

Fakultät für Physik und Astronomie

Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg

Diplomarbeit

im Studiengang Physik

vorgelegt von

Michael Liebig

geboren in Löbau

2014

Weiterentwicklung eines CASCADE-Detektors
für MIEZE-Anwendungen

Die Diplomarbeit wurde von Michael Liebig am
Physikalischen Institut
unter Betreuung von
Herrn Priv. Doz. Dr. Ulrich Schmidt
ausgeführt

Weiterentwicklung eines CASCADE-Detektors für MIEZE-Anwendungen

Der CASCADE-Detektor ist ein hochratentauglicher orts- und flugzeitauflösender Neutronendetektor. Er basiert auf ^{10}B als Neutronenkonverter, mit welchem ladungstransparente Gas Electron Multiplier-Folien (GEM) beschichtet werden. Durch Identifizierung der nur wenige Mikrometer dicken Konversionsschicht ist er für Neutronen-Spin-Echo-Experimente, insbesondere der technisch anspruchsvollen MIEZE-Methode, geeignet. Es zeigte sich in vorangegangenen Arbeiten, dass Ineffizienzen des Systems in der Summe nur minimiert werden können, indem das Gesamtkonzept überarbeitet wird. Der in dieser Arbeit entstandene Detektor ist Resultat einer umfassenden Weiterentwicklung und Umstrukturierung. Erstmals wird der ladungsempfindliche Vorverstärker nXYTER in einem Neutronendetektor integriert. Die von dem bisherig eingesetzten CiPix-Verstärker grundsätzlich verschiedene Funktionsweise erfordert eine komplett neue FPGA-basierte Ausleseelektronik und Verarbeitungs-Firmware. Im aktiven Nachweisvolumen wurden die Anordnung und insbesondere die Selbstspannvorrichtung für die GEMs verbessert. Die Ortsinformation wird jetzt statt von einer dedizierten Auslesestruktur direkt von einer in Streifen segmentierten GEM gewonnen.

Development of a improved CASCADE detector for MIEZE applications

CASCADE is a high rate spatial and time resolved neutron detector. It is based on charge transparent Gas Electron Multiplier foils (GEM) coated with ^{10}B as a neutron converter material. By means of identification of the micrometer thin conversion layer it is suitable for neutron Spin Echo experiments, especially the technically sophisticated MIEZE method. Analyses of previous outcomes showed, that inefficiencies of the system in total could only be minimized by revision of the concept as a whole. The detector developed during this thesis is the result of a comprehensive restructuring and rework. For the first time the charge sensitive preamplifier nXYTER is integrated into a neutron detector. The functional principle is inherently different to the so far used CiPix amplifier. Therefore it required to implement a completely new FPGA based readout electronics and data processing firmware. In the active detection volume the arrangement and especially the self-tensioning frames of the GEMs have been improved. The spatial information is now, instead of a dedicated readout structure, obtained by a stripe-segmented GEM directly.

Inhaltsverzeichnis

1	Grundlagen der Neutronenphysik	3
1.1	Das Neutron und Neutronenphysik	3
1.1.1	Entdeckung und Interpretation der ersten Neutronen	3
1.1.2	Eigenschaften des Neutrons	4
1.1.3	Wechselwirkung mit Materie	5
1.1.4	Neutronenquellen	5
1.2	Experimente an und mit Neutronen	6
1.2.1	Schwache Wechselwirkung	7
1.2.2	Radiographie	7
1.2.3	Neutronen-Streuexperimente	8
1.2.4	Neutron-Spin-Echo (NSE)	9
1.2.5	Neutronen-Resonanz-Spin-Echo (NRSE)	11
1.2.6	Modulation Intensity by zero Effort (MIEZE)	11
1.3	Neutronennachweis	14
2	CASCADE-Detektor	15
2.1	Aufbau des CASCADE-Detektors	16
2.1.1	Gas-Electron-Multiplier-Folien (GEM)	17
2.1.2	Komponenten und Funktionsweise des CASCADE-Detektors	17
2.2	MIEZE-Modifikation	18
2.3	Motivation für die Weiterentwicklung des Detektors	19
3	Neuentwicklung des Gehäuses	21
3.1	Rahmen zum Spannen der Folien	21
3.1.1	Materialauswahl der Rahmen	22
3.1.2	Geometrie	24
3.2	Aktives Nachweisvolumen	26
3.2.1	O-Ringe	27
3.2.2	ABS-Prototyp-Stack	27
3.2.3	Kompletter Detektorstack	28

3.2.4	Vorspannen und Bekleben der Spannrahmen	30
3.3	Gasanschluss	31
3.4	Anordnung der Detektorkomponenten	31
3.5	Kabelführung	34
3.6	Kühlung der Elektronik	34
3.7	Elektromagnetische Abschirmung	35
4	Neuentwicklung, Anpassung und Integration der Elektronik	36
4.1	Auslese-GEM	37
4.1.1	Lasersegmentierung	38
4.1.2	Konditionierung der GEM	39
4.2	HV-Board	39
4.3	nXYTER	41
4.3.1	Signalfluss durch einen Kanal	42
4.3.2	Datenausgabe	43
4.4	FEB-E Board	44
4.5	Adapter-Board	45
4.6	FPGA-Board DL711	46
4.6.1	Rohdatenauslese	48
4.6.2	Self Sorting Scheme S^3	51
4.6.3	Neutronenereignisrekonstruktion	54
4.7	USB-Kommunikation	56
4.7.1	FT2232h	56
4.7.2	VHDL-Umsetzung	58
4.8	Software: FEB-Communication	59
5	Elektroniktests und Messungen	61
5.1	FT245 Synchronous FIFO interface mode	61
5.2	SPI-Protokoll zwischen Attiny88 und Spartan6	62
5.3	Testtrigger des nXYTER	63
5.4	Testmessungen mit dem Detektor	65
A	Konstruktionszeichnungen	71

Einleitung

Die Neutronenphysik ist von fundamentaler Bedeutung für unser Verständnis der Natur. Einerseits geben die Eigenschaften des Neutrons Einblicke in die grundlegenden Mechanismen der Physik und andererseits sind Neutronen in den letzten Jahrzehnten zu unverzichtbaren Sonden bei der Beobachtung vieler physikalischer Phänomene geworden.

Bei der Untersuchung ihres Zerfalls gewinnt man Erkenntnisse über die schwache Wechselwirkung und kann das etablierte Standardmodell der Teilchenphysik auf seine Gültigkeit hin testen.

Neutronen sind die einzigen uns bekannten neutralen und schweren Teilchen, im Verhältnis zur Elektronenmasse, die eine nicht verschwindend geringe Wechselwirkungswahrscheinlichkeit mit der uns dominierenden Materie haben. Sie sind zudem quasi stabil, denn ihre Lebensdauer übersteigt bei Weitem den Quotienten aus mittlerer freier Weglänge in Materie und ihrer Geschwindigkeit.

Die Absorption von Neutronen ist stark isotonenabhängig, dies ermöglicht zu Röntgentechnik komplementäre Radiografie.

Wegen ihrer Neutralität nehmen sie nicht an der Coulombwechselwirkung teil. Dies macht mit Neutronen durchgeführte Streu- und Beugungsexperimente sensitiv auf den magnetischen und strukturellen Aufbau der Materie. Besonders eignen sich thermische Neutronen, denn ihre de-Broglie-Wellenlänge liegt im Bereich der Atomabstände in Gittern. Die Kinematik erlaubt es auch, Phononen in Festkörpern mit Neutronenspektrometern zu vermessen.

Für auf mikroskopischer Ebene langsame Prozesse existiert mit der Neutronen-Spin-Echo-Methode (NSE) und deren Weiterentwicklung, dem MIEZE-Verfahren (Modulation Intensity by zero Effort), ein einzigartiger Zugang. Bei diesen Techniken werden die up- und down-Komponenten der Spinwellenfunktion eines polarisierten Neutronenstrahls räumlich und zeitlich separiert und später wieder zusammengeführt. Die winkel- und separierungszeitabhängige Intensität der Interferenz ermöglicht die Bestimmung der Streufunktion. Dies ist mit γ -Spektroskopie oder herkömmlicher Neutronenstreuung nicht mit vergleichbarer Messzeit möglich.

Der typische Neutronennachweis geschieht über eine Kernabsorptionsreaktion. Der angeregte Zustand zerfällt dann über Teilchenabstrahlung oder Spaltung. Die so entstehenden Fragmente haben hohe Energien und können leicht durch ihre Ionisationsspur nachgewiesen werden.

Diese Diplomarbeit widmet sich dem Aufbau eines CASCADE-Detektor-Systems, welches speziell für die Anwendungen in MIEZE-Experimenten konzipiert ist. Die Neutronen werden in einer dünnen ^{10}B -Schicht absorbiert und die entstehenden Zerfallsprodukte in einem Zählgas nachgewiesen. Um eine hohe Effizienz zu erzielen, werden mehrere Borschichten auf ladungstransparentem Substrat kaskadiert. Dafür eignen sich Gas-Elektron-Multiplier-Folien (GEM), ein beidseitig leitend beschichteter Isolator mit regelmäßiger feiner Lochstruktur. Durch Anlegen einer hohen Spannung zwischen Ober- und Unterseite, kommt es zu Gasverstärkung in den Löchern und somit können auf der Oberfläche verlorene Ladungsträger gegenkompensiert werden.

Im ersten Kapitel werden Grundlagen der Neutronenphysik erläutert. Nach einem kurzen historischen Abriss und einer Vorstellung der Neutroneneigenschaften werden ausgewählte experimentelle Anwendungen präsentiert, wobei der Fokus auf der Spin-Echo-Methode und ihren Weiterentwicklungen liegt. Abschließend wird auf die Technik des Neutronennachweises eingegangen.

Das zweite Kapitel beschreibt den CASCADE-Detektor, auf dem diese Arbeit aufbaut. Dabei wird besonders auf die zu optimierenden technischen Komponenten eingegangen.

Im nächsten Kapitel wird das neue Gehäusekonzept vorgestellt. Die Spannrahmen für die verwendeten Folien wurden neu entwickelt und bezüglich ihres Spanverhaltens, der elektrischen Eigenschaften und des Gasabschlussverhaltens optimiert. Das grundlegend neue Gehäuse war notwendig, da der Detektor nun über den nXYTER ausgelesen wird.

Kapitel vier umfasst die Beschreibung der Elektronik des Detektors. Hauptsächlich sind dies der ladungsempfindliche Vorverstärker nXYTER und das FPGA-basierte Regel- und Ausleseboard DL711. Dem Signalfluss folgend werden die GEM, welche erstmals durch Segmentierung auch für die 2D-Ortsauflösung verwendet wird, die Hochspannungsverteilung und die Signalauskopplung vorgestellt. Der größte Teil dieses Kapitels beschäftigt sich mit dem Design der Firmware. Diese dient einerseits zum Sortieren und Strukturieren der nXYTER-Daten, andererseits ermöglicht sie eine direkte Rohdatenauslese. Das Kapitel endet mit einer Beschreibung der Kommunikation zwischen Firmware und Mess-PC.

Die Arbeit schließt mit einer Präsentation erster Messergebnisse.

Kapitel 1

Grundlagen der Neutronenphysik

Zu Beginn wird eine kurze Einführung in die Neutronenphysik gegeben. Das Neutron wird mit seinen Eigenschaften und den daraus resultierenden Wechselwirkungen mit Materie vorgestellt. Anschließend werden experimentelle Anwendungen genannt, wobei der Fokus dieser Arbeit auf der Neutronen-Spin-Echo-Spektroskopie und seiner Weiterentwicklung, dem MIEZE-Verfahren liegt. Abschließend werden die Möglichkeiten der Neutronendetektion erläutert.

1.1 Das Neutron und Neutronenphysik

1.1.1 Entdeckung und Interpretation der ersten Neutronen

Die ersten Neutronen wurden von Bothe und Becker [BB30] im Jahr 1930 entdeckt. Ihr Experimentieraufbau sah vor, Beryllium mit α -Teilchen zu beschießen. Die auftretende Reaktion war folgende



Zunächst nahm man an, dass es sich dabei um γ -Strahlung handelte, da sie kaum ionisierend wirkten. Dennoch schien sie anders zu sein als bekannte Strahlung, weswegen sie Berylliumstrahlung genannt wurde. Die Eheleute Joliot-Curie untersuchten ebenfalls dieses Phänomen und stellten fest, dass sich wesentlich mehr Ionisationsspuren in ihrer Ionisationskammer finden, wenn man eine Paraffinplatte in die Kammer bringt. Die ionisierenden Teilchen identifizierten sie als Protonen. Damit haben sie den ersten Neutronen-

detektor, basierend auf Rückstoßprotonen, für schnelle (siehe Tabelle 1.1) Neutronen gebaut. Mit der Annahme, dass es sich um γ -Strahlung handelte, kamen sie zu dem Schluss, dass sie eine Art Compton-Effekt am Proton beobachteten. Rechnungen ergaben dann eine γ -Energie von ungefähr 50 MeV, welche sehr viel höher war als bei gewöhnlichen γ -Strahlern.

1932 löste Chadwick [Cha32] nach eigenen Messungen dieses Problem, indem er ein neues Teilchen ohne Ladung und mit etwa der gleichen Masse eines Protons annahm. Für diese Entdeckung wurde er 1935 mit dem Nobelpreis geehrt. Chadwick gab diesem Teilchen dann auch den Namen „Neutron“. Das von Pauli postulierte „Neutron“ erhielt später den Namen „Neutrino“. Heisenberg benutzte dieses neue Teilchen für sein 1933 veröffentlichtes Atomkernmodell. Dies löste damit die Vorstellung von Kernen aus Protonen und Elektronen ab.

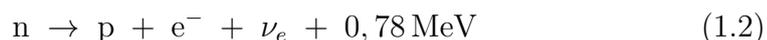
1.1.2 Eigenschaften des Neutrons

Die hier relevanten Eigenschaften des Neutrons sind [Ber12]:

- Masse: $m = 939,565 \text{ MeV}$
 - Differenz zur Protonenmasse $\Delta m = +1,293 \text{ MeV}$
- mittlere Lebensdauer: $\tau = 880,0 \pm 0,9 \text{ s}$
- Ladung: $q = (-0,2 \pm 0,8) 10^{-23} e$, also neutral
- Spin und Parität: $J^P = \frac{1}{2}^+$
- magnetisches Moment: $\mu = -1,913 \mu_N$

Wobei e die Elementarladung mit $1,602 \cdot 10^{-23} \text{ C}$ ist und $\mu_N = 5,051 \cdot 10^{-27} \text{ J/T}$ das Kernmagneton.

Das Neutron ist ein zusammengesetztes Teilchen, seine Valenzquarks sind zwei down- und ein up-Quark, und hat somit eine räumliche Ausdehnung von etwa 1,7 fm. Freie Neutronen sind nicht stabil und zerfallen:



Neutronen werden ihrer kinetischen Energie entsprechend unterteilt, siehe Tabelle 1.1.

Für diese Arbeit sind überwiegend thermische und kalte Neutronen von Interesse.

Energie	Geschwindigkeit	Bezeichnung
$< 10^{-5}$ eV	< 40 m/s	ultrakalt
$< 10^{-3}$ eV	< 400 m/s	kalt
$5 \cdot 10^{-3} \dots 0,5$ eV	$0,4 \dots 10$ km/s	thermisch
$0,5 \dots 10^3$ eV	$10 \dots 1400$ km/s	überthermisch
$1 \dots 100$ keV	$1400 \dots 14000$ km/s	mittel
$0,1 \dots 100$ MeV	$14000 \dots 130000$ km/s	schnell
> 100 MeV	> 130000 km/s	ultraschnell

Tabelle 1.1: Einteilung der Neutronen nach ihrer kinetischen Energie [Mus95].

1.1.3 Wechselwirkung mit Materie

Neutronen nehmen, wie alle Baryonen, an der starken, der schwachen, der elektromagnetischen Wechselwirkung und der Gravitation teil. Aufgrund der fehlenden Ladung ist ihr Energieverlust durch Ionisation über die magnetischen Momente etwa 10^6 mal kleiner als die des Protons. Dies führt dazu, dass sich auch niederenergetische Neutronen in Materie recht frei bewegen können. Damit kommen sie einem idealen Gas näher als jedes reale Gas. Sie haben praktisch keine Ausdehnung und keine Wechselwirkung untereinander. Beim Durchgang durch Materie interagiert das Neutron meist über die Kernkraft mit ihr, außer es handelt sich um langsame Neutronen in magnetischen Materialien; dann spielt auch die Wechselwirkung mit dem magnetischen Moment eine wesentliche Rolle.

1.1.4 Neutronenquellen

Da freie Neutronen nach Gleichung 1.2 zerfallen, ist der Anteil an ungebundenen Neutronen an der Gesamtheit aller Teilchen gering. Die existierenden freien Neutronen entstehen durch die kosmische Strahlung oder natürliche Radioaktivität. Die Dichte der sogenannten kosmischen Neutronen ist jedoch gering und sie haben ein sehr breites Energiespektrum. Daher steht am Anfang beinahe jedes Neutronenexperiments die Frage nach einer passenden Quelle. Zu Testzwecken werden auch heute noch Americium-Beryllium-Quellen mit der Reaktion 1.1 verwendet. Wir haben eine wesentlich stärkere Californium-Quelle zur Verfügung. In ihr werden in 3% aller Zerfälle 3,75 Neutronen durch spontane Spaltung frei. Größere Streu- oder Aktivierungs-

experimente benötigen eine höhere Neutronendichte. Sie verwenden Kernreaktoren wie den Forschungsreaktor MünchenII (FRMII) am Heinz Maier-Leibnitz Zentrum der Technischen Universität München, dessen Neutronenspektrum in Abbildung 1.1 zu sehen ist. In diesen dient das Kühlsystem des

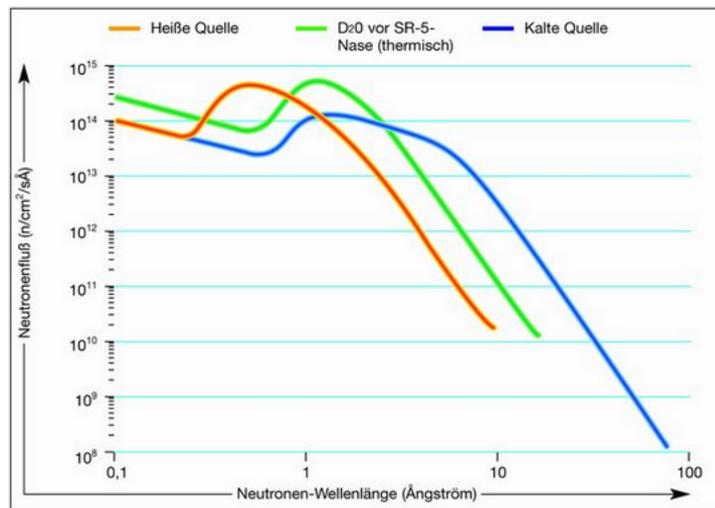


Abbildung 1.1: Neutronenspektren¹ an heißer, thermischer und kalter Quelle des FRM II.

Reaktors gleichzeitig als Moderationsvolumen für die Neutronen. Somit handelt es sich um Quellen für thermische Neutronen. Moderation bedeutet, dass hochenergetische Neutronen aus Kernreaktionen mittels elastischer Stöße mit Wasserstoff abgebremst werden. Für kalte Neutronen sind zusätzliche kalte Moderatoren in Reaktornähe zu bringen. Eine andere Möglichkeit, viele Neutronen zu erzeugen, sind sogenannte Spallationsquellen, in denen Targetkerne (meistens Wolfram) so stark durch Ionenbeschuss aufgeheizt werden, dass sie Neutronen abdampfen.

1.2 Experimente an und mit Neutronen

Neutronen werden in vielen Bereichen der Physik benutzt oder untersucht. Sie spielen eine wichtige Rolle in der Festkörperphysik, wo sie als schwere ungeladene Sonden für Gitterstrukturen und Phononen fungieren. In ihrem Zerfall bestimmt man die Parameter des Standardmodells. In der Umweltphysik oder bei Ölexplorationen nutzt man sie als Wassersonden. Es soll nun

¹<http://www.frm2.tum.de/technik/sekundaere-strahlquellen/index.html> .

ein kurzer und beispielhafter Überblick über verschiedene Anwendungen gegeben werden, wobei der Fokus auf denen liegt, für die der in dieser Arbeit entwickelte Detektor verwendet werden kann.

1.2.1 Schwache Wechselwirkung

Im PERKEO III Experiment [MAD⁺09] untersucht man den Zerfall kalter Neutronen in einem Neutronenstrahl. Durch gekrümmte Magnetfelder wie sie in Abbildung 1.2 zu sehen sind, werden die geladenen Zerfallsprodukte des Neutrons zu den Detektoren geführt. Über verschiedene Konfigura-

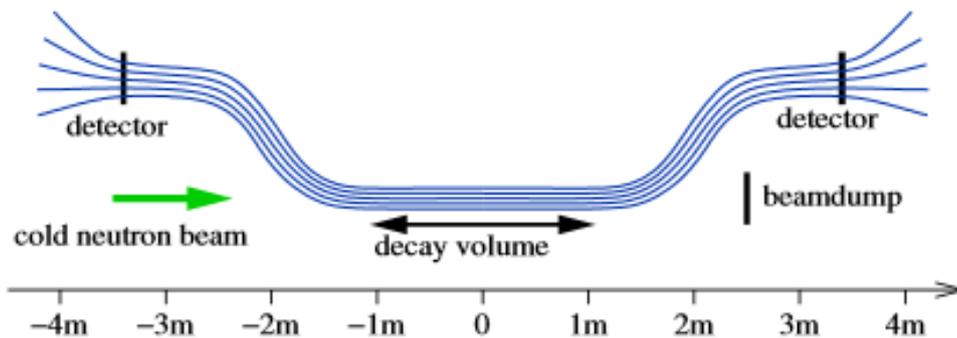


Abbildung 1.2: Darstellung der Magnetfeldlinien des PERKEO III Experiments, die die Zerfallsprodukte zu den Detektoren führen. Der Neutronenstrahl tritt links ein und wird am beamdump gestoppt [MAD⁺09].

tionen, wie Polarisation und Kontinuität des Neutronenstrahls, verbunden mit verschiedenen Detektorsystemen, hat man so einen Zugang zu diversen Parametern des Standardmodells, wie Elemente der CKM-Matrix und eine Testmöglichkeit dieses Modells.

1.2.2 Radiographie

In Abbildung 1.3 ist zu sehen, dass Neutronen von anderen Elementen absorbiert werden als Röntgenstrahlen. So sind beim Durchleuchten einer Probe mit Neutronen andere Isotope sichtbar, wie zum Beispiel der Wasserstoff im Kaffee. Dies macht die Neutronen-Radiographie für Diffusionsvorgänge von wasserstoffhaltigen Flüssigkeiten, wie in Filtern, nützlich.

²<http://mnrc.ucdavis.edu/neutronimaging.html> .

³<http://www.psi.ch/niag/movies> .

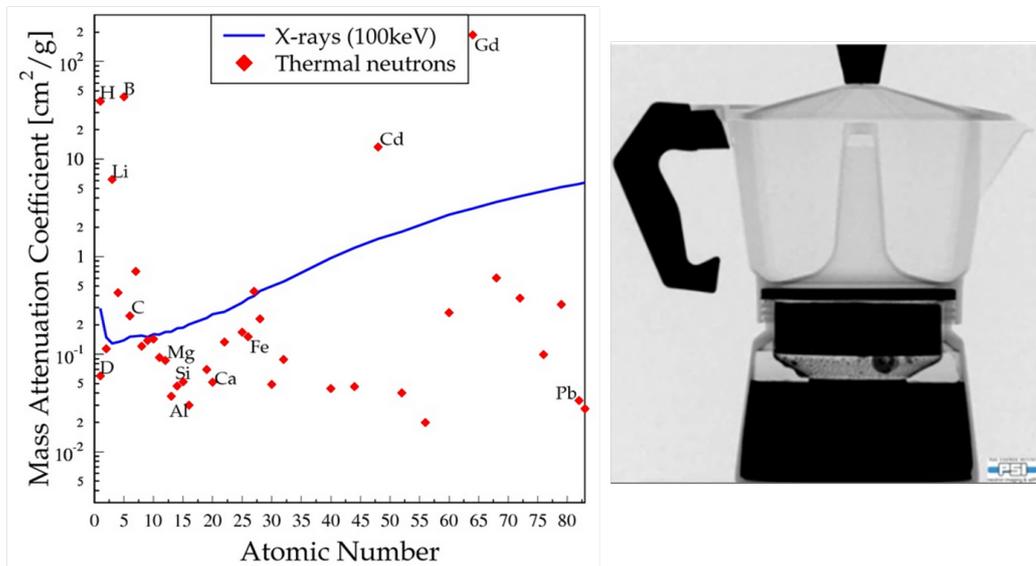


Abbildung 1.3: links: Vergleich der Dämpfung von Röntgenstrahlen und thermischen Neutronen in Abhängigkeit der Massenzahl ², rechts: Neutronen-Radiographie einer gefüllten Mokka-Kanne³.

1.2.3 Neutronen-Streuexperimente

Es gibt eine Fülle an Neutronenstreuexperimenten, die vor allem der Untersuchung von Fragen der Festkörperphysik dienen. So werden Phononendispersionskurven von Kristallen wegen den niedrigen Energien von 10^{-2} eV meistens mittels Neutronenstreuung bestimmt. [Hun11]

Als Beispiel sei das Drei-Achsen-Spektrometer PANDA (Abbildung 1.4) am FRM II angeführt. Hier werden kalte Neutronen erst kollimiert und mit einem Einkristall, dem sogenannten Monochromator, über den Bragg-Reflex, ein nahezu monoenergetischer Neutronenstrahl, ausgefiltert. Mit einem speziellen Monochromator kann man den Neutronenstrahl zusätzlich noch polarisieren. Dieser trifft auf die Probe. Die gestreuten Neutronen werden über einen Analysator, wieder ein Einkristall, energiewahrend und in einem ³He-Zählrohr detektiert.

Andere Spektrometer sind Flugzeitspektrometer, SANS-Instrumente (Small-Angle-Neutron-Scattering) oder Rückstreuexperimente.

⁴<http://www.mlz-garching.de/panda>.

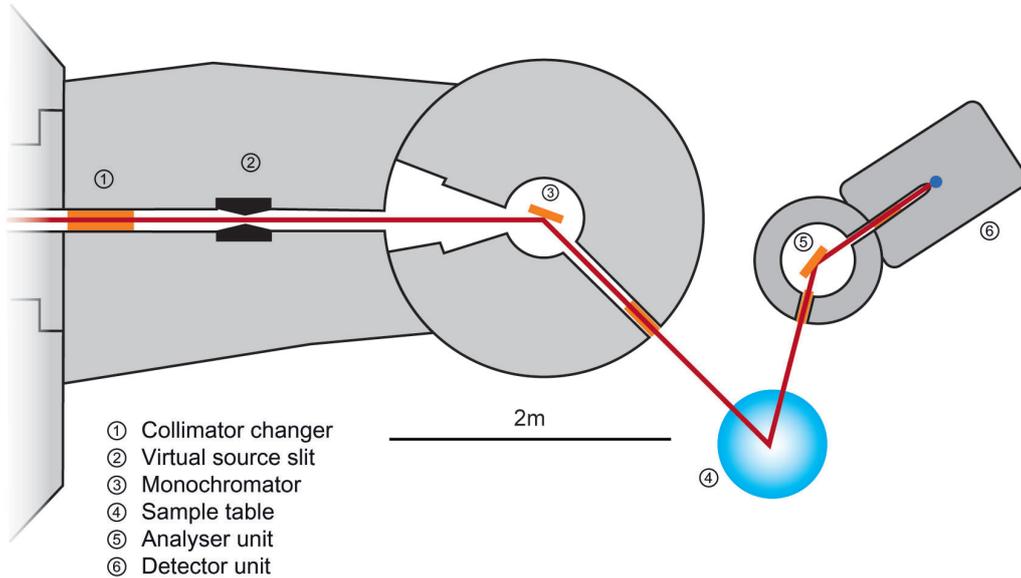


Abbildung 1.4: Schematischer Aufbau des PANDA-Spektrometers⁴. Der Neutronenstrahl wird kollimiert, dann mittels Monochromator ein schmaler Teil des Spektrums ausgefiltert und auf die Probe reflektiert. Die gestreuten Neutronen werden über einen zweiten Monochromator zum Detektor reflektiert. So erhält man eine winkel- und energieabhängige Messung.

1.2.4 Neutron-Spin-Echo (NSE)

Das Prinzip der Neutronen-Spin-Echo-Spektroskopie wurde 1972 von Mezei entwickelt. [Mez72] Es ist eine experimentelle Methode der inelastischen Neutronenstreuung. Dabei wird ein in Strahlrichtung polarisierter Neutronenstrahl, wie in Abbildung 1.5 zu sehen ist, in ein homogenes, senkrecht zum Strahl stehendes Magnetfeld geleitet. Dort präzedieren die Neutronenspins ihrer kinetischen Energie entsprechend unterschiedlich viel und die Polarisation geht verloren. Im quantenmechanischen Bild entspricht dieser Vorgang einer Aufspaltung der Spinkomponenten $|u\rangle$ und $|d\rangle$ bei Eintritt in das Magnetfeld aufgrund des longitudinalen Zeeman-Effekts. $|u\rangle$ wird beschleunigt und $|d\rangle$ abgebremst. Beim Austritt aus dem Feld kehrt sich die Beschleunigung genau um, aber $|u\rangle$ und $|d\rangle$ sind nun räumlich (Δz) und zeitlich (Spin-Echo-Zeit τ_{NSE}) getrennt.

$$\Delta z = v_0 \tau_{NSE} = \frac{\int E_{mag}(x) dx}{E_{kin}} \quad \tau_{NSE} = \frac{\hbar \gamma B_0 L_1}{m v_0^3} \quad (1.3)$$

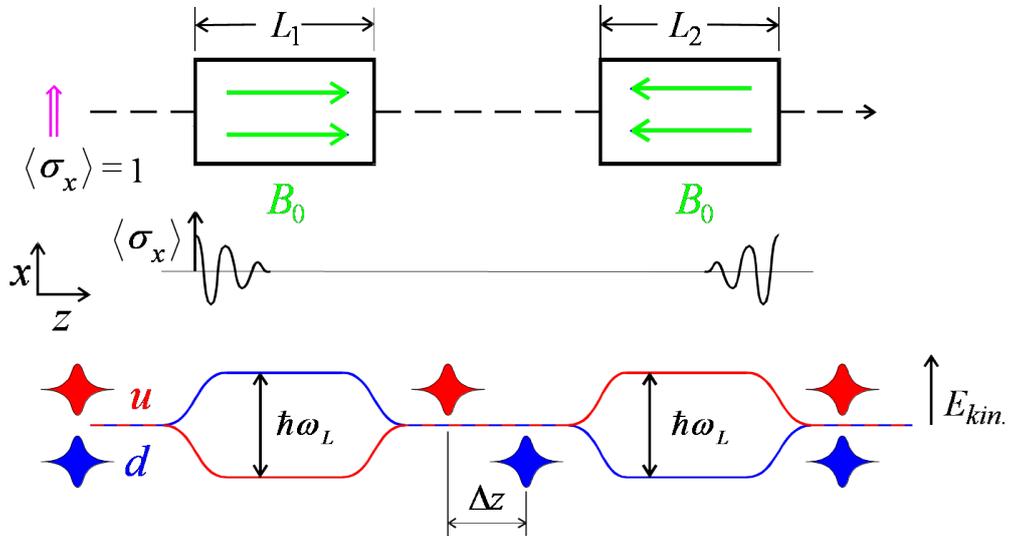


Abbildung 1.5: NSE-Prinzip mit Magnetfeldanordnung, Polarisation und Spin-Wellenfunktion. Polarisierte Neutronen treten in das Magnetfeld B_0 ein und verlieren ihre Polarisation. Wenn beide Magnetfelder gleich stark und lang sind, dann wird die Polarisation am Ende des zweiten Magnetfeldes zurückgewonnen. Unten ist das Phänomen im quantenmechanischen Bild mit der Energieaufspaltung der Spinkomponenten zu sehen.

Dabei ist γ das gyromagnetische Verhältnis des Neutrons, m seine Masse, v_0 seine Geschwindigkeit, B_0 die magnetische Induktion des Magnetfeldes, L_1 dessen Länge, E_{mag} die potentielle Energie und ω_L die Larmorfrequenz. Im zweiten Spektrometerarm werden nun alle Manipulationen am Neutronenstrahl umgekehrt, indem ein Magnetfeld gleicher Länge und Stärke, aber umgekehrter Richtung, durchlaufen wird. So entsteht das namensgebende Spin-Echo beim Wiedervereinen der Wellenfunktionen. Platziert man eine Probe zwischen den Magnetfeldern und misst mittels Analysator und Neutronendetektor die Polarisation hinter dem zweiten Arm, so gibt es zwei Fälle. Ist die Probe statisch, werden $|u\rangle$ und $|d\rangle$ exakt gleich gestreut und man misst maximale Polarisation. Ist sie hingegen dynamisch, das heißt, nachdem $|u\rangle$ gestreut wurde, ändert sie sich innerhalb von τ_{NSE} , so wird $|d\rangle$ anders gestreut und die Polarisation bricht zusammen. Mit einem Durchfahren der Spin-Echo-Zeit, ps bis einige 10 ns, erhält man die intermediäre Streufunktion $\tilde{S}(q, t)$, welche über eine eindimensionale Fouriertransformation mit der Streufunktion $S(q, \omega)$, die in klassischen Streuexperimenten bestimmt wird, zusammenhängt.

Mit den für atomare Prozesse langen Spin-Echo-Zeiten und deren Genauig-

keit erreicht man nach der Fouriertransformation gute Energieauflösungen bei sehr geringen Energien. Dies ist klassisch nur mit sehr langwelligen Neutronen, bei deren Ausfilterung man extrem an Strahlintensität verliert, realisierbar. Weitere Vorteile der NSE-Technik sind die Sensitivität für langsame Prozesse, wie Diffusion in Polymeren, das Nutzen des breiten Neutronenspektrums und der Betrieb im kontinuierlichen Strahl. Technisch sind die langen, starken und präzisen Magnetfelder eine große Herausforderung. Zudem sind magnetische Proben nicht zugänglich, da sie die Polarisation auch ohne Dynamik beeinflussen.

1.2.5 Neutronen-Resonanz-Spin-Echo (NRSE)

Eine Weiterentwicklung der NSE-Technik ist die Neutronen-Resonanz-Spin-Echo-Methode, die 1987 von Gähler und Gloub vorgestellt wurde [GG87]. Bei dieser Technik kann auf die lang ausgedehnten Magnetfelder verzichtet werden, denn wie in Abbildung 1.6 zu sehen ist, treten die Neutronen nicht nur in ein statisches Magnetfeld B_0 ein, sondern auch in eine π -Flip-Spule, in der ein rotierendes Feld B_1 die Spins während des Durchgangs (D) genau um 180° dreht. Dies hat zur Folge, dass beim Ausgang aus B_0 $|u\rangle$ und $|d\rangle$ nicht wieder auf die gleiche Geschwindigkeit gebracht werden, sondern die Energieaufspaltung noch größer wird. Damit laufen die Spinkomponenten während der Driftstrecke L_1 doppelt so weit auseinander. Dies führt zu einer Verdopplung der Spin-Echo-Zeit $\tau_{NRSE} = 2 \cdot \tau_{NSE}$. Dabei ist $B_1 \sim \sin(\omega_L t)$ mit $\omega_L = \gamma B_0$. Die Energieaufspaltung wird dann am Ende von L_1 durch einen identischen Aufbau aufgehoben. Im zweiten Arm, der gleich aufgebaut ist, wird lediglich B_0 invertiert um so, wie auch schon in 1.2.4, das Spin-Echo zu erzeugen. Das Vermessen einer Probe ist identisch mit der NSE-Technik. Der Vorteil von NRSE ist einerseits das Ersetzen der ausgedehnten Magnetfelder durch einen feldfreien Raum und andererseits die Verdopplung der Spin-Echo-Zeit. Dies gelingt allerdings nicht vollständig, da es wiederum technisch sehr anspruchsvoll ist, starke Hochfrequenz-Magnetfelder zu erzeugen. Mit dem NRSE-Aufbau lassen sich einfacher Inhomogenitäten in Feldern und Strahl ausgleichen. Man kann allerdings nicht mehr mit einem sehr breiten Neutronenspektrum arbeiten, da sonst die π -Flip-Bedingung nicht mehr zu erfüllen ist. Dennoch sind relative Wellenlängenbreiten von 20% möglich [Sch95], was wesentlich mehr ist als bei klassischen Methoden.

1.2.6 Modulation Intensity by zero Effort (MIEZE)

Das MIEZE-Verfahren ist wiederum eine Weiterentwicklung der NRSE-Methode. MIEZE-II ist im Prinzip auch ein NRSE-Aufbau, nur wird

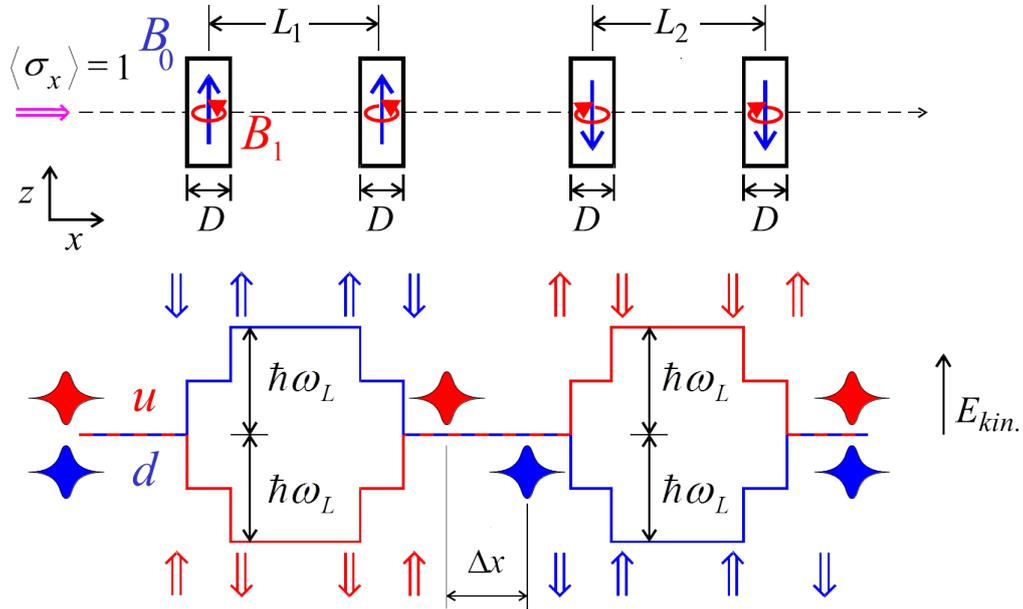


Abbildung 1.6: NRSE-Prinzip mit Magnetfeldanordnung, Polarisation und Spin-Wellenfunktion. Polarisierte Neutronen werden beim Eintritt in das Magnetfeld ihrer Spinrichtung entsprechend beschleunigt $|d\rangle$ oder abgebremst $|u\rangle$. In der π -Flip-Spule werden nun die Spins umgeklappt und so werden die Komponenten beim Austritt wieder beschleunigt beziehungsweise abgebremst. Im feldfreien Raum laufen $|u\rangle$ und $|d\rangle$ weiter auseinander. In der zweiten Spule wird die Energieaufspaltung rückgängig gemacht. Im zweiten Arm werden die Komponenten durch Umkehrung von B_0 wieder überlagert.

die vierte Spin-Flip-Spule durch einen Detektor, der in der Lage ist, die nun räumlich stark begrenzte Resonanz (die Spin-Echokurve) zu detektieren, ersetzt. Das MIEZE-I wurde zum ersten Mal in [GGK92] vorgestellt und ist in Abbildung 1.7 zu sehen. Dabei wird im ersten Spektrometerarm nicht zweimal die gleiche Magnetfeldanordnung gewählt, sondern die zweite ein wenig stärker eingestellt, das heißt $\omega_{L_1} < \omega_{L_2}$. Damit wird die Spinwellenmanipulation der ersten Spulenanordnung überkompensiert und $|u\rangle$ und $|d\rangle$ laufen nach L_2 wieder zusammen, ohne dass ein weiteres Magnetfeld nötig wäre. Am Spin-Echo-Punkt entsteht nun eine stehende Welle mit einer Frequenz von typischerweise einigen 100 kHz und einer Ausdehnung von mehreren cm.

$$\tau_M = \frac{L_2 \hbar \Delta \omega}{m v_2^3} \quad [\text{Ble03}] \quad (1.4)$$

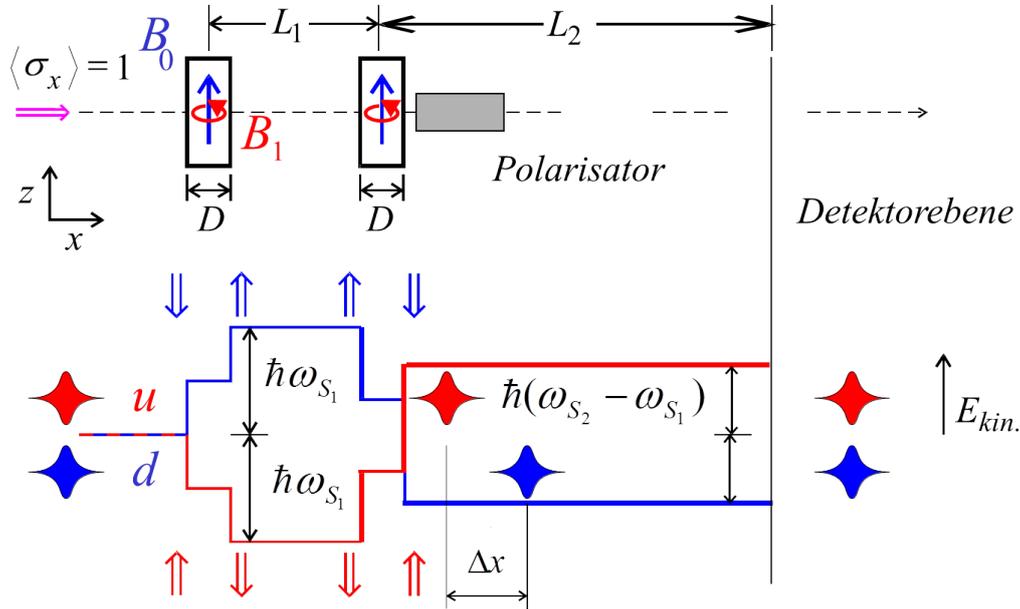


Abbildung 1.7: MIEZE-I-Prinzip mit Magnetfeldanordnung und Spin-Wellenfunktion; die Probe kann hier hinter dem Polarisator platziert werden.

τ_M ist die MIEZE-Zeit, das Äquivalent zu τ_{NSE} . Diese Anordnung hat mehrere Vorteile, wie mögliche Streuexperimente an magnetische oder wasserstoffhaltige Proben, die die Neutronenspins manipulieren. Es entfällt der komplette zweite Arm, sodass man eine Flächenmessung durchführen könnte. Die Herausforderungen liegen hier vor allem bei dem Detektor. Dieser muss schnell genug sein, um eine Welle mit einer Frequenz von 100 kHz abzutasten, und eine z-Ortsauflösung besitzen, die unter $v_2 \cdot \tau_M/4$, also etwa 50 μm bei kalten Neutronen, liegt. Die Proben in diesem Aufbau müssen aus einem ähnlichen Grund auch recht dünn sein.

Anwendungen dieser Technik sind zum Beispiel in [HHK⁺09] beschrieben, wo Relaxationen von magnetischen Nanopartikeln gemessen wurden. Wegen der magnetischen Probe funktioniert NRSE nicht, aber wegen des langsamen Prozesses ist eine Spin-Echo-Methode notwendig.

Natürlich sind diese drei vorgestellten Spin-Echo-Varianten nicht die einzigen. Es wird versucht, die Herausforderungen der Methoden zu meistern und ihre Stärken voll auszunutzen. Dafür werden die Methoden ineinander gestapelt und kombiniert.

1.3 Neutronennachweis

Thermische Neutronen werden aufgrund ihrer unterdrückten elektroschwachen Wechselwirkung ausschließlich über Konversionsreaktionen nachgewiesen. Der Nachweiskern fängt ein Neutron ein, dies macht ihn instabil und er zerfällt mit charakteristischem Muster. Die aufgrund des Wirkungsquerschnitts und der Zerfallskanäle in Frage kommenden Isotope sind in Tabelle 1.2 aufgeführt. Der Neutronennachweis an sich ist der Nachweis der Konver-

Isotop	Reaktionsprodukt	Absorbtionsquerschnitt σ_a
^3He	$^3\text{H} + \text{p} + 764 \text{ keV}$	5333 b
^6Li	$^3\text{H} + \alpha + 4,78 \text{ MeV}$	940 b
^{10}B	$^7\text{Li} + \alpha + 2,79 \text{ MeV}$ (6%) $^7\text{Li}^* + \alpha + 2,31 \text{ MeV}$ (94%)	3837 b
^{157}Gd	$^{158}\text{Gd} + \gamma + \approx 100 \text{ keV}$	259000 b
^{235}U	Spaltprodukte + $\approx 160 \text{ MeV}$	681 b
^{239}Pu	Spaltprodukte + $\approx 160 \text{ MeV}$	1017 b

Tabelle 1.2: Isotope mit hohem Absorbtionsquerschnitt, Produkte nach Neutroneneinfang und σ_a für thermische Neutronen ($v = 2200 \text{ m/s}$) nach [Sea92].

sionsprodukte. Da es sich um ionisierende, meist hochenergetische Teilchen handelt, kommen fast alle Detektorkonzepte in Frage, die auch in der Kern- und Teilchenphysik genutzt werden. Die Herausforderung ist es, einerseits den Absorber so in das Detektorvolumen zu bringen, dass die Konversionsprodukte gut nachgewiesen werden können ohne seine Effizienz zu sehr zu beeinflussen, und andererseits den γ -Untergrund, der in der Nähe von Neutronenquellen enorm sein kann, effektiv zu unterdrücken.

Die einfachste und am häufigsten verwendete Methode ist es, ein Zählrohr mit ^3He zu füllen. Mit Helium als Absorber und Detektionsgas ergibt dies einen nahezu untergrundfreien und effizienten Detektor. Für MIEZE-Anwendung ist das Zählrohr aufgrund der geringen Ratenakzeptanz und dem Rohrquerschnitt von mehreren cm nicht geeignet.

Gasdetektoren lassen sich außerdem mit BF_3 betreiben. Festkörper als Neutronenkonverter lassen sich mit einem üblichen Zählgas (Edelgas plus Quenchgas) kombinieren, wie auch der in [Mod14] entwickelte Detektor.

Mit Lithiumfluoridkristallen lassen sich Szintillationsdetektoren bauen, die aber recht γ -untergrundempfindlich sind.

Kapitel 2

CASCADE-Detektor

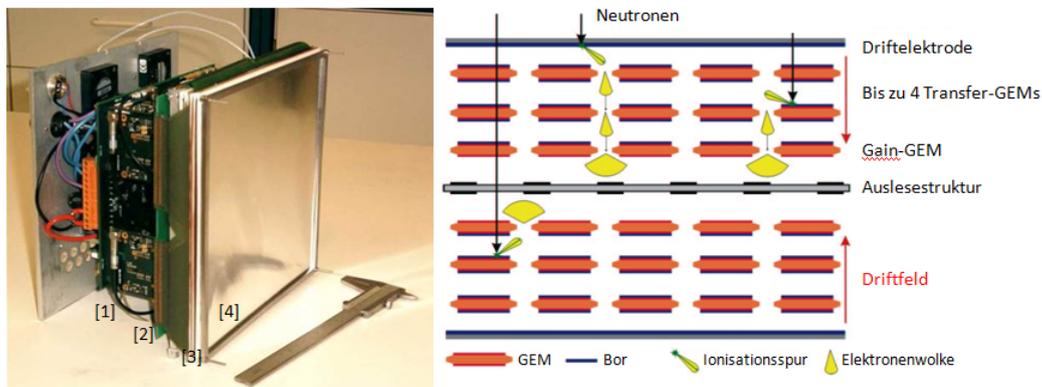


Abbildung 2.1: Aufbau und Funktionsweise des CASCADE-Detektors, links: [1] Ausleseelektronik, [2] HV-Board, [3] GEM-Stack, [4] Eintrittsfenster für Neutronen; rechts: Ein Neutron löst in ^{10}B eine Konversionsreaktion aus, eines der beiden Produkte ionisiert das Detektionsgas. Das Ladungssignal wird durch die GEMs auf die Auslesestruktur geleitet.

In den letzten Jahren, angefangen von Martin Klein [Kle00], wurde am Physikalischen Institut Heidelberg ein Bor-basierter Neutronendetektor entwickelt. Die aktuelle Variante, die auch schon kommerziell verfügbar ist¹, hat folgende Eigenschaften:

- Detektorfläche von $200 \times 200 \text{ mm}^2$ mit $128 \times 128 \text{ px}$ Auflösung
- Nachweiseffizienz von etwa 50% bei kalten Neutronen (5 \AA)
- Ortsauflösung von $2,6 \text{ mm FWHM}^2$

¹CDT GmbH, Heidelberg.

²Full Width at Half Maximum.

- Hochratentauglichkeit bis zu 2 MHz
- Gammauntergrund $< 10^{-6}$

Sein Aufbau und die Funktionsweise der einzelnen Komponenten werden in diesem Kapitel beschrieben. Zudem wird auf die Modifikationen für MIEZE-Messungen eingegangen. Am Ende des Kapitels wird die Motivation für die Weiterentwicklung des Detektors erläutert.

2.1 Aufbau des CASCADE-Detektors

Es wird ein Neutronenkonverter in ein Gasvolumen gebracht, mit dem man die entstehende ionisierende Strahlung orts aufgelöst nachweist. Bei CASCA-

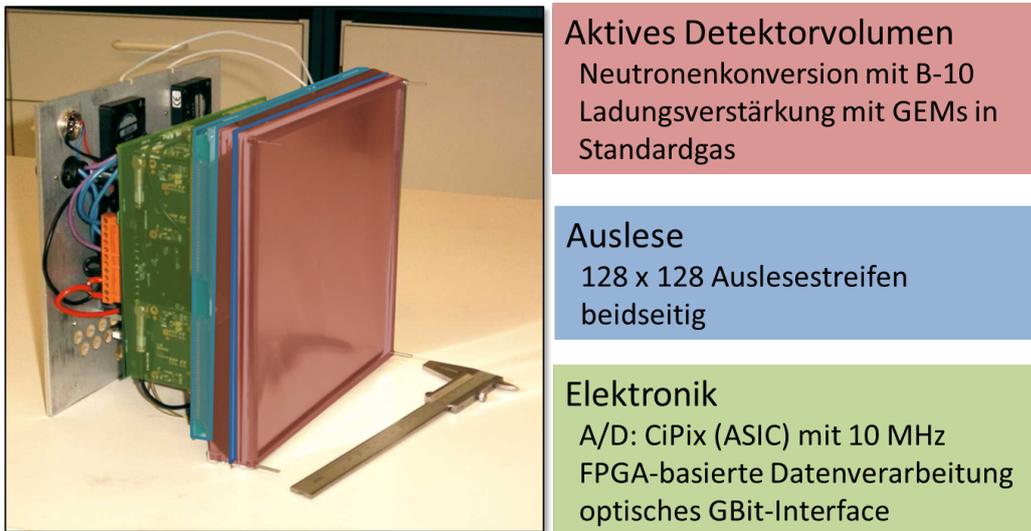


Abbildung 2.2: Aufbau des CASCADE-Detektors und Gliederung in Komponenten.

DE wird ^{10}B als Konversionsmaterial verwendet. Die Reaktionsprodukte haben allerdings eine geringe Reichweite in festem Bor, weswegen die Schichtdicken nur etwa $3\ \mu\text{m}$ betragen können. Damit sinkt aber auch die Absorptionswahrscheinlichkeit der thermischen Neutronen in der Schicht auf etwa 5%. Gelöst wird dies durch Kaskadierung mehrerer dünner Borschichten. Da man den Ort der Konversion messen möchte, muss man nun die entstehende Primärisation durch die Schichten leiten. Dafür werden GEMs verwendet.

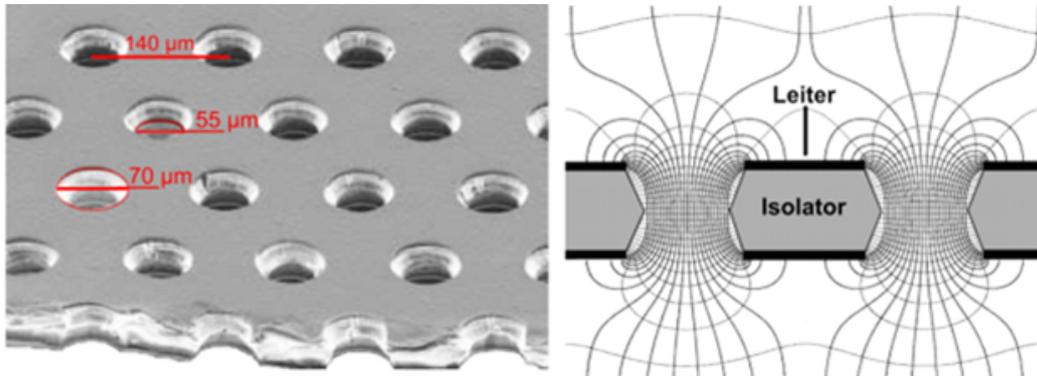


Abbildung 2.3: Mikroskopaufnahme und Feld einer GEM [SS99]. Die GEM besteht aus Polyimid (Kapton®) und ist beidseitig mit Kupfer beschichtet. Durch die Geometrie der Löcher, die nicht durchkontaktiert sein dürfen, werden in ihnen für Gasverstärkung nötige Feldstärken erreicht.

2.1.1 Gas-Electron-Multiplier-Folien (GEM)

GEMs sind beidseitig mit Kupfer beschichtete Kapton-Folien, in die 50 µm große Löcher geätzt werden. Sie wurden am CERN³ entwickelt [Sau97]. Zwischen Ober- und Unterseite wird eine Spannung angelegt, sodass das in Abbildung 2.3 zu sehende Feld entsteht. Ladung wird nun durch die Löcher geleitet. Aufgrund der Geometrie können die Feldstärken in den Löchern so groß werden, dass man die Anzahl der Ladungsträger tausendfach verstärken kann. Zudem kann die Feldstärke der Driftfelder unabhängig von der Gasverstärkung gewählt werden. GEMs gibt es, wie in [Pin11] vorgestellt, für große Flächen und es wurde erzielt stabile sphärische Geometrien der Folien zu realisieren.

2.1.2 Komponenten und Funktionsweise des CASCADE-Detektors

Es werden bis zu acht borbeschichtete GEMs übereinander gestapelt, mit Standardgas (Ar:CO₂ in 70:30 bis 88:12) gespült, um Alterungseffekte zu vermeiden, und in ein Aluminiumgehäuse gebracht. Dies ist das in Abbildung 3.10 dargestellte aktive Detektorvolumen.

Die Auslesestruktur ist gasdurchlässig und von beiden Seiten empfindlich, was ein Spiegeln des Aufbaus möglich macht.

³Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire.

Die Ausleseelektronik ist FPGA⁴-basiert und verwendet Vorverstärker-ASICs⁵, den CiPix, der eine stripped-down Version des HELIX-128 von HERA-B⁶ ist. Die Funktionsweise ist in Abbildung 2.4 dargestellt. Ein Neutron wird in ei-

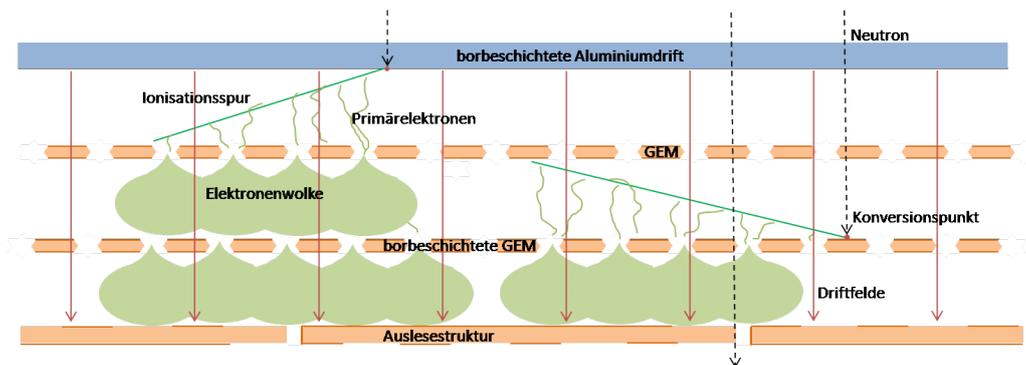


Abbildung 2.4: Schematische Darstellung der Funktionsweise des CASCADE-Detektors. Die Driftstrecken sind um den Faktor 10 gestaucht. Neutronen werden in den Borschichten absorbiert und ein Konversionsprodukt ionisiert das Detektorgas. Die Primärelektronen werden vom Driftfeld auf die GEMs geführt und in den Löchern verstärkt. Die Auslesestruktur ist gasdurchlässig und von beiden Seiten sensitiv.

ner Borschicht absorbiert. Eins der beiden Konversionsprodukte erreicht das Gasvolumen und ionisiert es auf seinem Weg bis zur nächsten Schicht. Die Primärelektronen werden von den GEMs aufgesammelt und die entstehenden Ladungswolken werden durch das Driftfeld bis auf die Auslesestruktur, die in der Arbeit [Hin05] entwickelt wurde, geführt. Dabei werden durchaus mehrere Auslesestreifen getroffen. Dies ist durch höhere Drücke oder Quenching-Gas-Anteile reduzierbar, denn damit werden die Ionisationsspuren kürzer.

2.2 MIEZE-Modifikation

Für MIEZE-Messungen muss der Detektor, wie in Kapitel 1.2.6 erwähnt, eine sehr gute Zeit- und Ortsauflösung (in Strahlrichtung) haben. Der CASCADE-Detektor hat die erforderliche Ratentauglichkeit. Für die präzise Ortsinformation ist eine Erweiterung, wie sie in in Diplomarbeiten [Gro09] und [All11] erarbeitet wurde, nötig. Das Prinzip ist in Abbildung 2.5 zu sehen. Man

⁴Field Programmable Gate Array.

⁵Application Specific Integrated Circuit.

⁶Teilchendetektor am DESY in Hamburg.

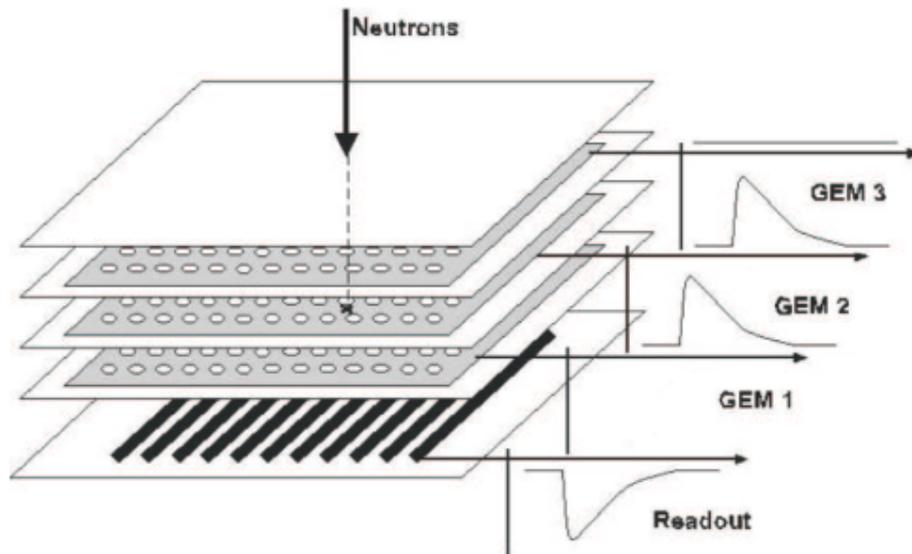


Abbildung 2.5: Prinzip der Auslese der GEM-Signale zur Identifikation der Konversionschicht. Die Ladungswolken erzeugen Spiegelladungen auf den über ihm liegenden GEMs, welche ausgelesen werden.

macht sich zunutze, dass die Elektronenwolken durch Spiegelladungen einen Spannungsabfall auf der GEM produzieren. Somit ist ein GEM-Signal von allen GEMs zwischen Konversionschicht und Auslese zu beobachten. Damit ist die Ausgangsschicht identifizierbar und man kann die Neutronenkonversion auf wenige μm (die Borschichtdicke) genau detektieren.

2.3 Motivation für die Weiterentwicklung des Detektors

Die richtige Zuordnung der Borschicht zu einem Neutronenereignis ist nicht so einfach. Da die GEMs untereinander kapazitiv gekoppelt sind, können Signale auch gegen die Elektronendrifttrichtung an eine benachbarte GEM gelangen. Zudem kommt es bei niederenergetischen Konversionsprodukten, wenn zum Beispiel ${}^7\text{Li}$ einen Großteil der Energie in der Borschicht deponiert hat, zu kleinen Signalen, die nicht mehr an der eigentlichen GEM detektiert werden. Mit eingezogenen Grids (Drahtnetzen) und größeren GEM-Spannungen gelingt eine Verbesserung aber kein Ausschluss dieser Fehlzuordnungen. Zudem sind sie Neutronenstreuer und beeinflussen die Neutronen zusätzlich. Wie in [Abbildung 2.6](#) zu sehen ist, gelingt es nicht, jedem auf der Auslese detektierten Ereignis auch eine GEM zuzuordnen. Dies kann an der Sensiti-

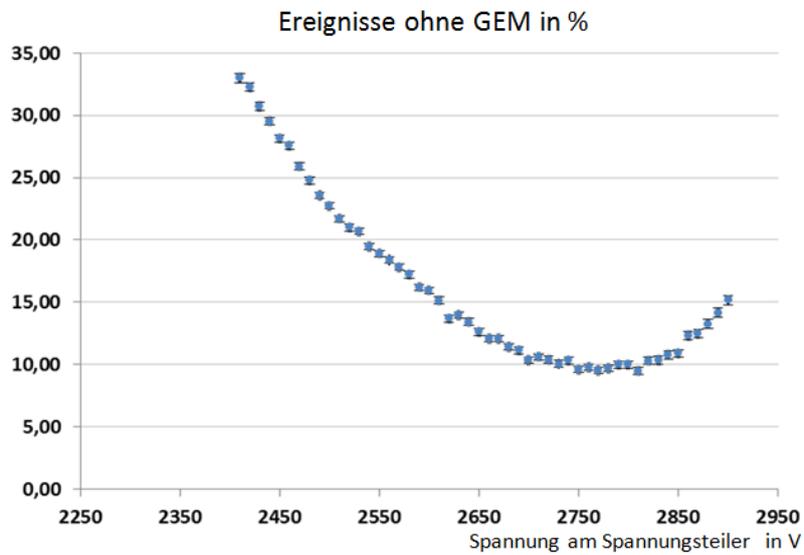


Abbildung 2.6: Fehlende GEM-Signale gegen Spannung [Köha].

vität des CiPix liegen, der schon nahe an seiner Rauschgrenze arbeitet. Beim Auswerten der GEM-Signale stellte sich heraus, dass die Gasverstärkung lokal auf der GEM starken Schwankungen unterlegen ist. Dies deutet auf mechanische Spannungsprobleme hin.

Kapitel 3

Neuentwicklung des Gehäuses

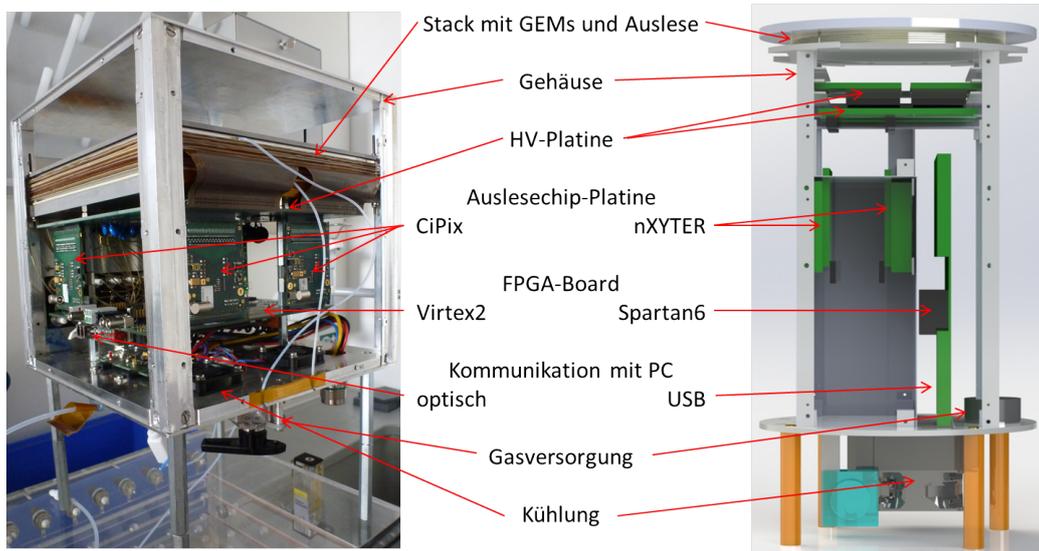


Abbildung 3.1: Veränderungen des CASCADE-Detektors, links: bisheriger Aufbau, rechts: in dieser Arbeit entwickelter Detektor.

In diesem Kapitel wird der in dieser Diplomarbeit neu- beziehungsweise weiterentwickelte CASCADE-Detektor in seinem Aufbau vorgestellt. Zuerst wird der neue runde Stack und seine Entwicklung beschrieben, dann das restliche Gehäuse mit den Besonderheiten und Gründen für diese.

3.1 Rahmen zum Spannen der Folien

Die Anforderungen an die Rahmen sind folgende:

- präzise Positionierung der auf ihnen gespannten Folien
- geringe Höhe zur Reduktion der Driftstrecke
- geringer Einfluss auf die Ladungssignale
- Transparenz für Neutronen
- kein Ausgasen zum Schutz der Detektorkomponenten, welche in den Gasverstärkungsprozess involviert sind
- modular anwendbar sowohl beim Stapel als auch in gleichzeitiger Anwendung mehrerer Detektoren
- gasdicht für Spülbetrieb

Bisher werden quadratische Edelstahlrahmen als Spannvorrichtung für die GEMs verwendet. Diese zeigen einige Nachteile auf. Sie koppeln die GEMs zusätzlich kapazitiv gegeneinander [All11]. Das optimale Bespannen erweist sich als schwierig, da die homogene Kraftverteilung orthogonal zu den Kanten auf den Diagonalen Kraftsenken erzeugt. Deshalb kommt es zu Faltenbildung, die sich auch in den Messdaten findet, siehe Abbildung 3.2. Auch mit dafür in [Fri07] entwickelten Druckrahmen kann eine zufriedenstellende Gasdichtigkeit eines Stacks nicht erreicht werden. Der Vorteil der Edstahllösung ist vor allem sein sehr schmales Design, welches eine modulare Anwendung bei geringer Blindfläche, welche Detektorfläche ist, die kein Neutronensignal erzeugen kann, ermöglicht und eine geringe Neutronenstrahlbeeinflussung bietet. Bei dem hier entwickelten Detektor wird auf eine modulare Anwendung keine Rücksicht genommen. Die anderen Punkte werden weitgehend optimiert.

3.1.1 Materialauswahl der Rahmen

Da die kapazitive Überkopplung das Hauptproblem für die Fehlzuordnungen ist, kommen nur noch Isolatoren als Material für die Rahmen in Frage. Da die Rahmen eine O-Ring-Nut bekommen sollen, fallen spröde Materialien wie Glimmer, welches praktisch keine Neutronen absorbiert oder streut, aus. Teflon, welches bisher nur als Isolationsfolie zwischen den Edelstahlrahmen verwendet wurde und einen sehr kleinen Neutronenwirkungsquerschnitt hat, ist von der Elastizität her noch verwendbar, aber ein Bekleben wird wegen

¹AS 500 M auf: http://www.agk.de/html/isolierwerkstoffe/k_therm_as_m.htm#TechnischeDatenGlimmer.

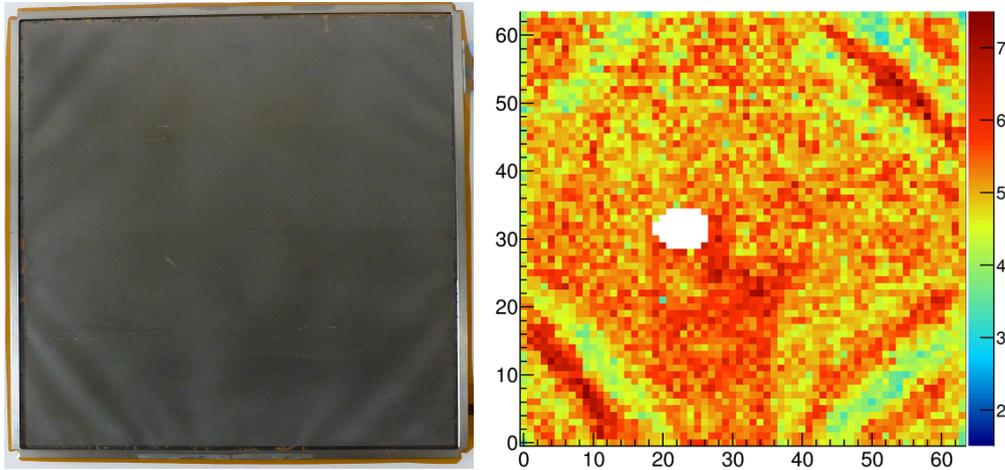


Abbildung 3.2: Faltenwurf von 200 mm x 200 mm GEM in Fotografie und Daten [Köhb] ohne Beam. Die Daten zeigen orts aufgelöst die Länge der Auslesezeit der GEM-Signale in [100 ns].

Material	Elastizitätsmodul	spezifischer Widerstand	Neutroneneinflussung	Bearbeitbarkeit
Edelstahl	190 GPa	$7 \cdot 10^{-1} \Omega$	gering	mäßig
Aluminium	70 GPa	$3 \cdot 10^{-2} \Omega$	sehr gering	gut
Glimmer ¹	0,1 GPa	$> 10^{16} \Omega$	sehr gering	schlecht
Teflon	0,42 GPa	$> 10^{18} \Omega$	sehr gering	schlecht
ABS	2,3 GPa	$> 10^{14} \Omega$	groß	sehr gut
Polypropylen	2 GPa	$> 10^{16} \Omega$	groß	gut
Aluminiumoxid	350 GPa	$> 10^{14} \Omega$	gering	mäßig

Tabelle 3.1: In Frage kommende Materialien für den Rahmen (als spezifischer Widerstand ist hier der Durchgangswiderstand durch einen $1 \times 1 \text{ cm}^3$ Probe angegeben).

der äußerst geringen Oberflächenspannung zu aufwendig. Gut und in beliebiger Geometrie ist ABS (Acrylnitril-Butadien-Styrol), ein Kunststoff, der am Physikalischen Institut Heidelberg gedruckt werden kann, verfügbar. Sein Ausgasverhalten macht ihn für einen Gasdetektor aber unbrauchbar. Allerdings ist sein mechanisches Verhalten (Elastizitätsmodul: $E = 2320 \text{ N/mm}^2$ [alp14]) dem von PP (Polypropylen mit $E = 2000 \text{ N/mm}^2$ [Ens11]) ähnlich, welches sich für Gasdetektoren eignet [Cpe07]. Ein Problem bei der Ver-

wendung von PP stellt der enthaltene Wasserstoff als Neutronenstreuer dar. Dieses ist durch eine Abschirmung des Rahmenbereichs des Stacks mit Bor-Gummi gelöst worden. In dieser Arbeit wird die Geometrie, das Druck- und das Spanverhalten mit ABS-Rahmen getestet und für den Detektor werden PP-Rahmen verwendet.

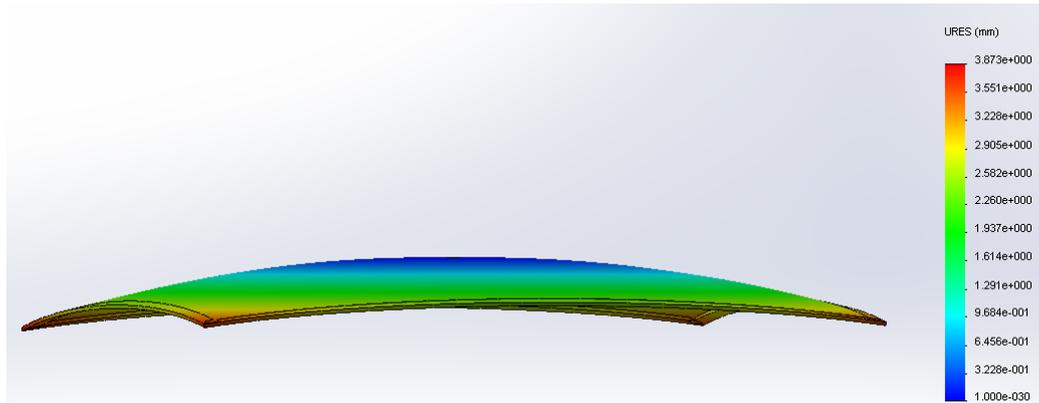


Abbildung 3.3: Mit SOLIDWORKS erstellte Simulation eines gespannten Rahmens mit 200 N Spannkraft orthogonal zu den Stegen.

3.1.2 Geometrie

Bisher wurde eine quadratische Geometrie des Detektors und des Rahmens gewählt. Die Stege des Rahmens sind nach außen hin gewölbt. Bei genauer Berechnung ergibt sich eine parabelförmige Wölbung, diese ist allerdings innerhalb der Druckgenauigkeit des 3D-Druckers ² (0,4 mm) nicht von einem Kreisbogen zu unterscheiden. Bis jetzt werden die Diagonalen als Spannungslinien nicht beachtet. Um diesen Rechnung zu tragen, wurde eine Simulation der Verformung eines unter Spannung stehenden Rahmens samt Folie mit SOLIDWORKS ³ erstellt (Abbildung 3.3). In dieser ist zu sehen, dass sich der Rahmen wie auf eine Kugeloberfläche zieht. Diesem Ergebnis entsprechend wurde der Rahmen aus Abbildung 3.4 bzw 3.5c dimensioniert.

Es werden ABS-Prototypen der Innenmaße 90 mm x 90 mm und Höhe 2 mm erstellt und in den für die Edelstahlrahmen angefertigten Spannvorrichtungen gespannt. Verklebt wird Kapton-Folie 50 µm mit STYCAST®1266 Part A [Eme03] CATALYST 24LV im Verhältnis 100 zu 28 bei 4 bis 6 Stunden Aushärtezeit und 60°C.

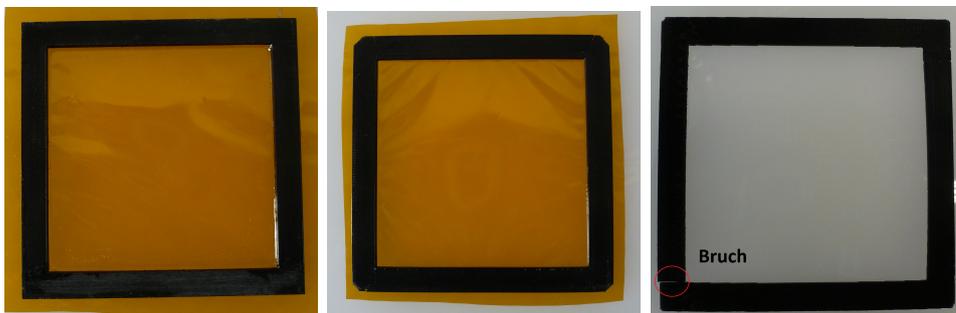
Der erste Rahmen (Abbildung 3.5a) ist ein Quadrat mit quadratischem Aus-

²alphacam, Dimension Elite.

³DASSAULT SYSTEMS, SOLIDWORKS 2012.



Abbildung 3.4: ABS-Prototyp eines auf eine Kugelfläche gezogenen Rahmens.



(a) Rahmen 1

(b) Rahmen 2

(c) Rahmen 3 mit Bruch

Abbildung 3.5: ABS-Testrahmen zur Spannoptimierung.

schnitt mit Innenmaß 90 mm und Außenmaß 110 mm. Man erkennt die Falten längs zu den Stegen gut. Dies entspricht der Erwartung.

Beim zweiten Rahmen (Abbildung 3.5b) werden die Stege als Kreisbögen mit Radius 1375 mm, einer Spannkraft von 200 N entsprechend, geformt. Die Falten orientieren sich nun entlang den Diagonalen. Dies ist ähnlich den Mustern bei den Edelstahlrahmen. Zudem stellt man eine erhebliche Dislokation der Ecken fest, was aufgrund der Bohrungen an den Stahlrahmen keine Probleme beim Spannen verursachte. Die ABS-Rahmen passen dann aber nicht mehr richtig in die Spannvorrichtung.

Im letzten Versuch wird das Simulationsergebnis für einen dreidimensional gekrümmten Rahmen (Abbildung 3.5c) verwendet. Der Stegkrümmungsradius ist auch 1375 mm, der Flächenkrümmungsradius ist 507 mm. Auch diese Maße entsprechen einer Spannkraft von 200 N. Der Rahmen selbst wies eine noch größere Verschiebung der Ecken auf als der ebene Rahmen (Abbildung 3.5b). Dies war der Grund für den zu erkennenden Bruch des Materials.

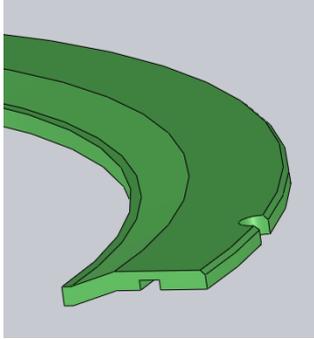


Abbildung 3.6: Profil des verwendeten GEM-Rahmens.

Letztendlich zeigen die Prototypen, dass die eckige Form nicht leicht zu beherrschen ist, der Spannvorgang an sich ist unter manueller Arbeitsweise nicht reproduzierbar und nur mit viel Erfahrung zufriedenstellend. Deshalb wird das eckige Design aufgegeben.

Es werden runde, selbstspannende Rahmen verwendet. Im Zuge dieser Arbeit wurde die Form dieser Rahmen entwickelt. Die Dimensionierung sieht eine aktive Fläche, das heißt eine GEM von 100 mm x 100 mm, ein CERN-Standardmaß, vor. Der Innendurchmesser beträgt 162 mm und der Außendurchmesser 194 mm. Durch die totale Höhe von 4 mm bleibt die Driftstrecke von 2 mm vom quadratischen Aufbau erhalten. Im Profil (Abbildung 3.6) sieht man einige Besonderheiten.

Die große Fase innen dient dem Spannen der Folien, indem der darüber liegende Rahmen sie nach unten drückt. Der innere Zapfen positioniert die GEM exakt. Dies stellte sich bei Tests an 3D-Drucker-Rahmen als notwendig heraus, da die Kanten nicht der benötigten Genauigkeit ($< 100 \mu\text{m}$) für die MIEZE-Messungen entsprachen. In die Rahmen wird eine O-Ring-Nut für O-Ringe der Schnurstärke 1,5 mm und des Innendurchmessers 180 mm eingelassen. Die Fase am äußeren Rand dient einem möglichen Nachkleben der Folien. Es gibt insgesamt vier kreisförmige Führungskerben. In Abbildung 3.6 ist nur eine zu sehen. Sie dienen dem Ausrichten der Schichten gegeneinander. Zugleich werden sie benutzt, um die Spannschrauben durch den Stack zu führen.

3.2 Aktives Nachweisvolumen

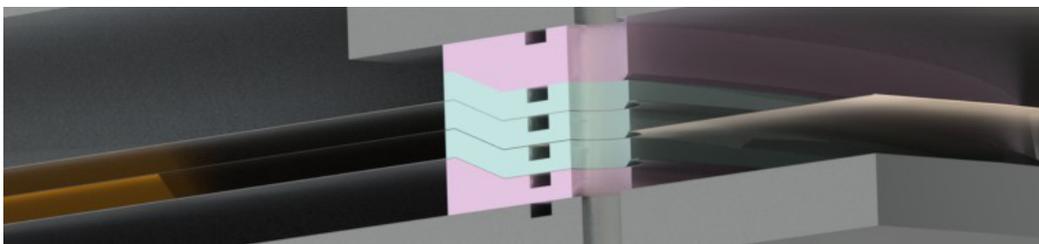


Abbildung 3.7: Querschnitt durch den Stack, es sind die beschriebenen Rahmen zu sehen und wie sie die Folien spannen.

Der Stack besteht aus mehreren übereinander geschichteten, oben beschriebenen Rahmen, welche sich gegenseitig spannen.

3.2.1 O-Ringe

Für die Dichtungen werden O-Ringe verwendet. Als Material (siehe Tabelle 3.2) wird FKM der Härte 80 ± 5 Shore A gewählt. FFKM hat zwar bessere Eigenschaften, doch ist dieser Werkstoff in dem hier benötigtem Maß von 180 mm Innendurchmesser und 1,5 mm Schnurstärke unverhältnismäßig teuer und für Messzeiten von wenigen Tagen ist bei FKM-O-Ringen in Gasdetektoren kein negativer Effekt aufgetreten [Pin].

NBR-O-Ringe werden für die ABS-Prototypen der Rahmen verwendet, da

Material	Abkürzung	Tauglichkeit für Gasdetektoren
Nitrilkautschuk	NBR	untauglich, zu starkes Ausgasen
Fluorkautschuk	FKM/VITON®	für Kurzzeitmessungen tauglich
Perfluorkautschuk	FFKM/KALREZ®	tauglich

Tabelle 3.2: Materialien für O-Ringe [Cpe07].

hier nur auf Gasdichtigkeit und das Verhalten im Stack getestet wird.

3.2.2 ABS-Prototyp-Stack

Aus ABS-Rahmen wird ein Prototyp, wie in Abbildung 3.8 zu sehen, aufgebaut. Als GEM-Dummy dient 50 µm Kaptonfolie, in welche Löcher gestanzt werden, um das gesamte Volumen mit Testgas zu füllen. Der Gaseinlass wird auf die erste Folie aufgeschraubt. Es werden verschiedene auch nicht den Einbaunormen für Flanschdichtungen⁴ entsprechende O-Ringe hinsichtlich Positionierung und Gasdichtigkeit getestet.

Die Lecksuche mit einem Heliumschnüffler⁵ [Alc14] zeigt, dass schon bei niedrigem Druck von etwa 50 mbar Helium außerhalb des Stacks nachweisbar ist. Dabei ist auffällig, dass die höchsten Konzentrationen am Gaseinlass und an den Führungskerben beobachtet werden. Ein zweiter Test mit CO₂ zeigt die gleichen Schwachstellen bei geringfügig höherem Druck von etwa 100 mbar. Im Wasserbad dann sind die Lecks deutlich zu sehen. Der Gaseinlass ist undicht. Die ersten Blasen am Stack selbst treten an den Führungen auf. Dieses

⁴<http://www.cog.de/o-ringeprodukte/einbauraeume-der-o-ringe/o-ringe-einbaumasse.html> .

⁵adixen ASM 310.

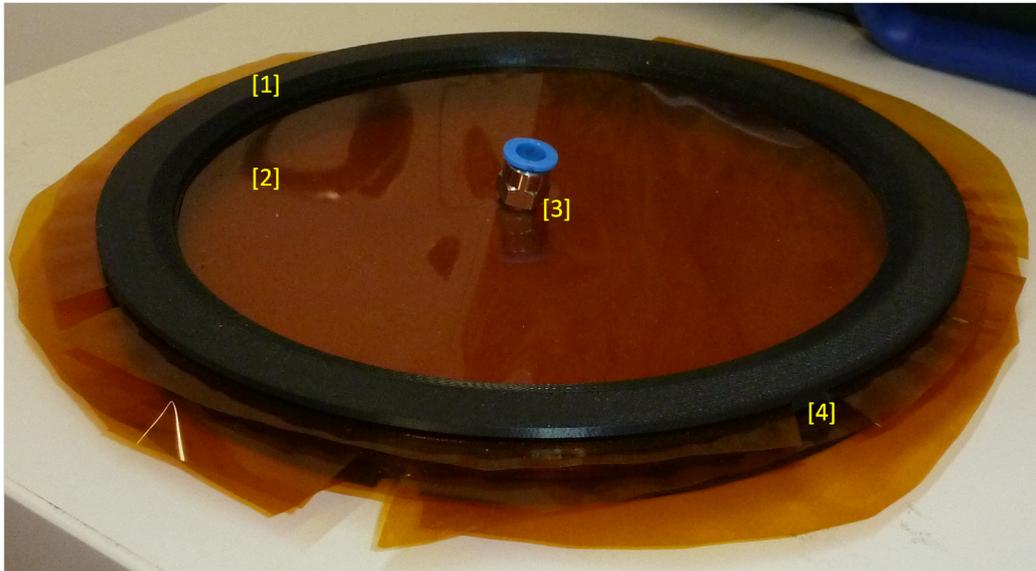


Abbildung 3.8: Prototyp aus mit Kapton bespannten ABS-Rahmen für Drucktests und Testpositionierung; ABS-Rahmen[1], Kapton-Folie[2], Gasanschluss[3], in die Rahmen integrierte Führungsstifte[4].

Leck lässt sich mit dickeren O-Ringen 180 x 2 (180 mm Innendurchmesser, 2 mm Schnurstärke) verringern.

Die ABS-Rahmen haben eine recht raue Oberfläche und die Führungsstifte, die beim Prototyp im Rahmen integriert sind, liegen beim Pressen auf dem nächsten Rahmen auf und verhindern so eine gleichmäßige Verpressung der O-Ringe. Dies scheinen die Gründe für die mäßige Gasdichtigkeit zu sein.

Die PP-Rahmen haben eine glattere Oberfläche und keine Führungsstifte, zudem wurde die Einbautiefe der O-Ringe von 1,05 mm auf 0,95 mm reduziert. Damit wird eine ausreichende Gasdichtigkeit bei Normaldruck gewährleistet. Die Positionierung der Rahmen untereinander mit den eingelegten O-Ringen funktioniert für 180 x 1,5 problemlos, aber für davon abweichende Maße ist sie kaum möglich.

3.2.3 Kompletter Detektorstack

Der Aufbau des Detektorstacks ist in Abbildung 3.9 zu sehen.

Der Aluminiumboden kann mit den darunterliegenden Elementen verschraubt werden. Er verfügt über eine Aussparung, die eine Borabschirmung aufnimmt. Diese schützt die Elektronik unter anderem vor Umdotierung durch die nicht detektierten Neutronen. Zudem wirkt sie als Beamstop, sodass keine Neutronen zurück in das Detektorvolumen gestreut werden. Des Weiteren

verfügt der Boden über eine O-Ring-Nut, eine sich außerhalb der aktiven Fläche aber innerhalb der O-Ring-Nut befindende M5-Gewindebohrung für den Gasauslass, eine Schlauchdurchführung außerhalb der O-Ring-Nut für den Gaszufluss und vier Ausklinkungen für die Kabel zu GEM und Drift. Der Polypropylen-Stack besteht aus den oben beschriebenen Rahmen und Modifikationen dieser, die den Stack abschließen. Dabei schafft der Boden ein Gasvolumen unter der Drift und spannt diese gleichzeitig. Der Deckel stellt einen ebenen Abschluss hin zu dem Aluminiumdeckel dar. Er könnte ebenfalls mit der oberen Drift-Folie bespannt werden. Die untere Drift-Folie besteht aus 100 μm Aluminium und stellt das untere Potentialniveau des Driftfeldes bereit. Die obere Drift besteht aus einer mit Kupfer und Bor beschichteten Kaptonfolie und hat folgende Funktionen: Erstens liegt auf ihr das obere Potentialniveau des Driftfeldes und zweitens ist die Borschicht auf ihr die Konversionschicht der Neutronen. Die GEM und ihre Eigenschaften werden in Kapitel 4.1 beschrieben.

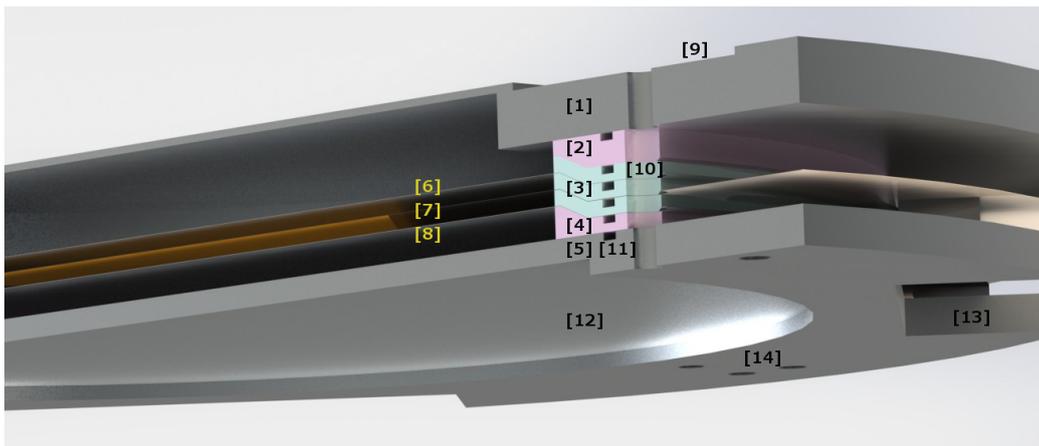


Abbildung 3.9: Querschnitt durch den Detektorstack mit Aluminiumdeckel[1], PP-Deckel[2], drei PP-Rahmen[3], PP-Boden[4], Aluminiumboden[5], Driftfolien mit[6] und ohne[8] Borbeschichtung, GEM[7]. Modifikationen: Aussparungen für Borabschirmung[9][12], Durchführung für Spannschrauben[10], O-Ring-Einbauräume[11], Kabeldurchführung[13] und Montagedurchführung[14].

Der Aluminiumdeckel ist wie auch der Boden aus dem vollen Block gefräst und verfügt über ein kreisförmiges Eintrittsfenster von 142 mm Durchmesser und 1 mm Stärke. Er verfügt ebenfalls über eine Aussparung zur Aufnahme einer Borabschirmung, die hier vor allem den Nachteil des großen Neutronenstreuquerschnitts der Polypropylen-Rahmen kompensieren soll. Dies gelingt mit dieser Anordnung bis hin zu einer Strahldivergenz von 19° . Der Gasein-

lass ist auch hier über eine M5-Gewindebohrung realisiert, allerdings seitlich am Deckel, damit sich der Einlass später nicht im Neutronenstrahl befindet. Dies macht eine Ausklinkung zur Montage notwendig.

Das Verpressen erfolgt über M4 Stahlschrauben oder Gewindestangen. Die Schrauben werden innerhalb des Stacks, also im Bereich der PP-Rahmen, aus Isolationsgründen durch Teflonschläuche mit Durchmesser 6 mm und Wandstärke von 1 mm geführt. Als Schlauch spielen die in Kapitel 3.1.1 genannten Nachteile von Teflon keine Rolle. Der geringe Neutronenstreuquerschnitt und die sehr kleine Oberflächenspannung kommen der Anwendung hier zugute.

Es ist jederzeit möglich, den Stack ohne großen Aufwand zu vergrößern, indem man weiter bespannte Rahmen hinzufügt. Eine Grenze der Erweiterung ist eher bei der Unterbringung der Ausleseelektronik gesetzt.

3.2.4 Vorspannen und Bekleben der Spannrahmen

Der Klebevorgang läuft für die Drift-Folien und die GEM gleich ab. Es stellte sich heraus, dass die Polypropylenrahmen vorbehandelt werden müssen. Bei dem angedachten Kleber, STYCAST®1266 Part A [Eme03] mit CATALYST 24LV als Härter im Verhältnis 100 zu 28, und unbehandelter Klebefläche, löste sich die Verbindung beim Spannen, also dem Verpressen der Rahmen. Andere Kleber, die für das Verkleben von unbehandeltem Polypropylen entwickelt wurden, gasen zu stark aus oder sind vom Markt genommen worden. Also werden die Klebeflächen auf dem Rahmen mit feinem Schleifpapier (Körnung: 320) angeraut, danach mit Wasser abgewaschen und mit Druckluft vorgetrocknet. Die Folien werden mittels einer dafür angefertigten Schablone, die die Durchführungen für die Spannschrauben abbildet, und einem 6 mm Stanzeisen gelocht. Anschließend werden alle Klebeflächen mit Aceton gesäubert. Die Folien werden auf einer Aluminiumunterlage und lediglich einer Durchführung fixiert, damit keinerlei Spannungen entstehen. Dann wird der Kleber im angegebenen Verhältnis angerührt und dünn auf die PP-Flächen aufgetragen. Anschließend wird der Rahmen auf der Folie positioniert und mit einer weiteren Aluminiumplatte beschwert. Ein Anpressen ist nicht notwendig, bei zu hoher Kraft sogar kontraproduktiv, da der Kleber recht dünnflüssig ist. Alles kommt nun zum Aushärten bei 70°C für vier Stunden in einen Ofen⁶. Nach mindestens einem halben Tag Abkühlung kann die Folie gespannt werden.

⁶WTC binder, Typ: 1824030000202.

3.3 Gasanschluss

Der Gaseinlass ist im Deckel und der Gasauslass im Boden des Stacks. Dabei wird darauf geachtet, dass beide nicht zu dicht an den Folien beziehungsweise an der aktiven Fläche liegen, da in Daten vom bisherigen Aufbau ein Effekt in der Gasverstärkung an Ein- und Auslass zu sehen war [Köha]. Auf die Anschlüsse werden jeweils FESTO-Adapter⁷ geschraubt. Mit einem 3 mm Schlauch⁸ wird das Gas durch den Aufbau zu einem 4-Wege-Kugelhahn⁹ geleitet. Diese Leitung wird so lang gewählt, dass der Detektor teilweise demontierbar ist, ohne das Gasvolumen zu verunreinigen. Der Hahn wird mit einem Zufluss entweder an zwei Gasflussregler¹⁰ zum Mischen des Gases oder direkt an eine vorgemischte Gasflasche angeschlossen und mit einem anderen Anschluss über einen Bubbler mit der Umgebungsluft verbunden. Der Bubbler ist ein Becher mit Alkohol, in dem das Schlauchende unter dem Flüssigkeitsspiegel liegt. Man verwendet Alkohol, da Wasserdampf das Detektorgas unbrauchbar macht. Mit dem Hahn kann man die Umgebung komplett von dem Detektorvolumen trennen und ihn somit zum Beispiel transportieren.

Als Gas kommt ein Gemisch von Argon 82 % und CO₂ 18 % zum Einsatz, wenn es vorgemischt ist.

3.4 Anordnung der Detektorkomponenten

Man kann den Detektor in drei Teile gliedern. Der schon beschriebene Stack, die HV-Einschübe und die Ausleseelektronikhalterung. Diese Teile können auch separat bewegt und justiert werden, da sie über Aluminium Vierkant-Profile mit Gewindebohrungen miteinander verbunden sind.

Die HV-Boards, siehe Kapitel 4.2, werden auf Aluminium-T-Profile geschraubt, welche genau in die an den Hauptträgern befestigten U-Profile passen. Diese Schlitten können, sobald man ein L-Profil löst, herausgenommen werden. Für Transporte kann man die Einschübe zusätzlich mit einer M3-Gewindestange sichern. Mit geringfügigen Modifikationen an den Trägern könnte man auch mehr HV-Einschübe aufeinander stapeln. Dabei ist dann die Kabelführung der limitierende Faktor. Die Ausleseelektronikhalterung basiert auf der Grundplatte (siehe Abbildung 3.11), die aus Aluminium besteht. Auf ihr sind verschieden lange Aluminium-Profile mittels Haltewürfel angeschraubt. Diese

⁷FESTO, OSML-M5-3.

⁸FESTO, PUN-3x0,5-BL.

⁹Swagelok, SS-43YFS2.

¹⁰MKS Instruments, Typ 1179.

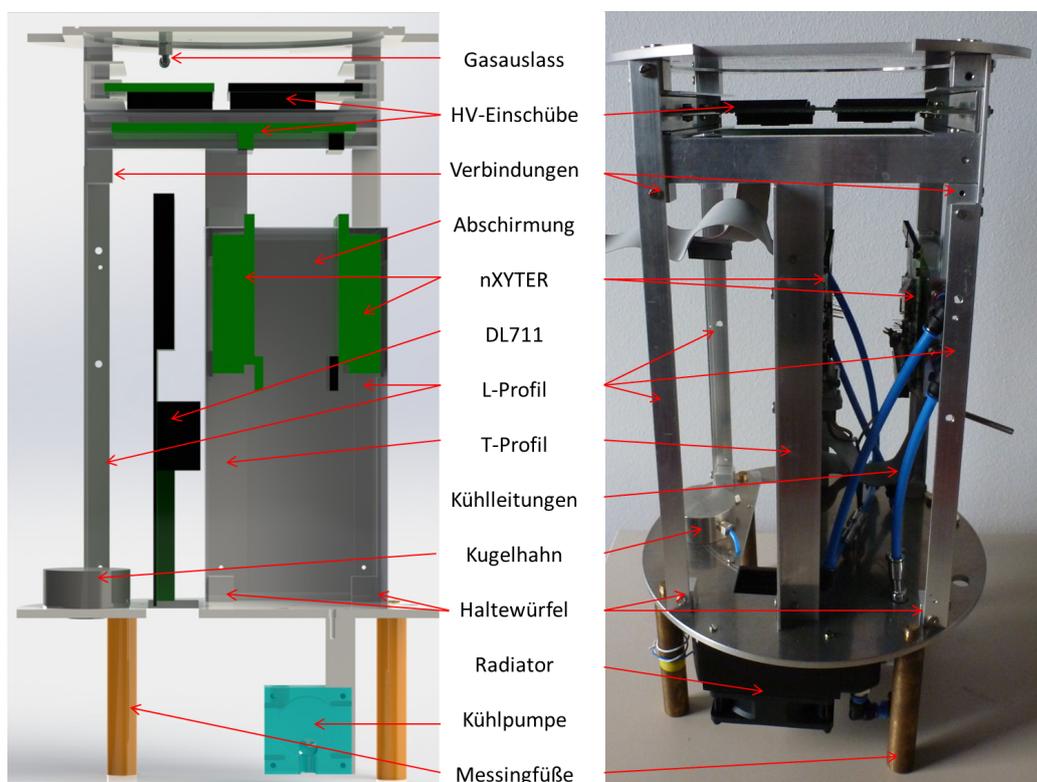


Abbildung 3.10: Detektor ohne Stack, links: Querschnitt durch CAD Model, rechts: Aufbau ohne Abschirmung und DL711.

Profile tragen den restlichen Aufbau und die Elektronik. Der so entstehende Raum ist wiederum in drei vertikale Bereiche unterteilt.

Für die Auslese-Boards (Kapitel 4.4) ist ein abgeschirmtes Segment etwa im Zentrum vorgesehen. Die Boards selbst sind mit ihrem Kühlkörper auf Querstreben geschraubt, die wiederum an den vertikalen Profilen befestigt sind. Zur Zeit sind zwei, alle vorhandenen, Auslese-Boards verbaut. Es wäre durchaus möglich, unter diesen zwei weitere anzubringen und würde man einen Kühlkörper für zwei Boards verwenden, was aus kühltechnischer Sicht kein Problem ist, könnten acht nXYTER¹¹ im derzeitig bemessenen Gehäuse untergebracht werden.

Auf der einen Seite der Abschirmbox wird das FPGA-Board DL711 (siehe Kapitel 4.6) direkt an den Profilen angebracht. Dahinter liegen der Kugel-

¹¹Neutron-X-Y-Tim-Energy-Readout.

hahn und die Gasleitungen. Setzt man den Hahn unter die Grundplatte, könnte man auch noch ein zweites FPGA-Bord neben das erste setzen und könnte acht nXYTER ansteuern und auslesen.

Auf der anderen Seite der Abschirmbox werden die HV-Kabel gezogen. Die

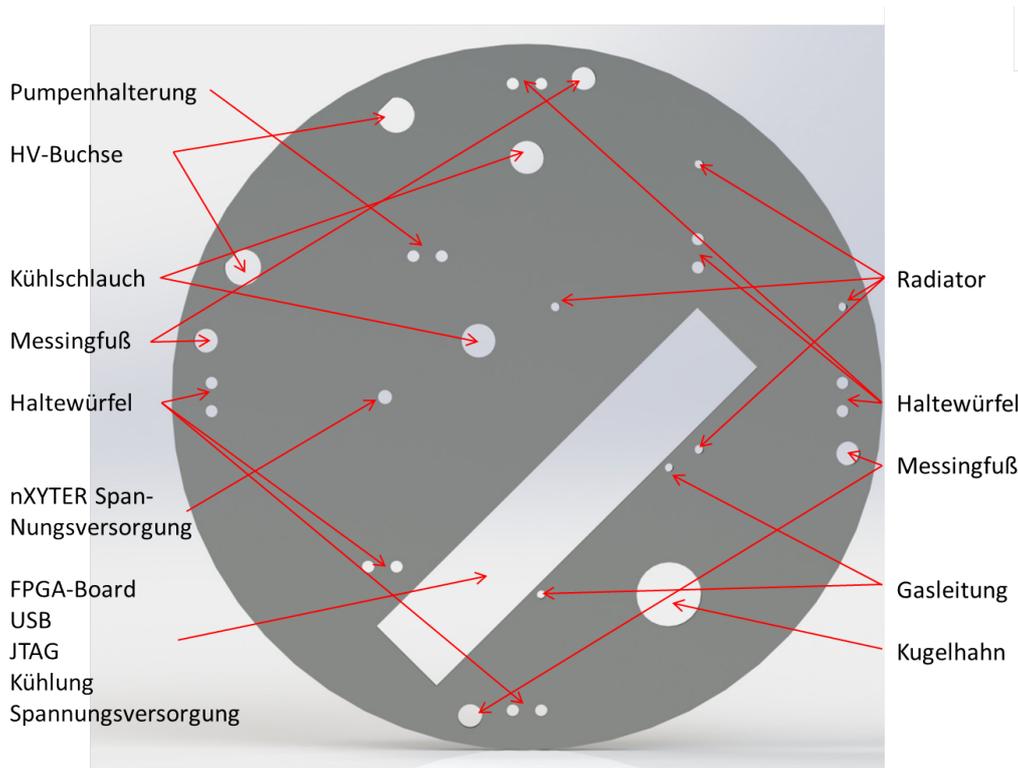


Abbildung 3.11: Aluminium-Grundplatte mit sämtlichen Versorgungsdurchführungen und Montagepunkten.

kreisförmige Grundplatte mit dem Durchmesser 250 mm, wie in Abbildung 3.11 zu sehen ist, verfügt über alle benötigten Durchführungen und Einbauräume. Diese sind: die HV-Buchsen-Einbauräume [HUB13]; die Durchführungen für die Kühlwasserschläuche (12 mm), die nXYTER Versorgung (5 mm), den Kugelhahn (23 mm) und die Gasschläuche (3 mm); die Durchgangslöcher für den Radiator (M3), die Pumpenhalterung und die Profilhalterungen (beide M4); Gewindebohrungen für die Messingfüße (M10) und die rechteckige Durchführung für die Anschlüsse und Tasten des DL711 (160 mm x 30 mm). Unter der Grundplatte befindet sich noch die Kühltechnik und der Griff des Kugelhahns.

3.5 Kabelführung

Die Spannungsversorgung des Stacks erfolgt über die HV-Buchsen, von dort aus sind einadrige Hochspannungskabel zwischen beiden Abschirmungen bis zu den HV-Boards (Kapitel 4.2) gezogen. Von den Boards aus werden Drifts und GEM versorgt und gleichzeitig die Ladungssignale von der Auslesestruktur geleitet. Zu den Drifts führen wieder Hochspannungskabel. Die Verbindung zu der GEM erfolgt über vier 68-adrige 100 mm lange Flachbandkabel¹², zwei für die Unterseite und zwei für die Oberseite, die durch die Ausklinkungen an dem Stack-Boden geführt werden. Je zwei von diesen Kabeln leiten dann die auf dem HV-Board ausgekoppelten Signale zu einem nXYTER-Board (Kapitel 4.4). Da die HV-Platinen um 90° gegeneinander gedreht sind und darauf geachtet wurde, die Analogsignalwege möglichst kurz zu halten, sind diese geschlitzt, sodass die Kabel von dem oberen Board durch das untere gezogen werden können. Vom FEB-E gehen die digitalen Signale und die Steuerung über ein 600 mm langes 68-adriges Flachbandkabel¹³ zwischen Kühlkörper und Abschirmung hindurch zu dem Adapter-Board auf dem DL711.

Die Spannungsversorgung der Boards und der Kühlung erfolgt über Drehschaltadapter¹⁴, die mit unterschiedlichen Steckertypen, um Verwechslungen zu vermeiden, an die Bauteile angeschlossen werden.

3.6 Kühlung der Elektronik

Da die nXYTER temperaturempfindlich sind, das heißt, sie ändern ihre Eigenschaften mit steigender Betriebstemperatur, müssen sie gekühlt werden. Das FEB-E-Board verfügt bereits über einen Kühlkörper mit 6 mm Steckanschlüssen für Zu- und Rückfluss. Mittels eines 6 mm Schlauchs und diverser Verbindungselemente¹⁵ werden die Kühlkörper mit der Pumpe¹⁶ und dem Radiator¹⁷ so verbunden, dass auch hier noch weitere Boards zugeschaltet werden können. Die Pumpe wird auf einer eigenen Halterung auf die Unterseite der Grundplatte geschraubt. Der Radiator ist mit einem Lüfter¹⁸ verbunden und wird so unter der Platte positioniert, dass die Abluft durch die

¹²ERNI Production GmbH & Co. KG, ERNI 193888.

¹³VIDEK, 2269 - SCSI RIBBON 0.6M.

¹⁴Minwa Electronics Co., MW 3R15GS/FUSB1.

¹⁵FESTO, Schlauch: PUN-6x1 Verbinder: QSML-6, QST-F-6, QS-G1/4-6.

¹⁶Alphacool, DC-LT Ceramic - 12V DC Pro.

¹⁷Alphacool, NexXoS XT45 Full Copper 80mm.

¹⁸Sharkoon, Silent Eagle 1000.

rechteckige Aussparung auch noch den FPGA-Kühlkörper erreicht. Befüllt wird der Kühlkreislauf mit Wasser.

3.7 Elektromagnetische Abschirmung

Es ist notwendig, den Auslese-Chip gegen elektromagnetische Störfelder abzuschirmen. Auf dem FEB-E-Board ist der nXYTER als solches schon einseitig von einer dünnen Aluminiumbox umgeben. Im Aufbau ist ein Anbringen einer größeren Abschirmung um alle nXYTER-Platinen herum vorgesehen. Dazu werden an die Aluminiumprofile 1 mm Aluminiumplatten angebracht. Unten schließt sich die Grundplatte, in der die Durchführungen extra eng bemessen sind, an. Für die Kühlwasserdurchführungen wurden an dieser Stelle aus Abschirmungsgründen verchromte Messing-T-Verbinder gewählt. Oben wird ein Deckel mittels Aluminium-Vierkantprofilen an die vertikalen Profile geschraubt. Es sind Aussparungen für die Kabel beziehungsweise die Stecker im Deckel integriert.

Der gesamte Detektor wird abschließend noch mit einem 250 mm durchmessenden 80 μ m starken Aluminium-Flexschlauch verkleidet. Auch diese letzte Schicht bietet noch einmal eine abschirmende Wirkung, vor allem für die noch nicht geschützten Bereiche des Detektors.

Kapitel 4

Neuentwicklung, Anpassung und Integration der Elektronik

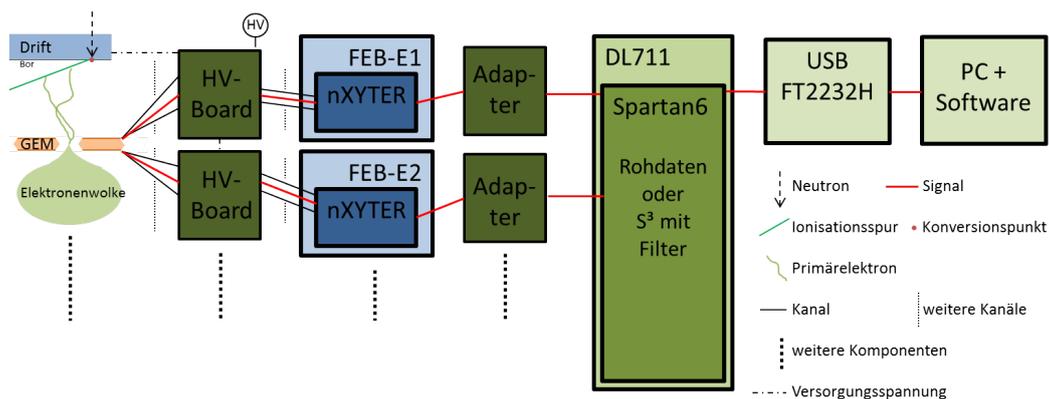


Abbildung 4.1: Signalfluss durch den Detektor. Ein Neutron löst über sein Konversionsprodukt einen Elektronenschauer aus, der auf der GEM ein Ladungssignal produziert. Auf dem HV-Board, welches die GEM mit Hochspannung versorgt, wird das Signal ausgekoppelt. Der nXYTER verstärkt es und gibt ein digitales Signal aus. Über das Adapter-Board gelangt es zum FPGA, dem Spartan6, der auf dem DL711 gebondet ist. Dort wird es gespeichert und an den USB-Chip gesendet, von wo es vom PC ausgelesen werden kann.

In diesem Kapitel wird dem Signalfluss folgend jedes elektronische Bauteil des Detektors vorgestellt und erläutert. Die ersten Abschnitte befassen sich vorrangig mit Hardwarekomponenten, die entweder neu in der Anwendung im CASCADE-Detektor sind, wie Auslese-GEM und nXYTER, oder für diese entwickelt werden mussten. Das Ende des Kapitels beschreibt die neue Firmware und Weiterentwicklungen für die etablierte.

4.1 Auslese-GEM

In dieser Arbeit wird zusätzlich zu der für MIEZE-Anwendungen vorgesehenen GEM-Identifikation auch die 2D-Ortsinformation aus dem GEM-Signal gewonnen. Die Vorteile dieser Optimierung sind folgende: Es ist keine aufwen-

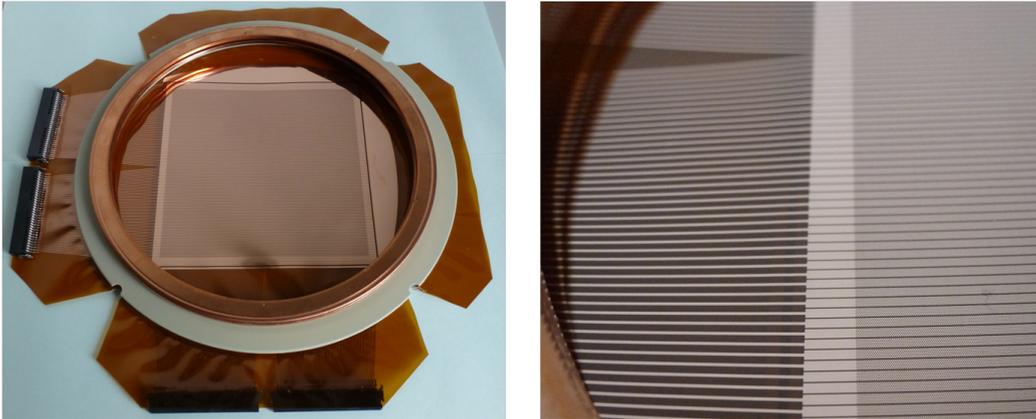


Abbildung 4.2: rechts: bestückte, segmentierte, auf PP-Rahmen geklebte und mit Kupferdichtungen leicht gespannte GEM, links: Nahaufnahme der Segmentierung, der Unterschied zwischen aktiver und inaktiver Fläche ist gut zu erkennen.

dige gasdurchlässige und von beiden Seiten auslesbare Struktur mehr nötig, bei der man die maximale Auflösung bei akzeptablen Kosten auch schon erreicht hat. Die Identifikation der Borschicht wird wesentlich einfacher, da es nicht mehr nötig ist, die Ladungssignale durch mehrere GEMs zu führen. Die Hochratentauglichkeit kann weiter gesteigert werden, denn bisher war die Totzeit der GEM selbst die Limitation. Diese gilt natürlich immer noch, aber ein Neutron auf der ersten GEM produziert nun kein Signal mehr auf der zweiten.

Für die Ortsauflösung wird die GEM segmentiert, das heißt die Kupferschicht wird in 0,7 mm Streifen, mit einem Pitch von 0,85 mm, unterteilt, dabei sind die Streifen auf Ober- und Unterseite orthogonal zueinander. Die Kupferstreifen werden bis nach außen, bis hinter den Rahmen, geführt und enden in Pads, auf die ERNI-Stecker¹ gelötet werden.

Die in Abbildung 4.2 gezeigte GEM wurde am CERN hergestellt.

¹ERNI, ERNI 154766.

4.1.1 Lasersegmentierung

Alternativ zu den bestellten GEMs wurde auch versucht, mit den am Physikalischen Institut Heidelberg zur Verfügung stehenden Mitteln eine GEM selbst zu segmentieren. Mit Hilfe eines Lasers² werden Testmuster in eine GEM gebrannt. Die Laserparameter Fokussierungspunkt, Leistung und Schreibegeschwindigkeit werden variiert. Das Ergebnis ist in Abbildung 4.3 zu sehen.

Es zeigt sich, dass die Parameter aus Tabelle 4.1 nicht so zu optimieren

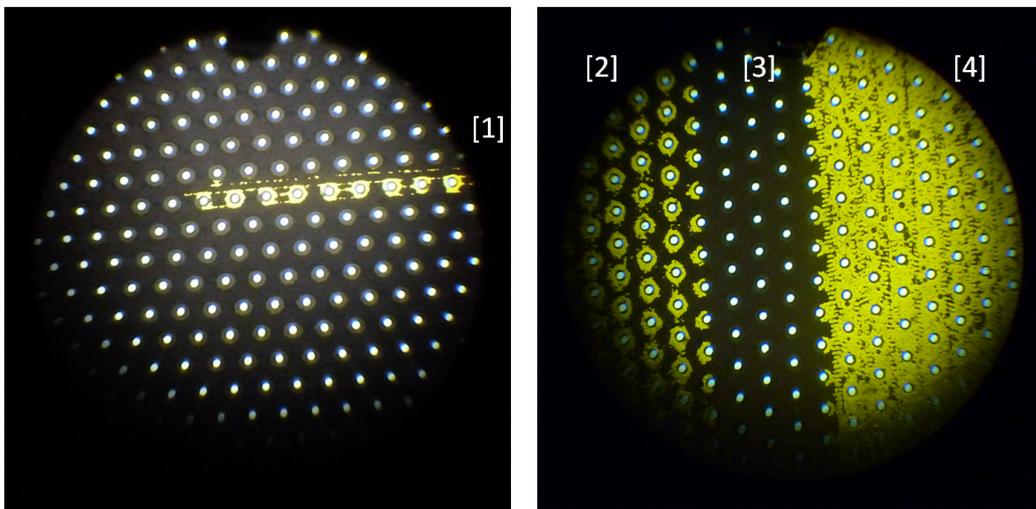


Abbildung 4.3: Mikroskopaufnahmen einer mit einem Laser bearbeiteten GEM (140 μm Pitch), rechts: Segmentierungslinie, links: Flächenbearbeitung. Die Laserparameter sind in Tabelle 4.1 zu sehen.

	Bearbeitung	Leistung	Geschwindigkeit	Fokussierung	Bemerkung
[1]	Linie	80%	40%	2,3 mm	ohne Abluft
[2]	Fläche	100%	50%	2,2 mm	ohne Abluft
[4]	Fläche	100%	50%	2,2 mm	mit Abluft

Tabelle 4.1: Beschreibung der Bearbeitungen aus Abbildung 4.3, Fokussierung meint die vertikale Koordinate des Fokussierungspunktes bezüglich des Auflagetisches, [3] ist komplett unbearbeitet.

sind, dass einerseits die Oberseite kontaktfrei segmentiert ist und andererseits die Unterseite weitestgehend intakt bleibt. Gut zu erkennen ist, dass

²UNIVERSAL LASER SYSTEMS, PLS 6MW.

die Struktur streifenförmig ist, man sieht hier die Lauflinien des Lasers und dass das Ablösen des Kupfers an den Lochrändern wesentlich stärker ist als in den Flächen. Mit Abluft wird zwar mehr Kupfer abgetragen, allerdings drückt der Luftzug die GEM auch nach unten. Dies macht einen scharfen Trennstreifen nahezu unmöglich, da die Fokussierung mit einer Genauigkeit von weniger als 0,1 mm eingestellt werden muss. Vielleicht ist bei GEMs mit größerem Pitch, so wird der Lochabstand genannt, und einer exakten Positionierung eine Lasersegmentierung doch möglich, indem man die Linien genau durch die Flächen führt, also keine GEM-Löcher trifft.

4.1.2 Konditionierung der GEM

Damit die GEM ihre Betriebsspannung von über 300 V auch hält, muss sie konditioniert werden. Das heißt, dass man sie langsam an Hochspannung „gewöhnt“, indem man Unebenheiten und kleine Spitzen, wie sie im Produktionsprozess entstehen können, abbrennt. Dazu wird die GEM langsam auf deutlich niedrigere Spannungen (150 V) gebracht und auf dieser längere Zeit (einige Stunden) gehalten. Dies wird wiederholt und dabei die Spannung erhöht.

Bei der durchgeführten Konditionierung wurde die GEM mehrere Tage mit Stickstoff gespült, um sie zu trocknen. Für die Hochspannungsversorgung wird die EHS F 240n Spannungsversorgung der Firma iseg mit der zugehörigen Software³ verwendet. Beim Durchfahren der Spannungsrampen kam es bei 450 V zu einem Spannungsabfall. Es stellte sich heraus, dass eine Durchkontaktierung entstanden ist. Dies geschieht durch Verunreinigungen der GEM oder des Gases. Der Kontakt ließ sich nicht mit hohen Strömen (25 mA) ausbrennen, wie es manchmal möglich ist. Da die GEM segmentiert ist, wurde der Kanal, welcher einen Kurzschluss aufwies, abgetrennt.

Nach dem zweiten Konditionierungsvorgang ist die GEM bis 400 V spannungsfest.

4.2 HV-Board

Das für diese Arbeit entwickelte HV-Board ist in Abbildung 4.4 zu sehen. Es hat die Abmessung 148 x 140 mm² und sein Aufbau ist folgender:

35 µm Kupfer Oberfläche chemisch Gold
1150 µm Kern aus FR4⁴

³iseg Spezialelektronik GmbH, High Voltage CAN Control 1.8.1 .

⁴ISOLA, Duraver-E-Cu 104i.

35 μm Kupfer Oberfläche chemisch Gold

Es ist aus zwei Teilen aufgebaut. Der dicht besetzte Bereich dient der Versorgung der einzelnen GEM-Streifen mit Hochspannung, dem Auskoppeln der Ladungssignale und dem Überspannungsschutz des nXYTERs. Zudem befindet sich ein Spannungsteiler auf der Platine, über den die Driftelektroden versorgt werden können. Abbildung 4.5 zeigt die auf dem Board verwirklichte



Abbildung 4.4: Vorder- und Rückseite des bestückten und an die Gleitschienen geschraubten HV-Boards. Es ermöglicht die Spannungsversorgung, die Signalauskopplung und den Überspannungsschutz für jeden einzelnen der 128 GEM-Streifen einer GEM-Seite. Ein Spannungsteiler für die Drift-Folien kann angelötet werden. Die GEM wird an die Vorderseite und der nXYTER an die Rückseite angeschlossen.

Verschaltung von zwei einzelnen Kanälen. Die Hochspannung wird über einen $4\text{ M}\Omega$ Widerstand mittels Stecker⁵ und in Kapitel 3.5 beschriebenen Kabel auf den ersten Streifen gegeben. Dieser ist über einen $100\text{ k}\Omega$ Widerstand⁶ mit dem nächsten verbunden. Die Ladungssignale werden über einen 100 pF Kondensator⁷ von der Hochspannungsregion ausgekoppelt. Um den nXYTER vor zu großen Spannungen zu schützen, wie sie zum Beispiel bei Kurzschlüssen entstehen können, ist jeder Kanal über eine TVS-Diode⁸ [NXP09], die ab 6 V durchbricht, gesichert. Über ein $100\ \Omega$ Widerstand⁹ gelangt das Signal zu dem Stecker¹⁰ und von dort direkt zum nXYTER-Eingang. Bei der

⁵ERNI, ERNI 154766.

⁶YAGEO, RV1206JR-07100KL.

⁷MULTICOMP, MCCA000739.

⁸NXP, MMBZ6V8AL.

⁹PANASONIC, ERJPA3F1000V.

¹⁰ERNI, ERNI 244839.

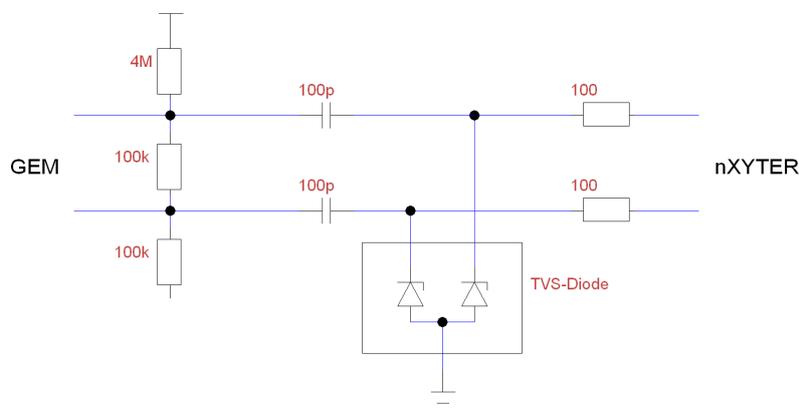


Abbildung 4.5: Schaltung für zwei Kanäle von GEM bis nXYTER. Die Kanäle liegen alle auf dem gleichen Potential und sind durch $100\text{ k}\Omega$ getrennt. Mit dem Kondensator werden die Signale aus dem HV-Bereich ausgekoppelt. Die TVS-Diode bricht bei plötzlichen Spannungsspitzen, wie sie bei einer GEM-Durchkontaktierung entstehen könnten, durch, um den nXYTER vor diesen zu schützen. Der $100\text{ }\Omega$ -Widerstand verzögert im Überspannungsfall diese Spannungsspitze so lange, bis die Diode durchbricht.

Entwicklung des Boards wurde auf besonders kurze Signalwege geachtet. Zudem sind alle Bauteile auf der Hochspannungsseite hochspannungsfest. Die Erdleitungen sind absichtlich dicker gehalten und die TVS-Diode hat eine maximale Leistungsaufnahme von 24 W zur Verwirklichung eines effektiven Überspannungsschutzes.

Der Spannungsteiler ist wie folgt aufgebaut:

HV– $4\text{ M}\Omega$ –Drift– $4\text{ M}\Omega$ –GEM-O– $4\text{ M}\Omega$ –GEM-U– $4\text{ M}\Omega$ –Drift– $2\text{ M}\Omega$ –Erde

wobei HV die Hochspannung (etwa 1400 V), GEM-O die Oberseite und GEM-U die Unterseite der GEM ist.

4.3 nXYTER

Bisher wird für den CASCADE-Detektor der CiPix als Auslesechip verwendet. Dieser wurde für eine Hochenergiephysikanwendung entworfen und deren Anforderungen, wie der Kollisionsrate und -frequenz, angepasst. Zum einen sind in der Neutronenphysik andere Eigenschaften gefragt und zum anderen kann dieser Chip nicht mehr produziert werden. In dieser Arbeit wird deswegen der nXYTER eingesetzt.

Der nXYTER wurde im Rahmen der DETNI¹¹-Kollaboration speziell für die Nutzung in Neutronendetektoren entwickelt. Er ist für Detektion thermischer Neutronen aus Spaltreaktoren optimiert. Diese Neutronen folgen, was ihre Ankunft am Detektor betrifft, aufgrund der statistischen Natur der Kernprozesse, bei denen sie entstehen, einer Poissonverteilung.

$$P_{\lambda}(k) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda} \quad (4.1)$$

Wobei k die Anzahl der im Detektor gleichzeitig¹² eintreffenden Neutronen ist und λ die Ereignishäufigkeit, das heißt, bei einem homogenen Fluss von 10^5 Neutronen pro Sekunde und cm^2 , einer Detektorfläche von 100 cm^2 und dem Zeitintervall von 100 ns , wäre λ gleich 1.

Der nXYTER ist ein selbsttriggernder ladungsempfindlicher Verstärker-Chip mit digitalem und analogem Ausgang. In dieser Diplomarbeit kommt der nXYTER 2.0 zum Einsatz.

4.3.1 Signalfluss durch einen Kanal

In Abbildung 4.6 ist einer von 128 Kanälen des nXYTER dargestellt, an dem seine Funktionsweise kurz erläutert werden soll. Ein Ladungspuls wird im Vorverstärker (Preamp) verstärkt und geht dann sowohl in den Fast als auch in den Slow Shaper. Der Fast Shaper löst, sobald der Puls über Threshold ist, den Trigger aus und generiert nach der Time Walk Compensation (TWC) aus der internen Clock einen 14 Bit tiefen Timestamp, der in einem digitalem FIFO abgelegt wird. Gleichzeitig wird nach dem Slow Shaper im Peak Detektor und Hold Circuit (PDH) der Puls verarbeitet und an einen analogen FIFO übergeben. Die FIFOs sind je vier Wort tief, um die statistischen Schwankungen der Events abzufangen. Anschließend wird dem Token Manager angezeigt, dass gültige Daten in diesem Kanal vorliegen. Dieser geht nacheinander alle Kanäle ab und schickt, wenn Daten vorhanden sind, jeweils ein Ereignis an den Ausgabemultiplexer (RO MUX).

Mit diversen Steuerregistern lassen sich Entladezeiten, Vorspannungen, Diskriminatorschwellen oder Clockteilungsverhältnisse einstellen. Zudem kann jeder Kanal maskiert und mittels Testpuls oder Testtriggers getestet werden.

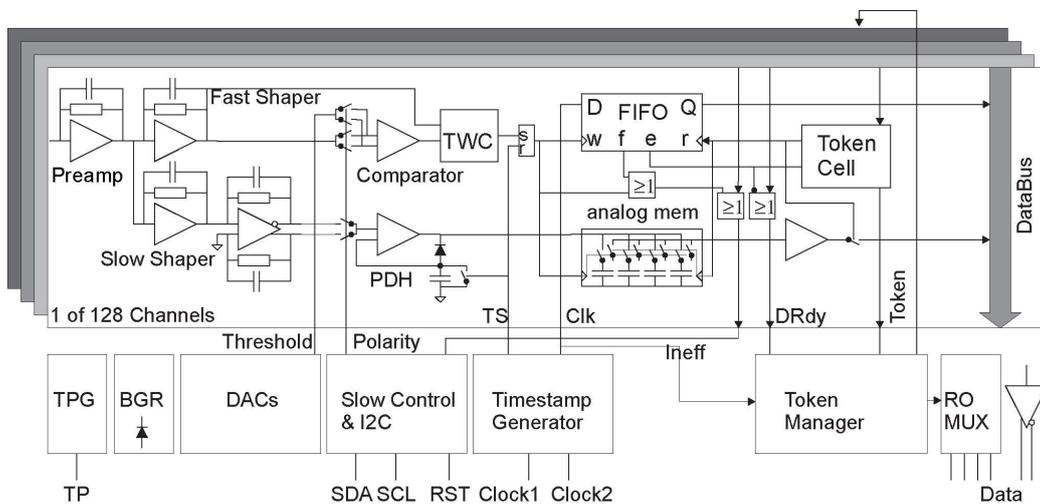


Abbildung 4.6: Schematischer Aufbau eines nXYTER-Kanals [BSS⁺09]. Signale werden in Preamp vorverstärkt und dann in Fast und Slow Shaper geglättet. Vom Fast Shaper aus wird über den Comparator der digitale Zeitstempel des Signals in ein FIFO geschrieben. Der Slow Shaper speist über den PDH gleichzeitig einen analogen FIFO mit der Pulshöhe. Die Fifos werden vom Token Manager ausgelesen und über RO MUX zusammen mit der Kanalnummer an die Ausgänge gelegt

4.3.2 Datenausgabe

Die Daten werden über neun LVDS¹³-Ausgänge und eine Clock, wie in Abbildung 4.7 zu sehen ist, ausgegeben. Dabei ist ein Ausgang der analoge. Er hat nur am Ende eines Readout-Clock-Taktes einen gültigen Wert. Die restlichen 8 Kanäle geben die digitalen Daten, wie in Tabelle 4.2 dargestellt, aus. Dabei handelt es sich um den 14 Bit tiefen Timestamp (TS), die Kanalnummer (ID), ein Data-Valid-Bit (DV), welches gültige Signale anzeigt. Hinzu kommen PileUp, das auf '1' geht, wenn zwei Ereignisse innerhalb der eingestellten Totzeit (Register iDUR) des analogen Kanals stattgefunden haben, und OverF, welches '1' ist, wenn der 4-Wort-FIFO übergelaufen ist. Als letztes gibt das Parity-Bit die Parität an. Die Ausgabe-Clock wird aus der Internen generiert. Die Interne wiederum wird von außen in den Chip gegeben. Die Transmission Clock hat die halbe Frequenz und die Readout Clock dann ein Achtel der Frequenz der Internen.

¹¹Detectors for Neutron Instrumentation, <http://jra1.neutron-eu.net/jra1/> .

¹²im Sinne der Zeitaufösung, also zum Beispiel pro 100 ns beim CIPix.

¹³low voltage differential signaling.

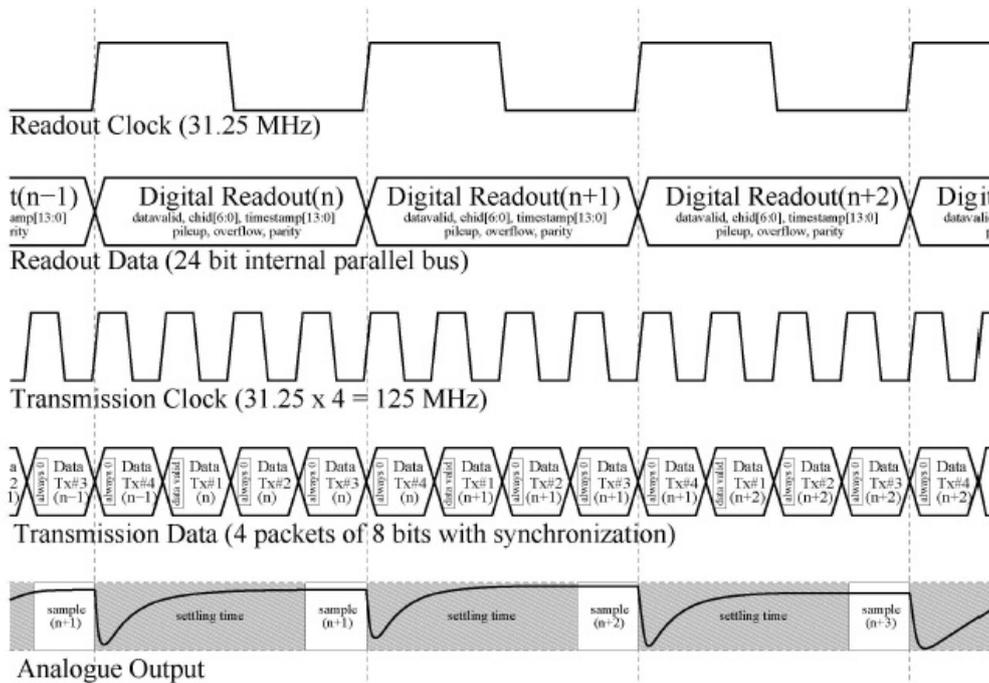


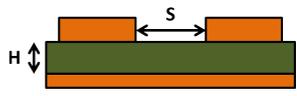
Abbildung 4.7: Ausgabeformat des nXYTER mit interner Readout Clock [BSS⁺09]. Während jedes Taktzyklusses der Readout Clock werden 4 Byte digitaler Daten synchron zu der Transmission Clock übertragen. In dieser Zeit wird am analogen Ausgang die Spannung hochgefahren und hat im dritten Transmission Clock-Takt einen gültigen Wert. Analoges und digitales Signal haben eine Latenz von 5 Transmission Clock-Zyklen.

4.4 FEB-E Board

Der nXYTER ist auf dem FEB-E-Board gebondet, das am GSI¹⁴ entwickelt wurde, und sowohl seine Spannungsversorgung als auch die Ansteuerung übernimmt. Das Board ist in Abbildung 4.8 zu sehen. Unter der Aluminiumabdeckung befindet sich der nXYTER. Er wird über das I²C-Protokoll¹⁵ vom ATtiny [Atm11] gesteuert, der auch die Ansteuerung des Analog-to-Digital-Converters (ADC) und des Digital-to-Analog-Converters (DAC) übernimmt. Die Versorgungsspannung beträgt 3,7V bis 5V. Der zu sehende Kühlkörper wird an das in Kapitel 3.6 beschriebene Kühlsystem angeschlossen.

¹⁴GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH Darmstadt.

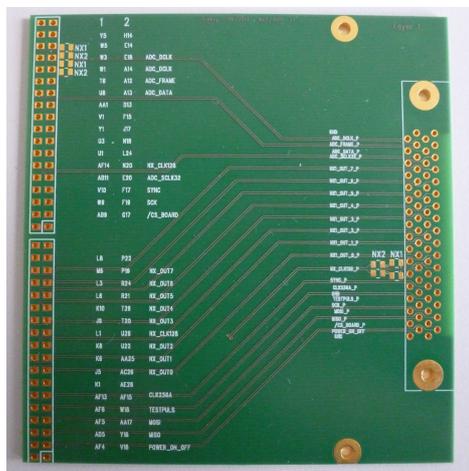
¹⁵Inter-Integrated Circuit.



$$Z_{diff} = Z_0 \cdot \left(1 - 0,48 \cdot \exp \left(-0,96 \cdot \frac{S}{H} \right) \right)$$

In den Formeln verwendete Abmessungen sind alle in der Einheit mil, ein tausendstel Zoll, also 25,4 μm angegeben, die bei Platinen typischerweise verwendet wird. Das verwendete Platinenmaterial hat eine Dielektrizitätskonstante von $\epsilon_r = 4,6$. Mit diesem Wert, realisierbaren Leiterabmessungen und dem Aufbau aus Abbildung 4.9 erhält man bei 6 mil breiten und 9 mil Leiterabstand eine Impedanz von 99,5 Ω .

Das Adapterboard hat die Außenmaße: 88 x 93 mm². In Abbildung 4.9 sind



- Aufbau des Adapters:
- 35um Kupfer chemisch Gold
 - 120um Prepeg FR4
 - 35um Kupfer
 - 1550um Kern FR4
 - 35um Kupfer
 - 120um Prepeg FR4
 - 35um Kupfer chemisch Gold

Abbildung 4.9: Adapter-Board vom FEB-E-Board auf DL711 und dessen Schichtung.

zusätzliche Pads (Lötfußpunkte) zu erkennen. Diese sind notwendig, damit ein und das selbe Board für beide nXYTER verwendet werden kann. Die Steckplätze auf dem DL711 (siehe Kapitel 4.6) sind nicht identisch. Ist ein Pin auf dem ersten Steckplatz ein GCLK¹⁸-Pin, so muss er das nicht auf dem zweiten sein. Dies wurde durch die zusätzlichen Pads kompensiert, sodass alle einlaufenden Clocks auf einen GCLK-Pin gehen.

4.6 FPGA-Board DL711

Die Datenverarbeitung und Steuerung der Ausleschips übernimmt ein FPGA. Hier wird ein Spartan6¹⁹ [XIL11] verwendet, der auf dem DL711, einer Lo-

¹⁸global Clock, also ein Pin, der direkt mit dem Glocktree im FPGA verbunden ist.

¹⁹Xilinx, Spartan 6 XC6SLXT150 FG676.

gicbox, die in der Elektronikwerkstatt des Physikalischen Instituts Heidelberg entwickelt wurde [Got13]. Sie ist in Abbildung 4.10 zu sehen. Unter dem

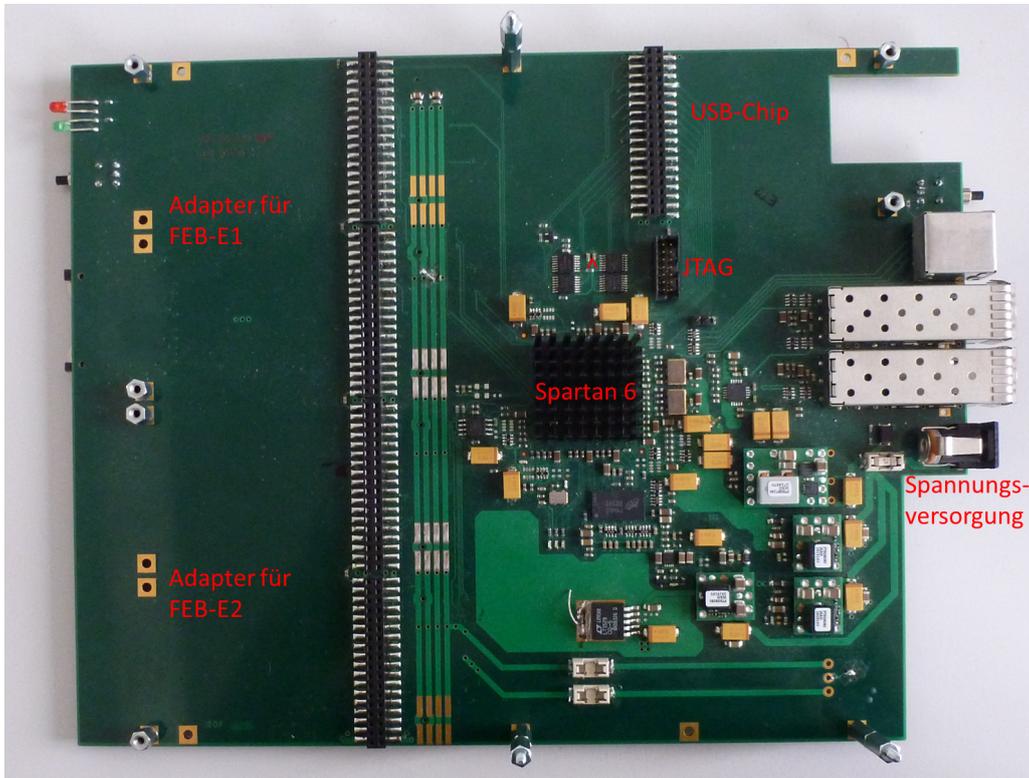


Abbildung 4.10: Das FPGA-Board DL711 wurde von der Elektronikwerkstatt des Physikalischen Instituts Heidelberg entwickelt. Auf ihm ist ein Spartan6 gebondet. Es bietet Platz für vier Adapter-Boards und eine USB-Platine. Die Versorgungsspannung beträgt 5 V.

Kühlkörper befindet sich der Spartan6. Auf die Konnektoren links werden die Adapter hin zum FEB-E-Board gesteckt, auf den sich oben links befindenden kommt die Platine mit dem USB-Chip, siehe Kapitel 4.7.1. Programmiert wird der FPGA über die JTAG-Schnittstelle. Die optischen Ausgänge und das RAM werden vorerst nicht benutzt. Die Versorgungsspannung beträgt 5 V.

Der Spartan6 wird mit der HDL VHDL²⁰ über den Project Navigator²¹ programmiert. Die wesentlichen dabei entstandenen Entitäten (Entity) werden nun vorgestellt.

²⁰Hardware Description Language Very High Speed Integrated Circuit.

²¹Xilinx Inc, ISE Project Navigator 14.5.

4.6.1 Rohdatenauslese

Für erste Tests und zum Charakterisieren des Detektors und der nXYTER wurde eine kompakte Firmware zum Auslesen der Rohdaten in VHDL geschrieben. Der schematische Aufbau dieser Entity ist in Abbildung 4.11 zu sehen. Sie unterteilt sich in sechs Teile. Die Kommunikation mit dem USB-Chip übernimmt die *FT232H*-Entity, die in Kapitel 4.7.2 genauer beschrieben wird. Das Steuern und Testen der FEB-E-Boards übernehmen die *AVR*- und *TP*-Entities, die in den Arbeiten [Käs13] und [Mod14] entwickelt wurden und hier weitestgehend übernommen werden. Die Entity *Daten* liest

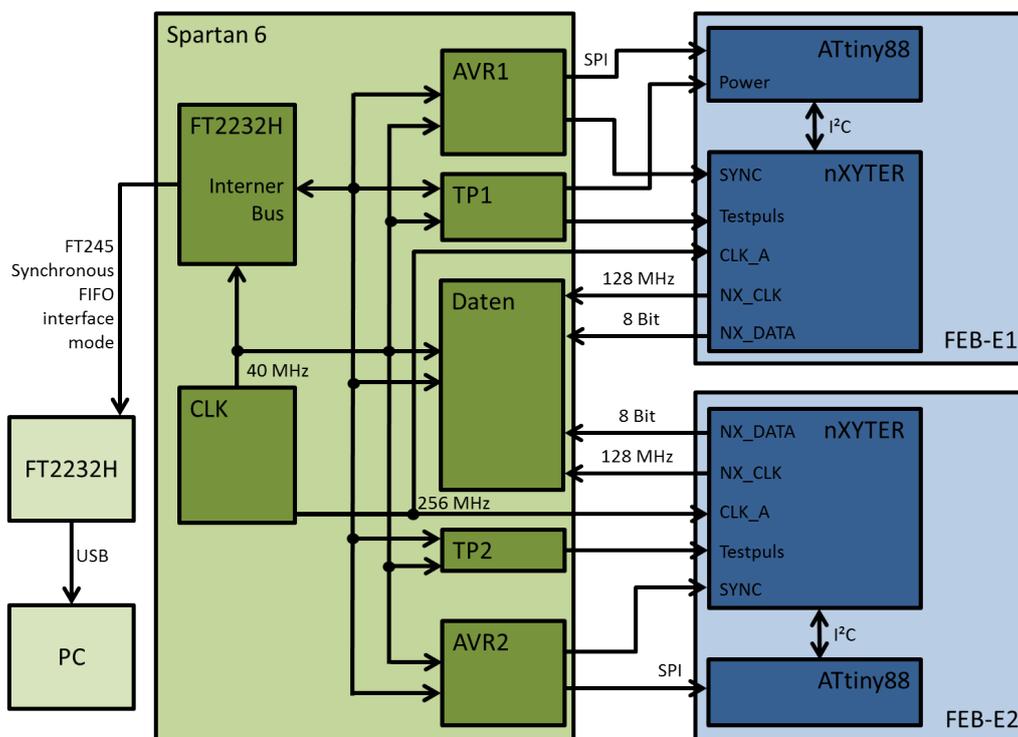


Abbildung 4.11: Schema der Rohdatenauslese. Vom Spartan6 aus werden die nXYTER über die ATtiny88 gesteuert. Die digitalen nXYTER-Daten werden im FPGA gespeichert und dem FT2232H übergeben, der wiederum gibt sie an den PC weiter. Der Spartan6 wird über USB und FT2232H vom PC gesteuert.

die nXYTER aus und speichert die empfangenen Daten unbearbeitet. Für Tests und Statusabfragen ist die *Status*-Entity aus der bisherigen Firmware angepasst übernommen worden, ebenso wie der *ResetBuilder* (beide nicht im Schema aufgeführt). Den neuen Anforderungen angepasst übernimmt der ClockMaster (*CLK*-Entity) das Managen der verwendeten Clocks.

Die Kommunikation mit dem ATtiny auf dem FEB-E ist über das SPI-Protokoll²² realisiert. Dafür sind vier Leitungen, in diesem Fall LVDS-Leitungen, nötig. Sie sind in Tabelle 4.3 zu sehen.

Bei diesem Protokoll haben die Kommunikationssequenzen eine beliebige

SCLK	Serial Clock	von Master ausgegeben
MOSI	Master out, Slave in	Daten von Master an Slave
MISO	Master in, Slave out	Daten von Slave an Master
$\overline{CS} / \overline{SS}$	Chip/Slave Select	low aktiv

Tabelle 4.3: Signalleitungen für SPI-Protokoll.

Länge; hier wird sich an das in [Kle13] beschriebene Muster gehalten. Der Befehl geht immer vom FPGA aus, er setzt \overline{CS} auf low und gibt dann SCLK für genau 8 Clock-Zyklen aus. Danach gibt es eine Verzögerung von 32 Taktzyklen, bevor das nächste Byte geschrieben oder gelesen wird, je nachdem, wie der Befehl im ersten Byte es vorsieht. Anschließend folgt nach weiteren 16 Taktzyklen Verzögerung das nächste Byte. Wie viele es insgesamt werden, hängt wieder vom Befehl ab. Ist die Kommunikation beendet, wird \overline{CS} vom FPGA wieder auf high gesetzt.

Die AVR-Entity setzt zudem noch das nXYTER-Reset (SYNC).

Getestet wird der nXYTER mittels der *Testpuls*-Entity. In ihr kann man Testpulssequenzen in von einstellbarer Periode und Länge erzeugen. Für diese Tests müssen allerdings vorher einige Register im nXYTER richtig gesetzt werden, dies wird in Kapitel 5.3 beschrieben. Zudem wird über diese Entity das Powersignal an das FEB-E-Board gegeben. Dabei gibt es einen produktionsbedingten Unterschied zwischen den beiden verwendeten Boards, bei FEB-E2 wurde Power mittels einer gelöteten Überbrückung dauerhaft auf high gesetzt.

Der nXYTER selbst gibt die Auslese-Clock von 128 MHz vor, mit dieser wird in der Entity *Daten* die Schreibeseite der Speicherfifos betrieben. Diese FIFOs sind 32 Bit und 2048 Word tief und werden mit zwei verschiedenen Clocks betrieben. Die Leseseite wird mit der FPGA-interner 40 MHz-Clock betrieben. Wenn keine gültigen Daten im nXYTER vorhanden sind, sendet er den in Tabelle 4.4 dargestellten Datenstrom. Es wird nun das 7.

²²Serial Peripheral Inteface.

Byte / Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
0	0	1	1	1	1	1	1	1
1	0	1	1	1	1	1	1	1
2	0	1	1	1	1	1	1	1
3	0	0	0	0	0	1	1	0

Tabelle 4.4: nXYTER-Signal, wenn keine gültigen Daten anliegen.

Bit im Datenstrom verwendet, um nur gültige Daten in den FIFOs zu speichern. Dazu wird dieses Valid-Bit vier Taktzyklen lang verzögert und dann als Schreibe-Enable der FIFOs benutzt. Gleichzeitig werden alle vier Bytes zu einem 32 Bit-Word zusammengesetzt. Um ein Überlaufen zu verhindern, gibt das full-Bit der FIFOs ein Veto für das Enable. Dies erwies sich als notwendig, da sonst das Auslesen misslingt. Die Daten werden dann vom internen Bus (siehe Kapitel 4.7.2) ausgelesen, dafür dient die Busanfrage selbst als Auslese-Enable.

Bei einer nXYTER-Clock-Frequenz von 128 MHz ist es nötig, alle Eingänge mit dieser Clock noch in den Input-Buffern zu registern, das heißt, man nimmt eine Latenz von einem Taktzyklus in Kauf, um die Signale auch im FPGA über eine komplette Periode stabil zu halten. Bei niedrigeren Frequenzen ist dies nicht nötig, was zeigt, dass man mit 128 MHz recht nahe an der Grenze einer korrekten Datenübertragung ist.

Die *CLK*-Entity stellt alle benötigten Clocks zur Verfügung. Sie bekommt ein 40 MHz Signal von einem Oszillator, der auf dem DL711 implementiert ist, und eine 60 MHz-Clock vom USB-Chip. Letztere wird in einer PLL stabilisiert und 110° phasenverschoben und dient ausschließlich der Kommunikation mit dem FT2232H. Mittels PLLs und DCM²³ werden aus dem Oszillatorsi-

Clock-Name	Frequenz	Bedeutung
Clk40	40 MHz	FPGA-interne Clock für den internen BUS
Clk256A	256 MHz	zweimal nXYTER-Clock A als Hauptclock
SCLK	78,125 kHz	Clock für SPI-Kommunikation
ADC_SCLK	32 MHz	Clock für den ADC auf FEB-E

Tabelle 4.5: In Rohdaten-Firmware generierte Clocks.

gnal die in Tabelle 4.5 genannten Clocks generiert.

²³Phase Locked Loop und Digital Clock Manager.

In der *Status*-Entity können die Firmwarenummer und einige Statusbits abgerufen werden, zudem sind in ihr Testregister für die USB- und die interne BUS-Kommunikation implementiert. Der *ResetBuilder* resettet alle nicht fest implementierten Register und Einstellungen des FPGAs, wenn der entsprechende BUS-Befehl gesendet wird. Da das Reset auch für die PLLs gilt und diese dann ihre Arbeit einstellen, gibt es also auch keine interne Clock, weswegen diese Entity direkt das Oszillatorsignal benutzt, um das Reset nach 2 Taktzyklen auch wieder aufzuheben.

4.6.2 Self Sorting Scheme S^3

Dieser und der folgende Abschnitt behandeln Firmwareweiterentwicklungen für den alten Detektoraufbau, also mit separater Auslesestruktur und GEM-Stack im herkömmlichen Sinn.

Die Datenpakete, die der nXYTER ausgibt, sind aufgrund seines Designs nicht mehr chronologisch geordnet. Denn die Kanäle werden mit 32 MHz über den Token Ring ausgelesen, aber mit einer Genauigkeit von 1 ns beschrieben. Das heißt, ist ein Kanal gültig, dann wird er ausgelesen und im ungünstigsten Fall erst wieder nach $129 \cdot 31,25 \text{ ns} = 4,03 \mu\text{s}$, wenn alle Kanäle gültige Daten haben. Allerdings kann dieser Kanal nach wenigen Nanosekunden wieder getroffen werden und dann werden spätere Ereignisse von dem Token Manager eher ausgelesen. Dies macht einen Sortieralgorithmus, den Self Sorting Scheme S^3 , notwendig, wie er zusammen mit [BBD⁺06] vorgeschlagen wurde.

Dabei wird ausgenutzt, dass jedes Ereignis einen Zeitstempel trägt, welchen man zum Sortieren nutzen kann. Hier wird nicht nur sortiert sondern die Ereignisse werden auch gleich zu eventuellen Neutronenereignissen zusammengefasst. Denn es ist möglich, dass ein Neutron mehrere Ereignisse aufgrund der Spurlänge seiner Konversionsprodukte im Gasvolumen oder dem Signaldurchgang durch mehrere GEMs produziert. Ein Strom aus Ereignissen wird durch eine Reihe von sogenannten Cross-Units geleitet. Diese sind mit den Neutron-Units verbunden, in welchen die Ereignisse einsortiert werden. Die Neutron-Units können entweder leer, voll oder teilweise voll sein. Die Cross-Units sind im Prinzip nur Komparatoren für die Zeitstempel der Pakete, welche jede Unit zweimal (Hin- und Rückweg) durchlaufen, siehe Abbildung 4.12.

Ein Paket besteht aus dem DataValid (gültiges/ungültiges Ereignis), dem Zeitstempel (Timestamp) und den für die Sortierung unwichtigen Informationen (Kanalnummer und Statusbits). Ihm wird gleich zu Beginn ein Similar

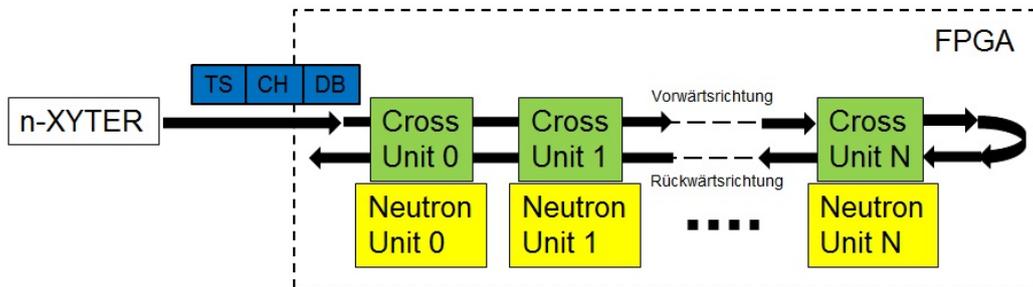


Abbildung 4.12: S^3 -Algorithmus: Decodierte Datenpakete (blau) aus Zeitstempel (TS), Kanalnummer (CH) und Diag Bits (DB) laufen durch die Cross-Units, werden dort mit den Neutron-Units verglichen und ihrem Zeitstempel entsprechend einsortiert.

Flag (SF) angehängt, was anzeigt, ob es zu einem anderen Paket passt, das heißt, ob es einen ähnlichen²⁴ Zeitstempel hat. In der Hin-Richtung wird nun in jeder Cross-Unit verglichen, ob das Paket in die Neutron-Unit passt. Dies ist der Fall, wenn sein Zeitstempel ähnlich dem der Neutron-Unit ist und diese teilweise voll ist. Zudem wird der Zeitstempel mit dem des rücklaufenden Pakets verglichen und ist dieser ähnlich, wird SF auf 1 gesetzt, wie auch bei Übereinstimmung mit der Neutron-Unit. In der Rück-Richtung werden die Pakete in die Neutron Units sortiert. Ist SF 1, dann sucht das Paket wieder in jeder Unit nach der Ähnlichen und wird in diese geschrieben. Ist SF 0, dann wird das Paket in die nächste leere Neutron-Unit geschrieben und diese übernimmt den Zeitstempel für die nächsten Vergleiche mit anderen Paketen.

So wird jedes Paket mit jedem verglichen, wenn genügend Neutron-Units vorhanden sind. Unter „genügend“ versteht man folgendes:

Die nXYTER-FIFOs sind vier Wort tief und werden mit 32 MHz ausgelesen, damit haben zwei gleichzeitige Ereignisse auf benachbarten Kanälen Auslesezeitpunkte, die maximal $4 \cdot 128 \cdot 31,25 \text{ ns} = 16 \mu\text{s}$ auseinanderliegen. Der Zeitstempel läuft nach $2^{14} \text{ ns} = 16,4 \mu\text{s}$ über. Damit sind diese Ereignisse nicht mehr korrelierbar. Mit diesem Limit liegen also maximal 512 andere Pakete zwischen den beiden Gleichzeitigen. Nimmt man an, dass all dies einzelne Ereignisse sind, also jedes eine Neutron-Unit belegt, bräuchte man 512 Units. Jedoch beträgt allein die Zeit, die die Elektronen zur Drift auf die GEM benötigen nach [ZCHH94], bei etwa 700 V/cm Driftfeld und 2 mm Driftstrecke, 40 ns. Betrachtet man den Signalfluss durch den Stack, können miteinander korrelierte Signale Zeitdifferenzen von 200 ns aufweisen,. Damit würden noch 80 Neutron-Units benötigt.

²⁴maximal um einen einstellbaren Wert abweicht.

Die VHDL-Implementierung für den CASCADE-Detektor erfolgte in [Käs13]. In der vorliegenden Arbeit wurde sie für 2 nXYTER erweitert und so abgeändert, dass sie auf dem Spartan6 genügend Platz findet. Das Schema ist in Abbildung 4.13 zu sehen.

Die nXYTER-Pakete gehen zuerst in einen Demultiplexer, in welchen aus

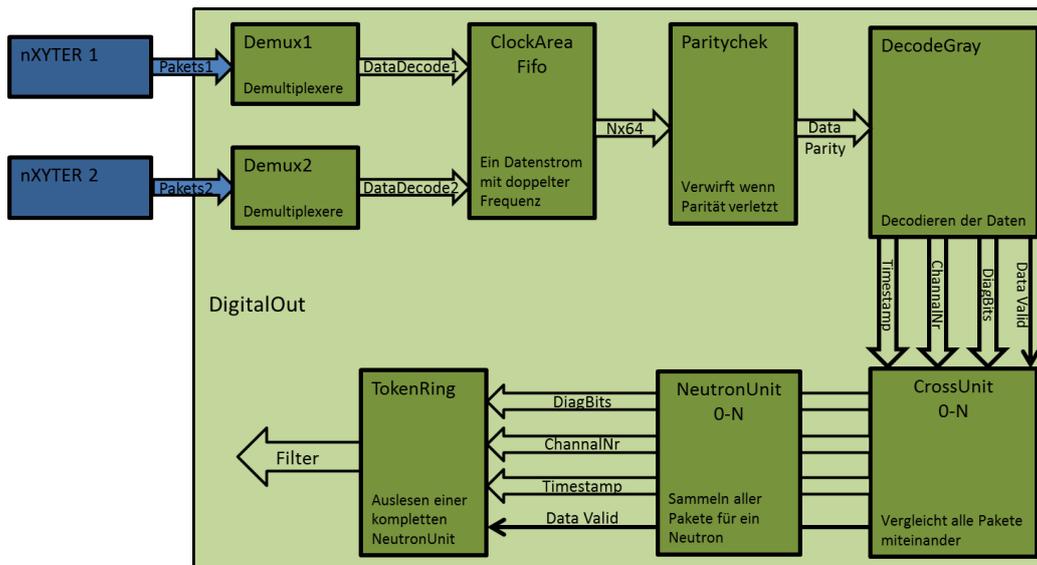


Abbildung 4.13: Schema des Datenflusses von zwei nXYTERn durch die Sortieroutine. Die nXYTER-Daten werden demultiplext und im *ClockAreaFifo* zu einem Strom zusammengefasst. Danach wird die Parität geprüft und graydecodiert. In den *CrossUnits* werden die Daten in die *NeutronUnits* sortiert. Ist eine Unit voll, gibt der *TokenRing* ihr den Befehl, alle Daten zum *Filter* zu schicken.

den 4 Bytes ein 32-Bit-Wort gemacht wird. Die Gültigkeit der Daten wird über ein extra Data-Valid-Bit bestätigt, das Originale vom nXYTER ist das MSB²⁵ des ausgegebenen Wortes.

In dem *ClockAreaFifo* werden die beiden Datenströme in einen geleitet, der dann mit 64 MHz jeweils 33-Bit-Worte ausgibt, wobei ein Identifikationsbit angehängt wird. Es werden nur noch gültige Daten, also mit MSB high, ausgegeben, um die Leistungsaufnahme zu verringern. Im Vollastfall werden im Wechsel Daten von nXYTER1 und nXYTER2 ausgegeben. Ab dieser Entity wird auch nicht mehr die nXYTER-Ausleseclock verwendet, zum einen weil man zwei synchronisieren müsste, und zum anderen, weil man die Clock dann

²⁵most significant bit.

überlastet und sie damit ihre Zuverlässigkeit verliert.

In der nächsten Stufe wird die Parität des Datenwortes berechnet und mit der gültigen verglichen; ist die Parität falsch, wird das Wort verworfen.

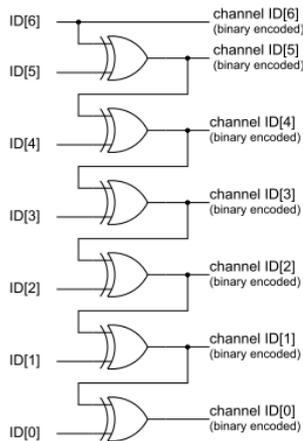


Abbildung 4.14: Decodierung der Kanalnummer mit XOR-Gattern.

In der *DecodeGray*-Entity werden die Datenworte auseinander genommen und in Timestamp, Channelnummer, Data_VALID, nXYTER-Nummer, PileUp und OverFlow unterteilt. Dabei werden Timestamp und Channel nach dem Schema in Abbildung 4.14 von Gray-Code in Binärcode umgewandelt.

Danach gehen sie in die oben beschriebene Pipeline aus *Cross*- und *Neutron-Units*. Über DELTA_T kann definiert werden, welche Ereignisse zu einem Neutron-Ereignis zählen sollen und über MAX_EVENT wird eingestellt, wie viele Ereignisse maximal zu einem Neutron gehören können. Man wählt MAX_EVENT so, dass man mit Sicherheit kein brauchbares Neutronen-Ereignis mehr rekonstruieren kann, wie bei zu großen Kanalabständen. In dieser S³-Version werden beide nXYTER in ein und der selben Sortieroutine verarbeitet. Dies macht ein Synchronisieren der Zeitstempel notwendig, spart aber erheblich Logik. Eine *Neutron-Unit* setzt ein Flag (N_COMPLETE) für den TokenRing, wenn diese voll ist oder T_MAX erreicht wird. Die Zeit, die die Neutron-Unit auf weitere Pakete wartet, ist typischerweise etwas weniger als der Zeitstempelüberlauf von 8,2 μ s.

Die *TokenRing*-Entity geht nacheinander alle *Neutron-Unit*-Flags durch, bis sie ein gesetztes Flag findet. Dann gibt sie dieser *Neutron-Unit* ein Enable, damit diese all ihre Ereignisse direkt in die *Filter*-Entity schreibt. Sobald diese damit fertig ist, fängt der *TokenRing* seine Suche von vorne an. Mit dieser Änderung in der Firmware wird erreicht, dass die *Neutron-Units* wesentlich schlanker werden und meist inaktive aber aufwendige Logik in ihren Filterkomponenten besser genutzt wird, indem der komplette Datenstrom durch sie geführt wird.

Die *TokenRing*-Entity geht nacheinander alle *Neutron-Unit*-Flags durch, bis sie ein gesetztes Flag findet. Dann gibt sie dieser *Neutron-Unit* ein Enable, damit diese all ihre Ereignisse direkt in die *Filter*-Entity schreibt. Sobald diese damit fertig ist, fängt der *TokenRing* seine Suche von vorne an. Mit dieser Änderung in der Firmware wird erreicht, dass die *Neutron-Units* wesentlich schlanker werden und meist inaktive aber aufwendige Logik in ihren Filterkomponenten besser genutzt wird, indem der komplette Datenstrom durch sie geführt wird.

4.6.3 Neutronenereignisrekonstruktion

Die *Filter*-Entity generiert aus den Daten einer geschlossenen *Neutron-Unit* einzelne Neutronenereignisse. Dies geschieht in zwei Stufen.

Zuerst werden alle Events eingelesen und sortiert, das heißt, GEM-Ereignisse werden in ein GEM-Register gefüllt, Zeitstempel und Kanalnummern setzen Rand-Pointer und die DiagBits werden ihren Kanälen entsprechend zu Registern addiert. Für die GEM-Ereignisse sind jeweils vier nXYTER-Kanäle vorgesehen. Das GEM-Register besteht aus vier Bits, der Eintrag 0111 würde beispielsweise bedeuten, dass GEM II, III und IV ein Signal gegeben haben. In der zweiten Stufe werden vereinfachte Daten ausgewertet. Als Neutron-Zeitstempel wird der kleinste Ereignis-Stempel gewählt. Die 2D-Koordinaten werden aus den Kanalpointern durch Mittelung gewonnen, dabei werden Einstreifenereignisse und Multihits bei zu großem Abstand der Pointer als Fehler markiert. Die GEM-Register werden ausgewertet und die Konversionsschicht wird ausgegeben. Zudem werden für jeden Fehlertyp (OneStripe, MultiHit, GEMError, NoGEM) Zähler betrieben.

Wie auch in der Arbeit [Käs13] wurde der Code mit ModelSim²⁶ an synthetischen nXYTER-Daten getestet und arbeitete wie erwartet. Es wurde auch die Realisierbarkeit des S³-Algorithmus mit ausreichend *Neutron-Units* überprüft, die Ergebnisse sind in Tabelle 4.6 zu sehen. Die li-

Anzahl Neutron-Units	Anzahl benötigter LUTs	relative Auslastung
3	11532	12%
50	25877	28%
150	61742	67%
250	87544	95%
262	99524	108%

Tabelle 4.6: Synthetisierungsergebnisse des S³-Algorithmus auf einem Spartan6 XC6SLX150T.

mitierende Ressource des FPGA sind die Slice LTUs²⁷. Man sieht, dass die 80 Neutron-Units von oben realisierbar sind. Bei wesentlich mehr, also etwa 150 Neutron-Units, sind zwar noch ausreichend LTUs vorhanden, allerdings gerät man dann in Timing-Probleme, die zusätzlich zu lösen wären. In dem implementierten Design sind natürlich auch noch alle anderen Entities der kompletten Firmware enthalten. Sollten auch noch die analogen Daten des nXYTER in die Auswertung einbezogen werden, wird sich die Zahl an möglichen Neutron-Units reduzieren.

²⁶Mentor Graphics Corporation, ModelSim SE-64 10.1a .

²⁷ Look Up Tables sind mit Flip-Flops in sogenannten Slices organisiert, das heißt, sie nutzen gemeinsame Verbindungen mit schnellen Leitungen im FPGA.

4.7 USB-Kommunikation

Für die USB-Kommunikation wird eine Zusatzplatine auf das DL711 gesteckt, die mit dem FT2232H [FTD12a] bestückt ist. Sie ist in Abbildung 4.15 zu sehen. Die Spannungsversorgung mit 3,3 V kommt direkt von dem FPGA-



Abbildung 4.15: USB-Platine mit FT2232H.

Board, eine Versorgung über die Power-Line des USB-Kabels ist mit dieser Platine nicht möglich. In der Mitte befindet sich der USB-Chip. Die rechts angelötete Stiftleiste dient nur der Signalkontrolle mittels Oszilloskop²⁸.

4.7.1 FT2232h

Der Chip ist ein Protokollkonverter. Er kann Pakete von dem USB 2.0 High Speed Standard in verschiedene andere, wie UART, JTAG, I²C oder SPI, wandeln. In dieser Arbeit wird der FT245 Synchronous FIFO Interface Mode [FTD10] benutzt. Mit dem Programm FT Prog²⁹ wird der Chip in diesen Modus gesetzt.

Der FT2232H benutzt in diesem Modus zwei 4 kB Buffer als Schreibe- (RX) und Lese-FIFOs (TX), wobei RX vom PC beschrieben und vom FPGA ausgelesen wird, bei TX ist es genau andersherum. Die Waveform dieses Standards ist in Abbildung 4.16 zu sehen.

Die Timings sind in Tabelle 4.7 zu sehen. Ein Lesezyklus läuft wie folgt ab: Ist RX nicht leer, so setzt der FT2232H (im Folgenden FT) RXF#³⁰ auf 0, ist das FPGA zum Lesen bereit, zieht er OE# runter. Nun stellt FT nach t_7 das erste Datenbyte zur Verfügung. Mit RD# 0 signalisiert das FPGA, dass es die Daten annimmt.

²⁸ROHDE & SCHWARZ HAMEG, HMO3524.

²⁹FTDI, FT Prog v2.8.2.0 2013 .

³⁰A# bedeutet wie auch \bar{A} oder nA oder /A, dass Signal A low aktiv ist.

Name	min	max
t1		16,67
t2	7,5	9,17
t3	7,5	9,17
t4	1	7,15
t5	1	7,15
t6	1	7,15
t7	8	16,67
t8	0	
t9	8	16,67
t10	0	
t11	1	7,15
t12	8	16,67
t13	0	
t14	8	16,67
t15	0	

1 bis 7,15 ns (t_5) nach jeder Taktflanke der 60 MHz Clock (CLKOUT) stellt FT nun immer ein weiteres Byte zur Verfügung, so lange bis RX leer ist oder das FPGA die Kommunikation abbricht. In beiden Fällen werden die Steuerbits auf 1 gesetzt. Der Schreibzyklus kann nur gestartet werden, wenn $TEX\#$ von FT auf 0 gesetzt ist. Dies ist nur dann nicht der Fall, wenn TX voll ist oder er den Fifo gerade über USB an den PC schickt. Der FPGA setzt $WR\#$ auf 0 und stellt t_{12} vor der steigenden Taktflanke gültige Daten bereit. Der Byte-Strom wird vom FPGA durch das 1 setzen von $WR\#$ beendet. Wird während der Übertragung TX voll, geht $TEX\#$ hoch und die restlichen Daten verloren.

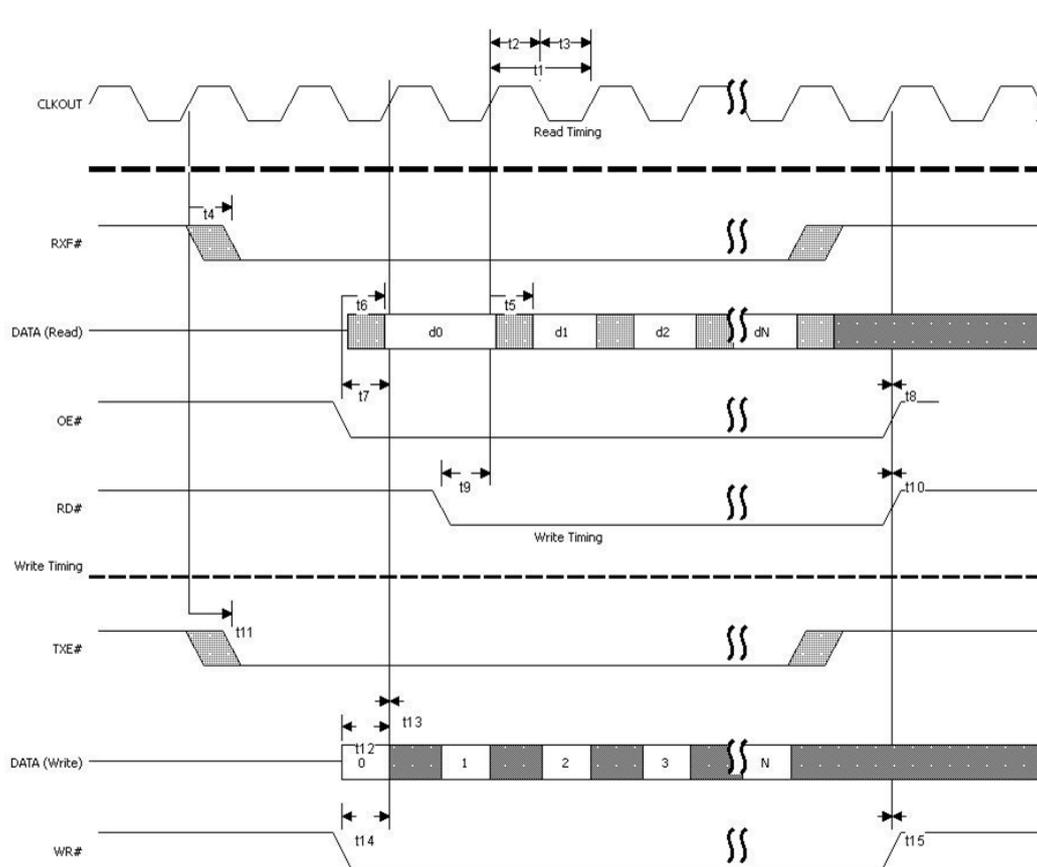


Abbildung 4.16: Waveform des FT245 Synchronous FIFO Interface Mode [FTD12a].

4.7.2 VHDL-Umsetzung

Die beschriebene Kommunikation wird von einer in dieser Arbeit entwickelten VHD-Entity umgesetzt. In Abbildung 4.17 ist der

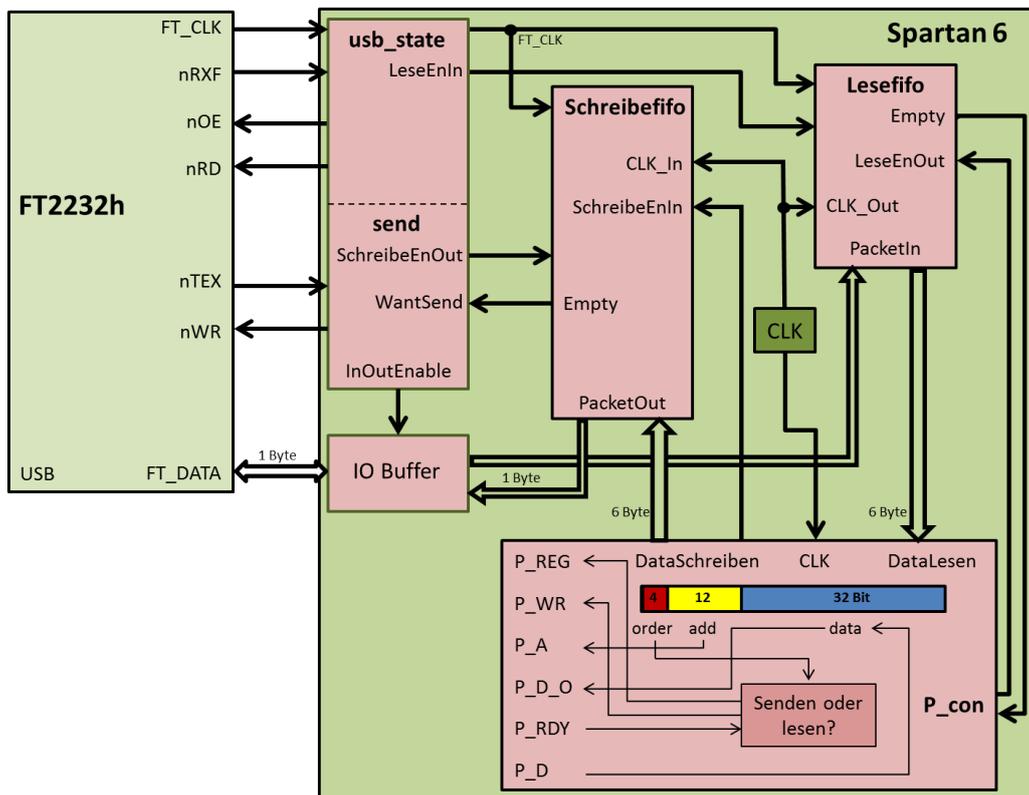


Abbildung 4.17: Schematische Darstellung der ft2232h-Entity. Die Steuerbefehle an den FT2232H werden vom usb_state-Zustandsautomaten gesetzt. Jener gibt die Daten auch an den Lesefifo weiter oder holt sie sich vom Schreibefifo. Der P_con-Zustandsautomat wertet die Daten, die vom Lesefifo kommen, aus und treibt den internen Bus. Er befüllt auch den Schreibefifo mit zu schreibenden Daten.

wesentliche Teil des Codes grafisch dargestellt. Die Entity ist im Wesentlichen in zwei Zustandsautomaten aufgeteilt. usb_send übernimmt die direkte Kommunikation mit dem FT2232H und P_con wertet die Daten aus und betreibt den internen Bus. Ein Problem stellen die unterschiedlich getakteten Clocks dar, FT_CLK hat 60 MHz und die interne 40 MHz. Deshalb werden zwei FIFOs mit unabhängigen Clocks implementiert. Zudem ist es notwendig, die FT_CLK über eine PLL zu stabilisieren und alle Ein- und Ausgänge zum FT2232H mit ihr in den jeweiligen Ein-/Ausgangsbuffern zu registern,

denn wie in Abbildung 4.16 zu sehen ist, sind die Daten bei weitem nicht über einen Takt stabil.

Der Zustandsautomat `usb_state` prüft, ob `nRXF` low ist; wenn ja, startet er einen Lesezyklus, indem die Steuerbits, `nOE`, `nRD` und `LeseEnIn` gesetzt und genau 6 Byte gelesen werden, und diese legt er im Lesefifo ab. Ist der Schreibefifo nicht leer, das heißt, `Empty` ist Null, wird, wenn nicht gelesen wird und `nTEX` 0 ist, ein Schreibeyklus gestartet. `nWR` wird runtergezogen, ein Wort wird aus dem Schreibefifo gelesen und 6 Bytes werden nacheinander geschrieben. Es wurde auch ein Schnellschreiben implementiert, um möglichst viele Rohdaten aus dem FPGA zu bekommen. Dabei werden 510 Bytes, einmal `order` und `add` und 127 Mal `data`, geschrieben. Des Weiteren signalisiert `usb_state` dem IO Buffer für `FT_DATA`, ob sie als Ein- oder Ausgang arbeiten sollen.

Ist der Lesefifo nicht leer, dann holt sich `P_con` ein Wort aus ihm. Diese Worte sind, wie in Abbildung 4.17 zu sehen ist, in eine 4 Bit `order`, die interne Registeradresse (`add`) und etwaige Daten unterteilt. In der `order` ist codiert ob es sich um einen Lese-, Schreibe- oder Schnellschreibe-Befehl handelt. Je nachdem was für ein Befehl es ist, wird der BUS gesteuert und der Schreibefifo bedient.

Bei einem Lesebefehl wird `P_REG` und `P_WR` für einen Taktzyklus auf Eins gesetzt. Adresse und Daten werden einfach auf `P_A` und `P_D_O` gelegt.

Ein Schreibebefehl beginnt genau so, nur wird `P_WR` auf Null gesetzt. Aus der BUS Antwort `P_D`, Adresse und `order` wird ein neues Wort gebildet und mit `SchreibeEnIn` in den Schreibefifo gelegt, sobald `P_RDY` Eins ist.

Der Schnellschreibe-Befehl führt im Prinzip nur 127 Schreibebefehle mit je einem Taktzyklus Pause hintereinander aus. Da so der Schreibefifo mit 2 Byte je Taktzyklus, also 0,64 Bit/ns, beschrieben, aber nur mit 1 Byte je Taktzyklus, also mit 0,48 Bit/ns, gelesen wird, ist so ein kontinuierlicher Datenstrom möglich.

Diese Entity wurde erfolgreich auf dem DL711 implementiert und ist geeignet, Rohdaten vom `nXYTER` auszulesen.

4.8 Software: FEB-Communication

Zur Ansteuerung des FPGA wird die Variation der Software `DetectorControl`³¹, die von Gerd Modzel [Mod14] entwickelt wurde, auf die neuen Gege-

³¹CDT, CASCADE DetectorControl 9.5 .

benheiten angepasst.

Es wurde die Klasse ft2xx [FTD12b] für die USB-Kommunikation eingebunden. Die Registeradressen wurden angepasst und die Ansteuerung von zwei nXYTERn realisiert.

Zudem wurde die Möglichkeit der Rohdatenauslese, die die FPGA-Firmware bietet, implementiert. Diese Rohdaten werden rudimentär bearbeitet. Die Kanalnummern und die Zeitstempel werden gray-dekodiert und in einer Textdatei gespeichert.

Kapitel 5

Elektroniktests und Messungen

In diesem Kapitel werden die neu installierten Elektronikkomponenten auf ihre Funktionsfähigkeit hin getestet. Die dafür nötige Software wurde in C++ mittels Visual Studio¹ geschrieben oder verändert. Die Testmessungen mit dem neuen nXYTER zielen darauf ab von einzelnen dünnen Streifen einer segmentierten GEM erfolgreich Ladungssignale auszulesen. Mit dem CiPix-ASIC gelang das Auslesen einer feiner segmentierten GEM nicht [Kle]. Zum Nachweis der Ionisationsspur mit einer Ortsauflösung unter Tracklänge war eine zusätzliche Gasverstärkungsstufe notwendig (Gain-GEM vor Auslesestruktur).

5.1 FT245 Synchronous FIFO interface mode

Das Timing des FT245 Synchronous FIFO interface mode, wie es in Abbildung 4.16 zu sehen ist, ist anspruchsvoll, wenn man sowohl Schreibe- als auch Lesebefehle mit ein- und derselben Clock betreibt. Die Steuerbits (OE#, RD#, WR#) müssen einen Mindestabstand von 8 ns zur Taktflanke von CLKOUT haben. Gültige Daten beim Lesen liegen hingegen erst 7,15 ns nach der Taktflanke bereit. Bei einer Periodendauer von 16,67 ns bleibt ein 1,52 ns großes Fenster, in dem die FPGA-interne Verarbeitung- und Steuer-clock ihre Taktflanke haben muss. Es kommt noch hinzu, dass die CLKOUT nicht auf einem GCLK-Pin des Spartan6 gebondent ist. Das führt zu einer nicht vorhersehbaren Verzögerung der Clock, bis sie die PLL erreicht, und macht ein Ausmessen am Oszilloskop nötig. In Abbildung 5.1 ist ein Registerlesebefehl zu sehen. Man sieht, dass, nachdem RXF# auf 0 gegangen ist, OE# und RD# folgen. Dann werden die Daten 0x56.00.00.00.00.00 gelesen und 0x56.00.d9.2f.04.00 geschrieben. Die Daten sind als hexadezimale Zahl ange-

¹Microsoft Corporation, Microsoft Visual Studio Professional 2012 11.0.60610.01 .

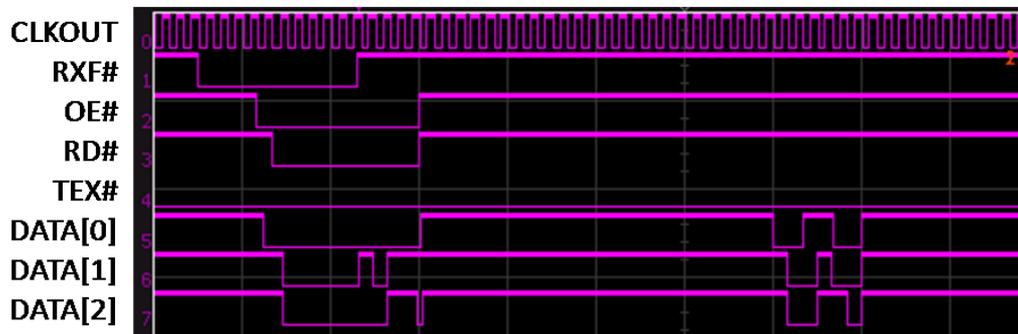


Abbildung 5.1: Oszillatorbild eines kombinierten Lese-/Schreibebefehls im FT245 Synchronous FIFO interface mode. Es sind die Steuerbits des FT2232H (RXf# , TEX#), seine Clock (CLKOUT), die Steuerbits des FPGA (OE# , RD#) und die ersten drei Datenbits zu sehen.

geben, der Punkt trennt die einzelnen Bytes. Ein Schreibebefehl ist wegen des auf 0 gesetzten TEX# und des nicht mit angezeigtem WR# möglich. Der in Kapitel 4.7.2 erwähnte Schnellschreibe-Befehl funktioniert ebenfalls wie erwartet.

5.2 SPI-Protokoll zwischen Attiny88 und Spartan6

Die SPI-Kommunikation zwischen dem FPGA-Board und dem ATtiny88 wurde größtenteils aus [Käs13] übernommen. Ein Test ist wegen des neuen FPGA allerdings dennoch notwendig. Denn es zeigten sich produktionsbedingte Schwankungen bei der Zuverlässigkeit der LVDS-Leitungen auf dem DL711. Ein SPI-Test ist in Abbildung 5.2 zu sehen. Die Kommunikations-



Abbildung 5.2: Oszillatorbild einer SPI-Anfrage an den ATtiny88. Die Kommunikation beginnt mit dem Heruntersetzen des /CS-Bits auf 0. Die Clock (SCLK) wird für jedes Byte einzeln freigeschaltet. Der FPGA schickt über MOSI die Daten, der ATtiny wartet ab (MISO) und gibt beim Empfangen ein Acknowledge.

	Byte1	Byte2	Byte3	Byte4
RedNX	CMD	I ² C-Adresse	REG-Adresse	CRC
MOSI	0x11	0x12	0x12	0x6a
MISO	0x00	0x00	0x00	0x00

Tabelle 5.1: SPI-Daten aus Abbildung 5.2. CMD ist der ATtiny-Befehl, ein nXYTER-Register hat die I²C-Adresse. Im nXYTER soll das Register mit der REG-Adresse ausgelesen werden, CRC ist das Kontrollbyte, was sich nach dem CRC-8 (ITU-T)-Standard berechnet.

daten sind in Tabelle 5.1 dargestellt und entsprechen den Softwarebefehl „nx -vth“, welcher ein nXYTER-Register ausliest. Nachdem /CR auf 0 gesetzt wurde, wird das erste Byte übertragen. Es beinhaltet den Befehl für den ATtiny, Alle möglichen sind in [Kle13] dokumentiert. Das nächste Byte übergibt die Adresse für das I²C-Protokoll, über das der ATtiny mit den Komponenten des FEB-E kommuniziert. In dem Beispielfall wird noch das nXYTER-Register gesendet, von dem gelesen werden soll. Abgeschlossen wird der Kommunikationsblock mit dem CRC-Kontrollbyte. Es wird, wie in [Käs13] ausführlich beschrieben, mittels Polynomdivision mit dem Bitstream 100000111 aus den übertragenen Daten berechnet. Die SPI-Kommunikation ist erfolgreich auf den Spartan6 portiert worden. Die Softwareerweiterung erlaubt es nun auch, das Trim-Schieberegister des nXYTER, genauer zu diesem findet man in [BSS⁺09], zu beschreiben.

5.3 Testtrigger des nXYTER

Um die digitalen Ausgänge zu testen, verfügt der nXYTER über einen sogenannten Testtrigger-Modus. In diesem werden die analogen Ausgänge abgeschaltet und ein Enable direkt an den Komparator, der in Abbildung 4.6 zu sehen ist, gesendet. Damit wird ein Zeitstempel generiert und letztendlich zusammen mit der Kanalnummer und den Statusbits ausgegeben. Jeder Kanal kann einzeln maskiert werden, damit lässt sich ein einzelner Kanal testen. Die für diese Tests notwendigen Registerwerte und Einstellungen sind in Tabelle 5.2 zu sehen. Der nXYTER wird mit einer 256 MHz Clock getrieben. Zusätzlich kann man über die Befehle „test tnum“ die Anzahl der zu sendenden Testpulse einstellen. Bei dem Wert 0 wird unendlich oft gepulst. Mit „test tpper“ wird der Abstand der Pulse festgelegt, wobei der ein Vielfaches von 25 ns ist.

Das Ergebnis einer solchen Testtrigger-Messung ist in Abbildung 5.3 zu sehen. Man erkennt auf ihr nicht das erwartete Ausgabeformat. Denn data_p[6]

Softwarebefehl	nXYTER-Register	Registeradresse	Registerwert
nx -config0 8	Configuration Register 32	32	00001000
nx -config1 8	Configuration Register 33	33	00001000
test nxrs1	FPGA-Register	0xf4	0xff.ff.ff.ff
test tpstart	FPGA-Register	0x120	0xff.ff.ff.ff

Tabelle 5.2: Notwendige Befehle für den Testtrigger-Modus des nXYTERs auf FEB-E2.

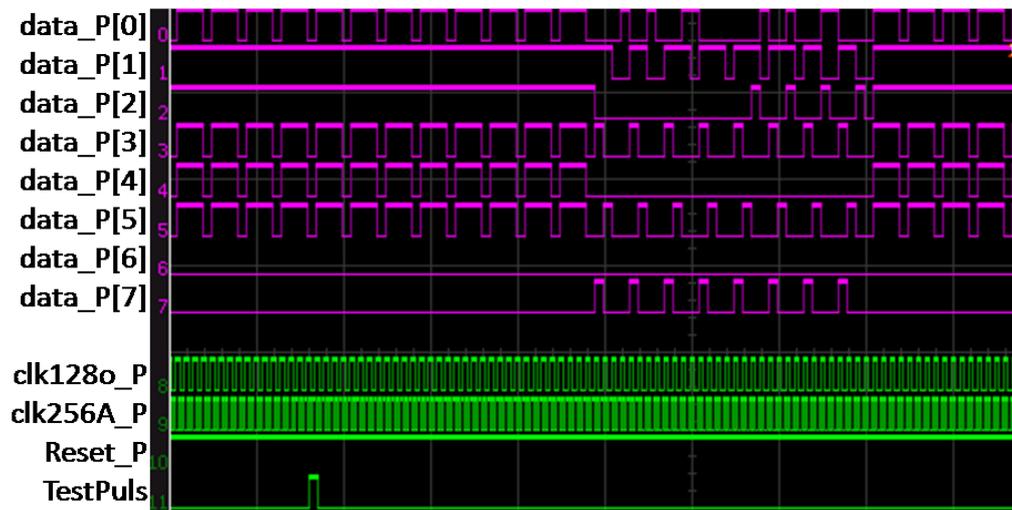


Abbildung 5.3: Oszillatorbild der positiven LVDS-Leitungen einer Testtriggermessung an FEB-E1 mit demaskierten Kanälen 0-7. Nach dem Testpuls gibt der nXYTER die Daten synchron zu der Ausgabeclock (clk128o) aus. Gültige Daten sind am ValiBit (data_p[7]) zu erkennen. Die Kanalnummern sind gelb markiert. Die Zeitstempel (die ersten beiden Bytes ohne data_p[7]) sind immer gleich. Das Paritätsbit (data_p[0]) wechselt je nachdem, wie die Parität ist. clk265A ist die Clock, die der FPGA an den nXYTER gibt, sie hat in der Regel eine Frequenz von 256 MHz. Das Reset ist dauerhaft auf 1.

scheint dauerhaft auf 0 zu sein, sollte sich aber bei ungültigen Signalen ($\text{data_p}[7] = 0$) wie $\text{data_p}[3]$ - $\text{data_p}[5]$ verhalten. Beim Ausmessen dieses Bits stellt sich heraus, dass es nicht wie eine normale LVDS-Leitung um 1,1 V schwankt, sondern um 0 V. Der FPGA-Buffer gibt trotz dieses Offsets meistens die richtigen Werte aus, jedoch nicht immer. Es handelt sich hierbei um einen Produktionsfehler des FEB-E1-Boards. FEB-E2 ist diesbezüglich in Ordnung. Das Reset des nXYTERs muss dauerhaft auf 1 stehen, es ist also low aktiv, anders als in der Dokumentation [BSS⁺09] beschrieben wird.

Eine weitere Unstimmigkeit findet sich bei der Reihenfolge der Kanalnummern. Der FPGA gibt sie so an: 1, 0, 3, 2, 7, 6, 5, 4. Da der TokenRing des nXYTERs die Kanäle von 0 an nacheinander abtastet und alle Triggerereignisse den gleichen Zeitstempel haben, müssten sie 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 sein. Dies ist auch am Oszilloskop zu erkennen, denn nach Graydecodierung ergibt die zu sehende Sequenz 0, 1, 2, 2, 6, 7, 5, 4. Das Problem kommt vom DL711, denn dort sind einige LVDS-Leitungen in falscher Polarität an den Spartan6 gebondet. Es handelt sich dabei um $\text{data_p}[1] \longleftrightarrow \text{data_n}[1]$ des FEB-E1, das entspricht den FPGA Pins AA25 \longleftrightarrow AA26, und $\text{data_p}[3] \longleftrightarrow \text{data_n}[3]$ des FEB-E2, was J9 \longleftrightarrow J7 auf dem Spartan6 entspricht. In längeren Tests stellte sich heraus, dass die Timestamps keinem erkennbaren Muster folgen. Nach [Sch] wird der Timestamp in dem nXYTER invertiert, bevor er ausgegeben wird. Nach einer Softwareinvertierung verhalten sich die Timestamps wie erwartet.

Des Weiteren zeigt das Paritätsbit nicht wie erwartet die Parität der übertragenen Daten an. In Tabelle 5.3 ist ein Ausschnitt aus einem Datensatz mit Paritätsberechnung zu sehen. Bei einer Suche nach dem maximal paritätsver-

Byte1	Byte2	Byte3	Byte4	Parität	Parität ohne TS[6]
10111000	01110100	00000000	00000001	1	0
10111100	00101111	00000000	00000000	0	0
11111111	01010101	00000000	00000001	1	0
10000100	01110100	01111001	00000000	1	0
10000100	01110100	01111011	00000001	1	0
10000100	01110100	01111010	00000000	1	0

Tabelle 5.3: Beispieldaten vom nXYTER auf FEB-E2. Ohne das siebte Bit des zweiten Bytes (TS[6]) stimmt die Paritätsberechnung.

letzendem Bit ergab sich, dass TS[6] nicht bei der Berechnung der Parität berücksichtigt wird. Ohne TS[6] ergibt sich in allen genommenen Daten des FEB-E2 die richtige Parität. Bei FEB-E1 ist dies aufgrund der fehlerhaften siebten Datenleitung nicht der Fall.

In dieser Arbeit wird ausschließlich der digitale Teil des nXYTERs 2.0 genutzt, für den analogen Teil wird auf [Mod14] verwiesen werden.

5.4 Testmessungen mit dem Detektor

Bei Tests der nXYTER im Detektoraufbau stellt man fest, dass beide verwendeten nXYTER unterschiedlich reagieren. Die benutzten RegisterEinstellungen sind in Tabelle 5.4 zu sehen. Das Rauschverhalten von vom Chip auf

Softwarebefehl	Registernummer	Registername	Wert
nx -icg	16	Vcg	114
nx -icgfol	17	Icgfol	151
nx -vth	18	Vth	150
nx -vbfb	19	Vbfb	80
nx -vbiasf	20	VbiasF	103
nx -vbiasS	21	VbiasS	113
nx -vbiasS2	22	VbiasS2	128
nx -vcm	23	Vcm, Vbase	152
nx -cal	24	cal	102
nx -icom	25	iCOMP	62
nx -idur	26	iDUR	100
nx -iiny	27	iINV	37
nx -ipdh	28	iPDH, iOTA	92
nx -itwc	29	iTWC	75
nx -config0	32	Configuration Register 32	0
nx -config1	33	Configuration Register 33	8
nx -tpdelay	38	Test Puls Delay Register	0
nx -ttdelay	39	Test Trigger Delay Register	0
nx -clkdelay1	43	Clock Delay Register 43	0
nx -clkdelay2	44	Clock Delay Register 44	0
nx -clkdelay3	45	Clock Delay Register 45	0

Tabelle 5.4: Standardeinstellung des nXYTERs nach [BSS⁺09].

FEB-E2 ist wesentlich problematischer als das von FEB-E1. Beide nXYTER reagieren auf Manipulationen an den analogen Eingängen. Mit einem an einen Eingang angesteckten 12 pF-Kondensator als Rauschquelle ist Rauschen auf eben diesem Kanal zu beobachten.

Mit Oszilloskop-Messungen der Erdleitung wurden mehrere Rauschquellen identifiziert. So beeinflussen die verwendeten Drehschaltadapter für Kühlung und nXYTER sowohl die Erdleitung als auch das Rauschen des nXYTER selbst. Deshalb wurde die Spannungsversorgung mit einem Blei-Akkumulator² realisiert.

Mit einem höheren Threshold (nXYTER-Register Vth) lässt sich das Rauschen komplett reduzieren. Dies ist allerdings mit den gewählten Standard-Einstellungen nicht reproduzierbar und mit dieser Maßnahme könnte man auch Neutronen-Signale unterdrücken.

²Panasonic Corporation, LC-R0612P.

Es werden Messungen an der Californium-Quelle vorgenommen. Diese hat

Softwarebefehl	Registernummer	Registername	Wert
nx -icg	16	Vcg	160
nx -icgfolll	17	Icgfolll	255
nx -vth	18	Vth	35
nx -vbfb	19	Vbfb	30
nx -vbiasf	20	VbiasF	95
nx -vbiasS	21	VbiasS	141
nx -vbiasS2	22	VbiasS2	100
nx -vcm	23	Vcm, Vbase	137
nx -cal	24	cal	255
nx -icomP	25	iCOMP	69
nx -idur	26	iDUR	15
nx -iiny	27	iINV	54
nx -ipdh	28	iPDH, iOTA	92
nx -itwc	29	iTWC	69
nx -config0	32	Configuration Register 32	0
nx -config1	33	Configuration Register 33	11
nx -tpdelay	38	Test Puls Delay Register	0
nx -ttdelay	39	Test Trigger Delay Register	0
nx -clkdelay1	43	Clock Delay Register 43	0
nx -clkdelay2	44	Clock Delay Register 44	0
nx -clkdelay3	45	Clock Delay Register 45	0

Tabelle 5.5: Veränderte Registereinstellung des nXYTERs.

einen Neutronenfluss von $100 \text{ n}/(\text{s cm}^2)$. Die verwendete Borschicht weist etwa 5% der Neutronen nach. Dabei wurde je einmal bei offenem und kurz darauf bei geschlossenem Neutronenschacht gemessen. Mit den in Tabelle 5.4 vorgenommenen Registereinstellungen konnten keine sinnvollen Daten gewonnen werden. Der nXYTER rauscht auch noch bei höchster Threshold-Schwelle.

Nach [Pau] wurde eine andere Registersetzung gewählt, sie ist in Tabelle 5.5 zu sehen. Mit diesen Einstellungen war es möglich, einen Unterschied in der Zählrate zu erkennen. Die Messdaten sind in Tabelle 5.6 zusammengetragen. In den Daten erkennt man einen Zählanstieg bei offenem Schacht. In Messung 3 ist dies nicht der Fall, dies ist aber auf die höhere Threshold-Schwelle zurückzuführen. Der auffällig hohe Unterschied in den Counts der Messung 4 ist in der niedrigen Zählrate bei geschlossenem Schacht begründet. Diese trat auf, da es zu einem Leckstrom kam, der in der iseg-Software bemerkt wurde.

Messung	Spannung	Threshold	Counts offen	geschlossen	Messzeit
1	1500 V	30	3003	1464	75 s
2	1500 V	30	13764	10156	750 s
3	1500 V	35	2261	2578	750 s
4	1600 V	30	33012	6025	750 s

Tabelle 5.6: Messergebnisse des Detektors (mit FEB-E2) an der Californium-Quelle. Bei allen Messungen wurde der Kanal 107 maskiert und die übrigen Registerwerte aus Tabelle 5.5 benutzt. Es wurde je einmal bei offenem und einmal bei geschlossenem Neutronenschacht gemessen.

Tritt dieser auf, so ist keine Zählrate mehr zu beobachten. Vermutlich bricht die GEM-Spannung zusammen.

Da der einzige Unterschied in den Messaufbauten die Öffnung des Schachtes ist, hat der Detektor Neutronen detektiert.

Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel der Arbeit war es, den CASCADE-Detektor für MIEZE-Anwendungen weiter zu entwickeln. Aus vorhandenen Daten und mit Hilfe der Expertise der Arbeitsgruppe wurde zuerst ergründet, bei welchen Komponenten die MIEZE-Tauglichkeit weiter optimiert werden kann. Die Limitationen des vorhandenen Systems lagen im Design selbst, sodass es grundlegend überarbeitet werden musste. Das Resultat stellt der in dieser Arbeit vorgestellte Detektor dar.

Die umfassende Weiterentwicklung der für den Teilchennachweis relevanten Komponenten erforderte einen neuen Aufbau des Detektors. Dies beinhaltet Gehäuse, Kühlung, Hochspannungsversorgung und Signalleitung. Die in vorangegangenen Messungen beobachtete räumliche Inhomogenität in der Gasverstärkung einer GEM ist auf mechanische Verspannung zurückzuführen. Daher wurde ein neues Spannrahmenkonzept erarbeitet. Die durch Aufeinanderpressen sich selbst spannenden, auf Rahmen geklebten Folien zeigen keine Faltenbildung oder Verspannungslinien. Aufgrund der Materialwahl reduzieren sie ebenfalls die kapazitive Kopplung der Folien untereinander, was beim CASCADE-Detektor zu schwer kontrollierbarem Übersprechen führte und somit die Zuordnung der Konversionsebene verfälschte. Weiterhin wird nun durch O-Ring-Dichtungen der kontaminationsfreie Spülbetrieb gewährleistet, da die vorherigen Teflon-Flachdichtungen Fremdgas in das aktive Detektorvolumen einließen.

Der bisherige Vorverstärker-ASIC CiPix arbeitet an der Grenze seiner Sensitivität und Eingangskapazität. Deshalb wurde in dieser Arbeit der an der GSI Darmstadt neu entwickelte nXYTER 2.0 integriert. Dieser bietet neben der höheren Sensitivität die Möglichkeit, analoge Signale aller Kanäle auszugeben. Die Zeitauflösung des nXYTER ist um den Faktor 100 besser. Er besitzt doppelt so viele Kanäle und ist selbsttriggernd. Für diesen ASIC wurde eine neue Regellogeik und Verarbeitungselektronik entwickelt. Als Basis dient das notwendigerweise LVDS-fähige FPGA-Board DL711, die neuste Version der Logicbox der Elektronikwerkstatt des Physikalischen Instituts Heidelberg. Mit Hilfe einer hierfür erstellten Firmware wurde das Board er-

folgreich getestet und betrieben.

Auf eine dedizierte Auslesestruktur wurde verzichtet, da eine in gekreuzten Streifen segmentierte GEM zusätzlich zu dem bereits verwendeten GEM-Signal nun auch die Ortsinformation liefert, welche nicht durch transversale Diffusionsprozesse verschlechtert wird. Ein Übereinanderstapeln vieler solcher GEM-Module erhöht die Ratentauglichkeit weiter, da die Ladung nicht durch den kompletten Stack hindurch projiziert werden muss.

Bei Testmessungen an der Neutronenquelle des physikalischen Instituts konnten erste Ereignisse nachgewiesen werden.

Eine weitere Optimierung und Tests am nXYTER ist zwingend erforderlich, um einen anwendungsbezogenen Betrieb zu gewährleisten. Dies betrifft insbesondere eine genaue Kalibration der Registerwerte. Mit einer Integration der analogen Ausgänge des nXYTERs würde sich die Zeit- und Ortsauflösung des Detektors weiter erhöhen, da somit eine Trackrekonstruktion der Konversionsprodukte möglich wäre.

Der Einsatz von Aluminiumoxid, einer Keramik mit passenden elektrischen und mechanischen Eigenschaften, für die Rahmenstruktur ermöglicht einen aufgrund des kleinen Neutronenstreuquerschnittes reduzierten Eigenuntergrund.

Mit segmentierten GEMs sind der Ortsauflösung nicht mehr die technischen Grenzen gesetzt, die noch bei der separaten Auslesestruktur galten. Möglich wären GEMs mit sphärischen, fein segmentierten Strukturen, die für Kleinwinkel-Streuung, etwa in SANS-Anlagen, optimiert sind.

Anhang A

Konstruktionszeichnungen

Stack

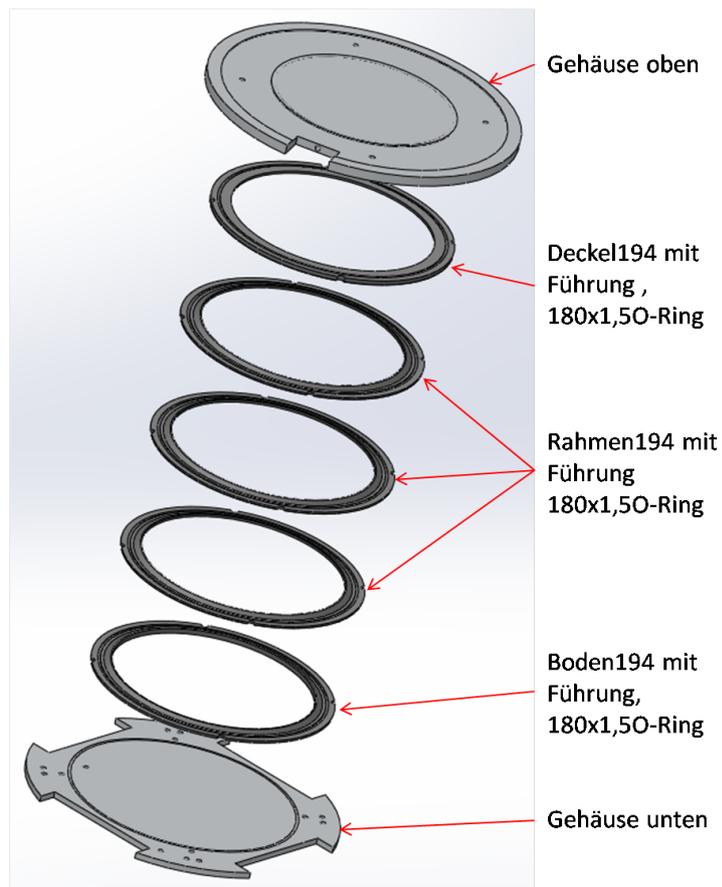
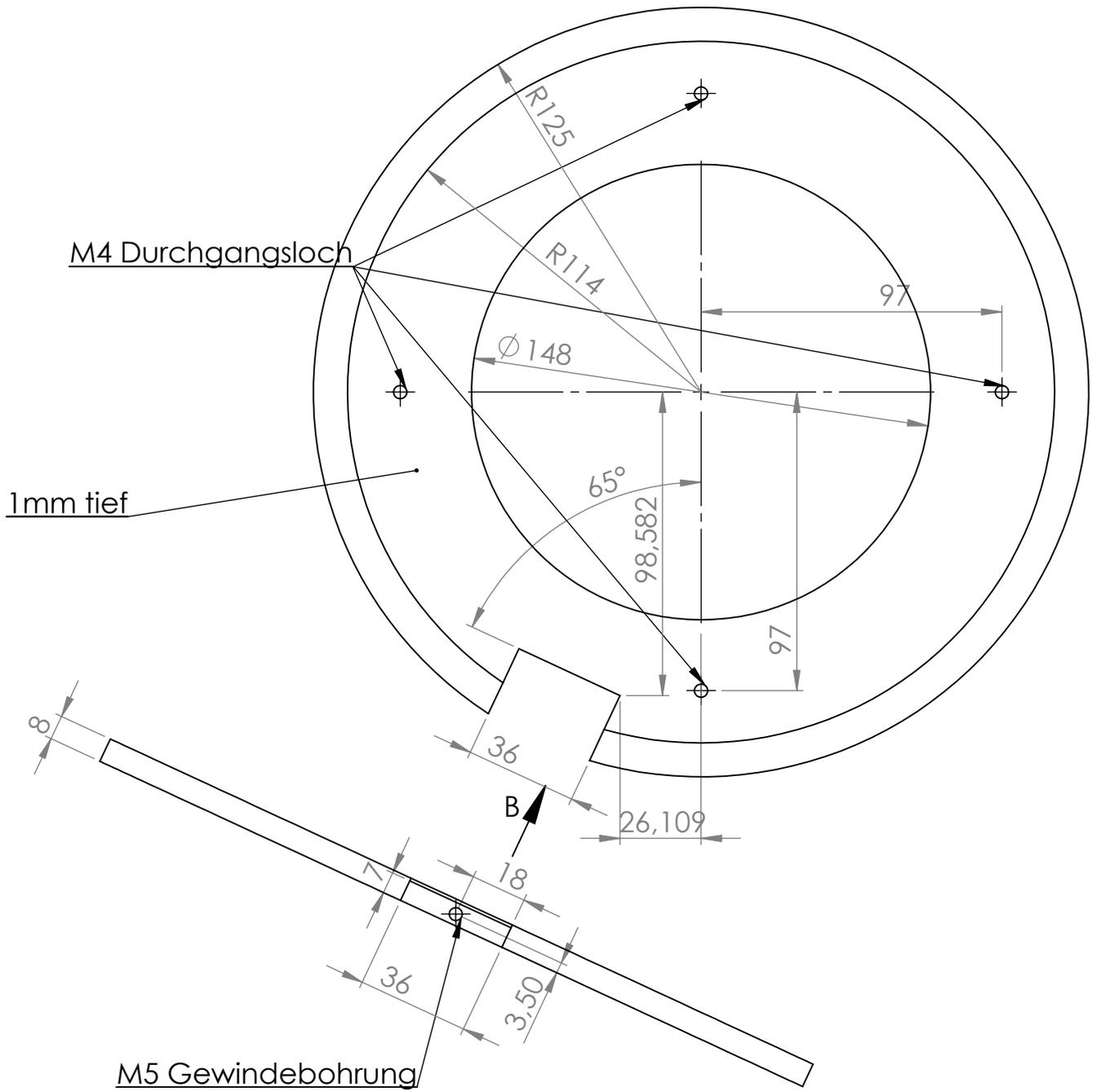


Abbildung A.1: Aufbau des Stacks mit Bezeichnung der Einzelteile.

Oben



ANSICHT B

WENN NICHT ANDERS DEFINIERT: BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT: TOLERANZEN: LINEAR: WINKEL:		OBERFLÄCHENGÜTE:		ENTGRATEN UND SCHARFE KANTEN BRECHEN		ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN		ÄNDERUNG	
NAME		SIGNATUR		DATUM		BENENNUNG:			
GEZEICHNET									
GEPRÜFT									
GENEHMIGT									
PRODUKTION									
QUALITÄT				WERKSTOFF:		ZEICHNUNGSNR.		Gehäuse oben	
						MASSSTAB: 1:2		A4	
				GEWICHT:		BLATT 1 VON 2			

Unten

7 mm tief

R125

Ø 142

142

SCHNITT C-C

M5 Gewindebohrung

DETAIL I
MAßSTAB 1 : 1

WENN NICHT ANDERS DEFINIERT:
BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER
OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT:
TOLERANZEN:
LINEAR:
WINKEL:

OBERFLÄCHENGÜTE:

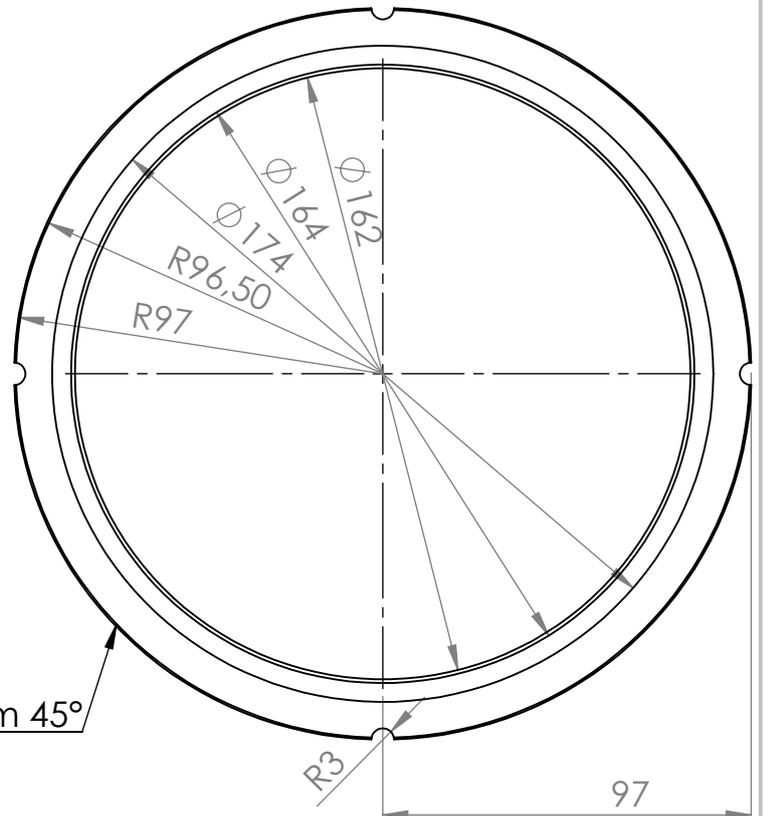
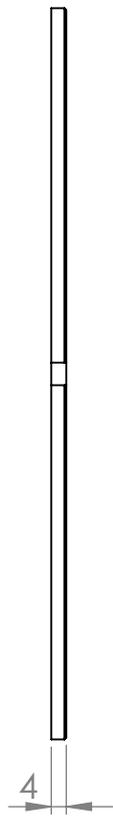
ENTGRATEN
UND SCHARFE
KANTEN
BRECHEN

ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN

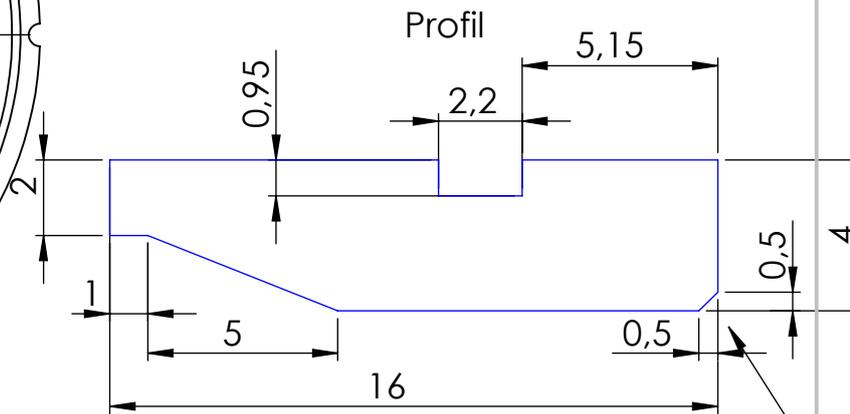
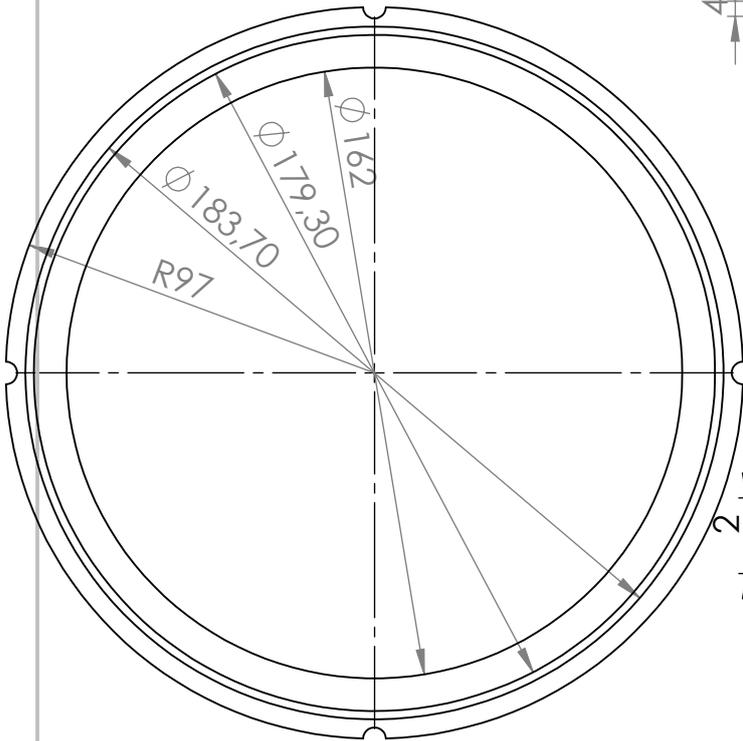
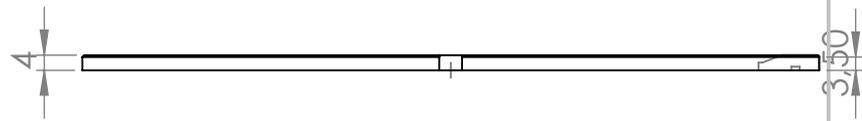
ÄNDERUNG

	NAME	SIGNATUR	DATUM		
GEZEICHNET					
GEPRÜFT					
GENEHMIGT					
PRODUKTION					
QUALITÄT				WERKSTOFF:	
				GEWICHT:	

BENENNUNG:	
ZEICHNUNGSNR.	Gehäuse oben
MASSTAB: 1:2	BLATT 2 VON 2
	A4



Fase 0,5 mm 45°



Fase 0,5 mm 45°

WENN NICHT ANDERS DEFINIERT:
BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER
OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT:
TOLERANZEN:
LINEAR:
WINKEL:

OBERFLÄCHENGÜTE:

ENTGRATEN
UND SCHARFE
KANTEN
BRECHEN

ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN

ÄNDERUNG

	NAME	SIGNATUR	DATUM
GEZEICHNET			
GEPRÜFT			
GENEHMIGT			
PRODUKTION			
QUALITÄT			

WERKSTOFF:

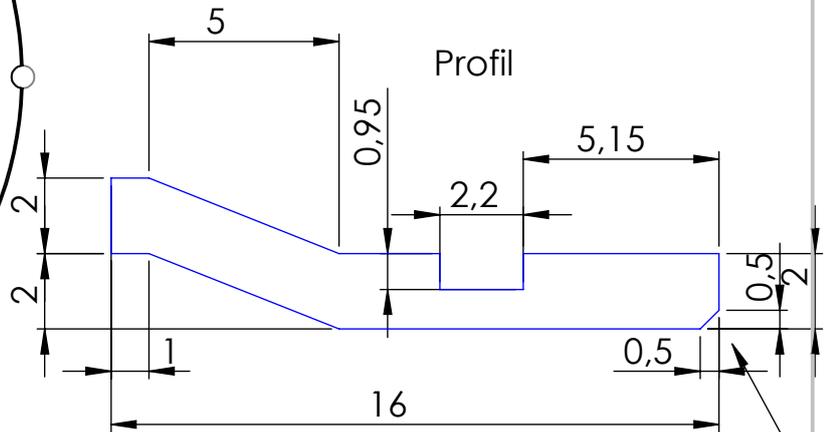
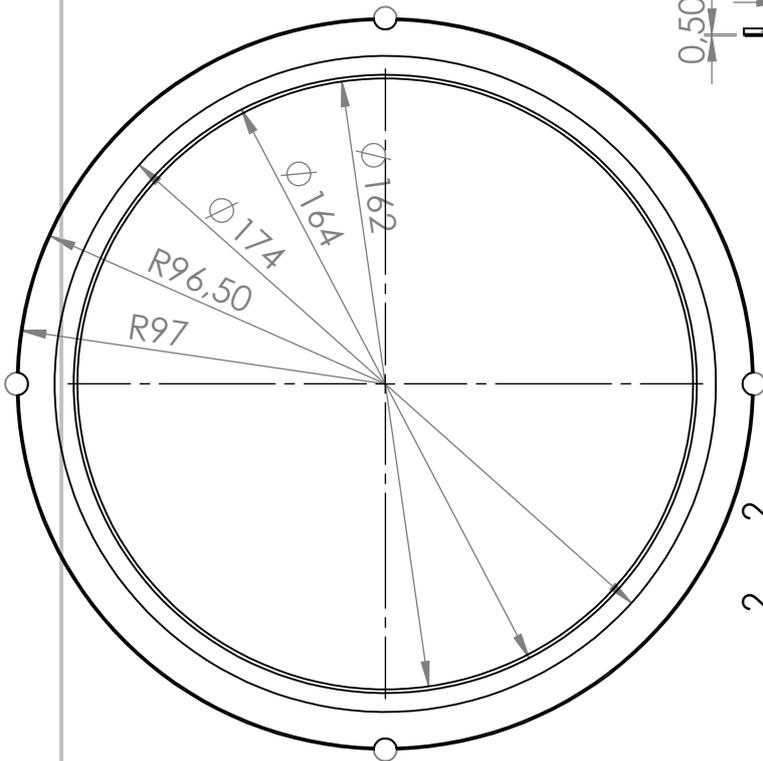
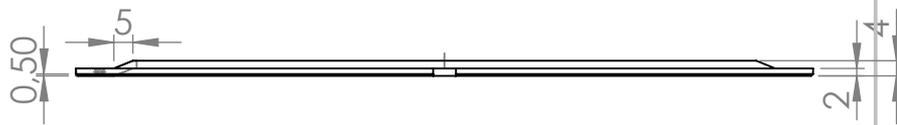
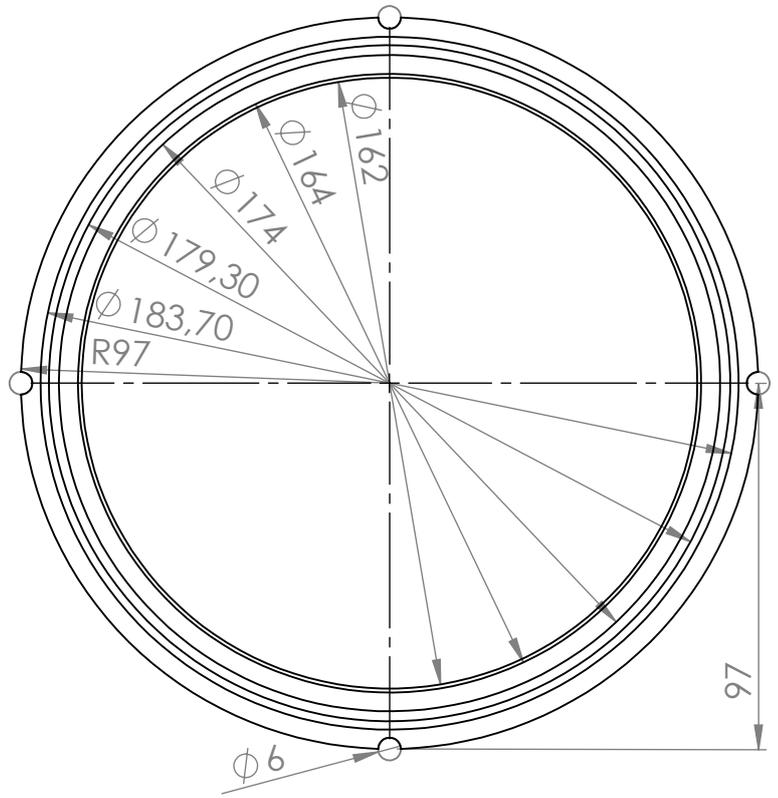
ZEICHNUNGSNR.

Deckell 94 mit Führung, 180x14,50

GEWICHT:

MASSSTAB: 1:2

BLATT 1 VON 1



Fase 0,5 mm 45°

WENN NICHT ANDERS DEFINIERT:
BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER
OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT:
TOLERANZEN:
LINEAR:
WINKEL:

OBERFLÄCHENGÜTE:

ENTGRATEN
UND SCHARFE
KANTEN
BRECHEN

ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN

ÄNDERUNG

	NAME	SIGNATUR	DATUM
GEZEICHNET			
GEPRÜFT			
GENEHMIGT			
PRODUKTION			
QUALITÄT			

WERKSTOFF:

BENENNUNG:

Rahmen 194 mit Führung 180x1,5

ZEICHNUNGSNR:

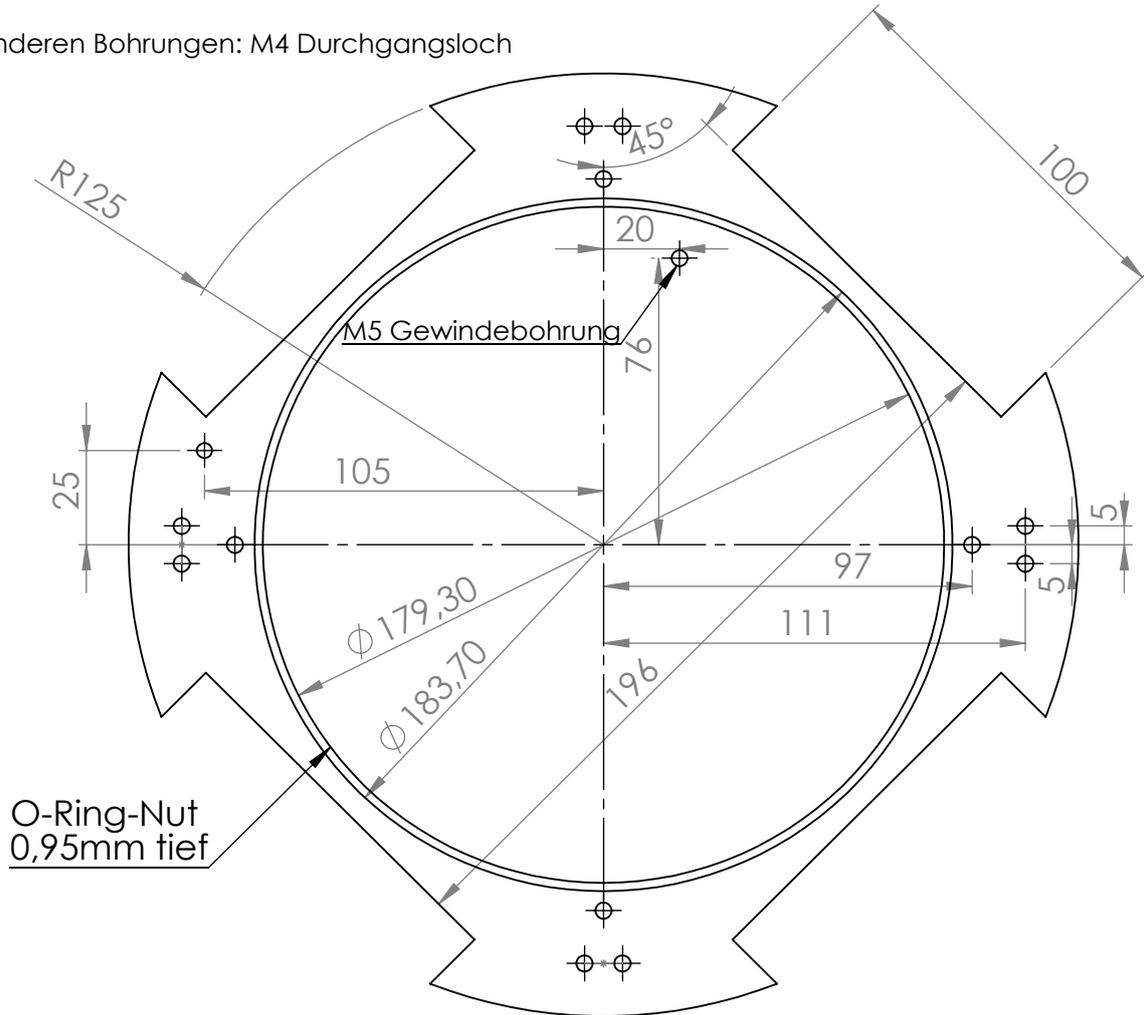
GEWICHT:

MASSSTAB: 1:2

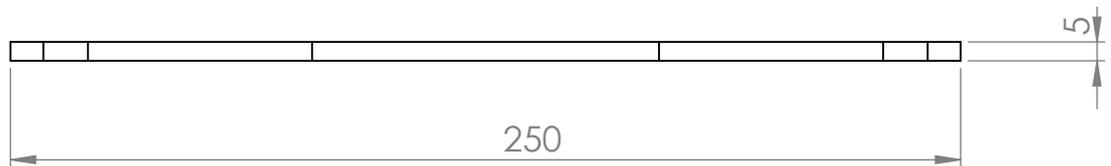
BLATT 1 VON 1

Oben

Alle anderen Bohrungen: M4 Durchgangsloch



O-Ring-Nut
0,95mm tief



WENN NICHT ANDERS DEFINIERT:
BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER
OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT:
TOLERANZEN:
LINEAR:
WINKEL:

OBERFLÄCHENGÜTE:

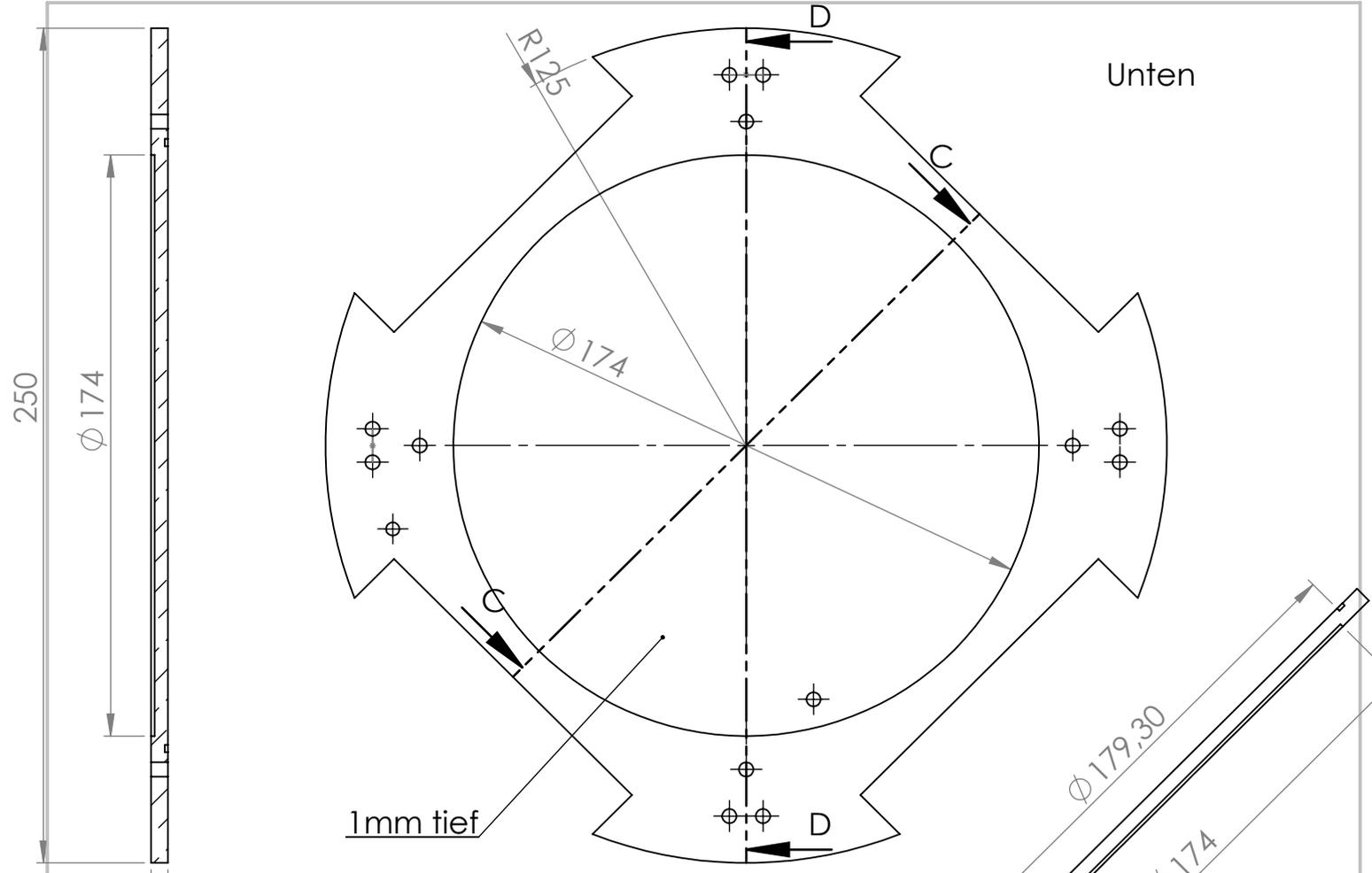
ENTGRATEN
UND SCHARFE
KANTEN
BRECHEN

ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN

ÄNDERUNG

	NAME	SIGNATUR	DATUM		
GEZEICHNET					
GEPRÜFT					
GENEHMIGT					
PRODUKTION					
QUALITÄT				WERKSTOFF:	
				GEWICHT:	

BENENNUNG:	
ZEICHNUNGSNR.	Gehäuse unten
MASSTAB: 1:2	BLATT 1 VON 2
	A4



Unten

1mm tief

SCHNITT D-D

SCHNITT C-C

DETAIL E
MAßSTAB 5 : 1

WENN NICHT ANDERS DEFINIERT: BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT: TOLERANZEN: LINEAR: WINKEL:		OBERFLÄCHENGÜTE:		ENTGRATEN UND SCHARFE KANTEN BRECHEN		ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN		ÄNDERUNG	
NAME		SIGNATUR		DATUM		BENENNUNG:			
GEZEICHNET									
GEPRÜFT									
GENEHMIGT									
PRODUKTION									
QUALITÄT				WERKSTOFF:		ZEICHNUNGSNR.		Gehäuse unten	
						MASSSTAB: 1:2		A4	
				GEWICHT:		BLATT 2 VON 2			

HV-Einschübe

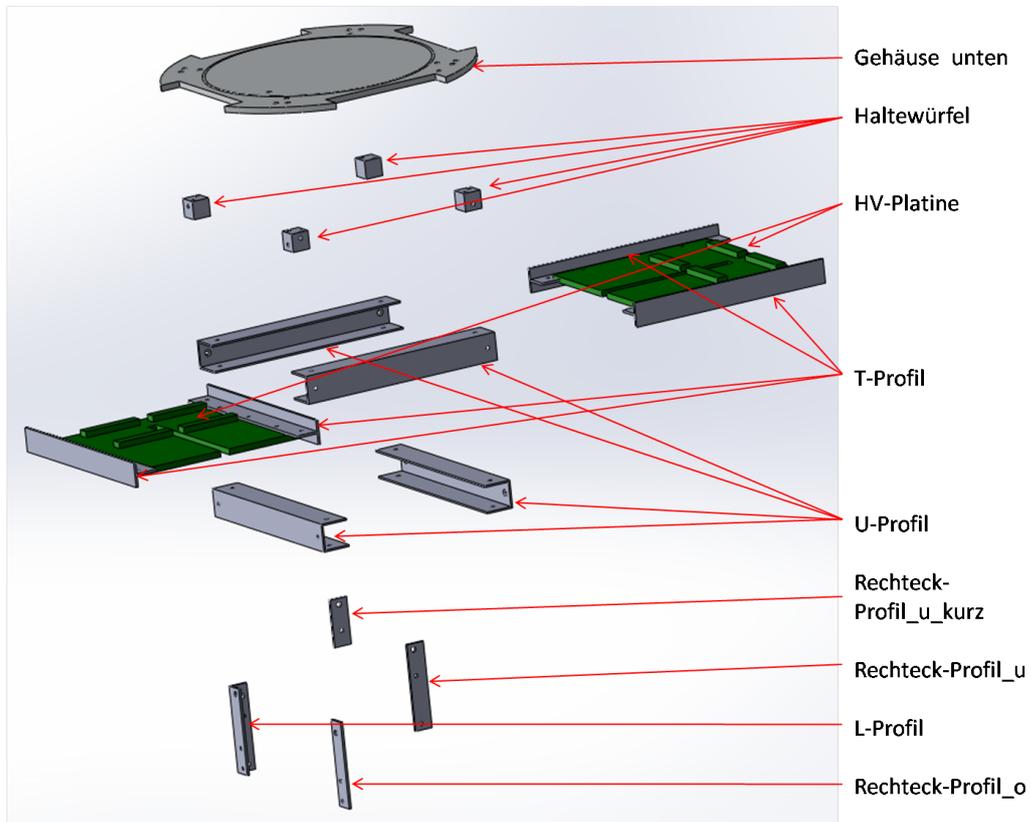
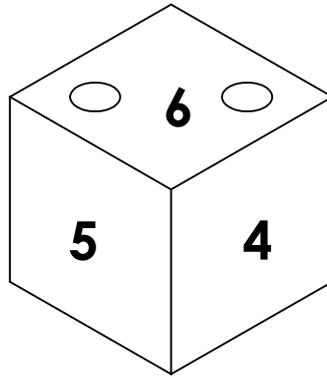
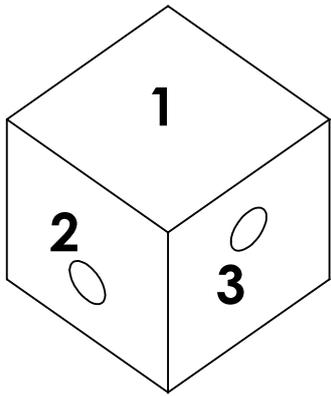
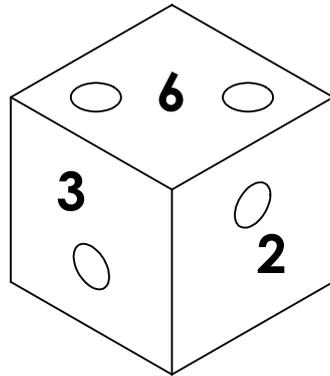


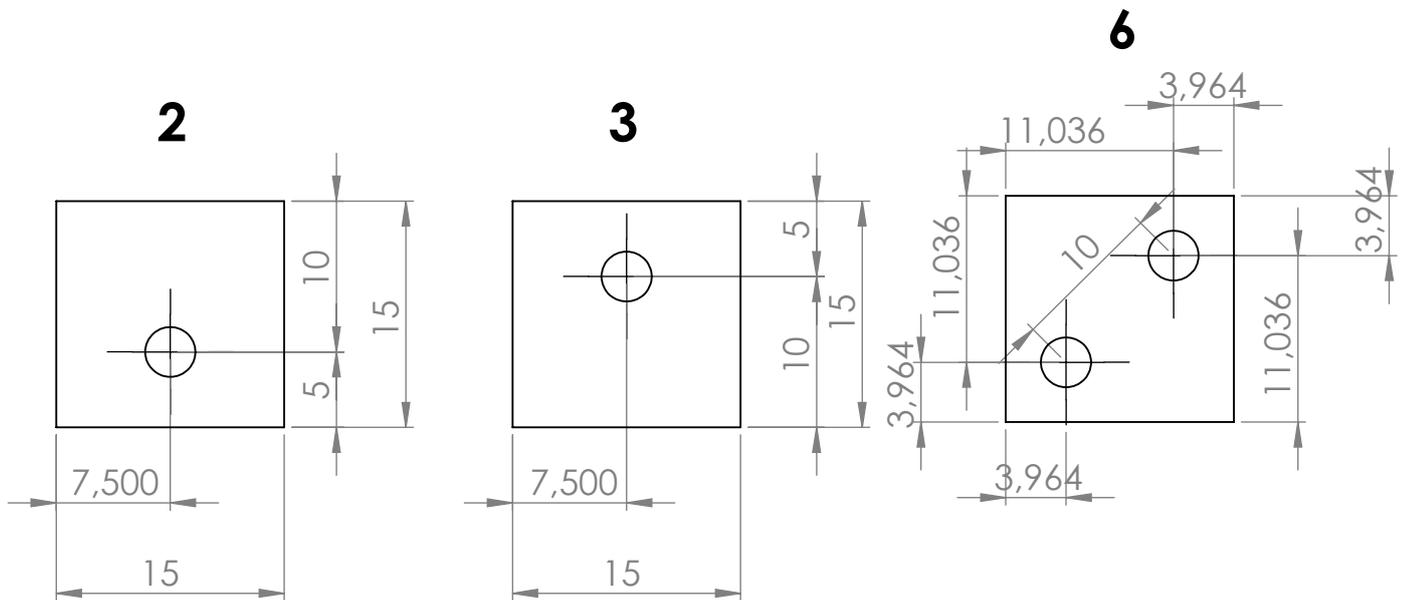
Abbildung A.2: HV-Aufbau mit Bezeichnung der Einzelteile.



Beschriftung
wie beim Spielwürfel



Alle Bohrungen sind M4 Gewindebohrungen



WENN NICHT ANDERS DEFINIERT:
BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER
OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT:
TOLERANZEN:
LINEAR:
WINKEL:

OBERFLÄCHENGÜTE:

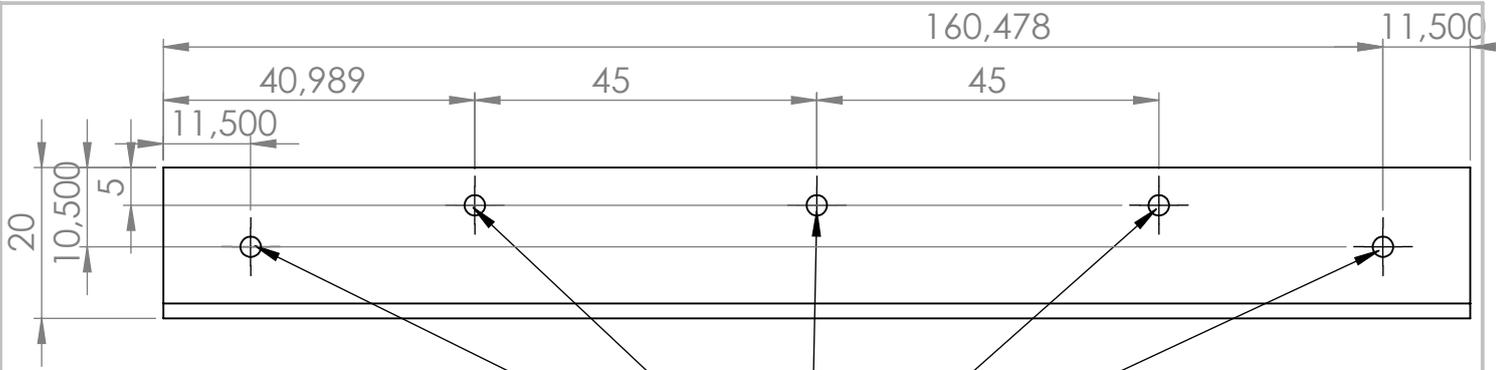
ENTGRATEN
UND SCHARFE
KANTEN
BRECHEN

ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN

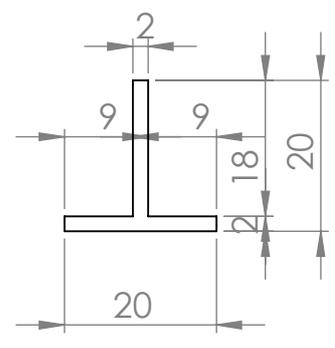
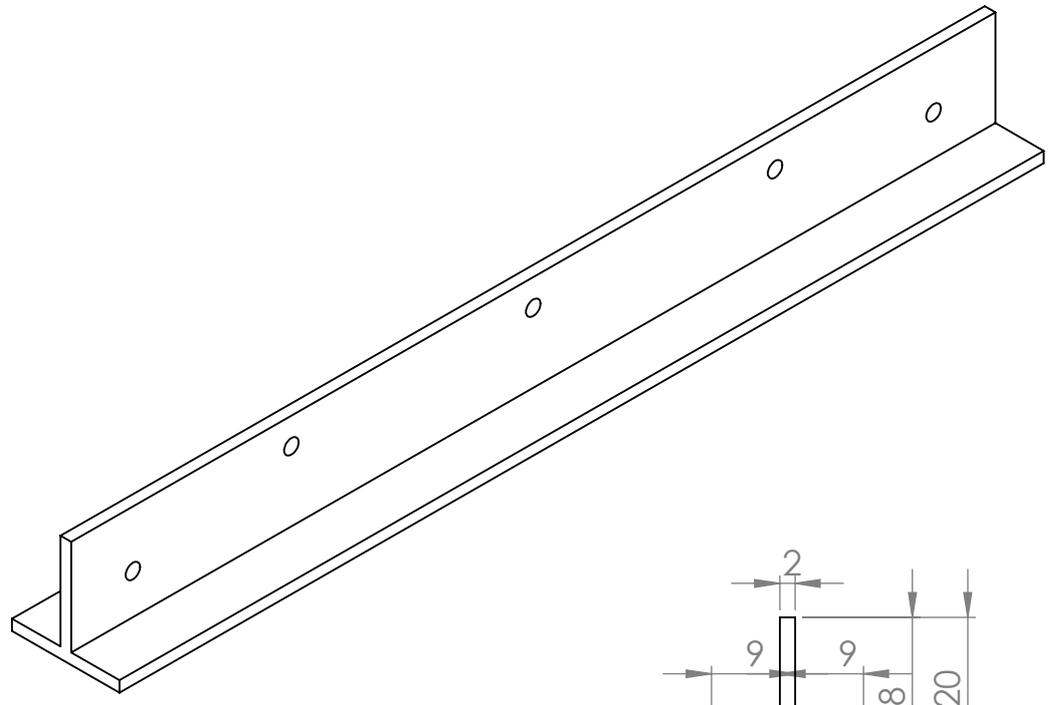
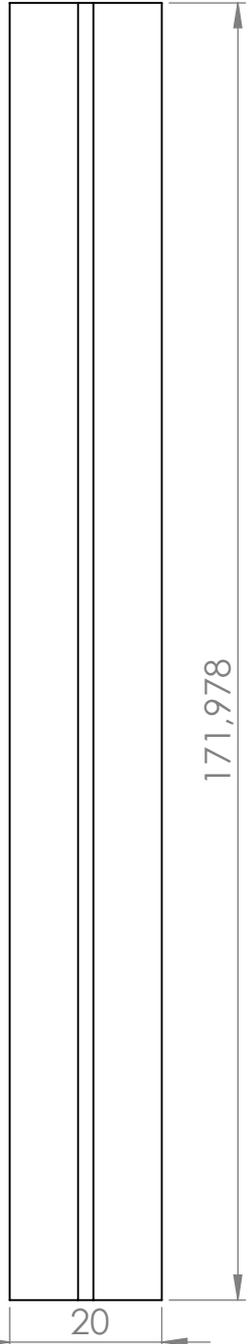
ÄNDERUNG

	NAME	SIGNATUR	DATUM		
GEZEICHNET					
GEPRÜFT					
GENEHMIGT					
PRODUKTION					
QUALITÄT				WERKSTOFF:	
				GEWICHT:	

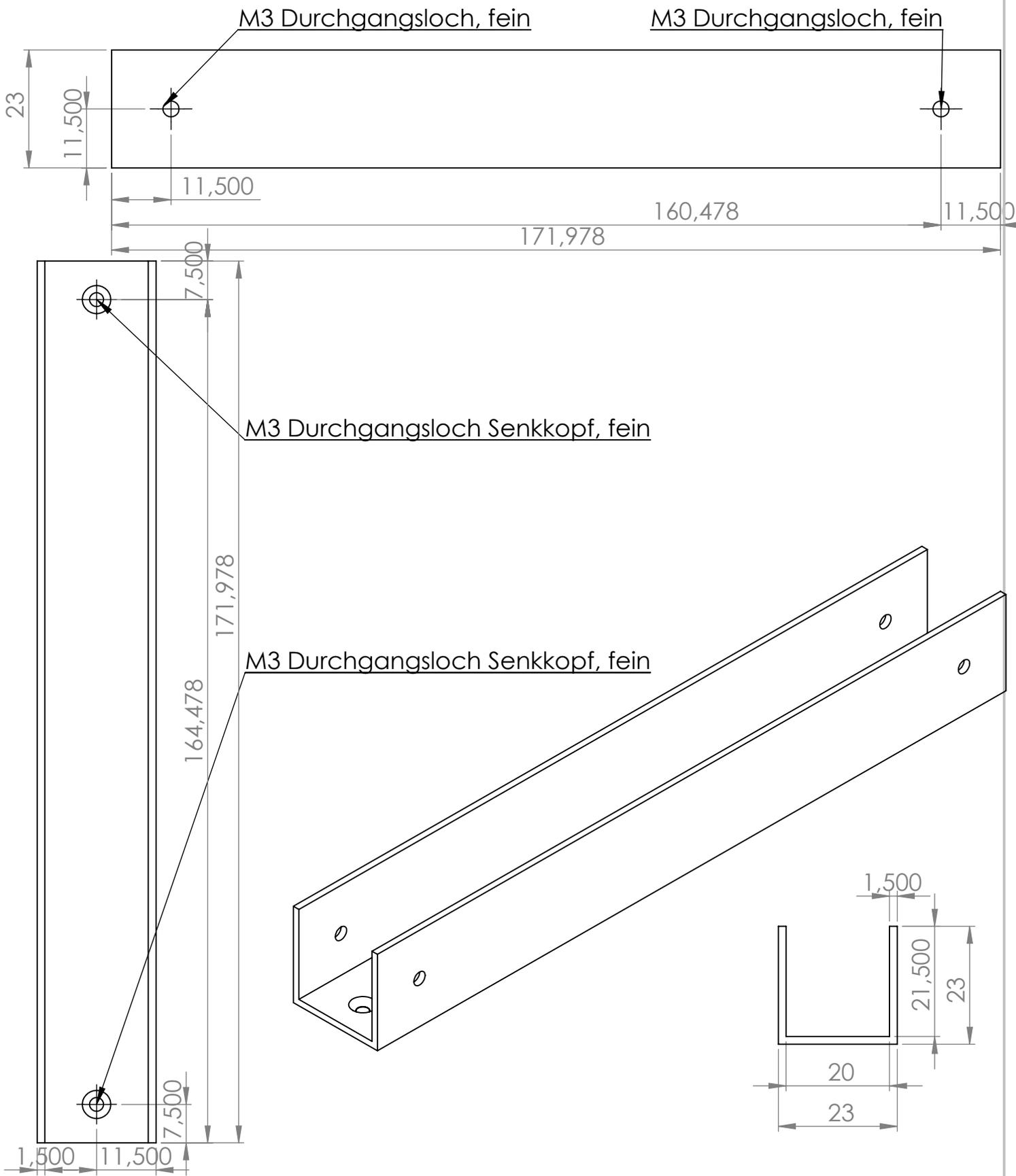
BENENNUNG:		
ZEICHNUNGSNR.	Haltewürfel	A4
MASSSTAB:2:1	BLATT 1 VON 1	



Alle Bohrungen M3 Durchgangsloch, fein



WENN NICHT ANDERS DEFINIERT: BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT: TOLERANZEN: LINEAR: WINKEL:		OBERFLÄCHENGÜTE:		ENTGRATEN UND SCHARFE KANTEN BRECHEN		ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN		ÄNDERUNG	
NAME		SIGNATUR		DATUM		BENENNUNG:			
GEZEICHNET		GEPRÜFT		GENEHMIGT		ZEICHNUNGSNR.			
PRODUKTION		QUALITÄT		WERKSTOFF:		T-Profil			
GEWICHT:		MASSSTAB: 1:1		BLATT 1 VON 1		A4			



WENN NICHT ANDERS DEFINIERT:
 BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER
 OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT:
 TOLERANZEN:
 LINEAR:
 WINKEL:

OBERFLÄCHENGÜTE:

 ENTGRATEN
 UND SCHARFE
 KANTEN
 BRECHEN

ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN

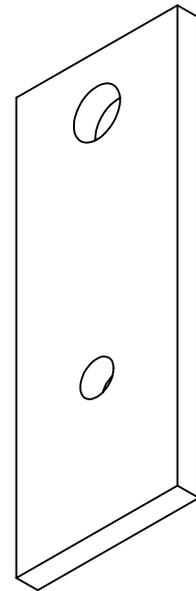
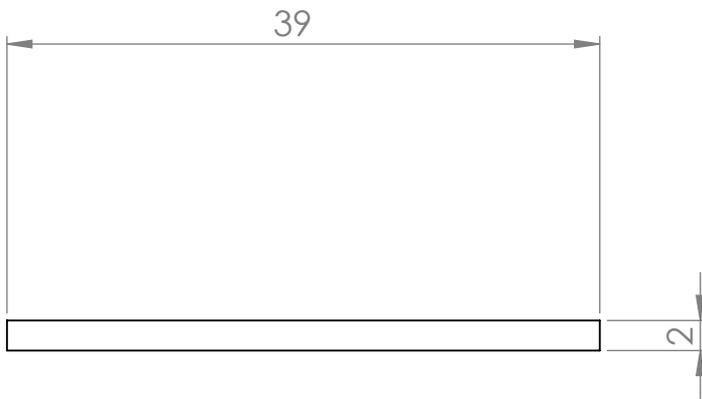
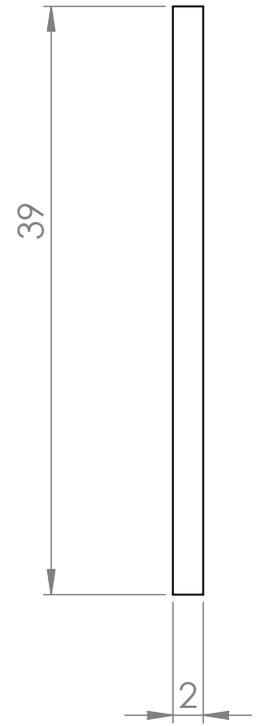
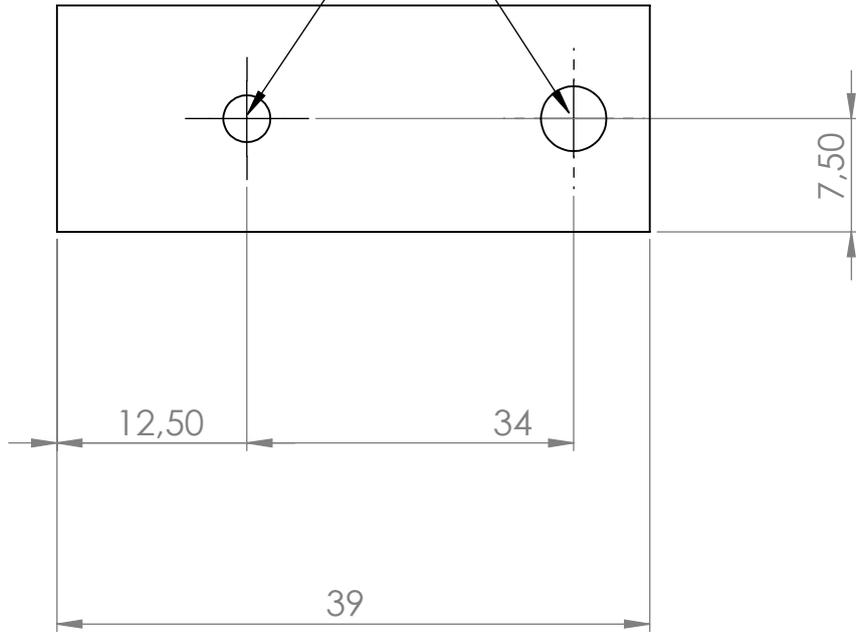
ÄNDERUNG

NAME	SIGNATUR	DATUM	WERKSTOFF:
GEZEICHNET			
GEPRÜFT			
GENEHMIGT			
PRODUKTION			
QUALITÄT			
			GEWICHT:

BENENNUNG:	<h1>U-Profil</h1>	A4
ZEICHNUNGSNR.		
MASSTAB: 1:1	BLATT 1 VON 1	

M3 Durchgangsloch, fein

M4 Durchgangsloch, fein



WENN NICHT ANDERS DEFINIERT:
BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER
OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT:
TOLERANZEN:
LINEAR:
WINKEL:

OBERFLÄCHENGÜTE:

ENTGRATEN
UND SCHARFE
KANTEN
BRECHEN

ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN

ÄNDERUNG

	NAME	SIGNATUR	DATUM		
GEZEICHNET					
GEPRÜFT					
GENEHMIGT					
PRODUKTION					
QUALITÄT				WERKSTOFF:	
				GEWICHT:	

BENENNUNG:

ZEICHNUNGSNR.

Rechteck-Profil_u_kurz

A4

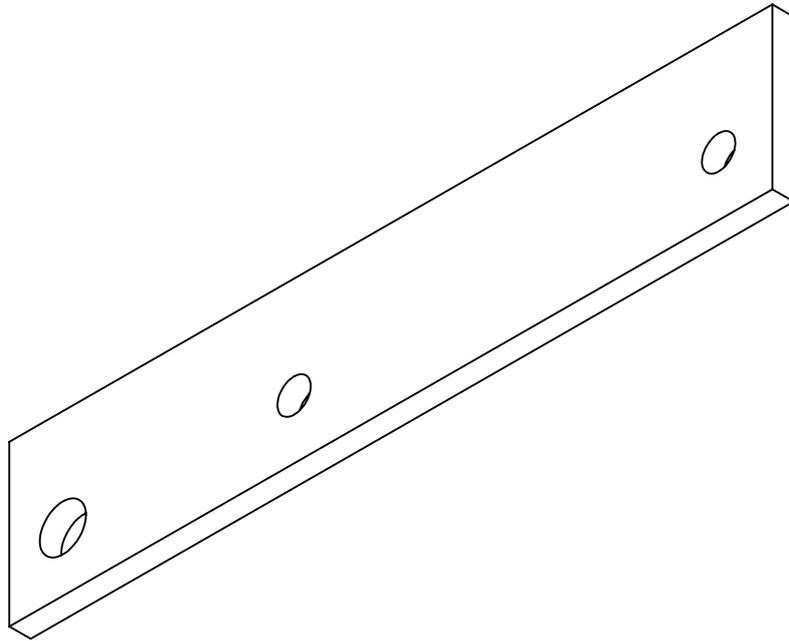
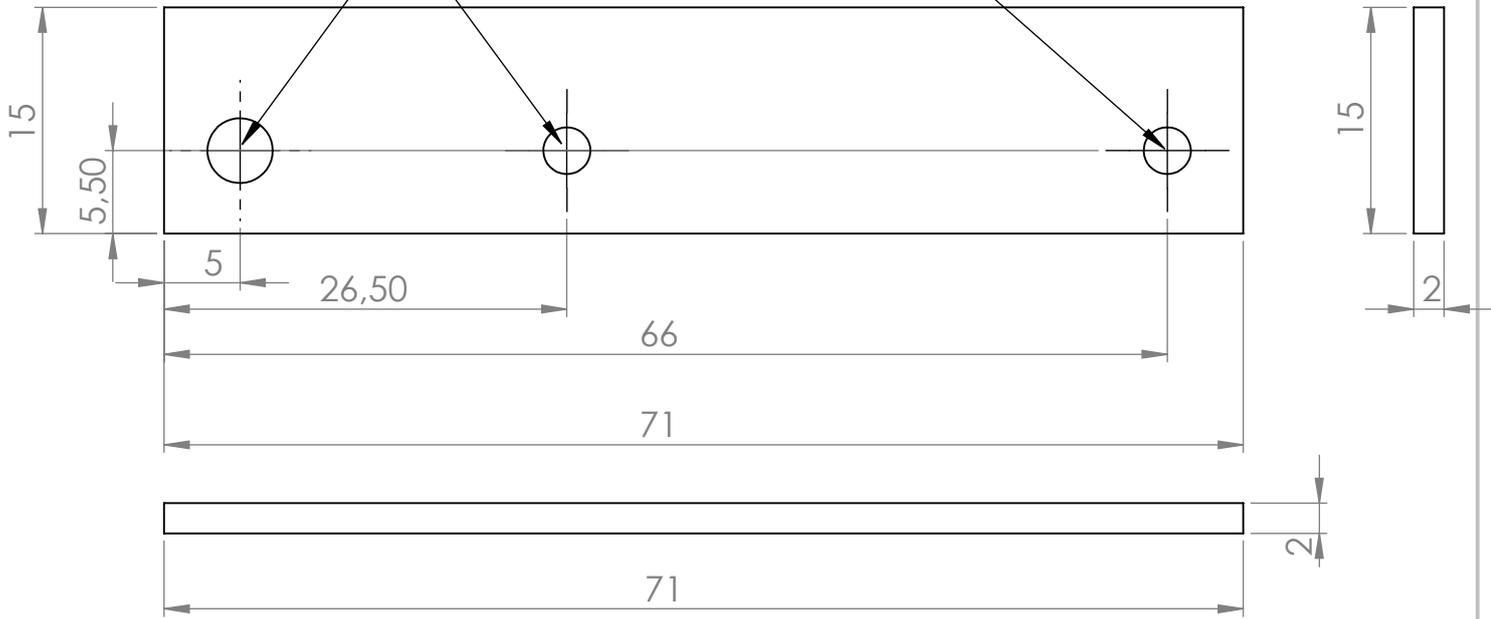
MASSSTAB:2:1

BLATT 1 VON 1

M4 Durchgangsloch, fein

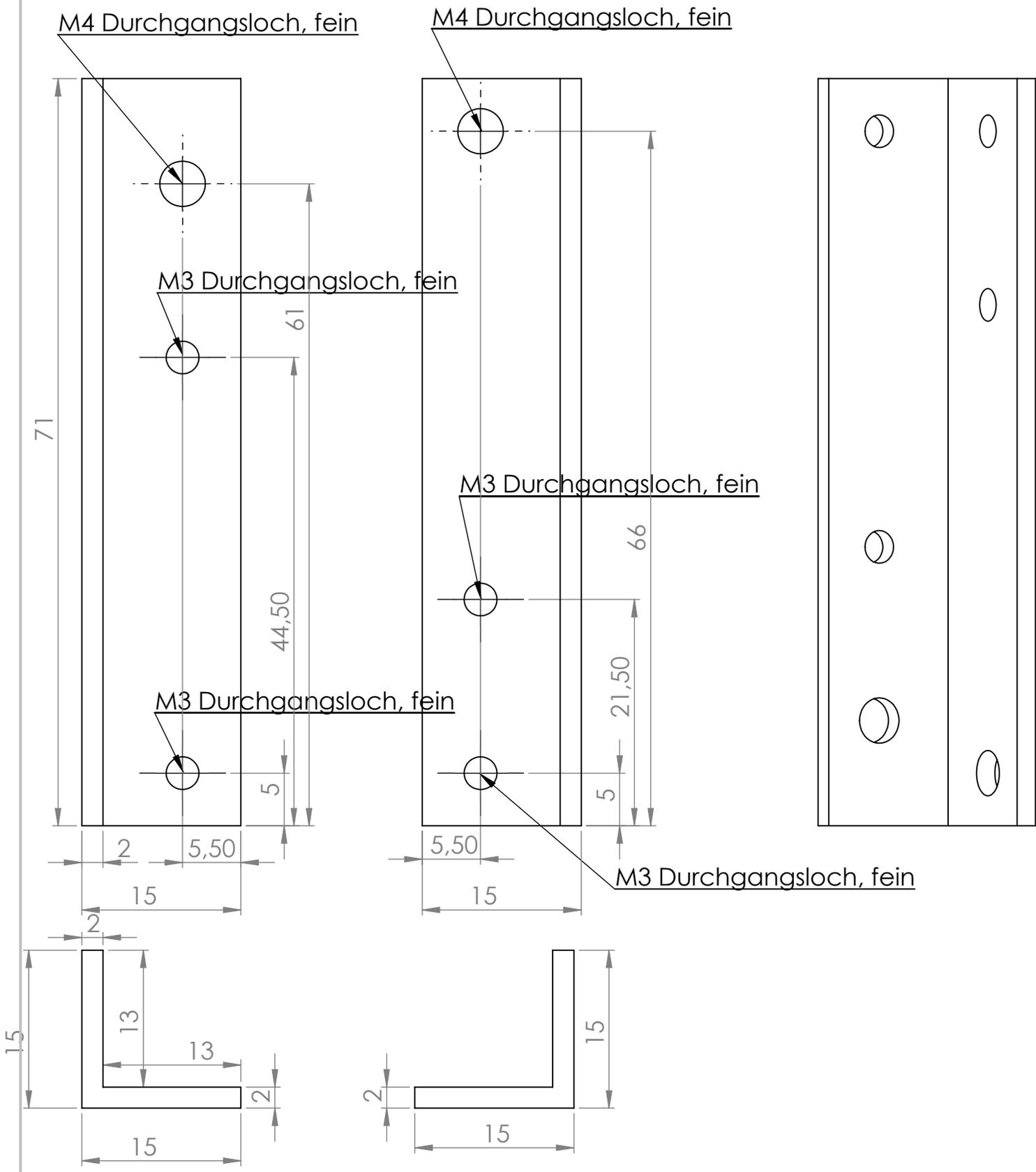
M3 Durchgangsloch, fein

M3 Durchgangsloch, fein

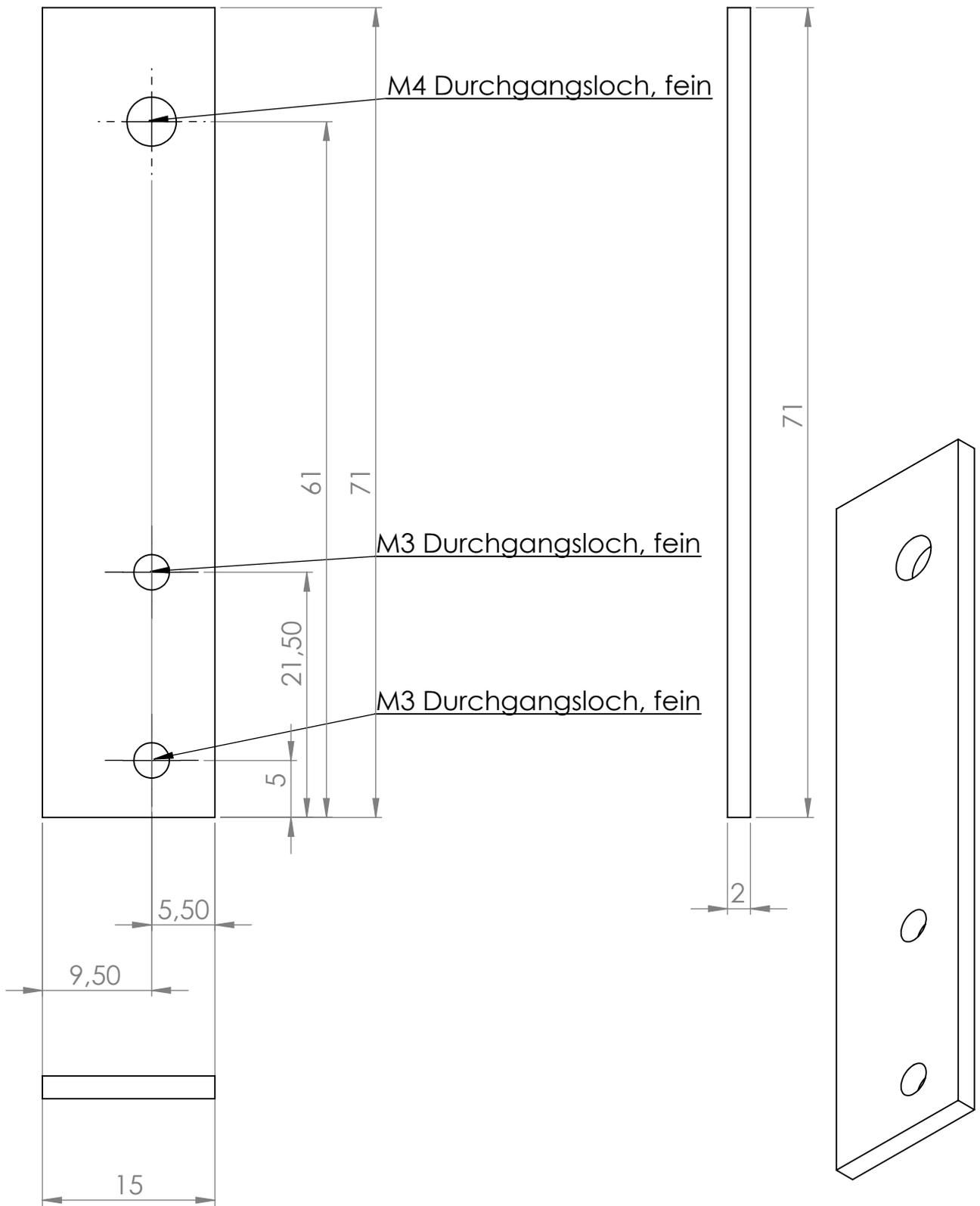


WENN NICHT ANDERS DEFINIERT: BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT: TOLERANZEN: LINEAR: WINKEL:		OBERFLÄCHENGÜTE:		ENTGRATEN UND SCHARFE KANTEN BRECHEN		ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN		ÄNDERUNG	
NAME		SIGNATUR		DATUM		BENENNUNG:			
GEZEICHNET		SIGNATUR		DATUM		BENENNUNG:			
GEPRÜFT		SIGNATUR		DATUM		BENENNUNG:			
GENEHMIGT		SIGNATUR		DATUM		BENENNUNG:			
PRODUKTION		SIGNATUR		DATUM		BENENNUNG:			
QUALITÄT		SIGNATUR		DATUM		WERKSTOFF:		ZEICHNUNGSNR:	
QUALITÄT		SIGNATUR		DATUM		WERKSTOFF:		ZEICHNUNGSNR:	
GEWICHT:		SIGNATUR		DATUM		MASSTAB:2:1		BLATT 1 VON 1	
GEWICHT:		SIGNATUR		DATUM		MASSTAB:2:1		BLATT 1 VON 1	

Rechteck-Profil_u A4



WENN NICHT ANDERS DEFINIERT: BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT: TOLERANZEN: LINEAR: WINKEL:		OBERFLÄCHENGÜTE:		ENTGRATEN UND SCHARFE KANTEN BRECHEN		ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN		ÄNDERUNG	
NAME		SIGNATUR		DATUM		BENENNUNG:			
GEZEICHNET		GEPRÜFT		GENEHMIGT		PRODUKTION			
QUALITÄT		WERKSTOFF:		ZEICHNUNGSNR.		<h1 style="text-align: center;">L-Profil</h1>		A4	
GEWICHT:		MASSSTAB:2:1		BLATT 1 VON 1					



WENN NICHT ANDERS DEFINIERT:
 BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER
 OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT:
 TOLERANZEN:
 LINEAR:
 WINKEL:

OBERFLÄCHENGÜTE:

ENTGRATEN
 UND SCHARFE
 KANTEN
 BRECHEN

ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN

ÄNDERUNG

	NAME	SIGNATUR	DATUM		
GEZEICHNET					
GEPRÜFT					
GENEHMIGT					
PRODUKTION					
QUALITÄT				WERKSTOFF:	
				GEWICHT:	

BENENNUNG:	
ZEICHNUNGSNR:	Rechteck-Profil_o
	A4
MASSSTAB:2:1	BLATT 1 VON 1

Ausleseelektronik-Halterung

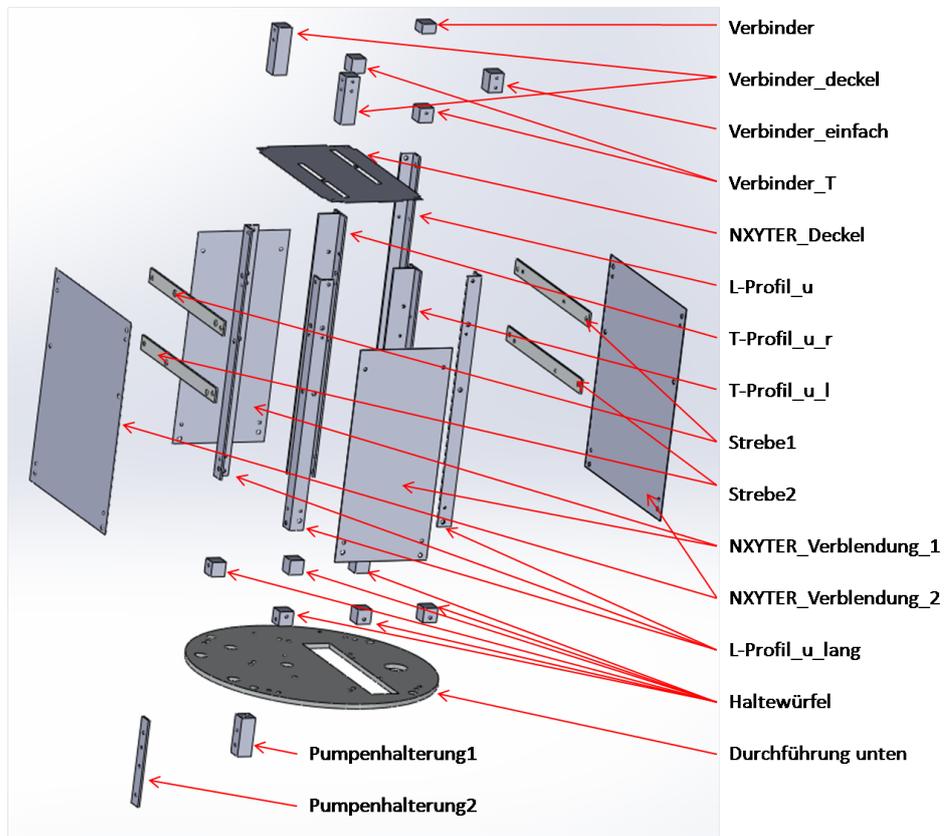
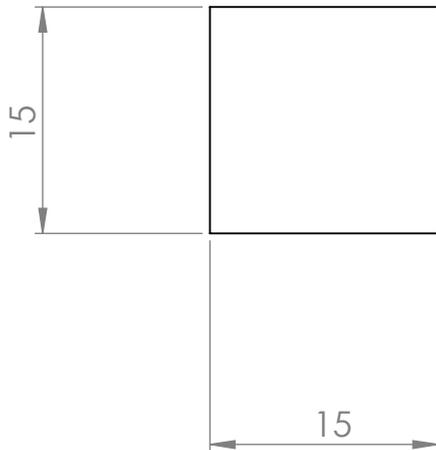
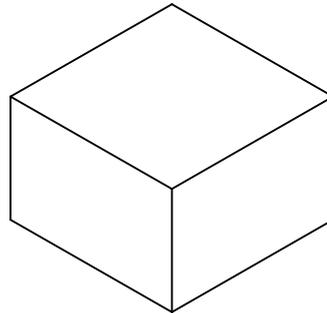
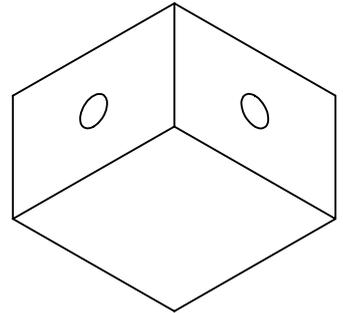
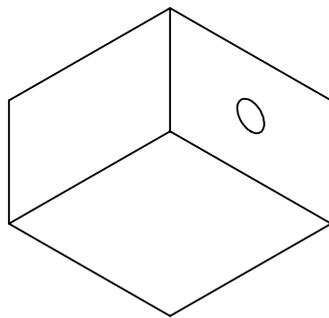
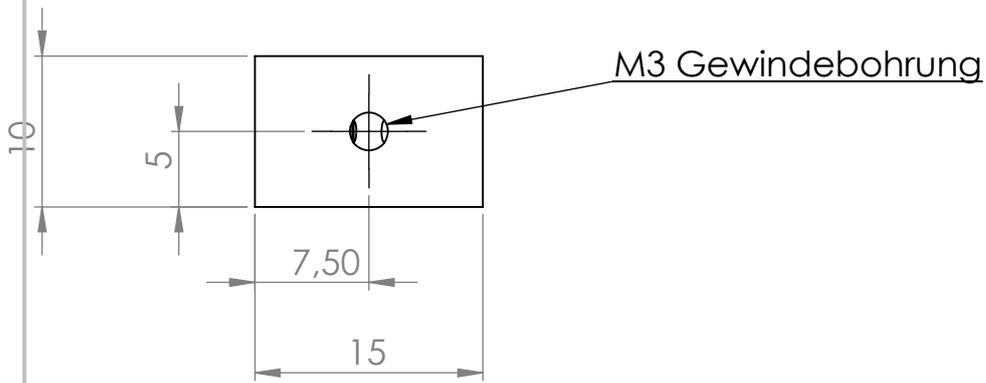
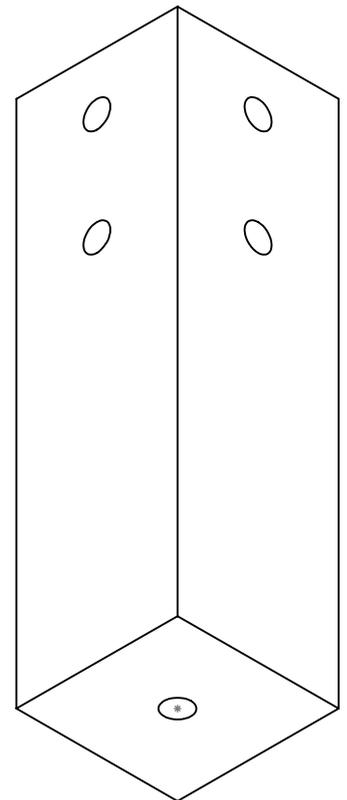
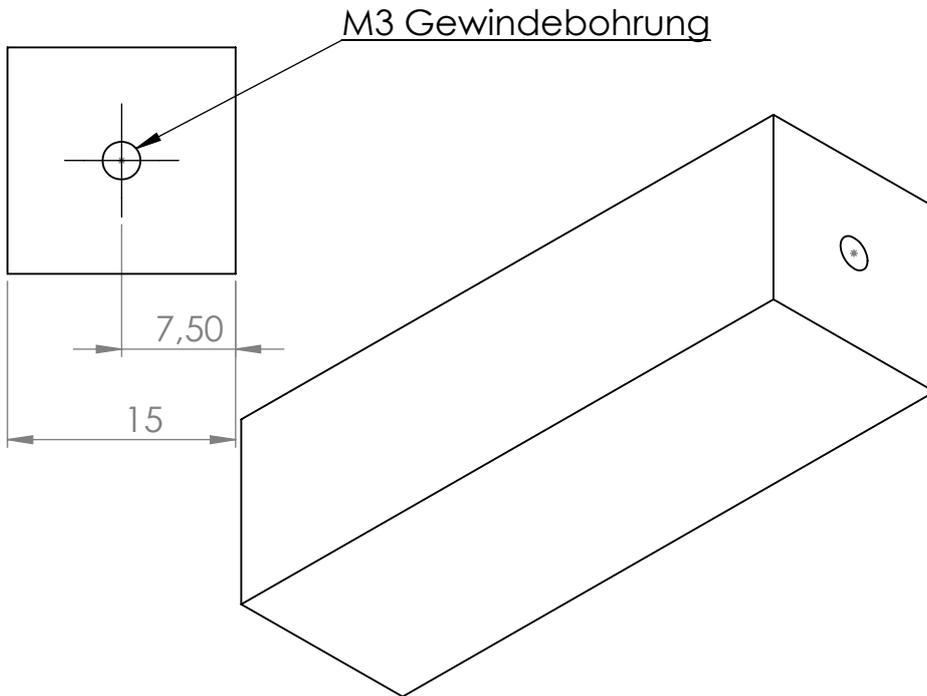
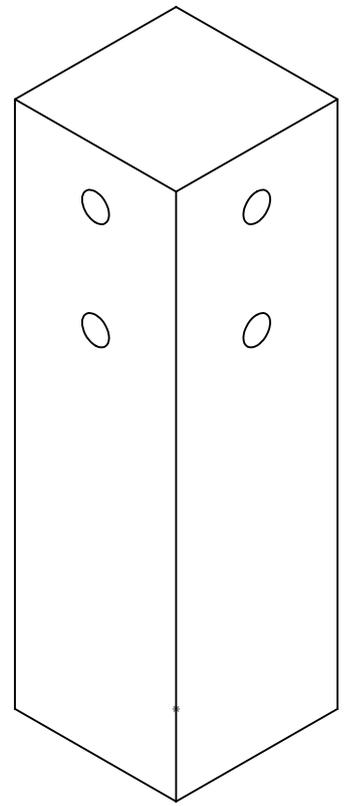
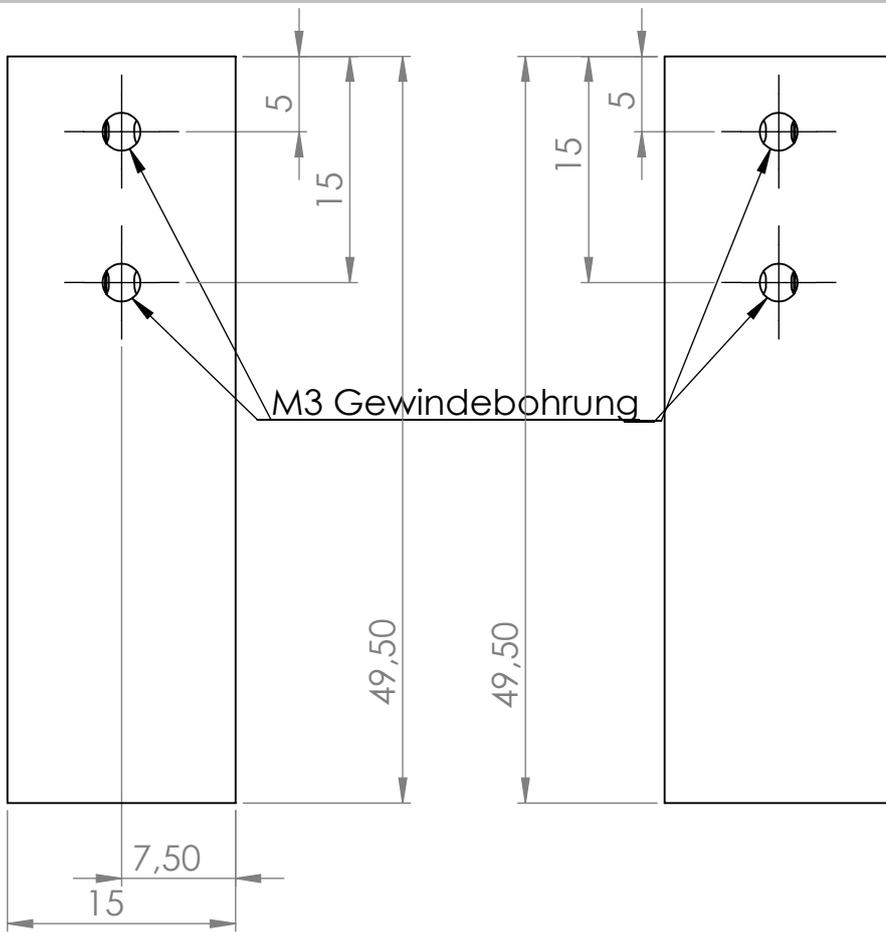


Abbildung A.3: Aufbau des Elektronik-Gehäuses mit Bezeichnung der Einzelteile.



WENN NICHT ANDERS DEFINIERT: BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT: TOLERANZEN: LINEAR: WINKEL:		OBERFLÄCHENGÜTE:		ENTGRATEN UND SCHARFE KANTEN BRECHEN		ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN		ÄNDERUNG	
NAME		SIGNATUR		DATUM		BENENNUNG:			
GEZEICHNET									
GEPRÜFT									
GENEHMIGT									
PRODUKTION									
QUALITÄT				WERKSTOFF:		ZEICHNUNGSNR.		Verbinder	
								A4	
				GEWICHT:		MASSSTAB:2:1		BLATT 1 VON 1	



WENN NICHT ANDERS DEFINIERT:
BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER
OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT:
TOLERANZEN:
LINEAR:
WINKEL:

OBERFLÄCHENGÜTE:

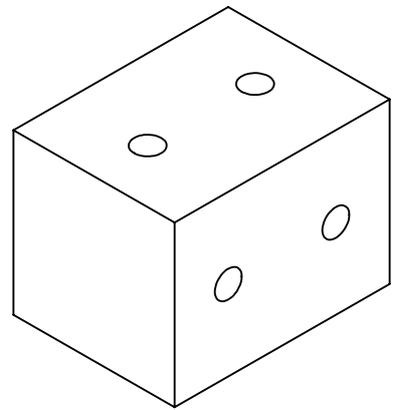
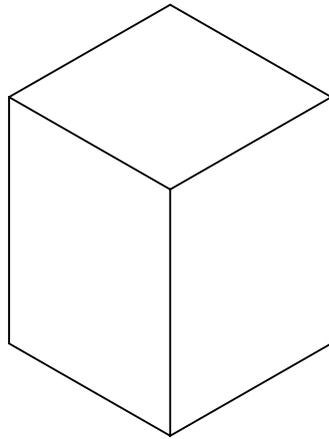
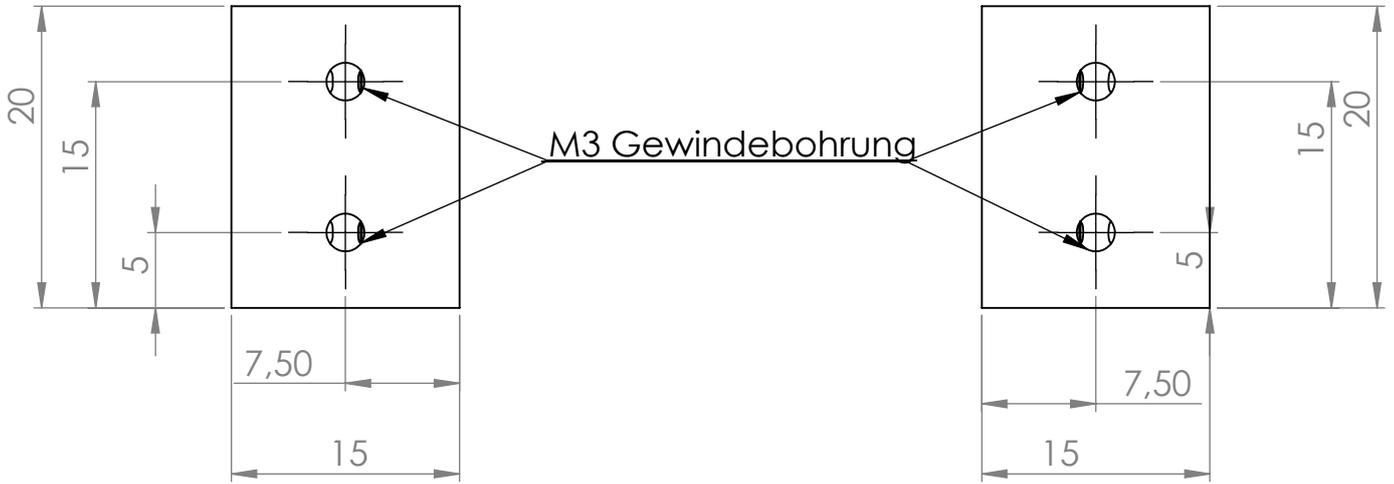
ENTGRATEN
UND SCHARFE
KANTEN
BRECHEN

ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN

ÄNDERUNG

	NAME	SIGNATUR	DATUM		
GEZEICHNET					
GEPRÜFT					
GENEHMIGT					
PRODUKTION					
QUALITÄT				WERKSTOFF:	
				GEWICHT:	

BENENNUNG:	
ZEICHNUNGSNR.	Verbinder_deckel A4
MASSTAB:2:1	BLATT 1 VON 1



WENN NICHT ANDERS DEFINIERT:
BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER
OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT:
TOLERANZEN:
LINEAR:
WINKEL:

OBERFLÄCHENGÜTE:

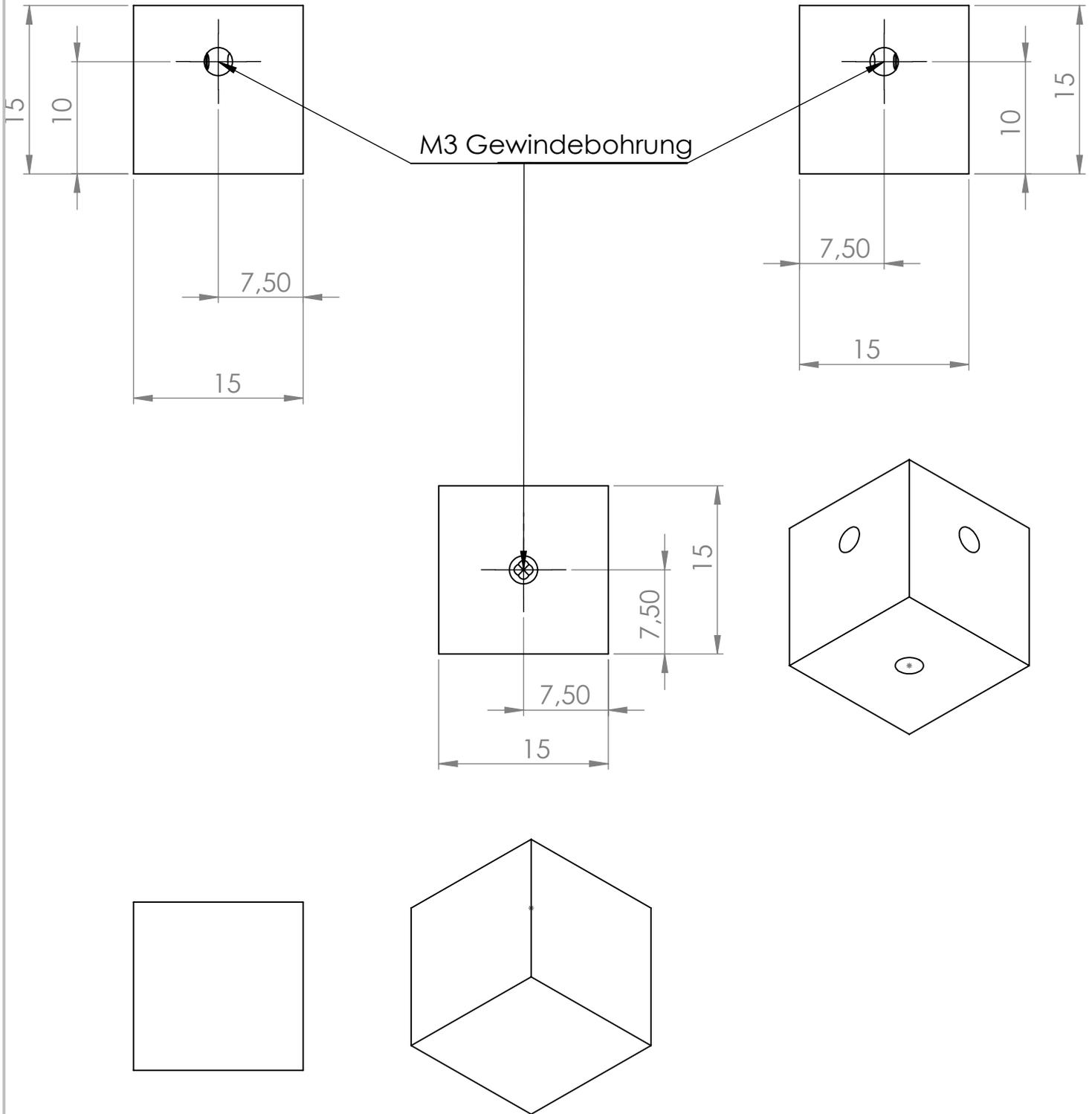
ENTGRATEN
UND SCHARFE
KANTEN
BRECHEN

ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN

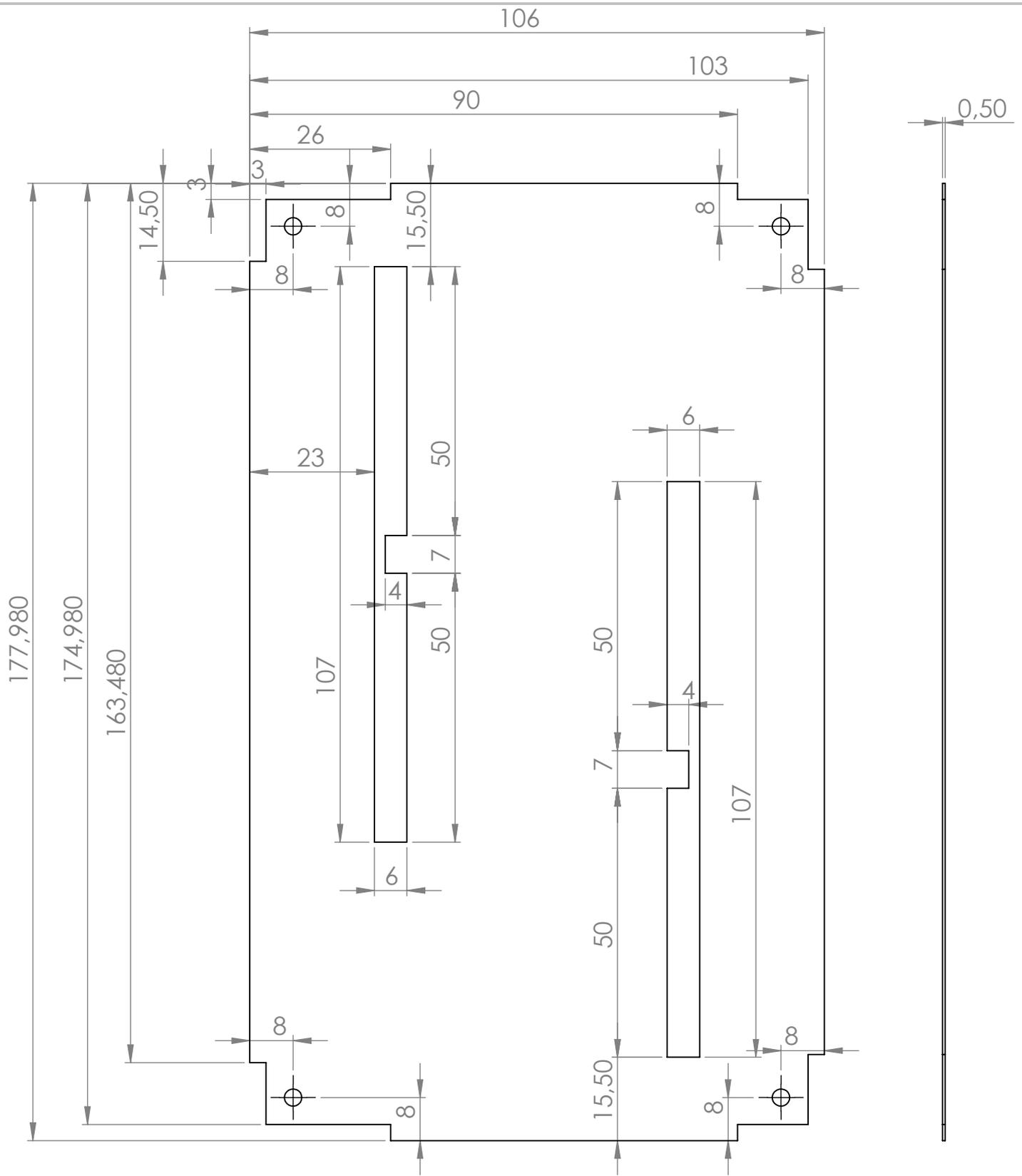
ÄNDERUNG

	NAME	SIGNATUR	DATUM		
GEZEICHNET					
GEPRÜFT					
GENEHMIGT					
PRODUKTION					
QUALITÄT				WERKSTOFF:	
				GEWICHT:	

BENENNUNG:	
ZEICHNUNGSNR:	Verbinder_einfach A4
MASSSTAB:2:1	BLATT 1 VON 1



WENN NICHT ANDERS DEFINIERT: BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT: TOLERANZEN: LINEAR: WINKEL:		OBERFLÄCHENGÜTE:		ENTGRATEN UND SCHARFE KANTEN BRECHEN		ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN		ÄNDERUNG	
NAME		SIGNATUR		DATUM		BENENNUNG:			
GEZEICHNET		GEPRÜFT		GENEHMIGT		PRODUKTION			
QUALITÄT		WERKSTOFF:		ZEICHNUNGSNR.		Verbinder_T		A4	
GEWICHT:		MASSSTAB:2:1		BLATT 1 VON 1					



Alle Bohrungen M3 Durchgangsloch

WENN NICHT ANDERS DEFINIERT:
BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER
OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT:
TOLERANZEN:
LINEAR:
WINKEL:

OBERFLÄCHENGÜTE:

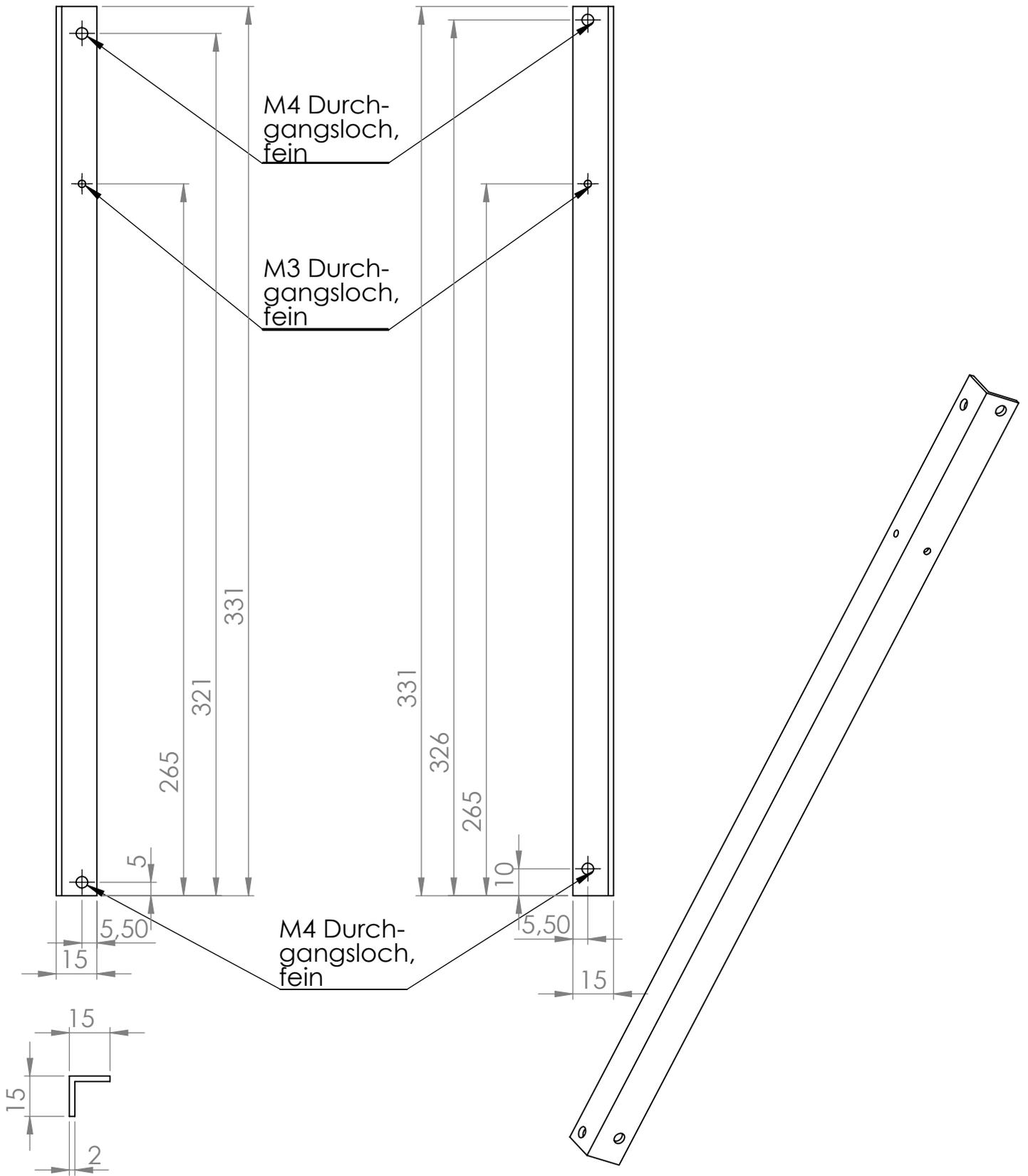
ENTGRATEN
UND SCHARFE
KANTEN
BRECHEN

ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN

ÄNDERUNG

NAME	SIGNATUR	DATUM	WERKSTOFF:
GEZEICHNET			
GEPRÜFT			
GENEHMIGT			
PRODUKTION			
QUALITÄT			
			GEWICHT:

BENENNUNG:	<p>ZEICHNUNGSNR. NXYTER_Deckel</p>	<p>A4</p>
MASSSTAB: 1:1		



WENN NICHT ANDERS DEFINIERT:
 BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER
 OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT:
 TOLERANZEN:
 LINEAR:
 WINKEL:

OBERFLÄCHENGÜTE:

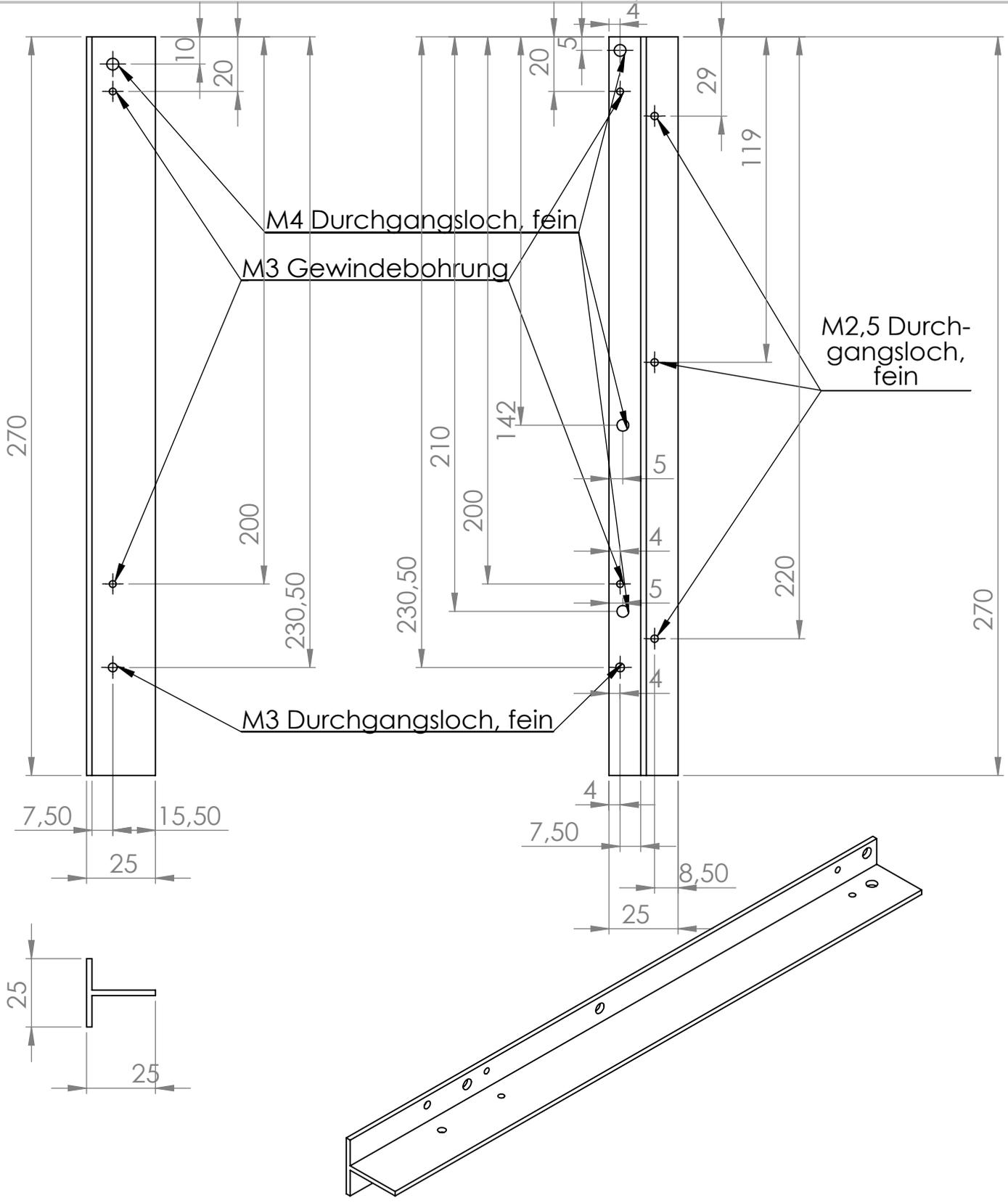
ENTGRATEN
 UND SCHARFE
 KANTEN
 BRECHEN

ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN

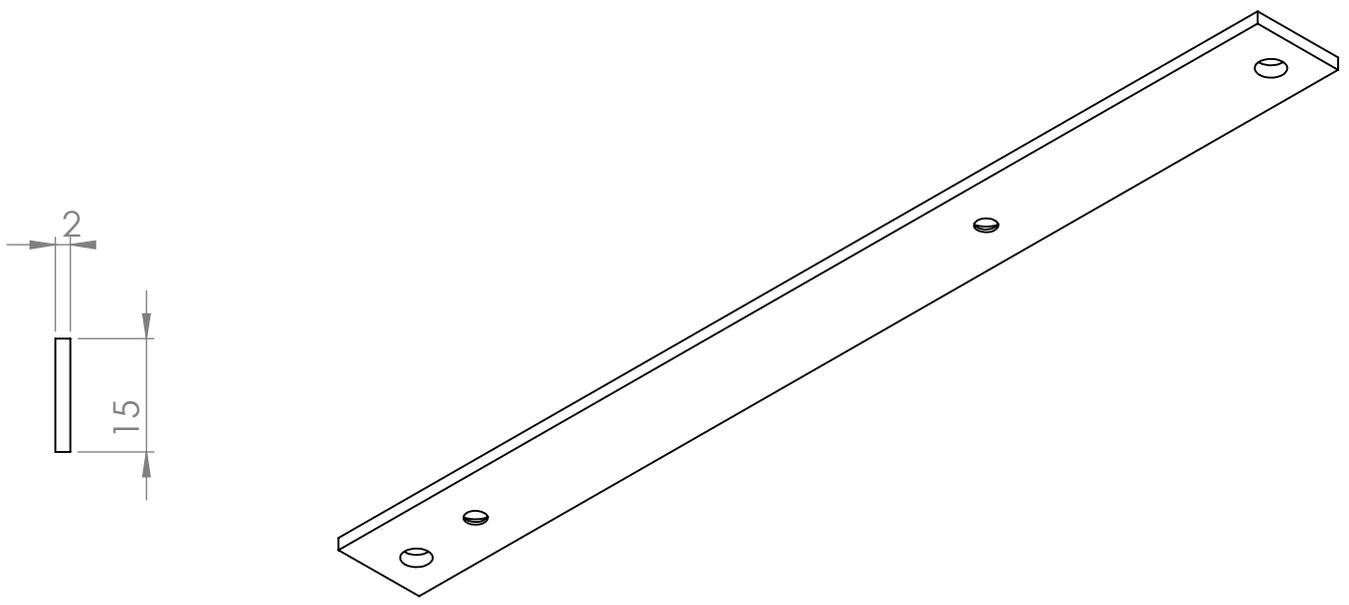
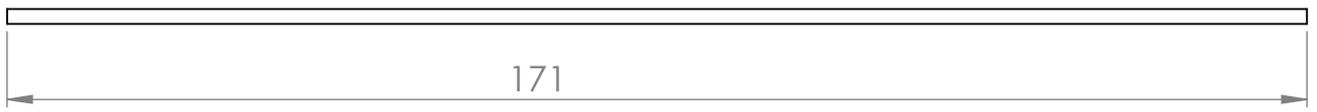
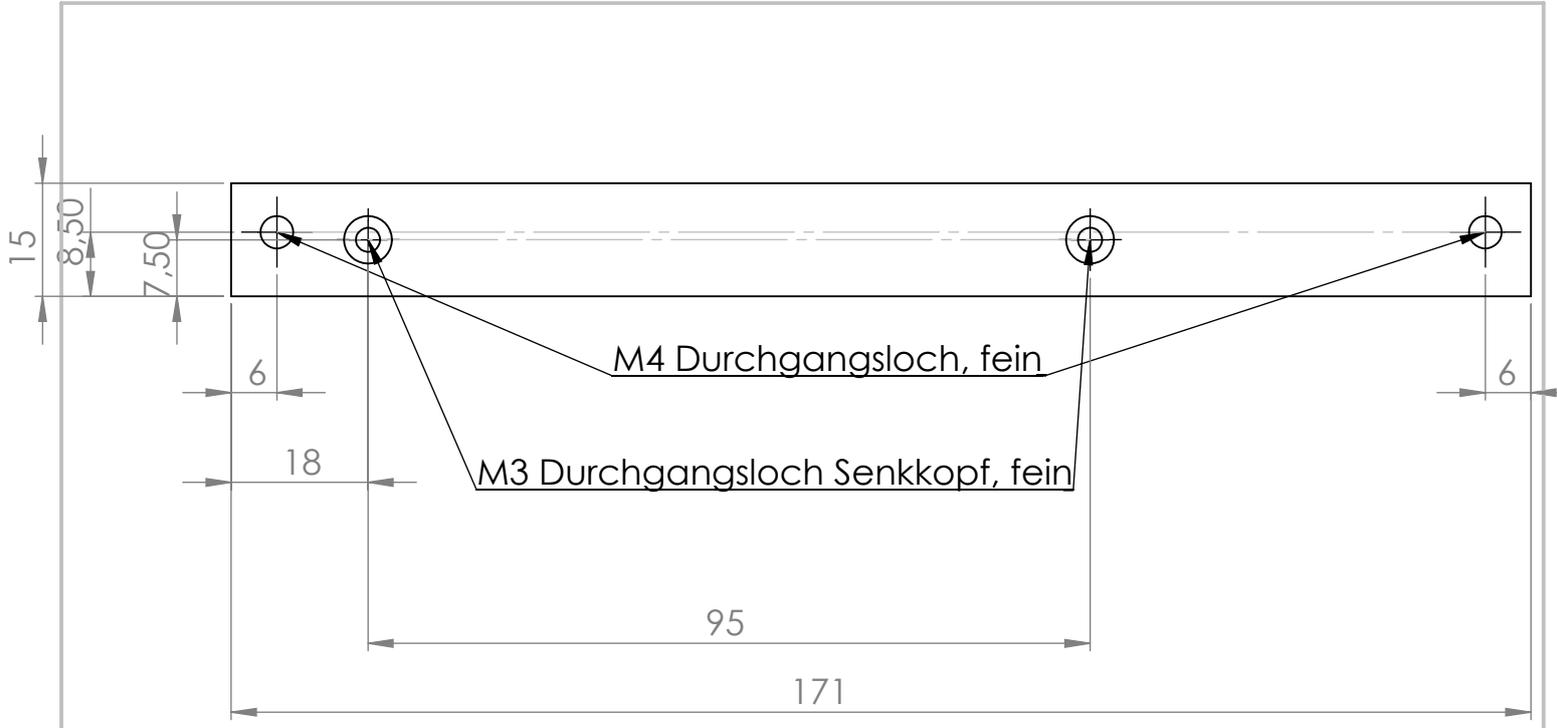
ÄNDERUNG

NAME	SIGNATUR	DATUM		
GEZEICHNET				
GEPRÜFT				
GENEHMIGT				
PRODUKTION				
QUALITÄT			WERKSTOFF:	
			GEWICHT:	

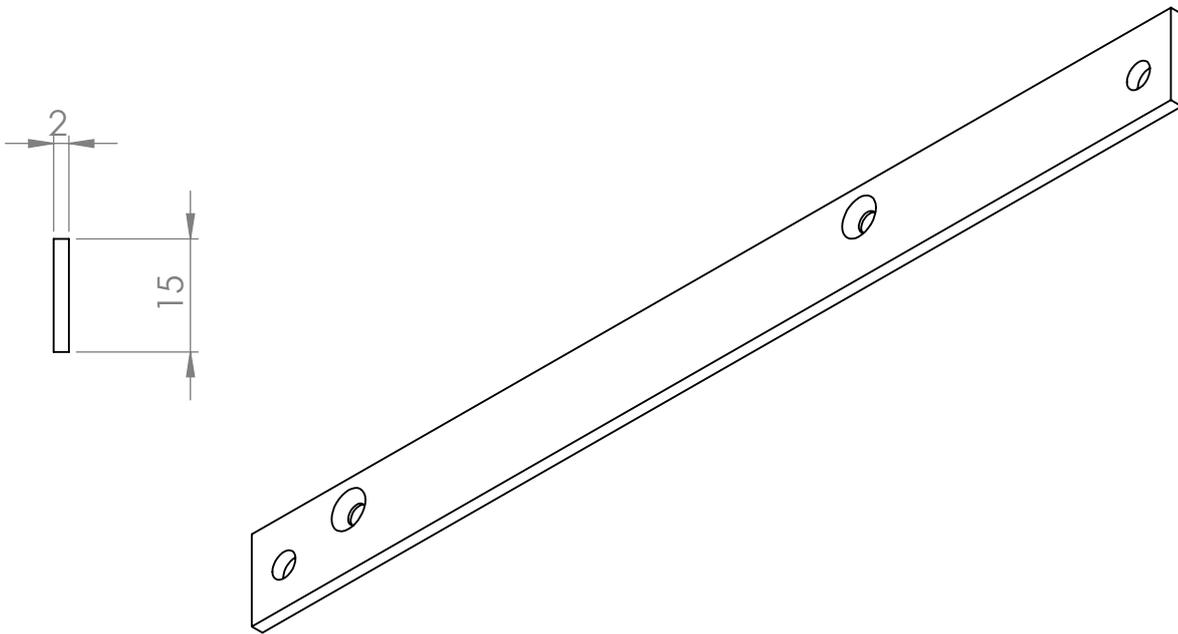
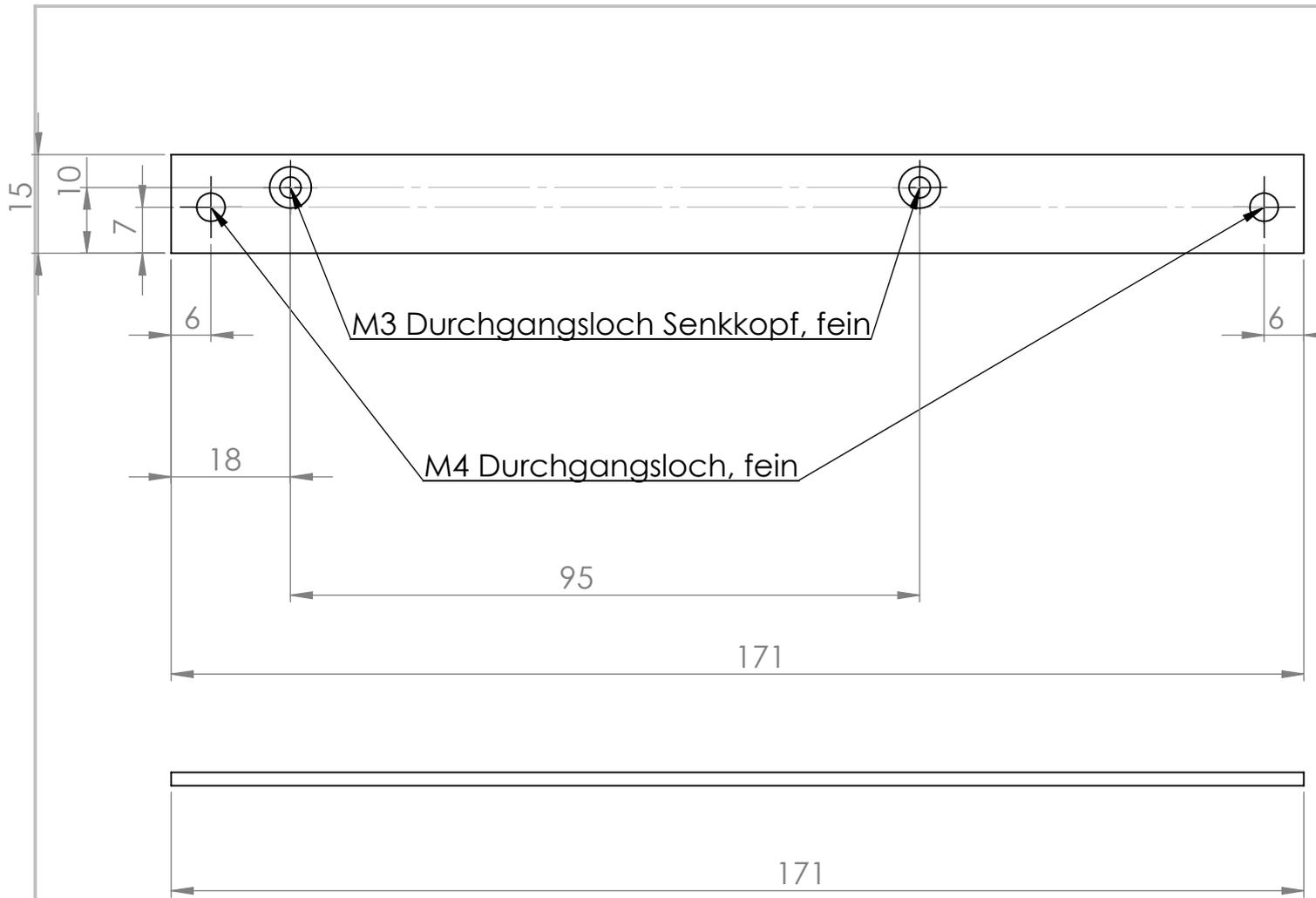
BENENNUNG:	
ZEICHNUNGSNR.	L-Profil_u
MASSTAB: 1:2	BLATT 1 VON 1
	A4



WENN NICHT ANDERS DEFINIERT: BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT: TOLERANZEN: LINEAR: WINKEL:		OBERFLÄCHENGÜTE:		ENTGRATEN UND SCHARFE KANTEN BRECHEN		ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN		ÄNDERUNG	
NAME		SIGNATUR		DATUM		BENENNUNG:			
GEZEICHNET									
GEPRÜFT									
GENEHMIGT									
PRODUKTION									
QUALITÄT				WERKSTOFF:		ZEICHNUNGSNR.		T-Profil_u_r	
						MASSSTAB: 1:2		A4	
				GEWICHT:		BLATT 1 VON 1			



WENN NICHT ANDERS DEFINIERT: BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT: TOLERANZEN: LINEAR: WINKEL:		OBERFLÄCHENGÜTE:		ENTGRATEN UND SCHARFE KANTEN BRECHEN		ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN		ÄNDERUNG	
NAME		SIGNATUR		DATUM		BENENNUNG:			
GEZEICHNET		GEPRÜFT		GENEHMIGT		ZEICHNUNGSNR.			
PRODUKTION		QUALITÄT		WERKSTOFF:		Streben 1			
GEWICHT:		MASSSTAB: 1:1		BLATT 1 VON 1		A4			



WENN NICHT ANDERS DEFINIERT:
BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER
OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT:
TOLERANZEN:
LINEAR:
WINKEL:

OBERFLÄCHENGÜTE:

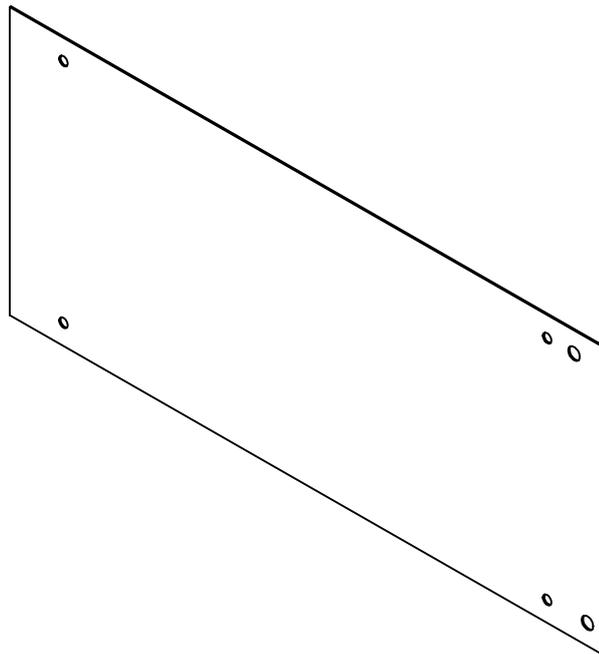
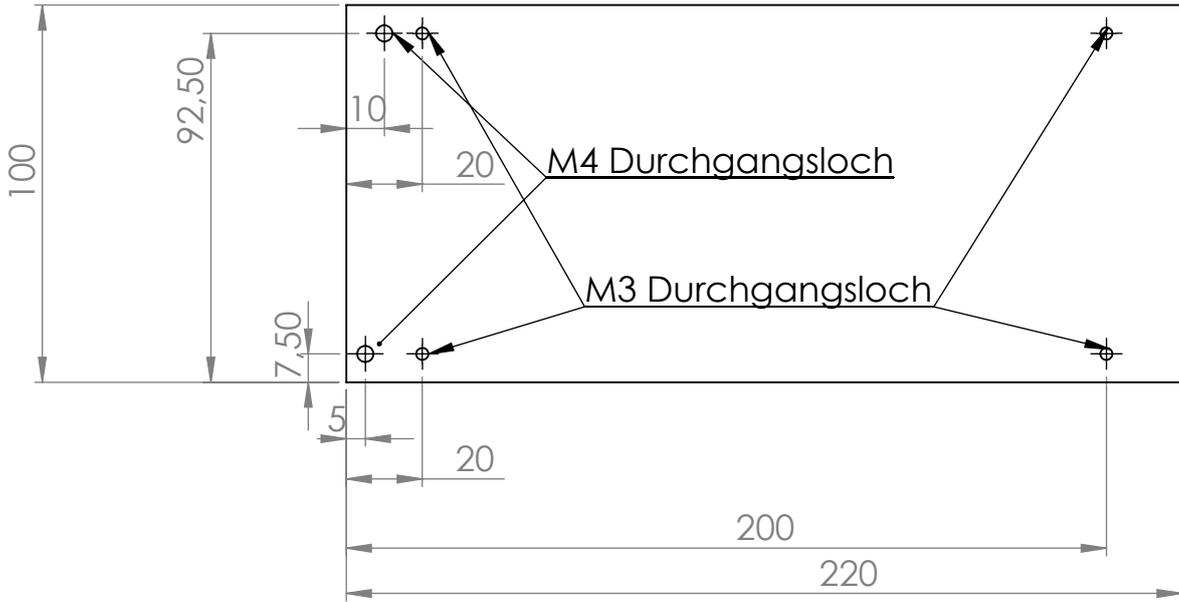
ENTGRATEN
UND SCHARFE
KANTEN
BRECHEN

ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN

ÄNDERUNG

	NAME	SIGNATUR	DATUM		
GEZEICHNET					
GEPRÜFT					
GENEHMIGT					
PRODUKTION					
QUALITÄT				WERKSTOFF:	
				GEWICHT:	

BENENNUNG:		
ZEICHNUNGSNR.	Streben2	A4
MASSSTAB: 1:1	BLATT 1 VON 1	



WENN NICHT ANDERS DEFINIERT:
BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER
OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT:
TOLERANZEN:
LINEAR:
WINKEL:

OBERFLÄCHENGÜTE:

ENTGRATEN
UND SCHARFE
KANTEN
BRECHEN

ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN

ÄNDERUNG

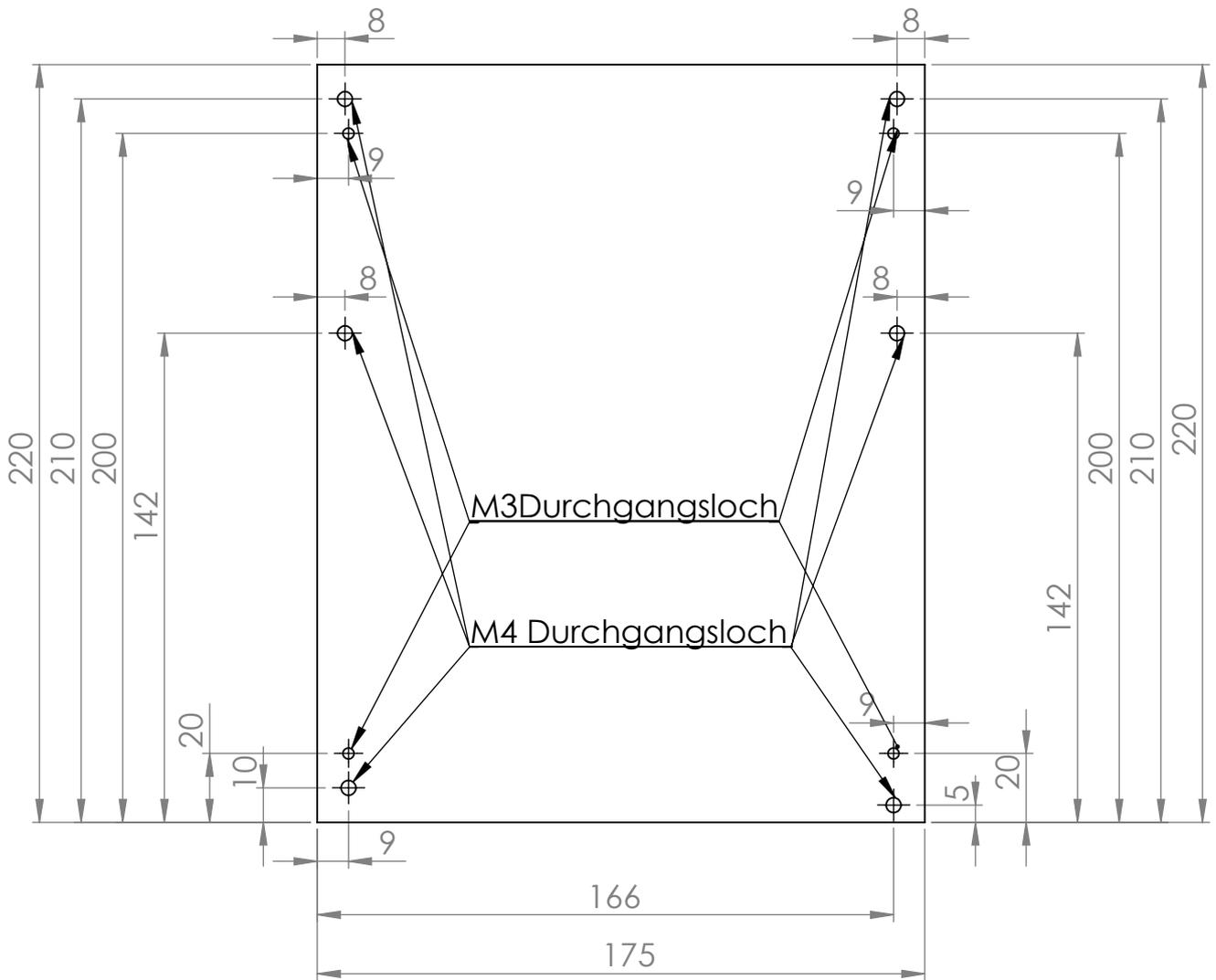
	NAME	SIGNATUR	DATUM		
GEZEICHNET					
GEPRÜFT					
GENEHMIGT					
PRODUKTION					
QUALITÄT				WERKSTOFF:	
				GEWICHT:	

BENENNUNG:

ZEICHNUNGSNR: **NXYTER_Verblendung_A41**

MASSSTAB: 1:2

BLATT 1 VON 1



WENN NICHT ANDERS DEFINIERT:
BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER
OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT:
TOLERANZEN:
LINEAR:
WINKEL:

OBERFLÄCHENGÜTE:

ENTGRATEN
UND SCHARFE
KANTEN
BRECHEN

ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN

ÄNDERUNG

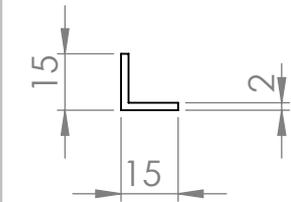
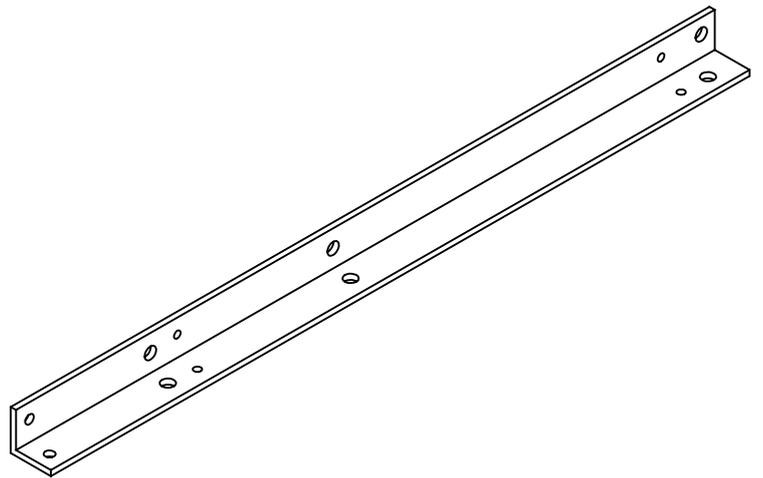
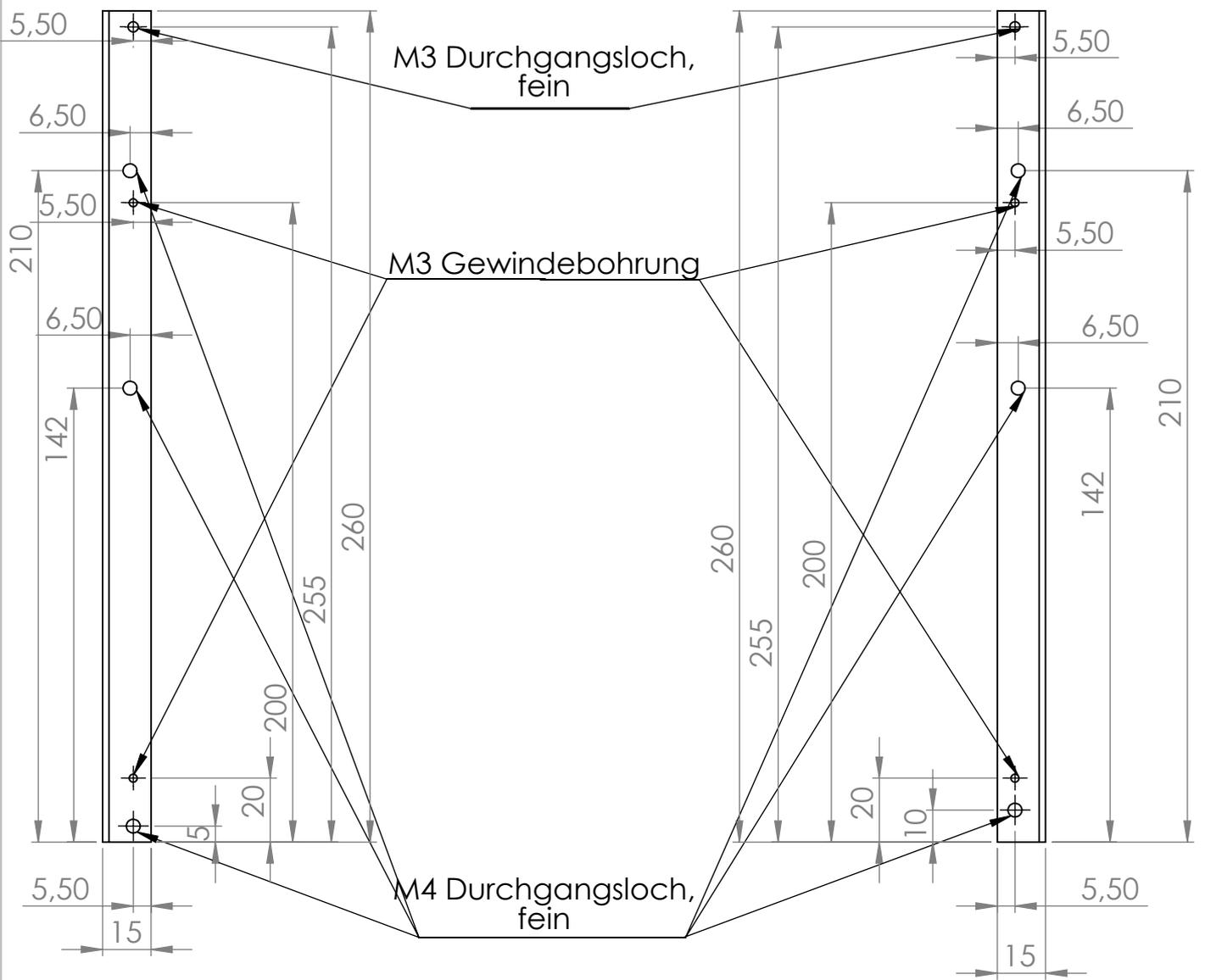
	NAME	SIGNATUR	DATUM		
GEZEICHNET					
GEPRÜFT					
GENEHMIGT					
PRODUKTION					
QUALITÄT				WERKSTOFF:	
				GEWICHT:	

BENENNUNG:

ZEICHNUNGSNR. NXYTER_Verblendung_A4_2

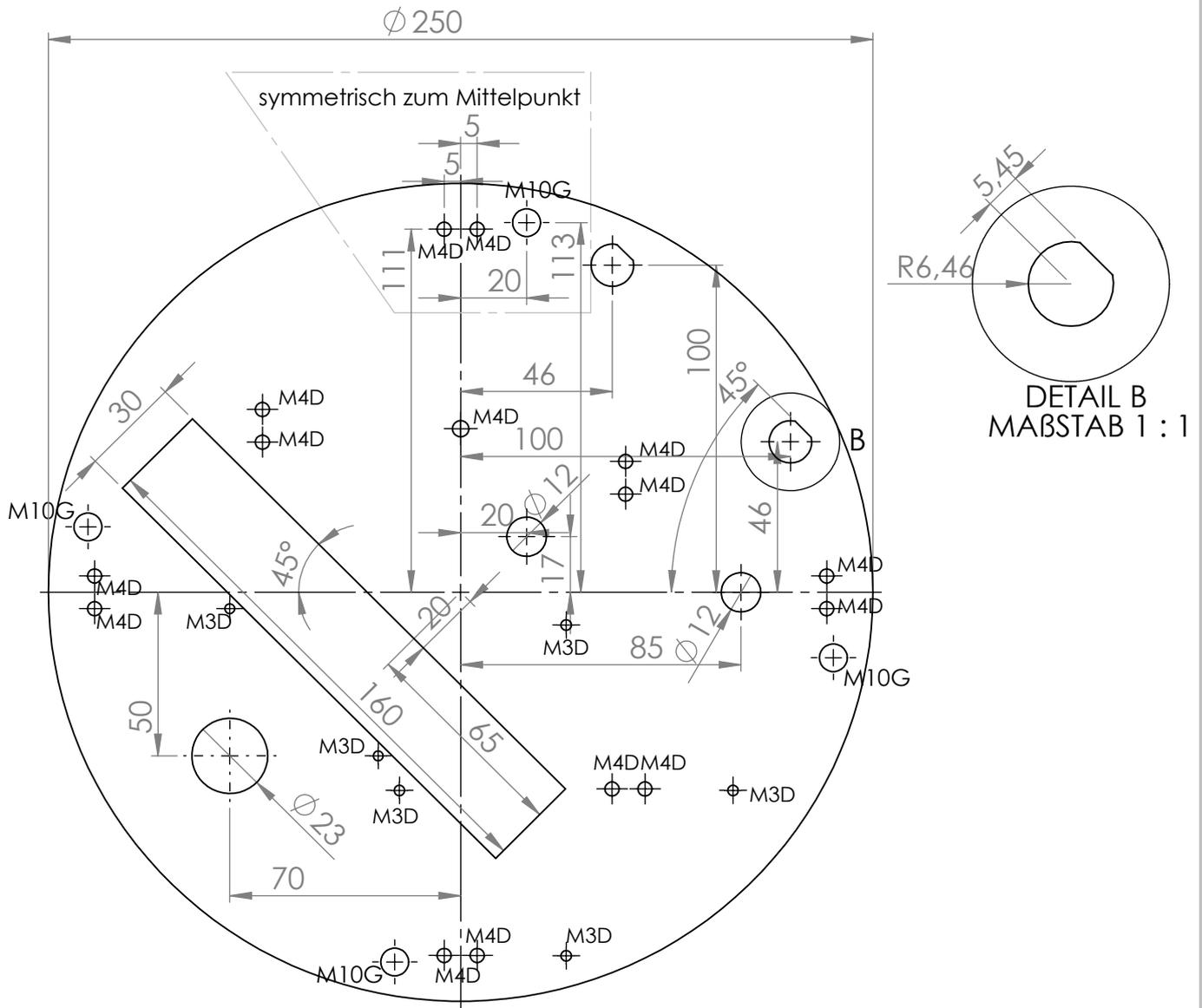
MASSSTAB: 1:2

BLATT 1 VON 1

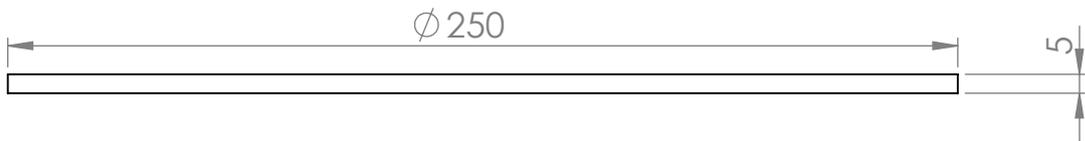


WENN NICHT ANDERS DEFINIERT: BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT: TOLERANZEN: LINEAR: WINKEL:		OBERFLÄCHENGÜTE:		ENTGRATEN UND SCHARFE KANTEN BRECHEN		ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN		ÄNDERUNG	
NAME		SIGNATUR		DATUM		BENENNUNG:			
GEZEICHNET		GEPÜFT		GENEHMIGT		ZEICHNUNGSNR.			
PRODUKTION		QUALITÄT		WERKSTOFF:		L-Profil_u_lang			
GEWICHT:		MASSSTAB: 1:2		BLATT 1 VON 1		A4			

Unten

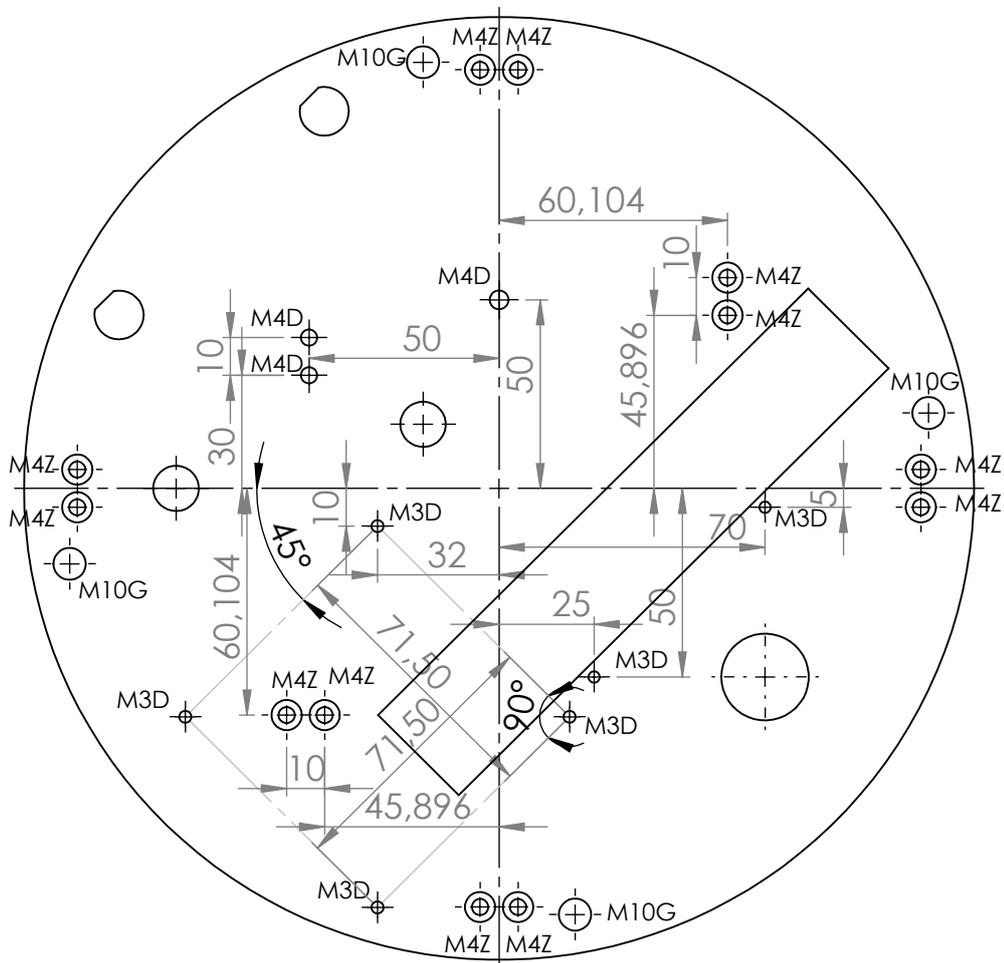


M4D M4 Durchgangsloch
 M10G... M10 Gewindebohrung
 M3D M3 Durchgangsloch



WENN NICHT ANDERS DEFINIERT: BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT: TOLERANZEN: LINEAR: WINKEL:		OBERFLÄCHENGÜTE:		ENTGRATEN UND SCHARFE KANTEN BRECHEN		ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN		ÄNDERUNG	
NAME		SIGNATUR		DATUM		BENENNUNG:			
GEZEICHNET		GEPRÜFT		GENEHMIGT		PRODUKTION			
QUALITÄT		WERKSTOFF:		ZEICHNUNGSNR.		Durchführungen unten			
GEWICHT:		MASSSTAB: 1:2		BLATT 1 VON 2		A4			

Oben



M4D M4 Durchgangsloch
 M4Z M4 Zylinderkopf
 M10G... M10 Gewindebohrung
 M3D M3 Durchgangsloch

WENN NICHT ANDERS DEFINIERT:
 BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER
 OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT:
 TOLERANZEN:
 LINEAR:
 WINKEL:

OBERFLÄCHENGÜTE:

ENTGRATEN
 UND SCHARFE
 KANTEN
 BRECHEN

ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN

ÄNDERUNG

	NAME	SIGNATUR	DATUM		
GEZEICHNET					
GEPRÜFT					
GENEHMIGT					
PRODUKTION					
QUALITÄT				WERKSTOFF:	
				GEWICHT:	

BENENNUNG:

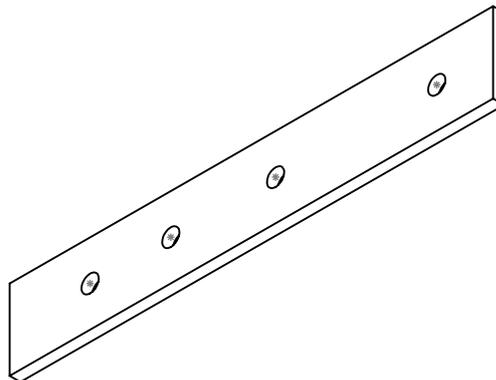
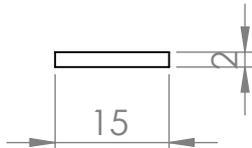
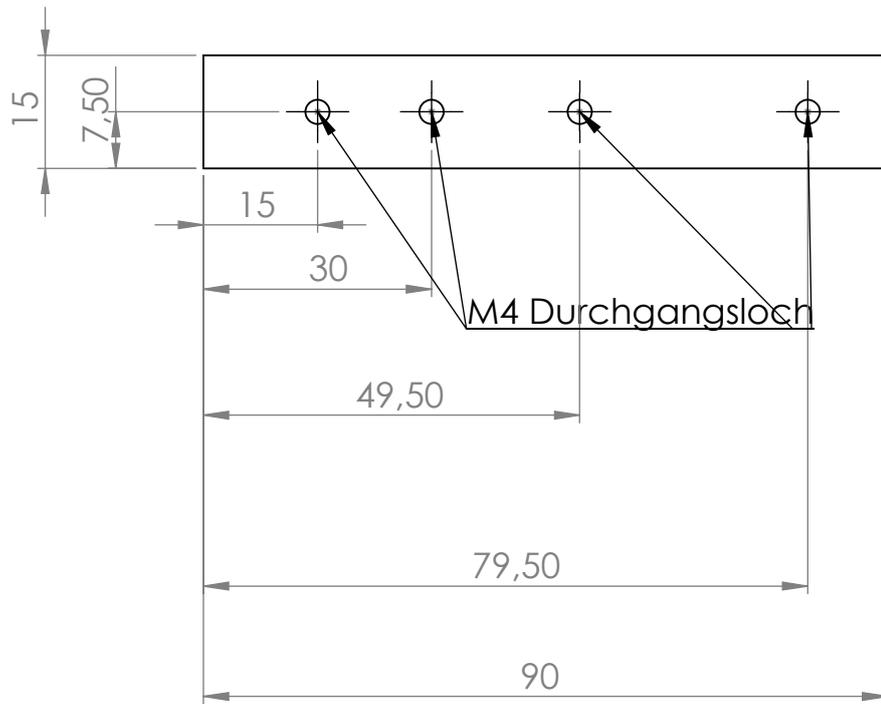
ZEICHNUNGSNR.

Durchführungen unten

A4

MASSSTAB: 1:2

BLATT 2 VON 2



WENN NICHT ANDERS DEFINIERT:
BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER
OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT:
TOLERANZEN:
LINEAR:
WINKEL:

OBERFLÄCHENGÜTE:

ENTGRATEN
UND SCHARFE
KANTEN
BRECHEN

ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN

ÄNDERUNG

	NAME	SIGNATUR	DATUM		
GEZEICHNET					
GEPRÜFT					
GENEHMIGT					
PRODUKTION					
QUALITÄT				WERKSTOFF:	
				GEWICHT:	

BENENNUNG:	
ZEICHNUNGSNR.	Pumpenhalterung ² A4
MASSSTAB: 1:1	BLATT 1 VON 1

Literaturverzeichnis

- [Alc14] ALCATEL, Vacuum Technology F.: *ASM 310 PORTABLE HELIUM LEAK DETECTOR*, 2014
- [All11] ALLMENDINGER, Fabian: *Weiterentwicklung des CASCADE-MIEZE-Detektors und dessen Integration in RESEDA*, Physikalisches Institut Heidelberg, Diplomarbeit, 2011
- [alp14] ALPHACAM, GmbH: *Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer AB-Plus Materialeigenschaften*, 2014
- [Atm11] ATMEL (Hrsg.): *8-bit AVR Microcontroller with 4/8K Bytes In-System Programmable Flash, ATtiny48/88*. Atmel, 2011
- [BB30] BOTHE, W. ; BECKER, H.: Künstliche Erregung von Kern- γ -Strahlen. In: *Zeitschrift für Physik* 66 (1930), Nr. 5-6, S. 289–306. – ISSN 0044–3328
- [BBD⁺06] BROGNA, A.S. ; BUZZETTI, S. ; DABROWSKI, W. ; FIUTOWSKI, T. ; GEBAUER, B. ; KLEIN, M. ; SCHMIDT, C.J. ; SOLVEIT, H.K. ; SZCZYGIEL, R. ; TRUNK, U.: N-XYTER, a CMOS read-out ASIC for high resolution time and amplitude measurements on high rate multi-channel counting mode neutron detectors. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 568 (2006)
- [Ber12] BERINGER, J. et al.: Particle Data Group. In: *Phys. Rev. D* 86, 010001 (2012). – and 2013 partial update for the 2014 edition
- [Ble03] BLEUEL, Markus: *Aufbau des Neutronen-Resonanz-Spinecho-Spektrometers RESEDA am FRM-II*, Technischen Universität München, Diss., 2003
- [BSS⁺09] BUZZETTI, A.S. Brogna S. ; SCHMIDT, C.J. ; SOLTVEIT, H.K. ; TRUNK, U. ; DABROWSKI, W. ; FIUTOWSKI, T. ; SZCZYGIEL, R. ; WIACEK, P.: *The n-XYTER Reference Manual*. 2009

- [Cha32] CHADWICK, J: Possible Existence of a Neutron. In: *Nature* 129 (1932), Nr. 3252, S. 312–312. – ISSN 0028–0836 ; 1476–4687
- [Cpe07] CPEANS, M.: *Aging of Gaseous Detectors: assembly materials and procedures*. 2007. – CERN
- [Eme03] EMERSON&CUMING: *STYCAST®1266 A/B Two Component, Low Viscosity, Epoxy Encapsulant*, 2003
- [Ens11] ENSINGER, GmbH: *Technische Kunststoffe - Das Handbuch*, 2011
- [Fri07] FRIEDRICH, Hermann: *Charakterisierung und Weiterentwicklung des CASCADE-Detektors*, Physikalisches Institut Heidelberg, Diplomarbeit, 2007
- [FTD10] FTDI, Ltd: *Application Note AN_130 FT2232H Used In An FT245 Style Synchronous FIFO Mode*, 2010
- [FTD12a] FTDI, Ltd: *FT2232H Dual High Speed USB to Multipurpose UART/FIFO IC*, 2012
- [FTD12b] FTDI, Ltd: *Software Application Development D2XX Programmer's Guide*. 1.3, 2012
- [GG87] GÄHLER, R ; GOLUB, R: A high resolution neutron spectrometer for quasielastic scattering on the basis of spin-echo and magnetic resonance. In: *Zeitschrift für Physik B Condensed Matter* 65 (1987). – ISSN 0722–3277 ; 1434–6036
- [GGK92] GÄHLER, R ; GOLUB, R ; KELLER, T: Neutron resonance spin echo - a new tool for high resolution spectroscopy. In: *Physica B: Physics of Condensed Matter* 180 (1992). – ISSN 0921–4526 ; 1873–2135
- [Got13] GOTTSCHALK, Dirk: *DL711 Xilinx Spartan 6 LogicBox User Manual*. 2013. – V0.11
- [Gro09] GROITL, Felix: *MIEZE mit dem CASCADE-Detektor*, Physikalisches Institut Heidelberg, Diplomarbeit, 2009
- [HHK⁺09] HAYASHIDA, Hirotoishi ; HINO, Masahiro ; KITAGUCHI, Masaaki ; ACHIWA, Norio ; KAWABATA, Yuji: A new MIEZE technique for investigating relaxation of magnetic nanoparticles. In: *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A* 600 (2009). – ISSN 0168–9002 ; 1872–9576

- [Hin05] HINDERER, Werner: *Der 2D-CASCADE Neutronendetektor und seine Auslese*, Physikalisches Institut Heidelberg, Diss., 2005
- [HUB13] HUBER+SUHNER, AG: *DATA SHEET Coaxial Panel Connector: 22_SHV-50-0-3/100_N*, 2013
- [Hun11] HUNKLINGER, Siegfried: *Festkörperphysik. 3.*, verb. und aktualisierte Aufl. München : Oldenbourg, 2011
- [Käs13] KÄSTNER, Marcel: *Entwicklung und Design eines Beammonitors für das PERC Experiment und Entwicklung einer VHDL-Firmware zur Inbetriebnahme des n-XYTER Auslesechips*, Physikalisches Institut Heidelberg, Diplomarbeit, 2013
- [Kle] KLEIN, Martin: *private Kommunikation*
- [Kle00] KLEIN, Martin O.: *Experimente zur Quantenmechanik mit ultrakalten Neutronen und Entwicklung eines neuen Detektors zum orts aufgelösten Nachweis von thermischen Neutronen auf großen Flächen*, Physikalisches Institut Heidelberg, Diss., 2000
- [Kle13] KLEIPA, V.: *Serial protocol specification for Atmel AVR ATtiny88 MCU On FEB_E Board.* 2013. – V0.96
- [Köha] KÖHLI, Markus: *Determination of the Absolute Detection Efficiency of a 6-Layer CASCADE-Detector at the HEIDI Spectrometer.* – unveröffentlicht Rohdatenanalyse
- [Köhb] KÖHLI, Markus: *private Kommunikation*
- [MAD⁺09] MÄRKISCH, B. ; ABELE, H. ; DUBBERS, D. ; FRIEDL, F. ; KAPLAN, A. ; MEST, H. ; SCHUMANN, M. ; SOLDNER, T. ; WILKIN, D.: The new neutron decay spectrometer Perkeo {III}. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 611 (2009), S. 216 – 218. – ISSN 0168–9002
- [Mez72] MEZEI, F.: Neutron spin echo: A new concept in polarized thermal neutron techniques. In: *Zeitschrift für Physik* 255 (1972). – ISSN 0044–3328
- [Mod14] MODZEL, Gerd: *Entwicklung einer Ersatztechnologie für den Standard ³He Detektor zum Nachweis thermischer Neutronen auf großen Flächen*, Physikalisches Institut Heidelberg, Diss., 2014

- [Mus95] MUSIOL, Gerhard: *Kern- und Elementarteilchenphysik*. 2., korrigierte Aufl. Frankfurt am Main ; Thun : Deutsch, 1995
- [NXP09] NXP: *MMBZxAL series, Low capacitance unidirectional double ESD protection diodes*, 2009
- [Pau] PAULY, Christian: *Bergische Universität Wuppertal, private Kommunikation*
- [Pin] PINTO, Serge: *private Kommunikation*
- [Pin11] PINTO, Serge D.: *Gas Electron Multipliers: Development of large area GEMs and spherical GEMs*, Universität Bonn, Diss., 2011
- [Sau97] SAULI, F: GEM: A new concept for electron amplification in gas detectors. In: *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A* 386 (1997), Nr. 2, S. 531–534. – ISSN 0168–9002 ; 1872–9576
- [Sch] SCHMIDT, Christian: *private Kommunikation*
- [Sch95] SCHMIDT, Ulrich: *Experimente mit polarisierten Neutronen zu Fragen der höchstauflösenden Spektrometrie und Quantenoptik*, Technische Universität München, Diss., 1995
- [Sea92] SEAR, Varley F.: Neutron scattering lengths and cross sections. In: *Neutron News* 3 (1992). – ISSN 0168–9002 ; 1872–9576
- [SS99] SAULI, F ; SHARMA, A: Micropattern gaseous detectors. In: *ANNUAL REVIEW OF NUCLEAR AND PARTICLE SCIENCE* 49 (1999). – ISSN 0163–8998 ; 1545–4134
- [WB58] WIRTZ, Karl ; BECKURTS, Karl H.: *Elementare Neutronenphysik*. Berlin [u.a.] : Springer, 1958
- [XIL11] XILINX: *Spartan-6 Family Overview*, 2011
- [ZCHH94] ZHAO, T. ; CHEN, Y. ; HAN, S. ; HERSCH, J.: A study of electron drift velocity in Ar-CO₂ and Ar-CO₂-CF₄ gas mixtures. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 340 (1994). – ISSN 0168–9002

Erklärung:

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

Heidelberg, den 06.06.2014

.....

Unterschrift