

# **Qualitätskontrolle der Module für den Neubau des ATLAS-Pixeldetektors**

Thesis  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Bachelor of Science (B. Sc.)  
in Angewandte Naturwissenschaften  
der Bergischen Universität Wuppertal

vorgelegt von  
Benedikt Leiß (2050629)

Erstprüfer: Prof. Dr. Wolfgang Wagner  
Zweitprüfer: Prof. Dr. Christian Zeitnitz

vorgegebenes Abgabedatum: 24. April 2026

# Inhaltsverzeichnis

|          |                                                              |           |
|----------|--------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>                                            | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>Experimenteller Kontext</b>                               | <b>1</b>  |
| 2.1      | Der Large Hadron Collider und das ATLAS-Experiment . . . . . | 1         |
| 2.2      | Aufbau und Funktionsweise von Pixeldetektormodulen . . . . . | 6         |
| <b>3</b> | <b>Messungen zur Qualitätskontrolle von Detektormodulen</b>  | <b>10</b> |
| 3.1      | Messungen der Auslesechips . . . . .                         | 10        |
| 3.2      | Messungen von IV-Kurven . . . . .                            | 12        |
| <b>4</b> | <b>Auswertung</b>                                            | <b>13</b> |
| 4.1      | Analyse der IV-Kurven . . . . .                              | 13        |
| 4.1.1    | Ergebnisse der Warmmessungen . . . . .                       | 14        |
| 4.1.2    | Ergebnisse Kaltmessungen . . . . .                           | 16        |
| 4.2      | Analyse der Treffereffizienz . . . . .                       | 19        |
| 4.3      | Analyse des Rauschens und der Schwellwerte . . . . .         | 27        |
| <b>5</b> | <b>Testübergreifende Modulbetrachtung</b>                    | <b>36</b> |
| <b>6</b> | <b>Fazit</b>                                                 | <b>37</b> |
| <b>7</b> | <b>Anhang</b>                                                | <b>42</b> |

## Abbildungsverzeichnis

|    |                                                                                                                                           |    |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1  | Schnitttdarstellung Atlas Detektor . . . . .                                                                                              | 3  |
| 2  | Schematische Darstellung des Layouts des Inneren Trackers . . . . .                                                                       | 5  |
| 3  | Schematische Darstellung eines Halbleiterdetektorsystems . . . . .                                                                        | 7  |
| 4  | Schaltbild analoges Frontend . . . . .                                                                                                    | 9  |
| 5  | Visualisierung des Rauschens und des Schwellwertes . . . . .                                                                              | 12 |
| 6  | IV Kurven der Module 20UPBLC0110064 und 20UPBLC0110083 bei 20°C . . . . .                                                                 | 14 |
| 7  | IV Kurven der Module 20UPBLC0110166 und 20UPBLC0110467 bei 20°C . . . . .                                                                 | 15 |
| 8  | IV Kurven der Module 20UPBLC0210067 und 20UPBLC0110328 bei 20°C . . . . .                                                                 | 15 |
| 9  | Maximale Leckstromwerte der Module aus den Warmmessungen . . . . .                                                                        | 16 |
| 10 | IV Kurven der Module 20UPBLC0110064 und 20UPBLC0110094 bei −15°C . . . . .                                                                | 17 |
| 11 | Maximale Leckstromwerte der Module aus den Kaltmessungen . . . . .                                                                        | 18 |
| 12 | Treffereffizienz Karte 20UPBLC0110015 nach dem Kleben kalt . . . . .                                                                      | 19 |
| 13 | Streumuster und verändertes Spaltenblockproblem . . . . .                                                                                 | 24 |
| 14 | Vergleich zweier Occupancy-Muster . . . . .                                                                                               | 25 |
| 15 | Aufkeimendes Spaltenblockproblem . . . . .                                                                                                | 26 |
| 16 | Coreweiser Treffereffizienz Ausfall . . . . .                                                                                             | 27 |
| 17 | Schwellenwertkarte und Histogramm des Moduls 20UPBLC0110015 nach dem Kleben kalt . . . . .                                                | 28 |
| 18 | Gefitteter Rauschmittelwertevergleich . . . . .                                                                                           | 29 |
| 19 | Rauschen an den Rändern der Chips . . . . .                                                                                               | 30 |
| 20 | Rauschkarte und Histogramm des Moduls 20UPBLC0110015 nach dem Kleben kalt . . . . .                                                       | 31 |
| 21 | Rauschkarte und Histogramm des Moduls 20UPBLC0210067 nach dem Kleben warm . . . . .                                                       | 32 |
| 22 | Histogrammvergleich der gefitteten Schwellwertmittelwerte zwischen Eingangskontrollmessung und Warmmessung der bestückten Zelle . . . . . | 33 |
| 23 | Vergleich der gefitteten Schwellwertmittelwerte zwischen Modulbauabschlussprüfung (kalt) und Kaltmessung der bestückten Zelle . . . . .   | 34 |
| 24 | Übergänge an Rändern bei Schwellwertmessungen . . . . .                                                                                   | 35 |
| 25 | Waagerechter Streifen in einer Schwellwertkarte . . . . .                                                                                 | 35 |
| 26 | Coreweise Ausfälle in Schwellwertkarten . . . . .                                                                                         | 36 |

## Tabellenverzeichnis

|   |                                                                                     |    |
|---|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 | Gesamte Treffereffizienz über 20 Module . . . . .                                   | 20 |
| 2 | Positionen der Chipausfälle aller Module . . . . .                                  | 21 |
| 3 | Gesamte Treffereffizienz über 20 Module ohne ausgefallene Chips . . . . .           | 22 |
| 4 | Spaltenblockproblem-Werte . . . . .                                                 | 23 |
| 5 | Gesamte Treffereffizienz über 20 Module ohne ausgefallene Chips und Cores . . . . . | 24 |
| 6 | Schwellwert und Rausch Durchschnittswerte . . . . .                                 | 29 |
| 7 | Anzahl akzeptabler Module . . . . .                                                 | 37 |

# 1 Einleitung

Die Europäische Organisation für Kernforschung (CERN) betreibt mit dem Large Hadron Collider (LHC) den weltweit leistungsstärksten Teilchenbeschleuniger. Im Zuge des High-Luminosity Upgrades (HL-LHC) steigt die Kollisionsrate ab den 2030er-Jahren erheblich, was eine deutlich höhere Strahlenbelastung in den Detektoren zur Folge hat. Der ATLAS-Detektor ersetzt daher seinen bisherigen Inneren Detektor durch den strahlungstoleranten und hochauflösenden Inner Tracker (ITk). Dessen Pixeldetektor besteht aus Modulen mit jeweils 614 400 Pixeln, die unter anderem in Wuppertal auf ein Graphitplättchen geklebt werden. Zum Zeitpunkt dieser Arbeit haben 20 Vorproduktionsmodule diesen Prozess durchlaufen.

Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung der elektrischen und funktionalen Qualität dieser Module vor und nach dem Kleben. Im Mittelpunkt stehen die Analyse der IV-Kurven, die Bestimmung der Treffereffizienz sowie die Charakterisierung von Rauschen und Schwellwerten über mehrere Messphasen hinweg. Durch den Vergleich von Modulbauabschlussprüfung, Eingangskontrollmessung und Messung der bestückten Zelle wird bewertet, ob die Module die geforderten Qualitätskriterien erfüllen und ob der Klebevorgang die Performance beeinflusst. Gleichzeitig wird geprüft, ob beobachtete Abweichungen auf kausale Zusammenhänge oder auf phasen- bzw. messaufbaubedingte Effekte zurückzuführen sind. Da es sich um Vorproduktionsmodule handelt, steht die Analyse möglicher Veränderungen durch den Klebeprozess im Vordergrund.

Die Arbeit beginnt mit einer Einführung in den ATLAS-Pixeldetektor und die relevanten Qualitätskriterien, gefolgt von der Beschreibung der Messverfahren. Anschließend werden die IV-Kurven, die Treffereffizienz sowie die Rausch- und Schwellwertverteilungen ausgewertet. Den Abschluss bilden eine testübergreifende Bewertung der Module und das abschließende Fazit.

## 2 Experimenteller Kontext

### 2.1 Der Large Hadron Collider und das ATLAS-Experiment

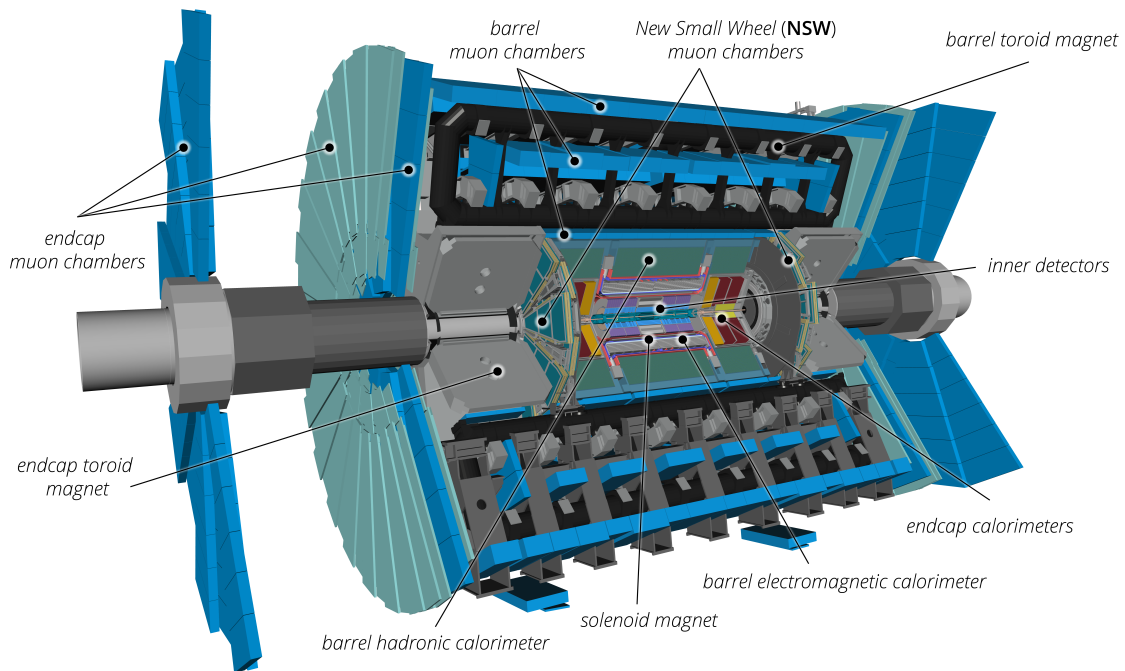
Das CERN ist das weltweit größte Zentrum für Teilchenphysik und untersucht den Aufbau der Materie sowie die fundamentalen Wechselwirkungen zwischen Elementarteilchen. Dazu werden Teilchen auf nahezu Lichtgeschwindigkeit beschleunigt und zur Kollision gebracht, wobei Detektorsysteme die entstehenden Spuren und Energien erfassen. Der wichtigste Beschleuniger ist der Large Hadron Collider (LHC), ein 26,7 km langer unterirdischer Ring, in dem Protonen oder Ionen mithilfe supraleitender Magnete geführt und fokussiert werden. Radiofrequenz-Kavitäten erhöhen die Energie der Teilchenpakete bei jeder Umrundung und erzeugen gemeinsam mit Dipol- und Quadrupolmagneten einen stabilen, hochenergetischen Strahl, der an Experimenten wie ATLAS zur Kollision gebracht wird [10, 11, 16].

Derzeit wird der LHC zum High-Luminosity LHC (HL-LHC) ausgebaut, um die integrierte Luminosität und damit die Zahl der Proton-Proton-Kollisionen um etwa einen Faktor zehn zu erhöhen. Die größeren Datenmengen ermöglichen präzisere Messungen, et-

wa der Higgs-Eigenschaften, und eröffnen den Zugang zu seltenen Prozessen. Der HL-LHC soll ab Anfang der 2030er-Jahre in Betrieb gehen und basiert auf technologischen Weiterentwicklungen wie neuen supraleitenden Magneten, verbesserten Fokussierungssystemen und modernisierter Kryotechnik [21].

**ATLAS** (A Toroidal LHC ApparatuS) ist eines der beiden großen Mehrzweckexperimente am LHC. Der Detektor besitzt eine Länge von 46 m, einen Durchmesser von 25 m und eine Gesamtmasse von etwa 7 000 t [7]. Am Bau und Betrieb sind mehrere tausend Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus über 200 Instituten weltweit beteiligt. Ziel des Experiments ist die experimentelle Überprüfung des Standardmodells sowie die Suche nach Phänomenen jenseits davon, etwa Supersymmetrie oder zusätzliche Raumdimensionen. Ein zentraler Erfolg war die Entdeckung des Higgs-Bosons im Jahr 2012. ATLAS wurde 2009 in Betrieb genommen und ist seitdem hohen Strahlungsdosen und mechanischen Belastungen ausgesetzt. Für den zukünftigen Betrieb des High-Luminosity LHC (HL-LHC) reichen die ursprünglichen Spezifikationen jedoch nicht mehr aus. Daher wird der Detektor im Rahmen des Phase-II-Upgrades umfassend modernisiert, wobei insbesondere der Innere Detektor vollständig durch den neuen Inner Tracker (ITk) ersetzt wird [1, 21].

Der ATLAS-Detektor besitzt eine zylindrische Zwiebelschalenstruktur, in der die Subsysteme konzentrisch um das Strahlrohr angeordnet sind. Die Hauptkomponenten umfassen das Magnetsystem, den Inneren Detektor, das Kalorimetersystem und die Myonkammern. Diese Kombination ermöglicht eine vollständige Rekonstruktion von Teilchenspuren und Energien und die Identifizierung von Teilchen. Ein Überblick über den Detektoraufbau ist in [Abbildung 1](#) dargestellt [7].



**Abbildung 1:** Querschnitt des ATLAS-Detektors am Large Hadron Collider (LHC), bestehend aus mehreren konzentrischen Subdetektoren zur präzisen Vermessung von Teilchenkollisionen [2].

Das Magnetsystem umfasst einen zentralen Solenoid sowie mehrere Toroide im Barrel- und Endkappenbereich. Während der Solenoid ein axiales, homogenes Magnetfeld in einer zylindrischen Spule erzeugt, stellt ein Toroid ein ringförmiges Magnetfeld bereit. Diese Felder lenken geladene Teilchen ab und ermöglichen so die Impulsbestimmung [4].

Die äußerste Schicht des ATLAS-Detektors bilden die Myonkammern, die speziell für die präzise Vermessung von Myonen ausgelegt sind, da diese aufgrund ihrer hohen Masse und geringen Wechselwirkungswahrscheinlichkeit nahezu ungehindert alle inneren Detektorsysteme durchdringen. Die Myonmessung beruht auf zwei komplementären Prinzipien: der Positionsbestimmung in den Driftröhren und der Impulsbestimmung über die Ablenkung im toroidalen Magnetfeld. Die Driftröhren bestehen aus gasgefüllten Aluminiumröhren, in deren Zentrum ein dünner Draht unter Hochspannung gespannt ist. Durchquert ein Myon eine solche Röhre, ionisiert es das Gas entlang seiner Flugbahn. Die dabei freigesetzten Elektronen bewegen sich im elektrischen Feld radial zum Draht und erzeugen beim Auftreffen ein elektrisches Signal. Aus der Driftzeit der Elektronen lässt sich der Abstand des Myons zum Draht bestimmen, sodass jede Driftröhre eine präzise Ortsmessung senkrecht zur Drahtachse liefert. Durch die Kombination vieler solcher Röhren in mehreren Lagen entsteht ein überbestimmtes System von Messpunkten, aus dem die Myonspur mit hoher Genauigkeit rekonstruiert werden kann. Die Impulsbestimmung erfolgt durch die Ablenkung der Myonspur im toroidalen Magnetfeld. Die Toroidmagnete erzeugen ein großvolumiges,

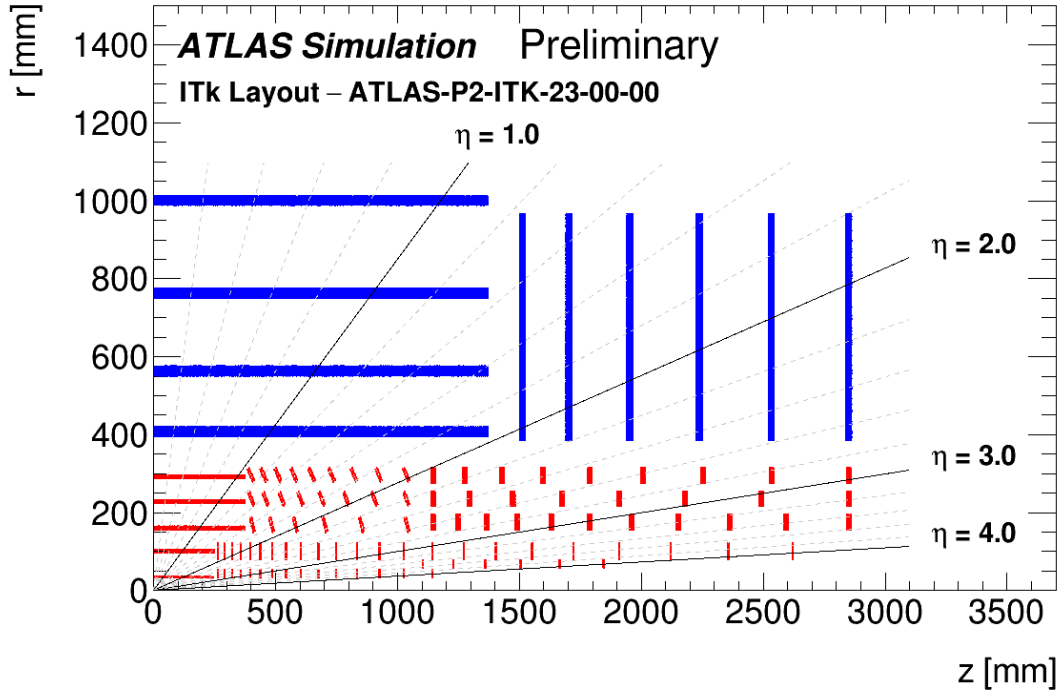
zu den Spuren überwiegend orthogonales Magnetfeld, das Myonen auf gekrümmte Bahnen zwingt. Der Krümmungsradius dieser Bahn ist direkt proportional zum Impuls des Myons. Da die Myonkammern über große Radien verteilt sind, entsteht ein langer effektiver Hebelarm, der selbst kleine Abweichungen von einer geraden Flugbahn messbar macht. Die Kombination aus vielen präzisen Ortsmessungen und dem bekannten Magnetfeld erlaubt es, die Krümmung der Spur zu bestimmen und daraus den Impuls des Myons zu berechnen [12][5].

Das Kalorimetersystem von ATLAS misst die Energie der Teilchen, die bei einer Kollision entstehen. Es ist so aufgebaut, dass die meisten dieser Teilchen vollständig im Detektor gestoppt werden und dabei ihre Energie in dichten Absorbermaterialien abgeben. Zwischen den Absorbern befinden sich aktive Detektionsmedien, die die entstehenden elektromagnetischen oder hadronischen Schauer registrieren. Elektronen und Photonen werden im elektromagnetischen Kalorimeter erfasst, während Hadronen überwiegend im hadronischen Kalorimeter gestoppt werden. Nur Myonen und Neutrinos durchdringen beide Systeme nahezu ungehindert. Das ATLAS-Kalorimetersystem besteht aus zwei technologisch unterschiedlichen Komponenten: dem Flüssig-Argon-Kalorimeter (LAr) und dem Tile-Hadronkalorimeter. Das LAr-Kalorimeter umgibt den Inner Detector und misst die Energie von Elektronen, Photonen und einem Teil der Hadronen. Dazu nutzt es Schichten aus Blei, Kupfer oder Wolfram, die die einfallenden Teilchen abbremsen und in eine Vielzahl niederenergetischer Sekundärteilchen umwandeln. Diese Schauerteilchen ionisieren das dazwischenliegende flüssige Argon, wodurch ein elektrisches Signal entsteht. Das Tile-Kalorimeter schließt sich radial an das LAr-System an und misst die Restenergie hadronischer Teilchen, die im LAr-Kalorimeter nicht vollständig gestoppt wurden. Es besteht aus Stahlabsorbern, in denen Hadronen einen hadronischen Schauer erzeugen sowie Kunststoffszintillatoren, die bei der Passage geladener Schauerteilchen Licht aussenden. Dieses Licht wird über Photomultiplier in elektrische Signale umgewandelt. Die Stärke dieses elektrischen Signals ist proportional zur im Szintillator deponierten Energie des hadronischen Schauers und ermöglicht nach entsprechender Kalibration die Rekonstruktion der ursprünglichen Hadronenergie [12][3].

Der alte innere Detektor bildet das zentrale Spurverfolgungssystem von ATLAS. Er besteht aus drei Subdetektoren; dem Pixeldetektor, dem Silizium-Streifendetektor (SCT) und dem Übergangsstrahlungsdetektor (Transition Radiation Tracker, TRT), die alle in einem Magnetfeld parallel zur Strahlachse betrieben werden. Sie messen Richtung, Impuls und Ladungsvorzeichen elektrisch geladener Teilchen [12] [6] [8].

Der komplette alte Inner Detector wird im Phase-II-Upgrade durch den Inner Tracker (ITk) ersetzt. Den äußeren Teil des vollständig aus Siliziumdetektoren bestehenden ITk bilden die Silizium-Streifendetektoren. Sie bestehen aus Modulen, die jeweils einen großflächigen Siliziumstreifensensor enthalten. Diese Module werden auf leichten Kohlefaserstrukturen montiert, um eine stabile, thermisch effiziente und gleichzeitig möglichst massenarme Trägerstruktur zu gewährleisten. Die Streifensensoren besitzen lange, lineare Sensorelemente und sind darauf ausgelegt, große Flächen mit moderater räumlicher Auflösung effizient abzudecken. Wie in [Abbildung 2](#) in blau dargestellt, sind die Streifen-Module im Endkappenbereich des ITk senkrecht und im Barrelbereich waagrecht orientiert, sodass

die Module so ausgerichtet sind, dass die Streifen die typischen Flugbahnen der Teilchen möglichst senkrecht schneiden und dadurch eine optimale Ortsauflösung erreicht wird [12] [8].



**Abbildung 2:** Schematische Darstellung des Layouts des Inneren Trackers (ITk) im Rahmen des ATLAS-Upgrade-Projekts. Dargestellt ist ein einzelnes Quadrantensegment mit ausschließlich aktiven Detektorelementen. Die horizontale Achse entspricht der  $z$ -Koordinate entlang der Strahlachse, deren Ursprung im Wechselwirkungspunkt liegt, während die vertikale Achse den radialen Abstand  $r$  vom Zentrum zeigt [17].

Im Vergleich zu den Pixelmodulen, die in [Abbildung 2](#) in rot dargestellt sind, unterscheiden sich die Streifenmodule insbesondere in ihrer Geometrie, der Signalverarbeitung und ihrer funktionalen Ausrichtung. Während Pixelmodule auf maximale Ortsauflösung und hohe Trefferraten in unmittelbarer Nähe des Strahlrohrs ausgelegt sind, zielen die Streifenmodule auf eine robuste Flächenabdeckung, geringere Kanalzahlen pro Sensorfläche und eine kosteneffiziente Auslese. Die grundlegende Signalentstehung basiert jedoch, wie im Pixeldetektor, auf dem Prinzip der Ladungserzeugung in einem Siliziumsensor, wie in [Unterabschnitt 2.2](#) beschrieben. Der Unterschied liegt somit weniger im physikalischen Messprinzip als in der Art der Segmentierung und der daraus resultierenden Detektorarchitektur [12] [6].

Der Pixeldetektor stellt das innerste und technisch anspruchsvollste Subsystem des ATLAS Detektors dar. Er bildet die innerste Schicht des ITk und liefert dank seiner hohen

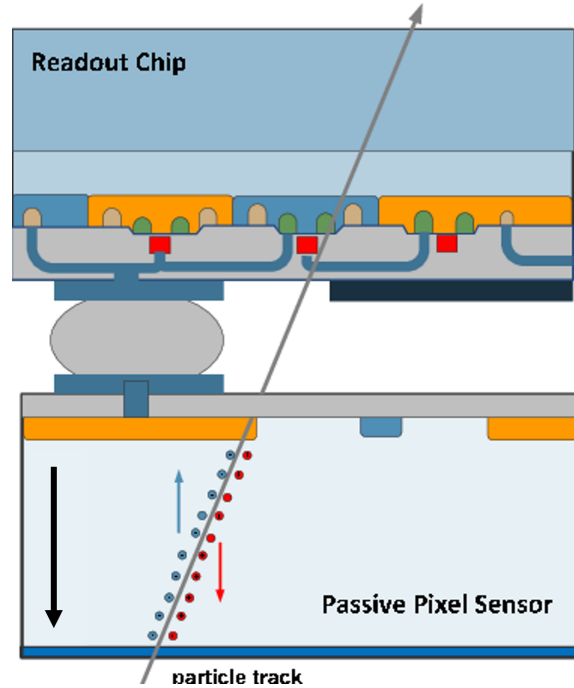
Anzahl und Dichte an Messpunkten die präzisesten Ortsmessungen im gesamten Spurdetektor. Die hohe Ortsauflösung ermöglicht eine Rekonstruktion des Entstehungspunktes eines Teilchens und spielt insbesondere bei der Identifikation kurzlebiger Teilchen eine zentrale Rolle. Dabei wird der Ort bestimmt, an dem ein Teilchen entsteht oder zerfällt, indem die gemessenen Spuren so zurück verfolgt werden, dass sie sich in einem gemeinsamen Schnittpunkt treffen. Auf diese Weise lassen sich sowohl der primäre Kollisionspunkt der Proton-Proton-Wechselwirkung als auch mögliche Zerfallsorte kurzlebiger Teilchen präzise lokalisieren [12] [6]. Die Pixeldetektormodule sind auf leichten, hochstabilen Kohlefaserstrukturen montiert. Der Pixeldetektor unterteilt sich in drei Subdetektorbereiche, das Inner System, das die ersten beiden Lagen umfasst, die Outer Endcaps, welche die ringförmigen Endkappen der Lagen 2-4 bilden und den Outer Barrel, der den zentralen Bereich der äußeren Lagen 2-4 bildet. Im Outerbarrel-Bereich kommen sogenannte Longerons als Trägerstrukturen zum Einsatz, während in den Endkappen ringförmige Kohlefaser-Träger verwendet werden. Die Module im inneren System werden im Zentralbereich auf Staves und im Endkappenbereich auf Ringen montiert. Diese lokalen Träger integrieren die Kühlröhrchen für die CO<sub>2</sub>-Kühlung. Wie in [Abbildung 2](#) in rot zu erkennen ist, werden die Staves/Longerons und Ringe präzise mechanisch ausgerichtet, sodass ein nahezu lückenloser zylindrischer Detektormantel entsteht [14]. Aufgrund der hohen Spurdichte und Strahlenbelastung muss der ITk Pixeldetektor eine hohe Granularität, Strahlungsresistenz und schnelle zuverlässige Auslese gewährleisten.

## 2.2 Aufbau und Funktionsweise von Pixeldetektormodulen

**Siliziumdetektoren** basieren auf dem Prinzip einer in Sperrrichtung betriebenen Halbleiterdiode, deren aktives Volumen durch eine angelegte Sperrrichtungsspannung vollständig verarmt wird. Der Prozess und Aufbau ist in [Abbildung 3](#) graphisch dargestellt. In dieser Verarmungszone sind nahezu alle freien Ladungsträger entfernt, sodass ein starkes elektrisches Feld entsteht, das sich über die gesamte Sensordicke erstreckt. Trifft ein elektrisch geladenes Teilchen auf den Sensor, so verliert es Energie durch Ionisation und erzeugt dabei Elektron-Loch-Paare entlang seiner Flugbahn. Innerhalb der Verarmungszone werden diese Ladungsträger sofort vom elektrischen Feld erfasst: Die Elektronen driften in Richtung der n-dotierten Seite, während die Löcher zur p-dotierten Seite wandern. Die Anzahl der erzeugten Paare ist proportional zur deponierten Energie. Dieser Driftprozess erzeugt einen messbaren Stromimpuls, dessen zeitliche Form und Höhe direkt mit der Menge der erzeugten Ladung korreliert [18].

Die im Silizium erzeugten Elektronen driften im vollständig verarmten Sensor nahezu verlustfrei zur positiv(er) geladenen Seite, die man bei einem Pixeldetektor in viele Segmente unterteilen kann und damit Signale einzelner Sensorsegmente auslesen kann. Jedes Sensor-Segment ist über sogenannte Löt Kügelchen (Bump-Bonds) elektrisch mit einer Zelle des Auslesechips verbunden. Dabei handelt es sich um mikroskopische Lötverbindungen, die beim Flip-Chip-Bonding zwischen Sensor und Chip hergestellt werden und auf speziell dafür vorgesehenen Bump-Bond-Pads sitzen. Diese Pads bestehen aus Passivationsöffnungen, unter denen freigelegtes Aluminium als Kontaktfläche dient [22]. Die Höhe des resultie-

renden Signals ist proportional zur Anzahl der erzeugten Elektron-Loch-Paare und damit zur im Sensor deponierten Energie. Der Auslesechip enthält typischerweise einen ladungsempfindlichen Verstärker, der die eingehende Ladung in eine Spannung umwandelt, sowie nachgeschaltete Pulsformungs- und Diskriminierungsstufen, die das Signal weiterverarbeiten und digitalisieren.



**Abbildung 3:** Schematischer Aufbau eines hybriden Halbleiterdetektors: Ein durchlaufendes Teilchen erzeugt Elektron-Loch-Paare im Siliziumsensor. Die Ladungsträger driften im elektrischen Feld zu den Bump-Bond-Kontakten und werden im Readout-Chip ausgelesen [19].

Der im ATLAS ITk genutzte **Auslesechip (RD53C)** ist ein System-on-Chip, das heißt ein hochintegrierter Auslesechip, der Verstärkung, Digitalisierung, Trigger-Logik und Datenverarbeitung auf einem einzigen Siliziumbaustein vereint. Er wurde speziell für die Auslese von Pixeldetektoren in den Hochenergieexperimenten ATLAS und CMS entwickelt. Obwohl beide Experimente auf derselben Grundarchitektur aufbauen, unterscheiden sich ihre Chipvarianten in Abmessungen, mechanischer Integration und einzelnen Designparametern. In dieser Arbeit wird ausschließlich die ATLAS-Version betrachtet [22].

Der RD53C-Chip ist funktional in mehrere nebeneinander angeordnete Bereiche gegliedert, die jeweils klar definierte Aufgaben übernehmen. Der größte Bereich bildet die Pixelmatrix, in der die Teilchenereignisse registriert werden. Sie besteht aus Pixeln mit einem Pitch von  $50\,\mu\text{m} \times 50\,\mu\text{m}$ , wobei der Pitch den Abstand zwischen zwei benachbarten Löt­kü­gel­chen definiert. Die Matrix umfasst 400 Spalten und 384 Reihen. Jeder Pixel des Sensors ist über eine eigene Bump-Bond-Verbindung elektrisch mit einer Auslese­zelle im

RD53C-Chip verbunden [22].

Zwischen Pixelmatrix und Chiprand befindet sich der in [Abbildung 4](#) dargestellte Analog Chip Bottom (ACB). Er umfasst eine Abfolge pixelweiser Funktionsblöcke, die ein eintreffendes Sensorsignal verstärken, formen, diskriminieren und schließlich digitalisieren. Der Signalpfad gliedert sich in fünf zentrale Komponenten: den Vorverstärker (Preamp), die Leakage Current Compensation (LCC), den Pre-Comparator, den Comparator sowie den Digital Core zur Time-over-Threshold-(ToT)-Messung [22].

Der Vorverstärker arbeitet als Ladungsverstärker, wobei eine eingehende Ladung  $Q$  den Feedback-Kondensator lädt und eine Ausgangsspannung

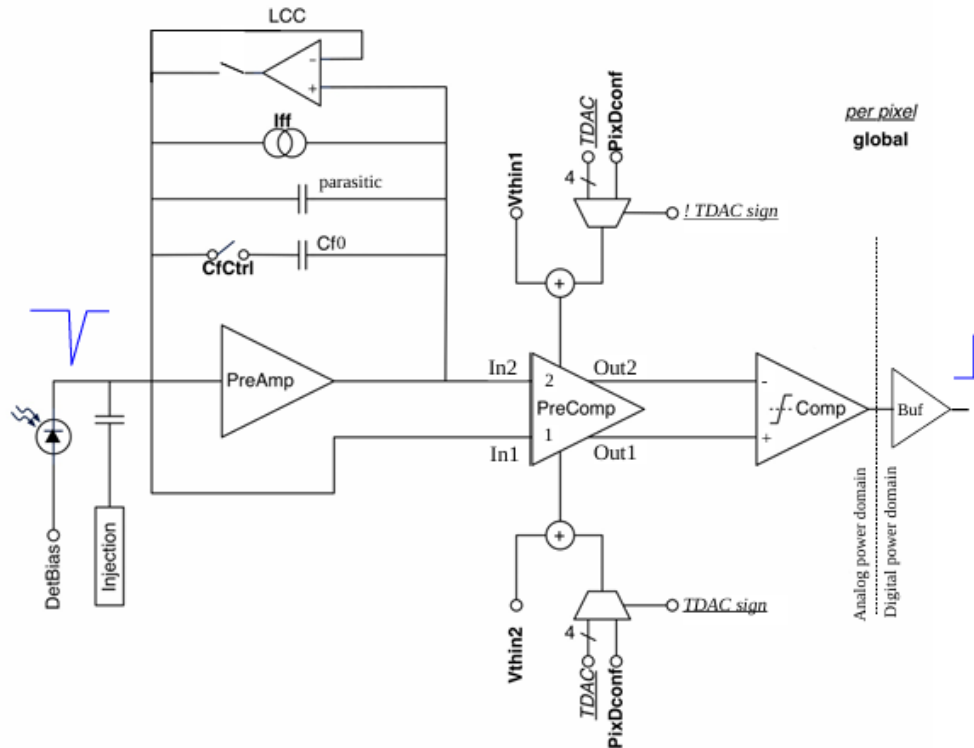
$$V_{\text{out}} = \frac{Q}{C_{\text{f0}}}.$$

erzeugt. Die Rückkopplungskapazität setzt sich aus der parasitären Kapazität  $C_{\text{par}} \approx 3.7 \text{ fF}$  und dem zuschaltbaren Kondensator  $C_{\text{f0}} \approx 3.3 \text{ fF}$  zusammen. Ein kontinuierlicher Resetstrom  $I_{\text{reset}}$  entlädt den Kondensator und führt zu einem exponentiellen Signalabfall

$$V(t) = V_0 e^{-t/\tau}, \quad \tau = \frac{C_{\text{f0}}}{I_{\text{reset}}}.$$

Die Leakage-Current-Compensation (LCC) kompensiert ausschließlich sehr langsame Änderungen des Sensorleckstroms und beeinflusst schnelle Detektorsignale nicht, sodass die eigentliche Signalverarbeitung vollständig im Vorverstärker erfolgt [22].

Der Pre-Comparator erzeugt einen einstellbaren Offset, aus dem der effektive Schwellenwert hervorgeht. Eine 4-Bit-Trimstruktur erlaubt die pixelweise Feinjustierung. Der Comparator vergleicht das verstärkte Signal mit diesem Schwellenwert und liefert ein binäres Ausgangssignal. Die Dauer, in der das Signal oberhalb des Schwellenwerts liegt, wird als Time-over-Threshold (ToT) gemessen und im Digital Core in einen digitalen Wert überführt, aus dem sich die im Sensor deponierte Energie ergibt [22].



**Abbildung 4:** Schematische Darstellung des analogen Front-End eines ATLAS-Pixelchips. Die Grafik zeigt den Signalverarbeitungsweg vom Eingang über Vorverstärker, Rückkopplungsschaltungen und Schwellenwert-DACs bis zum digitalen Ausgang [22].

Der digitale Bereich des Chips (Digital Chip Bottom, DCB) liegt direkt unterhalb des analogen Frontends. In diesem Bereich befindet sich die digitale Peripherie, die sämtliche globalen digitalen Aufgaben des Chips übernimmt. Dazu gehören die Verarbeitung und Weiterleitung der von den Pixeln gelieferten Time-over-Threshold-Daten (ToT), die interne Steuer- und Konfigurationslogik sowie verschiedene digitale Infrastrukturblöcke. Ergänzend sind im DCB weitere Funktionsmodule integriert, darunter ein Analog-Digital-Wandler (ADC), eine Clock-Data-Recovery- und Phase-Locked-Loop-Einheit (CDR/PLL) zur Takterzeugung und -stabilisierung sowie ein Ringoszillator. Der DCB bildet damit das digitale Zentrum des Chips, in dem alle Pixelinformationen zusammenlaufen, verarbeitet und für das spätere Auslesen aufbereitet werden [22].

Die elektrische Schnittstelle zur Außenwelt bildet der Padframe. Er besteht aus einer einzelnen Reihe von Wire-Bond-Pads entlang der unteren Chipkante mit einem Abstand von 100  $\mu\text{m}$ . Insgesamt stehen 198 Pads zur Verfügung, von denen vier bewusst ungenutzt bleiben, um mechanische Konflikte mit Bondwerkzeugen an den Rändern der Ausleitungsbereiche zu vermeiden. Über den Padframe werden sämtliche Versorgungs-, Steuer- und

Datensignale zwischen Chip und Ausleseelektronik übertragen. Sichtbare Positioniermarken unterstützen die präzise Positionierung während des Bondprozesses [22].

Der RD53C-Chip besitzt vier getrennte Stromversorgungsbereiche: einen analogen Bereich, einen digitalen Bereich, einen eigenen Bereich für die PLL-Schaltung sowie einen Bereich für die schnellen Ausgangstreiber (Serializer und Kabeltreiber). Alle Masseleitungen dieser Bereiche sind über einen gemeinsamen ESD-Schutzbus (VSS) miteinander verbunden, der antiparallele Dioden enthält und so eine sichere Ableitung elektrischer Ladungen ermöglicht [22].

### 3 Messungen zur Qualitätskontrolle von Detektormodulen

In Wuppertal wird der sogenannte Cellloading-Prozess durchgeführt. Dabei wird jedes Modul auf eine Graphitplatte geklebt, mit der das Modul später mechanisch auf die Trägerstruktur, die auch die Kühlung gewährleistet, montiert werden kann. Die vorliegende Arbeit untersucht die Messdaten, die sowohl vor als auch nach dem Kleben erhoben werden. Die erste Testphase hierbei ist die Modulbauabschluss-Prüfung (MaP), welche an der unmittelbar vorgelagerten Station und nicht in Wuppertal bei 20°C (warm) sowie bei -15°C (kalt) durchgeführt wird. In Wuppertal selbst erfolgt zunächst die Eingangskontrollmessung (Ekm), die ausschließlich im Warmzustand durchgeführt wird. Die Ekm dient primär der Überprüfung, ob während des Transports oder der Handhabung Schäden am Modul entstanden sind. Nach dem Kleben wird der bestückte Zellen Test warm sowie kalt durchgeführt. Die in der Qualitätskontrolle verwendeten Tests lassen sich grundsätzlich in zwei Kategorien einteilen: elektronische Funktionstests des Frontends und sensorphysikalische Charakterisierungstests. Diese beiden Testarten werden auf unterschiedlichen Ebenen durchgeführt, da sie völlig verschiedene physikalische Effekte prüfen. Die beiden relevanten Messungen in diesem Fall sind der Minimalfunktions-Test und die Messung der IV Kurven.

#### 3.1 Messungen der Auslesechips

Die Messungen von Schwellwert, Rauschen sowie analoger und digitaler Treffereffizienz im Rahmen des Minimalfunktions-Tests dienen der detaillierten Überprüfung der elektronischen Pixelkette eines Moduls. Jeder Pixel besitzt eine vollständig integrierte analoge und digitale Signalverarbeitung, sodass Fehlfunktionen lokal auftreten können, etwa abweichende Schwellwerte, erhöhte Rauschpegel, Pixel die nicht funktionieren, digitales Fehlverhalten einzelner Pixelregionen oder lokale Vorspannungs- und Verdrahtungsprobleme. Da die Elektronik jedes Pixels weitgehend unabhängig von benachbarten Pixeln arbeitet, müssen Schwellwert, Rauschen und Treffereffizienz zwingend pixelweise bestimmt werden, um lokale Defekte zuverlässig zu identifizieren und deren Einfluss auf die Gesamtfunktionalität des Moduls zu bewerten.

Für die Bestimmung der analogen Treffereffizienz werden in jedes Pixel definierte Kalibrationssignale injiziert. Die Signalerzeugung erfolgt über die im Chip integrierte Kalibrationsschaltung siehe [Abbildung 4](#), die es erlaubt, jedem Pixel wiederholt eine exakt

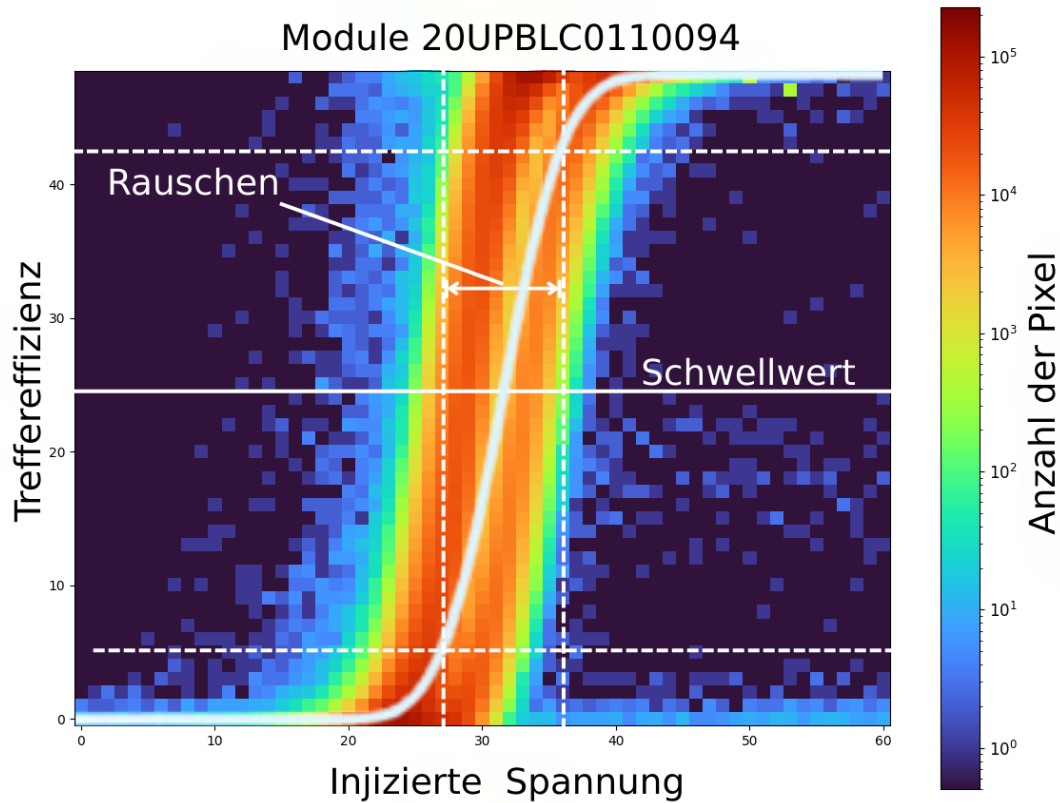
kontrollierte Ladungsmenge zuzuführen. Pro Pixel werden 100 solcher Injektionen durchgeführt. Anschließend wird gezählt, wie viele dieser künstlich erzeugten Signale vom analogen Frontend korrekt verarbeitet und als Treffer registriert wurden. Obwohl der digitale Verarbeitungspfad beim Auslesen der Treffer zwangsläufig mitverwendet wird, wird seine Funktionalität nicht durch diesen Test bewertet. Die digitale Treffereffizienz wird stattdessen separat über Simulationen und digitale Injektionen überprüft. Da die Datensätze der vier Auslesechips eines Moduls festen geometrischen Positionen zugeordnet sind, können die lokal gemessenen Trefferinformationen eindeutig in das Gesamtbild des Moduls eingeordnet werden. Die Treffereffizienz-Verteilung lässt sich dadurch zu einer vollständigen zweidimensionalen Darstellung des Moduls zusammensetzen, in der sowohl lokale Effizienzunterschiede als auch systematische Effekte sichtbar werden.

Der Schwellwert  $T_{\text{pix}}$  definiert die minimale Ladungsmenge, die ein eintreffendes Signal überschreiten muss, um als gültiger Treffer registriert zu werden. Mathematisch ergibt sich der Schwellwert aus der Detektionswahrscheinlichkeit  $P(Q)$  eines injizierten Signals der Ladung  $Q$  als jener Punkt, an dem  $P(Q) = 0.5$ , sodass  $T_{\text{pix}} = Q(P = 0.5)$ . Zur Bestimmung des Schwellwerts wird für jedes Pixel eine definierte Ladungsmenge  $Q$  in diskreten Schritten injiziert, woraus eine charakteristische S-Kurve entsteht, die den Übergang von nicht detektierten zu vollständig detektierten Signalen beschreibt. Der Schwellwert ergibt sich aus einer sigmoiden Anpassung dieser Kurve. Elektronisches Rauschen  $\sigma_{\text{pix}}$  entspricht den unvermeidbaren Spannungsschwankungen des Pixels. Diese Schwankungen bewirken, dass der ideale Schwellwert durch eine Gauß-Faltung mit dem Rauschpegel geglättet wird, wodurch der charakteristische Übergangsbereich der S-Kurve entsteht. Die Detektionswahrscheinlichkeit lässt sich durch

$$P(Q) = \frac{1}{2} \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{Q - T_{\text{pix}}}{\sqrt{2} \sigma_{\text{pix}}} \right) \right]$$

beschreiben. Sie bestimmt maßgeblich die Präzision, mit der ein Pixel seinen Schwellwert realisieren kann. Das Rauschen  $\sigma_{\text{pix}}$  ist somit direkt proportional zur Breite des Übergangsbereichs der S-Kurve: Ein hoher Rauschpegel führt zu einer flacheren Steigung, wodurch die Trennschärfe zwischen Signal und Untergrund abnimmt. Dies hat zwei wesentliche Konsequenzen: Erstens wird der effektive Schwellwert instabil, da Rauschfluktuationen die Lage des 50 %-Punktes verschieben können, zweitens steigt die Wahrscheinlichkeit für Fehltrigger, da Rauschspitzen häufiger den Schwellwert überschreiten [20].

Graphisch ist das zuvor mathematisch Beschriebene in [Abbildung 5](#) zu sehen. Schwellwert und Rauschen sind nicht unabhängig voneinander zu betrachten. Während der Schwellwert die Empfindlichkeit eines Pixels definiert, bestimmt das Rauschen, wie präzise dieser Schwellwert umgesetzt werden kann. Eine homogene Schwellwert-Verteilung ist nur dann aussagekräftig, wenn sie von einer ebenso homogenen und niedrigen Rausch-Verteilung begleitet wird. Erst das Zusammenspiel beider Größen erlaubt eine zuverlässige Bewertung der Stabilität und Leistungsfähigkeit der gesamten Frontend-Elektronik.



**Abbildung 5:** Die Heatmap zeigt die Pixel-Treffereffizienz des Chips in Abhängigkeit von der injizierten Spannung. In Weiß ist exemplarisch einer der 153.600 in der Heatmap enthaltenen Verläufe dargestellt. Die Breite des Anstiegs von 10 % auf 90 % beschreibt das Rauschen. Der Schwellenwert ist als die Hälfte dieser Anstiegsbreite definiert.

### 3.2 Messungen von IV-Kurven

Das Modul enthält einen zusammenhängenden Halbleiterkörper, dessen Leckstrom durch globale Materialeigenschaften wie Bulk-Defekte, Oberflächenströme, Herstellungsvariationen, mechanische Beschädigungen oder Strahlenschäden bestimmt wird. Die IV-Kurve beschreibt den Zusammenhang zwischen der angelegten Vorspannung  $V$  und dem resultierenden Leckstrom  $I_{\text{leak}}(V)$  und stellt eine zentrale Kenngröße zur Bewertung der elektrischen Integrität des Moduls dar. Bei niedrigen Spannungen wird der Leckstrom durch thermisch generierte Ladungsträger dominiert, während bei höheren Spannungen der Übergang in den vollständig depletierten Zustand zu einem stärkeren Anstieg führt. Abweichungen vom idealisierten Verlauf, etwa ein nichtlinearer oder abrupt ansteigender Strom, können auf strukturelle Defekte oder lokale Inhomogenitäten hinweisen [18].

Da der Leckstrom exponentiell von der Temperatur abhängt, müssen IV-Messungen auf eine gemeinsame Referenztemperatur normiert werden. Die Temperaturabhängigkeit folgt

der intrinsischen Ladungsträgerdichte in Silizium und lässt sich durch

$$I(T_2) = I(T_1) \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^2 \exp \left[ -\frac{E_g}{2k_B} \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \right]$$

beschreiben. Dabei bezeichnet  $I(T_1)$  den gemessenen Strom bei der Temperatur  $T_1$ , während  $I(T_2)$  den auf die Zieltemperatur  $T_2$  umgerechneten Strom darstellt. Für Silizium wird eine effektive Bandlücke von  $E_g \approx 1.21$  eV verwendet, da dieser Wert die temperaturabhängige intrinsische Ladungsträgerdichte hinreichend genau beschreibt. Die Boltzmann-Konstante beträgt  $k_B = 8.617 \cdot 10^{-5}$  eV/K; der Faktor  $2k_B$  ergibt sich daraus, dass die thermische Erzeugung von Elektron-Loch-Paaren exponentiell mit der halben Bandlücke skaliert. Diese Normierung stellt sicher, dass IV-Kurven unabhängig von den realen Messbedingungen vergleichbar bleiben und Unterschiede im Leckstromverhalten nicht durch Temperaturschwankungen verfälscht werden [15].

## 4 Auswertung

### 4.1 Analyse der IV-Kurven

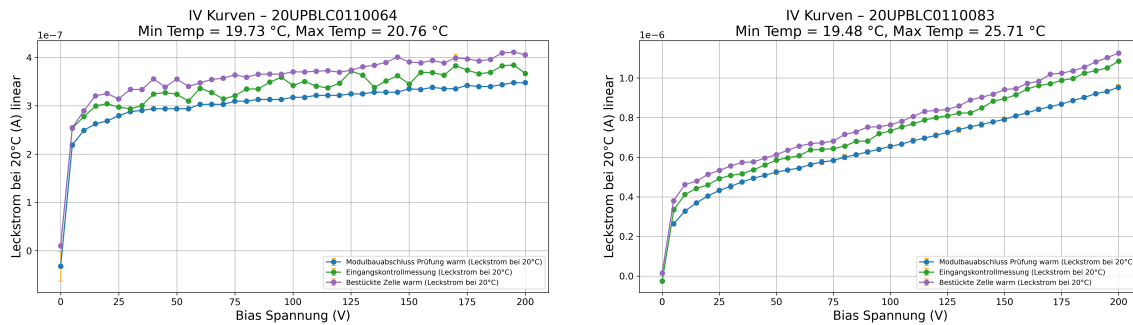
Für die Auswertung der IV-Messungen werden die gemessenen Strom-Spannungs-Verläufe der Module hinsichtlich Form, Stabilität und maximalem Leckstromwert untersucht. Die Kurven zeigen je nach Modul deutliche Unterschiede im Anstieg und im Erreichen hoher Strombereiche, sodass eine rein parametrische Beschreibung nicht sinnvoll ist. Stattdessen werden die Module anhand charakteristischer Verlaufstypen gruppiert, um strukturelle Auffälligkeiten, Instabilitäten und Abweichungen zwischen den Messphasen systematisch erfassen zu können.

Da der Leckstrom exponentiell von der Temperatur abhängt, sollten sich IV-Kurven unterscheiden, die bei unterschiedlichen Temperaturen aufgenommen werden, in ihrer absoluten Stromhöhe. Messungen im Warmzustand bei etwa 20 °C führen aufgrund der erhöhten thermischen Generation von Ladungsträgern zu deutlich höheren Leckströmen als Messungen bei ungefähr −15 °C. Der qualitative Verlauf der IV-Kurve sollte jedoch temperaturinvariant bleiben; insbesondere sollten der Beginn des Anstiegs, die Steigung im Depletionsbereich sowie das Verhalten nahe der maximalen Betriebsspannung konsistent sein. Abweichungen, die über den erwarteten temperaturinduzierten Skalierungsfaktor hinausgehen, können auf strukturelle Veränderungen oder Schädigungen des Moduls hinweisen und sind daher für die Bewertung der Modulintegrität von besonderer diagnostischer Relevanz.

Beim Plotten der IV-Kurven zeigt sich, dass die Module hinsichtlich ihres Spannungsverlaufs eine deutliche Varianz aufweisen. Die beobachteten Kurven lassen sich in vier charakteristische Verlaufstypen einteilen. Da sich die maximal erreichten Stromwerte je nach Verlaufstyp unterscheiden und gleichzeitig nur eine begrenzte Anzahl an Modulen und Messpunkten zur Verfügung steht, ist eine Kategorisierung der Module nach ihrer Verlaufsform für die weitere Analyse sinnvoller als das Ableiten und Vergleichen von Parametern aus Fit-Modellen.

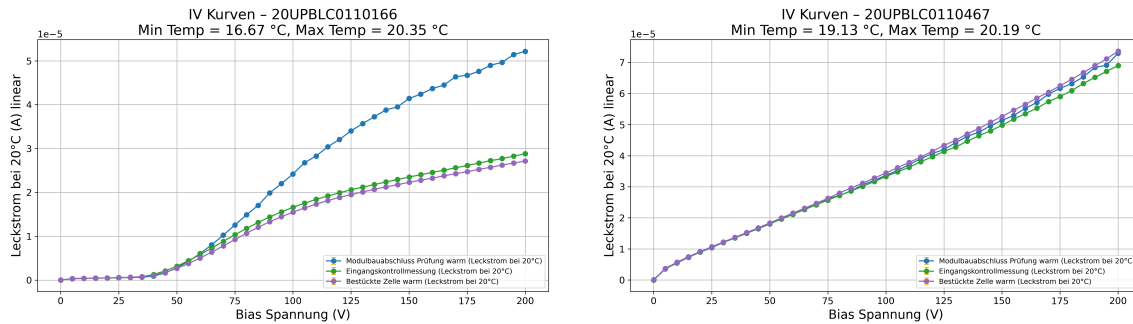
#### 4.1.1 Ergebnisse der Warmmessungen

Module mit sehr kleinen maximalen Leckstromwerten im Bereich von etwa  $1 \cdot 10^{-7}$  A bis  $9 \cdot 10^{-7}$  A zeigen zunächst einen logarithmischen Verlauf, der ab etwa 50 V in einen annähernd linearen Anstieg übergeht, wie in [Abbildung 6](#) zu erkennen ist. Dieses Verhalten entspricht dem typischen Leckstromanstieg eines intakten Sensors und weist auf eine stabile elektrische Charakteristik hin.



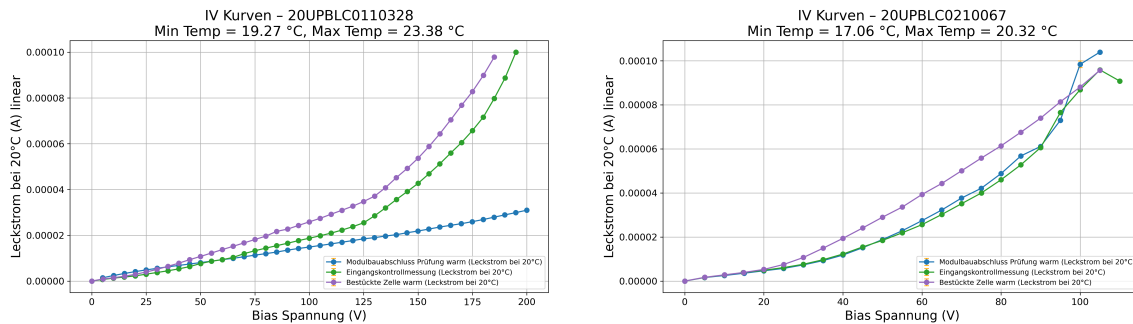
**Abbildung 6:** IV-Kurven der Module 20UPBLC0110064 (links) und 20UPBLC0110083 (rechts) bei 20°C. Beide Module weisen im Bereich bis  $6 \cdot 10^{-7}$  A einen logarithmischen Verlauf auf. Wobei rechts zu erkennen ist, dass ab diesem Punkt sich die IV-Kurve annähernd linear verhält.

Bei Modulen mit maximalen Leckstromwerten im Bereich von  $6 \cdot 10^{-7}$  A bis  $9 \cdot 10^{-5}$  A treten dagegen vermehrt lineare oder sigmoidale Formen wie in [Abbildung 7](#) auf. Diese Abweichungen vom idealen logarithmischen Verhalten deuten auf beginnende Instabilitäten hin, die beispielsweise durch mechanische Belastungen oder thermische Effekte verursacht sein können. Der Übergang von logarithmisch auf linear lässt sich im rechten Teil von [Abbildung 6](#) erkennen.



**Abbildung 7:** IV-Kurven der Module 20UPBLC0110166 (links) und 20UPBLC0110467 (rechts) bei 20°C. Beide Module weisen maximale Leckstromwerte im Bereich von  $6 \cdot 10^{-7}$  A bis  $9 \cdot 10^{-5}$  A auf und zeigen überwiegend lineare bis logistische Anstiegsformen. Diese Abweichungen vom idealen logarithmischen Verhalten deuten auf beginnende Instabilitäten hin.

Besonders auffällig sind Module mit maximalen Leckstromwerten im Bereich von über  $6 \cdot 10^{-5}$  A. Diese zeigen fast ausschließlich exponentielle Verläufe oder erreichen sogar die Strombegrenzung der Messhardware (current limit). Das führt in der Regel zum sofortigen Abbruch der Messung, wodurch weniger Messwerte existieren wie in [Abbildung 8](#) zu erkennen.

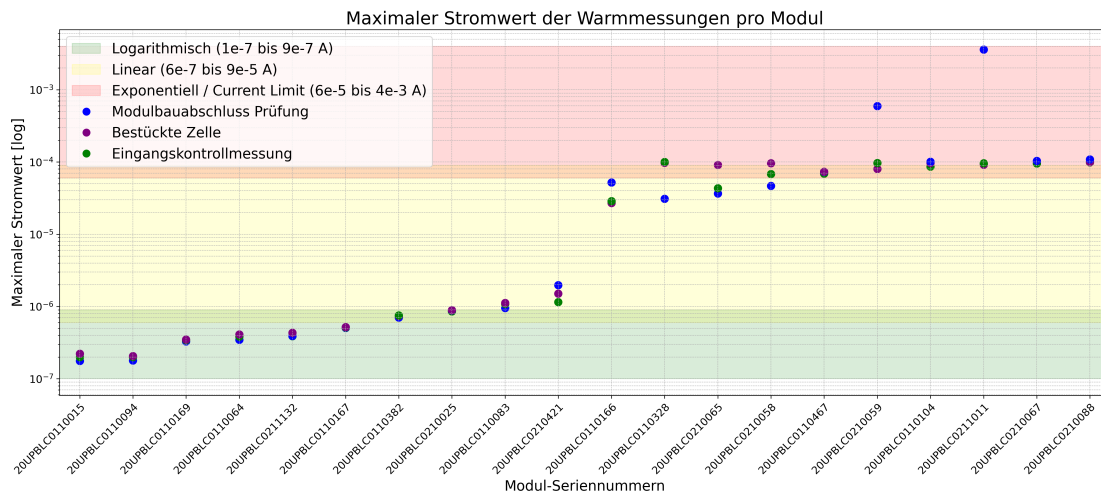


**Abbildung 8:** IV-Kurven der Module 20UPBLC0110328 (links) und 20UPBLC0210067 (rechts) bei 20°C. Beide Module weisen maximale Leckstromwerte im Bereich von  $6 \cdot 10^{-5}$  A bis  $5 \cdot 10^{-3}$  A. Die Verläufe zeigen eine exponentielle Anstiegsform. Im Falle der rechten Kurve erkennt man das Erreichen der Strombegrenzung der Messhardware. Dieses Verhalten weist auf deutliche Abweichungen vom idealen logarithmischen Verlauf hin und ist charakteristisch für Module mit ausgeprägten elektrischen Instabilitäten.

Die beobachteten Zusammenhänge zwischen dem maximalen Leckstromwerten und Verlaufstyp sind in [Abbildung 9](#) zusammengefasst.

Vergleicht man die Messwerte zwischen den Phasen Eingangskontrollmessung und bestückter Zelle, zeigen sich nur geringfügige Veränderungen von durchschnittlich  $10\% \pm 20\%$ . Zwischen Modulbauabschlussprüfung und Eingangskontrollmessung liegen die Abweichun-

gen dagegen bei über  $200\% \pm 800\%$ ; ohne die vier stärksten Ausreißer reduzieren sie sich auf etwa  $20\% \pm 30\%$ . Der deutliche Unterschied ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass für die Modulbauabschlussprüfung ein anderer Messaufbau verwendet wird. Ein direkter Vergleich dieser Phase ist daher nur eingeschränkt sinnvoll und sollte bei der Auswertung der Kaltmessungen in Abschnitt 4.1.2 berücksichtigt werden. Der relativ hohe Wert der Standardabweichung zwischen Eingangskontrollmessung und bestückter Zelle entsteht durch vier Module, die um mehr als 20 % voneinander abweichen. In zwei Fällen ist dies auf ein unterschiedlich frühes Erreichen der Strombegrenzung zurückzuführen. In anderen Fällen bleibt die Form der IV-Kurve zwar erhalten, jedoch steigt der Strom so stark an, dass die letzte Messung vor der Begrenzung unterschiedlich nah an dieser liegt. Dadurch unterscheiden sich die maximal gemessenen Leckstromwerte deutlich. Weitere Abweichungen treten bei Modulen auf, deren Kurvenverlauf von einem logarithmischen in einen linearen Anstieg übergeht: Je nachdem, bei welcher Spannung dieser Übergang einsetzt, steigt die Kurve früher oder später stärker an und führt so zu größeren Differenzen zwischen den Phasen.

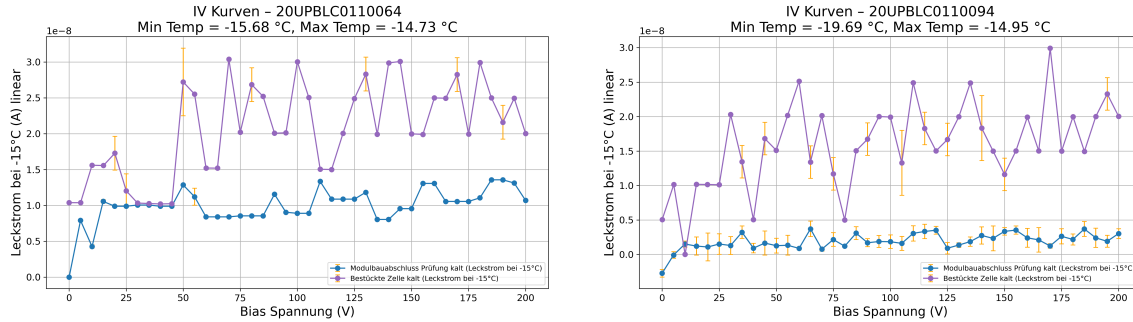


**Abbildung 9:** Maximale Leckstromwerte der Module aus den Warmmessungen. Die farblich hinterlegten Bereiche kennzeichnen die für den warmen Betriebszustand typischen Stromzonen. Diese Bereiche überlappen wodurch es so aussieht als gäbe es 5 Zonen. Teilweise kann man auch mehrere Phänomene bei einer Kurve beobachten. Die Punktfarben unterscheiden die Messphasen.

#### 4.1.2 Ergebnisse Kaltmessungen

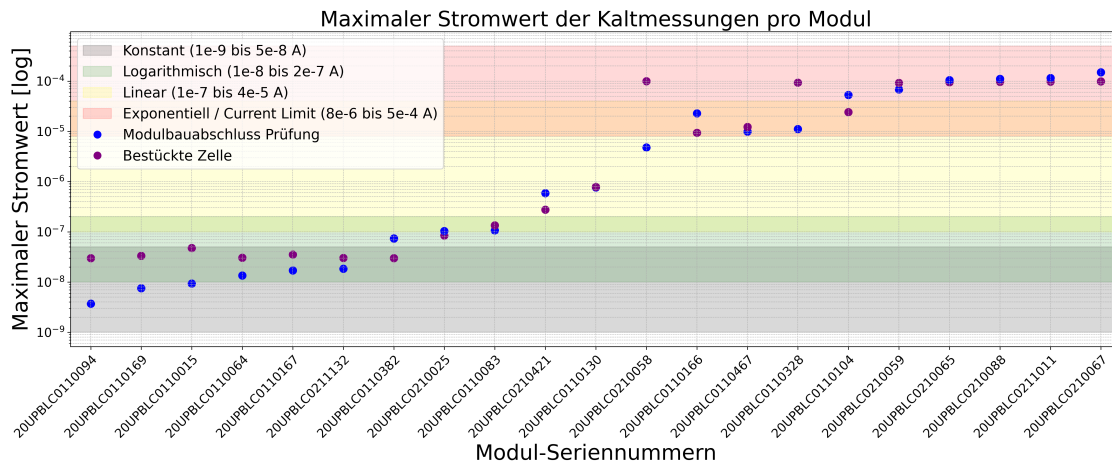
Die Verläufe der IV-Kurven bei  $25^{\circ}\text{C}$  sind ähnlich wie bei denen in Abschnitt 4.1.1 nur dass hier ein Phänomen mehr auftritt. Die IV-Kurven der Module mit sehr kleinen maximalen Leckstromwerten bis  $5 \cdot 10^{-8} \text{ A}$  haben einen nahezu konstanten Verlauf siehe [Abbildung 10](#). Eine Aussage zu diesen lässt sich nicht genauer treffen. Der Strom ist so gering, dass er aufgrund der Messungenauigkeit entweder nicht genau gemessen werden kann oder es gar

keinen gibt. Ersteres würde bedeuten, dass das Modul grundsätzlich funktionstüchtig ist. Letzteres bedeutet es funktioniert gar nicht. Im späteren Verlauf werden diese Module entsprechend ihrer Warmmessung kategorisiert.



**Abbildung 10:** IV-Kurven der Module 20UPBLC0110064 (links) und 20UPBLC0110094 (rechts) bei  $-15^{\circ}\text{C}$ . Beide Module weisen maximale Leckstromwerte von bis zu  $5 \cdot 10^{-8}$  A auf. Beide Verläufe zeigen über den gesamten Spannungsbereich hinweg nahezu konstante Stromwerte, sodass sich kein charakteristischer Anstiegstyp (logarithmisch, linear oder exponentiell) ausbildet.

Bei allen anderen maximalen Leckstromwerten verschieben sich die Grenzen, bei welchem maximalen Leckstromwert welcher Verlaufstyp auftritt. Die Kurven ähneln sonst stark den obigen in [Unterunterabschnitt 4.1.1](#). Die Module mit einem maximalen Leckstrom im Bereich von  $1 \cdot 10^{-8}$  A bis  $2 \cdot 10^{-7}$  A verlaufen logarithmisch. Module mit maximalem Leckstromwert im Bereich von  $10^{-7}$  A bis  $4 \cdot 10^{-5}$  A zeigen dagegen lineare Verläufe. Module mit sehr hohem maximalen Leckstromwert ab  $8 \cdot 10^{-6}$  A zeigen exponentielle Verläufe oder erreichen die Strombegrenzung der Messhardware. Die entsprechenden Phasen sind überlappend und mit den betrachteten Modulen in [Abbildung 11](#) dargestellt.



**Abbildung 11:** Maximale Leckstromwerte der Module aus den Kaltmessungen, dargestellt als logarithmischer Scatterplot. Die farblich hinterlegten Bereiche markieren charakteristische Stromzonen. Die Bereiche überlappen sich. Teilweise kann man mehrere Phänomene bei einer Kurve beobachten. Die Punktfarben kennzeichnen die Messphase.

Vergleicht man die Messwerte zwischen Modulbauabschlussprüfung und bestückter Zelle, zeigen sich bei den meisten Modulen nur geringe Veränderungen. Wie in [Abbildung 11](#) zu erkennen ist, treten insbesondere bei Modulen mit kleineren maximalen Leckströmen einzelne Fälle auf, in denen die Messwerte der bestückten Zelle deutlich höher liegen als jene der Modulbauabschlussprüfung. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Messungen der bestückten Zelle wie in [Abbildung 10](#) zu erkennen insgesamt, aufgrund der Messgenauigkeit des Aufbaus, stärkeren Schwankungen unterliegen.

In zwei Fällen sind die Messwerte der bestückten Zelle ebenfalls deutlich größer, während die IV-Kurven exponentiell verlaufen. Hier liegt die Ursache entweder in einem vorzeitig abgebrochenen Messlauf der Modulbauabschlussprüfung, der zu einem künstlich verkleinerten Maximalwert führt, oder in einer abweichenden Verlaufsform: Während die MaP in solchen Fällen einen linearen Anstieg zeigt, weist die bestückte Zelle einen exponentiellen Verlauf auf. Dadurch variieren die maximalen Leckstromwerte stark.

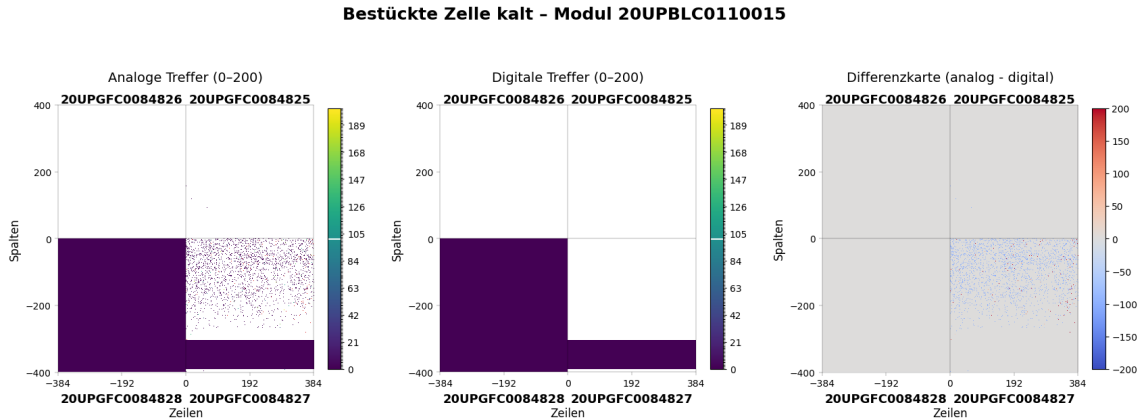
Bei den meisten anderen Modulen sind die MaP-Werte größer als bei der Messung der bestückten Zelle und der Unterschied so stärker ausgeprägt. Dadurch ist die Änderung der Maximalwerte bei durchschnittlich  $60\% \pm 50\%$ . Der Verlaufstyp bleibt unverändert. Konstant oder logarithmisch verlaufende Module behalten ihre Charakteristik bei, während auffällige Module auch nach dem Kleben auffällig bleiben. Dies deutet insgesamt darauf, hin, dass auch hier der unterschiedliche Messaufbau einen Einfluss auf die Messdaten haben kann, da sich an den Verlaufstypen nichts ändert.

Die maximalen Leckstromwerte der Warmmessungen sind wie erwartet höher als jene der Kaltmessungen. Der Verlaufstyp der IV-Kurve ändert sich in der Regel nicht. Ausnahme bilden hier Kurven, die keine großen Maximalwerte haben. Bei kalten Messungen lassen sich

bei diesen oft keine Kurvenform feststellen.

## 4.2 Analyse der Treffereffizienz

Zur Visualisierung der Treffereffizienz wird eine normierte Farbskala verwendet, die zwecks Vergleichbarkeit stets bei 0 beginnt und bei 200 endet. Dabei entspricht der untere Skalenbereich einem dunklen Violett, während hohe Werte bis 200 in ein helles Gelb übergehen. Pixel, die mehr als 200 Treffer registrieren, werden gesondert in Rot dargestellt, um auffällige Pixel deutlich hervorzuheben. Um Pixel zu identifizieren, die exakt die nominal erwarteten 100 Treffer aufweisen, werden diese zusätzlich in Weiß eingefärbt. Dadurch lassen sich selbst minimale Abweichungen vom Sollwert visuell klar erkennen. Aus den beiden Messungen werden drei Darstellungen gewonnen, die in [Abbildung 12](#) dargestellt sind: die analoge Treffereffizienz-Karte, die digitale Treffereffizienz-Karte sowie die Differenzkarte (analog – digital). Die Differenzkarte besitzt eine eigene, symmetrische Farbskala, um sowohl positive als auch negative Abweichungen übersichtlich darzustellen und gleichzeitig eine Verwechslung mit den absoluten Treffereffizienz-Plots zu vermeiden. Die einzelnen Auslesechips sind um 90° gedreht, sodass die in der Abbildung dargestellten Zeilen den Spalten der Auslesechips entsprechen.



**Abbildung 12:** Die Abbildung zeigt die Treffereffizienz Karten des Moduls 20UPBLC0110015 nach dem Kleben kalt. Links ist die analoge Treffereffizienz Karte in der Mitte digital und rechts die Differenzkarte. Der Front End Chip unten links fällt komplett aus. Beim Auslesechip unten rechts kann man 11 Spaltenblockprobleme von 88 Chipspalten erkennen. Analog fallen unten rechts mehrere einzelne Pixel aus.

Ein Idealer Chip hat 0 Pixel die nicht 100 Treffer haben. Bei insgesamt 20 Modulen und somit 80 Chips, die in Wuppertal den Klebeprozess vollständig durchlaufen haben, ergeben sich die in [Tabelle 1](#) dargestellten mittleren analogen und digitalen Effizienzen für die drei betrachteten Testphasen. Die Zahlen ergeben sich, indem die Zahl aller Pixel, die nicht 100 Hits anzeigen, Chipweise durch 153.600, also die Anzahl aller Pixel, geteilt werden.

Wie in [Abbildung 12](#) erkennbar, lassen sich drei relevante Abweichungsmuster von der

**Tabelle 1:** Prozentualer Anteil an Pixeln, die bei der Treffereffizienz-Messung keine 100 Treffer erreichen, über 20 vollständig getestete Module in Wuppertal. Der Fehler ist die Standardabweichung aus den prozentualen Treffereffizienzen aller Modulen.

|                     | Modulbauabschluss<br>Prüfung [%] | Eingangskontroll-<br>messung [%] | Bestückte<br>Zelle [%] |
|---------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------|
| <b>Warm Analog</b>  | $10 \pm 30$                      | $10 \pm 30$                      | $10 \pm 40$            |
| <b>Warm Digital</b> | $10 \pm 30$                      | $10 \pm 30$                      | $10 \pm 40$            |
| <b>Kalt Analog</b>  | $10 \pm 30$                      | —                                | $20 \pm 40$            |
| <b>Kalt Digital</b> | $10 \pm 30$                      | —                                | $10 \pm 40$            |

idealen Treffereffizienz Karte erkennen: Ganze Auslesechips die ausfallen, das sogenannte Spaltenblockproblem, bei dem 8 ganze Chipspalten 0 Treffer zeigen und einzelne Pixel, die ausfallen oder nicht 100 Treffer messen.

**Auslesechip Ausfälle** sorgen dafür, dass die Standardabweichung in [Tabelle 1](#) wesentlich höher als die eigentlichen Werte sind und die prozentuale Gesamttreffereffizienz gering ist. Je nach Phase besitzen die meisten Module zu über 97 % Pixel mit genau 100 Treffer. Fällt nur ein Chip aus, verliert das Modul 25 % und die Gesamt Effizienz aller 20 Module sinkt um 1,25 %. Welcher Auslesechip in welcher Phase ausfällt, ist in [Tabelle 2](#) dargestellt. Ein Auslesechip der bei einer Messung nicht funktioniert, wird maskiert, das heißt er wird bei dem Test nicht weiter berücksichtigt. Dass ein Chip nicht funktioniert, ist meistens dann ersichtlich wenn die Messung, wegen vieler defekter Pixel, länger als erwartet dauert. Grundsätzlich können also die meisten Chips, die in einer Messung ausfallen gemessen werden, aber das Ergebnis ist dann schlecht und braucht länger.

**Tabelle 2:** Diese Tabelle zeigt alle Module, bei denen ein oder mehr Chips ausfallen in den einzelnen Phasen. Die Kürzel stehen für die Position bei denen der Chip ausfällt. Also beispielsweise ol für oben links, ur für unten rechts und so weiter. Ein - bedeutet, dass kein Ausfall in der Phase gemessen wurde. Die letzte Zeile stellt dar wie viel Prozent der Gesamttreffereffizienz die Ausfälle der jeweiligen Messung ausmachen.

| Modul                  | Modulbauabschluss<br>Prüfung (MaP) |        | Eingangskontroll-<br>messung (Ekm) | Bestückte<br>Zelle |         |
|------------------------|------------------------------------|--------|------------------------------------|--------------------|---------|
|                        | warm                               | kalt   |                                    | warm               | kalt    |
| 20UPBLC0110015         | ul                                 | ul     | ul                                 | ul                 | ul      |
| 20UPBLC0110064         | ol, ur                             | ol, ur | ol                                 | ol                 | ol      |
| 20UPBLC0110083         | –                                  | –      | ur, ul                             | ur, ul             | ur, ul  |
| 20UPBLC0110166         | –                                  | –      | ul                                 | –                  | –       |
| 20UPBLC0110328         | ol                                 | ol     | ol                                 | ol                 | ol      |
| 20UPBLC0110467         | –                                  | –      | –                                  | ol                 | ol      |
| 20UPBLC0210025         | ur                                 | ur     | ur                                 | ur                 | ur      |
| 20UPBLC0210058         | –                                  | –      | –                                  | –                  | ur      |
| 20UPBLC0210065         | –                                  | –      | –                                  | ol                 | ol      |
| 20UPBLC0210067         | –                                  | –      | –                                  | ol                 | ol      |
| 20UPBLC0211011         | –                                  | –      | –                                  | ur                 | ur      |
| Total                  | 5                                  | 5      | 7                                  | 10                 | 11      |
| Prozentualer<br>Anteil | 6,25 %                             | 6,25 % | 8,75 %                             | 12,5 %             | 13,75 % |

Bei Modul 20UPBLC0110083 war bereits bei der Ankunft in Wuppertal eine sichtbare mechanische Beschädigung erkennbar. Ab der Ekm fallen daher die beiden unteren Chips vollständig aus. Bei den Modulen 20UPBLC0110064 und 20UPBLC0110166 konnte jeweils ein Chip in einer frühen Messung nicht ausgelesen werden, wurde jedoch in späteren Messungen ohne Einschränkungen erfasst. Dies spricht deutlich für einen Messfehler und nicht für einen Defekt der Chips. Unter der Annahme, dass diese Chips funktionsfähig sind, ergibt sich vor dem Kleben eine Verteilung von vier Modulen mit jeweils einem defekten Chip sowie einem Modul mit zwei defekten Chips.

Nach dem Kleben zeigen drei der betrachteten Modulen einen Ausfall des oben links liegenden Chips, während bei einem weiteren Modul der unten rechts liegende Chip nicht mehr gemessen werden konnte und bei einem weiteren unten rechts. Die drei Module mit Ausfall des oben links liegenden Chips wurden alle auf derselben Position im Testsetup vermessen. Der Fehler trat später erneut bei einem weiteren Modul auf, das für diese Arbeit jedoch nicht mehr berücksichtigt wird. Die betroffenen Module wurden inzwischen weitergeschickt und dort bislang nicht erneut getestet. Nach Entdeckung dieses Musters wurde ein Modul sowohl auf der verdächtigen Position im Testsetup als auch auf einer alternativen Position vermessen. Auf der ursprünglichen Position fiel der oben links liegende Chip erneut aus, während auf der alternativen Position alle Chips korrekt ausgelesen werden konnten. Dies

legt nahe, dass die Testposition selbst fehlerhaft ist. Für die weitere Analyse werden daher die Treffereffizienzen der vorherigen Messungen herangezogen.

Unter Berücksichtigung dieser Ergebnisse verbleiben lediglich zwei Chips, die nach dem Klebeprozess im Gegensatz zu zuvor nicht messbar sind. Einer dieser Chips ist jedoch im Warmbetrieb messbar.

Vernachlässigt man Chips die in einer Phase nicht gemessen werden, erhält man die Werte in [Tabelle 3](#), wodurch man in jeder Phase auf einen Durchschnitt von etwa 99 % kommt.

**Tabelle 3:** Prozentualer Anteil an Pixeln, die bei der Treffereffizienz-Messung nicht 100 Treffer erreichen, über 20 vollständig getestete Module in Wuppertal. Über alle Phasen werden Chips nicht berücksichtigt, die in einer Messung nicht ausgelesen werden konnten. Der Fehler wird als Fehler des Mittelwerts der prozentualen Treffereffizienzen der betrachteten Chips angegeben.

|                     | Modulbauabschluss<br>Prüfung [%] | Eingangskontroll-<br>messung [%] | Bestückte<br>Zelle [%] |
|---------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------|
| <b>Warm Analog</b>  | $0,59 \pm 0,21$                  | $0,75 \pm 0,21$                  | $0,62 \pm 0,21$        |
| <b>Warm Digital</b> | $0,58 \pm 0,21$                  | $0,62 \pm 0,21$                  | $0,59 \pm 0,21$        |
| <b>Kalt Analog</b>  | $0,95 \pm 0,37$                  | —                                | $0,92 \pm 0,35$        |
| <b>Kalt Digital</b> | $0,75 \pm 0,29$                  | —                                | $0,71 \pm 0,28$        |

Die im Vergleich zum den eigentlichen Werten hohen Standardabweichungen von 2 bis 4 % liegen hauptsächlich an einem Modul mit relativ großem Spaltenblockproblem, welches in jeder Phase unter 85 % Prozent liegt.

**Spaltenblockprobleme** sind die zweitgrößte Quelle für Effizienzeinbrüche. Dabei fallen mehrere benachbarte Chipspalten sowohl digital als auch analog vollständig aus und registrierten 0 Treffern. In [Abbildung 12](#) ist ein solches mit 88 Spalten zu sehen. Welche Module wie große Spaltenblockprobleme aufweisen, ist in [Tabelle 4](#) festgehalten.

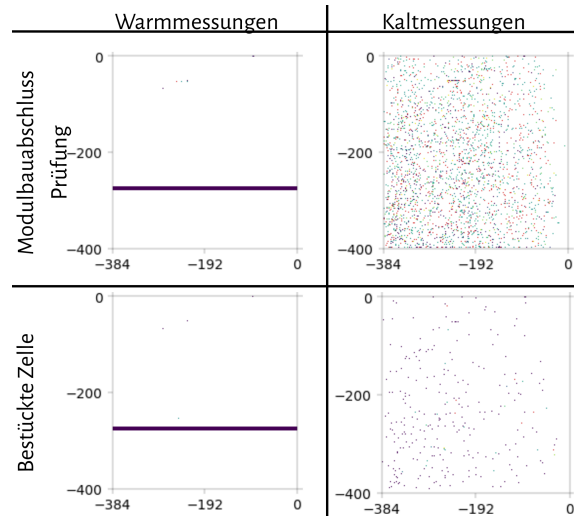
Das Spaltenblockproblem tritt stets in acht benachbarten Chipspalten auf, da jeweils  $8 \times 8$  Pixel zu einem sogenannten Core gehören. Ein Auslesechip besteht aus 50 Core-Spalten mit jeweils 48 dieser Cores. Die Cores werden spaltenweise mit Spannung und Strom versorgt, sodass bei problematischen Pixeln ganze Core-Spalten maskiert werden. Zwischen den analogen und digitalen Messungen zeigen sich dabei keine Unterschiede, und auch zwischen den einzelnen Phasen bleibt das Verhalten grundsätzlich konsistent. Die in [Tabelle 4](#) sichtbaren Unterschiede zwischen den Phasen lassen sich durch andere Effekte erklären. Beim Modul 20UPBLC0110064 tritt ab der Eingangskontrollmessung ein zusätzliches Spaltenblockproblem auf. Dies ist jedoch nicht auf eine Verschlechterung zurückzuführen, sondern darauf, dass in der vorherigen Phase ein Chip nicht ausgelesen werden konnte und nun wieder Messwerte liefert. Beim Modul 20UPBLC0210067 zeigt sich das gegenteilige Verhalten: Ein zuvor beobachtetes Spaltenblockproblem verschwindet, weil der gesamte Auslesechip

**Tabelle 4:** Hier ist die Anzahl der vom Spaltenblockproblem betroffenen Spalten pro Modul dargestellt.

| Modul          | Modulbauabschluss<br>Prüfung |      | Eingangskontroll-<br>messung | Bestückte<br>Zelle |      |
|----------------|------------------------------|------|------------------------------|--------------------|------|
|                | Warm                         | Kalt |                              | Warm               | Kalt |
| 20UPBLC0110015 | 64                           | 88   | 64                           | 64                 | 88   |
| 20UPBLC0110064 | 8                            | 8    | 16                           | 16                 | 16   |
| 20UPBLC0110083 | 128                          | 128  | 8                            | 8                  | 8    |
| 20UPBLC0110094 | 16                           | 8    | 16                           | 16                 | 8    |
| 20UPBLC0110169 | 8                            | 8    | 8                            | 8                  | 8    |
| 20UPBLC0210058 | 8                            | 8    | 8                            | 8                  | 8    |
| 20UPBLC0210065 | 8                            | 16   | 8                            | 8                  | 16   |
| 20UPBLC0210067 | 8                            | 8    | 8                            | 0                  | 0    |
| 20UPBLC0211132 | 32                           | 48   | 32                           | 32                 | 48   |

ausfällt und somit keine der betroffenen acht Spalten mehr gemessen werden kann. Beim Modul 20UPBLC0110083 reduziert sich die Anzahl der betroffenen Spalten von 128 auf lediglich 8, da zwei Chips aufgrund manueller Beschädigungen der außenliegenden Wires vollständig ausfallen. Dies bedeutet, dass die beobachteten Unterschiede zwischen den Phasen nicht auf systematische Veränderungen der Module zurückzuführen sind, sondern auf Ausfälle einzelner Chips oder auf Messartefakte, die den Eindruck eines veränderten Spaltenblockproblems erzeugen.

Zwischen den Kalt- und Warmmessungen vergrößert sich der Bereich des Spaltenblockproblems bei drei Modulen: einmal um 24 Spalten (20UPBLC0110015), einmal um 8 Spalten (20UPBLC0210065) und einmal um 16 Spalten (20UPBLC0211132). In zwei Fällen wird ein bestehendes Spaltenblockproblem größer, in zwei weiteren Fällen fallen zusätzlich 8 neue Spalten aus. Beim Modul 20UPBLC0110094 (siehe [Abbildung 13](#)) verschwindet das zuvor beobachtete Spaltenblockproblem auf einem Auslesechip in der Kaltmessung und wird durch ein SStreuselmusterersetzt. Das Phänomen tritt in zwei unabhängigen Messungen mit unterschiedlichen Setups auf. Was dafür spricht, dass dies nicht auf Umstände der Messung zurückzuführen ist.



**Abbildung 13:** Darstellung des veränderten Ausfallmusters eines Auslesechips des Moduls 20UPBLC0110094. Das zuvor beobachtete Spaltenblockproblem verschwindet in der Kaltmessung und wird durch ein SStreuselmuster ersetzt. Die Anzahl der analogen und digitalen Pixelausfälle zwischen den Phasen unterscheidet sich, da digital kein SStreuselmuster auftritt. Das Spaltenblockproblem verschwindet dennoch.

Insgesamt macht das Spaltenblockproblem bei den 20 untersuchten Modulen je nach Phase bis zu einem Prozent der Pixel aus. Neun Module sind betroffen, davon vier so stark, dass der maximale Ausfallwert von einem Prozent, der nach zehn Jahren nicht überschritten werden sollte, bereits erreicht wird. Dies ist bereits der Fall, wenn nur zwei Spaltenblockprobleme, also 16 Spalten, in einem Modul auftreten. Vernachlässigt man jedoch die beschriebenen Messfehler, erhält man die in [Tabelle 5](#) dargestellten Werte.

**Tabelle 5:** Prozentualer Anteil an Pixeln, die bei der Treffereffizienzmessung nicht 100 Treffer erreichen, über 20 vollständig getestete Module in Wuppertal. Über alle Phasen werden Chips ausgeblendet, die in einer Messung nicht ausgelesen werden konnten, und zusätzlich alle Spaltenblockprobleme entfernt. Der Fehler ist die Standardabweichung der prozentualen Treffereffizienzen dieser Chips.

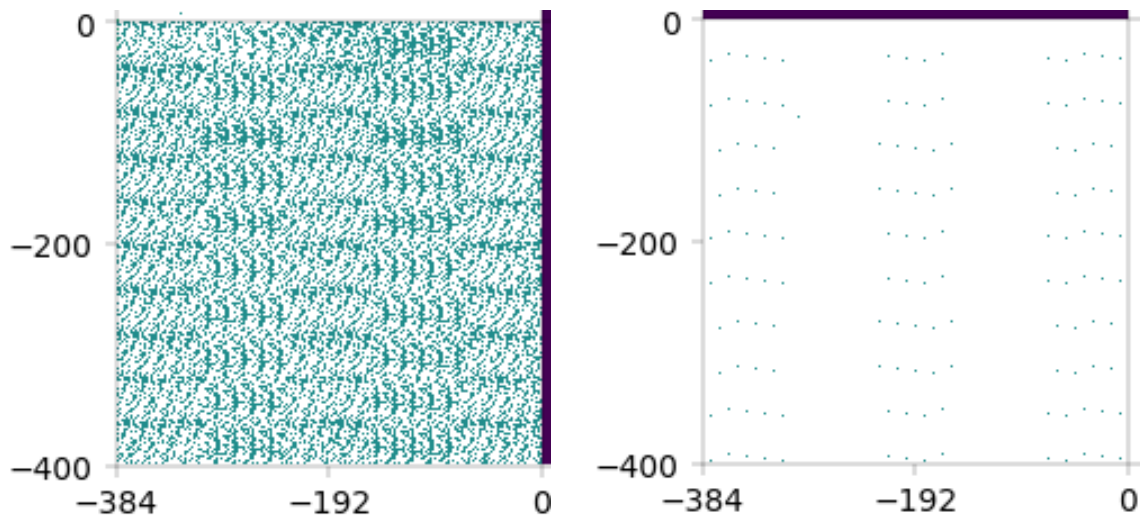
|                     | Modulbauabschluss<br>Prüfung [%] | Eingangskontroll-<br>messung [%] | Bestückte<br>Zelle [%] |
|---------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------|
| <b>Warm Analog</b>  | $0,022 \pm 0,045$                | $0,018 \pm 0,064$                | $0,052 \pm 0,021$      |
| <b>Warm Digital</b> | $0,015 \pm 0,065$                | $0,053 \pm 0,023$                | $0,020 \pm 0,073$      |
| <b>Kalt Analog</b>  | $0,27 \pm 0,13$                  | —                                | $0,24 \pm 0,11$        |
| <b>Kalt Digital</b> | $0,038 \pm 0,012$                | —                                | $0,0005 \pm 0,038$     |

**Einzelne Pixel**, die nicht exakt die erwarteten 100 registrierten Treffer erreichen, sind für die verbleibenden Abweichungen in der globalen Treffereffizienz verantwortlich, die im

Bereich weniger 0,5 % liegen. Ein systematisches oder geometrisch korreliertes Muster ist dabei grundsätzlich nicht erkennbar. Auffällig ist jedoch eine leichte Asymmetrie in der Verteilung der Abweichungen: Pixel mit mehr als 100 registrierten Treffer treten häufiger auf als solche mit einer Trefferzahl zwischen 0 und 100.

Wie in [Tabelle 5](#) zu erkennen ist, handelt es sich hierbei um den einzigen Effekt, bei dem sich die analogen und digitalen Messungen um bis zu 0,025 % unterscheiden. Zwischen den drei Testphasen zeigen die warmen Messungen durchgehend eine sehr hohe und zugleich stabile Treffereffizienz, während die kalten Messungen in allen Phasen eine deutlich größere Streuung aufweisen. Besonders in der MaP und nach dem Kleben wird sichtbar, dass kalte Bedingungen die Homogenität der Pixelantwort stärker beeinträchtigen als warme. Die Ekm zeigt zusätzlich, dass die Stabilität der Pixelantwort in dieser Phase generell etwas geringer ist als in den beiden anderen Phasen. Insgesamt verdeutlichen die Ergebnisse, dass die Temperatur einen wesentlich stärkeren Einfluss auf die Effizienzstabilität besitzt als die Unterschiede zwischen den Testphasen selbst.

Genauere Aussagen lassen sich daraus jedoch nicht ableiten. Aufgrund der Maskierung, die während der Messungen notwendig ist, da das Modul nicht alle 614 400 Pixel gleichzeitig auslesen kann, entstehen in verschiedenen Messungen zusätzliche Muster. Dies tritt nicht in allen Messungen auf, sondern erscheint phasenweise. Es kann sowohl ausschließlich in analogen oder ausschließlich in digitalen Messungen auftreten, teilweise nur chipweise und teilweise modulweise, und zeigt sich häufig nur in einzelnen Kalt- bzw. Warmmessungen. Dadurch beeinflusst es die in [Tabelle 5](#) dargestellten Effizienzen. Insgesamt sind davon zehn Module in verschiedenen Phasen betroffen.

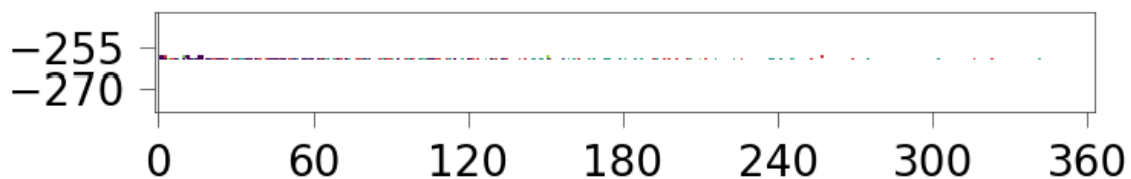


**Abbildung 14:** Vergleich der Occupancy-Muster zweier Module in der analogen Eingangskontrollmessung 20UPBLC0210495 (links) und in der warmen analogen Messung der bestückten Zelle 20UPBLC0110130 (rechts). Dargestellt sind jeweils die vollständigen Trefferkarten der Auslesechips unten links.

Das Muster weist eine ausgeprägte zweidimensionale Periodizität auf. Die beobachtete Periode kann jedoch durch ein weiteres Muster überlagert werden. Bei dem Muster weichen die betroffenen Pixel um typischerweise  $\pm 2$  Treffer von den erwarteten 100 ab.

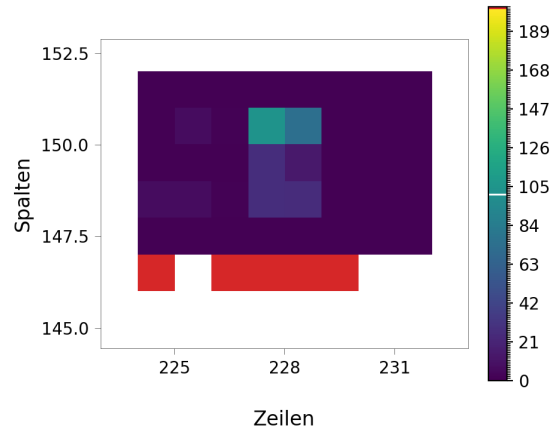
In den kalten Messungen zeigen vier Module ein zusätzliches Streumuster, das jedoch keiner der zuvor beschriebenen periodischen Strukturen entspricht. Es ist meistens zu einer Chipseite verstärkt wie beispielsweise in [Abbildung 12](#). Dieses Streumuster ist unregelmäßig, nicht reproduzierbar, sodass von einem Effekt, der bei Kälte auftritt, auszugehen ist. Nach dem Kleben tritt dieses Verhalten nur noch bei den zwei Modulen auf, während es bei den beiden anderen Modulen vollständig verschwindet. Eine klare Ursache lässt sich aus den vorliegenden Daten nicht ableiten.

Gelegentlich treten aufkeimende Spaltenblockprobleme wie in [Abbildung 15](#) auf. Bei diesem Phänomen lässt sich beobachten, wie mehrere Pixel in einer Spalte ausfallen. Diese Bereiche werden, wenn die Anzahl der Pixel zu groß wird, ausmaskiert. Die Größe der aufkeimenden Spaltenblockprobleme scheint nicht durch das Kleben beeinflusst zu werden.



**Abbildung 15:** Darstellung eines aufkeimenden Spaltenblockproblems in der anlogen warmen Modulbauabschlussprüfung des Moduls 20UPBLC0210067. Zu erkennen ist der beginnende Ausfall mehrerer aufeinanderfolgender Pixel innerhalb einzelner Spalten.

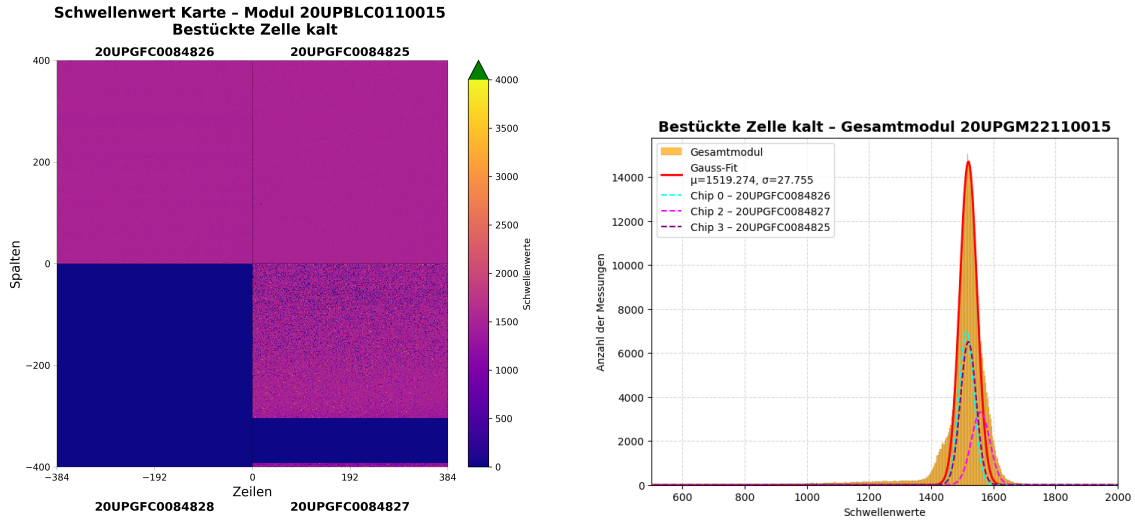
Coreweise Ausfälle, wie sie in [Abbildung 16](#) angedeutet sind, treten nur selten auf. Selbst in diesen Fällen fällt jedoch kein Core vollständig aus; betroffen sind lediglich Teilbereiche.



**Abbildung 16:** Hier ist ein zusammenhängender Bereich von  $8 \times 5$  Pixeln ausgefallen, was auf ein Problem im zugehörigen Core hindeutet. Auffällig ist, dass der Ausfall von Zeile 224 bis 232 reicht, also über einen Bereich, dessen Grenzen jeweils durch 8 teilbar sind. Ein einzelner Core umfasst  $8 \times 8$  Pixel.

### 4.3 Analyse des Rauschens und der Schwellwerte

Zur Darstellung der Schwellwerte und des Rauschens wird zunächst eine zweidimensionale Karte erzeugt, in der die pixelweise bestimmten Messwerte visualisiert werden. Anschließend werden die Werte chip- bzw. modulweise in Histogrammen zusammengefasst und jeweils mit einer Gaußfunktion gefittet, um Mittelwert und Breite der Verteilung zu bestimmen. Die Mittelwerte der einzelnen Chips können bei einer modulweisen Betrachtung jedoch voneinander abweichen, wodurch die modulweise Verteilung bis zu vier Peaks aufweisen kann. In solchen Fällen ist ein Gauß-Fit über das gesamte Modul nicht sinnvoll, weswegen zur Analyse die einzelnen Chips betrachtet werden. Starke Abweichungen zwischen den Auslesechips eines Moduls treten im Schwellwert bei 7 von 20 der betrachteten Modulen auf. Daher ist hier eine chipweise Betrachtung sinnvoller. Pixel, die 0 als Wert haben, werden aus den Betrachtungen in den Histogrammen ausgeschlossen, da sie den Fit verzerren und den zusätzlichen Wert des arithmetischen Mittels beeinflussen könnten. Die Daten werden zusätzlich als farbkodierte Karten visualisiert, wobei jedem Pixelwert eine Farbe gemäß einer kontinuierlichen Farbskala zugeordnet wird. Für Rauschmessungen kommt eine Skala im Bereich von  $[0, 400] \text{ e}^-$  zum Einsatz, während Schwellenwertmessungen mit einer Skala im Bereich von  $[0, 4000] \text{ e}^-$  dargestellt werden. Pixel, deren Messwert den oberen Darstellungsbereich überschreitet, werden durch eine gesonderte Überlauf-Farbe hervorgehoben (rot für Rauschkarten, grün für Schwellenwertkarten). Die Farbskala der Abbildung ist entsprechend mit einem Überlaufpfeil erweitert.



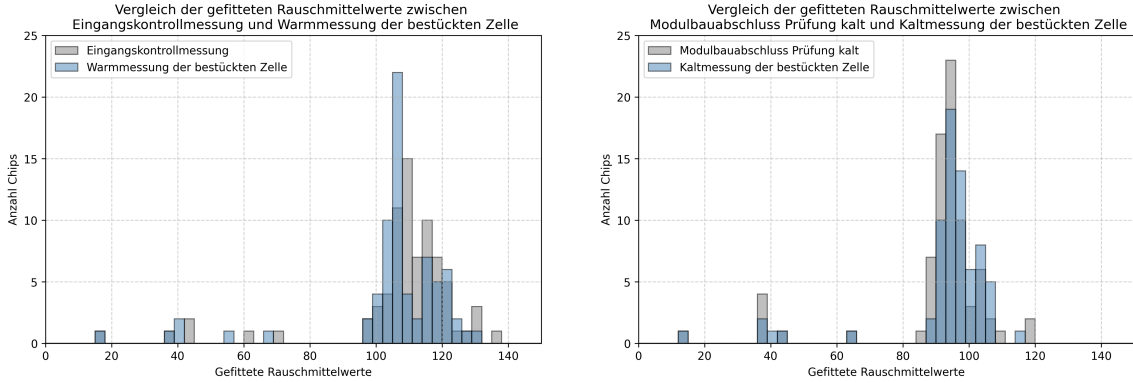
**Abbildung 17:** Schwellenwertkarte (links) und zugehöriges Schwellenwerthistogramm (rechts) des Moduls 20UPBLC0110015 nach dem Kleben kalt. Bei der Verteilung werden Pixel mit einem Wert von 0 ausgeschlossen, da sie den Fit verfälschen würden. Das Streumuster und auch die Spaltenblockprobleme sind an den selben Stellen wie auch schon bei den Treffereffizienzmessung in [Abbildung 12](#).

Die relevanten Werte sind daher die Mittelwerte der Gauß-Fits der einzelnen Auslesechips sowie die zugehörigen Sigma-Werte. Ein arithmetisches Mittel über die Rohdaten eines gesamten Chips wird ebenfalls betrachtet. Der Durchschnitt über alle funktionstüchtigen Chips ist in [Tabelle 6](#) dargestellt.

Bei niedrigeren Temperaturen stehen deutlich weniger thermisch angeregte freie Ladungsträger zur Verfügung. Dadurch verringern sich sowohl der Leckstrom als auch die Rekombinationswahrscheinlichkeit der im Sensor erzeugten Elektron-Loch-Paare. Dieser Effekt dominiert das Verhalten des Sensors bei tiefen Temperaturen. Die Beweglichkeit der Ladungsträger ist zwar ebenfalls temperaturabhängig und nimmt bei höheren Temperaturen leicht zu, spielt für die beobachtete Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses jedoch nur eine untergeordnete Rolle. Insgesamt erreicht bei niedrigen Temperaturen ein größerer Anteil der erzeugten Ladung die Front-End-Elektronik, was sich in stabileren und rauschärmeren Signalen äußert. Dies bestätigen auch die Rauschmittelwerte in [Tabelle 6](#) [\[18\]](#).

**Tabelle 6:** Schwellwert- und Rausch-Parameter über alle funktionierenden Auslesechips. Angegeben sind jeweils die Mittelwerte der gemessenen Größen sowie deren Standardabweichungen als Fehler, getrennt nach Phase und Temperaturbedingungen.

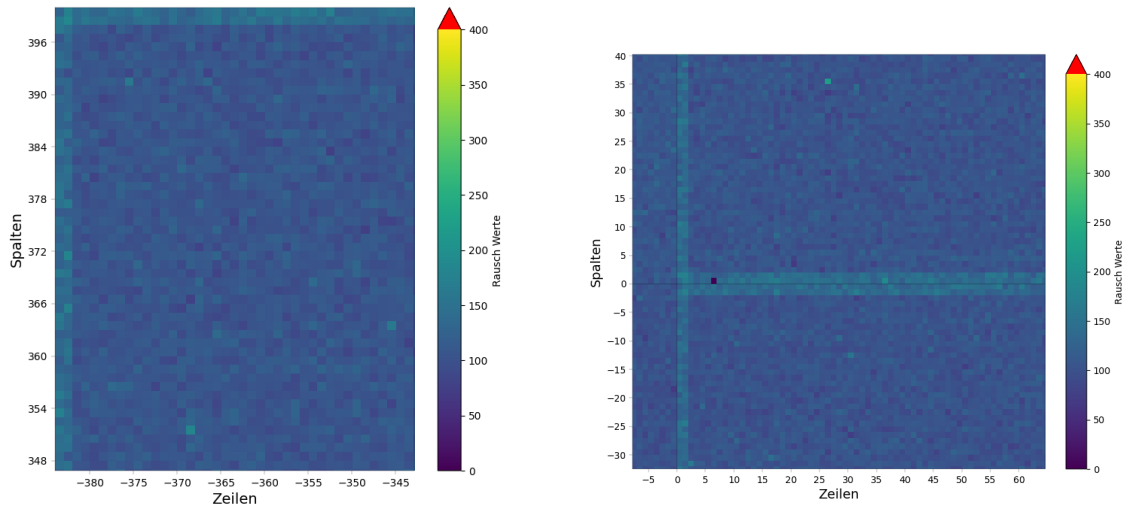
|                               | Modulbauabschluss<br>Prüfung [ $e^-$ ] |                | Eingangskontroll-<br>messung [ $e^-$ ] | Bestückte<br>Zelle [ $e^-$ ] |               |
|-------------------------------|----------------------------------------|----------------|----------------------------------------|------------------------------|---------------|
| <b>Warm/Cold</b>              | Warm                                   | Kalt           | Warm                                   | Warm                         | Kalt          |
| Rausch<br>Mittelwert          | $107 \pm 16$                           | $93 \pm 13$    | $110 \pm 16$                           | $107 \pm 17$                 | $95 \pm 14$   |
| Rausch Fit<br>Mittelwert      | $107 \pm 15$                           | $92 \pm 14$    | $108 \pm 18$                           | $106 \pm 18$                 | $94 \pm 15$   |
| Rausch Fit<br>Sigma           | $10.3 \pm 2.4$                         | $9.8 \pm 1.8$  | $10.2 \pm 1.8$                         | $10.0 \pm 1.6$               | $9.5 \pm 1.3$ |
| Schwellwert<br>Mittelwert     | $1585 \pm 265$                         | $1684 \pm 374$ | $1497 \pm 66$                          | $1485 \pm 61$                | $1493 \pm 56$ |
| Schwellwert Fit<br>Mittelwert | $1575 \pm 230$                         | $1683 \pm 351$ | $1400 \pm 66$                          | $1489 \pm 60$                | $1493 \pm 56$ |
| Schwellwert Fit<br>Sigma      | $60 \pm 64$                            | $107 \pm 139$  | $45 \pm 10$                            | $44 \pm 10$                  | $46 \pm 15$   |



**Abbildung 18:** Gefittete Rauschmittelwerte der Warmmessung (links) und der Kaltmessung (rechts). In Grau ist die jeweils letzte entsprechende Messung vor dem Kleben.

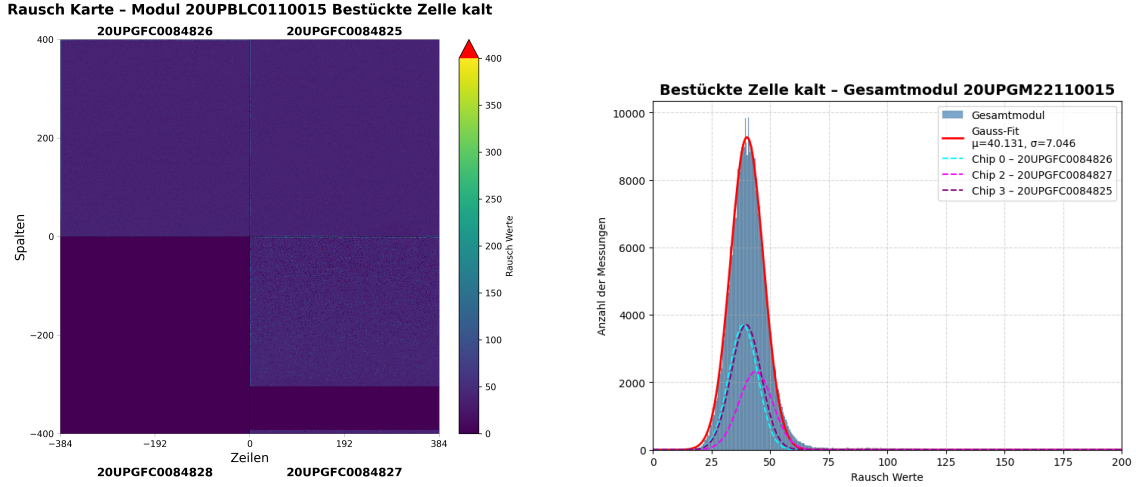
Die durchschnittlichen Rauschwerte der Kaltmessungen liegen um mehr als  $(20 \pm 20) e^-$  unter denen der Warmmessungen. Sowohl für warme als auch für kalte Bedingungen zeigen die verschiedenen Messreihen, wie in [Abbildung 18](#) dargestellt, nur geringe Veränderungen. Dies unterstützt die Annahme, dass das Bestücken der Zelle keinen Einfluss auf die Rauscheigenschaften des Moduls besitzt. Betrachtet man die einzelnen Rauschkarten sowie die zugehörigen Gauß-Verteilungen, fällt auf, dass die Schwankungen um den Mittelwert geringer ausfallen, als es der jeweilige globale  $\sigma$ -Wert vermuten lässt. Ursache hierfür sind systematische lokale Abweichungen: Auf den rechts auf dem Modul montierten Chips (Positionen

2 und 3) zeigen die zum benachbarten Chip gerichteten Pixelreihen erhöhte Rauschwerte. Durch die Rotation der linken Chips treten entsprechende Anhebungen an den äußeren Modulrändern auf. Dieser schmale Streifen erhöhter Rauschwerte ist in [Abbildung 19](#) sichtbar. Das erhöhte Rauschen an den Chiprändern ist konstruktionsbedingt: Dort sind größere Sensorzellen an die Elektronikzellen angeschlossen, typischerweise  $50 \times 100 \mu\text{m}^2$  oder im mittleren Bereich sogar  $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ . Diese größeren Sensorzellen dienen dazu, auch den Zwischenraum zwischen zwei Chips auszulesen, besitzen jedoch eine höhere Kapazität und führen daher zu erhöhtem Rauschen [\[13\]](#).



**Abbildung 19:** Die Karten zeigen einen schmalen Streifen erhöhter Rauschwerte entlang der Chipränder. Auf den rechts montierten Chips (rechtes Bild) treten die Abweichungen in den zum benachbarten Chip gerichteten Pixelreihen auf, während bei den linken, rotierten Chips (linkes Bild) erhöhte Werte an den äußeren Modulrändern erscheinen. Im linken Bild ist ein Ausschnitt der Karte oben links gezeigt; das Phänomen tritt entlang der X-Achse gespiegelt auch am unteren Rand auf. Das rechte Bild zeigt einen Ausschnitt aus der Modulmitte mit Fokus auf die rechte Chipseite.

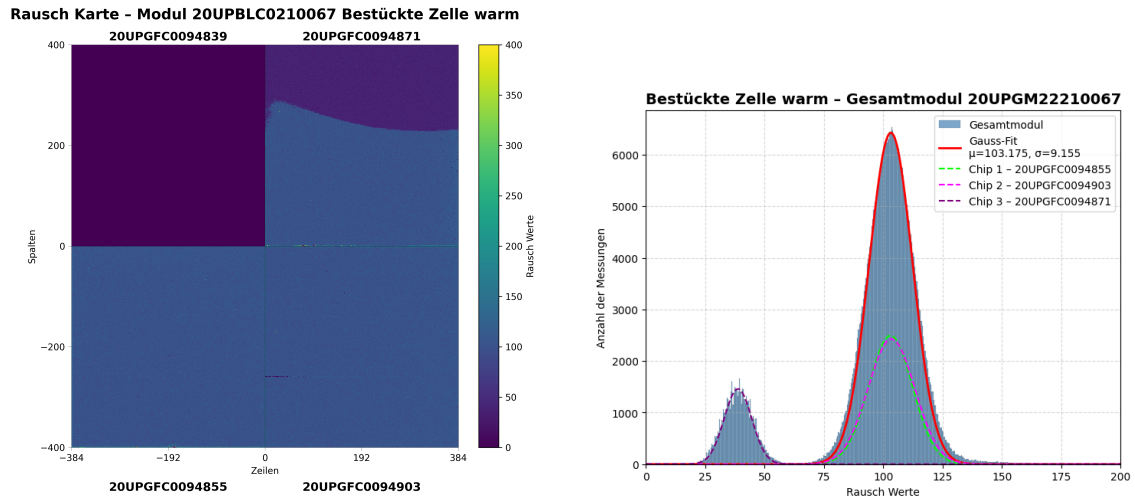
Die Phänomene, welche bei den Treffereffizienzen in Abschnitt [4.2](#) zu beobachten sind, lassen sich auch bei dieser Messung beobachten. Pixel, die nach oben stark abweichen, streuen in der Rausch Messung ebenfalls nach oben und andersherum. Dadurch bleiben die Streumuster und Spaltenblockprobleme auch bei der Messung des Rauschens wie in [Abbildung 20](#) sichtbar. Eine Ausnahme hiervon bildet das sich wiederholende Muster, welches durch die Maske zustandekommt. Dies ist nicht zu beobachten. Die Abweichungen der Treffereffizienzen sind so gering, dass es auch gut sein kann, dass es zwar existiert aber in den Abweichungen des Rauschens unter geht. Die Rauschwerte jedes Pixels eines Chips sind in etwa gleich und lassen sich mit einer Gaußkurve fitten.



**Abbildung 20:** Rauschkarte (links) und zugehöriges Rauschenhistogramm (rechts) des Moduls 20UPBLC0110015 nach dem Kleben kalt. Bei der Verteilung sind Pixel mit einem Wert von 0 ausgeschlossen. Das Streumuster und auch die Spaltenblockprobleme sind an den selben Stellen wie auch schon bei den Treffereffizienzmessung in [Abbildung 12](#).

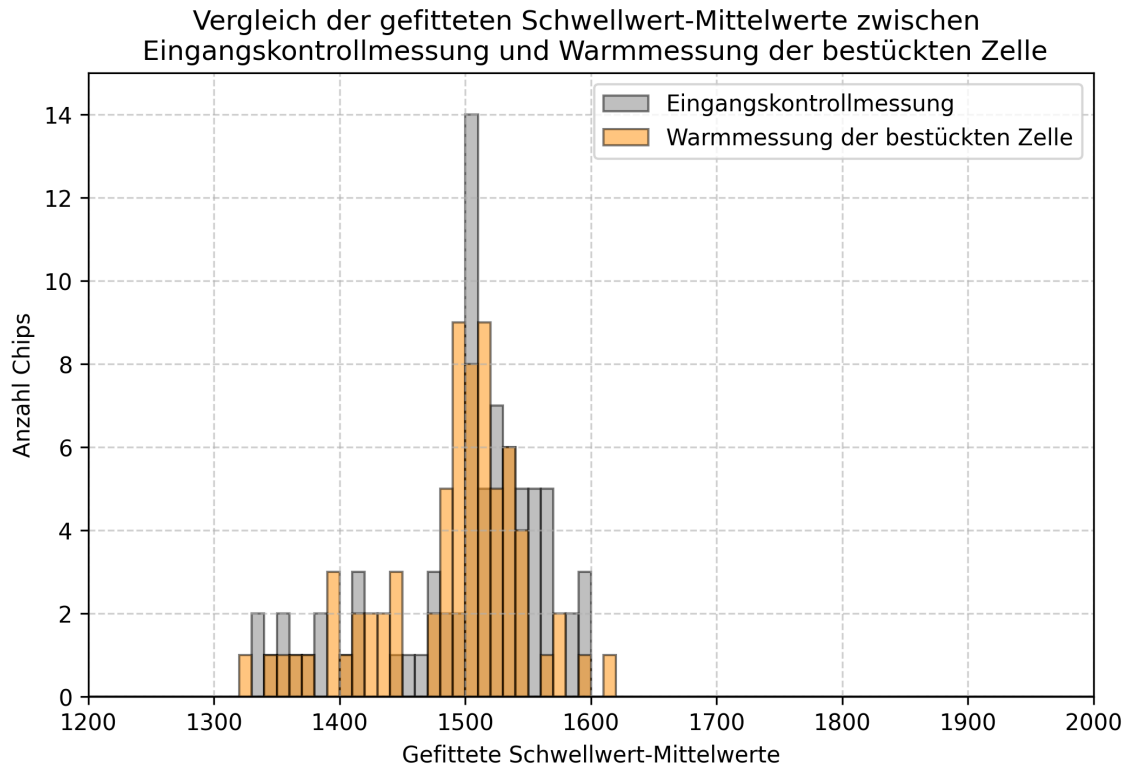
Betrachtet man die Gaußkurven des Rauschens der Chips eines Moduls, weichen die Mittelwerte und Sigmawerte minimal voneinander ab. Der größte Unterschied unter den Chips resultiert aus der Anzahl, der Pixel mit einem Rauschen und somit auch einer Treffereffizienz von 0. Deren Gaußverteilungen verfügen über eine geringere Amplitude. Da die Unterschiede zwischen den Chips mit Ausnahme der Amplitude so gering ausfallen, ließen sich diese theoretisch sogar modulweise wie in [Abbildung 20](#) betrachten.

Insgesamt sind die Rauschwerte eines Moduls größtenteils einheitlich. Die einzige Ausnahme von diesem homogen Rauschverhalten stellt der Chip oben rechts des Moduls 20UPBLC0210067 in [Abbildung 21](#) da. Dort ist eine Art Verlauf bereits in der MaP zu finden. Der Verlauf entsteht somit nicht beim Kleben und hat einen positiven Einfluss auf das Rauschen. Das Rauschen befindet sich im Verlaufsbereich bei  $30 e^-$ .



**Abbildung 21:** Rauschkarte (links) und zugehöriges Rauschenhistogramm (rechts) des Moduls 20UPBLC0210067 nach dem Kleben warm.

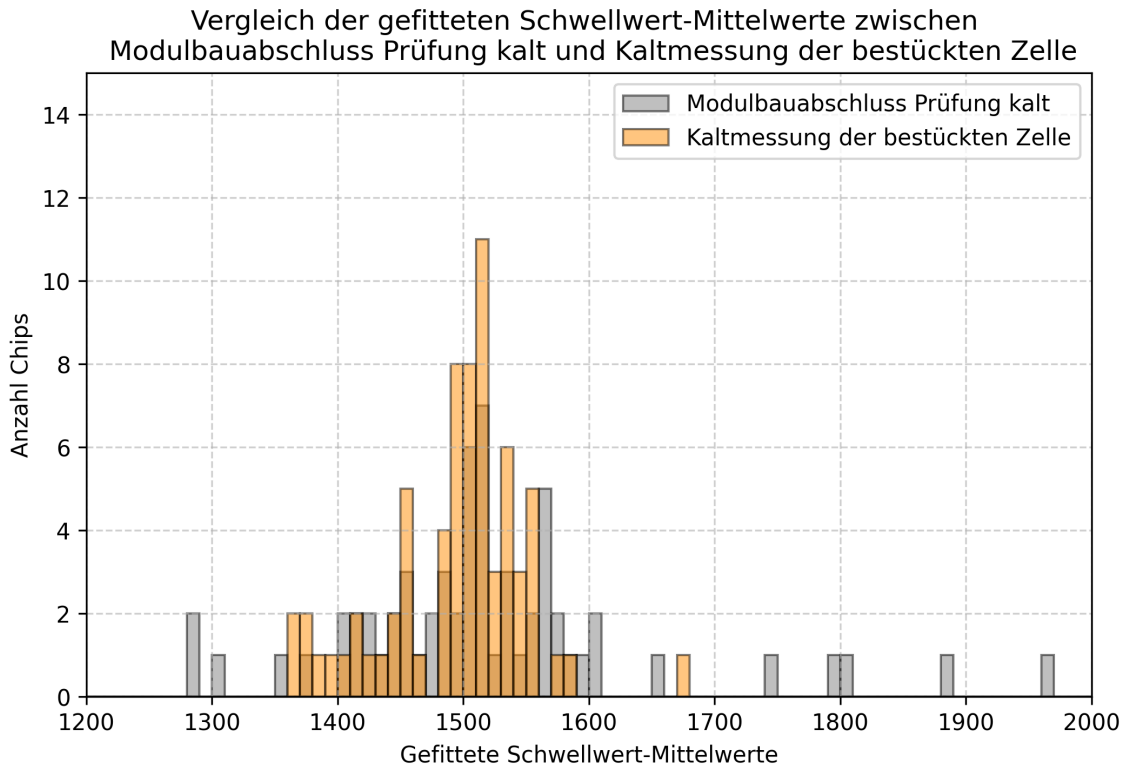
Die Schwellwerte der Ekm liegen im Mittel geringfügig über denen der Warmmessung der bestückten Zelle, wie in [Abbildung 22](#) zu erkennen ist. Die MaP-Messungen zeigen hingegen deutlich höhere Mittelwerte sowie eine wesentlich größere Standardabweichung. Daraus folgt, dass das Kleben zumindest im warmen Zustand keinen Einfluss auf die Schwellwerte hat.



**Abbildung 22:** Histogrammvergleich der gefitteten Schwellwertmittelwerte zwischen Eingangskontrollmessung und Warmmessung der bestückten Zelle. Die Warmmessung zeigt eine geringere Streuung und leicht niedrigere Mittelwerte.

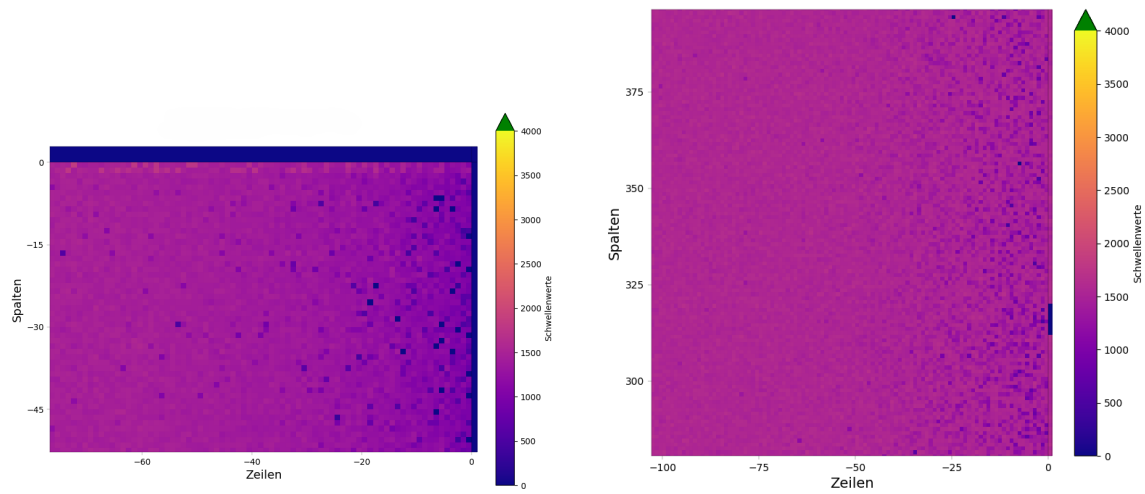
In den Kaltmessungen zeigt sich, dass die Schwellwerte im Durchschnitt leicht höher ausfallen. Für die bestückte Zelle ist dieser Unterschied jedoch so gering, dass beide Messungen unter Berücksichtigung der Standardabweichung als konsistent angesehen werden können. Zu beachten ist jedoch, dass für Warm- und Kaltmessungen unterschiedliche Pixelkonfigurationen verwendet werden. Das Tuning der Pixelparameter ist temperaturabhängig, sodass sich die absoluten Schwellwerte systematisch verschieben können. Diese Verschiebung ist ein erwartbarer Effekt des jeweiligen Tunings und kein Hinweis auf eine veränderte Modulfunktion. Unter Berücksichtigung dieser Konfigurationsunterschiede sind die warme EKM, die kalte Messung und die warme Messung der bestückten Zelle gut miteinander vergleichbar, da sie in etwa dieselben Mittelwerte aufweisen. Bei der MaP fallen insbesondere die großen Standardabweichungen auf. Diese weisen auf Module hin, deren Schwellwerte stark von den übrigen Mittelwerten abweichen. Auffällig ist, dass solche Ausreißer im Kaltbetrieb häufiger auftreten als im Warmbetrieb. Betrachtet man die entsprechenden Auslesechips, zeigt sich ein starkes Streumuster, das teilweise so ausgeprägt ist, dass die Werte auf der Karte nicht mehr vollständig innerhalb der Farbskala liegen. Einzelne Chips erreichen Schwellwertmittelwerte von bis zu  $7000 e^-$ . Da ein derartiger Anstieg des Schwellwerts allein durch

Transport oder Handling unwahrscheinlich ist und diese extremen Werte nur bei sechs Modulen auftreten, teilweise sogar chipweise, ist bei diesen Messungen von einem Fehler in der MaP auszugehen. Die Mehrheit der Module zeigt hingegen ein konsistentes Verhalten, wie in [Abbildung 23](#) dargestellt. Dies bestätigt, dass die MaP-Messung für den Großteil der Module konsistent ist und lediglich einzelne Ausreißer auf fehlerhafte Messungen oder fehlerhaftes Tuning zurückzuführen sind.



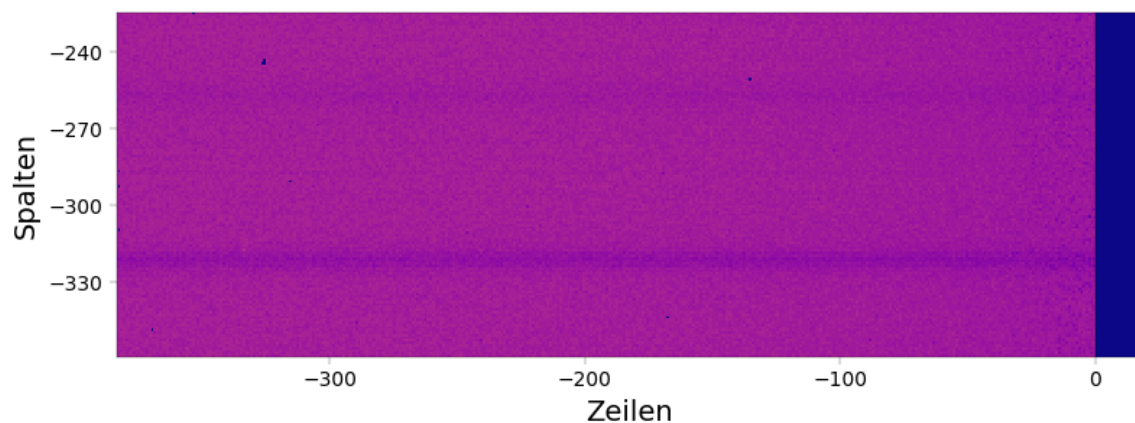
**Abbildung 23:** Vergleich der gefitteten Schwellwertmittelwerte zwischen Modulbauabschlussprüfung (kalt) und Kaltmessung der bestückten Zelle. Die bestückte Zelle zeigt eine engere Verteilung der Schwellwerte. Sechzehn Mittelwerte der Modulbauabschlussprüfung liegen oberhalb von  $2000\text{ e}^-$  und sind daher nicht dargestellt.

Auch beim Schwellwert zeigen sich ähnliche Phänomene wie bei der Treffereffizienz. Auffälligkeiten treten insbesondere an den Übergängen zu den Mitten auf der gegenüberliegenden Seiten der Wire Bonds auf. Diese Bereiche unterscheiden sich von den Rauschrandstrukturen dadurch, dass sie einen ausgeprägten Verlauf besitzen und nicht bei jedem Chip auftreten. Die Abweichungen können sowohl zu kleineren als auch zu größeren Schwellwerten führen, wie in [Abbildung 24](#) dargestellt ist.



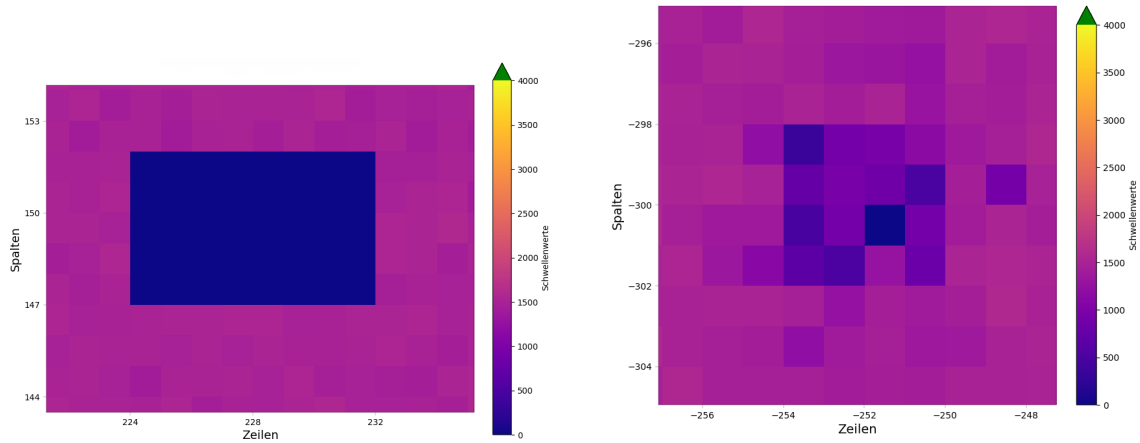
**Abbildung 24:** Schwellwertverläufe an den Modulrändern. Diese treten in beide Richtungen in der Modulmitte auf.

Solche Streifen treten sowohl waagrecht als auch auf einzelnen Chips in der Modulmitte auf und sind somit nicht ausschließlich auf Randbereiche beschränkt. Ein Beispiel hierfür ist in [Abbildung 25](#) dargestellt.



**Abbildung 25:** Waagrechtter Streifen in einer Schwellwertkarte. Die dargestellten Werte liegen unterhalb des jeweiligen Durchschnitts und bilden eine deutlich erkennbare Struktur.

Die Bereiche, in denen das Rauschen deutlich geringer ausfällt, treten ebenfalls bei den Schwellwerten auf. Diese Flecken sind auch hier nicht exakt symmetrisch, könnten jedoch auf Ausfälle einzelner Cores hindeuten. Beispiele hierfür sind in [Abbildung 26](#) dargestellt.



**Abbildung 26:** Beispiele für lokale Abweichungen in Schwellwertkarten. In der linken Abbildung ist ein rechteckiger Bereich zu sehen, der aus einer Maskierung zweier Cores, wie schon in [Abbildung 16](#) zu sehen, resultiert. In der rechten Abbildung tritt ein Fleck mit Abweichungen in einer ähnlichen Größe auf, der nicht maskiert ist.

## 5 Testübergreifende Modulbetrachtung

Für die Interpretation der Messergebnisse ist es erforderlich, alle Tests auf Modulebene zu betrachten. Auf diese Weise lassen sich sowohl die Gesamtänderungen der relevanten Kenngrößen über die einzelnen Messphasen hinweg bestimmen, außerdem lässt sich die Anzahl der funktionsfähigen Module quantifizieren. Aufgrund der zwischen den einzelnen Phasen auftretenden Messwertschwankungen, die unter anderem auf phänomenologische Effekte des Messaufbaus zurückzuführen sind, ist eine eindeutige Darstellung der Ergebnisse erschwert. Daher wird im Folgenden insbesondere der Anteil der Module betrachtet, die infolge des Klebevorgangs als nicht mehr funktionsfähig eingestuft werden.

Module, bei denen der Auslesefehler an Testposition 3 eine Messung des oben links positionierten Chips verhindert, sowie Module, bei denen das periodische Muster stark auftritt, können in der entsprechenden Phase nicht zuverlässig bewertet werden. In diesen Fällen wird die Treffereffizienzmessung der unmittelbar vorhergehenden Messphase zur Beurteilung herangezogen. Liegt der Maximalstromwert in einem Bereich, in dem sowohl exponentielle als auch lineare Verläufe auftreten können, erfolgt die Kategorisierung abhängig vom beobachteten Verlaufstyp manuell.

Ein Modul gilt dabei als funktionsfähig, wenn es im Wesentlichen einen linearen oder logarithmischen Verlauf der IV-Kurve aufweist, eine Treffereffizienz von über 95 % erreicht [9], einen Schwellwert von etwa  $1500 \text{ e}^-$  besitzt und ein Rauschen unter  $150 \text{ e}^-$  zeigt. Die letzten beiden Kriterien werden in allen Messungen erfüllt, abgesehen von einzelnen Abweichungen in der MaP, die vermutlich auf eine fehlerhafte Einstellung der Schwelle zurückzuführen sind. Damit bestimmen ausschließlich die IV-Kurven und die Treffereffizienzen die Anzahl der akzeptablen Module in [Tabelle 7](#).

**Tabelle 7:** Anzahl der Module, die einen im Wesentlichen linearen Verlauf der IV-Kurve aufweisen und bei denen mindestens 95 % der Pixel eine ausreichende Treffereffizienz besitzen.

|      | Modulbauabschluss<br>Prüfung | Eingangskontroll-<br>messung | Bestückte<br>Zelle |
|------|------------------------------|------------------------------|--------------------|
| Warm | 9                            | 9                            | 8                  |
| Kalt | 8                            | –                            | 8                  |

In allen Messungen erfüllen die acht Module 20UPBLC0110094, 20UPBLC0110166, 20UPBLC0110167, 20UPBLC0110169, 20UPBLC0110382, 20UPBLC0110467, 20UPBLC0211132 und 20UPBLC0210421 durchgängig alle Kriterien.

Durch Spaltenblockprobleme und nicht messbare Auslesechips fallen insgesamt vier Module in allen Messungen aufgrund der Treffereffizienz außerhalb der definierten Maßgaben. Lediglich eines dieser Module weist in zwei Messphasen zusätzlich einen exponentiellen Verlauf der IV-Kurve auf. Weitere sieben Module verfehlen in jeder Messphase die Kriterien aufgrund der Form der IV-Kurve. Von diesen erfüllt nur ein Modul in der Messung der bestückten Zelle und in der Ekm zusätzlich auch das Kriterium der Treffereffizienz nicht. Ein weiteres dieser erfüllt das Kriterium der Treffereffizienz nur in der Kaltmessung der bestückten Zelle nicht, da dort ein Chip nicht mehr gemessen werden kann.

Beim Modul 20UPBLC0210065 verändert sich die Form der IV-Kurve nach dem Kleben, was zu einer inkonsistenten Bewertung führt. Dadurch ergibt sich vor dem Kleben eine Anzahl von neun akzeptablen Modulen, während nach dem Kleben nur 8 Module die Kriterien erfüllen.

Eine kausale Verknüpfung der verschiedenen Tests ist nicht erkennbar. Dies zeigt sich insbesondere daran, dass die Module in der Regel nur ein einzelnes Qualitätsmerkmal nicht erfüllen. Die beobachteten Abweichungen treten unabhängig voneinander auf: Einige Module verfehlen ausschließlich das Kriterium der Treffereffizienz, andere ausschließlich den Verlauf der IV-Kurve. Die Fehler sind somit nicht korreliert und lassen keine gemeinsame Ursache erkennen.

## 6 Fazit

Die IV-Analysen zeigen, dass der maximale Leckstrom bei einer Spannung von bis zu 200 V ein zentraler Indikator für den Verlaufstyp der Kurve ist. Kleine maximale Leckströme führen zu konstanten oder logarithmischen Verläufen, mittlere Ströme zu linearen Anstiegen und hohe Ströme zu exponentiellen Verläufen bis hin zum Erreichen der Strombegrenzung. Die Grenzen dieser Bereiche überlappen, sodass einzelne Module mehrere Phänomene gleichzeitig zeigen können oder zwei Module mit identischem Maximalwert unterschiedliche Verlaufsformen aufweisen. Bei einer kleinschrittigen Spannungserhöhung ließen sich vermutlich alle Verlaufsformen innerhalb eines Moduls beobachten, da diese typischerweise erst nach einer bis zu zwanzigfachen Erhöhung des vorherigen Stromwertes auftreten.

Die Unterschiede der maximalen Leckstromwerte zwischen den Messphasen sind überwiegend auf variierende Messaufbauten oder auf Messläufe zurückzuführen, die aufgrund

der Strombegrenzung vorzeitig abgebrochen wurden. Strukturelle Veränderungen der Module lassen sich daraus nicht ableiten. Der qualitative Verlauf bleibt unabhängig von der Temperatur stabil. Eine Ausnahme bilden Messungen, bei denen die Leckströme der Kaltmessungen so gering sind, dass kein charakteristischer Verlauf erkennbar ist. Die absoluten Stromwerte liegen erwartungsgemäß bei Warmmessungen höher.

Insgesamt zeigen sechs Module in allen Phasen konsistent einen exponentiellen Verlauf, was auf Defekte dieser Module hindeutet. Mit Ausnahme einer Kaltmessung ändern sich die Verlaufstypen während des Klebens nicht. Dieses Modul ändert sowohl kalt als auch warm seinen Verlaufstyp bereits vor der Eingangskontrollmessung. Transportbedingungen sowie unterschiedliche Messaufbauten können hierfür ursächlich sein. Lediglich bei einem Modul wechselt der Verlaufstyp beim Kleben ausschließlich in den Warmmessungen von linear zu exponentiell, während es in allen Kaltmessungen einen exponentiellen Verlauf zeigt.

Die Analyse der Treffereffizienz zeigt, dass funktionierende Auslesechips in allen Messphasen eine sehr hohe Effizienz von über 99 % erreichen, sofern vollständige Chip-Ausfälle und Spaltenblockprobleme herausgerechnet werden. Die größten Effizienzeinbrüche entstehen durch komplette Ausfälle einzelner Chips, gefolgt von Spaltenblockproblemen, bei denen ganze Spalten keine Treffer registrieren. Die Anzahl einzelner Pixel, die digital oder analog keine 100 Treffer erreichen, ist, sofern kein Streumuster vorliegt, gering.

Viele Unterschiede zwischen den Messphasen lassen sich auf Messartefakte zurückführen, etwa Chips, die in einer Phase nicht ausgelesen werden konnten, periodische Maskierungsartefakte oder temperaturabhängige Streumuster. Der Klebeprozess selbst führt nur selten zu neuen Defekten; die meisten Auffälligkeiten sind bereits zuvor vorhanden oder auf defekte Testkammern zurückzuführen. Lediglich bei einem zuvor unauffälligen Modul fällt nach dem Kleben in der Kaltmessung ein Chip vollständig aus und bei einem weiteren Modul ein kompletter Chip in beiden Messungen.

Fünf Module weisen in jeder Phase mehr als 5 % der Pixel auf, die keine 100 Treffer registrieren. Zwischen warmen und kalten Messungen treten nur wenige zusätzliche Auffälligkeiten auf, die meist auf isolierte Phänomene wie Spaltenblockprobleme oder den Ausfall einzelner Chips zurückgehen. Die Größe der Spaltenblockprobleme ändert sich in der Kaltmessung bei insgesamt fünf Modulen; nur in einem Fall wird das Problem kleiner. Da die Module später im kalten Zustand betrieben werden, wäre hier eine weiterführende Untersuchung sinnvoll. Alle Pixel, die in der Treffereffizienzmessung erfasst wurden, besitzen zudem einen Schwellwert und ein Rauschen von 0, was darauf hindeutet, dass bei den Pixeln keine elektrische Verbindung besteht.

Die Mittelwerte des Rauschens sind temperaturabhängig: Im Kaltbetrieb liegen sie bei etwa  $90 \pm 20 \text{ e}^-$ , im Warmbetrieb bei etwa  $110 \pm 20 \text{ e}^-$ . Durch das Kleben sind beim Rauschen keine relevanten Unterschiede feststellbar. Das Rauschen verhält sich somit erwartungsgemäß und liegt in einem akzeptablen Bereich. Jeder Chip weist an zwei Kanten einen Randstreifen mit erhöhten Werten auf. Die Schwellwertmittelwerte der Eingangskontrollmessung und der bestückten Zelle liegen bei etwa  $1500 \pm 70 \text{ e}^-$ , während die Modulbauabschlussprüfung höhere und deutlich stärker streuende Werte zeigt, was auf Messfehler oder fehlerhafte Einstellungen einzelner Module hindeutet. Lokale Abweichungen wie Streifen oder fleckweise reduzierte Bereiche treten zwar auf, beeinflussen die Gesamtverteilung jedoch nicht. Die

Werte von beidem sind in einem akzeptablen Bereich und ändern sich nicht aufgrund der Klebung.

Die testübergreifende Betrachtung zeigt, dass insgesamt acht Module stabile und reproduzierbare Ergebnisse liefern, die den Anforderungen entsprechen. Die genaue Anzahl ist für die Fragestellung jedoch nicht entscheidend, da die Tests nicht darauf ausgelegt waren, diese Module eindeutig zu identifizieren. Für die tatsächliche Produktion ergibt sich daraus jedoch ein Bedarf an Qualitätsverbesserungen. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf dem Klebevorgang, der systematisch nur zu geringen Qualitätsverlusten führt. Kein Modul, das vor dem Kleben nicht aussortiert worden wäre, schneidet nach dem Kleben wesentlich schlechter ab. Ein kausaler Zusammenhang zwischen dem minimalen Funktionstest und der IV-Kurvenmessung lässt sich nicht erkennen, da die betroffenen Module jeweils nur ein einzelnes Kriterium nicht erfüllen. Abgesehen von der Beobachtung, dass Module, die in einem der Tests mangelhaft abschneiden, im weiteren Prozessverlauf offenbar anfällig für zusätzliche Beschädigungen sind und daher auch im jeweils anderen Test Defizite aufweisen können.

Darüber hinaus ergeben sich aus den Messungen mehrere Ansatzpunkte für potenzielle Verbesserungen. Die beobachteten Ausfälle einzelner Auslesechips sowie die Spaltenblockprobleme stellen einen großen Teil der Ursachen für nicht geeignete Module dar. Eine verbesserte Testinfrastruktur könnte helfen, Messartefakte wie Maskierungsstrukturen oder temperaturabhängige Streumuster frühzeitig zu erkennen und zu vermeiden. Dass ein Defekt auf einer Testposition bereits in der Preproduktion auftritt, deutet darauf hin, dass solche Probleme häufiger vorkommen werden. Durch gut dokumentierte Reparaturanweisungen sowie ausreichend Ersatzteile lassen sich Produktionsstaus vermeiden. Auch die Kalibrationsverfahren der vorgelagerten Stationen bieten Potenzial für Weiterentwicklungen: Die enge Verteilung der Schwellwerte nach dem Kleben zeigt, dass stabile Kalibrationen grundsätzlich möglich sind.

## Literatur

- [1] Collaboration ATLAS. *Technical Design Report for the ATLAS Inner Tracker Pixel Detector*. en. 2017. DOI: [10.17181/CERN.FOZZ.ZP3Q](https://doi.org/10.17181/CERN.FOZZ.ZP3Q).
- [2] ATLAS Experiment at CERN. *ATLAS Schematics*. 6.03.2026. URL: <https://atlas.cern/Resources/Schematics> (besucht am 06.03.2026).
- [3] ATLAS Experiment at CERN. *Calorimeter*. 5.03.2026. URL: <https://atlas.cern/Discover/Detector/Calorimeter> (besucht am 05.03.2026).
- [4] ATLAS Experiment at CERN. *Magnet System*. 5.03.2026. URL: <https://atlas.cern/Discover/Detector/Magnet-System> (besucht am 05.03.2026).
- [5] ATLAS Experiment at CERN. *Muon Spectrometer*. 5.03.2026. URL: <https://atlas.cern/Discover/Detector/Muon-Spectrometer> (besucht am 05.03.2026).
- [6] ATLAS Experiment at CERN. *The Inner Detector*. 5.03.2026. URL: <https://atlas.cern/Discover/Detector/Inner-Detector> (besucht am 05.03.2026).
- [7] *BMFTR-Forschungsschwerpunkt ATLAS*. 5.03.2026. URL: [https://lhc-deutschland.de/lhc\\_deutschland/fsp\\_atlas/index\\_ger.html](https://lhc-deutschland.de/lhc_deutschland/fsp_atlas/index_ger.html) (besucht am 05.03.2026).
- [8] Craig Buttar. “ATLAS ITk pixel detector overview”. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 1070 (2025). PII: S0168900224009045, S. 169978. ISSN: 01689002. DOI: [10.1016/j.nima.2024.169978](https://doi.org/10.1016/j.nima.2024.169978).
- [9] Craig Buttar. *Bad Pixels*. mündlich.
- [10] CERN. *Accelerating: Radiofrequency cavities*. 5.03.2026. URL: [https://home.cern/science/engineering/accelerating-radiofrequency-cavities?utm\\_source=copilot.com](https://home.cern/science/engineering/accelerating-radiofrequency-cavities?utm_source=copilot.com) (besucht am 05.03.2026).
- [11] CERN. *The Large Hadron Collider*. 5.03.2026. URL: <https://home.cern/science/accelerators/large-hadron-collider> (besucht am 05.03.2026).
- [12] The ATLAS Collaboration u. a. “The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider”. In: *Journal of Instrumentation* 3.08 (2008), S08003–S08003. DOI: [10.1088/1748-0221/3/08/S08003](https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/S08003).
- [13] Tobias Flick. *erhöhte Rauschen am Rand der Chips*. mündlich.
- [14] Muñoz Francisca. “ATLAS ITk Pixel Detector Overview”. In: *Journal of Physics: Conference Series* 2374.1 (2022), S. 012061. ISSN: 1742-6588. DOI: [10.22323/1.476.0878](https://doi.org/10.22323/1.476.0878).
- [15] Aiden Grummer, Martin Hoferkamp und Sally Seidel. “Prediction of Leakage Current and Depletion Voltage in Silicon Detectors Under Extraterrestrial Radiation Conditions”. English. In: *Frontiers in Physics* 9 (2021), S. 617026. ISSN: 2296-424X. DOI: [10.3389/fphy.2021.617026](https://doi.org/10.3389/fphy.2021.617026). URL: [https://www.frontiersin.org/journals/physics/articles/10.3389/fphy.2021.617026/full?utm\\_source=copilot.com](https://www.frontiersin.org/journals/physics/articles/10.3389/fphy.2021.617026/full?utm_source=copilot.com).

- [16] Michael Hauschild. *Exploring the Large Hadron Collider - CERN and the accelerators. The world machine clearly explained.* eng. Springer essentials. Hauschild, Michael (VerfasserIn). Wiesbaden: Springer, 2021. 63 S. ISBN: 978-3-658-32725-5. DOI: [10.1007/978-3-658-32726-2](https://doi.org/10.1007/978-3-658-32726-2).
- [17] *ITk Pixel Layout Updates*. 6.03.2026. URL: <https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/PLOTS/ITK-2020-002/> (besucht am 06.03.2026).
- [18] Hermann Kolanoski und Norbert Wermes. *Teilchendetektoren. Grundlagen und Anwendungen.* ger. Kolanoski, Hermann (VerfasserIn) Wermes, Norbert (VerfasserIn). Berlin und Heidelberg: Springer Spektrum, 2016. 921 S. ISBN: 978-3-662-45350-6. URL: <http://www.springer.com/>.
- [19] Scientific Figure on ResearchGate, Hrsg. *Overview and perspectives of depleted CMOS sensors for high radiation environments.* URL: [https://www.researchgate.net/figure/A-cross-section-through-a-typical-hybrid-pixel-sensor-with-fully-depleted-silicon-planar\\_fig1\\_329432492](https://www.researchgate.net/figure/A-cross-section-through-a-typical-hybrid-pixel-sensor-with-fully-depleted-silicon-planar_fig1_329432492).
- [20] Helmuth Spieler. *Semiconductor detector systems.* eng. Repr. Bd. 12. Oxford science publications. Oxford: Oxford Univ. Press, 2012. 489 S. ISBN: 9780198527848. DOI: [10.1093/acprof:oso/9780198527848.001.0001](https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780198527848.001.0001).
- [21] *The HL-LHC project | High Luminosity LHC Project*. 23.02.2026. URL: <https://hilumilhc.web.cern.ch/content/hl-lhc-project> (besucht am 05.03.2026).
- [22] *The RD53C-ATLAS Pixel Readout Chip Manual. CERN-RD53-PUB-xxxx Version 1.92, January 22, 2025.* 2025.

## 7 Anhang

Prozentualer Anteil an Pixeln, die bei der Treffereffizienz-Messung keine 100 Hits erreichen, über 20 vollständig getestete Module in Wuppertal. Der Fehler ist die Standardabweichung aus den prozentualen Treffereffizienzen aller Modulen.

|                     | Modulbauabschluss<br>Prüfung [%] | Eingangskontroll-<br>messung [%] | Bestückte<br>Zelle [%] |
|---------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------|
| <b>Warm Analog</b>  | $7,1445 \pm 24,2722$             | $9,7345 \pm 28,1369$             | $13,0525 \pm 32,9178$  |
| <b>Warm Digital</b> | $7,1413 \pm 24,2729$             | $9,4592 \pm 28,1264$             | $13,0162 \pm 32,9320$  |
| <b>Kalt Analog</b>  | $7,5088 \pm 24,3436$             | —                                | $14,5579 \pm 34,2663$  |
| <b>Kalt Digital</b> | $7,2891 \pm 24,3020$             | —                                | $14,3796 \pm 34,2867$  |

Prozentualer Anteil an Pixeln, die bei der Treffereffizienz-Messung nicht 100 Hits erreichen, über 20 vollständig getestete Module in Wuppertal. Über alle Phasen werden Chips nicht beachtet die in einer Messung nicht gemessen werden konnten. Der Fehler ist die Standardabweichung aus den prozentualen Treffereffizienzen dieser Chips

|                         | Modulbauabschluss<br>Prüfung [%] | Eingangskontroll-<br>messung [%] | Bestückte<br>Zelle [%] |
|-------------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------|
| <b>Warm Analog [%]</b>  | $0,5886 \pm 2,0683$              | $0,7454 \pm 2,1212$              | $0,6187 \pm 2,0657$    |
| <b>Warm Digital [%]</b> | $0,5819 \pm 2,0693$              | $0,6196 \pm 2,0662$              | $0,5865 \pm 2,0732$    |
| <b>Kalt Analog [%]</b>  | $0,9465 \pm 3,7095$              |                                  | $0,9209 \pm 3,4882$    |
| <b>Kalt Digital [%]</b> | $0,7472 \pm 2,8576$              |                                  | $0,7113 \pm 2,8434$    |

Prozentualer Anteil an Pixeln, die bei der Treffereffizienzmessung 100 Hits erreichen, über 20 vollständig getestete Module in Wuppertal. Über alle Phasen werden Chips ausgeblendet, die in einer Messung nicht ausgelesen werden konnten, und zusätzlich alle Spaltenblockprobleme entfernt. Der Fehler ist die Standardabweichung der prozentualen Treffereffizienzen dieser Chips.

|                         | Modulbauabschluss<br>Prüfung [%] | Eingangskontroll-<br>messung [%] | Bestückte<br>Zelle [%] |
|-------------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------|
| <b>Warm Analog [%]</b>  | $0,0216 \pm 0,0452$              | $0,1783 \pm 0,6386$              | $0,0522 \pm 0,2115$    |
| <b>Warm Digital [%]</b> | $0,0149 \pm 0,0649$              | $0,0525 \pm 0,2264$              | $0,0199 \pm 0,0733$    |
| <b>Kalt Analog [%]</b>  | $0,2747 \pm 1,3362$              |                                  | $0,2403 \pm 1,11$      |
| <b>Kalt Digital [%]</b> | $0,0379 \pm 0,1178$              |                                  | $0,0005 \pm 0,0377$    |

|                               | Modulbauabschluss<br>Prüfung [e <sup>-</sup> ] |                  | Eingangskontroll-<br>messung[e <sup>-</sup> ] | Bestückte<br>Zelle [e <sup>-</sup> ] |                 |
|-------------------------------|------------------------------------------------|------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------|-----------------|
| <b>Warm/Cold</b>              | Warm                                           | Kalt             | Warm                                          | Warm                                 | Kalt            |
| Rausch<br>Mittelwert          | 107.04 ± 15.17                                 | 93.48 ± 12.71    | 109.52 ± 15.62                                | 107.04 ± 16.27                       | 94.66 ± 13.38   |
| Rausch Fit<br>Mittelwert      | 106.82 ± 15.02                                 | 92.18 ± 14.03    | 108.33 ± 17.38                                | 105.99 ± 17.82                       | 93.53 ± 14.79   |
| Rausch Fit<br>Sigma           | 10.34 ± 2.36                                   | 9.82 ± 1.73      | 10.22 ± 1.80                                  | 10.03 ± 1.59                         | 9.52 ± 1.23     |
| Schwellwert<br>Mittelwert     | 1584.76 ± 264.48                               | 1684.37 ± 373.72 | 1496.97 ± 65.69                               | 1485.15 ± 60.62                      | 1487.59 ± 55.43 |
| Schwellwert Fit<br>Mittelwert | 1574.93 ± 229.34                               | 1682.61 ± 350.23 | 1499.78 ± 65.84                               | 1489.28 ± 59.29                      | 1492.80 ± 55.23 |
| Schwellwert Fit<br>Sigma      | 59.59 ± 63.40                                  | 106.86 ± 138.47  | 44.70 ± 9.83                                  | 43.97 ± 9.80                         | 46.12 ± 15.27   |

Schwellwert- und Rausch-Parameter über alle funktionierenden Auslesechips. Angegeben sind jeweils die Mittelwerte der gemessenen Größen sowie deren Standardabweichungen als Fehler, getrennt nach Stage und Temperaturbedingungen.