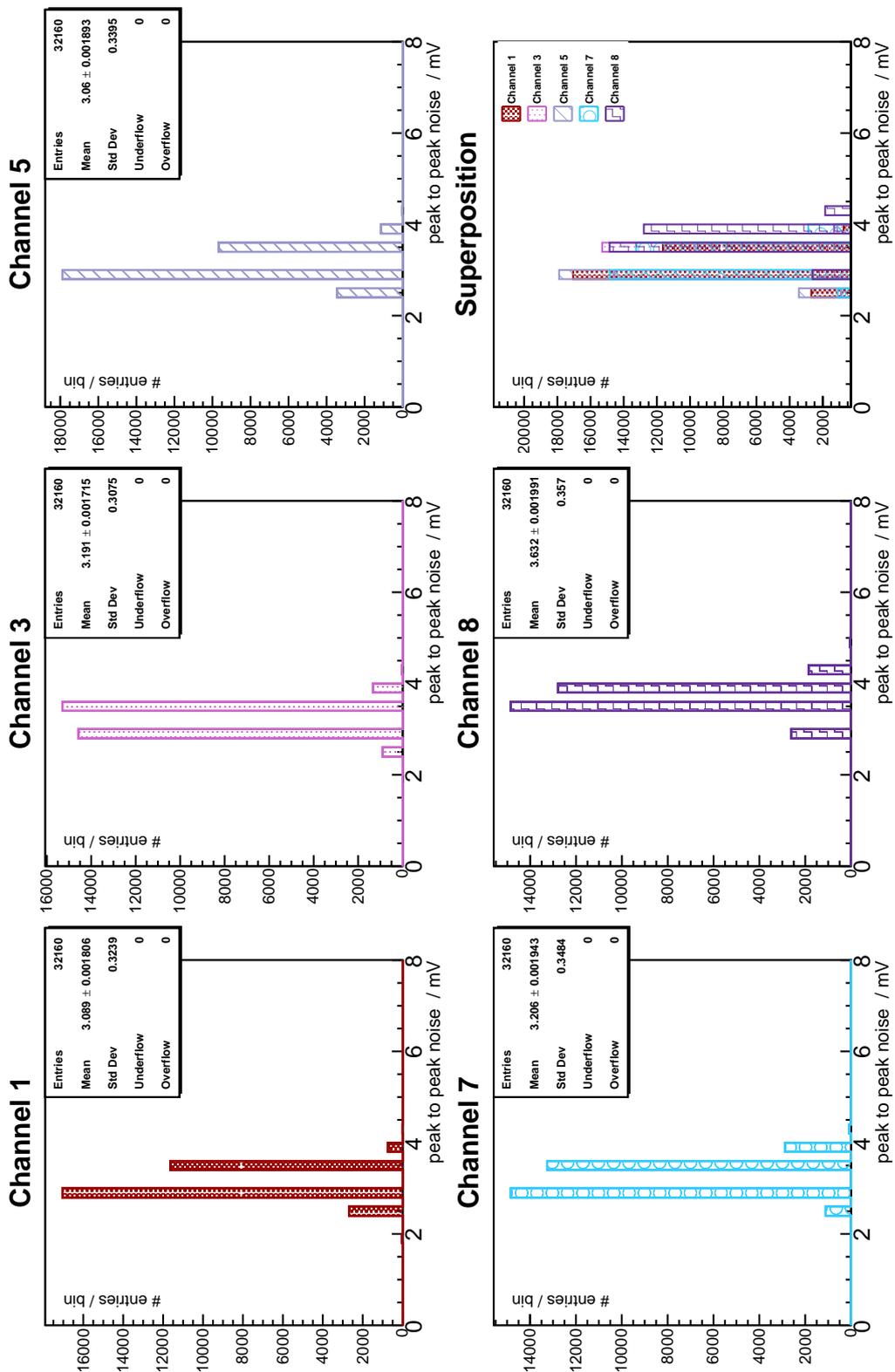


Abbildung A.57.: Peak to Peak-Rauschen aller Datenpakete eines Tests mit 800mV40ns-Pulsen auf den Low-Gain-Kanälen

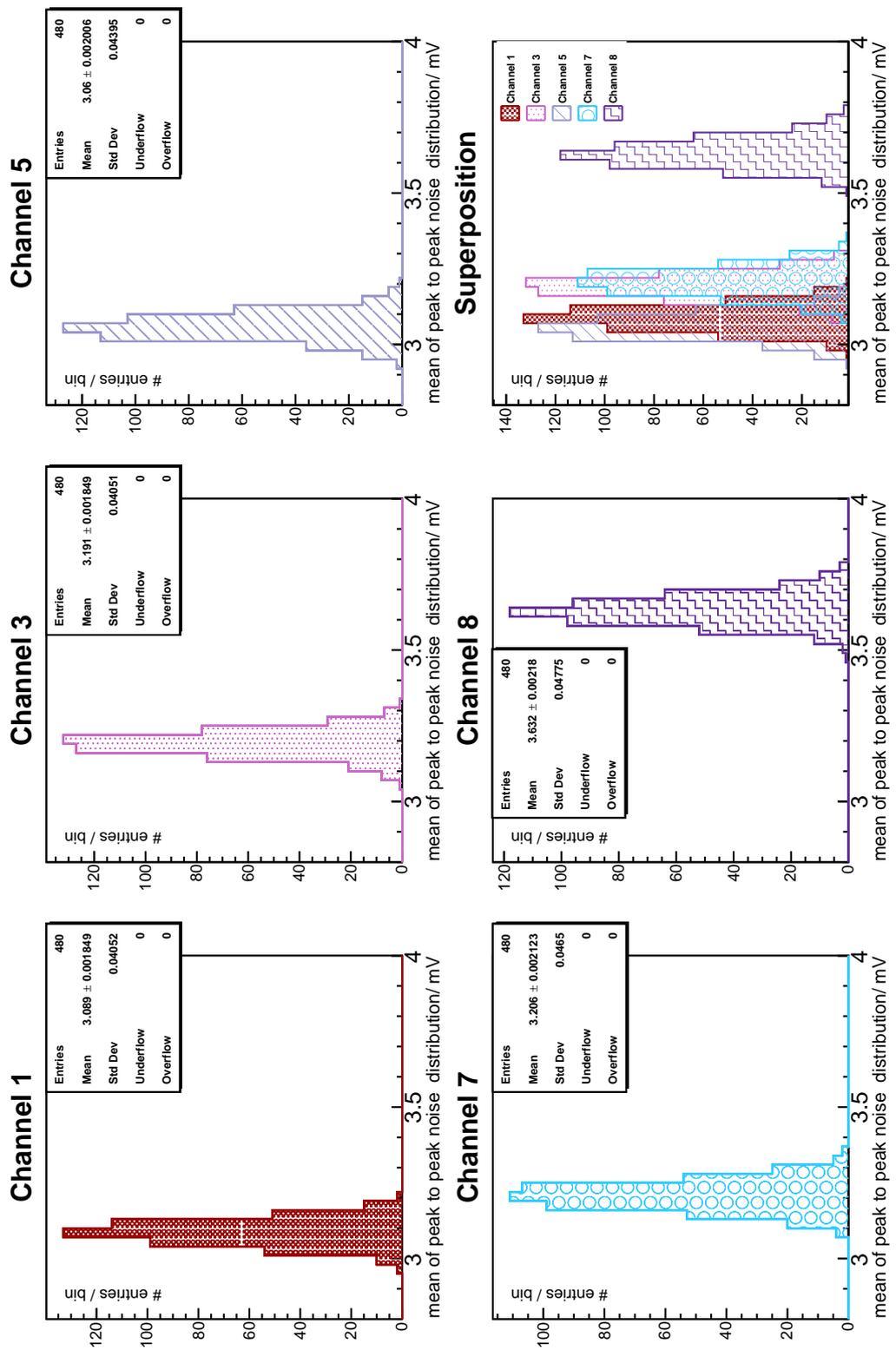


Abbildung A.58.: Mittelwerte der Verteilungen des Peak to Peak-Rauschens bei den Tests mit 800mV40ns-Pulsen auf den Low-Gain-Kanälen

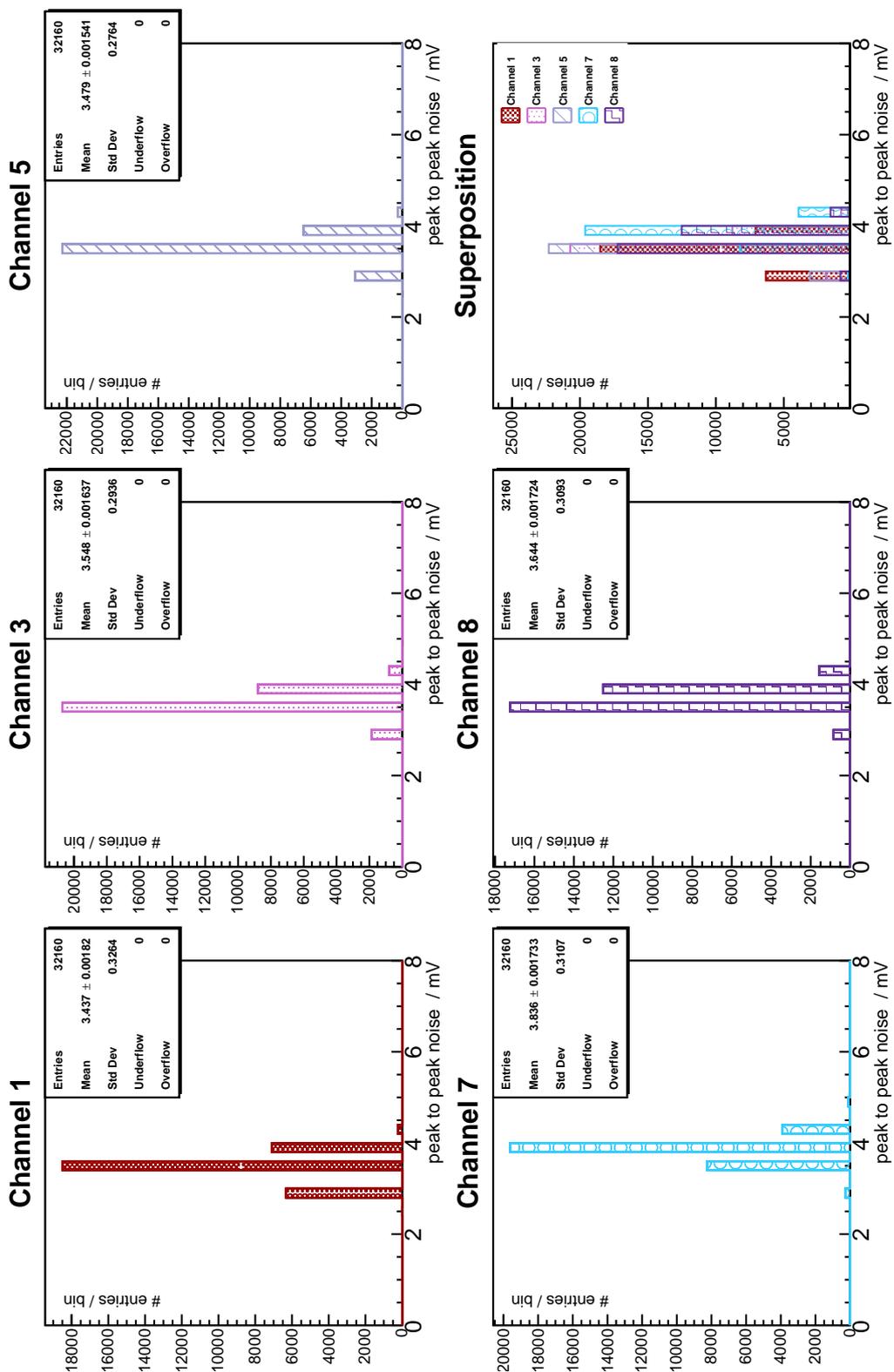


Abbildung A.59.: Peak to Peak-Rauschen aller Datenpakete eines Tests mit 800mV200ns-Pulsen auf den Low-Gain-Kanälen

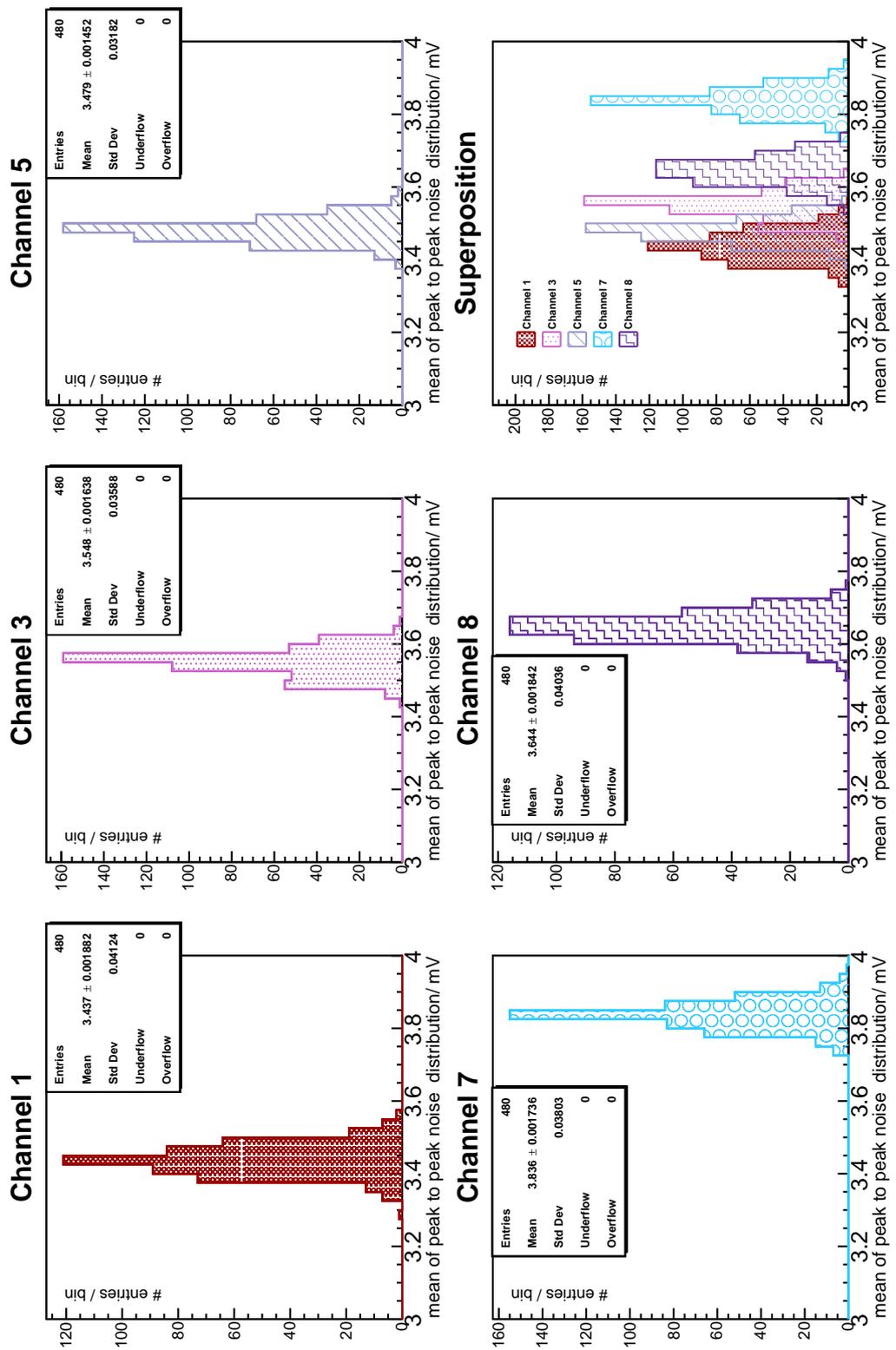


Abbildung A.60.: Mittelwerte der Verteilungen des Peak to Peak-Rauschens bei den Tests mit 800mV200ns-Pulsen auf den Low-Gain-Kanälen

A.5. Pedestal

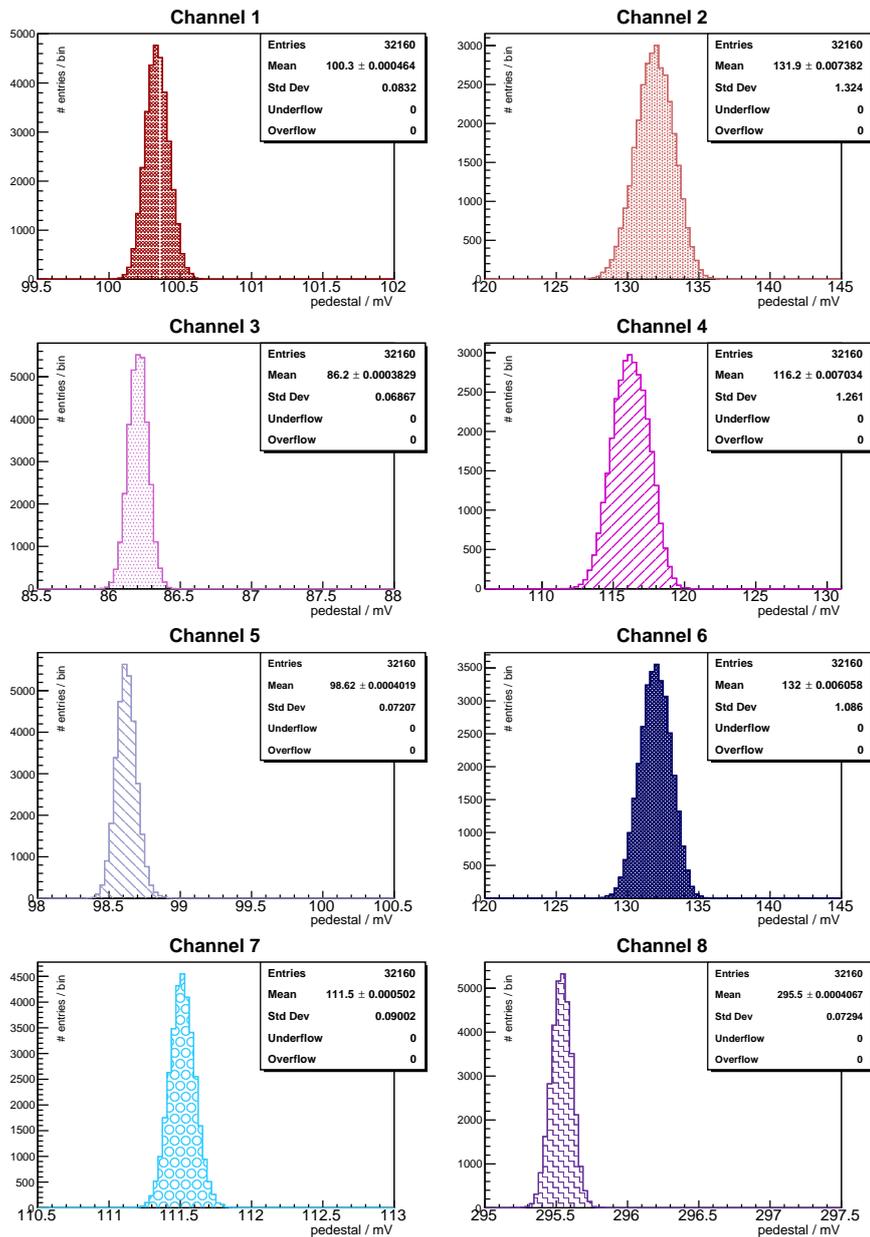


Abbildung A.61.: Pedestal aller 50mV40ns-Pulse des Dauertests

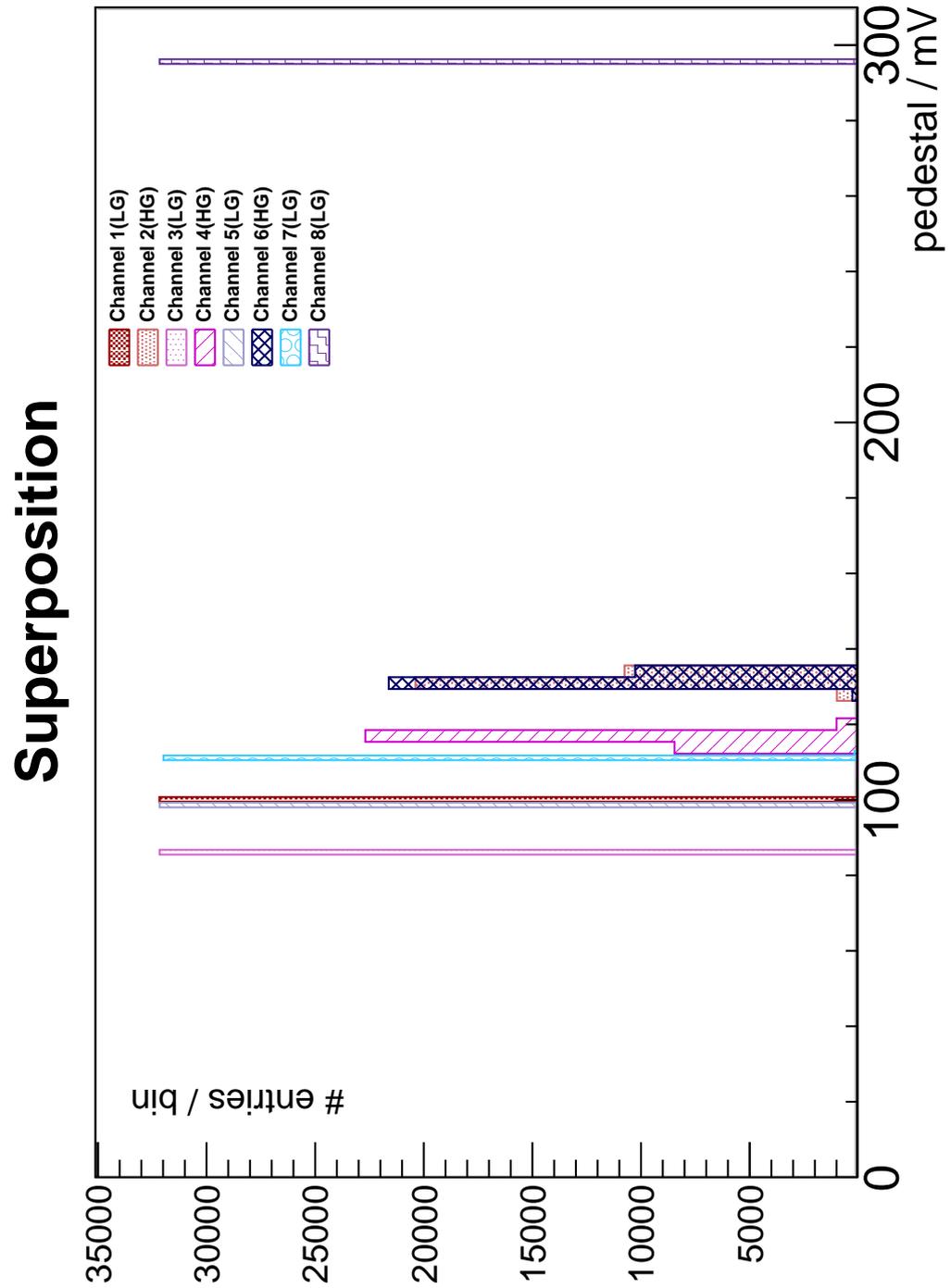


Abbildung A.62.: Überlagerung des Pedestals aller 50mV40ns-Pulse des Dauertests

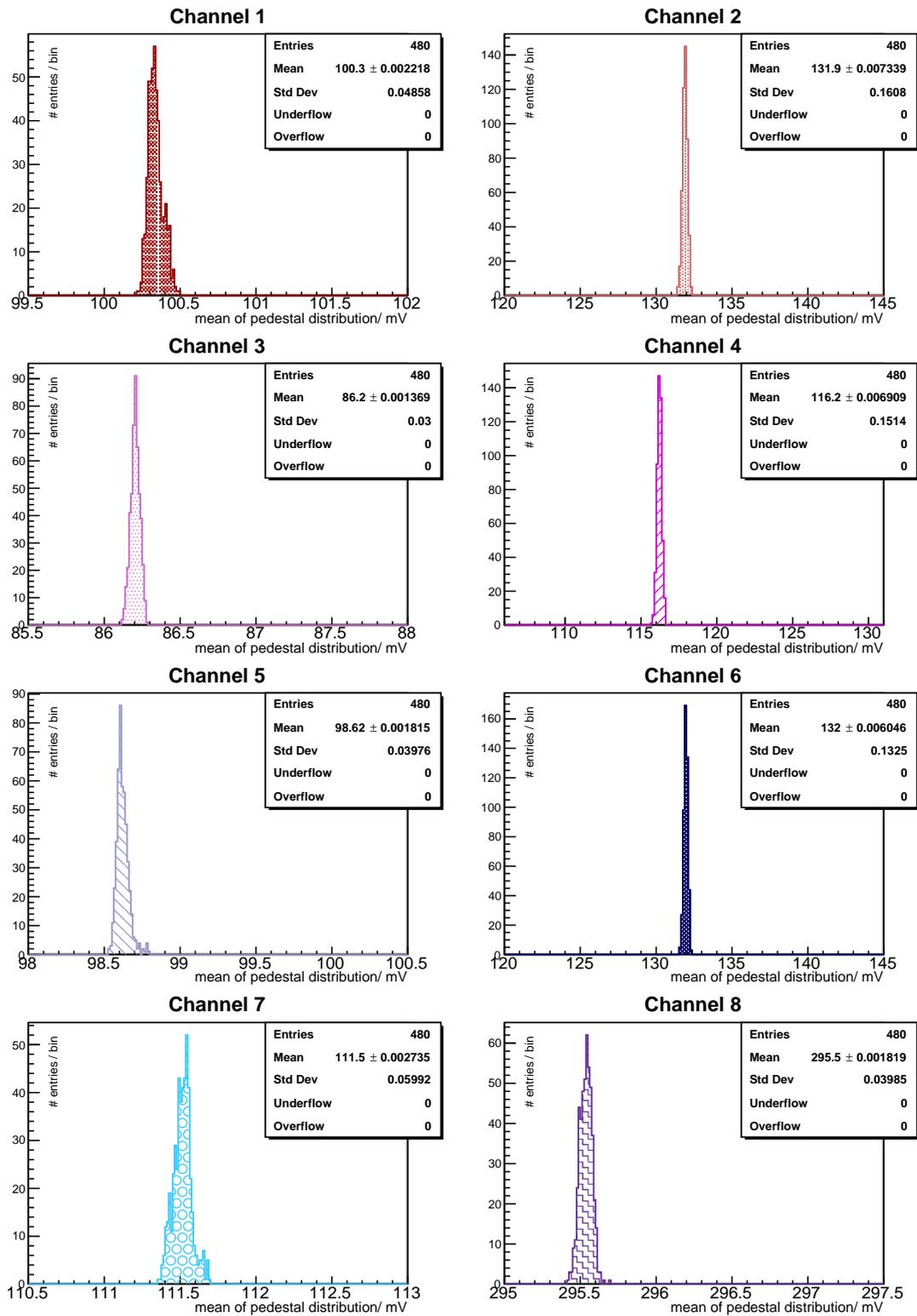


Abbildung A.63.: Mittelwerte des Pedestals für den Dauertest der 50mV40ns-Pulse

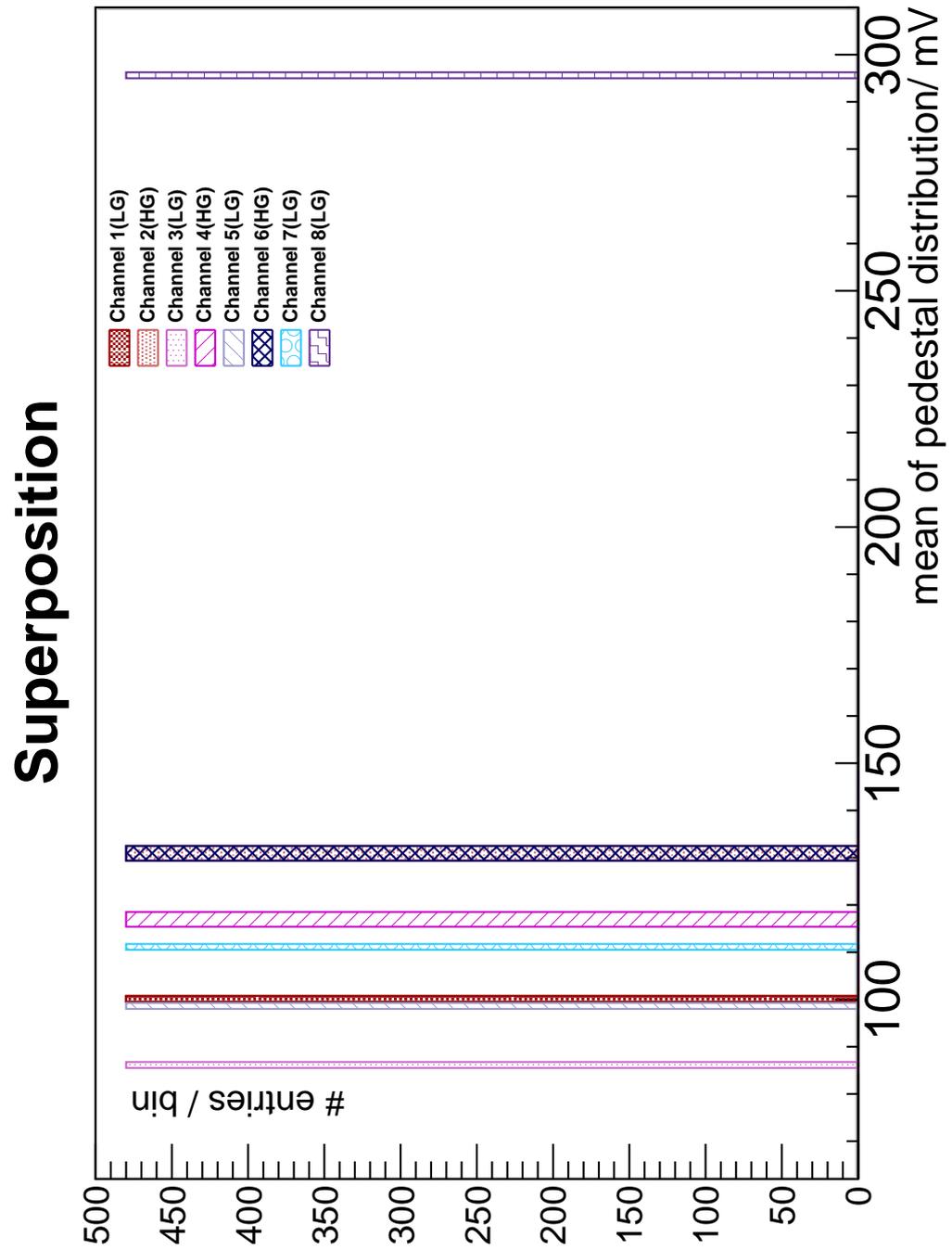


Abbildung A.64.: Überlagerung der Mittelwerte des Pedestals für den Dauertest der 50mV40ns-Pulse

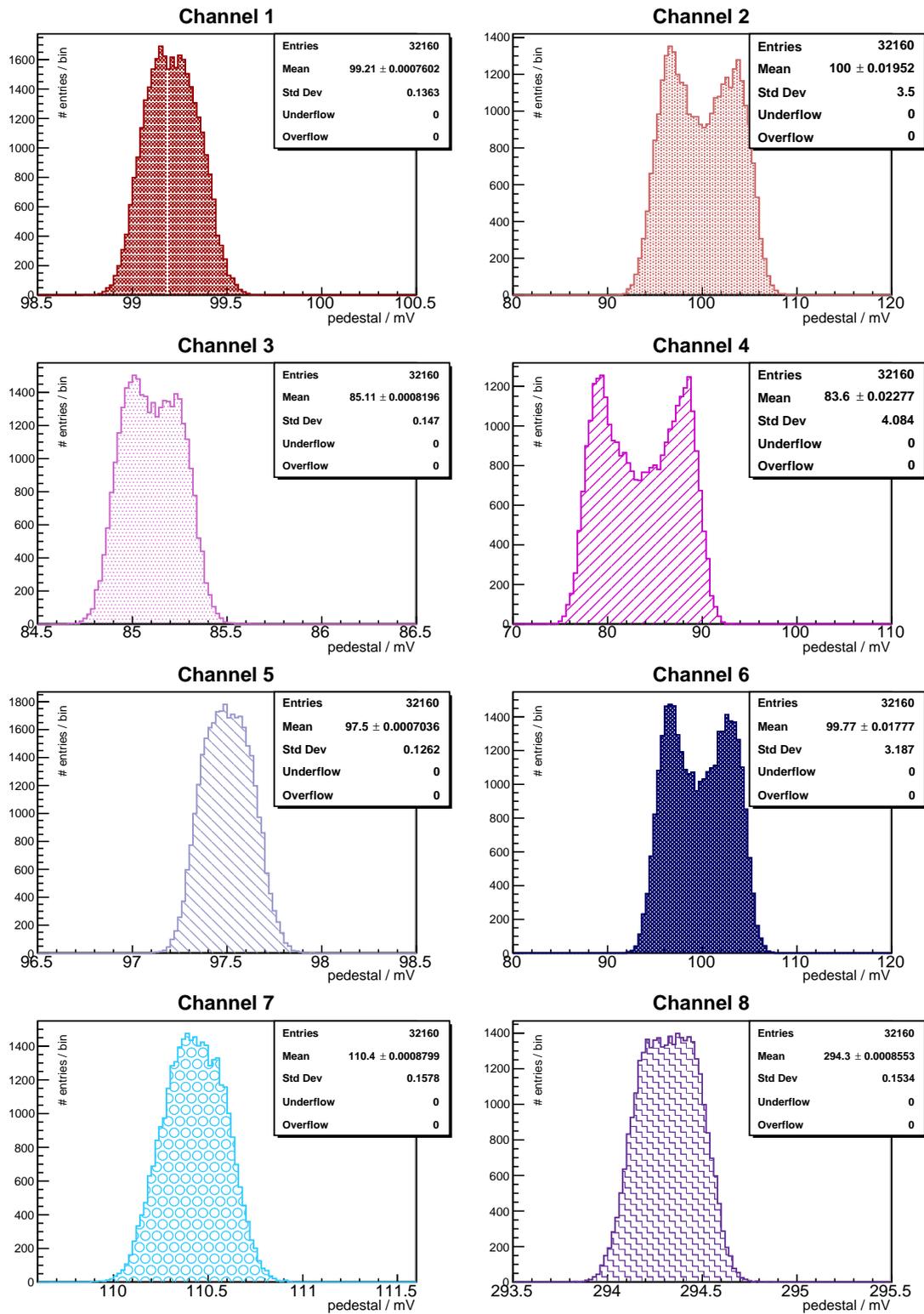


Abbildung A.65.: Pedestals aller 50mV200ns-Pulse des Dauertests

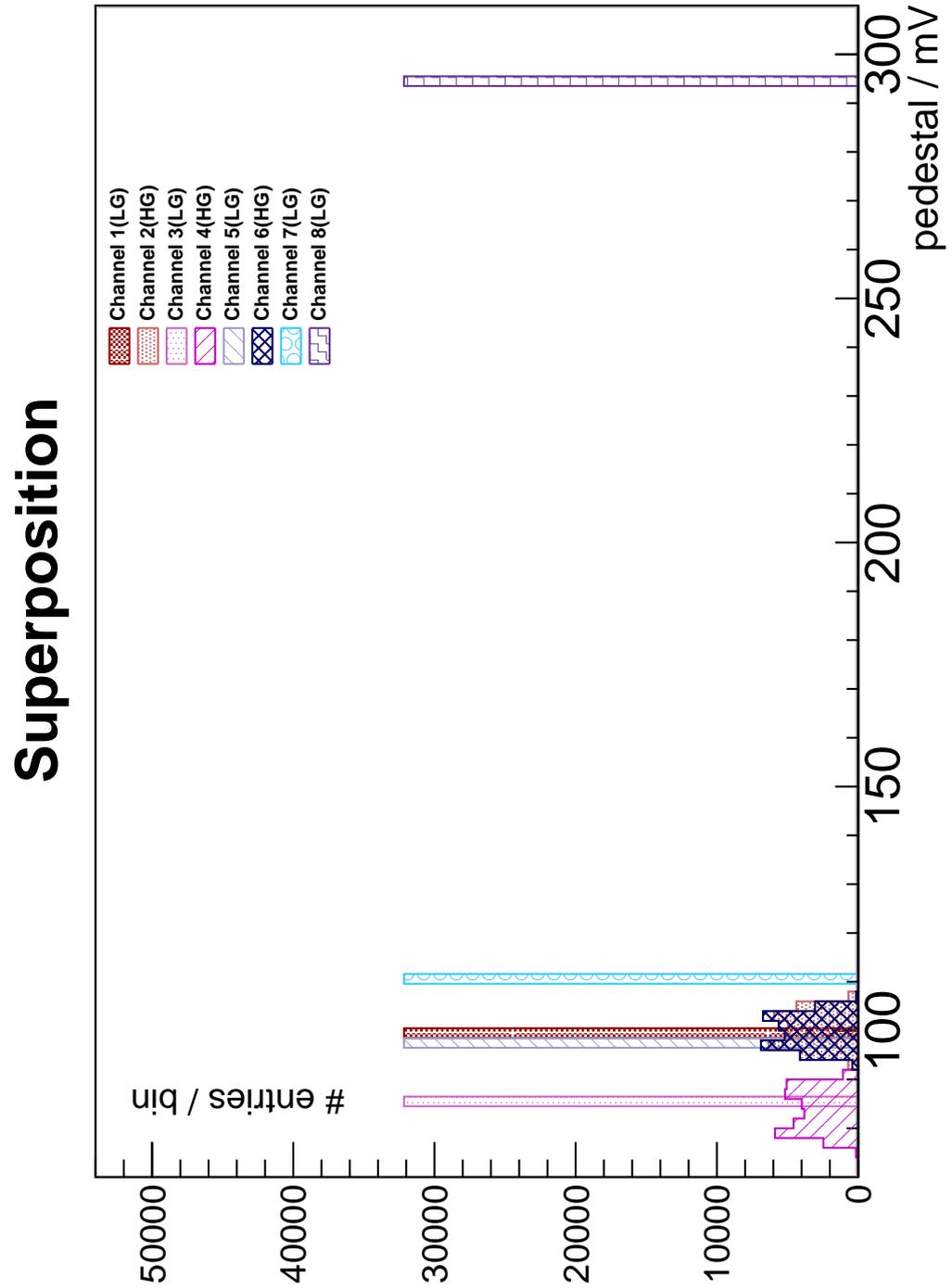


Abbildung A.66.: Überlagerung des Pedestals aller 50mV200ns-Pulse des Dauertests

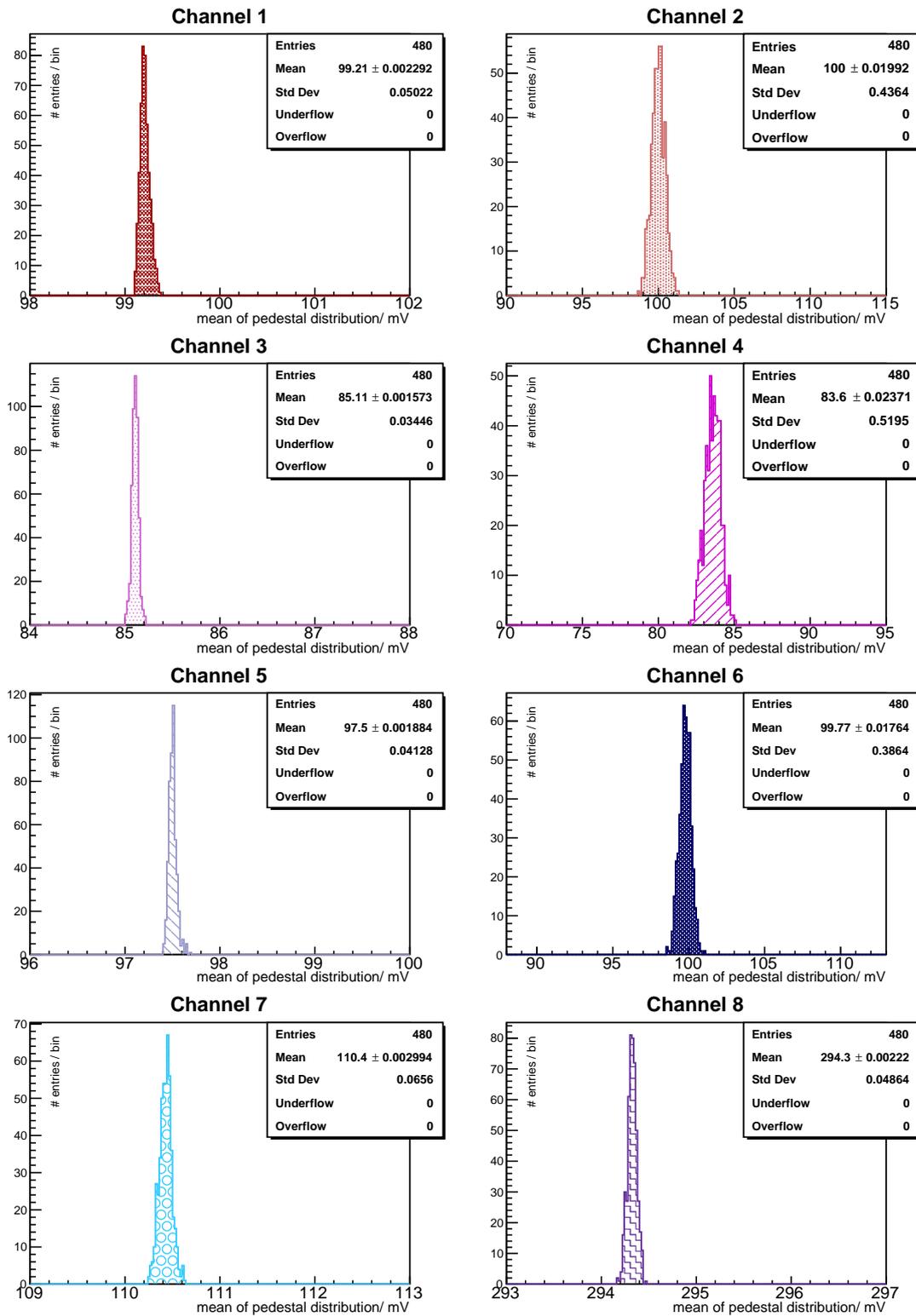


Abbildung A.67.: Mittelwerte des Pedestals für den Dauertest der 50mV200ns-Pulse

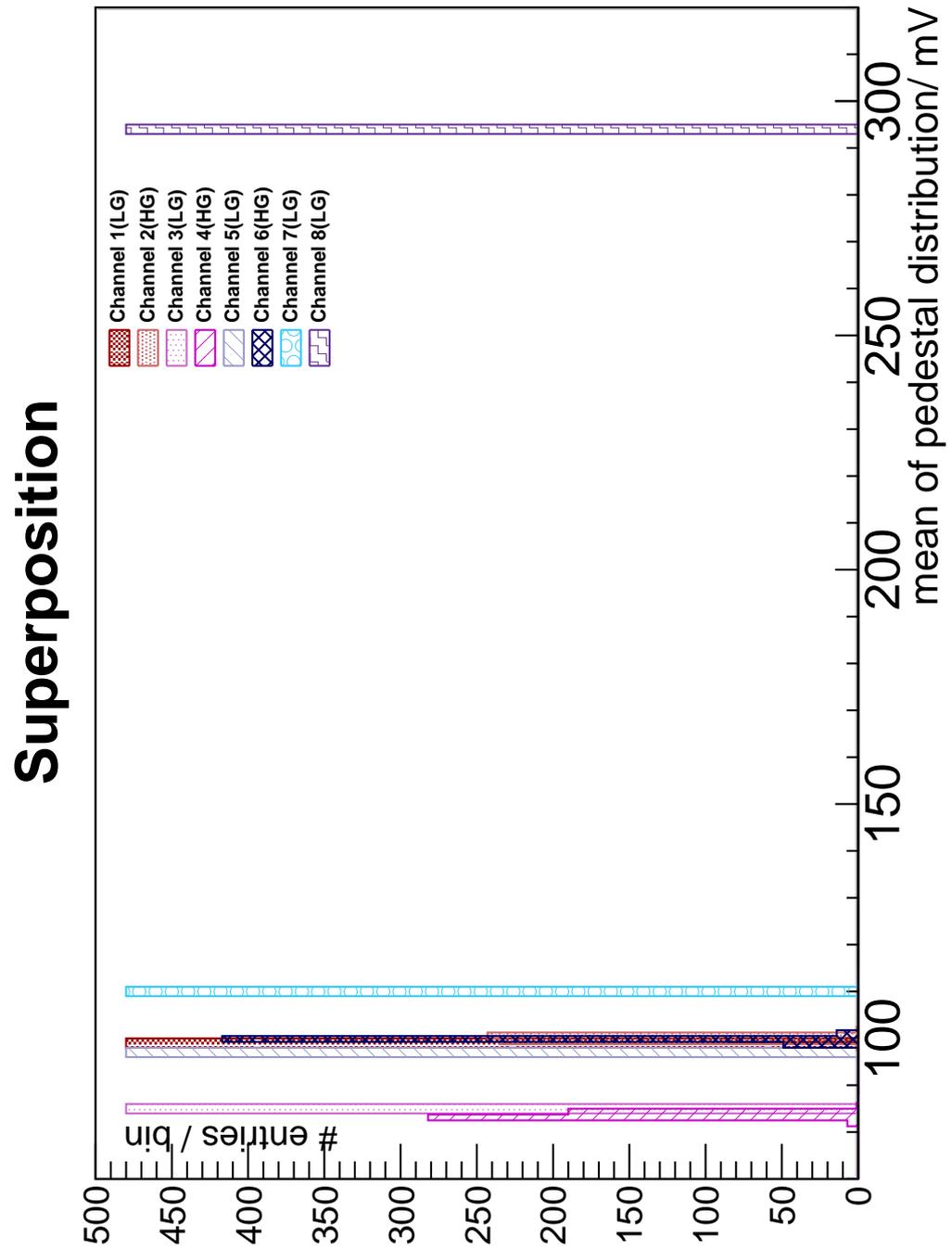


Abbildung A.68.: Überlagerung der Mittelwerte des Pedestals für den Dauertest der 50mV200ns-Pulse

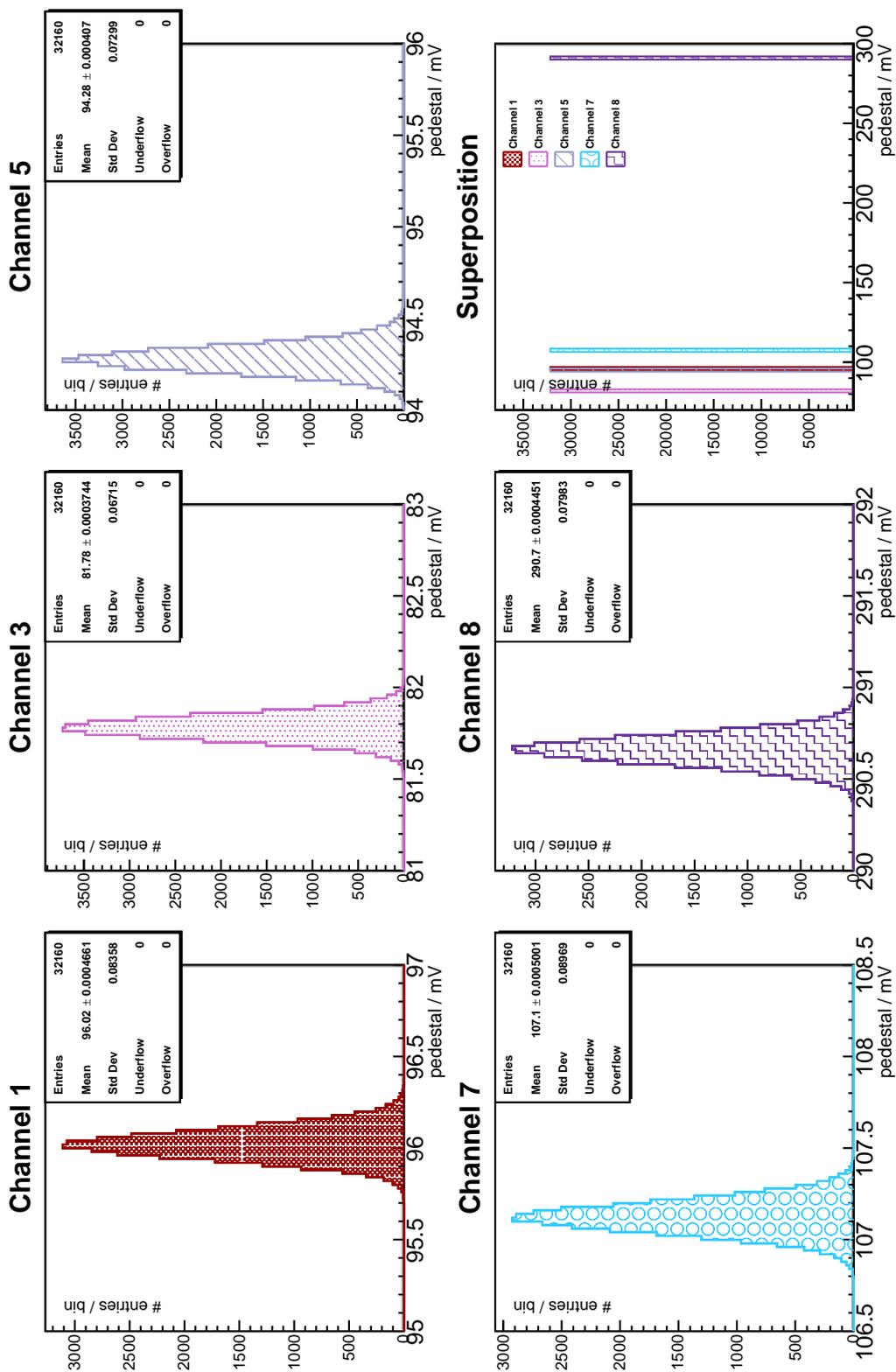


Abbildung A.69.: Pedestal aller 800mV40ns-Pulse des Dauertests auf den Low-Gain-Kanälen

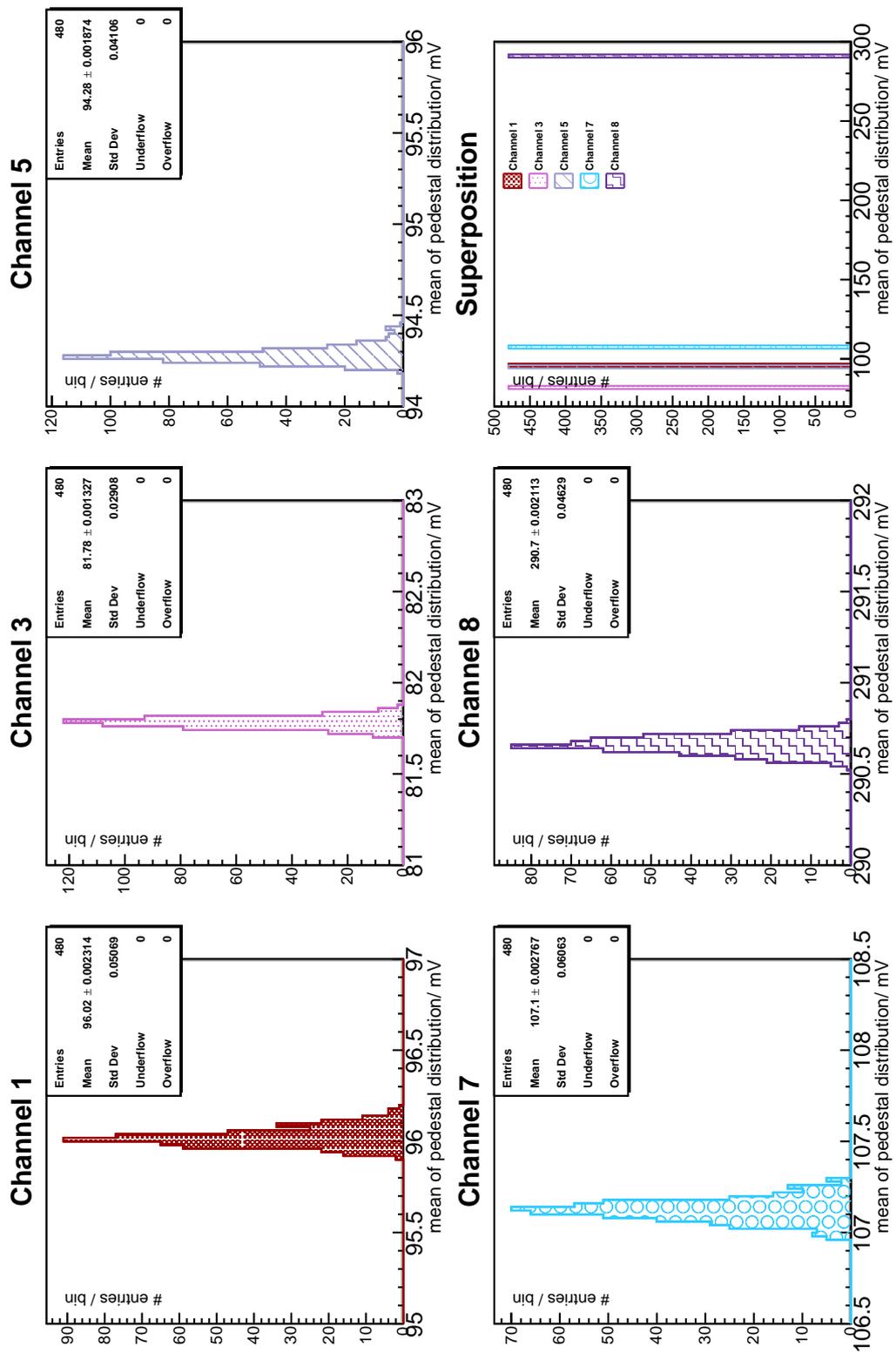


Abbildung A.70.: Mittelwerte des Pedestals für den Dauertest der 800mV40ns-Pulse auf den Low-Gain-Kanälen

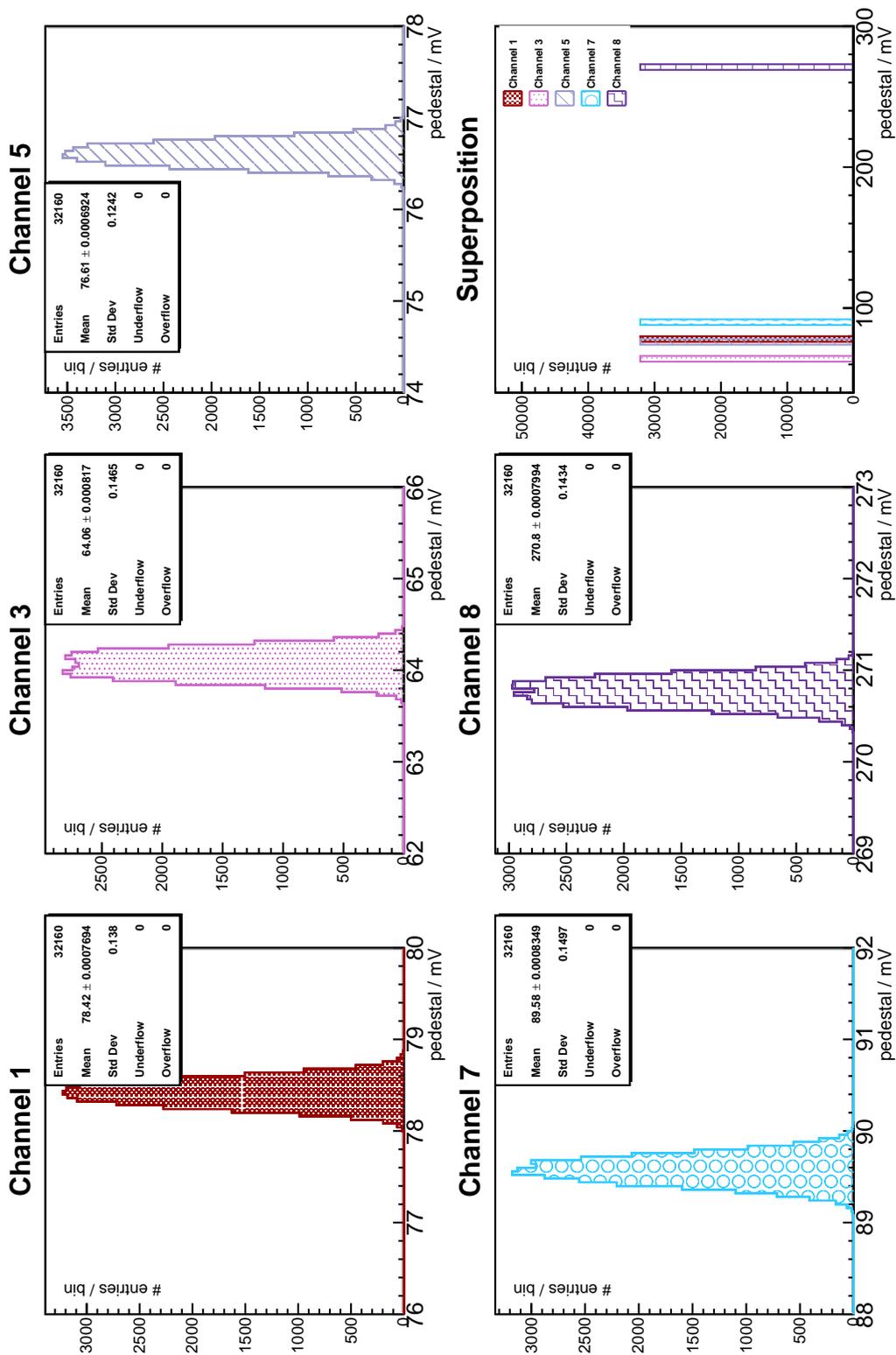


Abbildung A.71.: Pedestal aller 800mV200ns-Pulse des Dauertests auf den Low-Gain-Kanälen

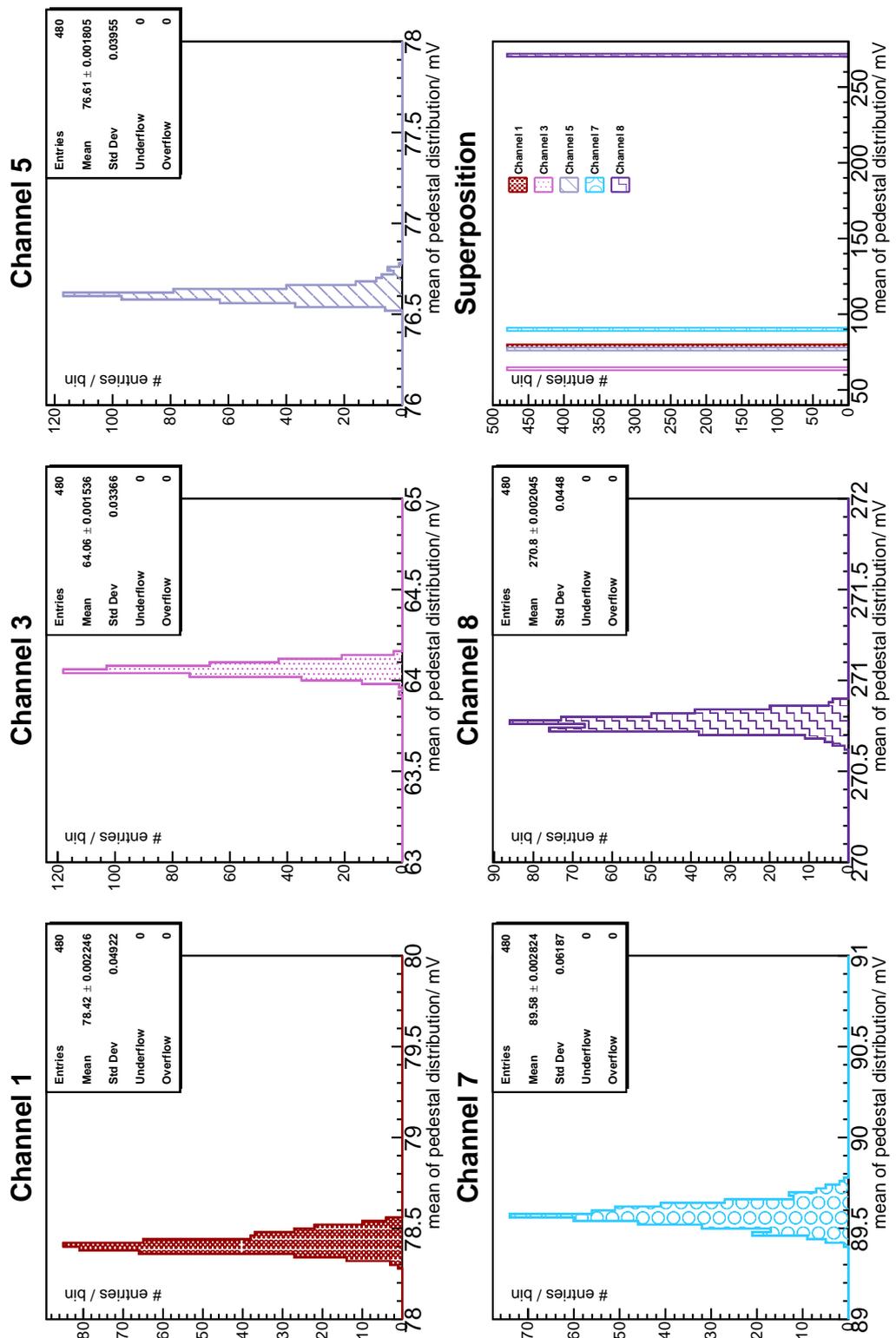


Abbildung A.72.: Mittelwerte des Pedestals für den Dauertest der 800mV200ns-Pulse auf den Low-Gain-Kanälen

A.6. Verstärkungsverhältnis

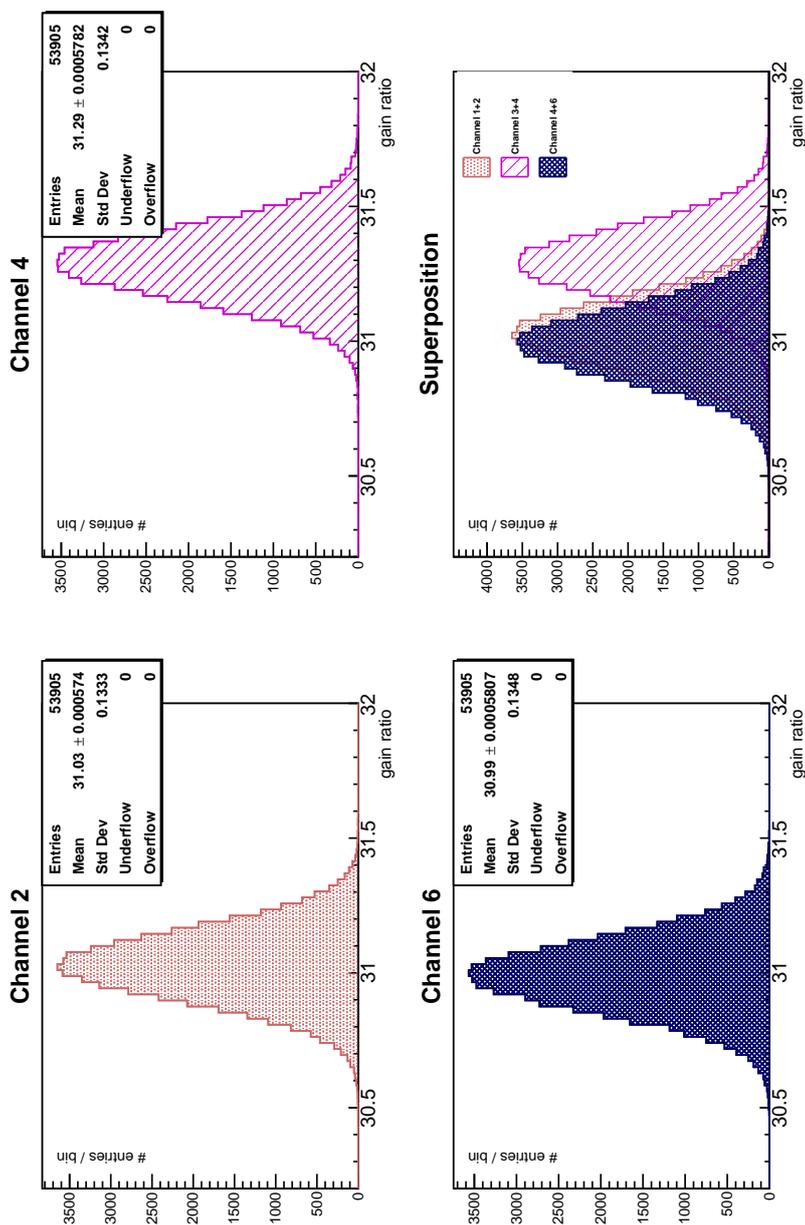


Abbildung A.73.: Verstärkungsverhältnis aller 50mV40ns-Pulse des UUB-Dauertests

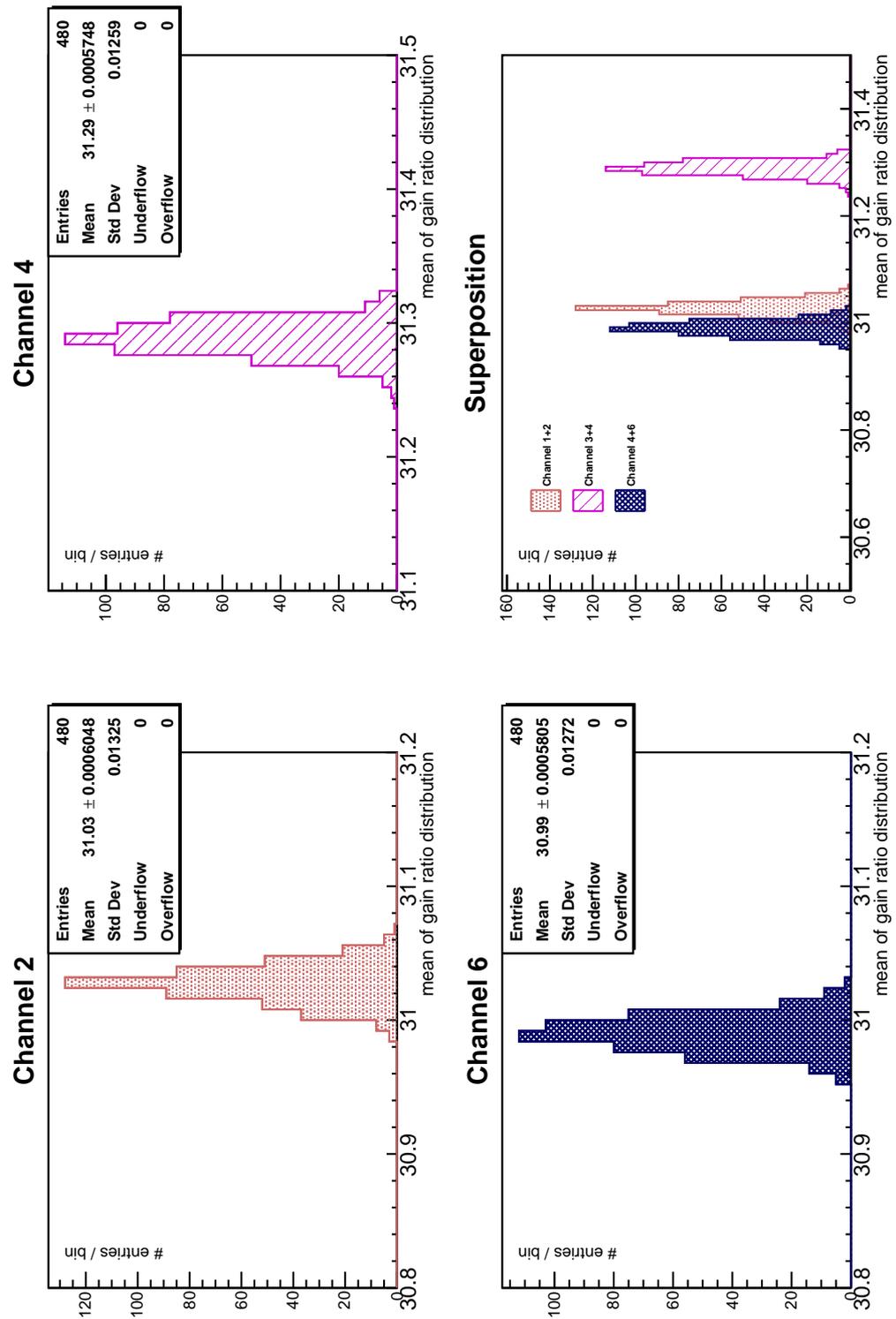


Abbildung A.74.: Mittelwerte der Verstärkungsverhältnis-Verteilungen der 50mV40ns-Pulse des UUB-Dauertests

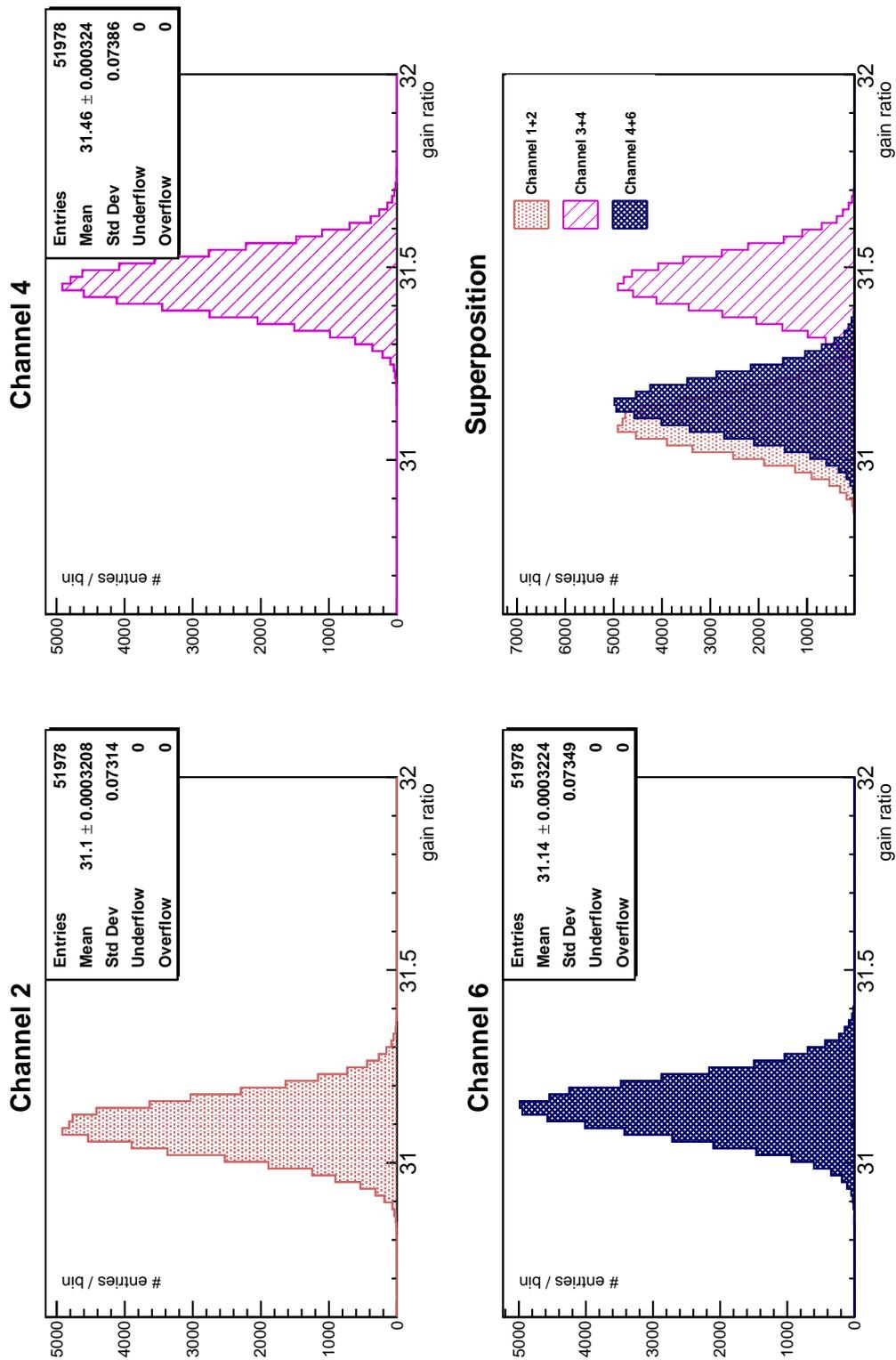


Abbildung A.75.: Verstärkungsverhältnis aller 50mV200ns-Pulse des UUB-Dauertests

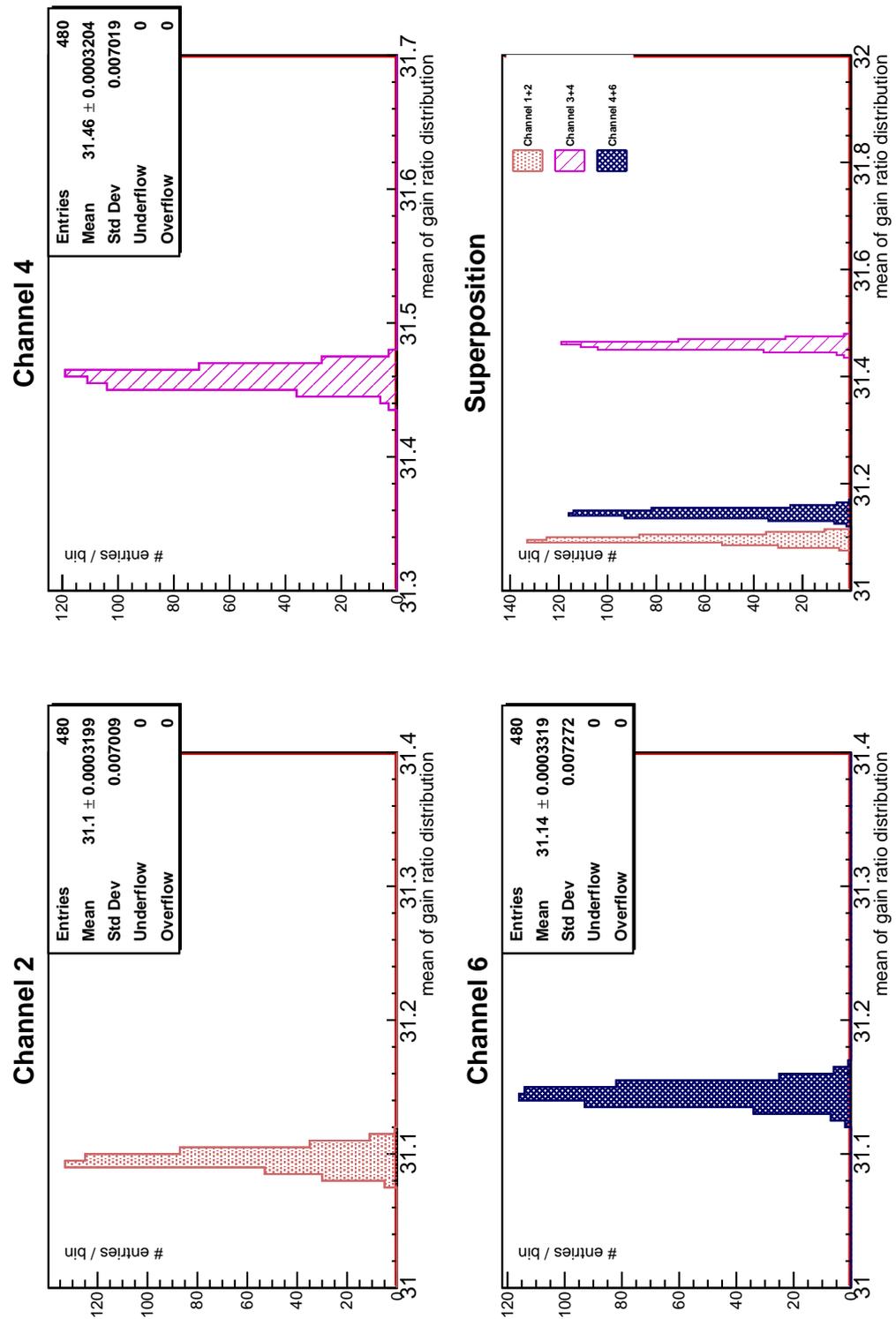


Abbildung A.76.: Mittelwerte der Verstärkungsverhältnis-Verteilungen der 50mV200ns-Pulse des UUB-Dauertests

B. Dokumentation der Analysen

Parameter	Erklärung
Datum	Der Tag, an dem der Datensatz mit dem Testsystem aufgenommen und vom Pulseanalyzer analysiert wurde
Testsystem	Das Testsystem, mit dem der Dauertest durchgeführt wurde
Pulseanalyzer	Das Kürzel der Version des Pulseanalyzer-Programms in Git
Testkontroller	Die Version des Testkontroller-Programms
DAC-Karte	Label der im Testsystem eingebauten Digital to Analog Converter (DAC)-Karte
Power-Karte	Label der im Testsystem eingebauten Power-Karte
UUB	Seriennummer des UUBs
Anzahl Tests	Anzahl der Wiederholungen des SPT, die Dauertest durchgeführt wurden
Amplitude	Theoretische Amplitude, anhand der die Look Up Table (LUT) erstellt wurde
FWHM	Theoretische FWHM, anhand der die LUT erstellt wurde
σ	Die Standardabweichung der Landau-Verteilung. Sie hängt über einen Faktor vier mit der FWHM zusammen.
Anzahl Pulse	Eine Anzahl der Pulse, die auf jedem Kanal aufgenommen und analysiert wurden
Abtastrate	Die Abtastrate des UUBs
Paketgröße	Die Größe eines zusammenhängenden Datenpakets
X-Fehler	Die geschätzte Unsicherheit eines gemessenen Datenpunktes in der Zeit (wichtig für den Fit)
Y-Fehler	Die geschätzte Unsicherheit eines gemessenen Datenpunktes in der Spannung (wichtig für den Fit)
Pulsschwelle	Der Prozentsatz der Amplitude, der überschritten werden muss, damit ein Puls als solcher im Pulseanalyzer detektiert wird.
Minimale Länge	Innerhalb dieses Zeitraums in Einheiten von σ wird nach erstmaligem Überschreiten der Pulsschwelle nicht nach einem weiteren Pulsanfang gesucht, um zu vermeiden, dass DAC-bedingte Stufen in der fallenden Flanke als Puls erkannt werden.
Fitgrenze links	Der Abstand in Einheiten von σ von Maximum zur linken Fitgrenze

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Parameter	Erklärung
Fitgrenze rechts	Der Abstand in Einheiten von σ von Maximum zur rechten Fitgrenze
Offsetpunkte	Anzahl der Punkte vor Pulsbeginn anhand derer das Offset berechnet wurde.

Tabelle B.1.: Konfigurationen für die Aufnahme und Analyse der Datensätze

Tabelle B.2.: Konfigurationen für die Aufnahme und Analyse der 50mV40ns-Pulse im Dauertest

Parameter	Wert
Datum	30. April - 2. Mai 2018
Testsystem	Testsystem 4 (Prototyp vor Massenproduktion)
PA-Version	Wuppertal_v1-87-gbc5b8e0
Testkontroller	4.03
DAC-Karte	35408 000002
Power-Karte	36683 000008
UUB	ac1005010000
Anzahl Tests	480
Amplitude	50 mV
FWHM	40 ns
σ	10 ns
Anzahl Pulse	53905
Abtastrate	0.12 GSa/s
Paketgröße	2048
X-Fehler	0 ns
Y-Fehler	0.5 mV
Pulseshwelle	33%
Minimale Länge	4 σ
Fitgrenze links	1.5 σ
Fitgrenze rechts	12 σ
Offsetpunkte	11

Tabelle B.3.: Konfigurationen für die Aufnahme und Analyse der 50mV200ns-Pulse im Dauertest

Parameter	Wert
Datum	30. April - 2. Mai 2018
Testsystem	Testsystem 4 (Prototyp vor Massenproduktion)
Pulseanalyser	Wuppertal_v1-87-gbc5b8e0
Testkontroller	4.03
DAC-Karte	35408 000002
Power-Karte	36683 000008
UUB	ac1005010000
Anzahl Tests	480
Amplitude	50 mV
FWHM	200 ns
σ	50 ns
Anzahl Pulse	51978
Abtastrate	0.12 GSa/s
Paketgröße	2048
X-Fehler	0 ns
Y-Fehler	0.5 mV
Pulseschwelle	33%
Minimale Länge	4 σ
Fitgrenze links	1.5 σ
Fitgrenze rechts	12 σ
Offsetpunkte	11

Tabelle B.4.: Konfigurationen für die Aufnahme und Analyse der 800mV40ns-Pulse im Dauertest

Parameter	Wert
Datum	30. April - 2. Mai 2018
Testsystem	Testsystem 4 (Prototyp vor Massenproduktion)
Pulseanalyser	Wuppertal_v1-87-gbc5b8e0
Testkontroller	4.03
DAC-Karte	35408 000002
Power-Karte	36683 000008
UUB	ac1005010000
Anzahl Tests	480
Amplitude	800 mV
FWHM	40 ns
σ	10 ns
Anzahl Pulse	53940
Abtastrate	0.12 GSa/s
Paketgröße	2048
X-Fehler	0 ns
Y-Fehler	0.5 mV
Pulseschwelle	33%
Minimale Länge	4 σ
Fitgrenze links	1.5 σ
Fitgrenze rechts	12 σ
Offsetpunkte	11

Tabelle B.5.: Konfigurationen für die Aufnahme und Analyse der 800mV200ns-Pulse im Dauertest

Parameter	Wert
Datum	30. April - 2. Mai 2018
Testsystem	Testsystem 4 (Prototyp vor Massenproduktion)
Pulseanalyser	Wuppertal_v1-87-gbc5b8e0
Testkontroller	4.03
DAC-Karte	35408 000002
Power-Karte	36683 000008
UUB	ac1005010000
Anzahl Tests	480
Amplitude	800 mV
FWHM	200 ns
σ	50 ns
Anzahl Pulse	51855
Abtastrate	0.12 GSa/s
Paketgröße	2048
X-Fehler	0 ns
Y-Fehler	0.5 mV
Pulseschwelle	33%
Minimale Länge	4 σ
Fitgrenze links	1.5 σ
Fitgrenze rechts	12 σ
Offsetpunkte	11

C. Abkürzungen

ADC	Analog to Digital Converter
BRAM	Block Random Access Memory
CDAS	Central Data Acquisition System
DAC	Digital to Analog Converter
FADC	Flash Analog to Digital Converter
FD	Fluoreszenz-Detektor
FPGA	Field Programmable Gate Array
FTP	File Transfer Protocol
FWHM	Full Width at Half Maximum
GPS	Global Positioning System
GUI	Graphical User Interface
HV	High Voltage
LED	Light-Emitting Diode
LHC	Large Hadron Collider
LUT	Look Up Table
PMT	Photomultiplier Tube
PVT	PMT Voltage Test
RMS	Root Mean Square
SD	Surface Detector
SSD	Surface Scintillation Detector
SPMT	Small Photomultiplier Tube
SPT	Single Pulse Test
SRV	Signal-Rausch-Verhältnis

Telnet	Teletype Network
TS	Testsystem
UB	Unified Board
UPT	UUB Power Test
USB	Universal Serial Bus
UUB	Upgraded Unified Board
UV	Ultraviolett
VEM	Vertical Equivalent Myon
WCD	Wasser-Cherenkov-Detektor

D. Verwendete Geräte und Programme

- [I] Analog Devices: AD9628
- [II] Xilinx: Zynq-7020
- [III] Motorola: M12M
- [IV] Texas Instruments: MSP430
- [V] Xilinx: PetaLinux
- [VI] Mean Well: GST280A12
- [VII] Texas Instruments: DAC3164
- [VIII] Mitac: PD10AI-N3350
- [IX] National Instruments: LabVIEW (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench)
- [X] LabJack: U12
- [XI] CERN: ROOT, Klasse TTree
- [XII] Tim-Philip Hücking: TestSystemResultMerger
- [XIII] Hewlett Packard: infinium, 1.5 GHz, 8 GSa/s
- [XIV] Moritz Porst: READSCOPE
- [XV] CERN: ROOT, Klasse TMath, Landau
- [XVI] Qader Dorosti, Moritz Porst, Rico Schmidtbauer: pulseController

E. Abbildungsverzeichnis

2.1. Energiespektrum der primären Kosmischen Strahlung	4
2.2. Oberes Ende des Energiespektrums	5
2.3. Simulation zum GZK-Cutoff	7
2.4. Schematische Darstellung eines hadronischen Schauers	8
2.5. Schematische Darstellung des Schauermodells nach Heitler	9
2.6. Schematische Darstellung der Entstehung des Cherenkov-Lichts	11
3.1. Karte des Pierre-Auger-Observatoriums	14
3.2. Tank des Oberflächendetektors	14
3.3. Auswertung eines Ereignisses im FD	16
3.4. Schematischer Aufbau eines Fluoreszenzteleskops	17
3.5. Schematische Darstellung Teilchenschauer	18
3.6. Ankunft der Signale im SD nach Komponenten	19
3.7. Vorhersagen der Schauereindringtiefe für zwei Szenarien	20
4.1. Bild eines UUBs, das in Siegen in Betrieb genommen wurde.	24
4.2. Flussdiagramm des Testsystems	25
4.3. Bild des Testsystems	26
4.4. Darstellung des Testablaufs mit Schwerpunkt auf der Erzeugung und Verarbeitung der Pulse im Rahmen des SPT	29
4.5. Programmablauf des Pulseanalyzers	30
4.6. Rohdaten eines einzelnen Datenpakets	33
4.7. Programmablauf der Analyse eines Pakets	34
4.8. Programmablauf der Analyse eines einzelnen Pulses	37
4.9. Bestimmung FWHM anhand der Datenpunkte	38
4.10. Überlagerung des gemessenen Pulses mit dem Eingangspuls	39
4.11. Bithistogramm	40
4.12. Programmablauf für das Treffen der Entscheidung	41
4.13. Netzplot für den Testausgang eines 800mV 200ns-Pulses	42
5.1. Darstellung der Verbindung vom Testsystem zum UUB	44
5.2. Mittelwerte der Amplituden-Verteilungen der 50mV40ns-Pulse des UUB-Dauertests auf den High-Gain-Kanälen	49
5.3. Mittelwerte der Amplituden-Verteilungen der 50mV40ns-Pulse des UUB-Dauertests auf den Low-Gain-Kanälen	50
5.4. Mittelwerte der Amplituden-Verteilungen der 50mV200ns-Pulse des UUB-Dauertests auf den High-Gain-Kanälen	51

5.5. Mittelwerte der Amplituden-Verteilungen der 50mV200ns-Pulse des UUB-Dauertests auf den Low-Gain-Kanälen	52
5.6. Mittelwerte der Amplituden-Verteilungen der 800mV40ns-Pulse des UUB-Dauertests auf den Low-Gain-Kanälen	53
5.7. Mittelwerte der Amplituden-Verteilungen der 800mV200ns-Pulse des UUB-Dauertests auf den Low-Gain-Kanälen	54
5.8. Veranschaulichung der Grenzen für die relative Abweichung der Amplitude	55
5.9. Amplituden aller 800mV40ns-Pulse des UUB-Dauertests auf den Low-Gain-Kanälen	57
5.10. FWHM aller 800mV40ns-Pulse des UUB-Dauertests auf den Low-Gain-Kanälen	58
5.11. Verteilung der Fitamplituden, eingefärbt	59
5.12. Überlagerung aller Datenpunkte, eingefärbt	59
5.13. Korrelation Abtastzeitpunkt - Breite 800mV40ns	60
5.14. Korrelation Abtastzeitpunkt - Amplitude 800mV40ns	60
5.15. Korrelation Abtastzeitpunkt - Breite 50mV40ns	61
5.16. Korrelation Abtastzeitpunkt - Breite 800mV200ns	61
5.17. Überlagerung der Mittelwerte des Pedestals für den Dauertest der 50mV200ns-Pulse	69
A.1. Amplituden aller 50mV40ns-Pulse des UUB-Dauertests auf den High-Gain-Kanälen	77
A.2. Mittelwerte der Amplituden-Verteilungen der 50mV40ns-Pulse des UUB-Dauertests auf den High-Gain-Kanälen	78
A.3. Amplituden aller 50mV40ns-Pulse des UUB-Dauertests auf den Low-Gain-Kanälen	79
A.4. Mittelwerte der Amplituden-Verteilungen der 50mV40ns-Pulse des UUB-Dauertests auf den Low-Gain-Kanälen	80
A.5. Standardabweichungen der Amplituden-Verteilungen der 50mV40ns-Pulse des UUB-Dauertests	81
A.6. Überlagerung der Standardabweichungen der Amplituden-Verteilungen der 50mV40ns-Pulse der UUB-Kanäle des UUB-Dauertests	82
A.7. Amplituden aller 50mV200ns-Pulse des UUB-Dauertests auf den High-Gain-Kanälen	83
A.8. Mittelwerte der Amplituden-Verteilungen der 50mV200ns-Pulse des UUB-Dauertests auf den High-Gain-Kanälen	84
A.9. Amplituden aller 50mV200ns-Pulse des UUB-Dauertests auf den Low-Gain-Kanälen	85
A.10. Mittelwerte der Amplituden-Verteilungen der 50mV200ns-Pulse des UUB-Dauertests auf den Low-Gain-Kanälen	86
A.11. Standardabweichungen der Amplituden-Verteilungen der 50mV200ns-Pulse des UUB-Dauertests	87
A.12. Überlagerung der Standardabweichungen der Amplituden-Verteilungen der 50mV200ns-Pulse der UUB-Kanäle des UUB-Dauertests	88

A.13. Amplituden aller 800mV40ns-Pulse des UUB-Dauertests auf den Low-Gain-Kanälen	89
A.14. Mittelwerte der Amplituden-Verteilungen der 800mV40ns-Pulse des UUB-Dauertests auf den Low-Gain-Kanälen	90
A.15. Standardabweichungen der Amplituden-Verteilungen der 800mV40ns-Pulse des UUB-Dauertests auf den Low-Gain-Kanälen	91
A.16. Amplituden aller 800mV200ns-Pulse des UUB-Dauertests auf den Low-Gain-Kanälen	92
A.17. Mittelwerte der Amplituden-Verteilungen der 800mV200ns-Pulse des UUB-Dauertests auf den Low-Gain-Kanälen	93
A.18. Standardabweichungen der Amplituden-Verteilungen der 800mV200ns-Pulse des UUB-Dauertests auf den Low-Gain-Kanälen	94
A.19. FWHM aller 50mV40ns-Pulse des Dauertests	95
A.20. Überlagerung aller FWHM-Verteilungen der 50mV40ns-Pulse des UUB-Dauertests eingefärbt nach UUB-Kanälen	96
A.21. Mittelwerte der FWHM-Verteilungen der 50mV40ns-Pulse des UUB-Dauertests	97
A.22. Überlagerung der Mittelwerte des FWHM für den Dauertest der 50mV40ns-Pulse	98
A.23. Standardabweichungen der FWHM-Verteilungen der 50mV40ns-Pulse des UUB-Dauertests	99
A.24. Überlagerung der Standardabweichungen der FWHM-Verteilungen der 50mV40ns-Pulse der UUB-Kanäle des UUB-Dauertests	100
A.25. FWHM aller 50mV200ns-Pulse des Dauertests	101
A.26. Überlagerung aller FWHM-Verteilungen der 50mV200ns-Pulse des UUB-Dauertests eingefärbt nach UUB-Kanälen	102
A.27. Mittelwerte der FWHM-Verteilungen der 50mV200ns-Pulse des UUB-Dauertests	103
A.28. Überlagerung der Mittelwerte des FWHM für den Dauertest der 50mV200ns-Pulse	104
A.29. Standardabweichungen der FWHM-Verteilungen der 50mV200ns-Pulse des UUB-Dauertests	105
A.30. Überlagerung der Standardabweichungen der FWHM-Verteilungen der 50mV200ns-Pulse der UUB-Kanäle des UUB-Dauertests	106
A.31. FWHM aller 800mV40ns-Pulse des UUB-Dauertests auf den Low-Gain-Kanälen	107
A.32. Mittelwerte der FWHM-Verteilungen der 800mV40ns-Pulse des UUB-Dauertests auf den Low-Gain-Kanälen	108
A.33. Standardabweichungen der FWHM-Verteilungen der 800mV40ns-Pulse des UUB-Dauertests auf den Low-Gain-Kanälen	109
A.34. FWHM aller 800m200Vns-Pulse des UUB-Dauertests auf den Low-Gain-Kanälen	110
A.35. Mittelwerte der FWHM-Verteilungen der 800mV200ns-Pulse des UUB-Dauertests auf den Low-Gain-Kanälen	111

A.36. Standardabweichungen der FWHM-Verteilungen der 800mV200ns-Pulse des UUB-Dauertests auf den Low-Gain-Kanälen	112
A.37. RMS-Rauschen aller Datenpakete eines Tests mit 50mV40ns-Pulsen auf den High-Gain-Kanälen	113
A.38. Mittelwerte der Verteilungen des RMS-Rauschens bei den Tests mit 50mV40ns-Pulsen auf den High-Gain-Kanälen	114
A.39. RMS-Rauschen aller Datenpakete eines Tests mit 50mV40ns-Pulsen auf den Low-Gain-Kanälen	115
A.40. Mittelwerte der Verteilungen des RMS-Rauschens bei den Tests mit 50mV40ns-Pulsen auf den Low-Gain-Kanälen	116
A.41. RMS-Rauschen aller Datenpakete eines Tests mit 50mV200ns-Pulsen auf den High-Gain-Kanälen	117
A.42. Mittelwerte der Verteilungen des RMS-Rauschens bei den Tests mit 50mV200ns-Pulsen auf den High-Gain-Kanälen	118
A.43. RMS-Rauschen aller Datenpakete eines Tests mit 50mV200ns-Pulsen auf den Low-Gain-Kanälen	119
A.44. Mittelwerte der Verteilungen des RMS-Rauschens bei den Tests mit 50mV200ns-Pulsen auf den Low-Gain-Kanälen	120
A.45. RMS-Rauschen aller Datenpakete eines Tests mit 800mV40ns-Pulsen auf den Low-Gain-Kanälen	121
A.46. Mittelwerte der Verteilungen des RMS-Rauschens bei den Tests mit 800mV40ns-Pulsen auf den Low-Gain-Kanälen	122
A.47. RMS-Rauschen aller Datenpakete eines Tests mit 800mV200ns-Pulsen auf den Low-Gain-Kanälen	123
A.48. Mittelwerte der Verteilungen des RMS-Rauschens bei den Tests mit 800mV200ns-Pulsen auf den Low-Gain-Kanälen	124
A.49. Peak to Peak-Rauschen aller Datenpakete eines Tests mit 50mV40ns-Pulsen auf den High-Gain-Kanälen	125
A.50. Mittelwerte der Verteilungen des Peak to Peak-Rauschens bei den Tests mit 50mV40ns-Pulsen auf den High-Gain-Kanälen	126
A.51. Peak to Peak-Rauschen aller Datenpakete eines Tests mit 50mV40ns-Pulsen auf den Low-Gain-Kanälen	127
A.52. Mittelwerte der Verteilungen des Peak to Peak-Rauschens bei den Tests mit 50mV40ns-Pulsen auf den Low-Gain-Kanälen	128
A.53. Peak to Peak-Rauschen aller Datenpakete eines Tests mit 50mV200ns-Pulsen auf den High-Gain-Kanälen	129
A.54. Mittelwerte der Verteilungen des Peak to Peak-Rauschens bei den Tests mit 50mV200ns-Pulsen auf den High-Gain-Kanälen	130
A.55. Peak to Peak-Rauschen aller Datenpakete eines Tests mit 50mV200ns-Pulsen auf den Low-Gain-Kanälen	131
A.56. Mittelwerte der Verteilungen des Peak to Peak-Rauschens bei den Tests mit 50mV200ns-Pulsen auf den Low-Gain-Kanälen	132
A.57. Peak to Peak-Rauschen aller Datenpakete eines Tests mit 800mV40ns-Pulsen auf den Low-Gain-Kanälen	133

A.58.Mittelwerte der Verteilungen des Peak to Peak-Rauschens bei den Tests mit 800mV40ns-Pulsen auf den Low-Gain-Kanälen	134
A.59.Peak to Peak-Rauschen aller Datenpakete eines Tests mit 800mV200ns-Pulsen auf den Low-Gain-Kanälen	135
A.60.Mittelwerte der Verteilungen des Peak to Peak-Rauschens bei den Tests mit 800mV200ns-Pulsen auf den Low-Gain-Kanälen	136
A.61.Pedestal aller 50mV40ns-Pulse des Dauertests	137
A.62.Überlagerung des Pedestals aller 50mV40ns-Pulse des Dauertests	138
A.63.Mittelwerte des Pedestals für den Dauertest der 50mV40ns-Pulse	139
A.64.Überlagerung der Mittelwerte des Pedestals für den Dauertest der 50mV40ns-Pulse	140
A.65.Pedestals aller 50mV200ns-Pulse des Dauertests	141
A.66.Überlagerung des Pedestals aller 50mV200ns-Pulse des Dauertests	142
A.67.Mittelwerte des Pedestals für den Dauertest der 50mV200ns-Pulse	143
A.68.Überlagerung der Mittelwerte des Pedestals für den Dauertest der 50mV200ns-Pulse	144
A.69.Pedestal aller 800mV40ns-Pulse des Dauertests auf den Low-Gain-Kanälen	145
A.70.Mittelwerte des Pedestals für den Dauertest der 800mV40ns-Pulse auf den Low-Gain-Kanälen	146
A.71.Pedestal aller 800mV200ns-Pulse des Dauertests auf den Low-Gain-Kanälen	147
A.72.Mittelwerte des Pedestals für den Dauertest der 800mV200ns-Pulse auf den Low-Gain-Kanälen	148
A.73.Verstärkungsverhältnis aller 50mV40ns-Pulse des UUB-Dauertests	149
A.74.Mittelwerte der Verstärkungsverhältnis-Verteilungen der 50mV40ns-Pulse des UUB-Dauertests	150
A.75.Verstärkungsverhältnis aller 50mV200ns-Pulse des UUB-Dauertests	151
A.76.Mittelwerte der Verstärkungsverhältnis-Verteilungen der 50mV200ns-Pulse des UUB-Dauertests	152

F. Tabellenverzeichnis

4.1. Rauschmessung am Ausgang der DAC-Karte	27
4.2. Pulsformen des SPTs	28
4.3. Kurze Beschreibung der Aufgaben der einzelnen Klassen	31
5.1. Auswertung Fitamplitudenabweichung 50mV40ns	47
5.2. Auswertung Fitamplitudenabweichung 50mV200ns	47
5.3. Auswertung Fitamplitudenabweichung 800mV40ns	47
5.4. Auswertung Fitamplitudenabweichung 800mV40ns	47
5.5. Auswertung Fitamplitudenabweichung 50mV40ns HG-Kanäle	48
5.6. Auswertung Fitamplitudenabweichung 50mV200ns HG-Kanäle	48
5.7. Auswertung Breite der Fitamplitudenverteilungen 50mV40ns LG-Kanäle .	62
5.8. Auswertung Breite der Fitamplitudenverteilungen 50mV200ns LG-Kanäle	62
5.9. Auswertung Breite der Fitamplitudenverteilungen 800mV40ns	62
5.10. Auswertung Breite der Fitamplitudenverteilungen 800mV200ns	63
5.11. Auswertung Breite der Fitamplitudenverteilungen 50mV40ns HG-Kanäle .	63
5.12. Auswertung Breite der Fitamplitudenverteilungen 50mV200ns HG-Kanäle	63
5.13. Auswertung FWHM-Abweichung 50mV40ns	64
5.14. Auswertung FWHM-Abweichung 50mV200ns	64
5.15. Auswertung FWHM-Abweichung 800mV40ns	64
5.16. Auswertung FWHM-Abweichung 800mV200ns	65
5.17. Auswertung Breite der FWHM-Verteilungen 50mV40ns	65
5.18. Auswertung Breite der FWHM-Verteilungen 50mV200ns	66
5.19. Auswertung Breite der FWHM-Verteilungen 800mV40ns	66
5.20. Auswertung Breite der FWHM-Verteilungen 800mV200ns	66
5.21. Auswertung Abweichung der Pedestal-Verteilungen 50mV40ns	67
5.22. Auswertung Abweichung der Pedestal-Verteilungen 50mV200ns	67
5.23. Auswertung Abweichung der Pedestal-Verteilungen 800mV40ns	68
5.24. Auswertung Abweichung der Pedestal-Verteilungen 800mV200ns	68
5.25. Auswertung mittleres RMS-Rauschen 50mV40ns LG-Kanäle	68
5.26. Auswertung mittleres RMS-Rauschen 50mV200ns LG-Kanäle	70
5.27. Auswertung mittleres RMS-Rauschen 800mV40ns	70
5.28. Auswertung mittleres RMS-Rauschen 800mV200ns	70
5.29. Auswertung mittleres RMS-Rauschen 50mV40ns HG-Kanäle	70
5.30. Auswertung mittleres RMS-Rauschen 50mV200ns HG-Kanäle	71
5.31. Auswertung mittleres Peak to Peak-Rauschen 50mV40ns LG-Kanäle . . .	71
5.32. Auswertung mittleres Peak to Peak-Rauschen 50mV200ns LG-Kanäle . . .	71

5.33. Auswertung mittleres Peak to Peak-Rauschen 800mV40ns	72
5.34. Auswertung mittleres Peak to Peak-Rauschen 800mV200ns	72
5.35. Auswertung mittleres Peak to Peak-Rauschen 50mV40ns HG-Kanäle . . .	72
5.36. Auswertung mittleres Peak to Peak-Rauschen 50mV200ns HG-Kanäle . .	72
5.37. Auswertung mittleres Verstärkungsverhältnis 50mV40ns	73
5.38. Auswertung mittleres Verstärkungsverhältnis 50mV200ns	73
B.1. Konfigurationen für die Aufnahme und Analyse der Datensätze	154
B.2. Konfigurationen für die Aufnahme und Analyse der 50mV40ns-Pulse im Dauertest	154
B.3. Konfigurationen für die Aufnahme und Analyse der 50mV200ns-Pulse im Dauertest	155
B.4. Konfigurationen für die Aufnahme und Analyse der 800mV40ns-Pulse im Dauertest	156
B.5. Konfigurationen für die Aufnahme und Analyse der 800mV200ns-Pulse im Dauertest	157

G. Literaturverzeichnis

- [1] VICTOR F. HESS:
Messungen der durchdringenden Strahlung bei zwei Freiballonfahrten Mitteilungen aus dem Institut für Radiumforschung, Aus den Sitzungsberichten der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften in Wien, Mathem.-naturw. Klasse, Bd CXX, Abt. IIa, (1911)
- [2] VICTOR F. HESS:
Über Beobachtungen der durchdringenden Strahlung bei sieben Freiballonfahrten Phys. Z. 13 1084 (1912), S.1090
- [3] PIERRE AUGER ET AL.:
Extensive Cosmic-Ray Showers, Rev. Mod. Phys. 11, 288 (1939)
- [4] DAVID KIEDA:
A new technique for the observation of EeV and ZeV cosmic rays, Astroparticle Physics, Vol. 4 (1995), S. 133-150
- [5] HENRI BECQUEREL:
On the rays emitted by phosphorescence, Compt. Rend. Math. Vol. 122 (1896), S.420f.
- [6] MICHAEL WALTER:
Ein Höhenflug der Physik, Physik Journal 11 (2012) Nr. 6, S. 53-57
- [7] JAMES CRONIN:
Design Considerations for a Ground Array , Pierre Auger Observatory Technical Notes, Internes Dokument der Pierre-Auger-Kollaboration (1994)
- [8] HANS BLÜMER, CARLOS GUERARD:
The Highest Energies in the Universe, Nachrichten - Forschungszentrum Karlsruhe Jahrg. 33 2/2001 S. 95-102
- [9] ALEXANDER SCHULZ FÜR DIE PIERRE AUGER COLLABORATION:
Measurement of the Energy Spectrum of Cosmic Rays above 3×10^{17} eV with the Pierre Auger Observatory, Proc. of 33rd Int. Cosmic Ray Conf, Rio de Janeiro, Brazil (2013)
- [10] HERMANN KOLANOWSKI, NORBERT WERMES:
Teilchendetektoren, Grundlagen und Anwendungen, 1. Auflage, Springer Spektrum, Heidelberg (2016)

- [11] FRANK E. TAYLOR:
Comparison of cosmic ray flux at $\sqrt{s} > 14\text{TeV}$ with LHC luminosity. arXiv:0805.4528 (2008)
- [12] CLAUS GRUPEN:
Einführung in die Astroteilchenphysik, 2. Auflage, Springer Spektrum (2018)
- [13] ENRICO FERMI:
On the Origin of the Cosmic Radiation, Phys. Rev. 75 (1949) 1169.
- [14] SCOTT E. FORBUSH:
Solar influences on cosmic rays, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America Vol. 43, No. 1 (1957)
- [15] WALTER BAADE, FRITZ ZWICKY:
Remarks on Super-Novae and Cosmic Rays, F. Phys. Rev. 46 (1934) 76.
- [16] CATHERINE CESARSKY, P.O. LAGAGE:
The maximum energy of cosmic rays accelerated by supernovae shocks, Astron. Astroph. 125 (1983) 249.
- [17] VLADIMIR PTUSKIN ET AL.:
Diffusion and drift of very high energy cosmic rays in magnetic fields, Astron. Astroph. 268 (1993) 726.
- [18] TADEUS WIBIG:
Ultra high-energy cosmic ray proton interactions, Phys. Lett. B 678, 60 (2009)
- [19] DAVID ALLARD ET AL.:
UHE nuclei propagation and the interpretation of the ankle in the cosmic-ray spectrum, Astron. Astrophys. 443, L29 (2005), astro-ph/0505566
- [20] DAN HOOPER, ANDREW M. TAYLOR
On The Heavy Chemical Composition of the Ultra-High Energy Cosmic Rays, M.A., Astropart. Phys. 33, 151 (2010)
- [21] KENNETH GREISEN:
End to the Cosmic-Ray Spectrum?, Phys. Rev. Lett. 16 (1964) 748
GEORG T. ZATSEPIN, VALENTIN A. KUZMIN:
Upper Limit of the Spectrum of Cosmic Rays, JETP Letters 4 (1966) 78.
- [22] FELIX A. AHARONIAN, JAMES CRONIN:
Influence of the universal microwave background radiation on the extragalactic cosmic-ray spectrum, Phys. Rev. D50 (1994) 1892.
- [23] P. BLASE, R. EPSTEIN, A.V. OLINTO:
Ultra-High-Energy Cosmic Rays from Young Neutron Star Winds, Astrophys. J. 533 (2000) L123

- [24] SIDNEY COLEMAN, SHELDON L. GLASHOW:
High-energy tests of Lorentz invariance, Phys. Rev. D59 (1999) 116008
- [25] BRUNO B. ROSSI:
High Energy Particles, 1. Ausgabe, Prentice-Hall (1952)
- [26] www.spektrum.de/lexikon/physik/schauer/12832 (aufgerufen am 28. August 2018)
- [27] J. MATTHEWS:
A Heitler model of extensive air showers, Astropart. Phys. 22 (2005).
- [28] LEV D. LANDAU, ISAAK J. POMERANCHUK:
Limits of applicability of the theory of bremsstrahlung electrons and pair production at high-energies. Dokl. Akad. Nauk Ser. Fiz. 92: 535 (1953).
- [29] PAVEL A. ČERENKOV:
Vidimoe svechenie chistyh zhidkostej pod dejstviem γ -radiacii, Doklady Akademii Nauk SSSR 2 (1934), pp. 451–454.
- [30] ILYA FRANK, IGOR TAMM:
Coherent visible radiation from fast electrons passing through matter, C. R. Acad. Sci. USSR 14 (1937) pp.109-114
- [31] PIERRE AUGER COLLABORATION:
The Pierre Auger Observatory Upgrade - Preliminary Design Report, arXiv:1604.03637 [astro-ph.IM].
- [32] O. C. ALKOFER:
Introduction to Cosmic Radiation, Verlag Karl Thieme, München (1975)
- [33] PIERRE AUGER COLLABORATION:
Trigger and aperture of the surface detector array of the Pierre Auger Observatory, Nucl. Instrum. Meth. A (2010), vol. 613(1): pp. 29–39.
- [34] <http://www.auger.de/public/sd.html> (aufgerufen am 29. August 2018)
- [35] BERNHARD SCHMIDT:
Ein lichtstarkes komafreies Spiegelsystem. Mitteilungen der Hamburger Sternwarte in Bergedorf (1938), vol. 7: pp. 15–17.
- [36] <http://www.ung.si/en/research/cac/projects/auger/> (aufgerufen am 29. August 2018)
- [37] PIERRE AUGER COLLABORATION:
Observation of the suppression of the flux of cosmic rays above 4×10^{19} eV, Phys. Rev. Lett. 101, 061101 (2008), arXiv:0806.4302

- [38] PIERRE AUGER COLLABORATION:
Upper limit on the diffuse flux of UHE tau neutrinos from the Pierre Auger Observatory, Phys. Rev. Lett. 100, 211101 (2008), arXiv:0712.1909
- [39] PIERRE AUGER COLLABORATION:
An upper limit to the photon fraction in cosmic rays above 10^{19} eV from the Pierre Auger Observatory, Astropart. Phys. 27, 155 (2007), astro-ph/0606619
- [40] PIERRE AUGER COLLABORATION:
Measurement of the Depth of Maximum of Extensive Air Showers above 10^{18} eV, Phys. Rev. Lett. 104, 091101 (2010), arXiv:1002.0699.
- [41] RALF ULRICH, JOHANNES BLÜMER, RALPH ENGEL, FABIAN SCHÜSSLER, MICHAEL UNGER:
On the measurement of the proton-air cross section using air shower data, New J. Phys. 11, 065018 (2009), arXiv:0903.0404.
- [42] PIERRE AUGER COLLABORATION:
Measurement of the proton-air cross-section at $\sqrt{s}=57$ TeV with the Pierre Auger Observatory, Phys. Rev. Lett. 109, 062002 (2012), arXiv:1208.1520.
- [43] ROY J. GLAUBER, GIORGIO MATTHIAE:
High-energy scattering of protons by nuclei, Nucl. Phys. B21, 135 (1970).
- [44] RALPH ULRICH, RALPH ENGEL, MICHAEL UNGER:
Hadronic Multiparticle Production at Ultra-High Energies and Extensive Air Showers, Phys. Rev. D83, 054026 (2011), arXiv:1010.4310.
- [45] RALPH ENGEL, DIETER HECK, TANGUY PIEROG:
Extensive Air Showers and Hadronic Interactions at High Energy, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 61, 467 (2011).
- [46] BALÁZS KÉGL FOR THE PIERRE AUGER COLLABORATION:
Measurement of the muon signal using the temporal and spectral structure of the signals in surface detectors of the Pierre Auger Observatory, Proc. of 33rd Int. Cosmic Ray Conf., Rio de Janeiro, Brazil 2013), arXiv:1307.5059.
- [47] L. CAZON, R. A. VAZQUEZ, E. ZAS:
Depth Development of Extensive Air Showers from Muon Time Distributions, Astropart. Phys. 23, 393 (2005), astro-ph/0412338.
- [48] THOMAS K. GAISSER, ANTHONY MICHAEL HILLAS:
Reliability of the method of constant intensity cuts for reconstructing the average development of vertical showers, Proceedings of the 15th International Cosmic Ray Conference, Plovdiv, Bulgaria 8 (1977) 353
- [49] PIERRE AUGER COLLABORATION:
Estimate of the non-calorimetric energy of showers observed with the fluorescence

and surface detectors of the Pierre Auger Observatory, [233], p. 11. arXiv:1307.5059 [astro-ph.HE].

- [50] TIM-PHILIP HÜCKING:
Entwicklung von Analysesoftware zum Test der neuen Oberflächendetektorelektronik des Pierre-Auger-Observatoriums, Bachelorarbeit, Universität Siegen (2017).
- [51] TIINA SUOMIJÄRVI FOR THE SDEU COMMITTEE:
Surface Detector Electronics Upgrade Plan, Internes Dokument der Pierre-Auger-Kollaboration (2013)
- [52] MARCO VOGT FÜR AUGERUPGRADE GRUPPE DER UNIVERSITÄT SIEGEN:
Fast Versatile and Programmable Multichannel Arbitrary Signal Generator, Vortrag im Rahmen des HAP-Workshop, Mainz (2016).
- [53] JOSHUA FUHRMANN:
Persönliche Mitteilung, Siegen, August 2018.
- [54] LEV D. LANDAU:
On the energy loss of fast particles by ionization, J. Exp. Phys., USSR (1944).
- [55] PATRICK STASSI:
SDEU UUB Test System Production Readiness Review Report, V2, Internes Dokument der Pierre-Auger-Kollaboration (2017)
- [56] PATRICK STASSI:
Surface Detector Electronics Upgrade Specification, Internes Dokument der Pierre-Auger-Kollaboration, WP10LPSC03I, (2012).
- [57] www.ebay.de/itm/2x-Reverse-Adapter-RP-SMA-Stecker-auf-SMA-Buchse-GPS-WLAN-Antenne-vergoldet-NEU-/263902635652?oid=263766278558(aufgerufen am 7. Oktober 2018)
- [58] DAVID F. NITZ:
UUB V2 Analog Performance. Internes Dokument der Pierre-Auger-Kollaboration, GAP2018_019 (2018)
- [59] DAVID F. NITZ:
Persönliche Mitteilung, März, 2017.

H. Danksagung

Zuletzt möchte ich mich bei einigen Personen bedanken, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben.

Besonderer Dank gilt:

- Prof. Dr. Peter Buchholz, der mir die Möglichkeit gegeben hat, an diesem interessanten und vielseitigen Projekt Testsystem mitzuarbeiten. Sein hartnäckiges Nachfragen bei den gemeinsamen Besprechungen hat sehr zu meinem Verständnis der Thematik beigetragen und mich viel über wissenschaftliches Arbeiten gelehrt.
- Dr. Qader Dorosti, der wertvolle Beiträge bei der Diskussion der Cut-Parameter lieferte.
- Tim-Philip Hücking für die nette Arbeitsatmosphäre im Büro und vor allem dafür, dass er mir mit seinem Wissen rund um ROOT, Python, \LaTeX , nützliche Konsolenbefehle und statistische Datenanalyse bei der Erstellung dieser Arbeit stets zur Seite stand.
- Dr. Michael Ziolkowski, der mir bereits im Fortgeschrittenenpraktikum viel über die Detektion kosmischer Strahlung erklärt hat. Er ermutigte mich auch dazu, meine Bachelorarbeit im Rahmen des Upgrades des Pierre-Auger-Observatoriums zu schreiben.
- Meinen Kommilitonen und guten Freunden Joshua Fuhrmann, Alexander Schicke, Florian Sledz und Dina Wilks, die wie ich einen Großteil ihrer vorlesungsfreien Zeit an der Uni verbracht haben, für die unterhaltsamen Kaffeepausen.
- Meinem Freund Michael Gaida für die vielen ermutigenden Worte und Nachrichten.
- Meinen Eltern, die mir das Studium ermöglichen, mich seit frühester Kindheit gefördert haben und jede meiner Entscheidungen begleiten, akzeptieren und unterstützen, sowie meinem Bruder Eric, der stets für unterhaltsame Ablenkung und sportlichen Ausgleich sorgte.

Danke!

I. Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Bachelor-Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt, sowie Zitate und Ergebnisse Anderer kenntlich gemacht habe.

(Datum)

(Ort)

(Unterschrift)