

Untersuchung der Feldverzerrungen bei InGrid-basierten Pixelchips

Katrin Kohl

Bachelorarbeit in Physik
angefertigt im Physikalischen Institut

vorgelegt der
Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der
Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität
Bonn

August 2014

Danksagung

Ich danke Prof. Dr. Klaus Desch für die Möglichkeit diese Bachelorarbeit zu verfassen. Weiterhin danke ich der gesamten Arbeitsgruppe, insbesondere Dr. Jochen Kaminski, Michael Lupberger, Alexander Deisting und Martin Rogowski für ihre tatkräftige Unterstützung und Hilfe in jeder Situation.

Ich versichere, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie die Zitate kenntlich gemacht habe.

Bonn,

Datum

.....

Unterschrift

1. Gutachter: Prof. Dr. Klaus Desch
2. Gutachter: Dr. Jochen Kaminski

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	6
2	Grundlagen	7
2.1	International Linear Collider und International Large Detector . . .	7
2.2	Spurendriftkammer (TPC)	7
2.3	Timepix Chip und Gitter	7
2.4	Wechselwirkung ionisierender Strahlung mit Materie	8
3	Aufbau und Verfahren zur Reduzierung der Feldverzerrungen	9
4	Simulation	12
5	Messung der Belegungsdichte der Chips	15
5.1	Messaufbau	15
5.2	Messung ohne Aluminium	15
5.2.1	Variation der Anodenspannung	15
5.2.2	Variation der Gitterspannung	16
5.2.3	Variation des Driftfeldes	17
5.3	Messung mit Aluminium	18
5.3.1	Variation der Anodenspannung	18
5.3.2	Variation der Gitterspannung	19
5.3.3	Variation des Driftfeldes	19
5.4	Vergleich der Messungen	20
6	Fazit	24
7	Anhang	25
7.1	Abbildungen	25
7.2	Tabellen	37
	Literaturverzeichnis	42

1 Einleitung

Die Teilchenphysik dringt in immer kleinere Strukturen vor und benötigt dazu immer höhere Energien. Dementprechend werden auch die Beschleuniger und Detektoren immer größer und die Auslesestrukturen immer kleiner. Da bei Ringbeschleunigern durch Synchrotronstrahlung, ab einer gewissen Energie, die Verluste so hoch sind, dass der Betrieb nicht mehr wirtschaftlich ist, werden für höhere Energien Linearbeschleuniger geplant. Neben den steigenden Energien soll auch die Genauigkeit der Detektoren steigen. Eine Möglichkeit ist die Verwendung von Pixeldetektoren, nicht nur im Inneren, sondern auch weiter außen in der Spurrekonstruktion. Insbesondere zum Nachweis von Teilchen in Spurendriftkammern (TPC). Hierbei wird Wert auf die Nutzung der gesamten Detektorfläche gelegt. Da die Chips in einer TPC den unterschiedlichen elektrischen Feldern des Driftbereiches und des Gasverstärkungsbereiches ausgesetzt sind, entstehen an den Übergängen zwischen den Chips Verzerrungen. Diese Feldverzerrungen verändern die Bahn der Elektronen, sodass auf den Chips tote Bereiche entstehen, in denen nichts detektiert wird. Ziel dieser Arbeit wird es sein diese Verzerrungen zu reduzieren.

2 Grundlagen

2.1 International Linear Collider und International Large Detector

Der ILC ist ein linearer Elektron-Positron Beschleuniger mit einer maximalen Schwerpunktsenergie von 500 GeV bis 1 TeV. Er ist 31 km lang und besteht hauptsächlich aus 2 Linearbeschleunigern, einer für Positronen und einer für Elektronen. Beide sind 11 km lang. Um den Wechselwirkungspunkt der beiden Beschleuniger werden zwei Detektoren gebaut, der International Large Detector (ILD) und der Silicon Detector (SiD)[1].

Der ILD ist in verschiedenen Lagen aufgebaut. Die innerste, mit einem Radius von wenigen cm, besteht aus hochauflösenden Silizium Pixel Sensoren. Darum herum befindet sich eine Spurendriftkammer (englisch *Time Projection Chamber* kurz TPC), ein gasbasierter Spurdetektor. Diese wird von Silizium-Streifen-Detektoren und schließlich von Kalorimetern umschlossen. In diesen Schichten aus Wolfram und Stahl verlieren Teilchen Energie, sodass sie in den dazwischen angeordneten Siliziumdetektoren oder Szintillatoren detektiert werden können[1].

2.2 Spurendriftkammer (TPC)

Eine TPC ist in der Regel ein gasgefüllter Zylinder. Das Volumen wird in der Mitte durch eine negative Elektrode geteilt und bildet so zwei Driftbereiche. Ionisierende Strahlung erzeugt im Gas freie Elektronen, die durch das Driftfeld zu den Anoden bzw. den Endkappen beschleunigt werden. Durch Stöße mit dem Gas werden sie abgebremst, sodass eine konstante Driftgeschwindigkeit entsteht. Aus dieser und dem Ort des Auftreffens auf die Anode lässt sich der Ort der Ionisation und damit die Spur des ionisierenden Teilchens rekonstruieren [2].

Typischerweise werden zum Nachweis der Elektronen an den Anoden Vieldrahtproportionalkammern verwendet. In diesen werden die Elektronen zu Drähten hin beschleunigt, dabei erhalten sie genügend Energie um selbst wieder ionisierend zu wirken und sogenannte Sekundärelektronen auszulösen. Die Verstärkung macht die Elektronen erst messbar, da diese im Draht einen Strom erzeugen.

Ein neuer Ansatz ist die Verwendung von Pixelchips. Diese bieten insbesondere bei gleichzeitig auftretenden Teilchen eine bessere Ortsauflösung. Die Gasverstärkung kann hier entweder vor, oder direkt auf den Chips angebracht werden[2].

2.3 Timepix Chip und Gitter

Beim Timepix Chip handelt es sich um einen 256 x 256 Pixel Chip. Jeder Pixel hat eine Größe von $55 \mu\text{m} \times 55 \mu\text{m}$, was zu einer aktiven Fläche von $(1,4 \text{ cm})^2$ führt. Mit dem Timepix Chip ist sowohl eine Ladungsmessung, als auch eine Messung der Ankunftszeit, ebenso wie ein Zählen der Treffer möglich[3].

Die Elektronik des Chips ist in zwei Blöcke gespalten, den digitalen und den analogen. Der analoge Teil besteht aus einem Vorverstärker und einem Diskriminator. Trifft Ladung auf den Pixel, so wird sie aufintegriert und verstärkt. Ist das Signal höher als die Schwelle des Diskriminators, so gibt dieser ein digitales Signal aus, dessen Länge proportional von der Ladung des Signals abhängt.

Im digitalen Teil wird einer der drei Arbeitsmodi eingestellt und das Signal des Diskriminators entsprechend verarbeitet. Dazu wird eine externe "reference clock" benötigt,

die das Zählen und Zeitmessen erst ermöglicht[3].

Zur Ladungsverstärkung wird auf den Chip ein Gitter oder auch InGrid (kurz für *Integrated Grid*) aufgebracht. Dabei handelt es sich um ein etwa $1\ \mu\text{m}$ dickes Lochgitter aus Aluminium, das $50\ \mu\text{m}$ über dem Chip angebracht wird. Der Lochdurchmesser beträgt $30\ \mu\text{m}$, ebenso wie der Durchmesser der Säulen, die das Gitter tragen. Am Rand wird das Gitter zusätzlich von einem Rahmen unterstützt. Hier befinden sich keine Löcher und ein Teil der aktiven Fläche des Chips wird abgedeckt. Der Rahmen hat eine Breite von etwa $500\ \mu\text{m}$, davon werden $300\ \mu\text{m}$ - $400\ \mu\text{m}$ vom Gitter überdeckt. Der Rahmen besteht, ebenso wie die Säulen, aus SU-8, einem Fotoresist.

Zwischen dem Gitter und dem Chip liegt ein starkes elektrisches Feld an, das für Gasverstärkung sorgt, indem es die Elektronen so stark beschleunigt, dass sie das Gas ionisieren und den Chip schließlich nicht nur ein Elektron, sondern ein größerer Stromimpuls erreicht. Die Gasverstärkung liegt in der Größenordnung 10^3 . Der kleine Abstand zwischen Gitter und Auslesefläche des Chips sorgt dafür, dass jedes Elektron, das durch ein Loch fliegt und dort verstärkt wird, nur auf dem darunter liegenden Pixel detektiert wird. [4].

2.4 Wechselwirkung ionisierender Strahlung mit Materie

Ionisierend wirken können sowohl Photonen, als auch geladene Teilchen und freie Neutronen.

Photonen können direkt ionisieren, indem sie durch den Photoeffekt Elektronen aus Atomhüllen lösen. Dabei muss die Photonenenergie größer als die Bindungsenergie der Elektronen sein. Jedes Photon löst nur ein Elektron aus und wird dabei absorbiert. Photonen können auch über Compton-Streuung wechselwirken und indirekt ionisieren, indem sie mit den Hüllenelektronen elastisch stoßen und soviel Energie übertragen, dass diese wiederum selbst ionisierend werden. Die dritte Möglichkeit ist die Paarbildung. Besitzt ein Photon genügend Energie kann es in ein Teilchen-Antiteilchenpaar zerfallen.

Neutronen können mit Materie wechselwirken, indem sie elastisch mit Atomkernen stoßen, sodass diese kinetische Energie erhalten und selbst ionisieren, oder durch inelastische Stöße mit den Atomkernen, wodurch diese angeregt werden.

Treffen geladene Teilchen auf Materie stoßen sie inelastisch mit den Elektronen der Atomhüllen, dadurch können die Atome angeregt, oder bei genügend hoher Energie ionisiert werden. Dabei können die herausgelösten Elektronen soviel Energie erhalten, dass sie erneut ionisieren. Sie werden als δ -Elektronen bezeichnet. Sind die Teilchen schwer genug, können sie wie Neutronen auch mit den Atomkernen stoßen. Bei Elektronen wird neben inelastischen Stößen ein weiterer Effekt relevant. Durch ihre geringe Masse werden sie vom Coulombfeld der Atomkerne abgelenkt und beschleunigt und emittieren daher elektromagnetische Strahlung [5].

3 Aufbau und Verfahren zur Reduzierung der Feldverzerrungen

Zur einfacheren Handhabung werden immer 8 Chips zu einem sogenannten Octo-board zusammengefasst. Sie werden in zwei Reihen à vier Spalten angeordnet. Bei einem solchen Octo-board sollen in dieser Arbeit die Feldverzerrungen untersucht werden. Zwischen den Chips entstehen Lücken von $24\text{ }\mu\text{m}$ - $117\text{ }\mu\text{m}$. Die genauen Maße sind in Abb. 3.1 dargestellt, ebenso die Anordnung der Chips in der X-Y-Ebene. Dabei wird deutlich, dass die Abstände in Y-Richtung etwas größer sind als in X-Richtung. Dies liegt vor allem an der Bauart des Chips.

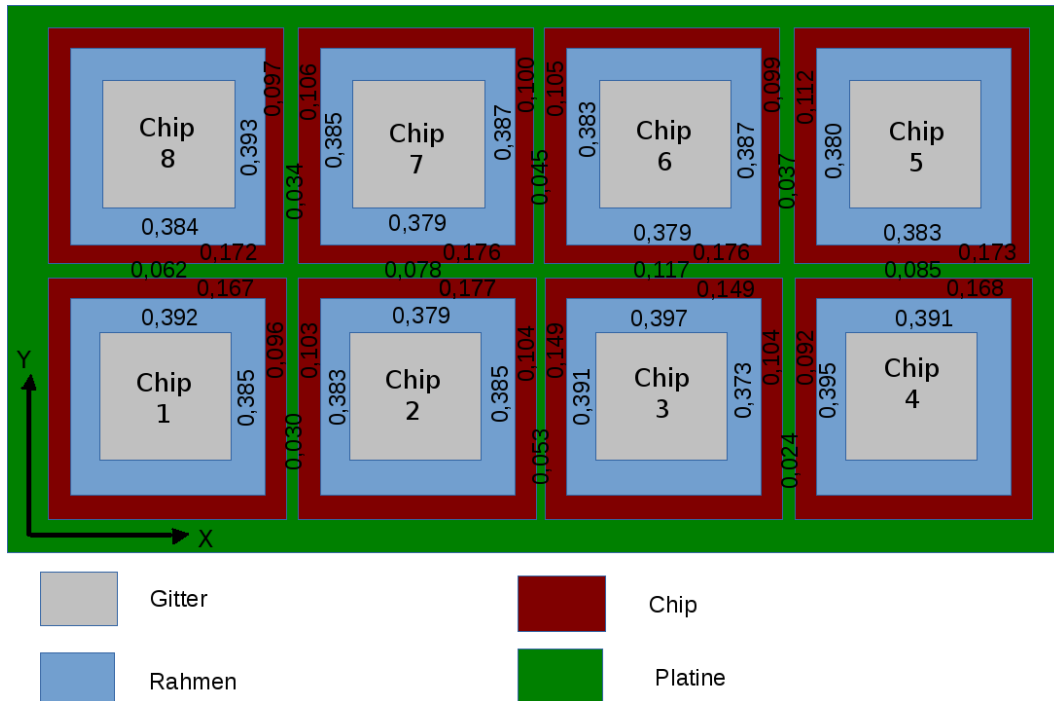


Abb. 3.1: Schematische Darstellung des Octoboards mit den Breiten der Lücken, der überstehenden Chips und des Rahmens. Alle Maße sind in mm angegeben. Die Größenverhältnisse sind nicht maßstabsgetreu.

Das Oktoboard wird zum Nachweis von Teilchen in einer TPC eingebaut. Im Detektor wird um das Oktoboard herum eine Anodenplatte angebracht. Diese befindet sich etwa $1,52\text{ mm}$ über den Gittern. Die Chips sind geerdet und am Gitter wird eine hohe Spannung (Größenordnung 300 V) zur Gasverstärkung angelegt. Zwischen der Kathode und dem Grid wird ein Driftfeld von etwa $100\frac{\text{V}}{\text{cm}}$ - $300\frac{\text{V}}{\text{cm}}$ eingestellt. Das Potential der Anode wird so angepasst, dass es dem Potential des Driftfeldes an dieser Stelle entspricht. Der prinzipielle Aufbau ist in Abb. 3.2 dargestellt.

Idealerweise ist das Driftfeld über dem gesamten Octo-board homogen. Die Lücken zwischen den Chips sorgen jedoch für Verzerrungen, da dort das hohe Feld der Gasverstärkungsregion nicht aufrechterhalten wird. Das Verhalten der Felder an dieser Stelle wird in Kapitel 4 simuliert und die Ergebnisse der Messungen werden in Kapitel 5 beschrieben.

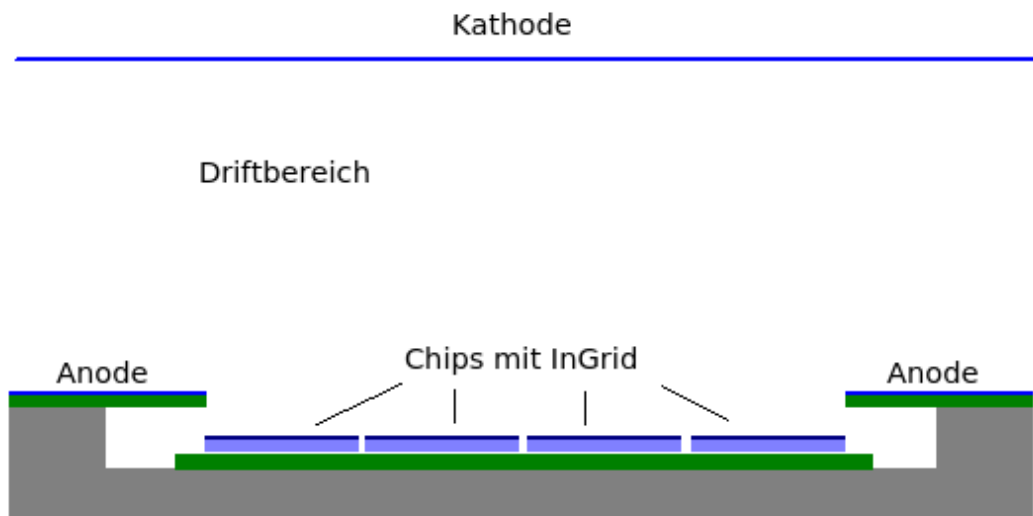


Abb. 3.2: Schematische Darstellung des Octoboards im Detektor.

Um die Feldverzerrungen zu reduzieren muss das Potential der Gitter auch über den Lücken gegeben sein. Um das zu realisieren eignen sich Streifen aus Aluminiumfolie, die über den Lücken angebracht und mit dem Gitter leitend verbunden werden. Aluminiumfolie ist günstig erhältlich und hat nur eine Dicke von $15\ \mu\text{m}$ - $17\ \mu\text{m}$. Da die Gitter am Rand von einem Rahmen umgeben sind bietet dieser sich als Auflage für die Aluminiumfolie an. Die Maße in Abb. 3.1 zeigen, dass die Streifen eine Breite von etwa einem Millimeter haben müssen, um auf beiden Seiten auf dem Rahmen aufzuliegen. Die Befestigung erfolgt mittels Silberleitkleber des Typs E-Solder 3025. In kleinen Tropfen wird die mit Klebeband positionierte Folie an den Ecken der Chips auf dem Rahmen fixiert. Zunächst wird das Kreuz in der Mitte geklebt, dann werden die Streifen mit einer Schere auf die richtige Länge geschnitten und an den äußeren Ecken geklebt. Das Ergebnis ist in Abb. 3.3 sichtbar.

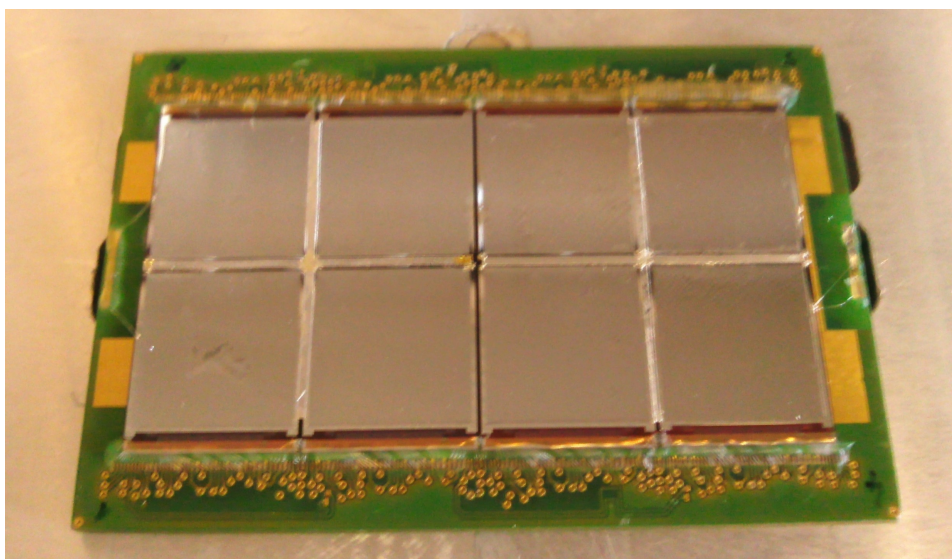


Abb. 3.3: Foto des mit Aluminiumstreifen beklebten Oktoboards.

Da die Chips bei der Herstellung des Oktoboards unterschiedlich tief in den Kleber auf der Platine einsinken ergeben sich schließlich Höhenunterschiede von mehreren $10\ \mu\text{m}$. Dadurch liegen die Aluminiumstreifen nicht mehr überall auf dem Rahmen auf. Dies führt vermutlich dazu, dass der Silberleitkleber unter die Folie und in die Lücke hineinläuft und dort eine leitende Verbindung zwischen Chip und Gitter herstellt. Die Hochspannungsquelle zeigt einen Strom von $0,03\ \text{mA}$ an, bei einer Gitterspannung in der Größenordnung $300\ \text{V}$ ergibt sich ein Widerstand von $10\ \text{M}\Omega$. Dies entspricht genau dem Schutzwiderstand. Es steht also keine Spannung mehr zur Gasverstärkung zur Verfügung, da diese komplett über den Schutzwiderstand abfällt. Dies wird sich später bei den Messungen negativ auswirken, da die fehlende Spannung zu Feldverzerrungen führt.

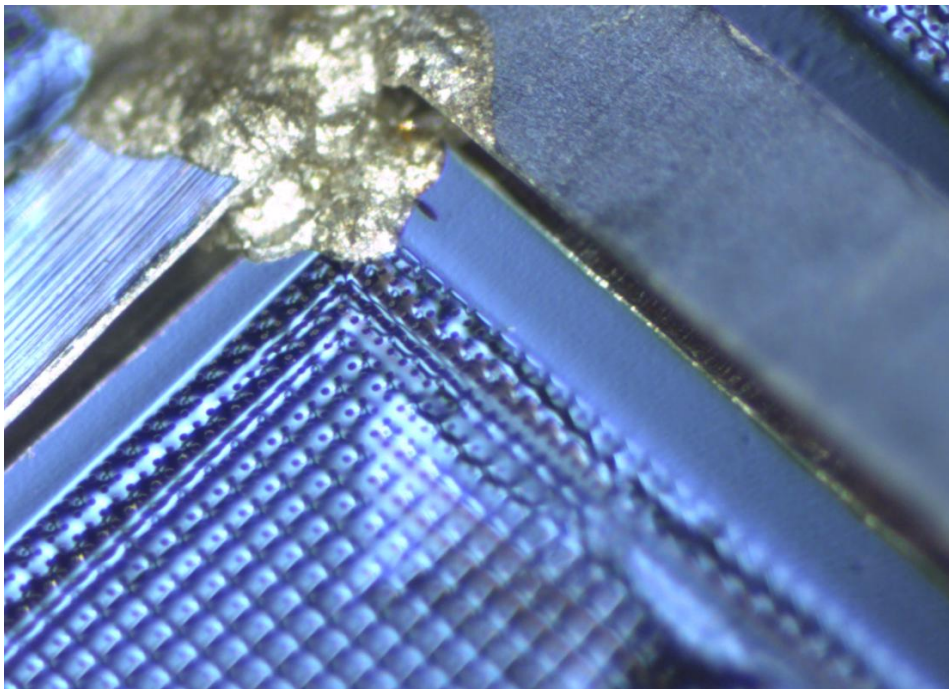


Abb. 3.4: 20-fache Vergrößerung der Klebestelle, an der der Silberleitkleber unter die Folie gelaufen ist.

Wahrscheinlich ist der Silberleitkleber nicht die beste Wahl um die Aluminiumstreifen zu befestigen. Um kleine Tropfen herstellen zu können, muss der Kleber mit Isopropanol verdünnt werden. Dadurch wird er so flüssig, dass die Tropfen zerfließen und unter die Folie in die Lücke gelangen können. Bei einem nichtleitenden Kleber ist die Gefahr deutlich geringer, dass eine solche Verbindung zwischen Gitter und Chip entsteht. Der Kontakt der Alufolie mit dem Gitter durch Aufliegen, würde vermutlich ausreichen, um eine leitende Verbindung herzustellen. Sollte dies nicht ausreichen kann mit einem Tropfen Silberleitkleber an einer geeigneten Stelle ein Kontakt hergestellt werden.

4 Simulation

Die durch die Lücken zwischen den Chips verursachten Feldverzerrungen werden zunächst mit ANSYS simuliert. Dabei handelt es sich um ein Programm, in welchem geometrischen Formen Materialeigenschaften und elektrische Potentiale zugewiesen werden können. Das Programm legt ein Netz über den Aufbau. An den Knoten des Netzes wird die elektrische Feldstärke berechnet. Zwischen den Knoten wird das Feld interpoliert. Anhand dessen entwickelt das Programm eine Simulation der elektrischen Felder.

Dazu wird in dem Programm eine Nahaufnahme der Umgebung am Übergang zweier Chips aufgebaut. Für die Lücke wird eine Breite von $100\ \mu\text{m}$ angenommen. Von den Chips links und rechts davon werden jeweils $5\ \text{mm}$ betrachtet. Die Anodenplatte ist in diesem Aufbau nicht zu sehen und auch nicht relevant. Auch vom Driftfeld werden nur $5\ \text{mm}$ betrachtet. Dies reicht aus um die Feldverzerrungen zu beobachten. Der grundlegende Aufbau ist in Abb. 4.1 zu sehen. In diesem Aufbau befindet sich das Gitter $50\ \mu\text{m}$ über den Chips und reicht bis auf $200\ \mu\text{m}$ an den Rand heran. $300\ \mu\text{m}$ am Rand des Gitters werden später als Auflagefläche für die Aluminiumfolie verwendet. Um den Aufbau zu vereinfachen, werden die Säulen und der Rahmen aus SU-8 in der Simulation vernachlässigt. Da sie sich unter dem Gitter befinden und elektrisch nicht leiten, werden sie keinen großen Unterschied in den Feldverzerrungen machen.

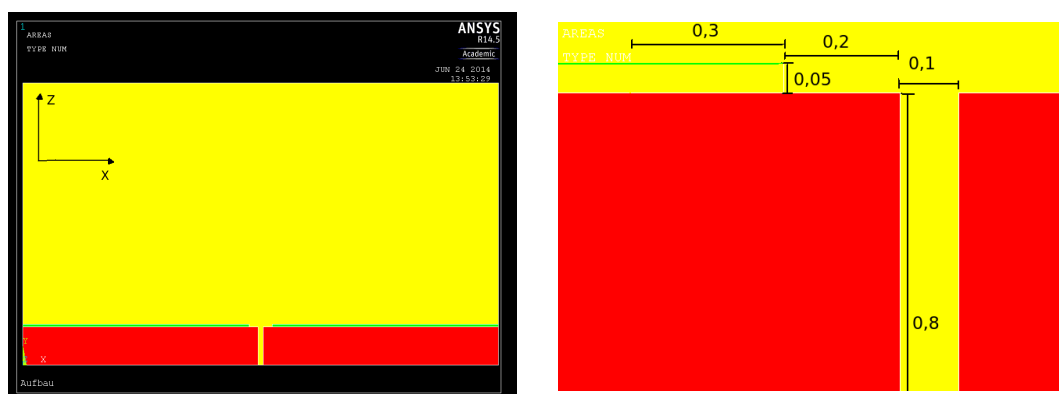


Abb. 4.1: Grundlegender Aufbau der Simulation. Das Gas ist gelb, die Chips rot und die Gitter grün dargestellt. In der Vergrößerung sind auch die verwendeten Maße in mm eingetragen.

Anschließend werden die Potentiale definiert. Die Chips und der Boden werden auf $0\ \text{V}$ gesetzt, die Gitter auf $350\ \text{V}$ und die Kathode auf $465\ \text{V}$, sodass zwischen Kathode und Gitter ein Driftfeld von $230\ \frac{\text{V}}{\text{cm}}$ besteht. Da die Gitter nur etwa $1\ \mu\text{m}$ hoch sind, wäre die Simulation eines zweidimensionalen Objektes sehr aufwendig, denn je kleiner das Objekt ist, desto feinmaschiger muss das Netz werden und das Programm die Felder berechnen. Aus diesem Grund werden für die Gitter lediglich Linien verwendet.

ANSYS stellt dann die entstehenden Felder und Verzerrungen entweder in X- oder in Z-Richtung dar (siehe Abb. 4.2). Wie erwartet ist in den Chips die Feldstärke $0\ \frac{\text{V}}{\text{cm}}$, ebenso gibt es kein Driftfeld in X-Richtung, jedoch eines in Z-Richtung von $230\ \frac{\text{V}}{\text{cm}}$ und ein sehr starkes Feld zwischen Gitter und Chip. In beiden Bildern sind weit in den Driftbereich reichende Feldverzerrungen sichtbar, die in Z-Richtung stärker

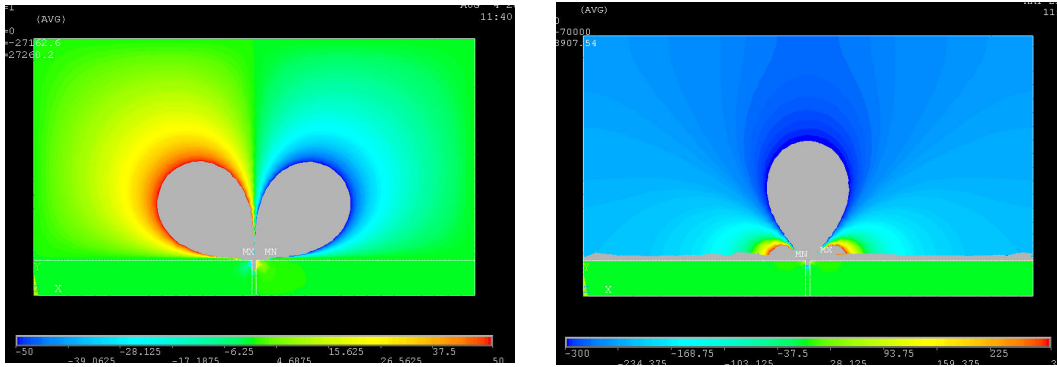


Abb. 4.2: ANSYS-Simulation der an den Lücken entstehenden Feldverzerrungen in X- und Z-Richtung. Die Skala reicht in X-Richtung von $-50 \frac{V}{cm}$ bis $50 \frac{V}{cm}$ und in Y-Richtung von $-300 \frac{V}{cm}$ bis $300 \frac{V}{cm}$. Mit dieser Skalierung ist in beide Richtungen möglichst viel der Verzerrungen sichtbar. In den grauen Bereichen liegt die Feldstärke außerhalb der Skala.

ausgeprägt sind als in X-Richtung. Es zeigt sich, dass Elektronen in die Lücke hineingezogen werden und somit verloren gehen, anstatt auf dem Chip zu landen und dort detektiert zu werden.

Zur Reduzierung der Feldverzerrungen wird ein $15 \mu m$ dicker und $1,1 mm$ breiter (Lücke plus Überstand) Streifen über die Lücke gelegt. Da der Streifen mit dem Gitter leitend verbunden ist, liegt er auf dem selben Potential.

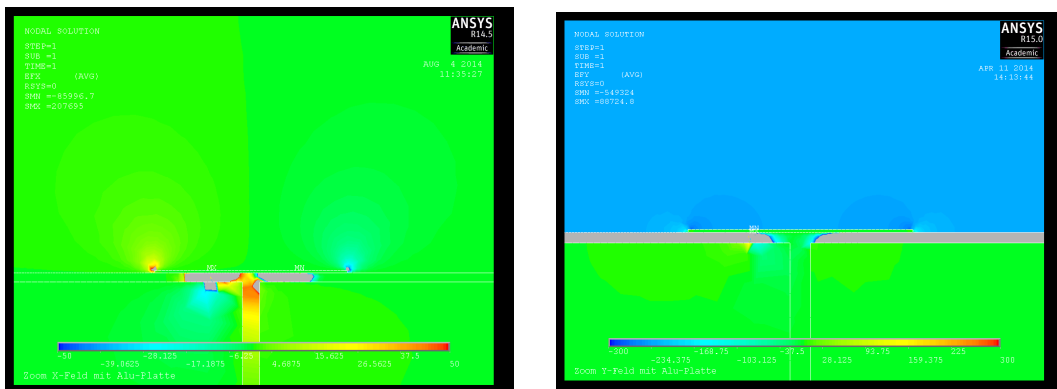


Abb. 4.3: ANSYS-Simulation der an den Lücken entstehenden Feldverzerrungen in X- und Z-Richtung. Über der Lücke ist ein $15 \mu m$ dicker Alustreifen angebracht. Die Skala reicht in X-Richtung von $-50 \frac{V}{cm}$ bis $50 \frac{V}{cm}$ und in Y-Richtung von $-300 \frac{V}{cm}$ bis $300 \frac{V}{cm}$. Die Feldverzerrungen sind so gering, dass sie nur durch vergrößern sichtbar sind.

Die Wirkung ist deutlich sichtbar, die weit ins Driftfeld hineinragenden Feldverzerrungen sind verschwunden, das Driftfeld ist nahezu homogen. Lediglich an den Kanten der Folie treten noch kleine Verzerrungen auf, die aber im Vergleich zu den vorher großen Blasen vernachlässigbar klein sind (siehe Abb. 4.3). Der Streifen ist hier $15 \mu m$ dick. Das entspricht etwa der Dicke einer handelsüblichen Alufolie. Bei einer dickeren Folie ($50 \mu m$) sind die Feldverzerrungen stärker, bei einer dünneren ($3 \mu m$) werden sie schwächer. Die Verbesserung ist aber bereits bei der normaler

Alufolie signifikant, sodass eine weitere Verbesserung bei einer dünneren Folie kaum feststellbar sein wird. Die Simulationen dazu befinden sich im Anhang (Abb. 7.1 und 7.3).

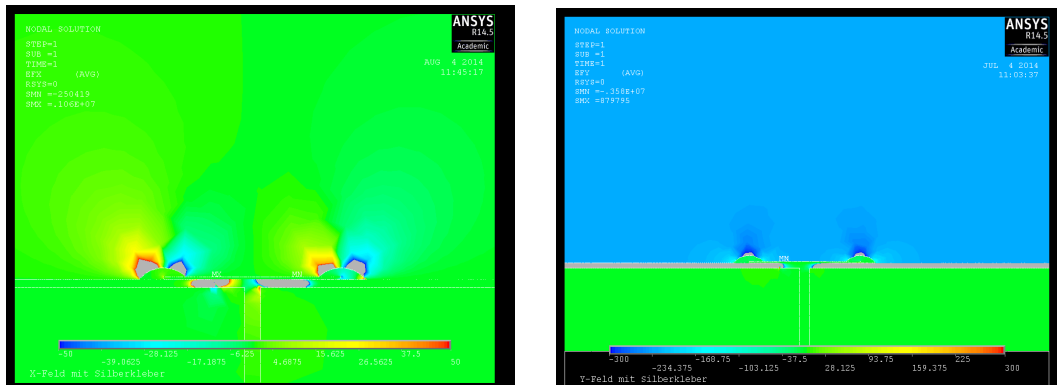


Abb. 4.4: ANSYS-Simulation der Feldverzerrungen in X- und Z-Richtung. Über der Lücke ist ein $15\ \mu\text{m}$ dicker Alustreifen angebracht. An den Rändern ist die Folie mit einem $300\ \mu\text{m}$ breiten und $70\ \mu\text{m}$ hohen Silberleitklebertropfen befestigt. Die Skala reicht in X-Richtung von $-50\ \frac{\text{V}}{\text{cm}}$ $-50\ \frac{\text{V}}{\text{cm}}$ und in Y-Richtung von $-300\ \frac{\text{V}}{\text{cm}}$ bis $+300\ \frac{\text{V}}{\text{cm}}$.

Die zur Befestigung verwendeten Silberleitklebertropfen stellt erneut eine Verformung der Oberfläche und eine Quelle von Feldverzerrungen dar. Sie werden als Kreissegmente von $30\ \mu\text{m}$ Höhe und $70\ \mu\text{m}$ Breite simuliert, die halb auf der Folie, halb auf dem Rahmen liegen. Die Feldverzerrungen sind stärker als an den Rändern der Folie, bleiben allerdings dennoch relativ schwach und wirken nur in geringem Umkreis (Abb. 4.4). Auch sie ziehen jedoch die Elektronen an, sodass die Klebeflächen möglichst klein gehalten werden sollten und an den Ecken angebracht werden, wo sie weniger stören. Insgesamt sind die Simulationen vielversprechend, sodass die Untersuchungen in die Realität übertragen werden.

5 Messung der Belegungsdichte der Chips

5.1 Messaufbau

Um einen Effekt der Aluminiumfolie auf die Feldverzerrungen zu beobachten wird die Belegungsdichte der Chips mit und ohne Alufolie gemessen. Dazu wird das Octo-board in einen Detektor (wie in Kapitel 3 bereits erwähnt) eingebaut. Über das Driftfeld wird möglichst mittig eine Sr 90-Quelle platziert. Die Elektronen aus dem β -Zerfall des Isotops ionisieren das Gas.

Maßgeblich für das elektrische Feld über dem Octo-board sind drei Parameter: Die Stärke des Driftfeldes, die Anodenspannung und die Gitterspannung. Dementsprechend werden drei Messungen durchgeführt, wobei jeweils zwei Parameter konstant bleiben und der dritte variiert wird. Anschließend wird das Octo-board mit den Aluminiumstreifen versehen und die Messungen erneut durchgeführt. So kann das Verhalten mit und ohne Aluminiumfolie verglichen werden.

5.2 Messung ohne Aluminium

5.2.1 Variation der Anodenspannung

Der Abstand zwischen Octo-board und Anodenplatte beträgt etwa 1,52 mm, daraus ließe sich die Anodenspannung berechnen, die dem Potential des Driftfeldes an dieser Stelle entspricht. Da die Chips aber unterschiedlich tief im Kleber liegen ist dieser Wert nicht exakt. Zur Kontrolle wird also die Anodenspannung bei konstanter Gitterspannung und konstantem Driftfeld zwischen 285 V und 445 V variiert um diesen Wert zu finden. Beispielhaft werden hier die Belegungsdichten von 285 V, 310 V, 315 V und 445 V dargestellt. Die nicht gezeigten befinden sich im Anhang (Abb. 7.4).

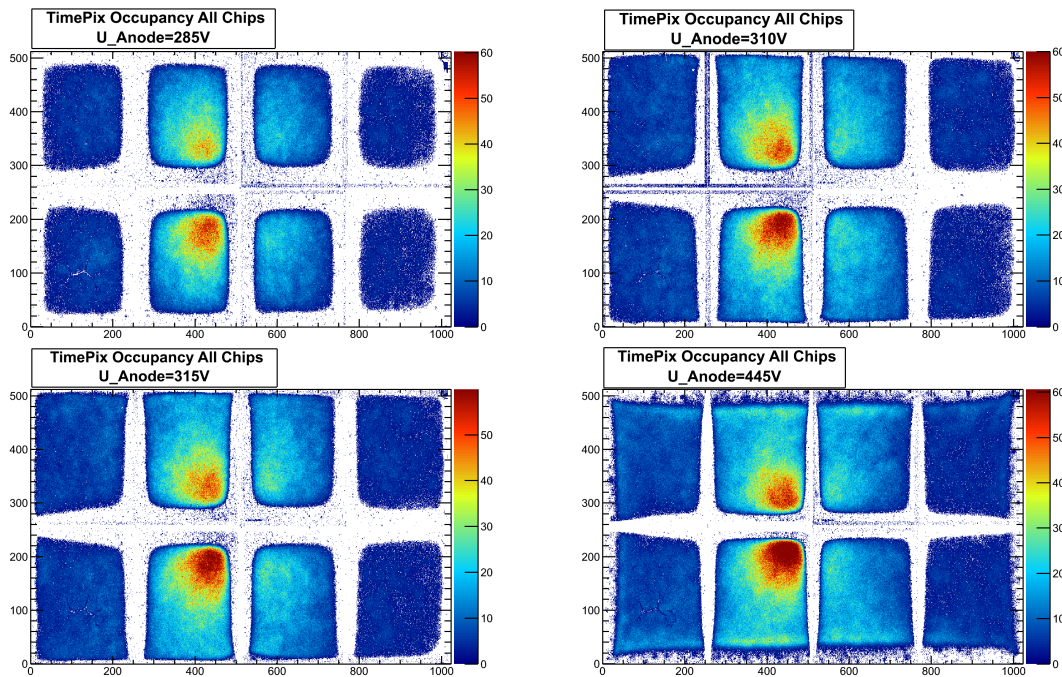


Abb. 5.1: Belegungsdichte für vier verschiedene Anodenspannungen. Die Spannung am Gitter (295 V) und das Driftfeld ($93 \frac{\text{V}}{\text{cm}}$) bleiben konstant.

In der Mitte des Octoboards zeigt die Betrachtung der Belegungsichte deutlich die von den Lücken verursachten Feldverzerrungen. Mit steigender Anodenspannung reichen die Elektronen zwar etwas näher an die Ränder der Chips heran, der Effekt ist jedoch nur gering. Außerdem zeigt sich, dass die Elektronen bei geringen Anodenspannungen nicht den äußeren Rand erreichen, da die an der Anode entstehenden Feldverzerrungen die Elektronen vom Chip ablenken. Bei höherer Anodenspannung werden die Elektronen von den Feldverzerrungen in die Chips hinein gedrückt. Die Betrachtung der Belegungsichte zeigt außerdem, dass die Fläche der Chips bei einer Anodenspannung von 315 V am gleichmäßigsten ausgeleuchtet wird. Dies entspricht einer Potentialdifferenz von 20 V zwischen Anode und Gitter. Die Berechnung aus eingestelltem Driftfeld und dem Abstand von 1,52 mm ergibt zwar eine Potentialdifferenz von 14,1 V, im weiteren werden jedoch die gemessenen 20 V verwendet.

5.2.2 Variation der Gitterspannung

Nach den Messungen zur Anodenspannung soll die Gitterspannung variiert werden. Allerdings ist in der Zwischenzeit das Octoboard beschädigt worden, möglicherweise durch einen Überschlag, sodass Chip 4 und 5 ausgetauscht wurden. Auch die Chips 1, 2, 3, 6 und 8 zeigen keine Signale mehr, da die Schwelle so hoch eingestellt werden muss, um Rauschen zu verhindern, dass auch die erwünschten Signale nicht mehr gemessen werden.

Die Gitterspannung wird zwischen 285 V und 315 V verändert, hier werden beispielhaft die Bilder zu 285 V, 295 V, 300 V und 315 V gezeigt.

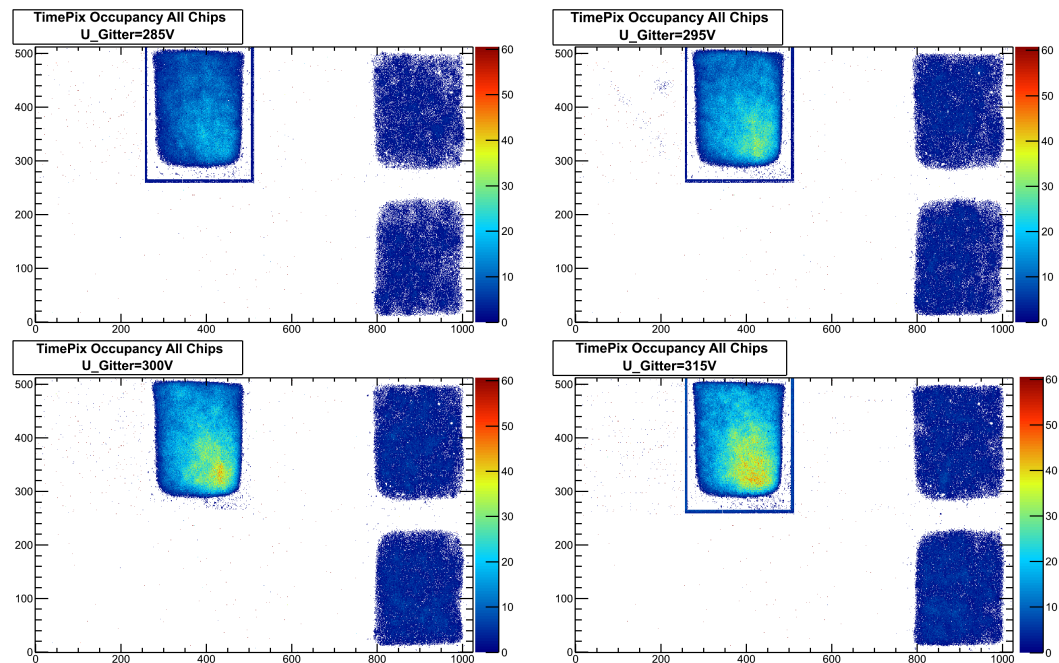


Abb. 5.2: Belegungsichte für vier verschiedene Gitterspannungen. Das Driftfeld ($93 \frac{\text{V}}{\text{cm}}$) und die entsprechende Anodenspannung bleiben konstant.

Die Veränderung der Gitterspannung zeigt kaum einen Effekt auf die Ausleuchtung des Chips. Der ausgemessene Bereich ist allerdings auch sehr gering. Neben den eigentlich beobachteten Signalen in der Mitte der Chips treten hin und wieder auch

Signale am Rand der Chips auf, an Stellen die vom Rahmen überdeckt werden. Diese entstehen, durch die größere Kapazität des Gitters an dieser Stelle, da die Löcher fehlen. So kann Ladung in den Chip induziert werden. Diese Signale sagen nichts über die Feldverzerrungen aus, das sie willkürlich bei allen Spannungen und Feldstärken auftreten. Sie werden daher nicht weiter berücksichtigt.

5.2.3 Variation des Driftfeldes

Schließlich wird auch das Driftfeld zwischen $50 \frac{\text{V}}{\text{cm}}$ und $1000 \frac{\text{V}}{\text{cm}}$ variiert. Um die jeweils entsprechende Anodenspannung zu berechnen wird ein Abstand von 1,52 mm angenommen. Während dieser Messreihe wurde eine stärkere Quelle eingesetzt, sodass die Zählrate ab $80 \frac{\text{V}}{\text{cm}}$ deutlich ansteigt. Auf diese Weise kann außerdem die Messung in kürzerer Zeit durchgeführt werden. Hier sind die Bilder zu $50 \frac{\text{V}}{\text{cm}}$, $90 \frac{\text{V}}{\text{cm}}$, $250 \frac{\text{V}}{\text{cm}}$ und $1000 \frac{\text{V}}{\text{cm}}$ gezeigt.

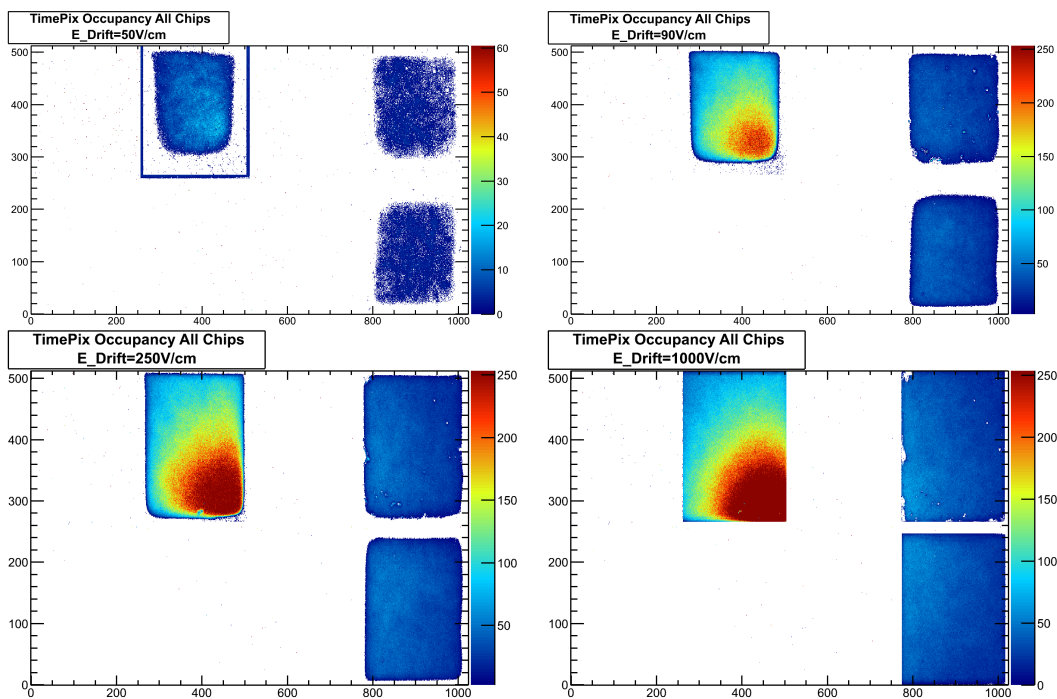


Abb. 5.3: Belegungsdichte für vier verschiedene Driftfelder. Die entsprechende Anodenspannung und die Gitterspannung sind konstant.

Bei der Variation des Driftfeldes zeigen sich die deutlichsten Veränderungen. Dies ist nicht verwunderlich, da die Gitterspannung nur um etwa 10% verändert wurde, während das Driftfeld um 2000% verändert wird. Bei kleinen Driftfeldern ist nur ein geringer Teil des Chips ausgeleuchtet, die Feldverzerrungen reichen über ein Viertel des Chips. Mit steigender Feldstärke erreichen die Elektronen immer größere Bereiche. Bei einem Driftfeld von $1000 \frac{\text{V}}{\text{cm}}$ ist der gesamte Chip ausgeleuchtet, die Feldverzerrungen sind nicht mehr sichtbar.

5.3 Messung mit Aluminium

Nach dem Anbringen der Aluminiumfolie werden die drei Messungen wiederholt. Bei allen wird diesmal die stärkere Quelle verwendet. Da beim Kleben vermutlich ein Kontakt zwischen Gitter und Chip entstand (wie in Kapitel 3 bereits diskutiert) zeigt nur noch Chip 7 brauchbare Ergebnisse. Die fehlende Spannung auf der rechten Hälfte des Oktoboards sorgt für Verzerrungen an der rechten Seite des 7. Chips, sodass diese für weitere Auswertungen unbrauchbar ist. Die restlichen drei Seiten sind davon jedoch nicht betroffen.

5.3.1 Variation der Anodenspannung

Wie oben wird die Anodenspannung von 285 V-445 V verändert, während die Gitterspannung und das Driftfeld konstant sind. Es werden auch wieder beispielhaft die Belegungsdichten von 285 V, 310 V, 315 V und 445 V gezeigt.

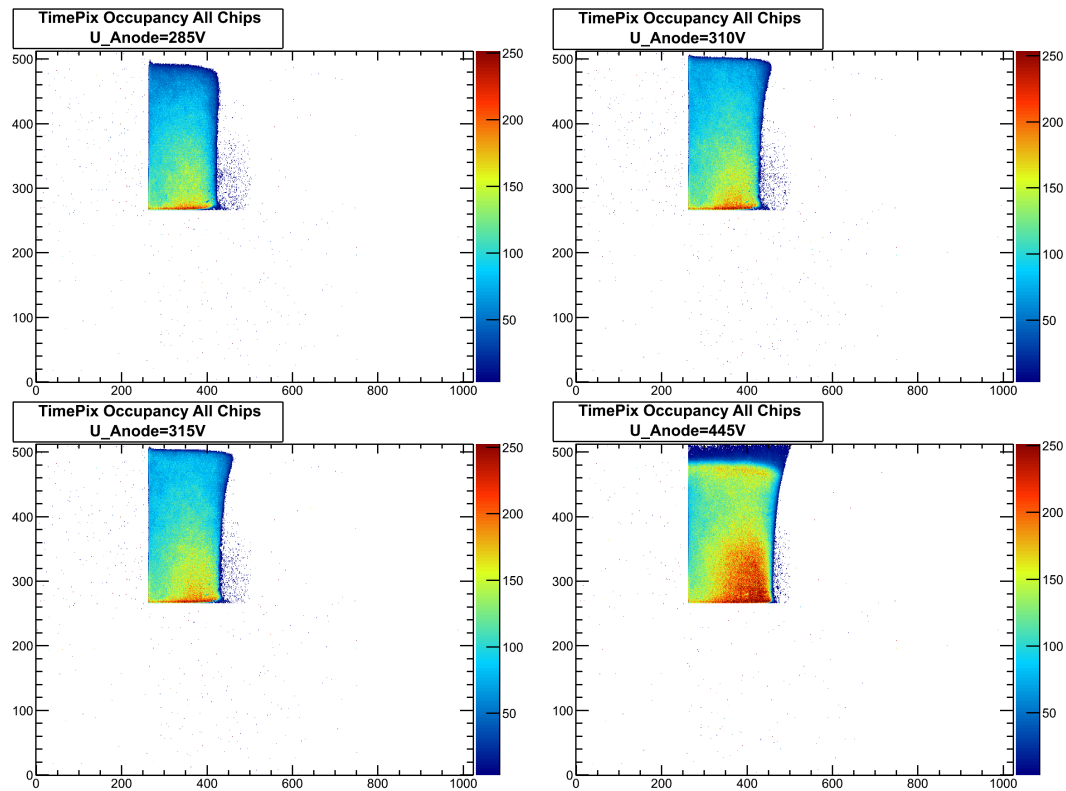


Abb. 5.4: Belegungsdichte für vier verschiedene Anodenspannungen bei angebrachten Aluminiumstreifen. Die Spannung am Gitter (295 V) und das Driftfeld ($93 \frac{\text{V}}{\text{cm}}$) bleiben konstant.

Gut erkennbar ist, dass an der linken und unteren Seite, wo sich die Folie befindet, der Chip bis zum Rand ausgeleuchtet ist, während er an der oberen Kante ein ähnliches Verhalten wie ohne Folie zeigt. Auch hier ist die Anodenspannung, bei der der Chip am besten ausgeleuchtet wird wieder 315 V, auch wenn das vierte Bild auf den ersten Blick einen anderen Eindruck erweckt. Hier tritt allerdings wieder der Effekt auf, dass bei hohen Anodenspannungen die Elektronen ins Innere des Chips gedrückt werden und nur noch einzelne den Rand erreichen.

5.3.2 Variation der Gitterspannung

Auch die Gitterspannung wird erneut zwischen 285 V und 315 V verändert, während Driftfeld und Anodenspannung konstant bleiben. Beispielhaft sind in Abb. 5.5 die Bilder zu 285 V, 295 V, 300 V und 315 V gezeigt.

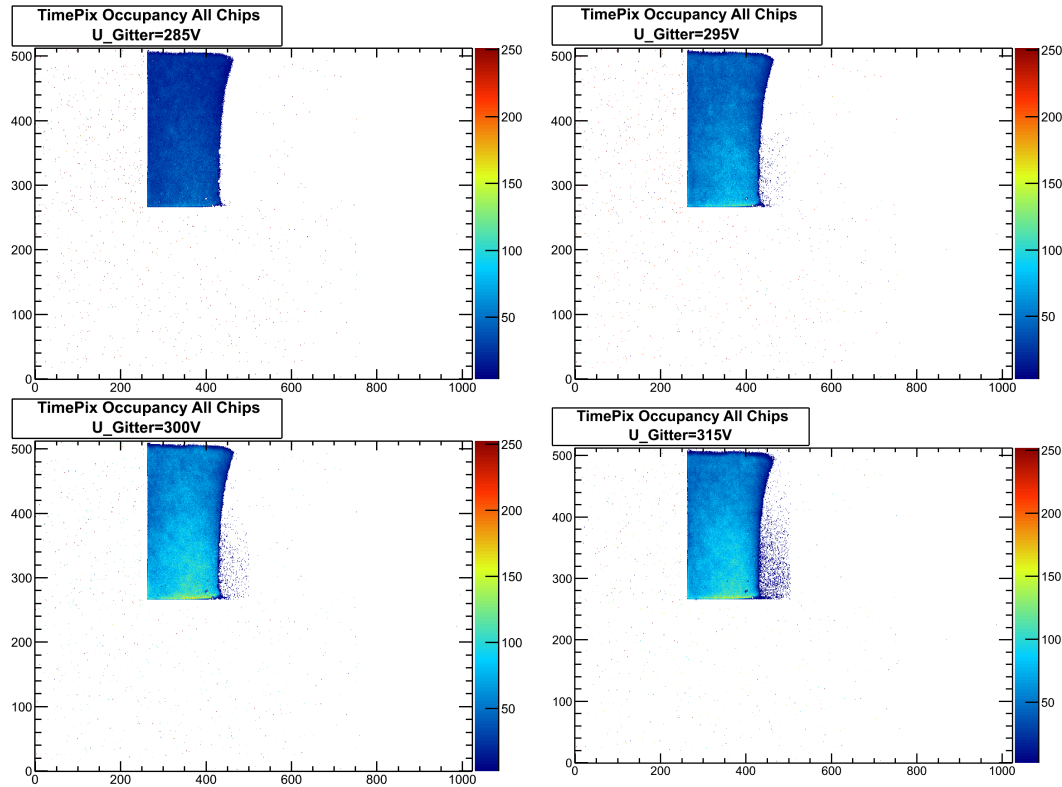


Abb. 5.5: Belegungsdichte für vier verschiedene Gitterspannungen. Das Driftfeld ($93 \frac{\text{V}}{\text{cm}}$) und die entsprechende Anodenspannung bleiben konstant.

Auch hier ist gut der Effekt der Aluminiumfolie zu sehen. An der linken und unteren Seite ist der Chip komplett ausgeleuchtet. Wie zuvor ist auch hier kaum eine Abhängigkeit von der Gitterspannung sichtbar. Lediglich die Zählrate steigt, da bei höherer Spannung auch die Gasverstärkung steigt.

5.3.3 Variation des Driftfeldes

Schließlich wird auch das Driftfeld wie zuvor von $50 \frac{\text{V}}{\text{cm}}$ - $1000 \frac{\text{V}}{\text{cm}}$ verändert, die Anodenspannung entsprechend eingestellt und die Gitterspannung ist konstant bei 295 V. Hier sind in Abb. 5.6 wieder die Bilder zu $50 \frac{\text{V}}{\text{cm}}$, $90 \frac{\text{V}}{\text{cm}}$, $250 \frac{\text{V}}{\text{cm}}$ und $1000 \frac{\text{V}}{\text{cm}}$ gezeigt.

Wie bei den anderen Messungen erreichen die Elektronen den Rand, an dem die Alufolie angebracht ist. Der obere Rand zeigt, wie zuvor auch, eine Abhängigkeit vom Driftfeld.

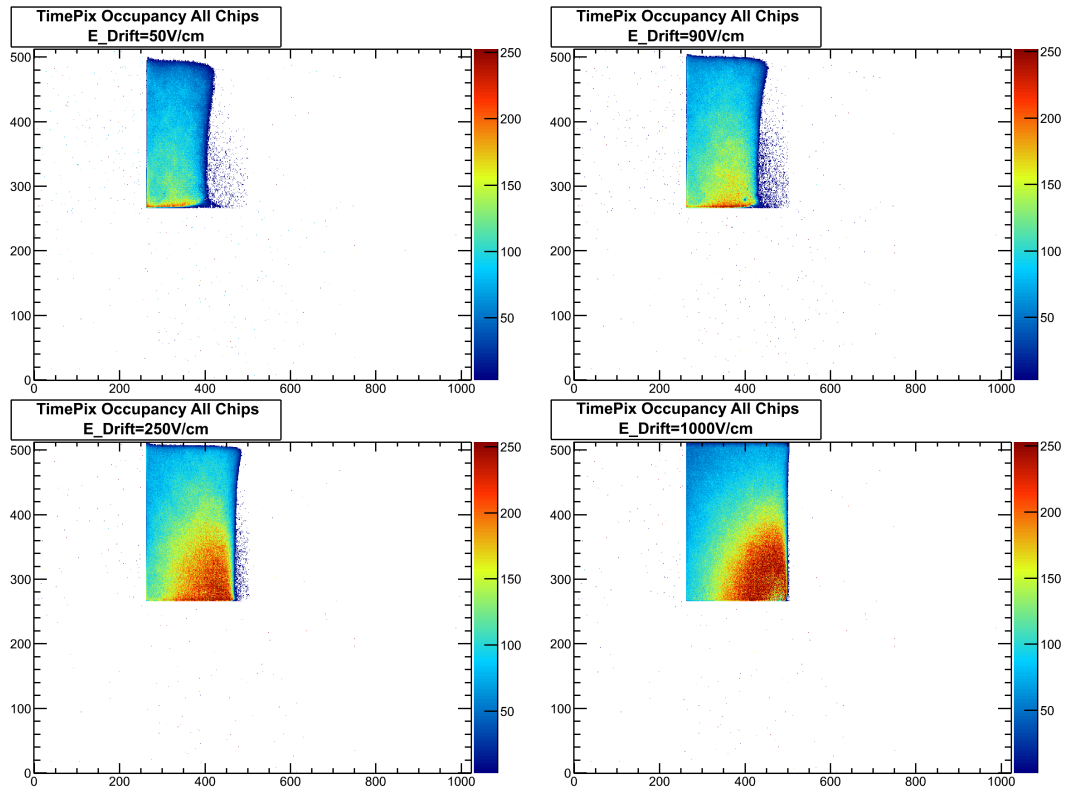


Abb. 5.6: Belegungsdichte für vier verschiedene Driftfelder. Die entsprechende Anodenspannung und die Gitterspannung sind konstant.

5.4 Vergleich der Messungen

Um die Auswirkungen der Alufolie quantitativ untersuchen zu können soll der Rand der ausgeleuchteten Zone auf den Chips vermessen werden.

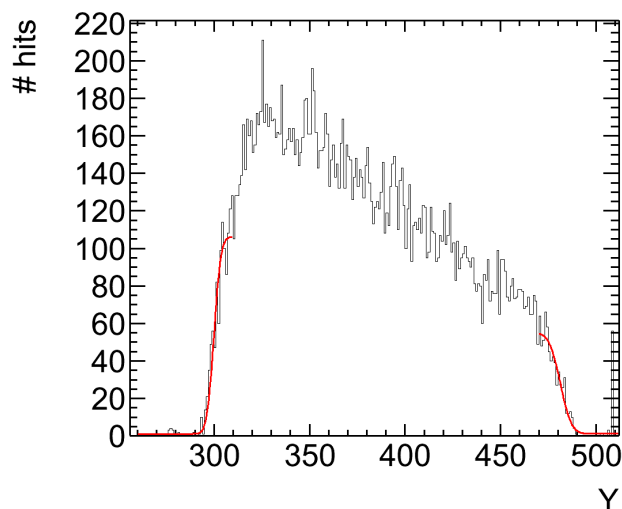


Abb. 5.7: Beispielhafte Projektion mit angepassten Fehlerfunktionen.

Dazu werden fünf Spalten vom 94 bzw. Zeilen vom 128 Pixel des siebten Chips (der einzige, der in allen Messungen Daten liefert) herausgeschnitten und auf die

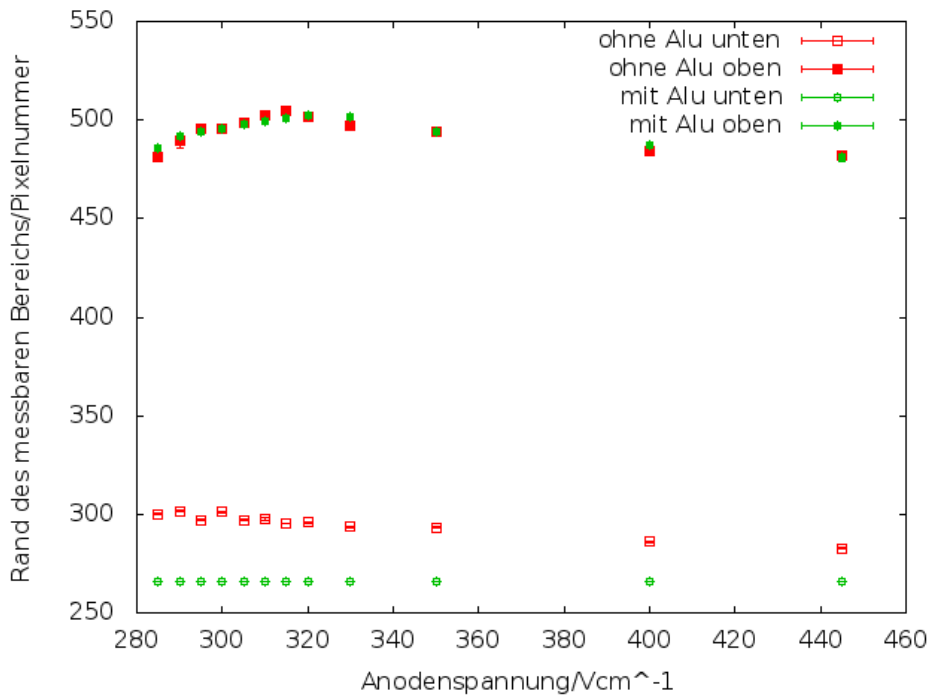


Abb. 5.8: Wendepunkte der auf die Y-Achse projizierten, an die Ränder angepassten Fehlerfunktionen, gegen die Anodenspannung aufgetragen.

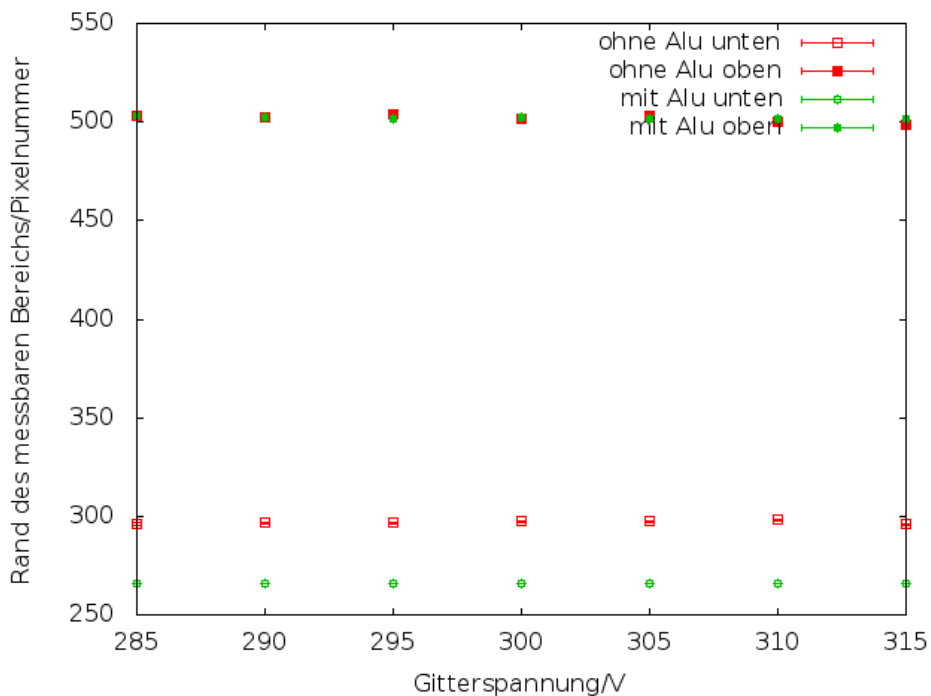


Abb. 5.9: Wendepunkte der auf die Y-Achse projizierten, an die Ränder angepassten Fehlerfunktionen, gegen die Gitterspannung aufgetragen.

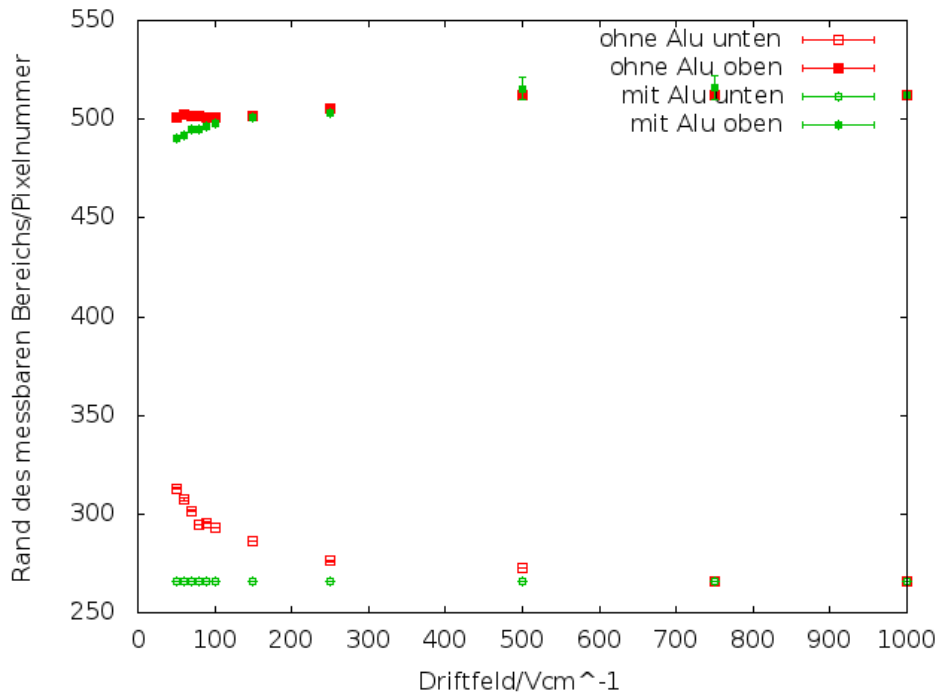


Abb. 5.10: Wendepunkte der auf die Y-Achse projizierten, an die Ränder angepassten Fehlerfunktionen, gegen das Driftfeld aufgetragen.

X- oder Y-Achse projiziert. In Y-Richtung wird genau die Mitte des Chips ausgewertet, in X-Richtung wird die Mitte des nach dem Klebens noch beobachtbaren Bereichs gewählt. An die Ränder werden Fehlerfunktionen angepasst. Beispielhaft ist dies in Abb. 5.7 gezeigt. Wo die Belegungsdichte den Rand des Chips erreicht, kann keine Fehlerfunktion angepasst werden. Die Wendepunkte der Fehlerfunktionen bzw. der Rand des Chips werden als Maß für den Rand der besetzten Zone genommen und gegen die Anoden- oder Gitterspannung bzw. gegen das Driftfeld aufgetragen. Hier werden nur die Projektionen auf die Y-Achse genauer betrachtet. Bei der X-Projektion fehlt die rechte Seite als Referenz, da bei den Messungen mit der Aluminiumfolie diese Seite durch Feldverzerrungen beeinträchtigt wird. Die X-Projektionen befinden sich im Anhang (Abb.7.10-Abb.7.12) ebenso wie die Wertetabellen (ab Tab. 7.1). Die Fehler der Wendepunkte sind die beim Anpassen der Fehlerfunktionen entstehenden Unsicherheiten. Diese sind alle in der Größenordnung 0,1-0,9 Pixel, sodass sie kaum sichtbar sind.

Zunächst wird das Verhalten der Wendepunkte bei Veränderung der Anodenspannung betrachtet (Abb. 5.8). Wie erwartet ändert sich das Verhalten des oberen Randes nicht. Die Wendepunkte mit und ohne Aluminiumfolie sind nahezu identisch. Es gibt eine Spannung, bei der der tatsächliche Rand des Chips fast erreicht wird. Bei höherer oder niedriger Spannung liegt der Rand weiter innen. Am unteren Rand ist die Veränderung durch die Aluminiumstreifen deutlich. Der Rand der ausgeleuchteten Zone ist nicht mehr von der Spannung abhängig, sondern konstant am äußersten aktiven Pixel (10 Pixel werden vom Rahmen überdeckt und können nicht getroffen werden. In X-Richtung sind es nur 8).

Auch die Betrachtung des Verhaltens bei Variation der Gitterspannung bestätigt

die positive Auswirkung der Aluminiumfolie (Abb. 5.9). Auch hier ist der obere Rand ohne Aluminiumfolie nahezu identisch mit dem oberen Rand mit Aluminiumfolie. Der untere Rand ist wieder bis auf den tatsächlichen Rand des Chips ausgedehnt und unabhängig von der Gitterspannung. Dadurch sind über 30 Pixelzeilen zusätzlich nutzbar.

Die Wendepunkte bei Variation des Driftfeldes weichen ein wenig vom erwarteten Verhalten ab. Der obere Rand stimmt erst ab einem Driftfeld von $90 \frac{\text{V}}{\text{cm}}$ überein. Der untere zeigt allerdings ebenfalls, dass der Rand mit Aluminiumfolie nicht mehr vom Driftfeld abhängt und auf den tatsächlichen Rand ausgedehnt ist. Woher die Abweichungen am oberen Rand kommen ist unklar. Eventuell waren die Bedingungen in der Umgebung (Temperatur, Druck) unterschiedlich oder die Quelle saß in einem anderen Winkel auf dem Detektor, sodass die Elektronen weiter in eine Richtung strahlen. Dies ist eine plausible Möglichkeit, da an der Stelle, ab der die beiden Messungen übereinstimmen die stärkere Quelle eingesetzt wurde.

6 Fazit

Zur Reduzierung der Feldverzerrungen über den Lücken zwischen den Chips wurden Aluminiumstreifen über die Lücken geklebt. Sowohl die Simulationen als auch die Messungen bestätigen, dass diese Streifen die Feldverzerrungen reduzieren. Alle Messungen zeigen, dass die Elektronen den Rand des Chips erreichen und nicht mehr abgelenkt werden. Die toten Bereiche werden deutlich reduziert. Die Befestigung der Streifen sollte allerdings überarbeitet werden, da Silberleitkleber ein hohes Risiko an Kurzschlüssen mit sich bringt, die sich mit nicht leitendem Kleber vermeiden lassen.

7 Anhang

7.1 Abbildungen

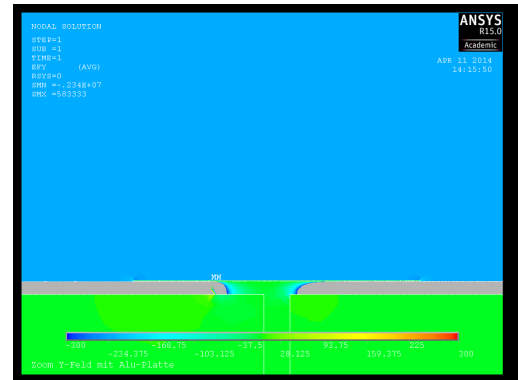
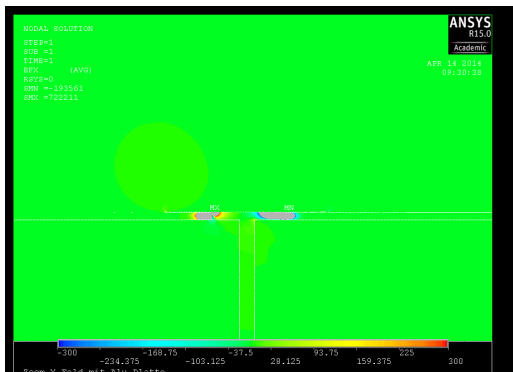


Abb. 7.1: Simulationen einer 3 µm dicken Aluminiumfolie.

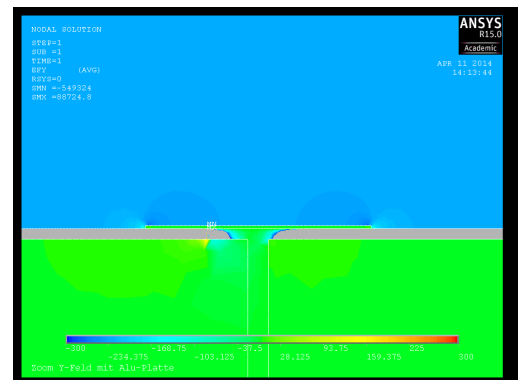
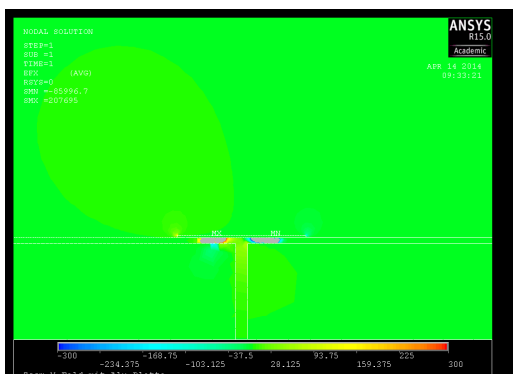


Abb. 7.2: Simulationen einer 15 µm dicken Aluminiumfolie.

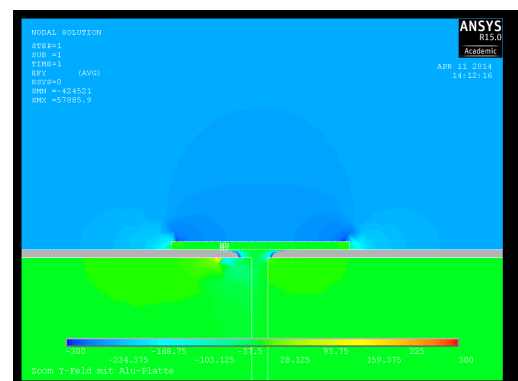
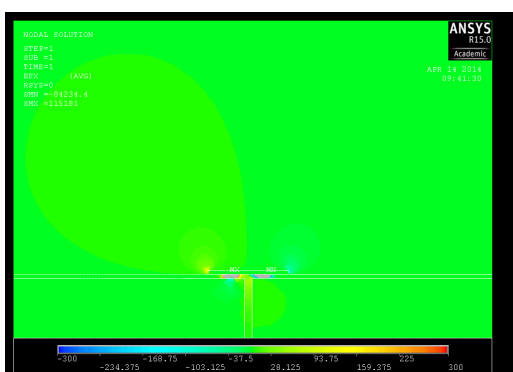
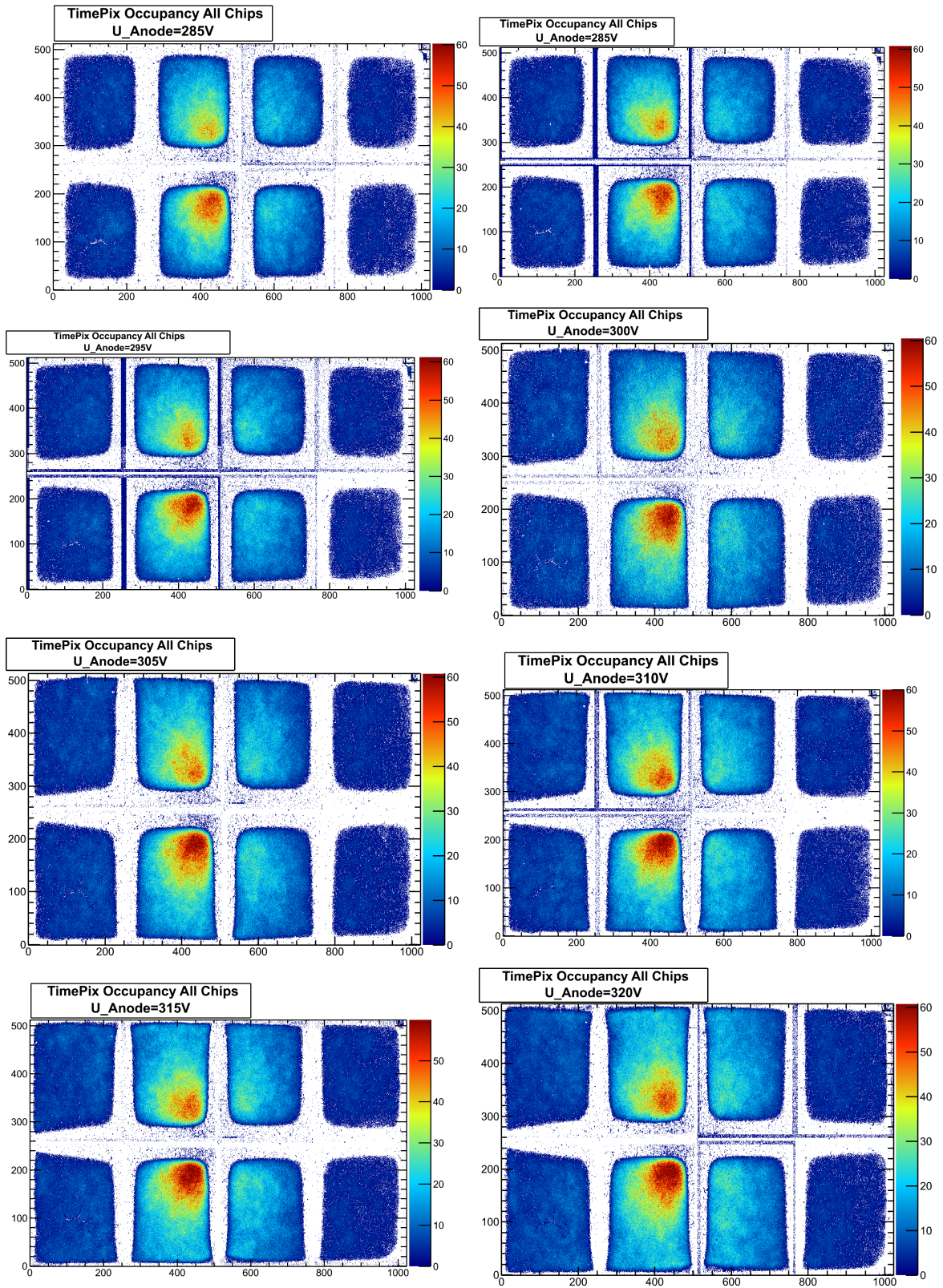


Abb. 7.3: Simulationen einer 50 µm dicken Aluminiumfolie.



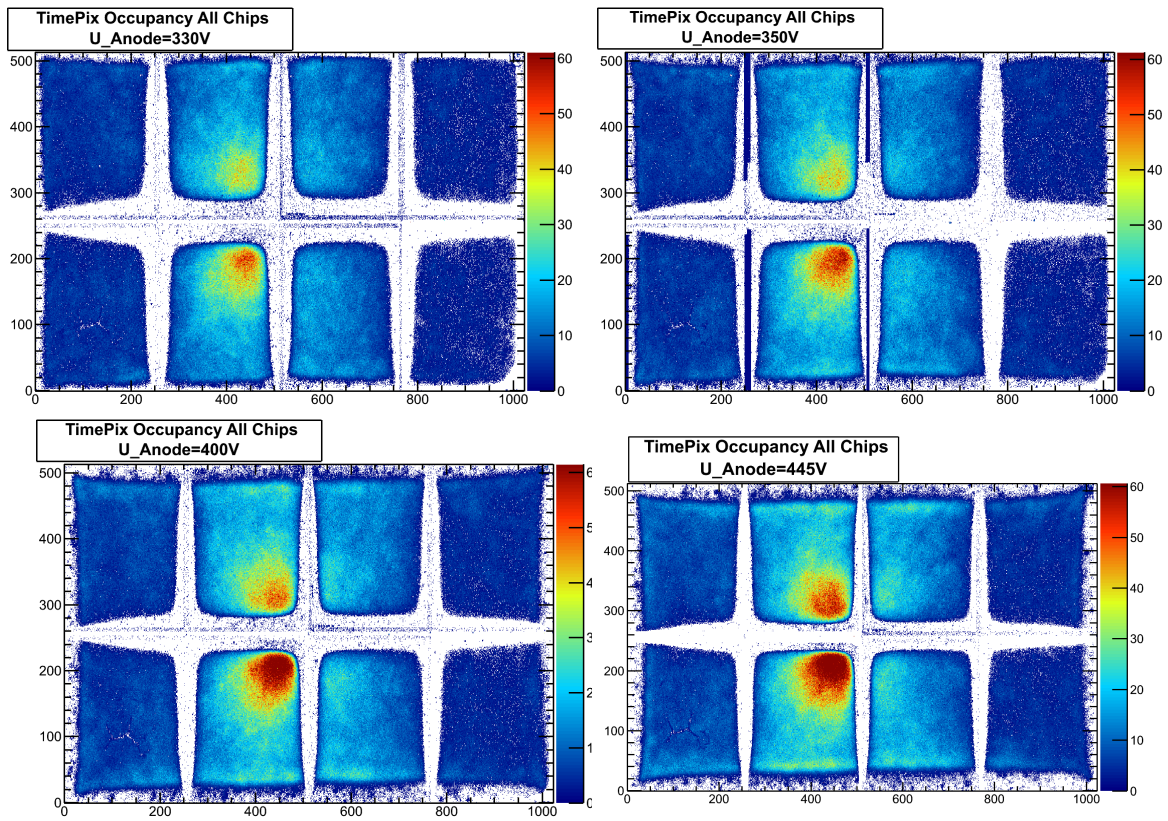


Abb. 7.4: Belegungsdichte für die verschiedenen Anodenspannungen ohne Aluminiumfolie. Die Spannung am Gitter (295 V) und das Driftfeld ($93\frac{\text{V}}{\text{cm}}$) bleiben konstant.

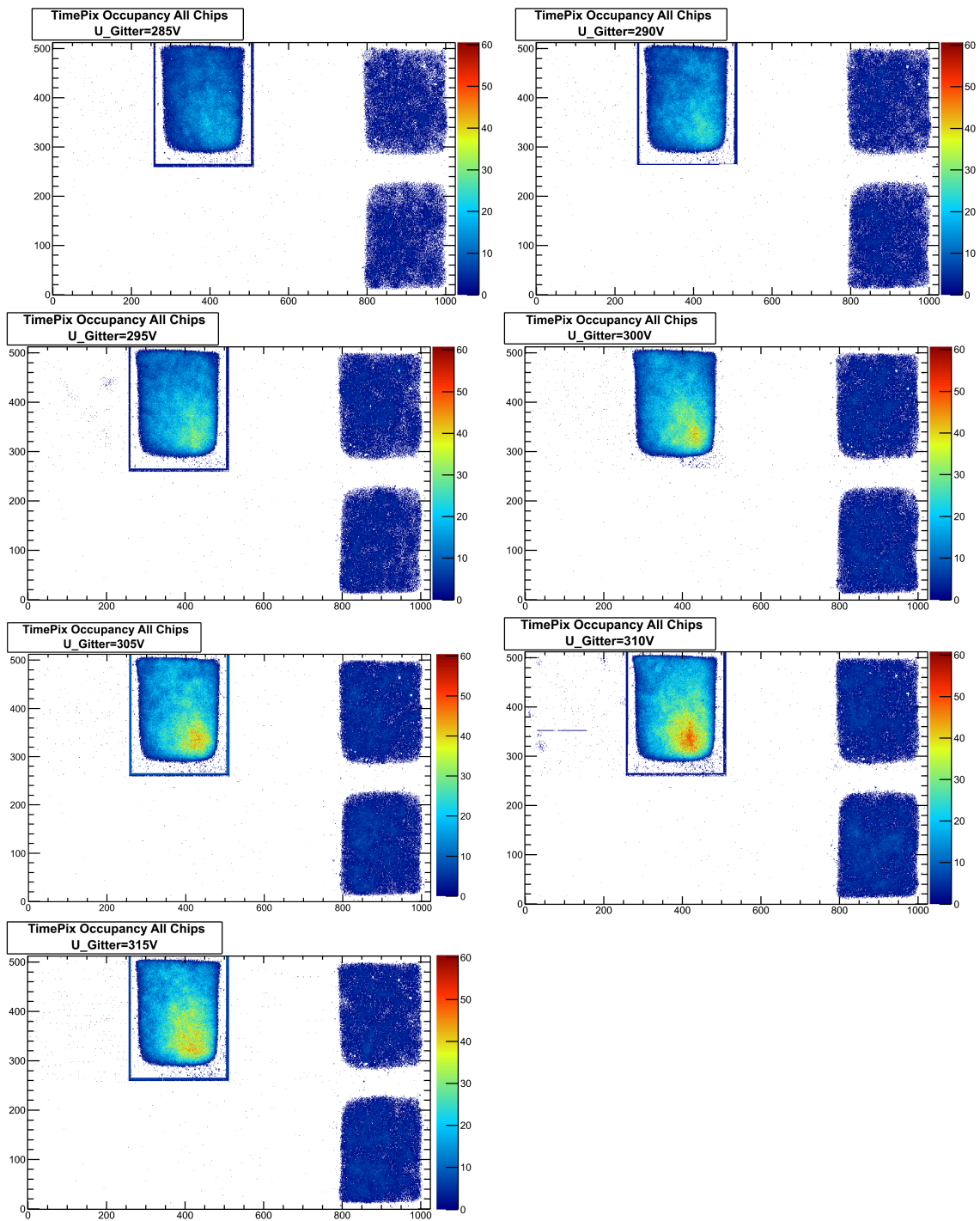
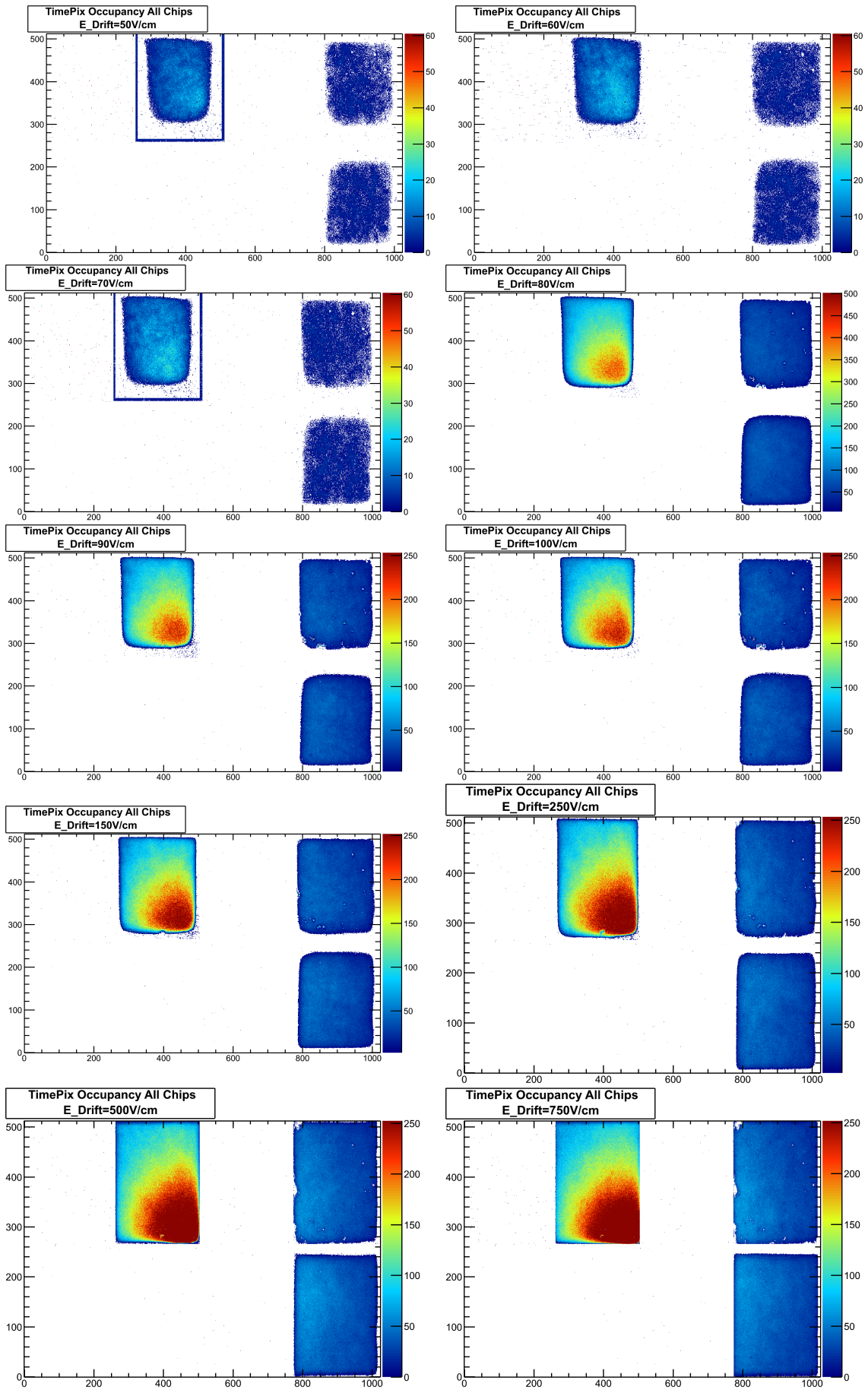


Abb. 7.5: Belegungsdichte für die verschiedenen Gitterspannungen ohne Aluminiumfolie. Das Driftfeld ($93 \frac{\text{V}}{\text{cm}}$) und die entsprechende Anodenspannung bleiben konstant.



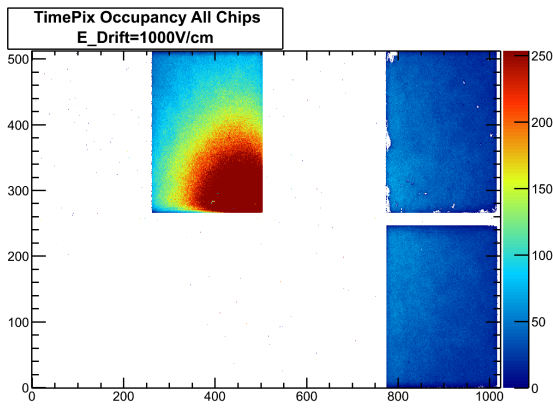
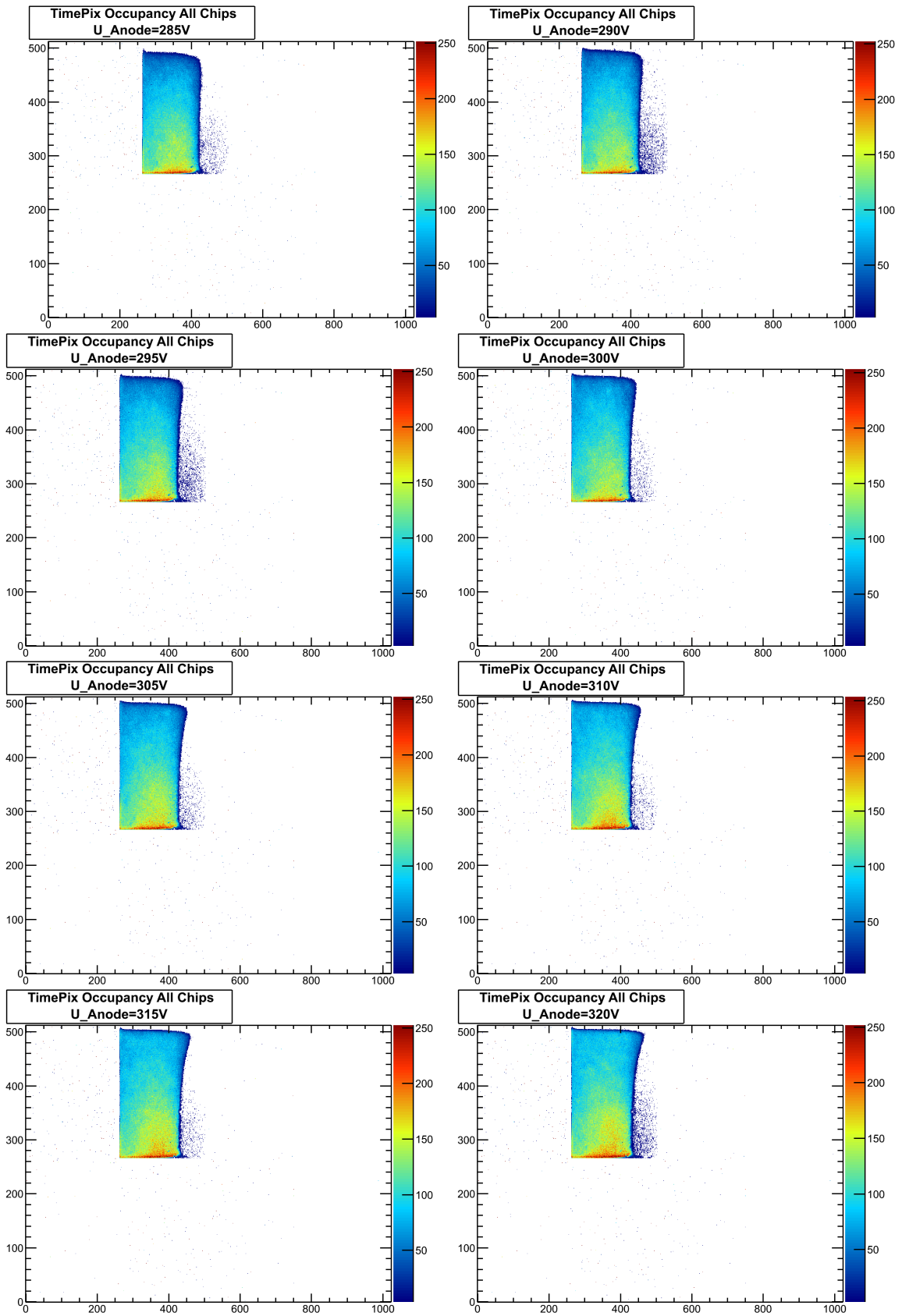


Abb. 7.6: Belegungsdichte für die verschiedenen Driftfelder ohne Aluminiumfolie. Die entsprechende Anodenspannung und die Gitterspannung sind konstant.



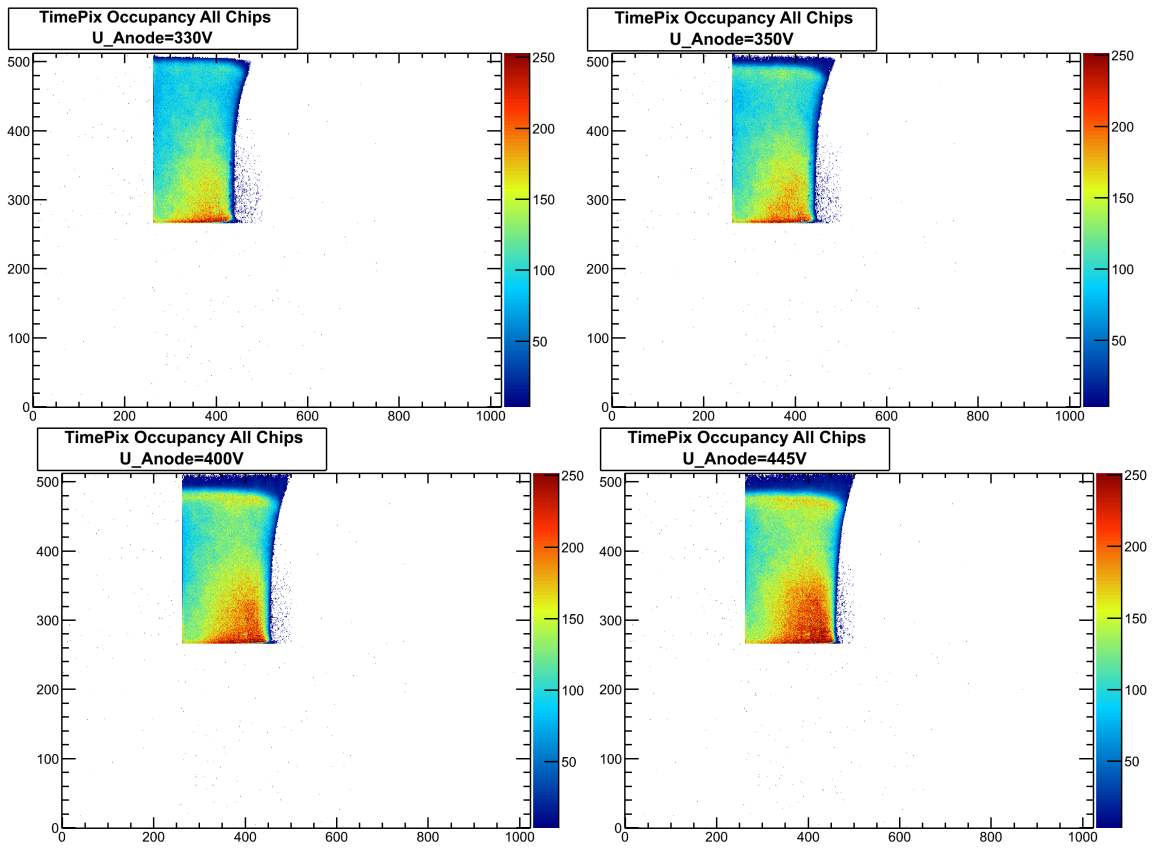


Abb. 7.7: Belegungsdichte für die verschiedene Anodenspannungen bei angebrachten Aluminiumstreifen. Die Spannung am Gitter (295 V) und das Driftfeld ($93 \frac{\text{V}}{\text{cm}}$) bleiben konstant.

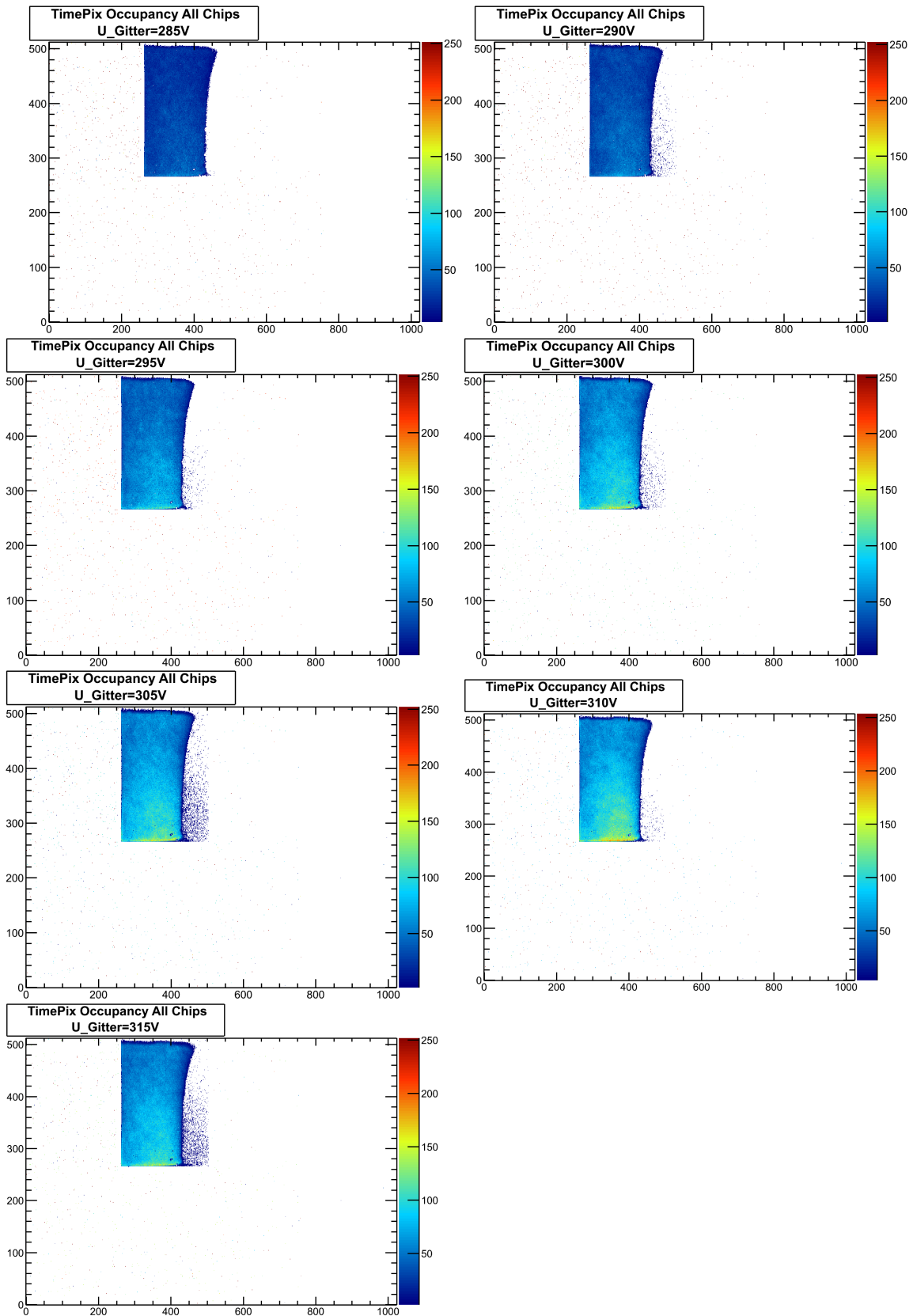
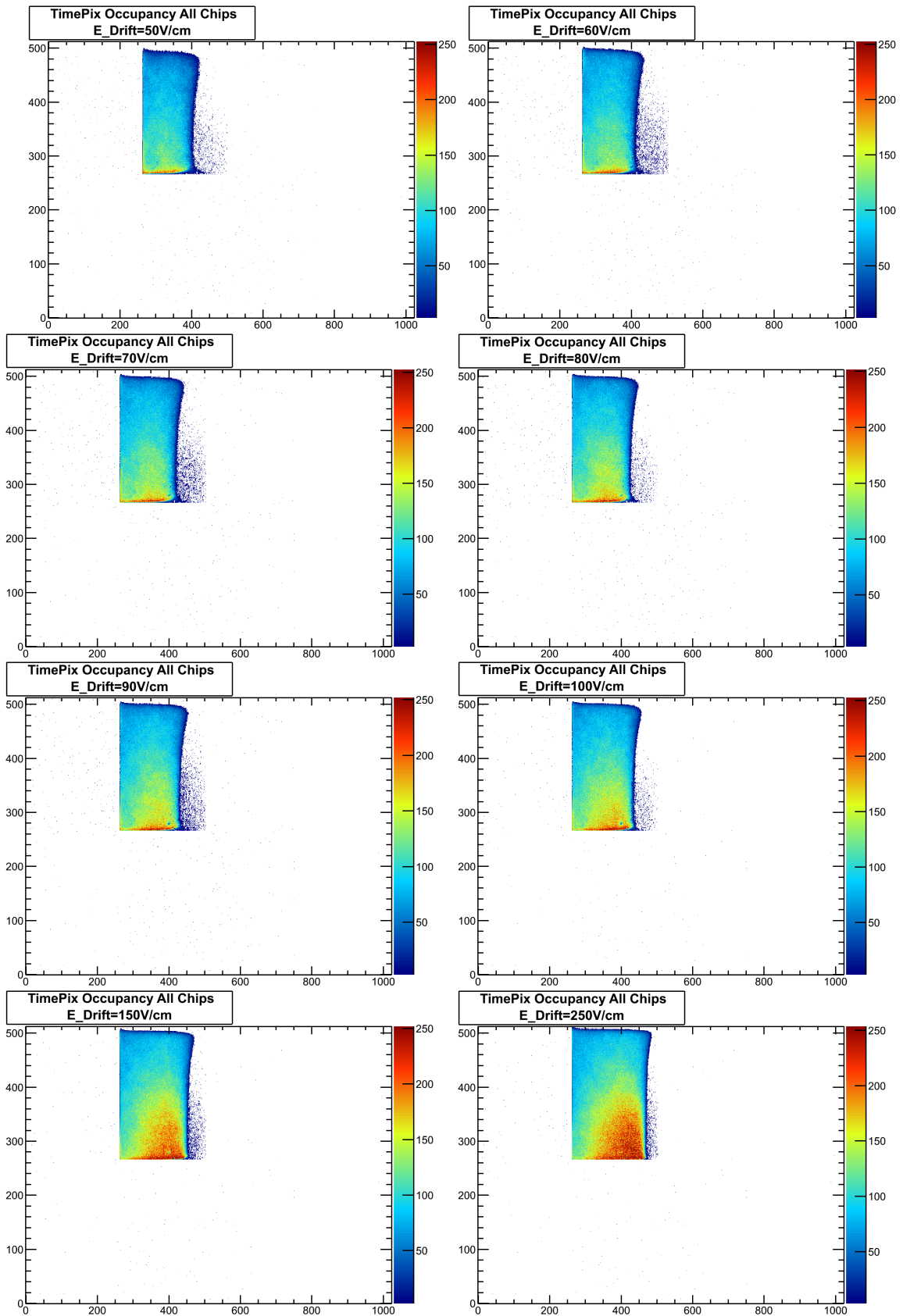


Abb. 7.8: Belegungsdichte für die verschiedenen Gitterspannungen bei angebrachten Aluminiumstreifen. Das Driftfeld ($93 \frac{\text{V}}{\text{cm}}$) und die entsprechende Anodenspannung bleiben konstant.



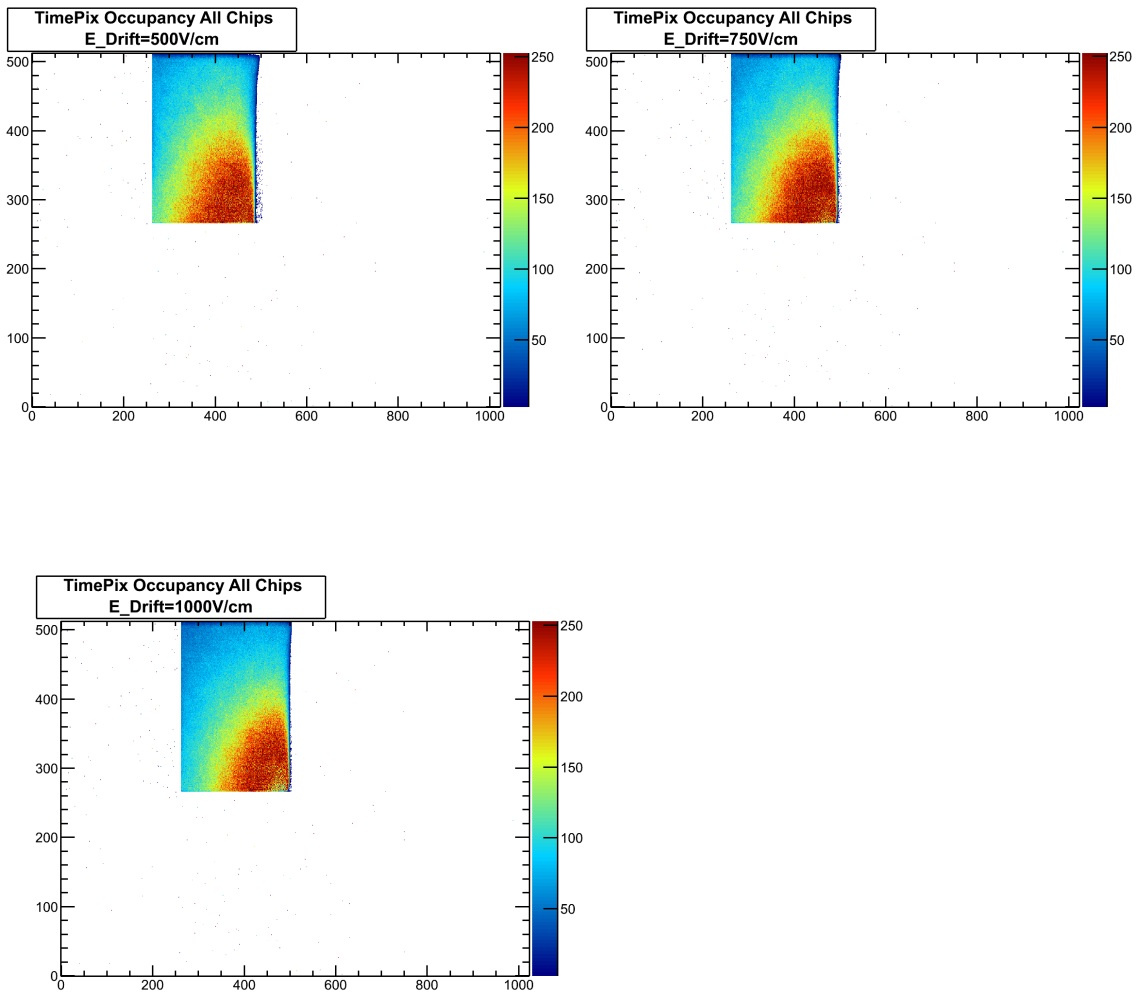


Abb. 7.9: Belegungsdichte für die verschiedenen Driftfelder bei angebrachten Aluminiumstreifen. Die entsprechende Anodenspannung und die Gitterspannung sind konstant.

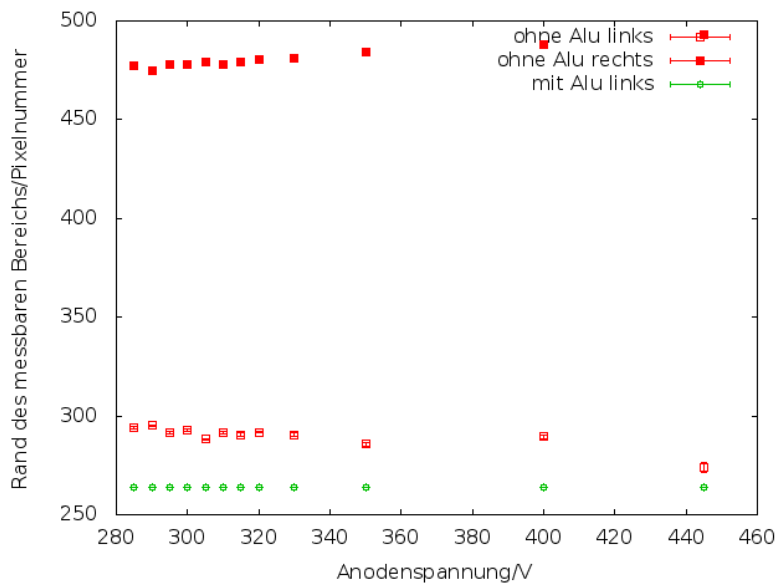


Abb. 7.10: X-Projektion der Wendepunkte der Ränder gegen die Anodenspannung.

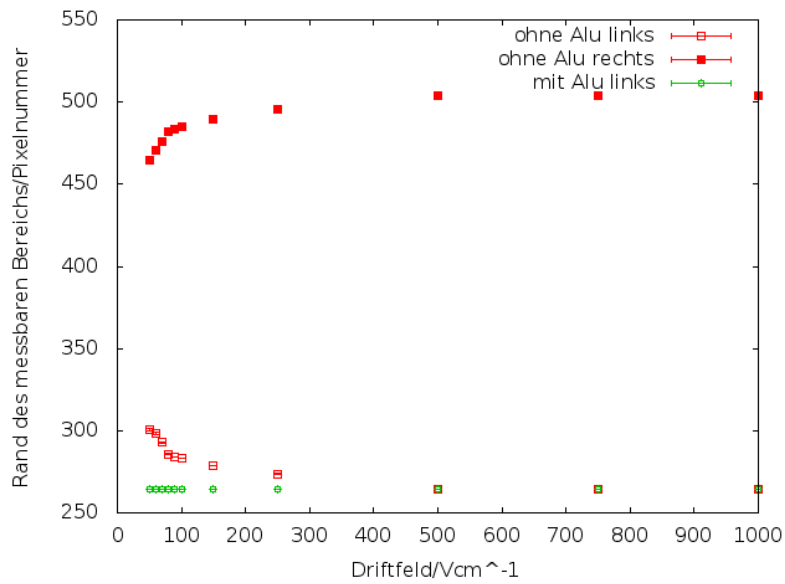


Abb. 7.11: X-Projektion der Wendepunkte der Ränder gegen das Driftfeld.

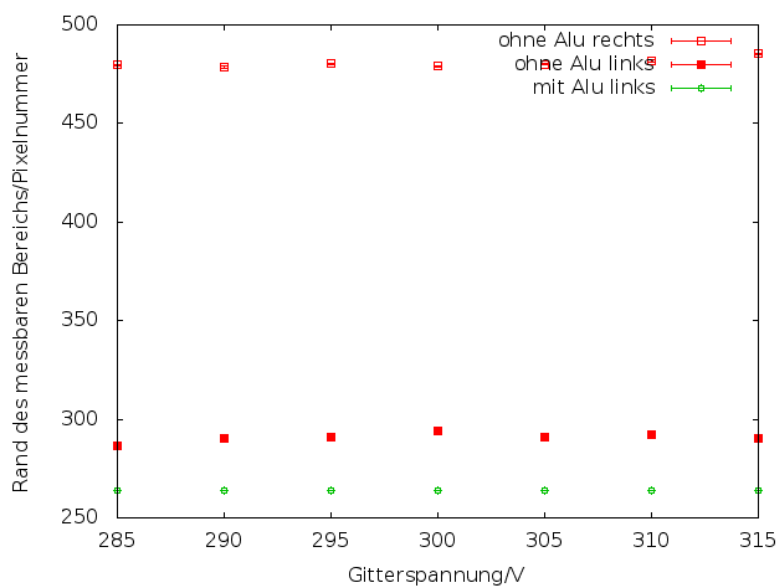


Abb. 7.12: X-Projektion der Wendepunkte der Ränder gegen die Gitterspannung.

7.2 Tabellen

U_{Anode}/V	WP links/Pixel	Δ WP links/Pixel	WP rechts/Pixel	Δ WP rechts/Pixel
285	294,2	0,7	477,2	0,6
290	295,1	0,5	474,8	0,5
295	291,5	0,6	477,9	0,4
300	292,7	0,6	477,9	0,4
305	288,2	0,4	478,9	0,4
310	291,4	0,5	477,9	0,5
315	290,5	0,8	479,4	0,4
320	291,8	0,6	480,4	0,4
330	290,4	0,8	481,1	0,4
350	285,7	0,9	484,5	0,7
400	289,5	0,9	487,8	0,4
445	274,1	0,2	493,1	0,7

Tabelle 7.1: Wendepunkte (WP) der Fehlerfunktionen, die an die Ränder bei unterschiedlichen Anodenspannungen angepasst wurden in X-Richtung, ohne Aluminiumfolie.

U_{Anode}/V	WP unten/Pixel	Δ WP unten/Pixel	WP oben/Pixel	Δ WP oben/Pixel
285	300,0	0,4	481,2	0,8
290	301,5	0,4	489,6	3,9
295	297,0	0,4	495,6	0,7
300	301,0	0,4	495,6	0,7
305	296,9	0,3	499,0	1,7
310	297,6	0,4	502,4	0,4
315	295,3	0,3	504,6	0,3
320	296,0	0,4	501,4	0,3
330	293,6	0,4	497,4	0,3
350	293,2	0,4	493,9	0,3
400	286,0	0,3	484,6	0,3
445	282,7	0,4	481,6	0,3

Tabelle 7.2: Wendepunkte (WP) der Fehlerfunktionen, die an die Ränder bei unterschiedlichen Anodenspannungen angepasst wurden in Y-Richtung, ohne Aluminiumfolie.

$E_{Drift}/\frac{V}{cm}$	WP links/Pixel	Δ WP links/Pixel	WP rechts/Pixel	Δ WP rechts/Pixel
1000	264,0	0,0	504,0	0,0
750	264,0	0,0	504,0	0,0
500	264,0	0,0	504,0	0,0
250	273,7	0,2	495,7	0,2
150	278,9	0,2	489,7	0,1
100	283,1	0,2	484,9	0,1
90	284,0	0,2	483,8	0,1
80	285,8	0,2	481,7	0,1
70	292,9	0,4	475,7	0,3
60	298,7	0,7	470,7	0,5
50	300,4	0,6	464,8	0,0

Tabelle 7.3: Wendepunkte (WP) der Fehlerfunktionen, die an die Ränder bei unterschiedlichen Driftfelder angepasst wurden in X-Richtung, ohne Aluminiumfolie.

$E_{Drift}/\frac{V}{cm}$	WP unten/Pixel	Δ WP unten/Pixel	WP oben/Pixel	Δ WP oben/Pixel
1000	266,0	0,0	512,0	0,0
750	266,0	0,0	512,0	0,0
500	272,9	0,1	512,0	0,0
250	276,1	0,1	505,2	0,1
150	286,1	0,1	501,5	0,1
100	293,1	0,1	500,7	0,2
90	295,6	0,2	501,0	0,1
80	294,5	0,1	501,5	0,1
70	301,6	0,5	502,0	0,3
60	307,3	0,6	502,4	0,7
50	313,0	0,6	500,9	0,4

Tabelle 7.4: Wendepunkte (WP) der Fehlerfunktionen, die an die Ränder bei unterschiedlichen Driftfelder angepasst wurden in Y-Richtung, ohne Aluminiumfolie.

U_{Gitter}/V	WP links/Pixel	Δ WP links/Pixel	WP rechts/Pixel	Δ WP rechts/Pixel
315	290,2	0,4	485,4	0,3
310	292,5	0,6	481,7	0,4
305	291,1	0,7	479,9	0,3
300	293,8	0,8	479,1	0,4
295	291,1	0,7	480,4	0,4
290	290,6	0,5	478,7	0,5
285	286,4	0,5	479,7	0,4

Tabelle 7.5: Wendepunkte (WP) der Fehlerfunktionen, die an die Ränder bei unterschiedlichen Gitterspannungen angepasst wurden in X-Richtung, ohne Aluminiumfolie.

U_{Gitter}/V	WP unten/Pixel	Δ WP unten/Pixel	WP oben/Pixel	Δ WP oben/Pixel
315	295,9	0,3	498,7	0,3
310	298,0	0,3	500,4	0,3
305	297,4	0,4	503,1	2,1
300	297,3	0,4	502,0	0,4
295	296,7	0,4	503,8	0,2
290	296,6	0,5	502,7	0,4
285	296,1	0,5	503,2	0,4

Tabelle 7.6: Wendepunkte (WP) der Fehlerfunktionen, die an die Ränder bei unterschiedlichen Gitterspannungen angepasst wurden in Y-Richtung, ohne Aluminiumfolie.

U_{Anode}/V	WP links/Pixel	Δ WP links/Pixel
285	264	0
290	264	0
295	264	0
300	264	0
305	264	0
310	264	0
315	264	0
320	264	0
330	264	0
350	264	0
400	264	0
445	264	0

Tabelle 7.7: Ränder der Belegungsdichte in X-Richtung, mit Aluminiumfolie.

U_{Anode}/V	WP unten/Pixel	Δ WP unten/Pixel	WP oben/Pixel	Δ WP oben/Pixel
285	266,0	0,0	485,6	0,3
290	266,0	0,0	491,6	0,2
295	266,0	0,0	494,4	0,2
300	266,0	0,0	495,6	0,2
305	266,0	0,0	497,6	0,2
310	266,0	0,0	499,2	0,2
315	266,0	0,0	501,0	0,1
320	266,0	0,0	502,0	0,1
330	266,0	0,0	501,3	0,1
350	266,0	0,0	494,1	0,2
400	266,0	0,0	487,0	0,4
445	266,0	0,0	480,9	2,1

Tabelle 7.8: Wendepunkte (WP) der Fehlerfunktionen, die an die Ränder bei unterschiedlichen Anodenspannungen angepasst wurden in Y-Richtung, mit Aluminiumfolie.

$E_{Drift}/\frac{V}{cm}$	WP links/Pixel	Δ WP links/Pixel
1000	264	0
750	264	0
500	264	0
250	264	0
150	264	0
100	264	0
90	264	0
80	264	0
70	264	0
60	264	0
50	264	0

Tabelle 7.9: Ränder der Belegungsdichte in X-Richtung, mit Aluminiumfolie.

$E_{Drift}/\frac{V}{cm}$	WP unten/Pixel	Δ WP unten/Pixel	WP oben/Pixel	Δ WP oben/Pixel
50	266,0	0,0	490,0	0,0
60	266,0	0,0	491,8	0,2
70	266,0	0,0	494,5	0,2
80	266,0	0,0	495,1	0,2
90	266,0	0,0	496,2	0,2
100	266,0	0,0	497,5	0,2
150	266,0	0,0	500,7	0,2
250	266,0	0,0	503,5	0,2
500	266,0	0,0	512,0	0,0
750	266,0	0,0	512,0	0,0
1000	266,0	0,0	512,0	0,0

Tabelle 7.10: Wendepunkte (WP) der Fehlerfunktionen, die an die Ränder bei unterschiedlichen Driftfelder angepasst wurden in Y-Richtung, Aluminiumfolie.

U_{Gitter}/V	WP unten/Pixel	Δ WP unten/Pixel
315	264	0
310	264	0
305	264	0
300	264	0
295	264	0
290	264	0
285	264	0

Tabelle 7.11: Ränder der Belegungsdichte in X-Richtung, mit Aluminiumfolie.

U_{Gitter}/V	WP unten/Pixel	Δ WP unten/Pixel	WP oben/Pixel	Δ WP oben/Pixel
315	266	0	501,6	0,1
310	266	0	501,8	0,1
305	266	0	501,6	0,1
300	266	0	502,2	0,1
295	266	0	502,0	0,1
290	266	0	502,1	0,2
285	266	0	502,8	0,2

Tabelle 7.12: Wendepunkte (WP) der Fehlerfunktionen, die an die Ränder bei unterschiedlichen Gitterspannungen angepasst wurden in Y-Richtung, mit Aluminiumfolie.

Literaturverzeichnis

- [1] ILD Concept Group, International Large Detector DBD,
URL: <http://ilcild.org/documents/ILD-master.pdf/view>
- [2] Vincent Lepeltier “Review on TPC’s”, 2007 *J.Phys.: Conf. Ser.* **65** 012001
- [3] X. Llopart Cudie, CERN-THESIS-2007-062.
- [4] R. Menzen, “InGrid based TPC readout”, 2013
- [5] W. R. Leo, Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments, Springer-Verlag,
1994, ISBN: 0-387-57280-5