

Das  $\text{Mu3e}$ -Experiment:  
Auf der Suche nach seltenen  
Zerfällen



Niklaus Berger

Institut für Kernphysik  
JGU Mainz



# Übersicht

- Was suchen wir?  
Leptonflavourverletzung
- Herausforderungen  
Raten und Auflösung
- Technologie  
Dünne Pixelkamera
- Zusammenbau  
Von der Technologie zum Experiment



# Leptonflavourverletzung



Elektron

$e^-/e^+$







# Leptonen

Elektron

$e^-/e^+$



Elektron -Neutrino

$\nu_e/\bar{\nu}_e$

 Leptonen

Elektron

$e^-/e^+$

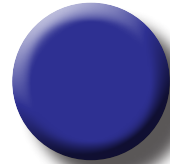


Elektron -Neutrino

$\nu_e/\bar{\nu}_e$

Muon

$\mu^-/\mu^+$



Muon -Neutrino

$\nu_\mu/\bar{\nu}_\mu$

 Leptonen

Elektron

$e^-/e^+$

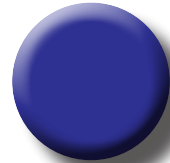


Elektron -Neutrino

$\nu_e/\bar{\nu}_e$

Muon

$\mu^-/\mu^+$

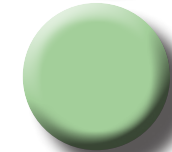
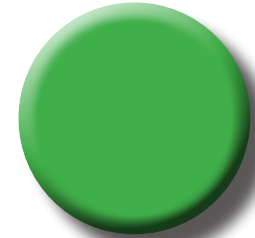


Muon -Neutrino

$\nu_\mu/\bar{\nu}_\mu$

Tau

$\tau^-/\tau^+$



Tau -Neutrino

$\nu_\tau/\bar{\nu}_\tau$

 Leptonen

Elektron

$e^-/e^+$

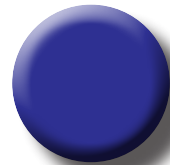


Elektron -Neutrino

$\nu_e/\bar{\nu}_e$

Muon

$\mu^-/\mu^+$

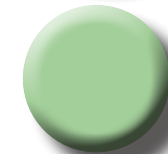
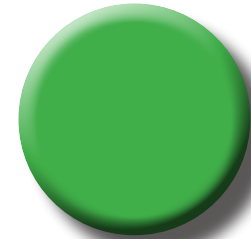


Muon -Neutrino

$\nu_\mu/\bar{\nu}_\mu$

Tau

$\tau^-/\tau^+$



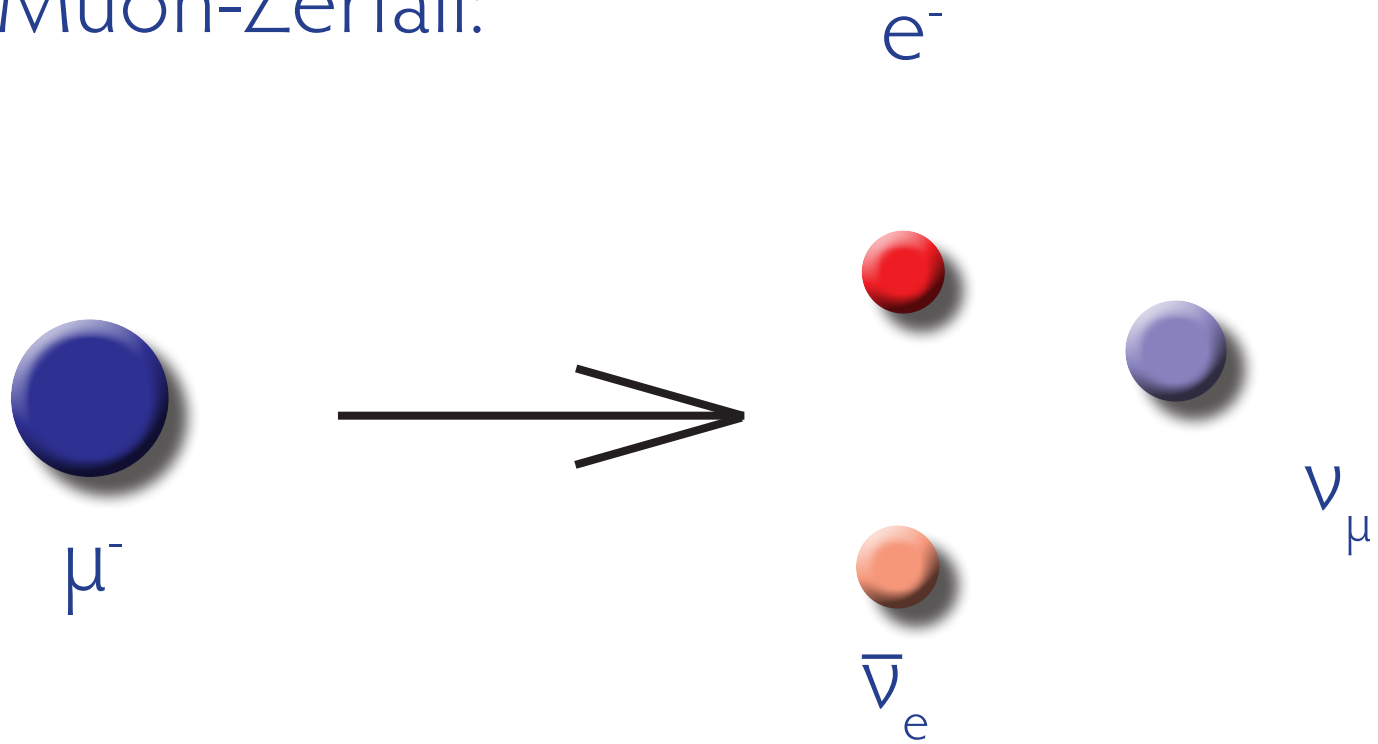
Tau -Neutrino

$\nu_\tau/\bar{\nu}_\tau$

3 „Geschmacksrichtungen“ - Flavours  
Eigentlich: Gewichtsklassen

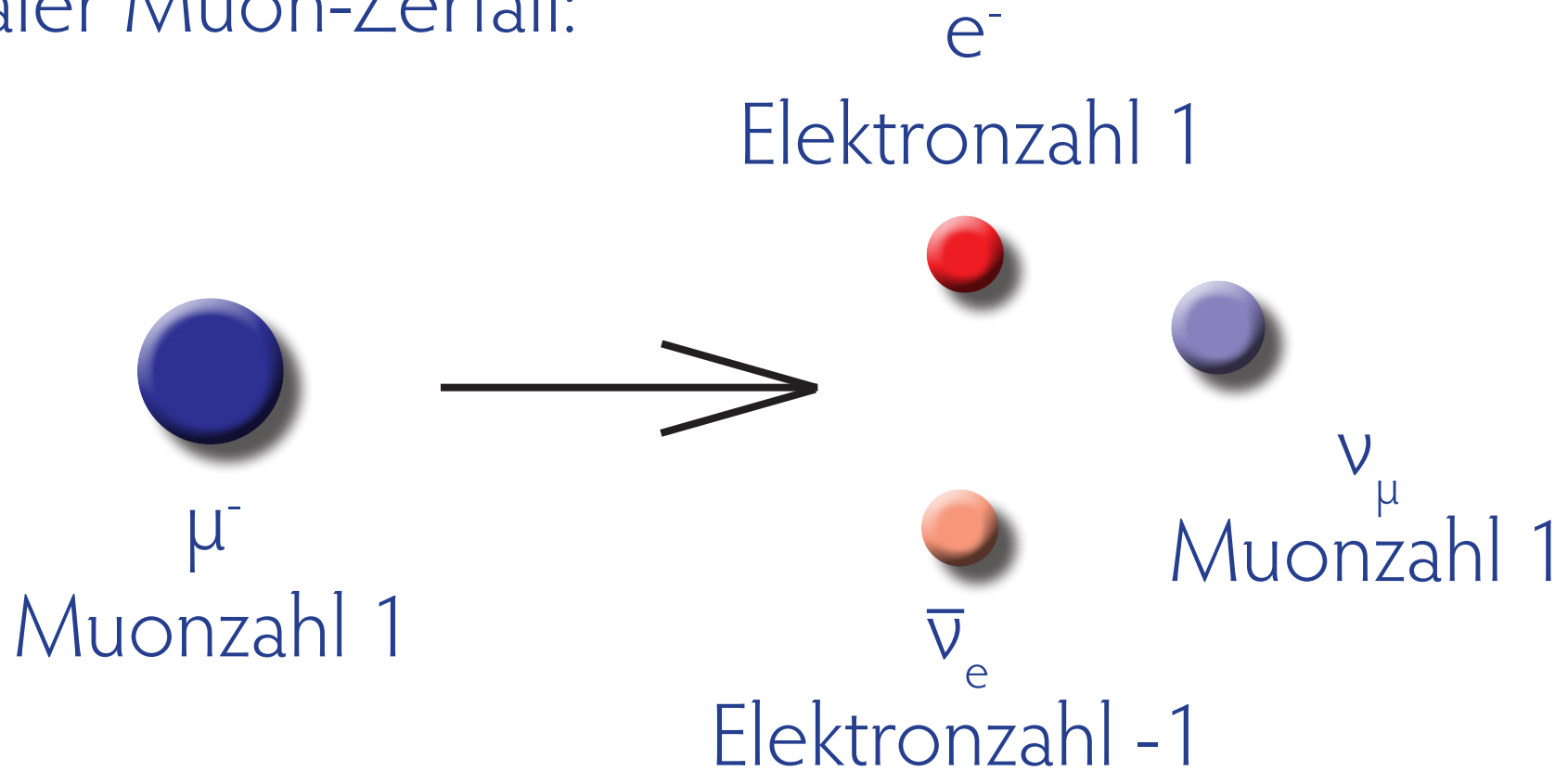
# Lepton-Buchhaltung

Normaler Muon-Zerfall:



# Lepton-Buchhaltung

Normaler Muon-Zerfall:





# Lepton-Buchhaltung


Normaler Muon-Zerfall:

  
 $\mu^-$   
Muonzahl 1



$e^-$   
Elektronzahl 1

  
  
 $\bar{\nu}_e$   
Elektronzahl -1

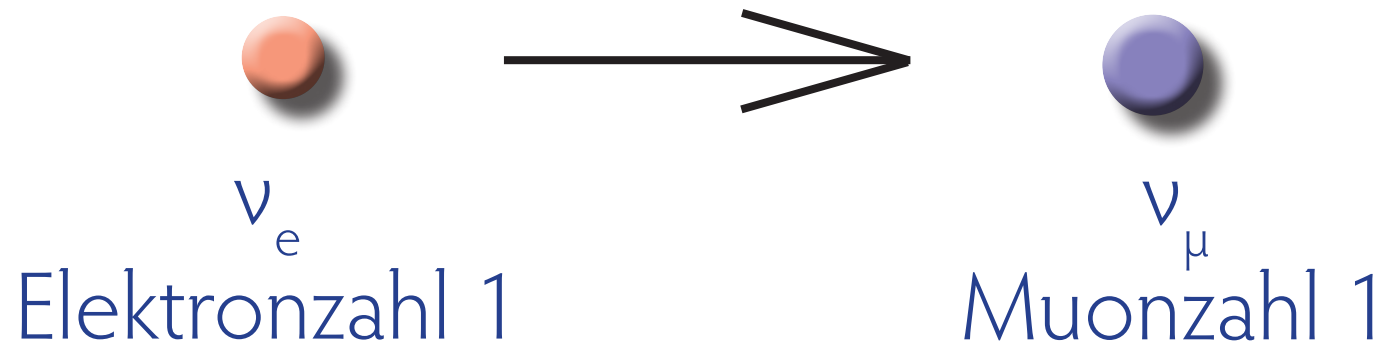
  
 $\nu_\mu$   
Muonzahl 1

Vorher:  
Muonzahl 1  
Elektronzahl 0

Nachher:  
Muonzahl 1  
Elektronzahl 0

# Unregelmäßigkeiten in der Lepton-Buchhaltung

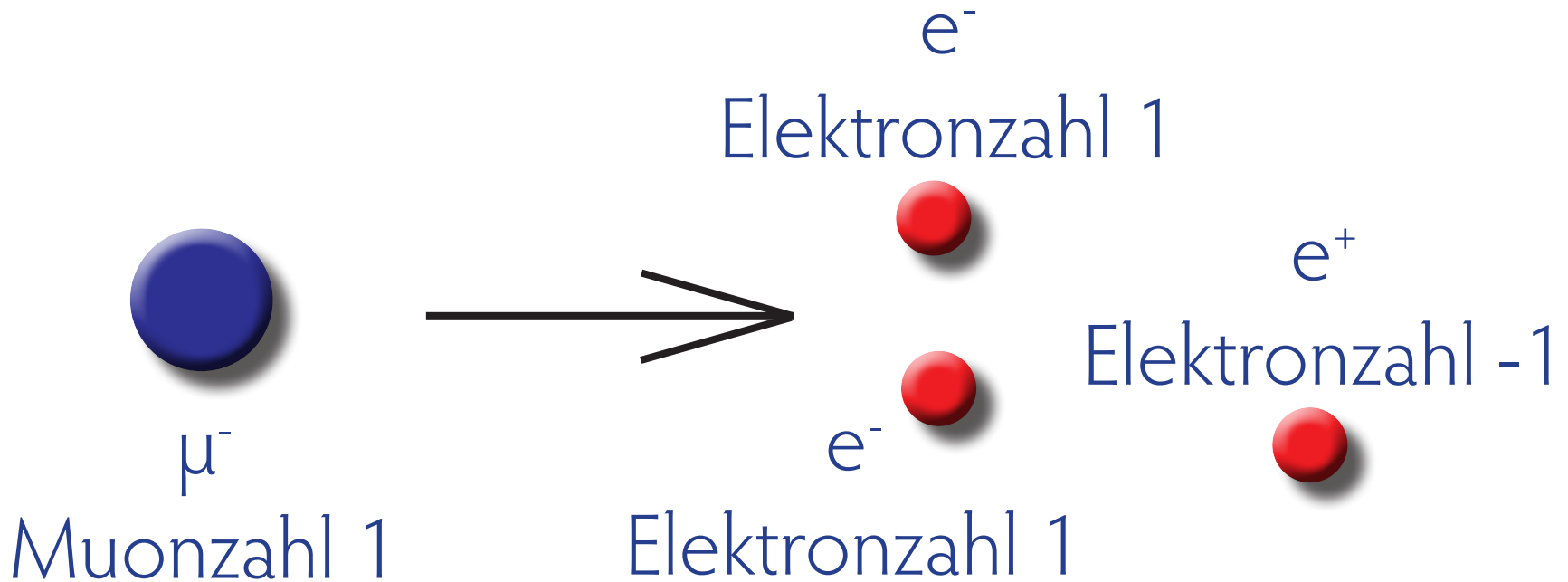
Beobachtet bei Neutrinos:





# Unregelmäßigkeiten in der Lepton-Buchhaltung

Gibt es das auch bei Muonen?



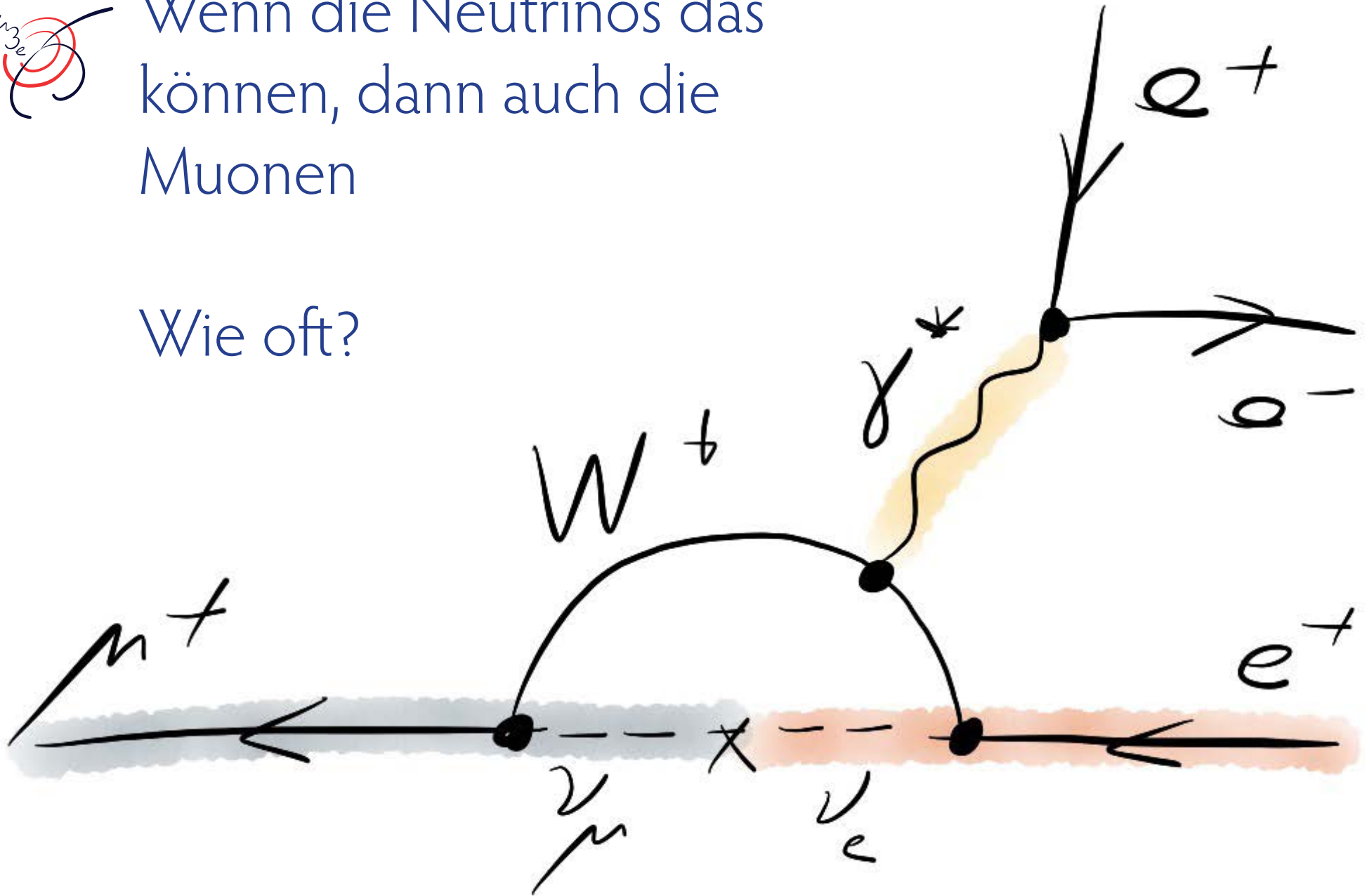
Vorher:  
Muonzahl 1  
Elektronzahl 0

Nachher:  
Muonzahl 0  
Elektronzahl 1



Wenn die Neutrinos das  
können, dann auch die  
Muonen

Wie oft?





Wenn es keine neuen Teilchen gibt:

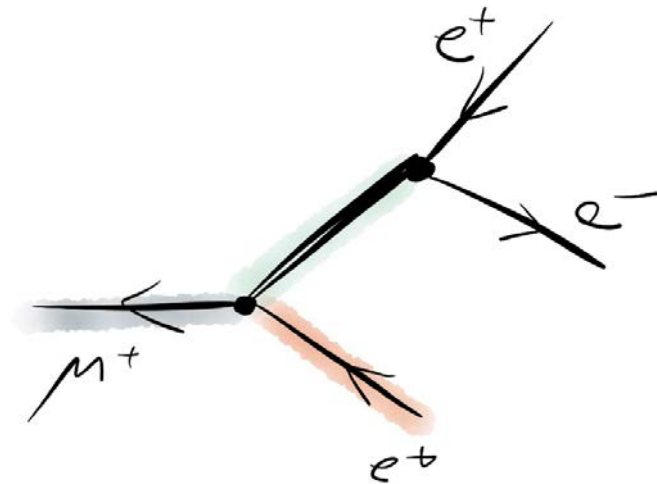
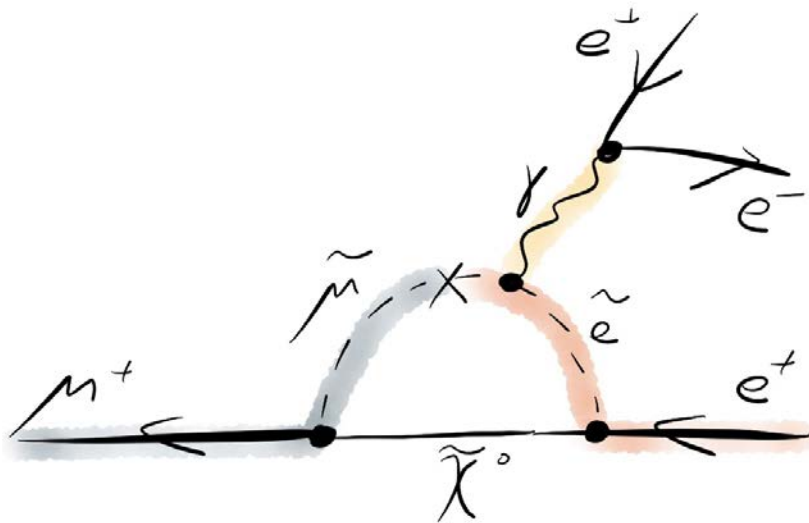
Etwa ein Mal in  $10^{54}$  Zerfällen

So gut wie nie



 Wenn es neue Teilchen gibt:

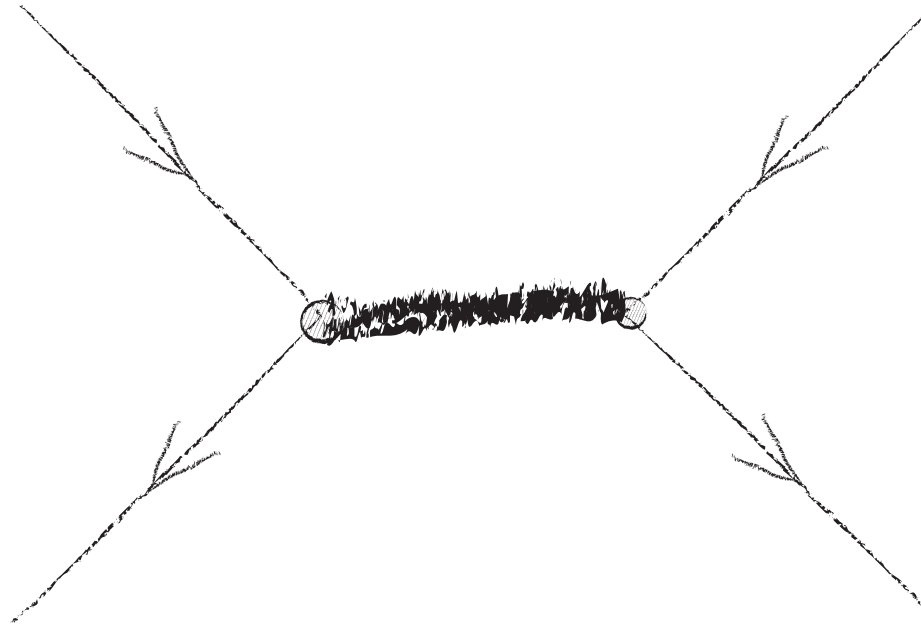
Viel, viel häufiger...



Indirekte Suche nach neuen Teilchen  
Sehr schwer oder sehr schwach wechselwirkend



Über seltene Prozesse können wir über die Physik bei  
**sehr grossen Massen** lernen



weit darüber hinaus, was Beschleuniger (z.B. LHC)  
direkt sehen können



Was wissen wir schon?

Suche mit dem SINDRUM-Experiment (1988)

Weniger als einer in Tausend Milliarden ( $10^{12}$ ) Zerfällen  
des Muons ist in drei Elektronen



Suche mit dem SINDRUM-Experiment (1988)

Weniger als einer in Tausend Milliarden ( $10^{12}$ ) Zerfällen  
des Muons ist in drei Elektronen

Entsprechung: Finde eine Nadel in einer Million  
Heuhaufen



Wir wollen einen grossen Schritt weiter gehen:

Suche des Zerfalls nach drei Elektronen in Zehn Millionen Milliarden ( $10^{16}$ ) Zerfällen des Muons

Entsprechung: Finde eine Nadel in  $10^{10}$  Heuhaufen  
(~ ein Haufen für jeden Menschen)

Finde ein graues Haar unter allen  
Menschen, die je gelebt haben





# Herausforderungen: Raten und Auflösung

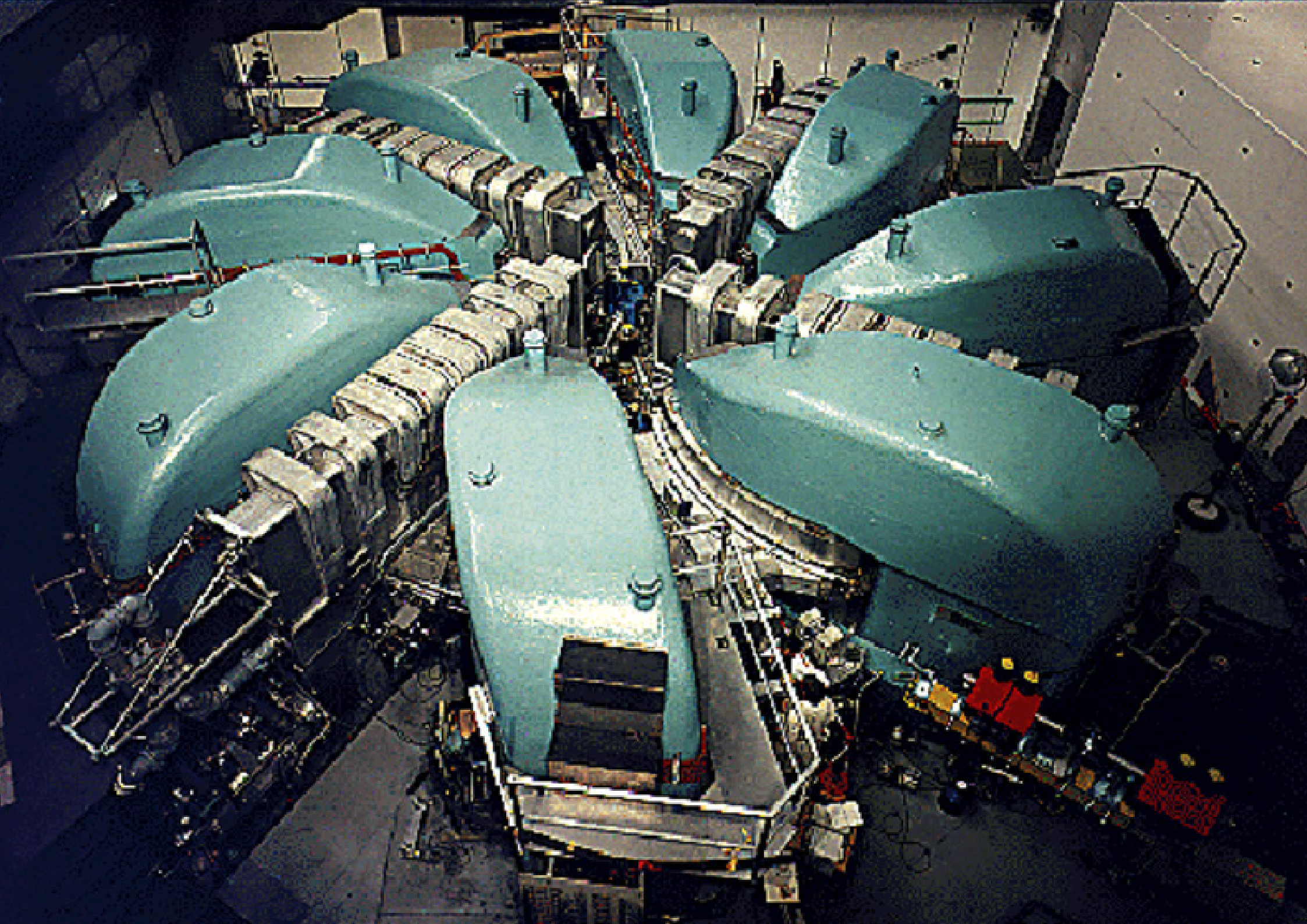


Um in einem Jahr  $10^{16}$  Muon-Zerfälle zu sehen,  
muss jede Sekunde eine Milliarde Muonen zerfallen



Paul Scherrer Institut in der Schweiz:  
Produziert genügend Muonen mit dem intensivsten  
Protonenstrahl der Welt













UNIVERSITÄT  
HEIDELBERG  
ZUKUNFT  
SEIT 1386



JOHANNES GUTENBERG  
UNIVERSITÄT MAINZ

# Practical Course in Particle Physics

at the Paul Scherrer Institut  
(PSI, Switzerland), Summer 2024

Perform a real particle physics experiment at a PSI beam-line.

Learn experimental particle physics hands-on.

Join a group of 12-15 students from ETH Zürich and Heidelberg and Mainz Universities for one week of preparations in Heidelberg and two weeks of beam time at the world's most powerful accelerator at PSI.

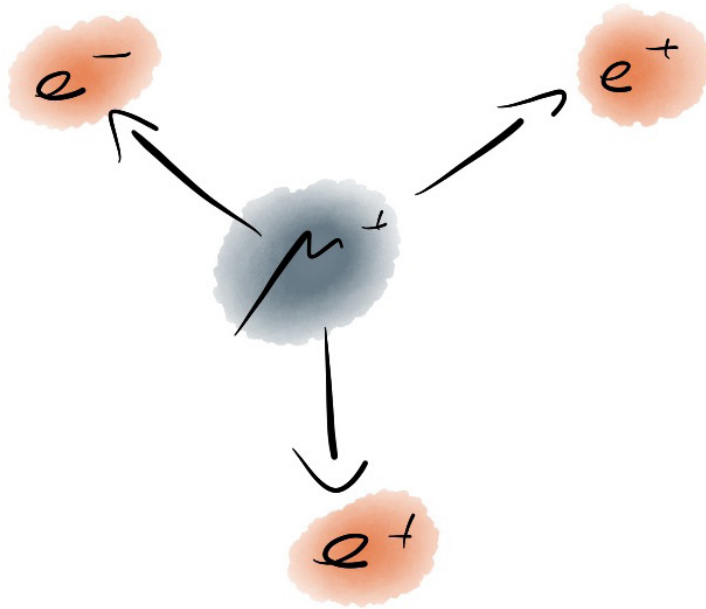
Design and build your experiment from available detector components, take data during a 24/7 beam





Wir müssen „unseren“ Zerfall von allem anderen -  
„Untergrund“ - unterscheiden können

# Das Signal



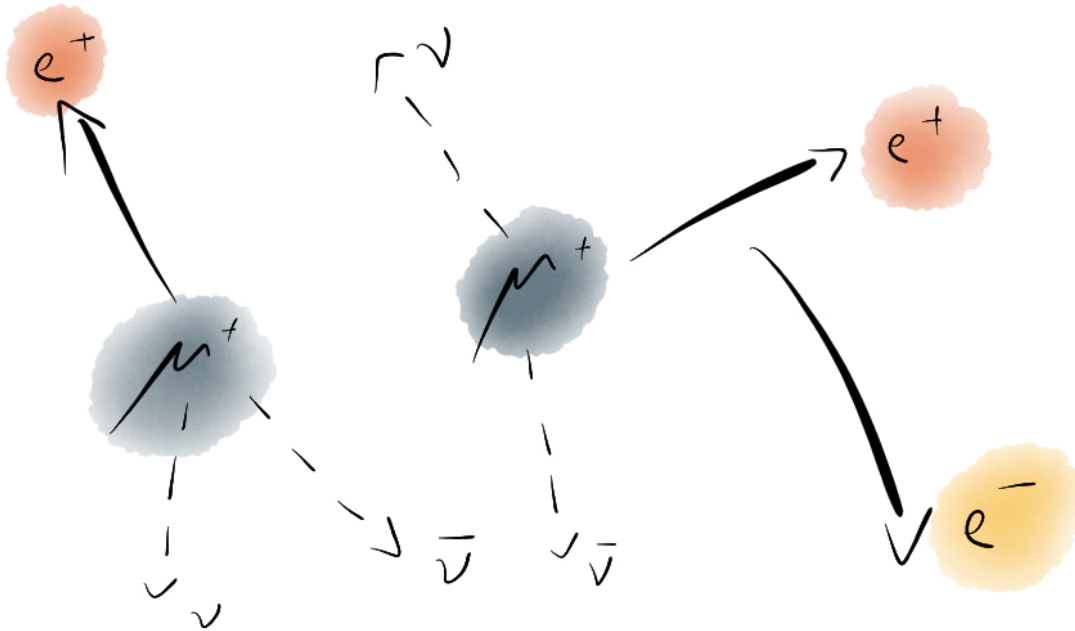
- $\mu^+ \rightarrow e^+e^-e^+$
- Muon zerfällt in Ruhe
- Zwei Positronen, ein Elektron
- Von einem Punkt - Vertex
- Zur selben Zeit
- Energieerhaltung: Elektron- und Positronenergien ergeben Muonmasse  
(wir messen die Impulse)





# Zufälliger Untergrund

- Positronen aus mehreren Muonzerfällen plus ein Elektron aus dem Detektormaterial (Bhabhastreueung)



- Wie kann ich das unterscheiden?

Sehr gute Vertexpföslung  
Sehr gute Zeitauföslung  
Sehr gute Impulsauföslung



# Der gemeine Untergrund: "Interne Konversion"

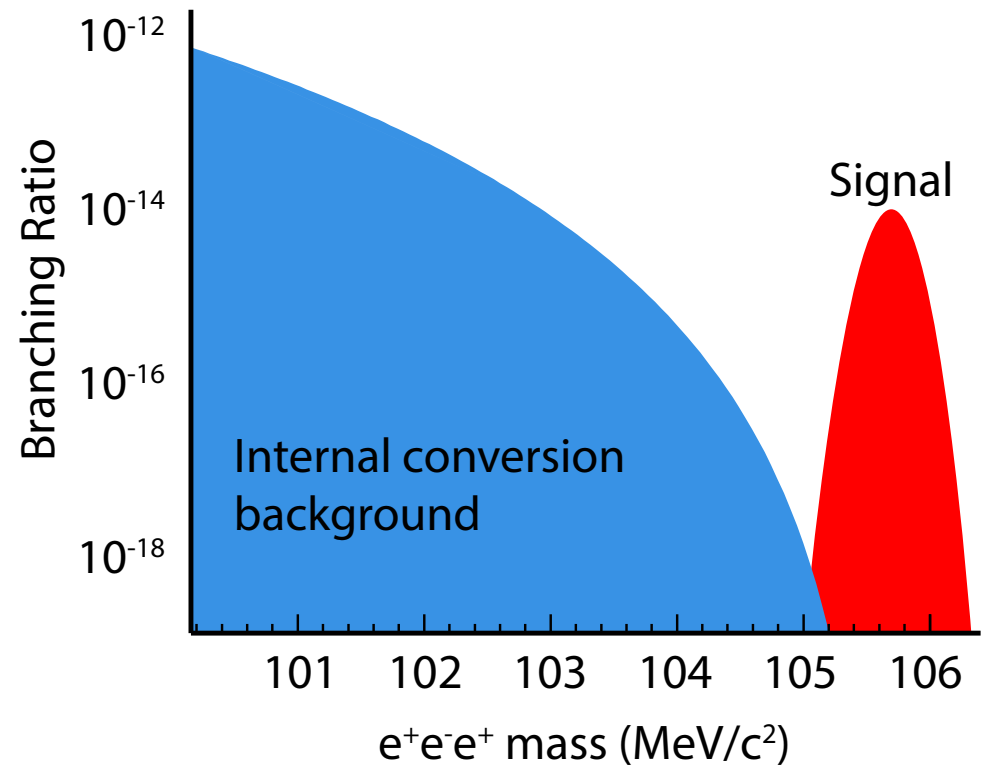
- Erlaubter Zerfall mit zwei Neutrinos



- Neutrinos sieht der Detektor nicht
- Es fehlt etwas Energie/Impuls



- Brauche eine super Impulsmessung





Wir messe ich Impulse sehr genau?

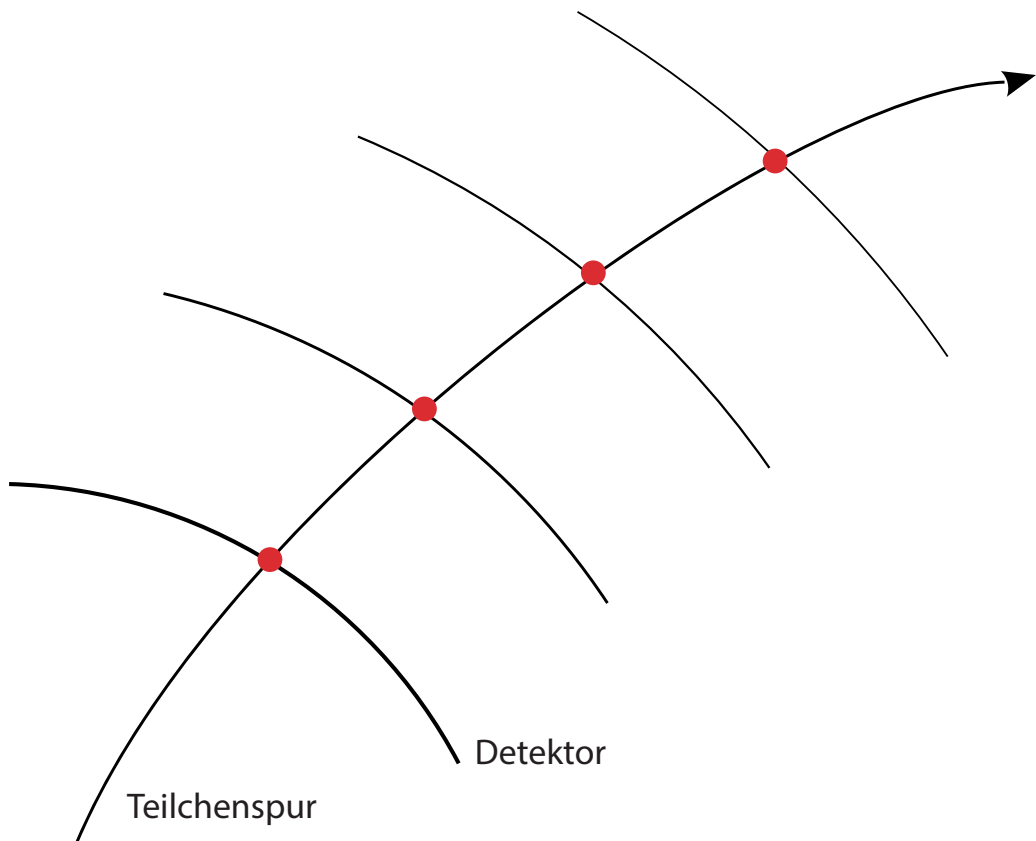
(für eine Milliarde Elektronen pro Sekunde)

# Impulsmessung

- Verwende ein starkes Magnetfeld (hier: 1 Tesla, Solenoid, 3 m lang, 1 m Innendurchmesser)



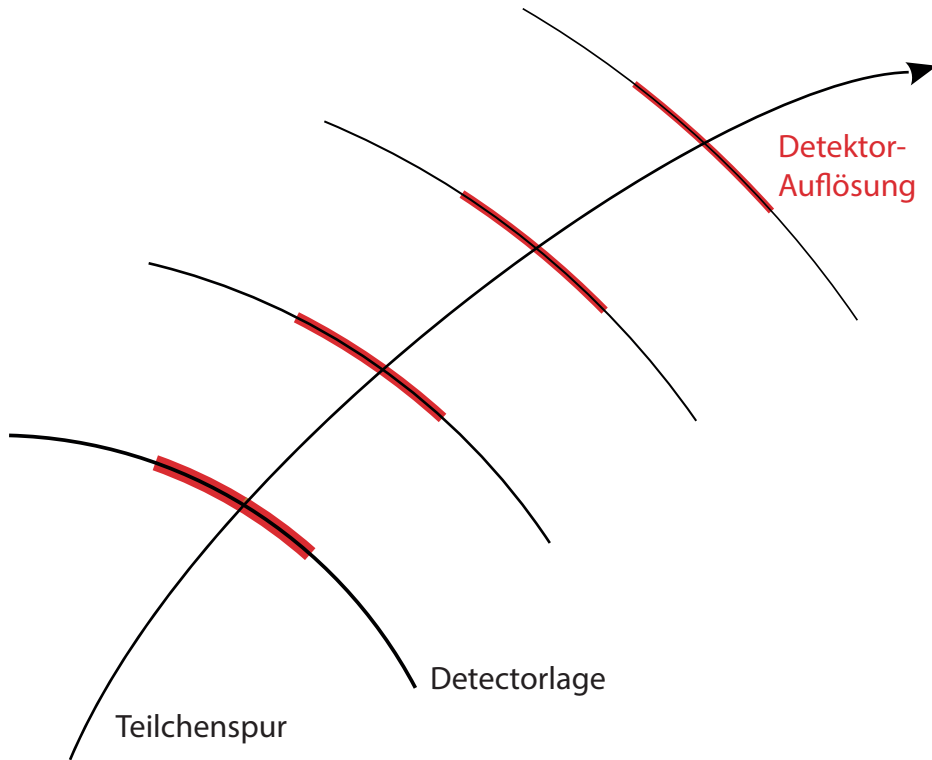
# Impulsmessung



- Verwende ein starkes Magnetfeld (hier: 1 Tesla, Solenoid, 3 m lang, 1 m Innendurchmesser)
- Geladene Teilchen werden je nach Impuls mehr oder weniger abgelenkt
- Messe Krümmung (mindestens drei Punkte), kenne Magnetfeld: Impulsmessung
- Auch: Vorzeichen der Ladung - Elektron oder Positron

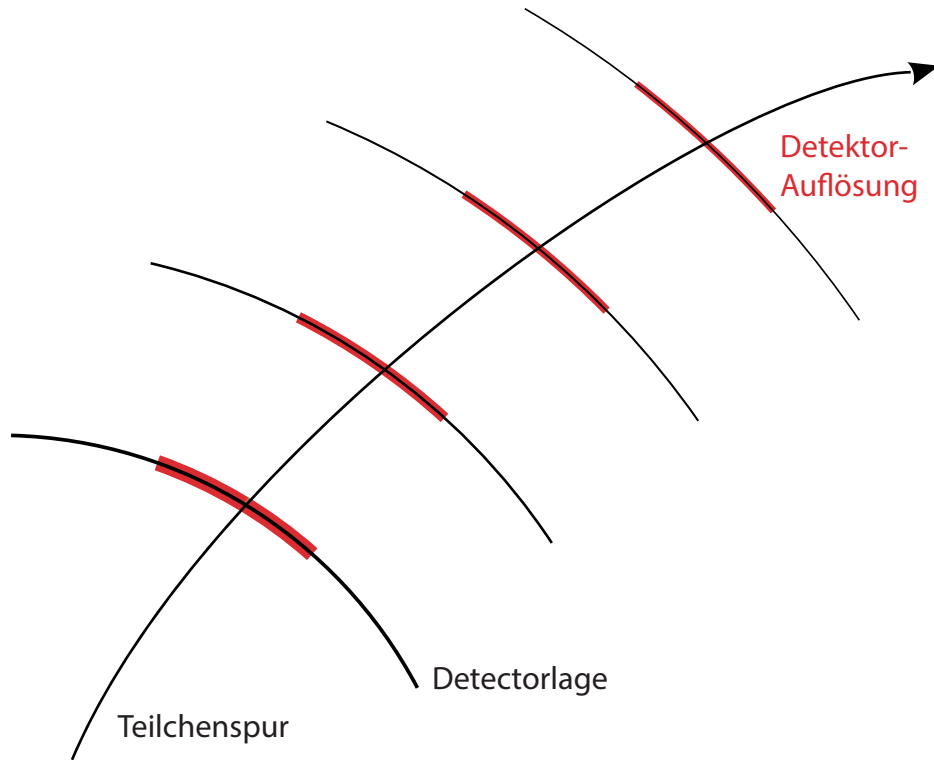


# Wie gut können wir Impulse messen?





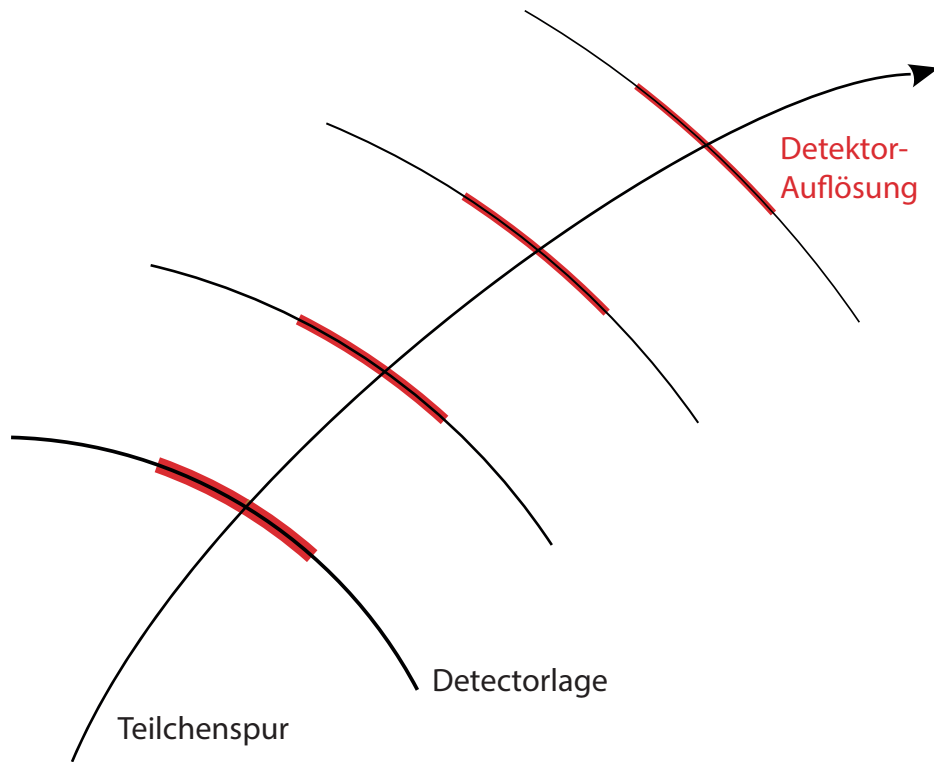
# Wie gut können wir Impulse messen?



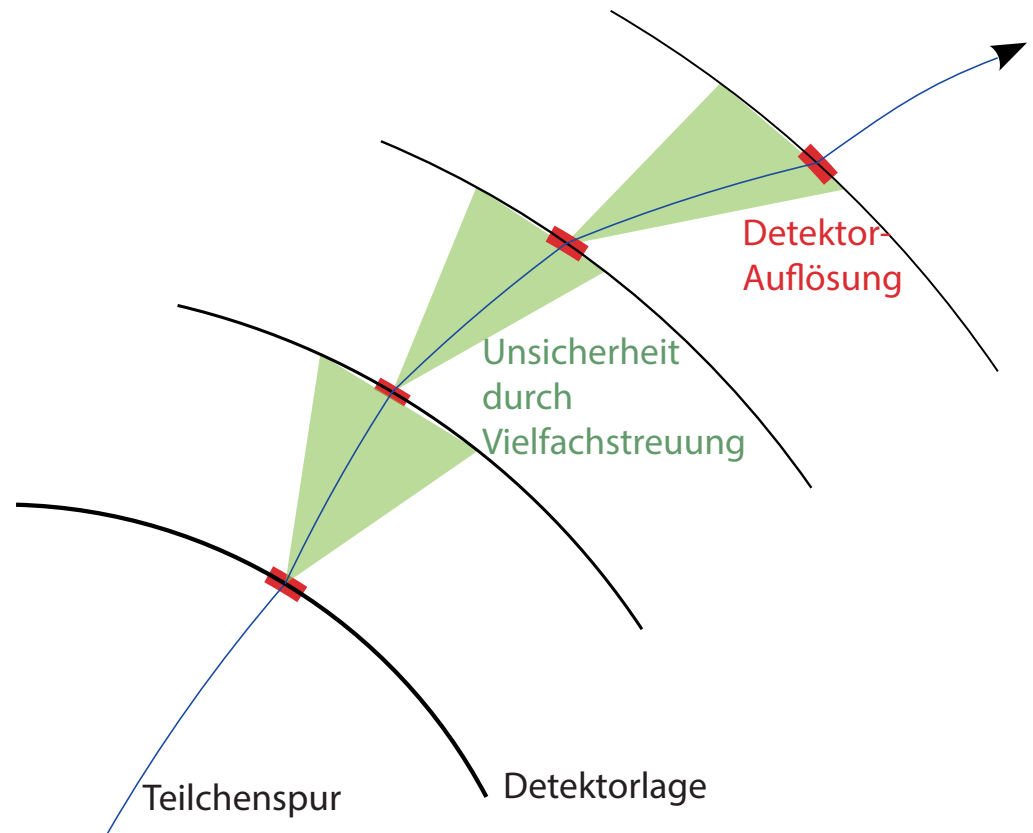
## Kleine Pixel



# Wie gut können wir Impulse messen?



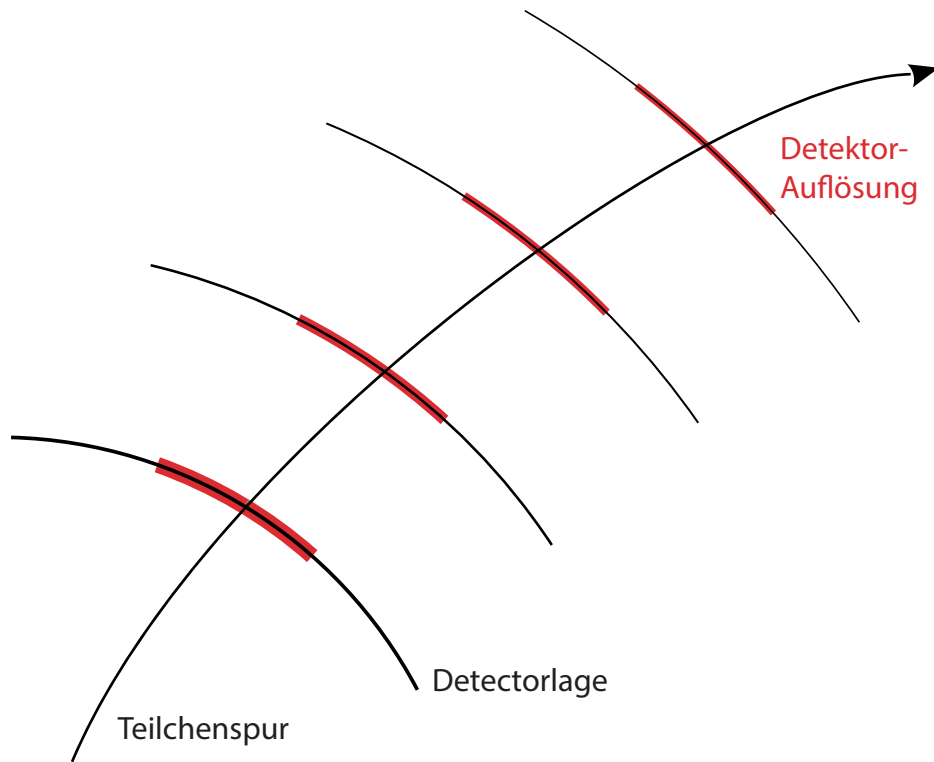
Kleine Pixel



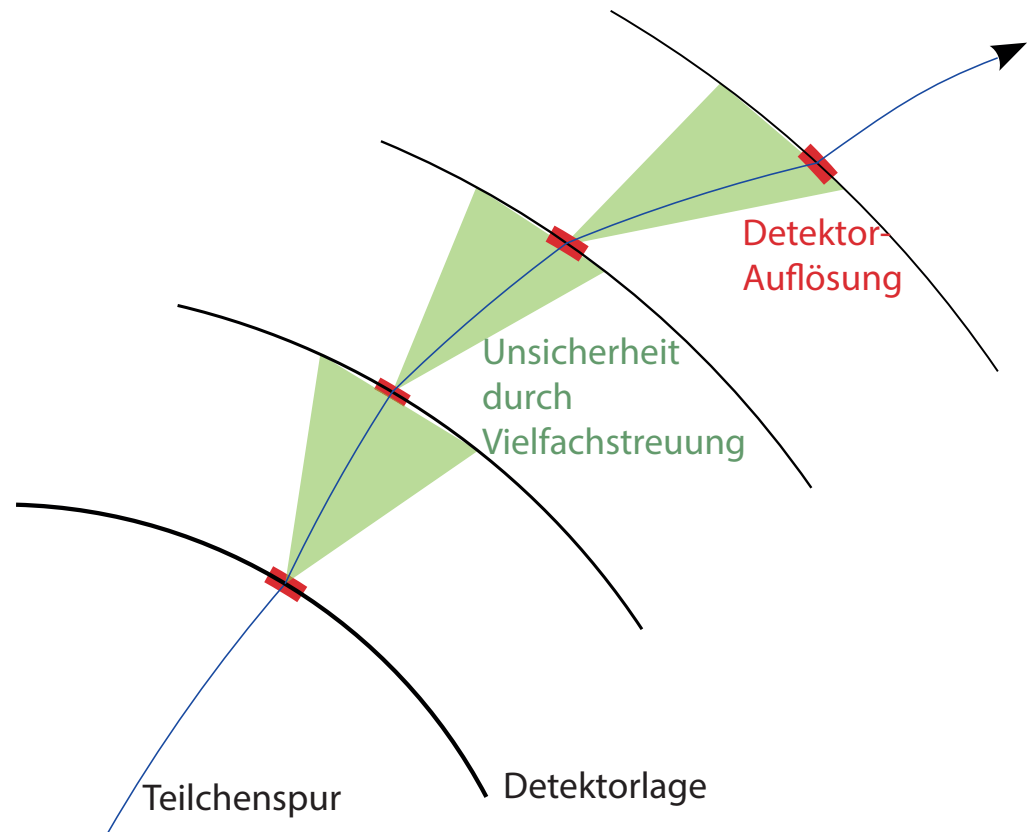




# Wie gut können wir Impulse messen?



Kleine Pixel



Wenig Material



# Leicht, schnell, hochauflösend: Der Mu3e Pixeldetektor



Im Wesentlichen eine Digitalkamera...





## Im Wesentlichen eine Digitalkamera...

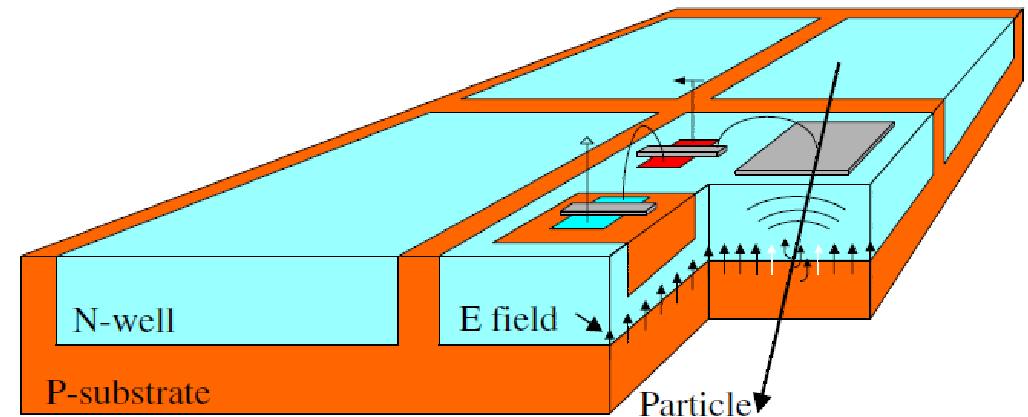
- Mit 300 Millionen Pixeln
- Für 20 Millionen Bilder pro Sekunde
- Dünner als ein Haar





## Wie geht das?

- Schwarz-weiß Bilder
- **Elektronik in den Pixeln:**  
Nur schwarze Pixel melden sich
- Sehr schnelle Verbindungen nach aussen  
- total ~1 Tbit/s





# HV-MAPS Pixel Sensoren

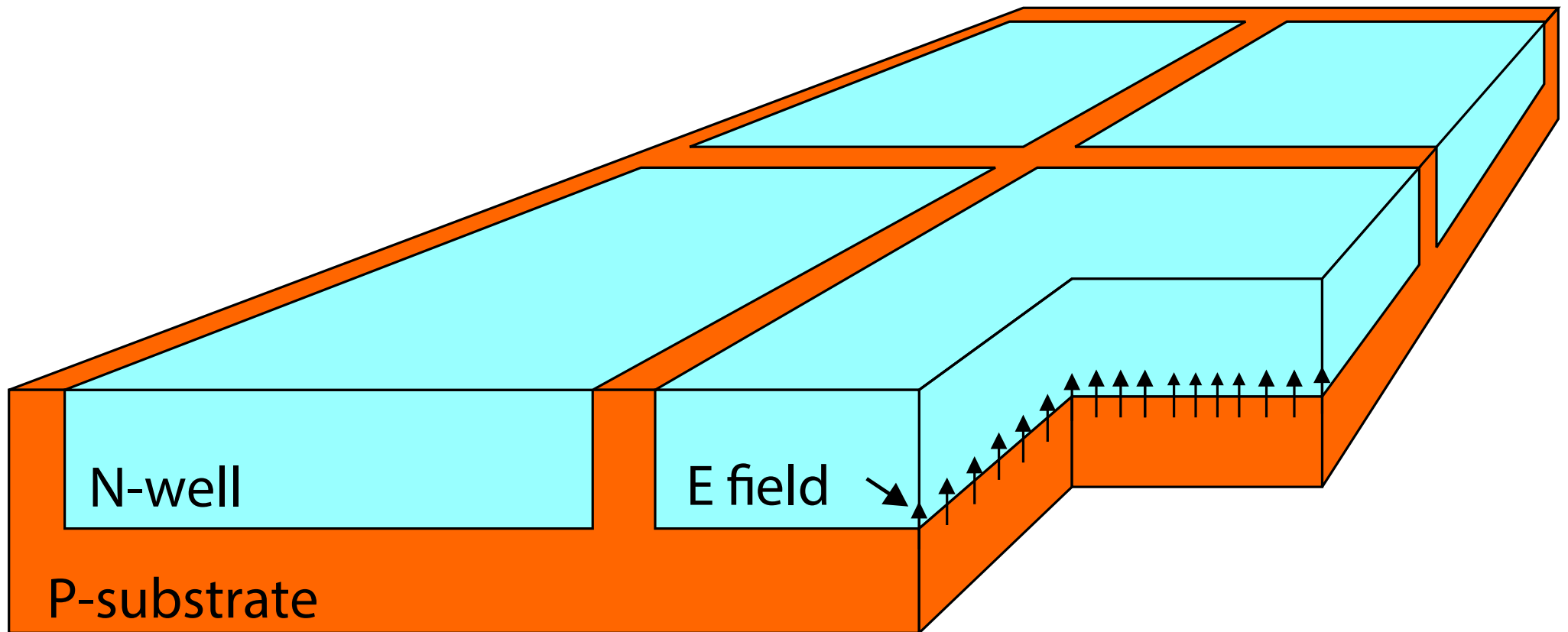
High-Voltage Monolithic Active Pixel Sensors

Silizium-Wafer mit unterschiedlichen Dotierungen

Hochspannung über den p-n Übergang

Chipdesign:

Ivan Perić vom KIT (Karlsruhe)





# HV-MAPS Pixel Sensoren

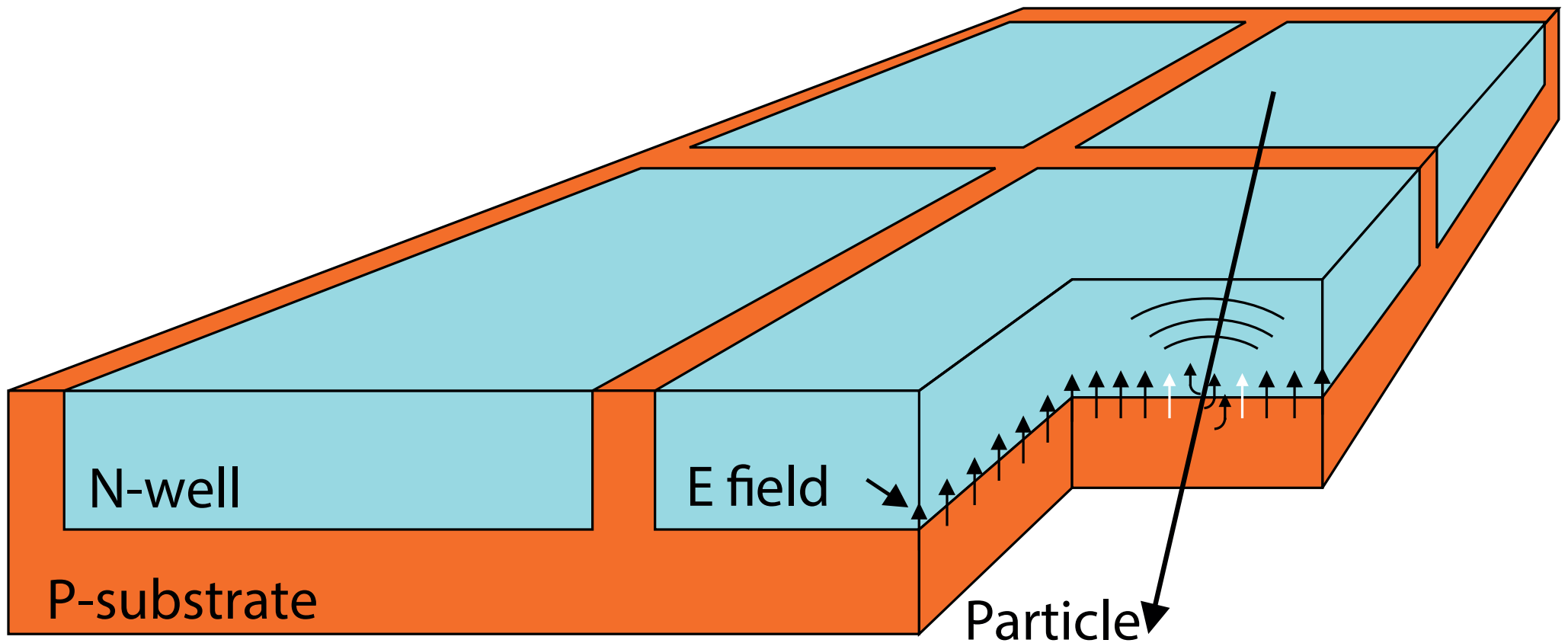
Hochspannung über den p-n Übergang

Teilchen erzeugt Elektron-Loch-Paare

Schnelle Ladungssammlung im elektrischen Feld

Chipdesign:

Ivan Perić vom KIT (Karlsruhe)





# HV-MAPS Pixel Sensoren

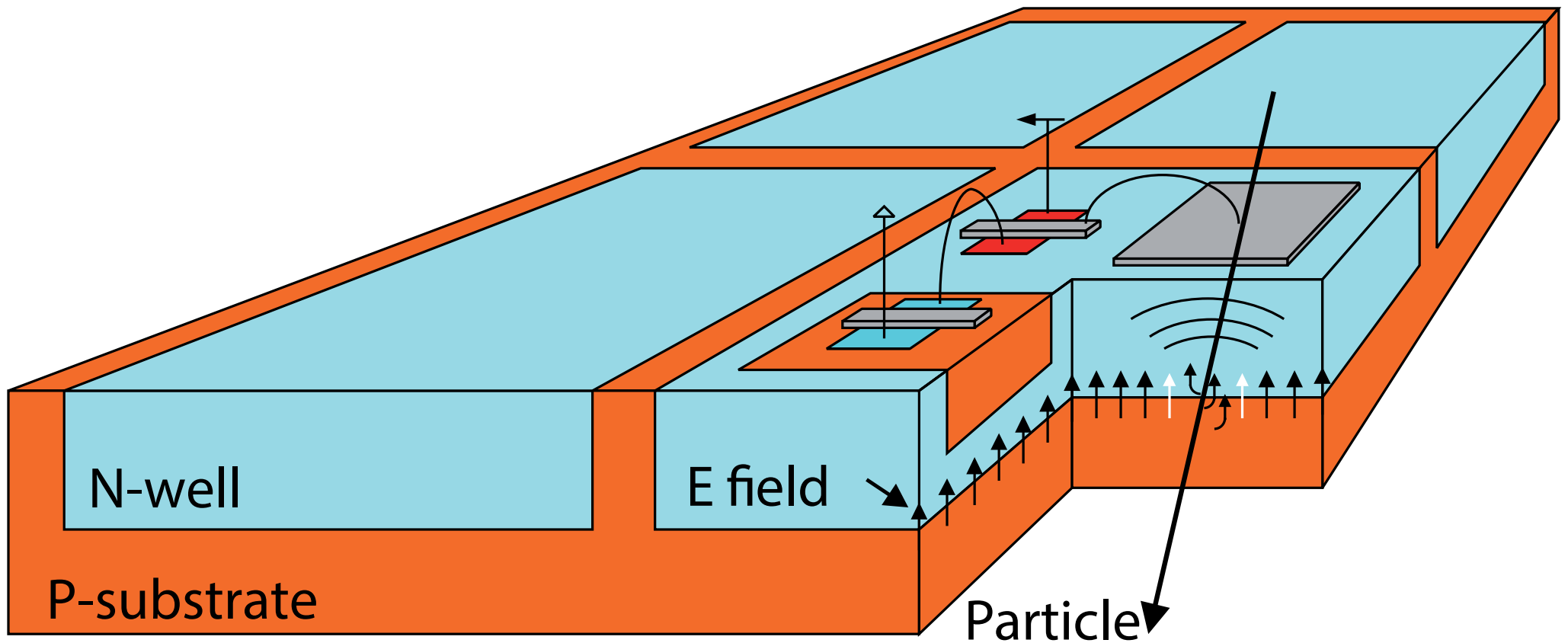
Schnelle Ladungssammlung im elektrischen Feld

Verstärker und Logik auf dem selben Chip

Chipdesign:

Ivan Perić vom KIT (Karlsruhe)

Kann auf 50  $\mu\text{m}$  gedünnt werden



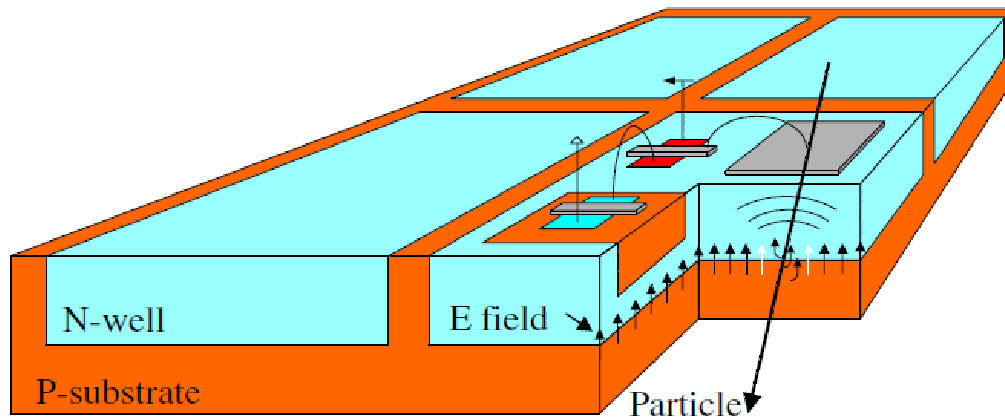




# HV-MAPS Pixel Sensoren

Chipdesign:

Ivan Perić vom KIT (Karlsruhe)



High-Voltage Monolithic Active Pixel Sensors

„Hochspannung“:

- Prozess aus der Automobilindustrie
- Schnelle Ladungssammlung

Monolithic Active:

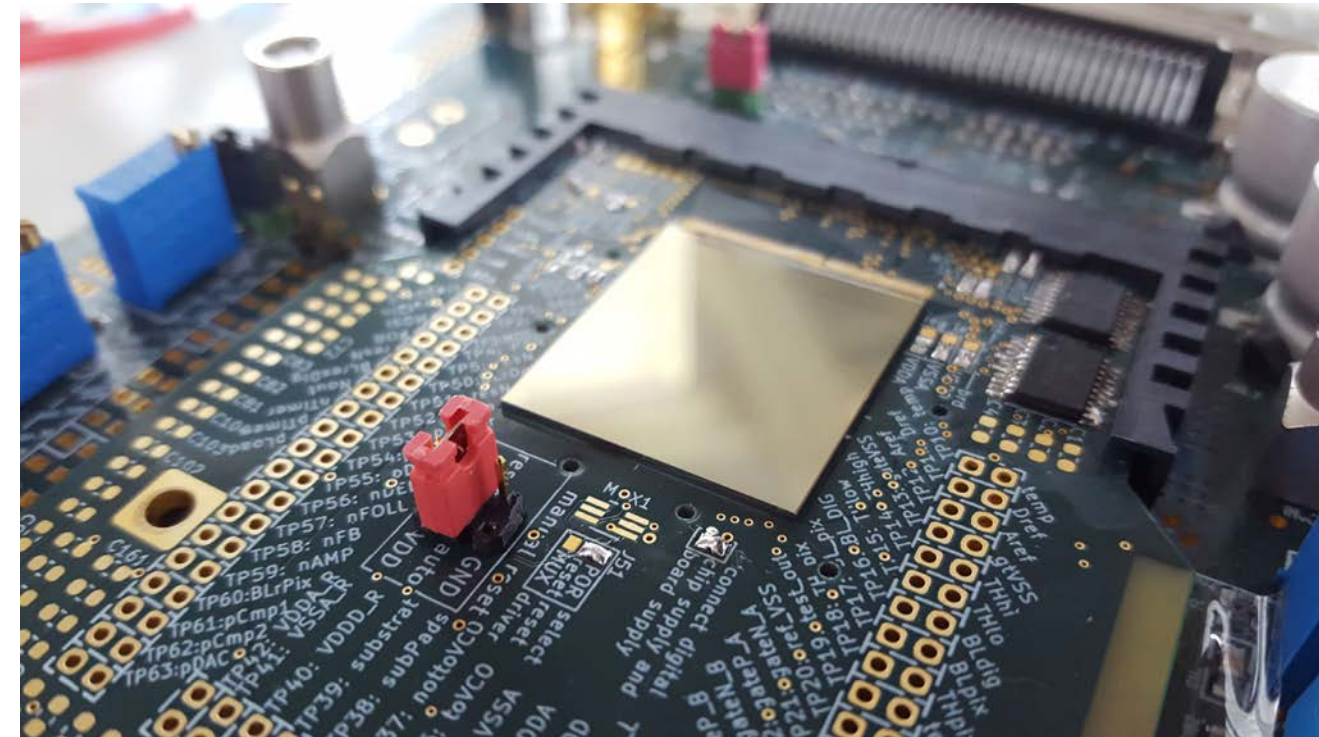
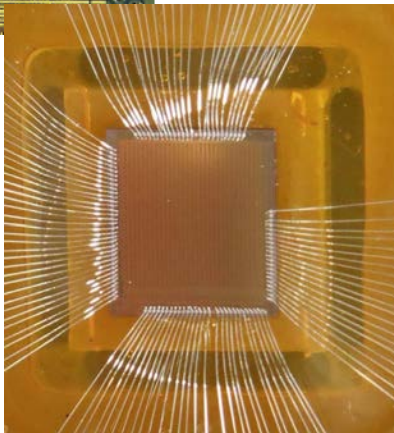
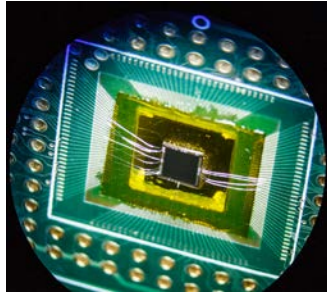
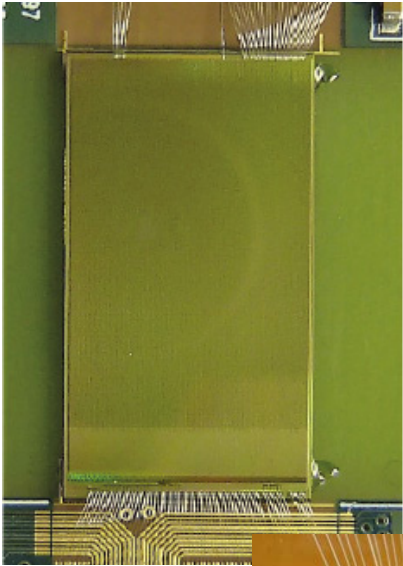
- Analog- und Digitalelektronik auf dem Chip
- Strukturgröße 180 nm

Pixel Sensor:

- 80 x 80  $\mu\text{m}$  große Pixel

Aktiver Bereich nur ca. 30  $\mu\text{m}$  tief

# Chip Tests

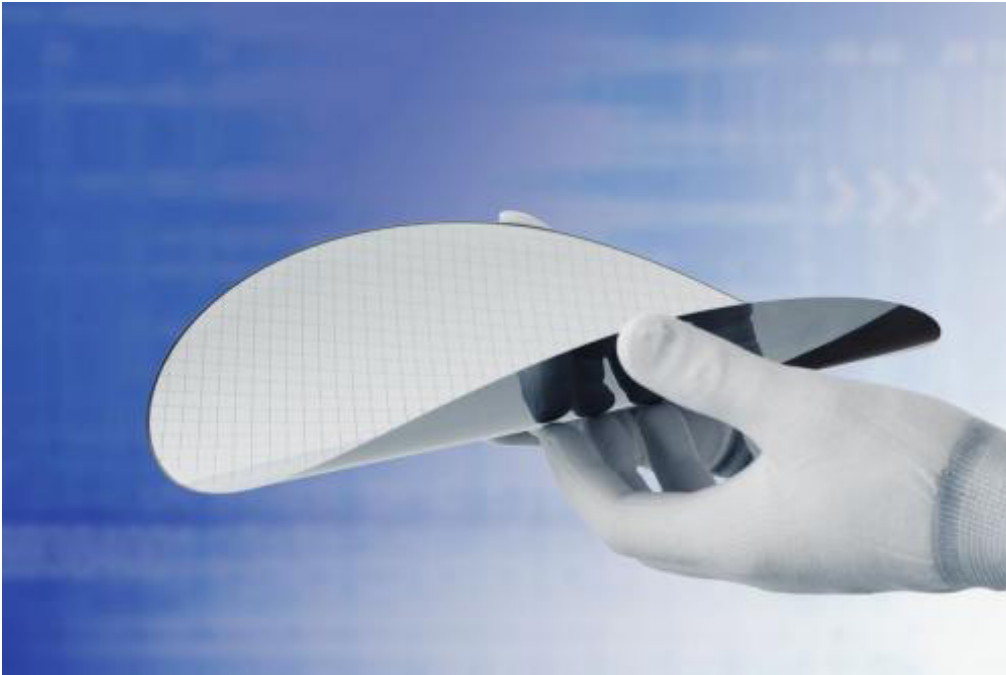


Viele Prototypen bei uns im Labor (10 Jahre Entwicklung) - jetzt finaler Sensor verfügbar

- Ca. 2 x 2 cm groß
- Massenproduktion letztes Jahr



## Dünnen...



- Elektronen sollen im Silizium so wenig wie möglich streuen
- Chips können auf **unter 50  $\mu\text{m}$  gedünnt** werden (Chipkarten)
- Wir lernen den Umgang mit grossen, dünnen Chips...



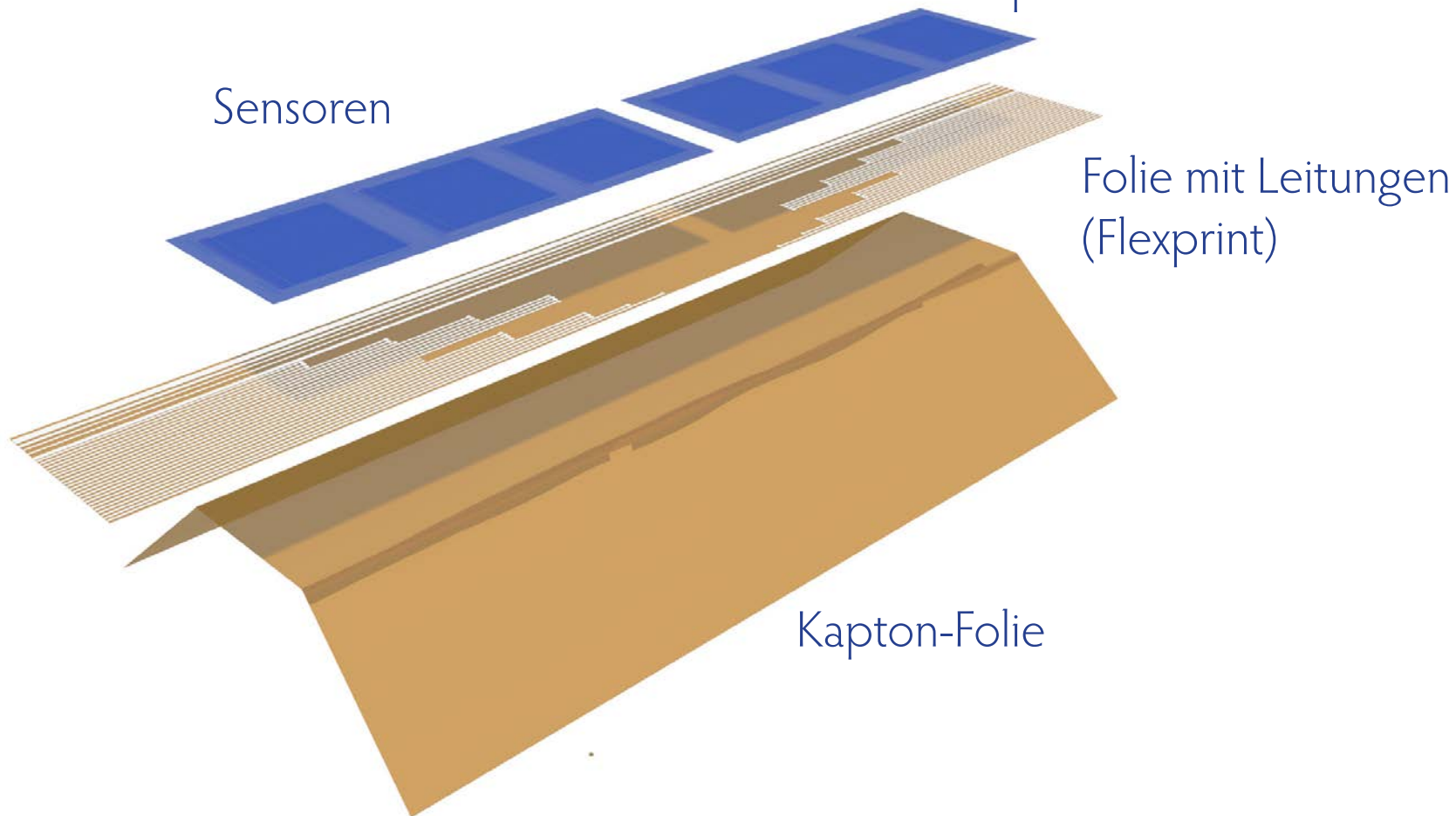
50  $\mu\text{m}$  Silizium ist nicht mehr selbsttragend

- Brauche Tragestruktur, plus elektrische Anschlüsse
- Möglichst wenig zusätzliches Material

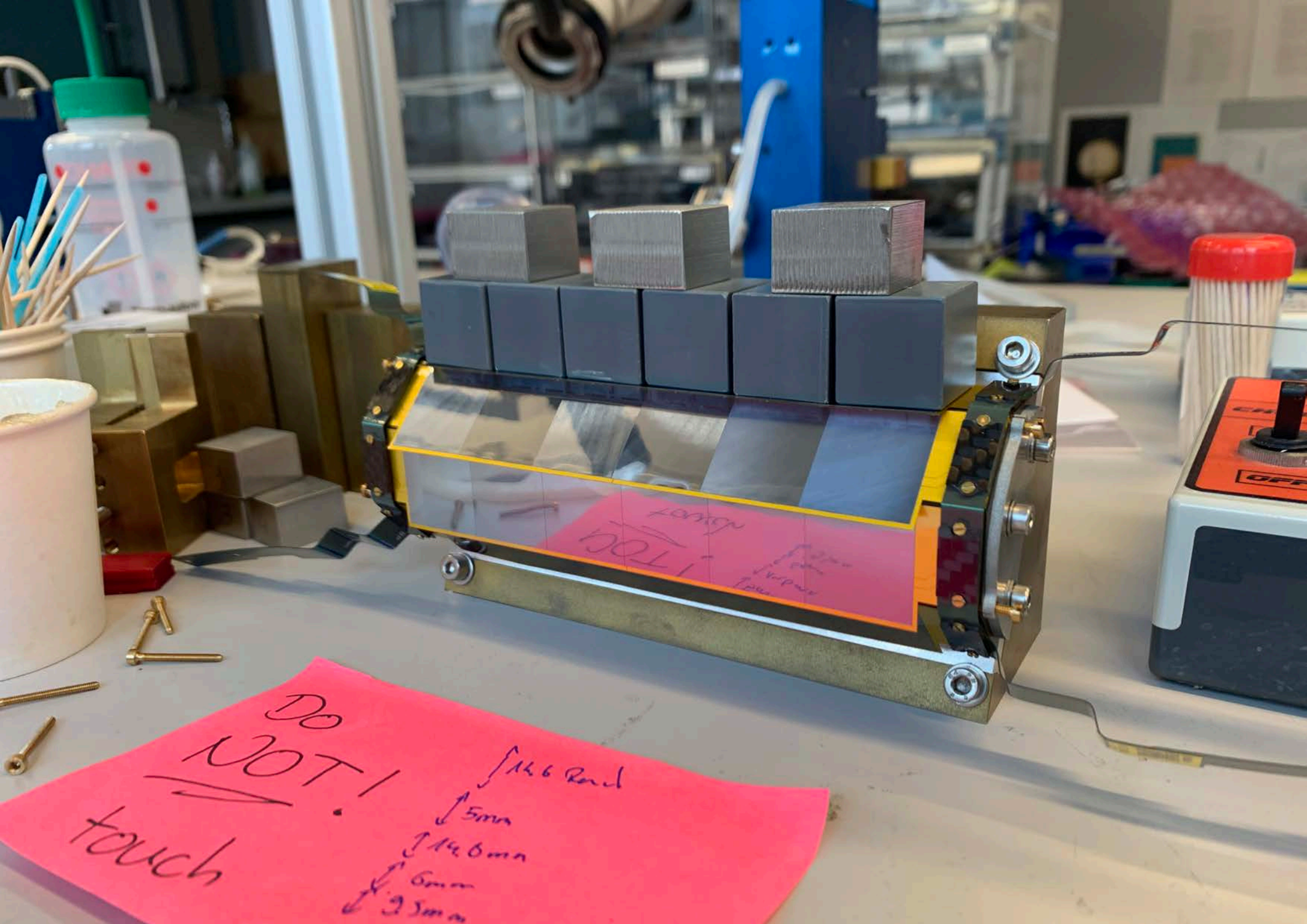


# Mechanik

- Klebe Sensoren auf 25  $\mu\text{m}$  Folie mit aufgedruckten Leiterbahnen
- Verklebe dies mit Rahmen aus 25  $\mu\text{m}$  Kapton-Folie





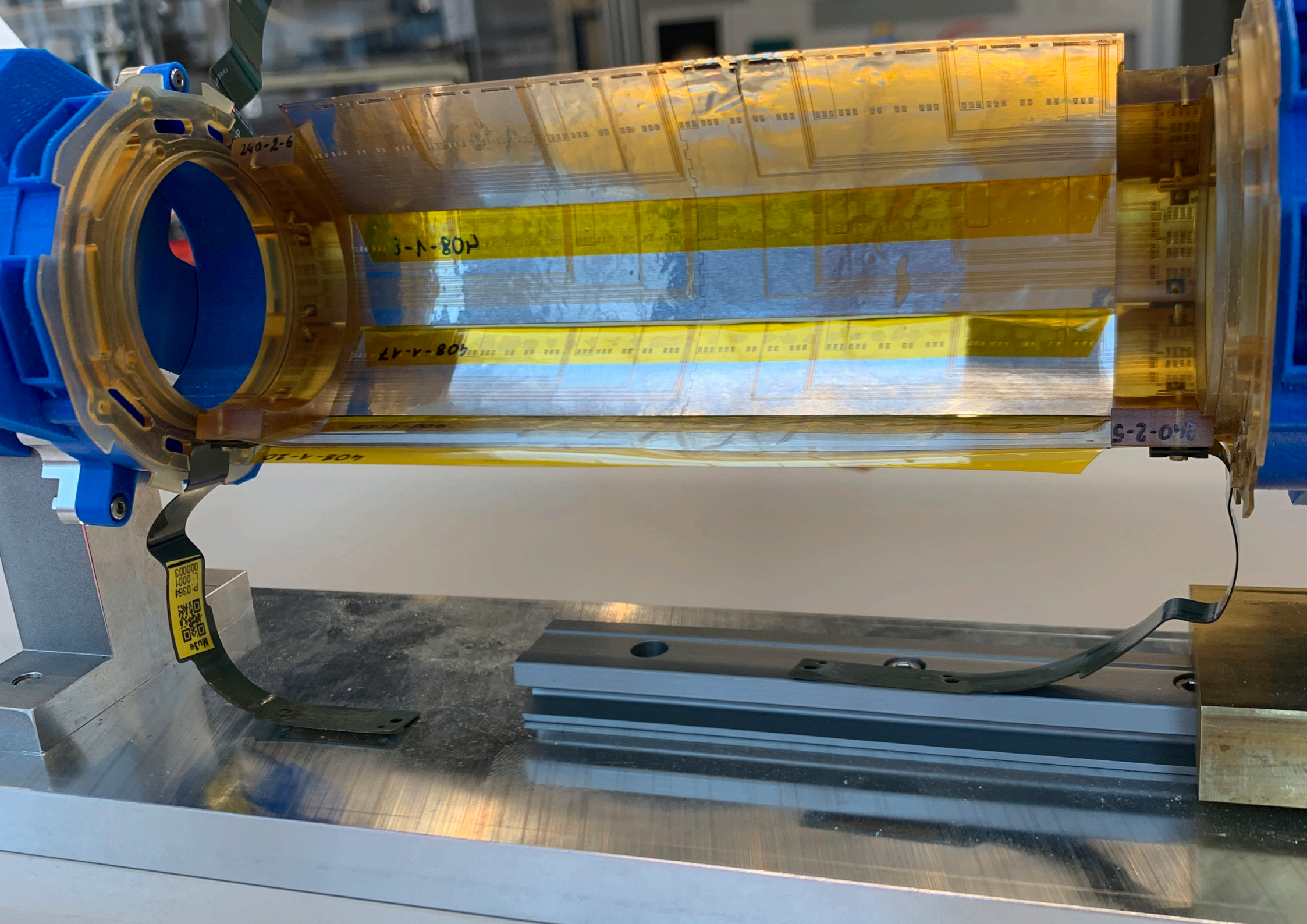


TOC  
TOC

DO  
NOT!  
touch

14.6 Round  
5mm  
14.6mm  
6mm  
3.5mm





240-2-6

408-1-3

408-1-17

240-2-5

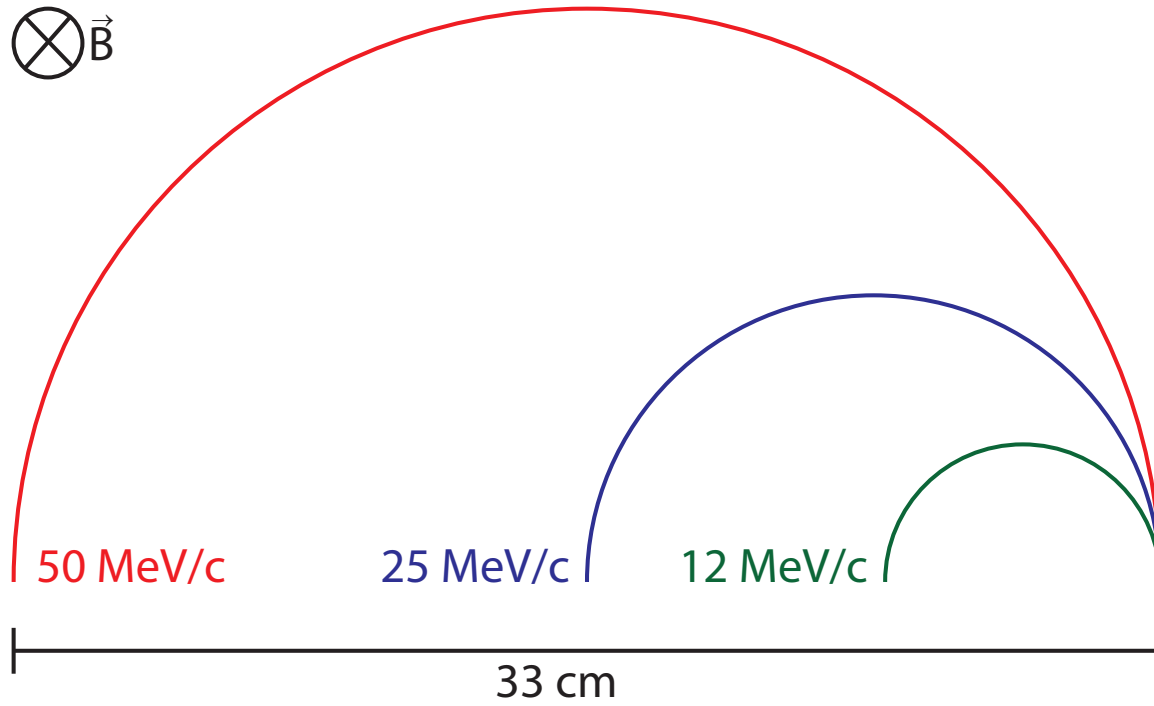
Made  
P-0384  
L-0001  
000003

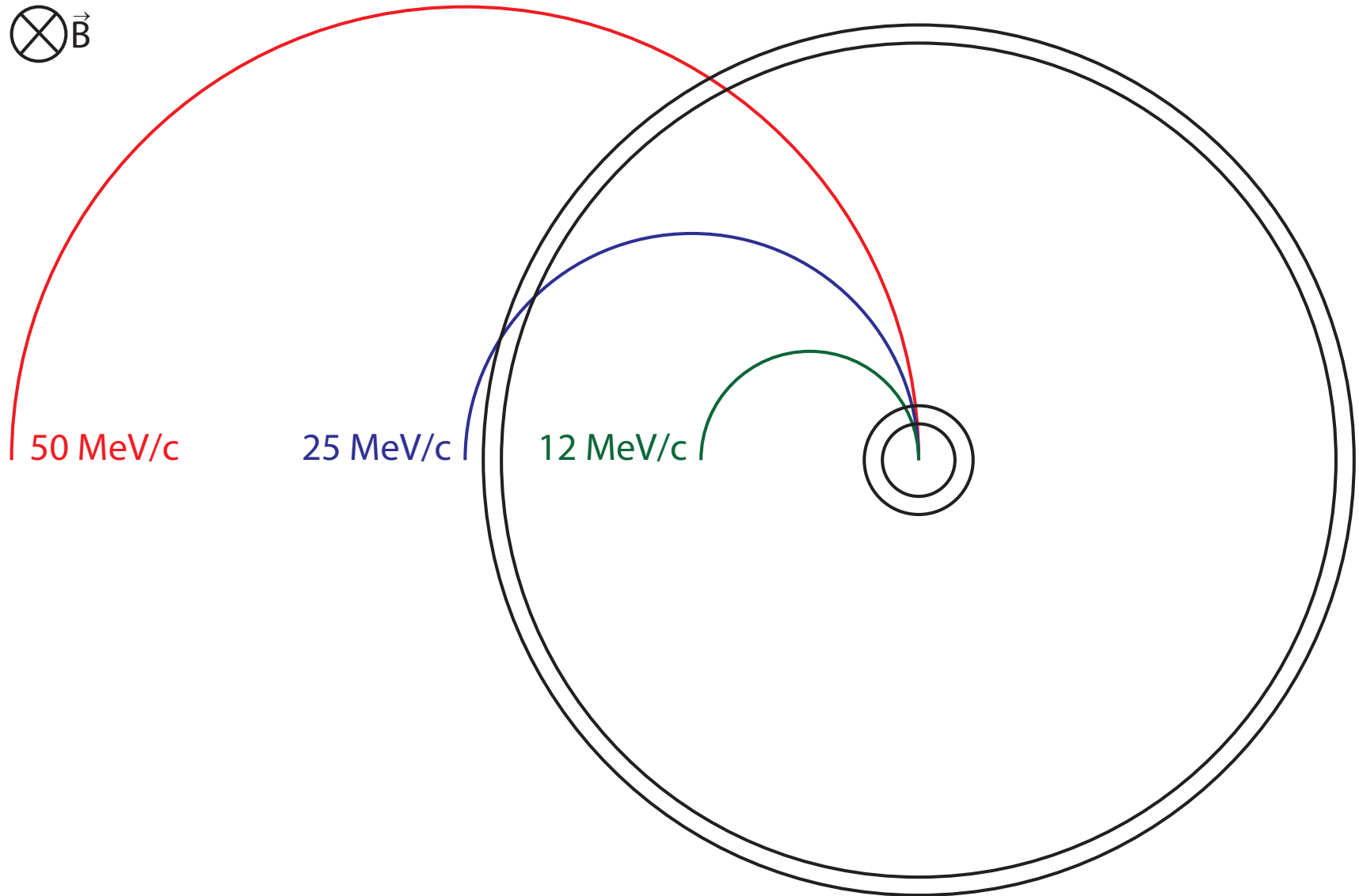


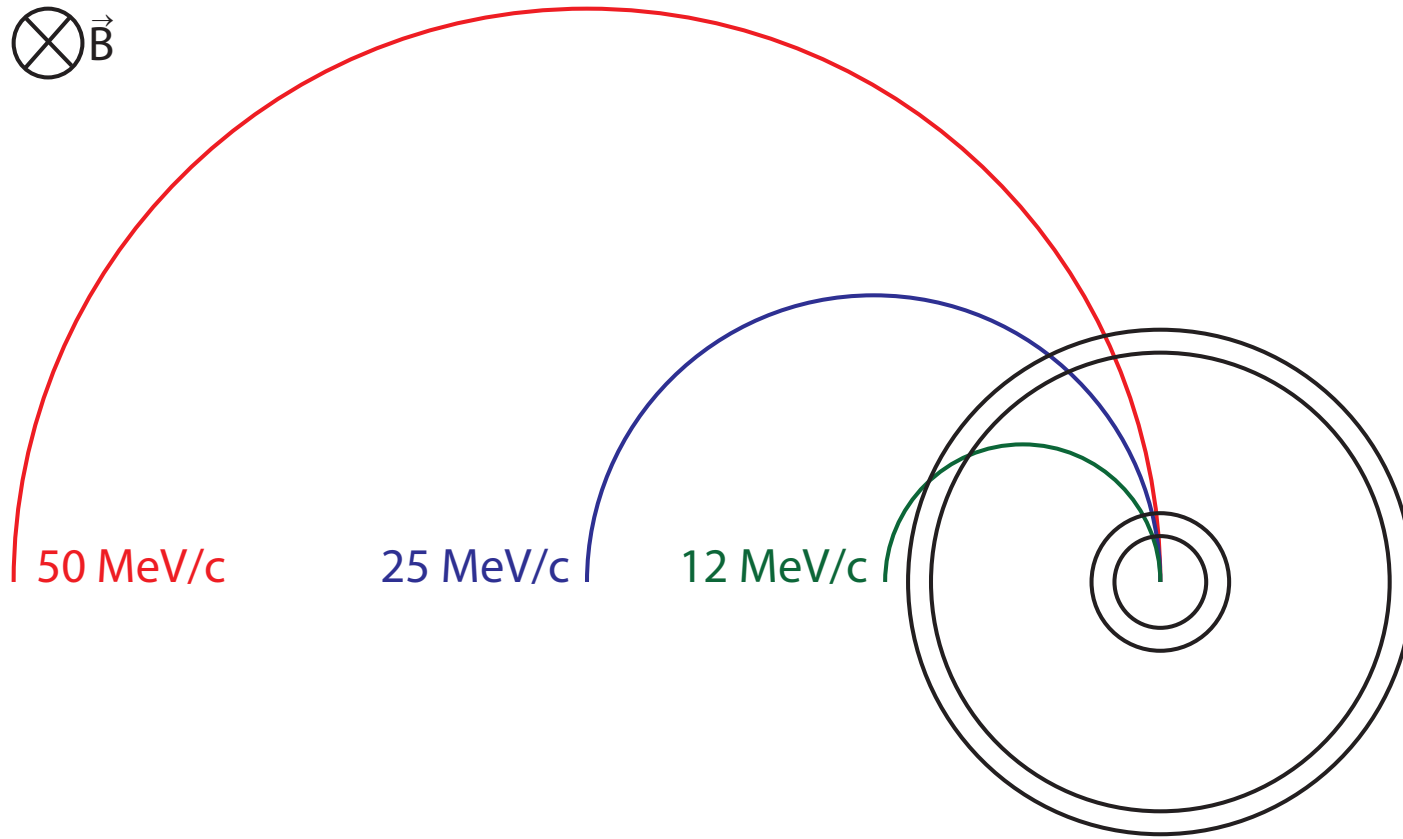


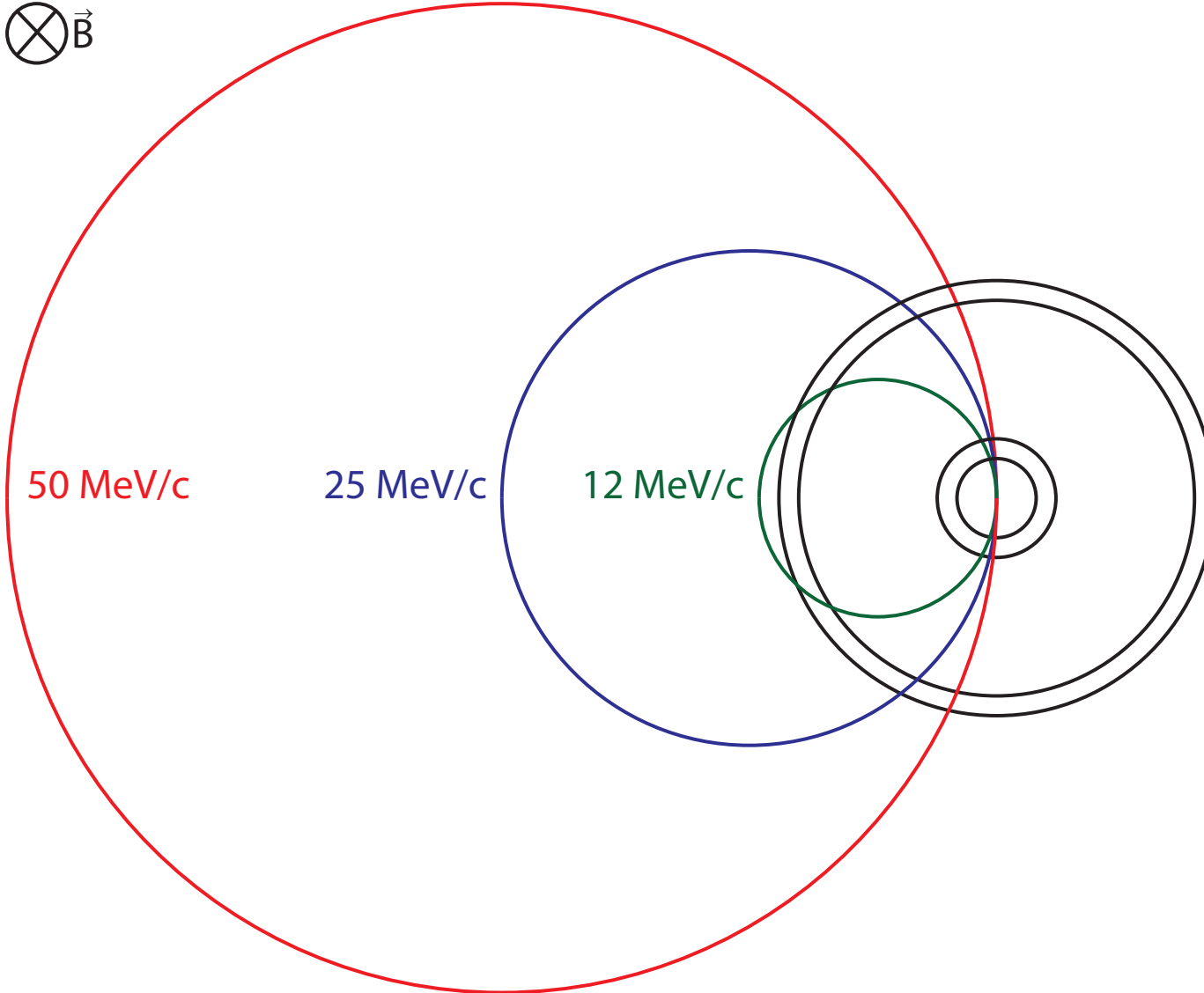
Wie ordne ich die Pixel an?

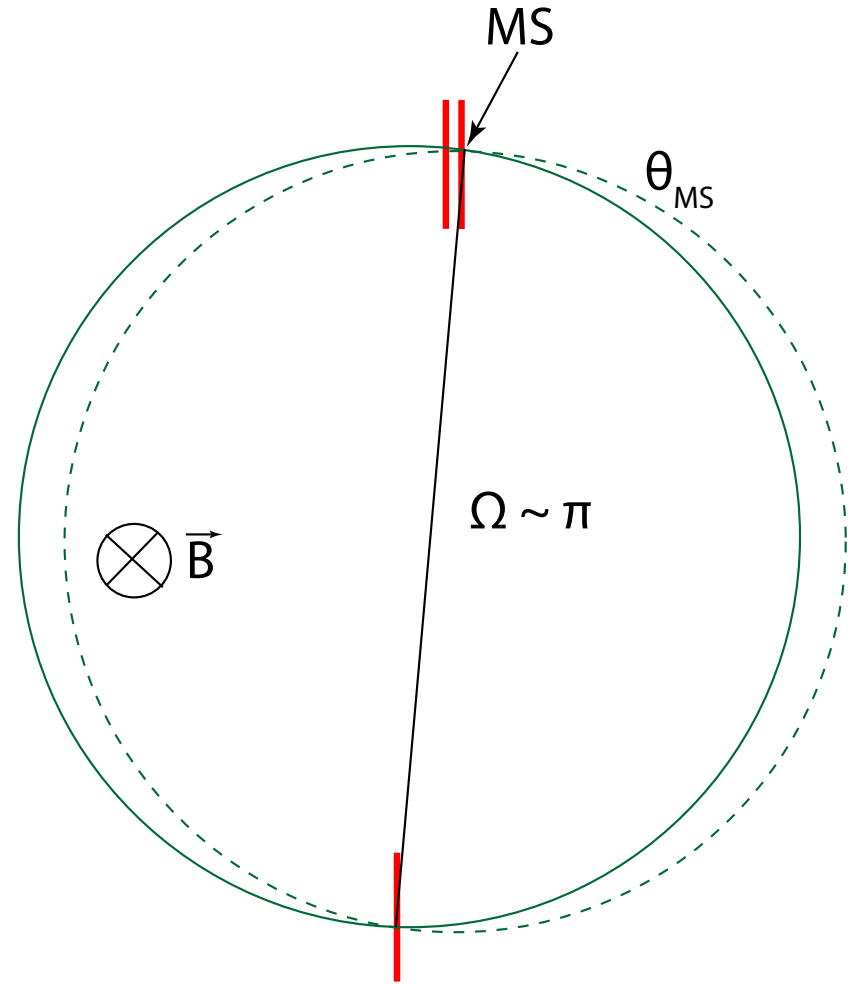
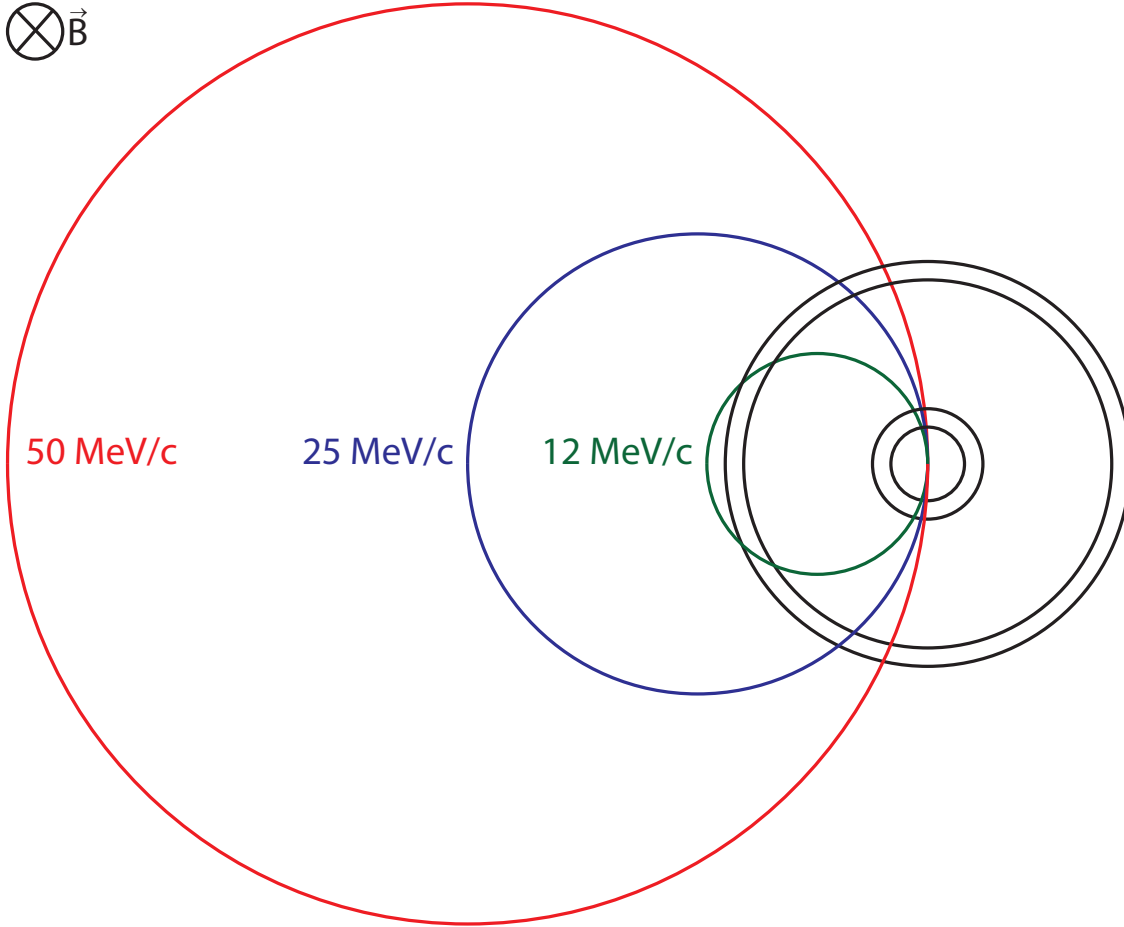












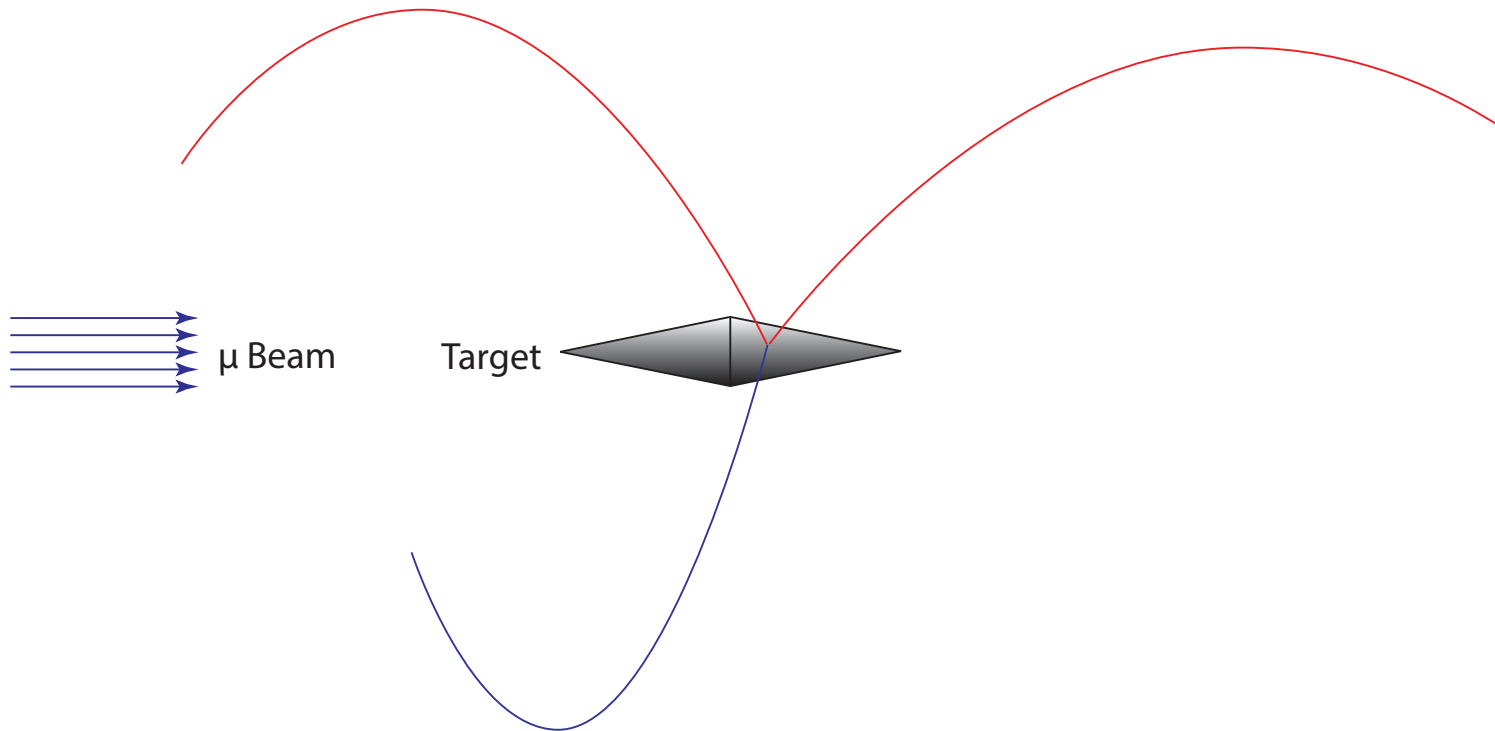


# Das komplette Experiment



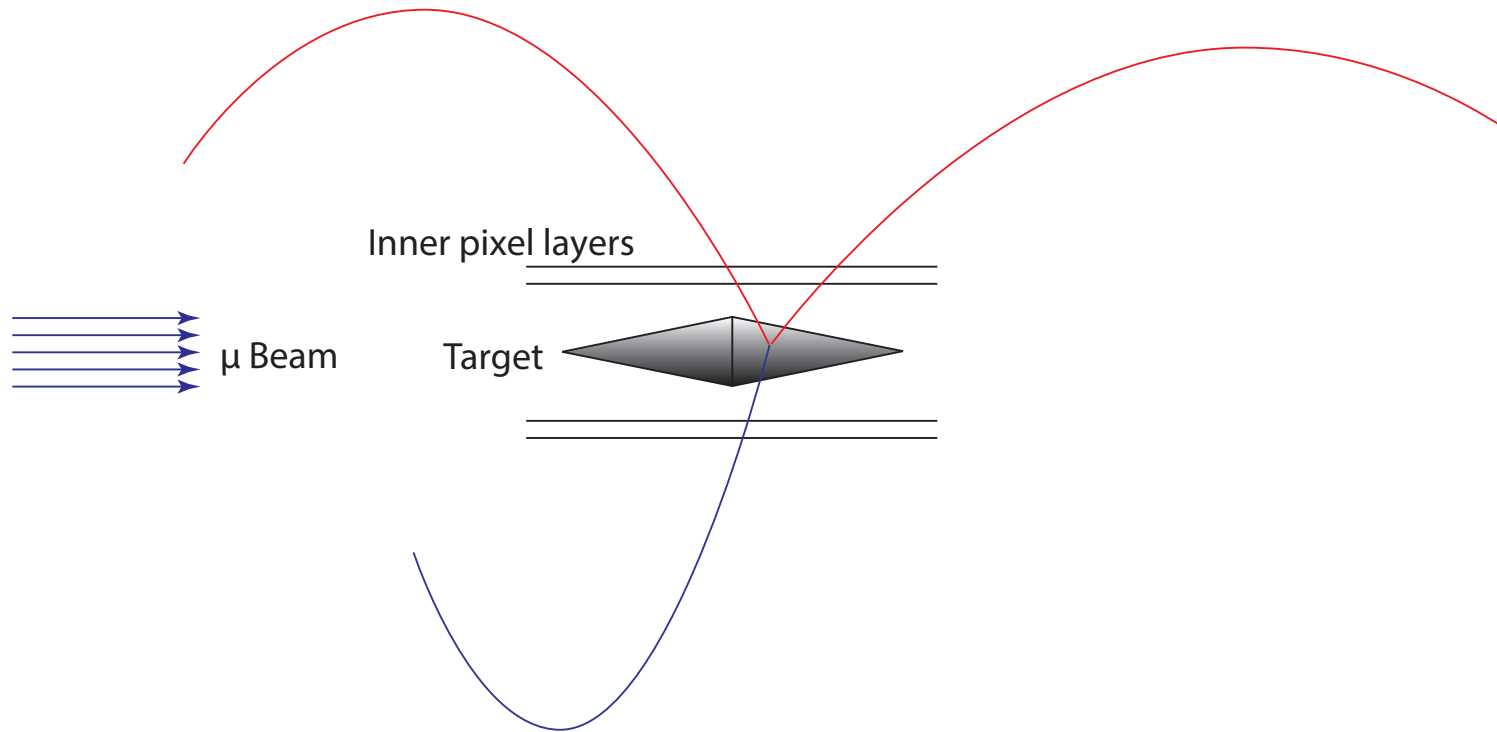


# Das komplette Experiment





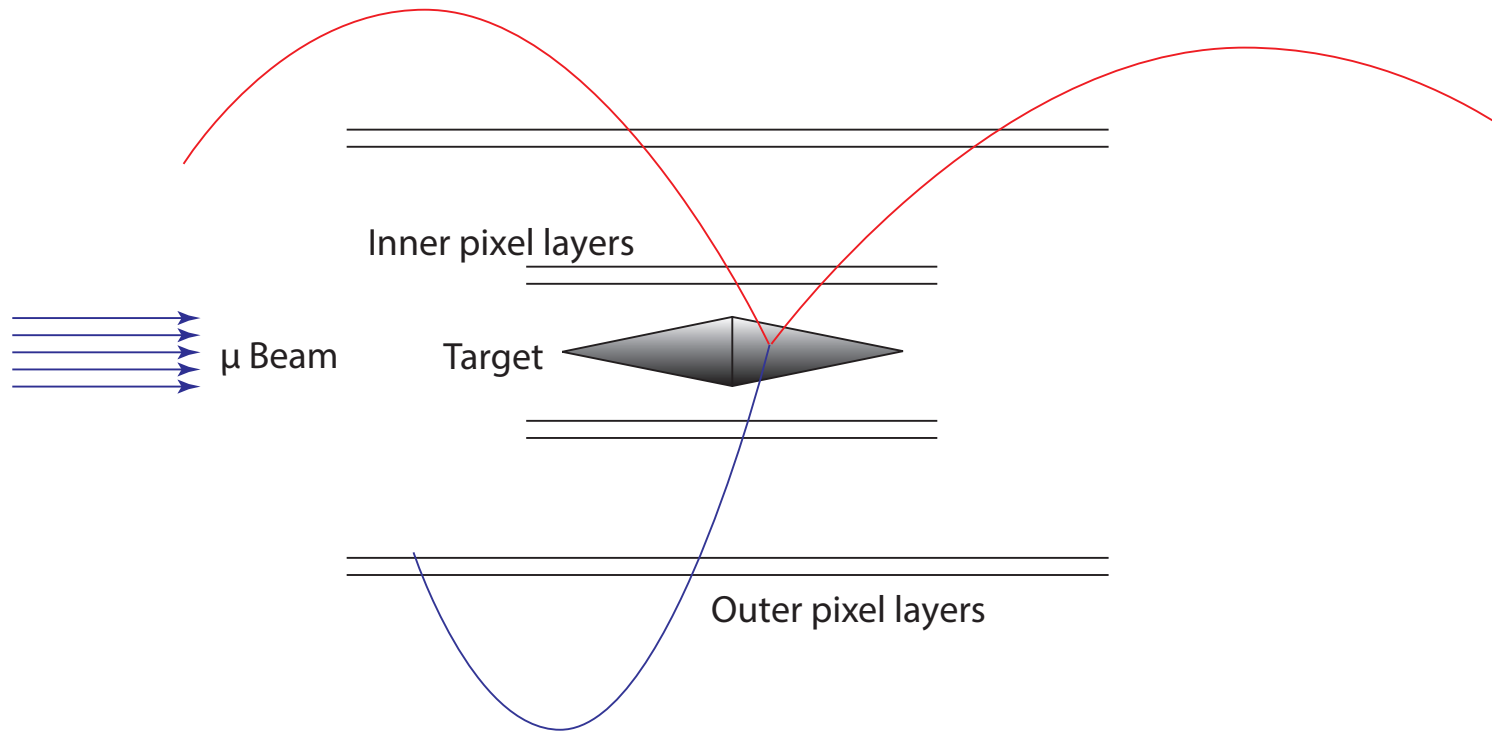
# Das komplette Experiment





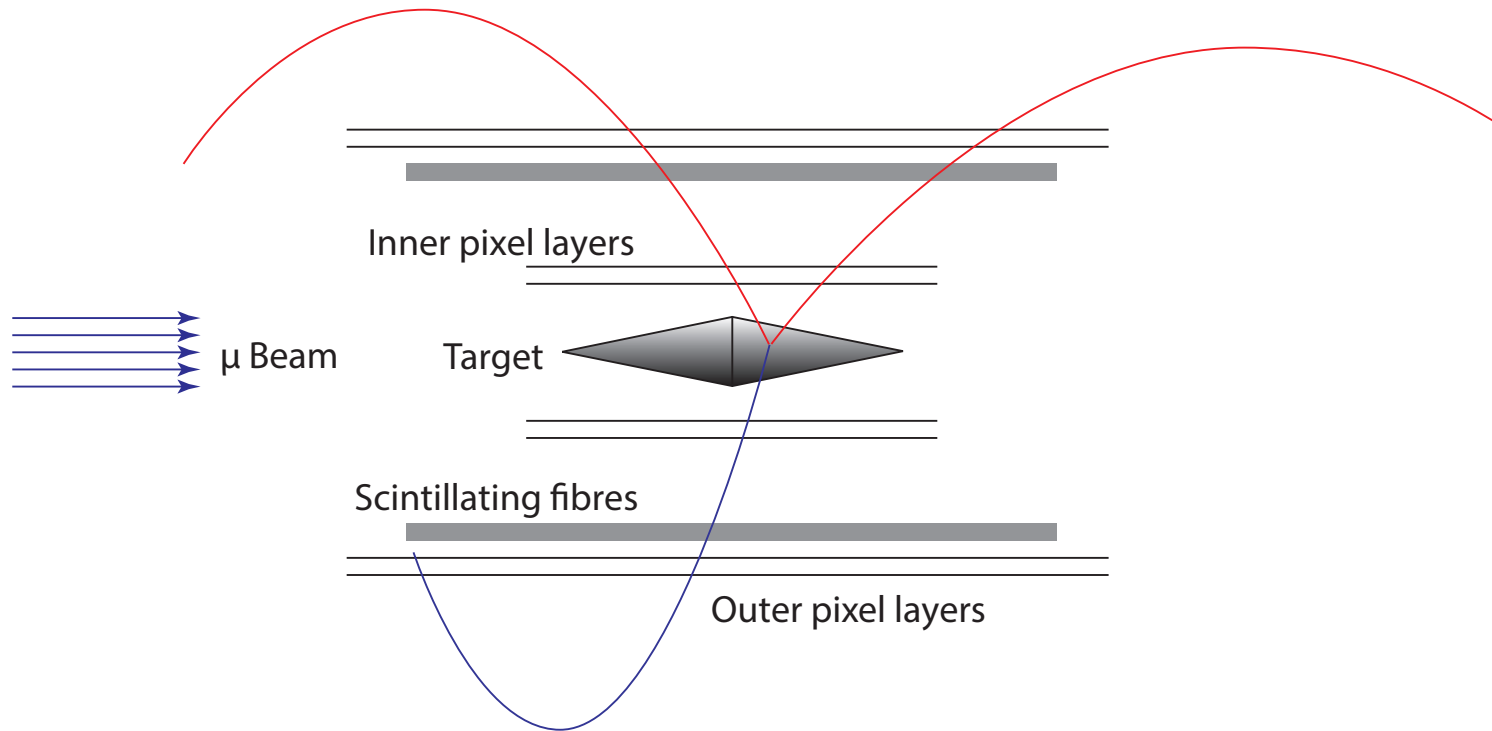


# Das komplette Experiment



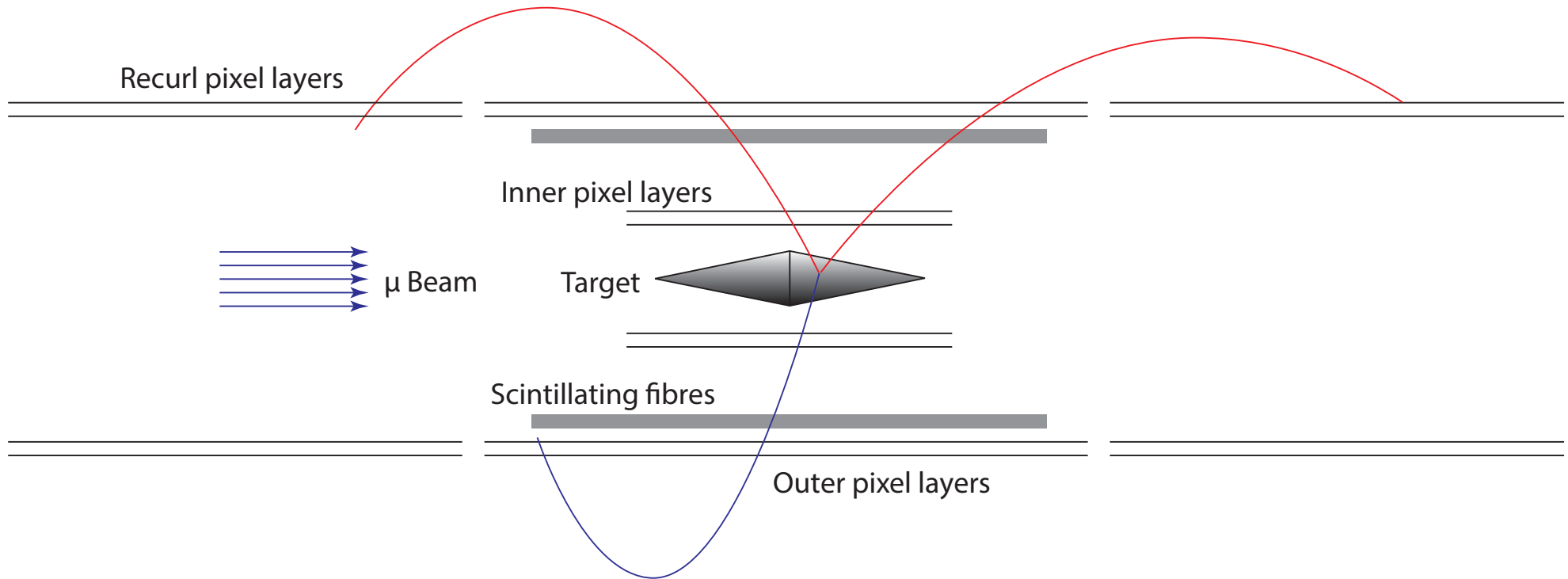


# Das komplette Experiment



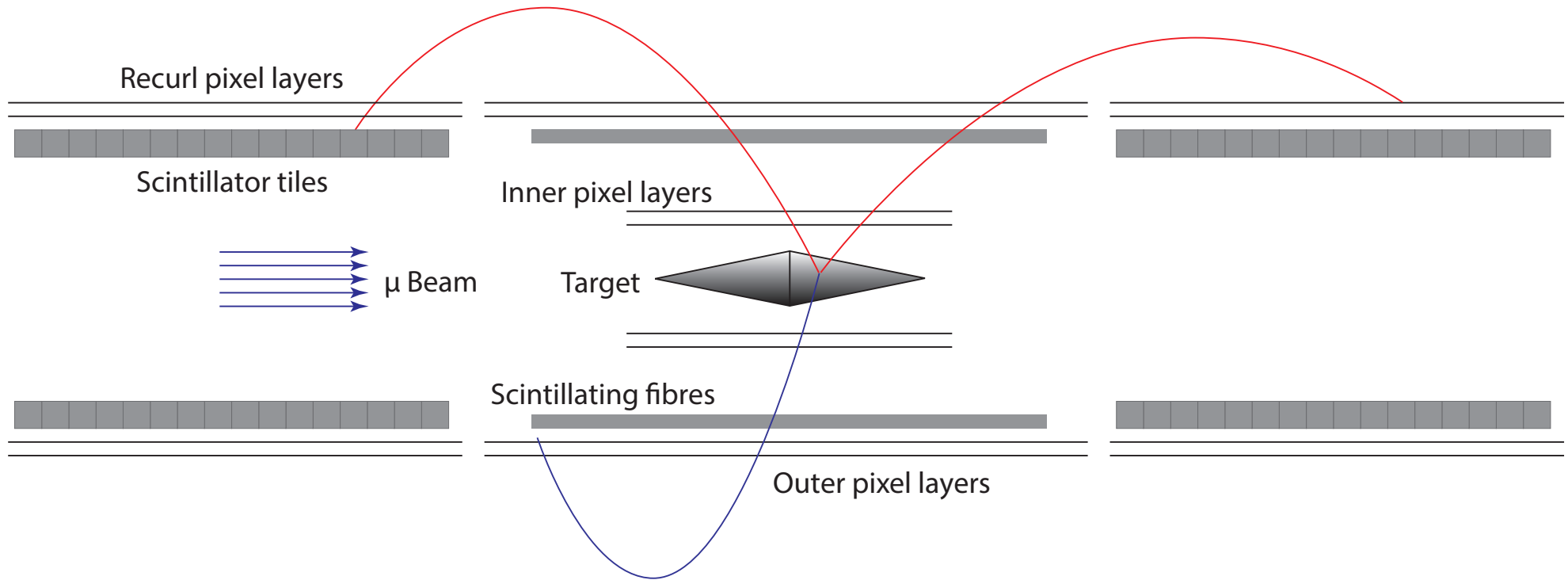


# Das komplette Experiment



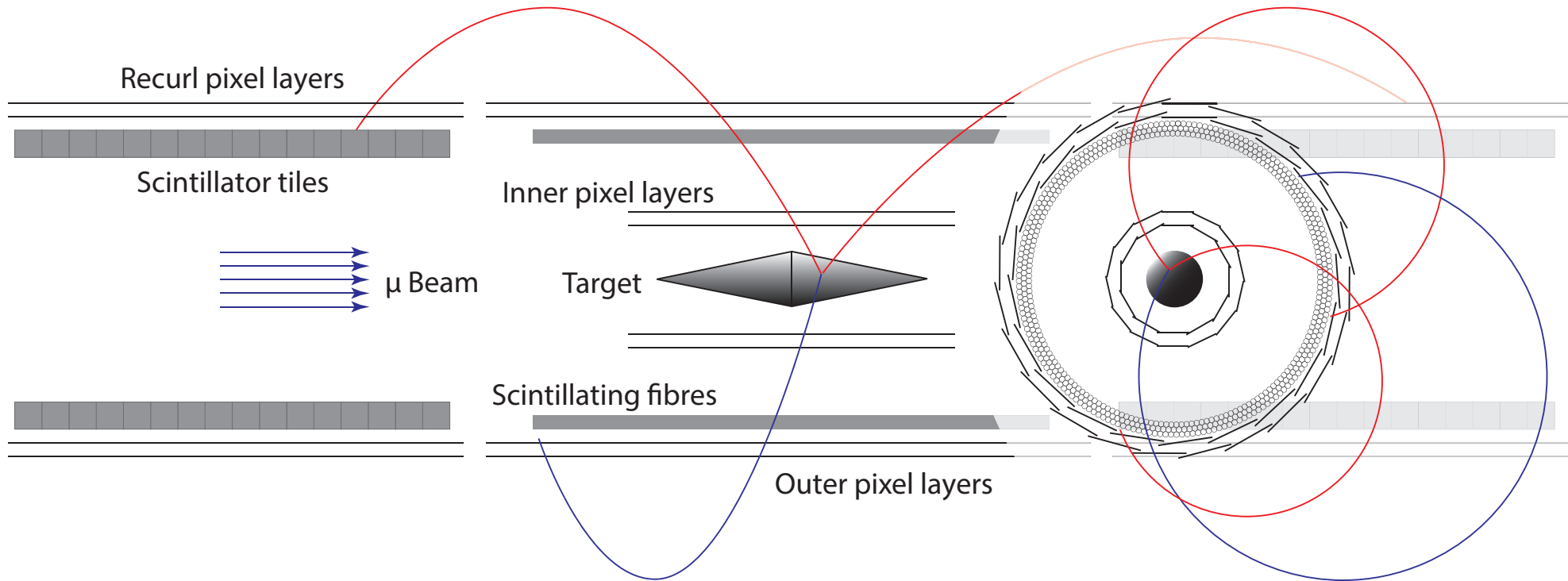


# Das komplette Experiment





# Das komplette Experiment

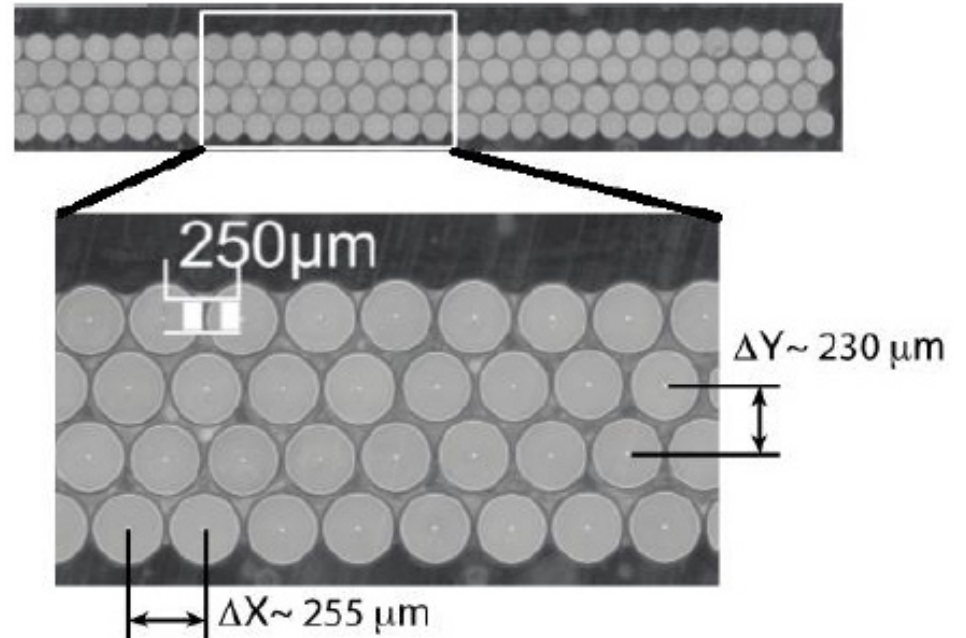
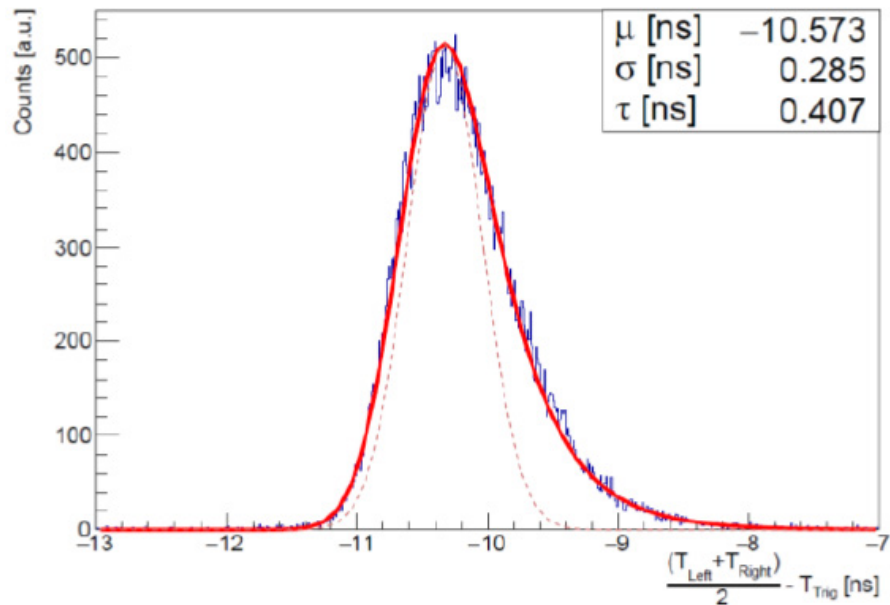




# Zeitmessung: Scintillierende Fasern



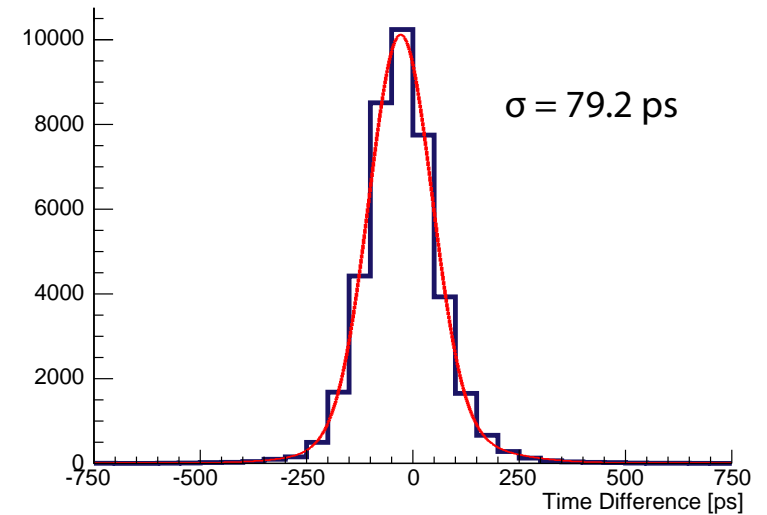
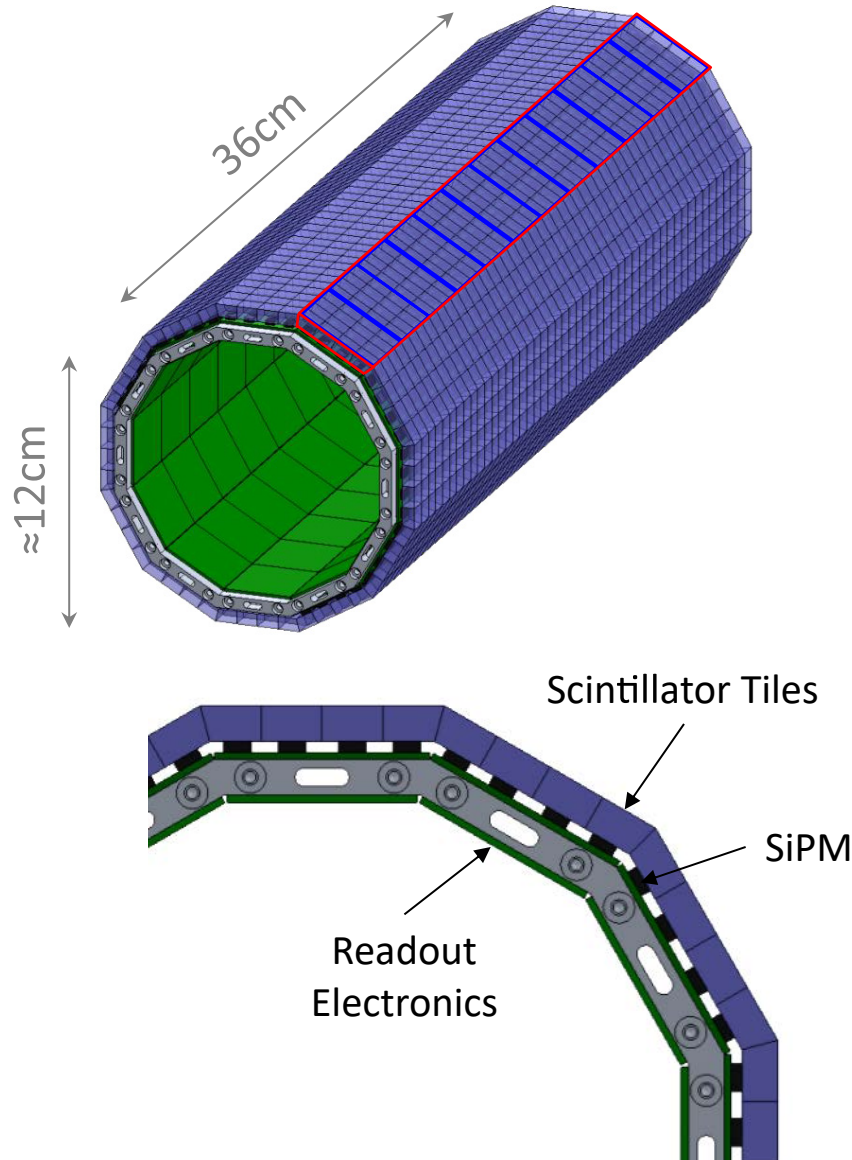
- 3 Lagen von 250  $\mu\text{m}$  szintillierenden Fasern - auch sehr dünn
- Auslese mit Silizium-Photomultipliern und einem selbst entwickelten Chip (MuTrig)
- Zeitauflösung  $< 0.5$  ns





# Zeitmessung: Szintillierende Kacheln

- $\sim 0.5 \text{ cm}^3$  szintillierende Kacheln
- Auslese mit Silizium-Photomultipliern und einem selbst entwickelten Chip (MuTrig)

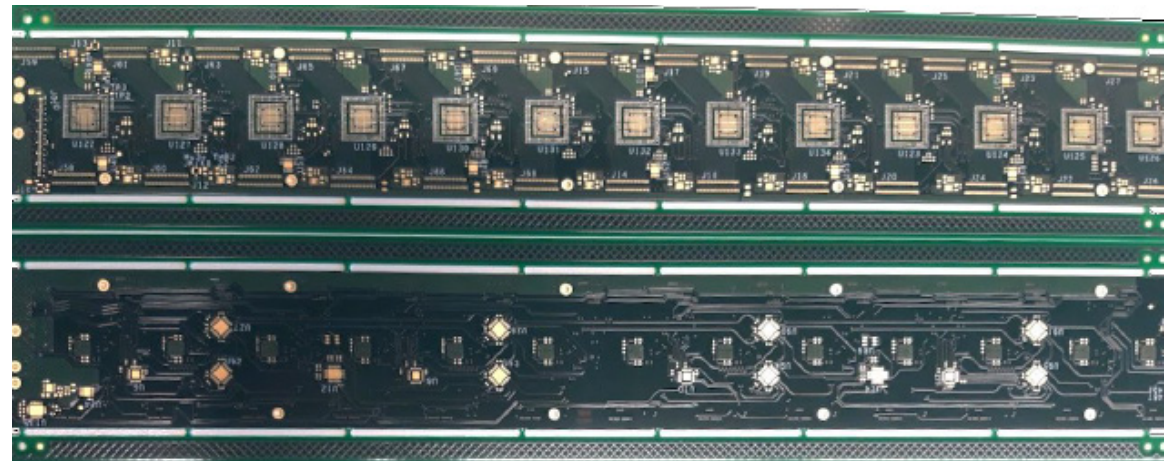
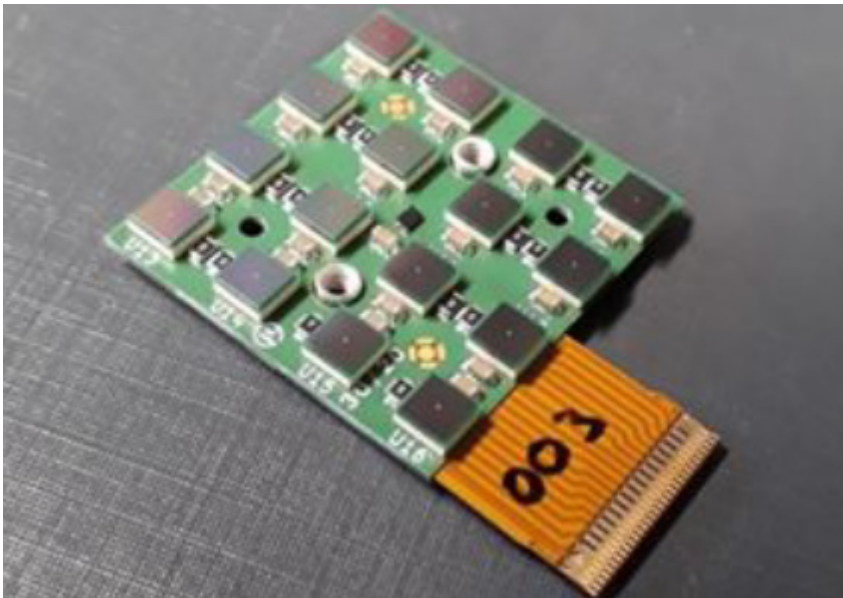
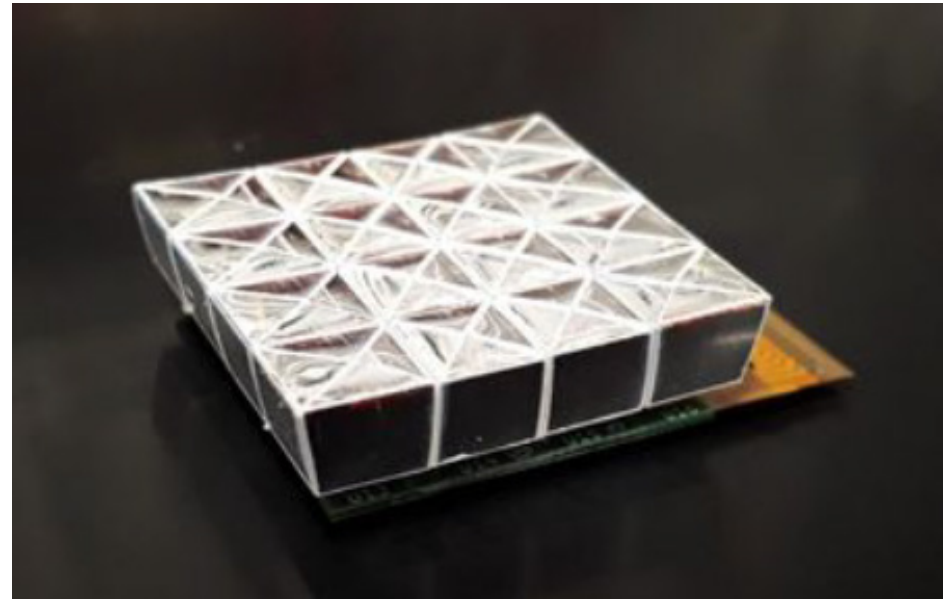


- Zeitauflösung  $\sim 80 \text{ ps}$





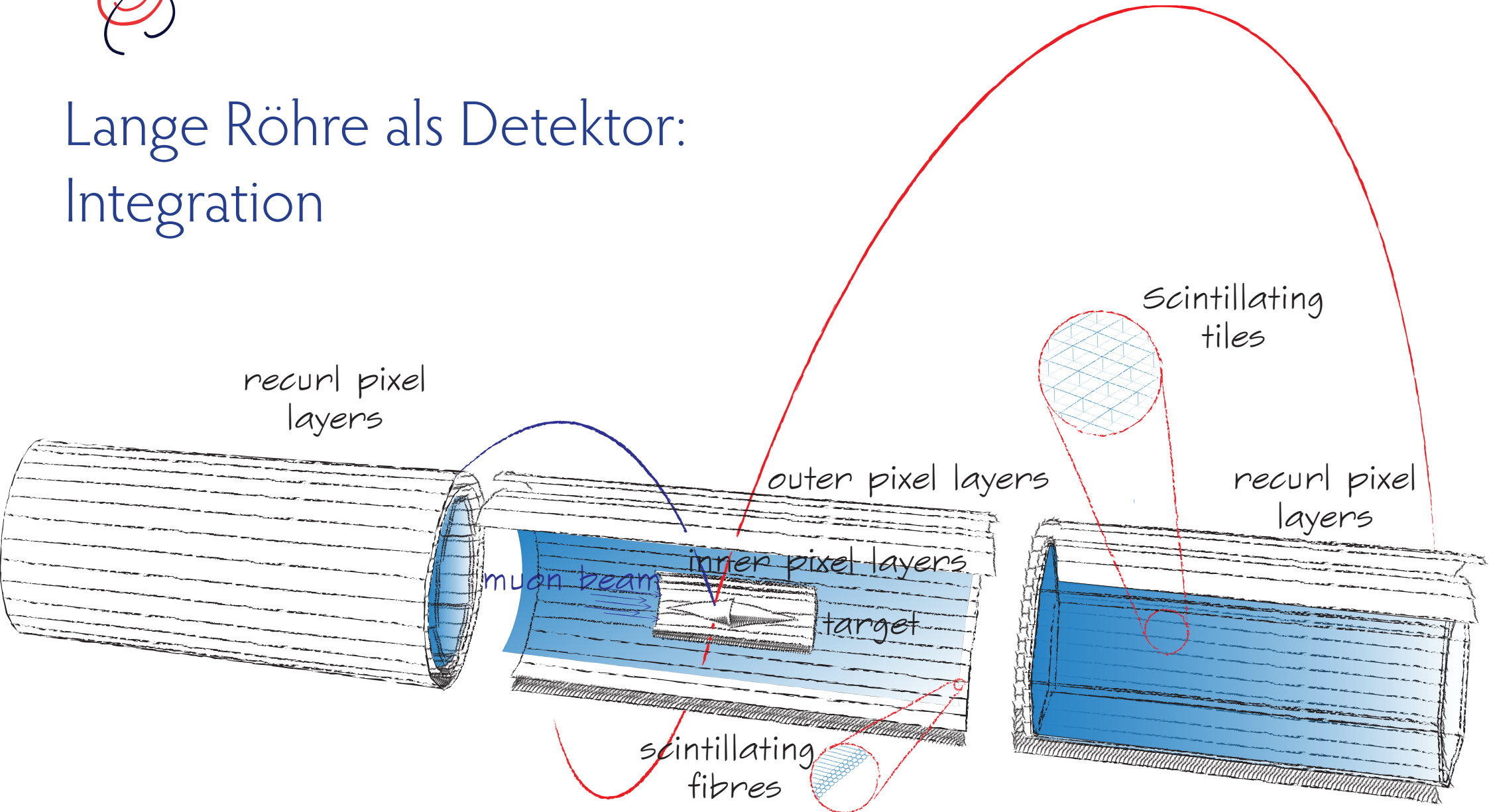
# Zeitmessung: Szintillierende Kacheln







# Lange Röhre als Detektor: Integration



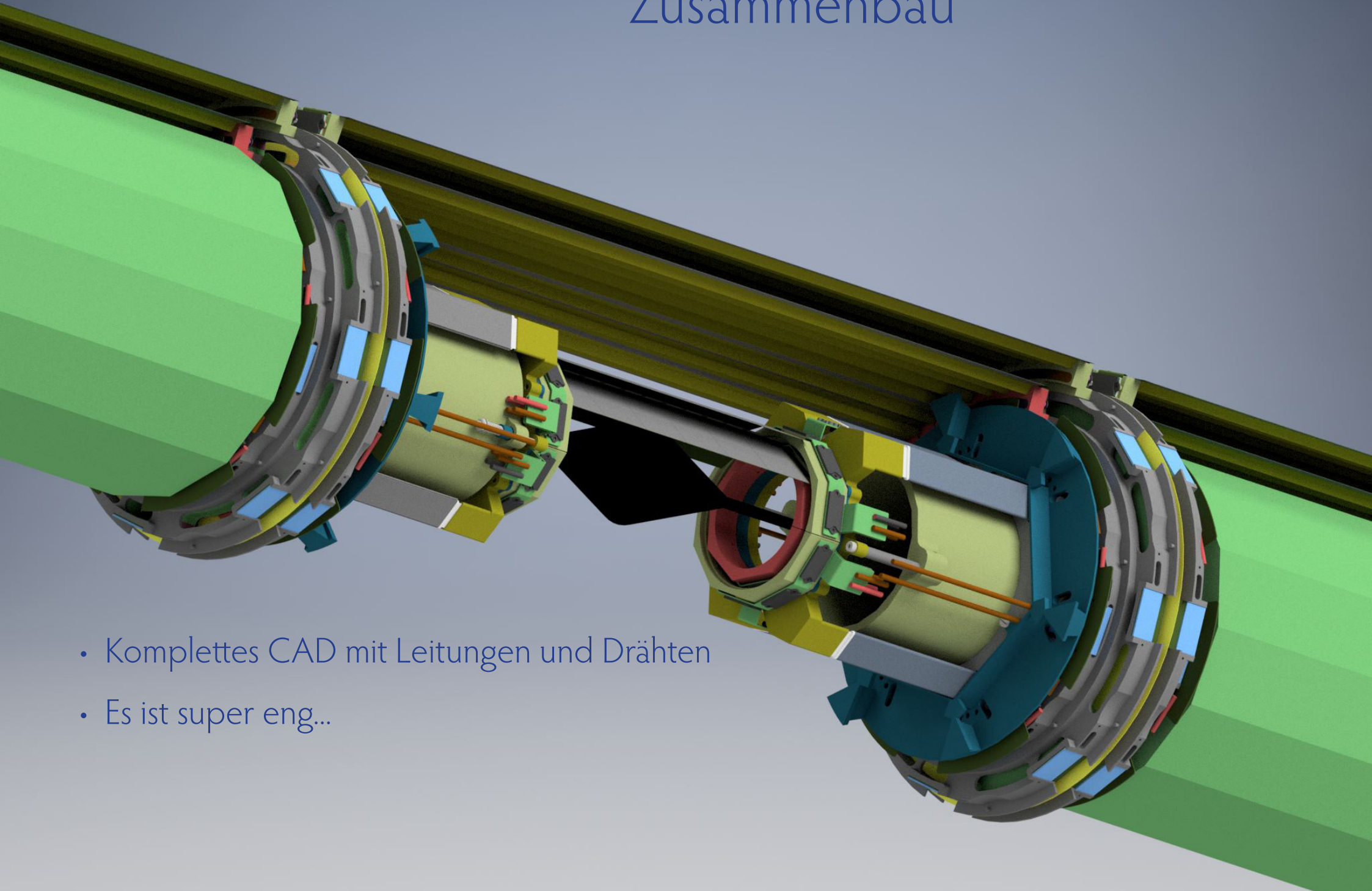
# Kühlung

- Pixel chips:  $\sim 200 \text{ mW/cm}^2$  - total etwa 2 KW
- So wenig wie möglich zusätzliches Material Heliumgas bei  $\sim 0^\circ\text{C}$
- Brauche etwa 50 g/s ( $\sim 280 \text{ Liter/s}$  bei STP...)
- Helium ist schwierig zu pumpen
- Kleine, sehr schnelle Turbokompressoren



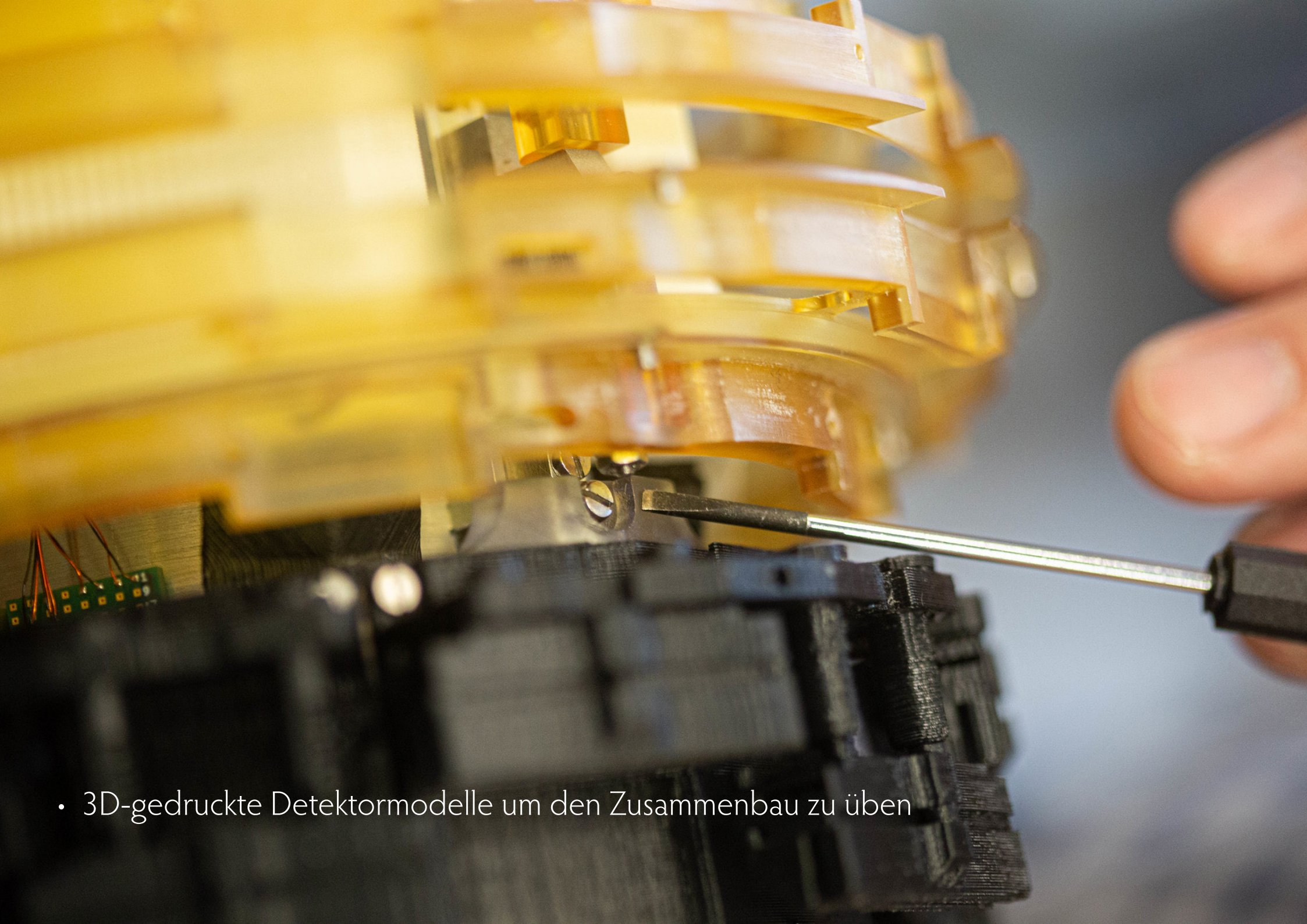


# Zusammenbau



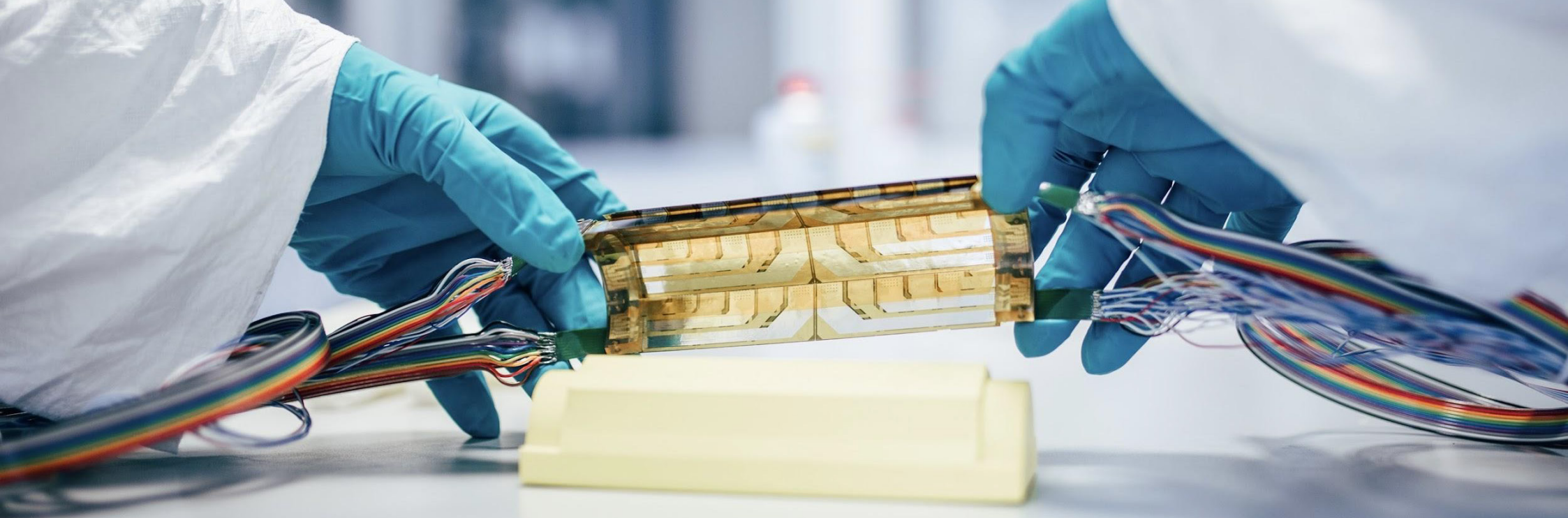
- Komplettes CAD mit Leitungen und Drähten
- Es ist super eng...





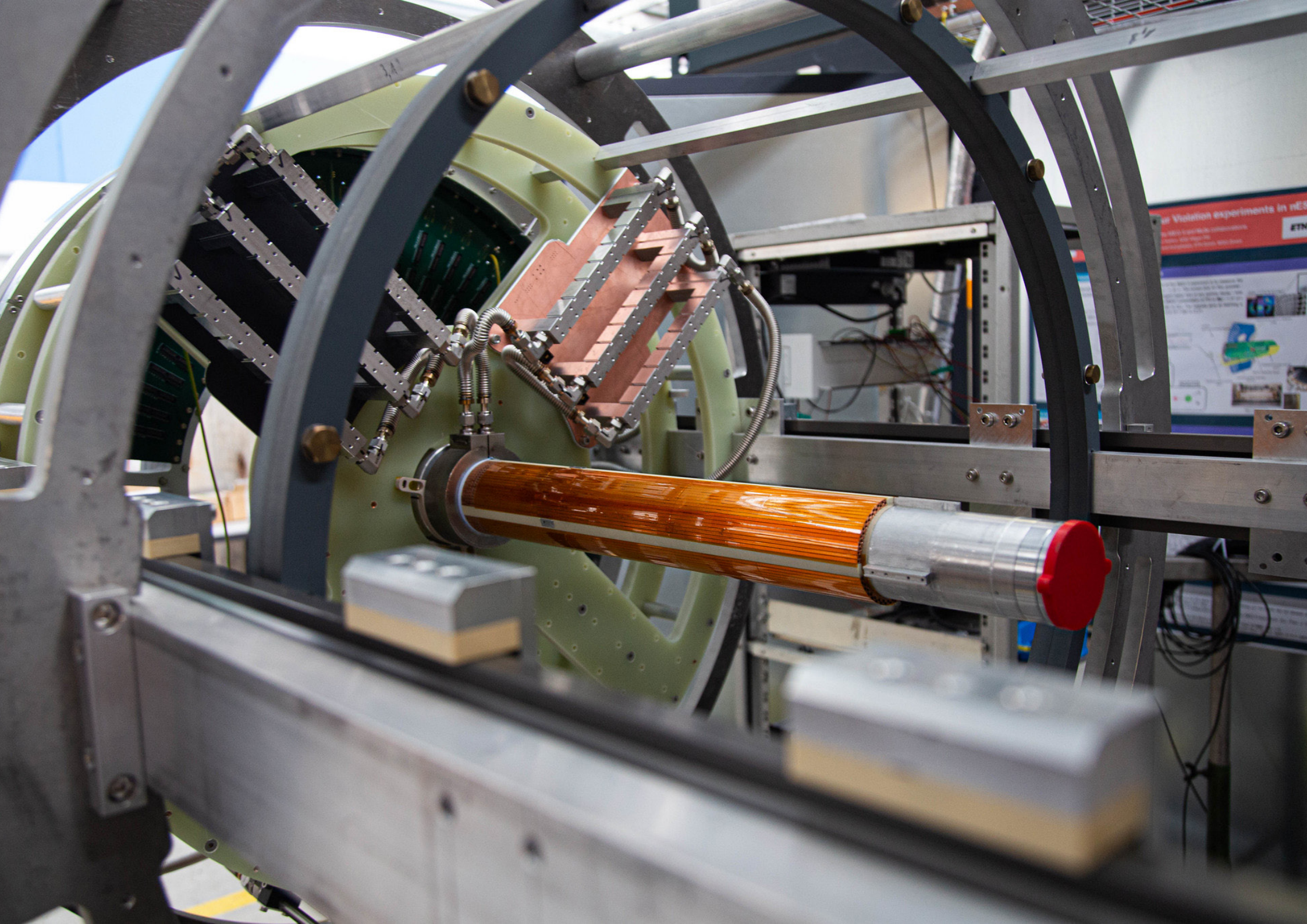
- 3D-gedruckte Detektormodelle um den Zusammenbau zu üben





Zusammenbau und Kühlung wurde mit  
heizbarem Prototypen getestet











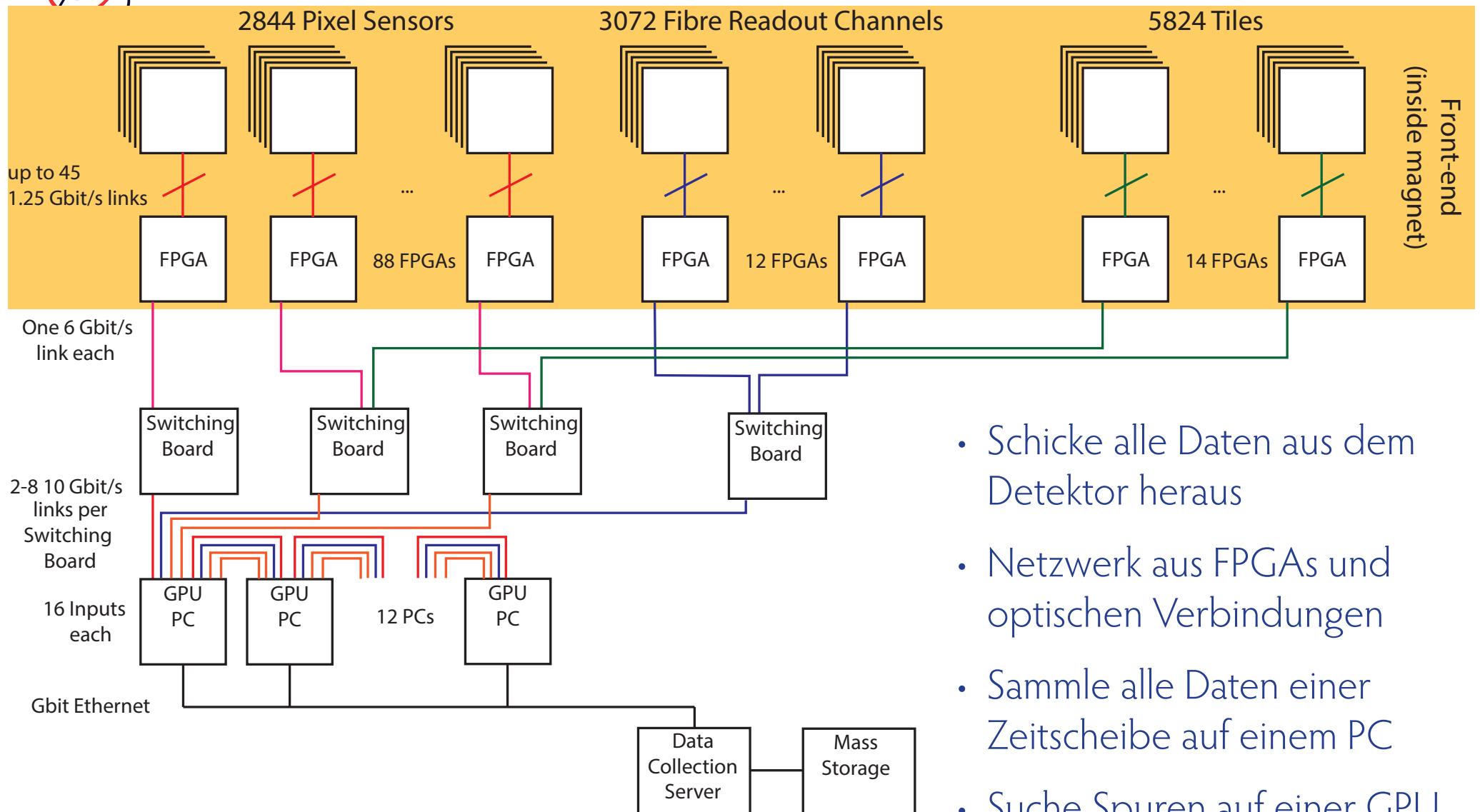


# Auslesesystem

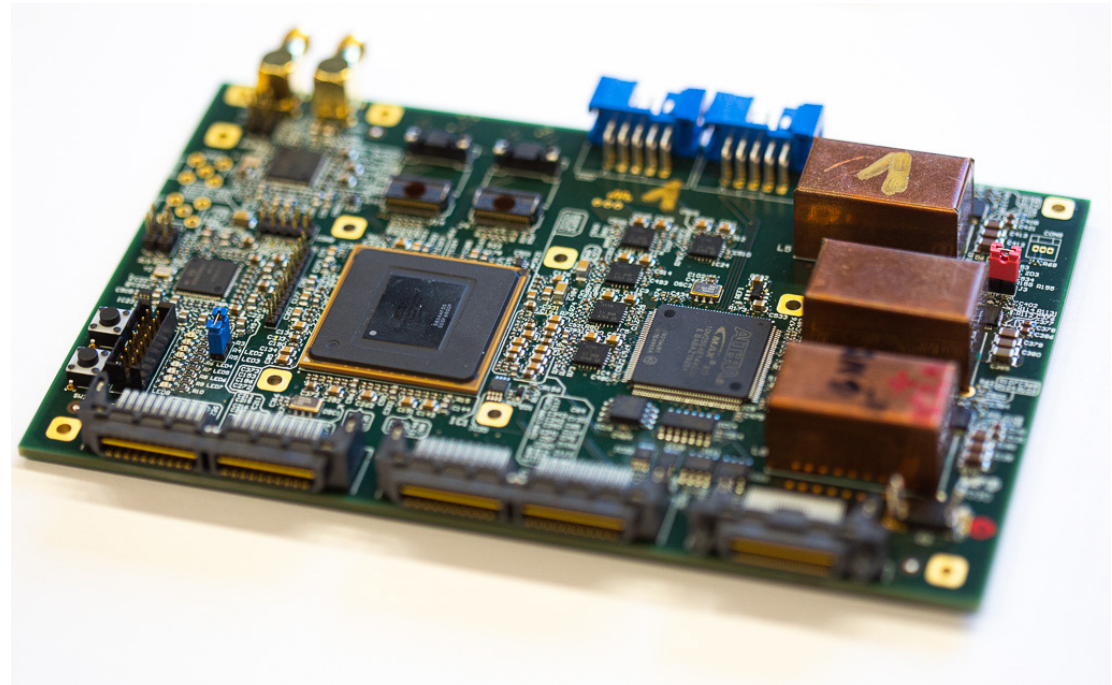
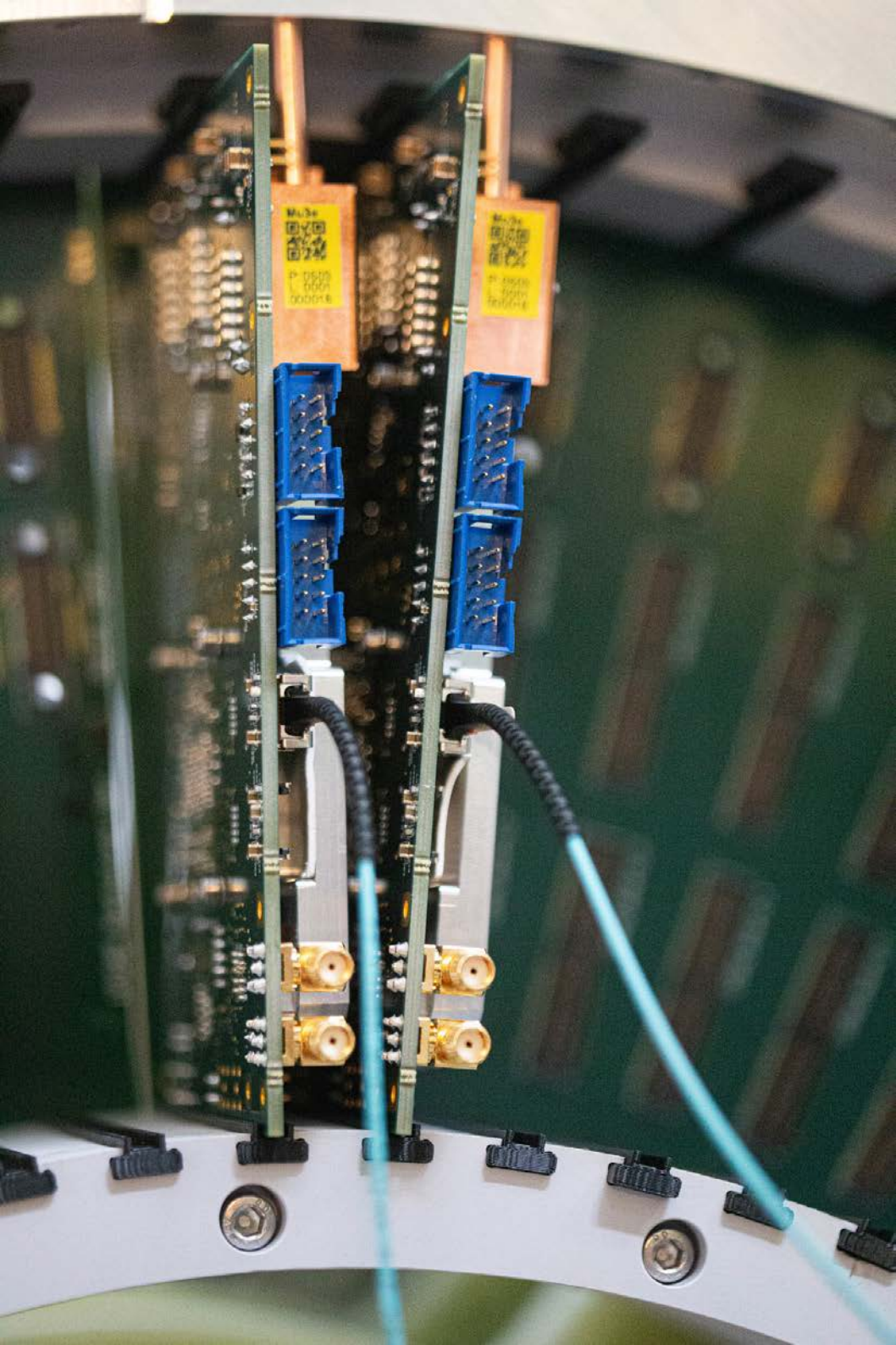




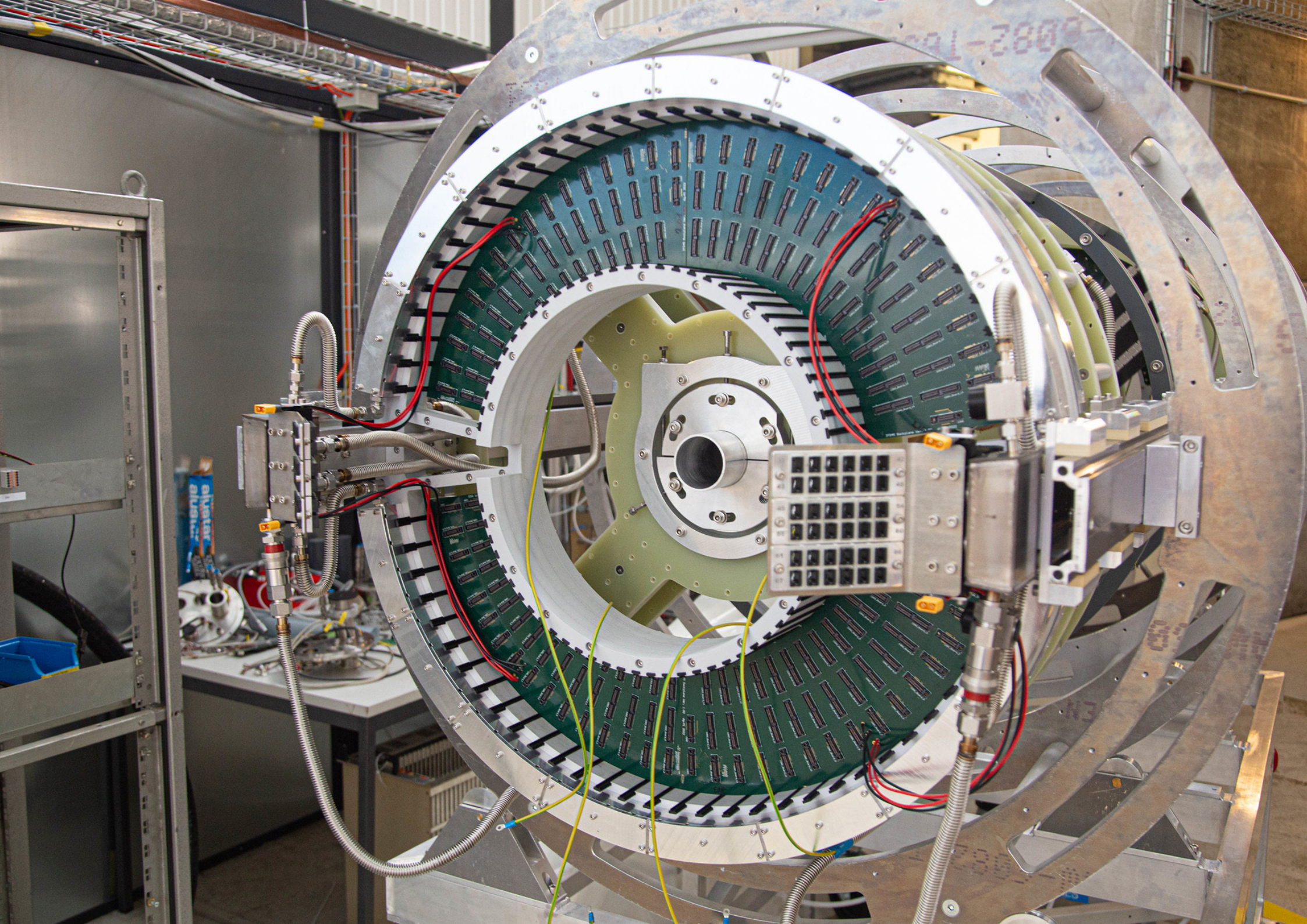
# DAQ Design



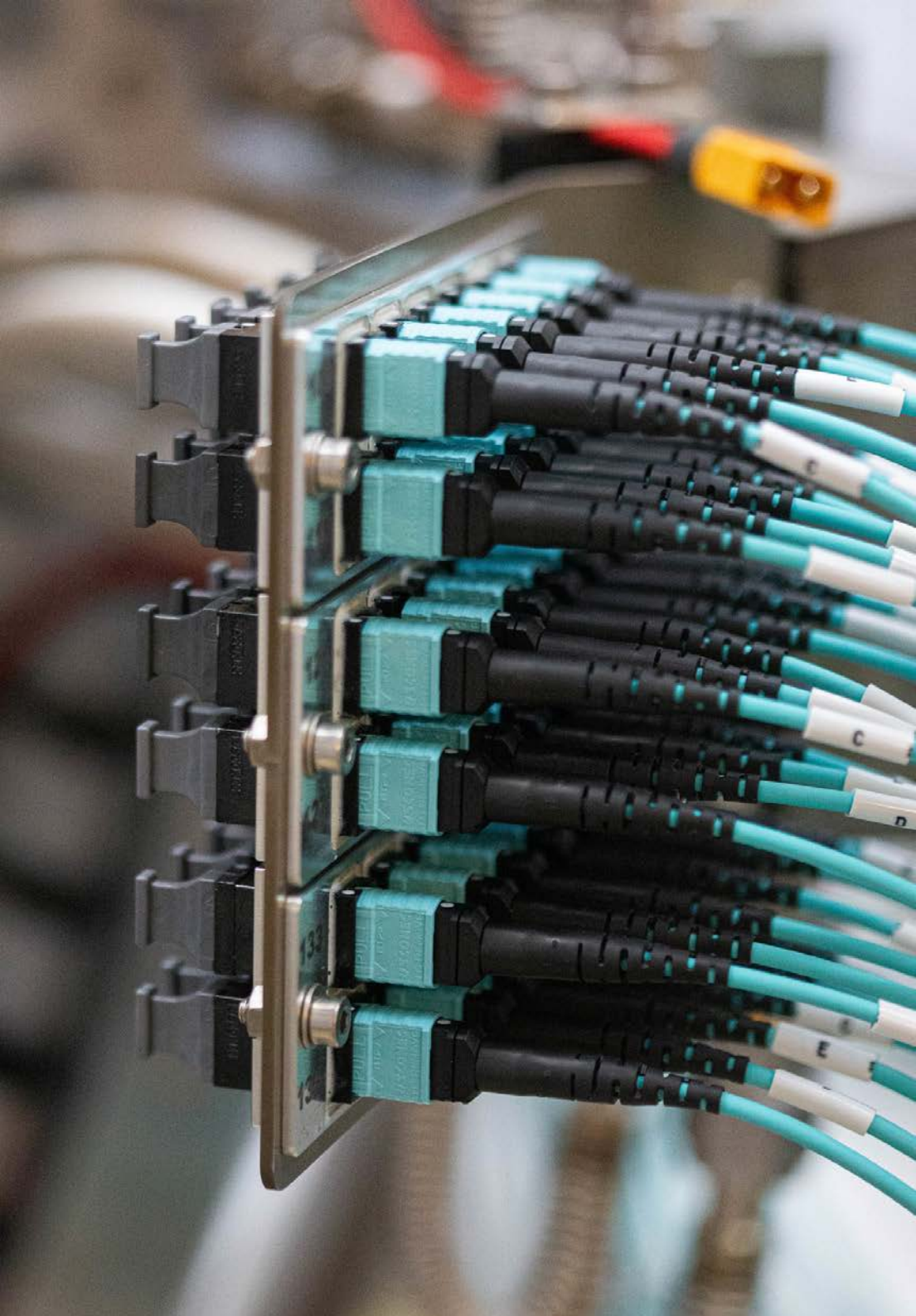
- Schicke alle Daten aus dem Detektor heraus
- Netzwerk aus FPGAs und optischen Verbindungen
- Sammle alle Daten einer Zeitscheibe auf einem PC
- Suche Spuren auf einer GPU



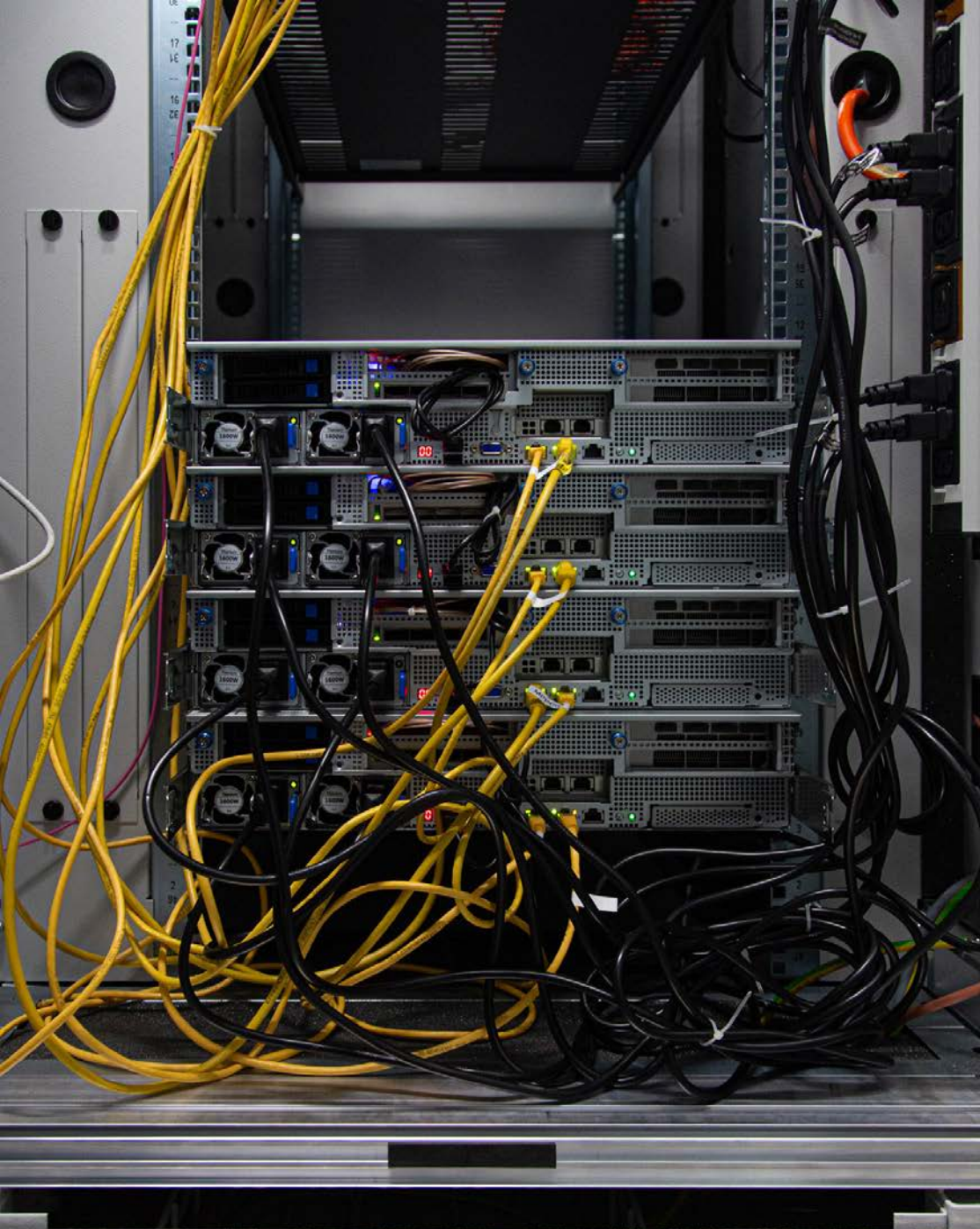
















# GPU-Rekonstruktion



- GPU-Rekonstruktion auf Game-Karten
- $> 10^9$  Spurfits/s per GPU (Nvidia GTX 980)
- Zwölf GTX 1080Ti sind ausreichend um  $10^8$  Muonzerfälle/s zu verarbeiten
- ~ 8 Jahre vergehen
- Nur vier RTX 4090 für Mu3e phase I nötig
- Phase I?

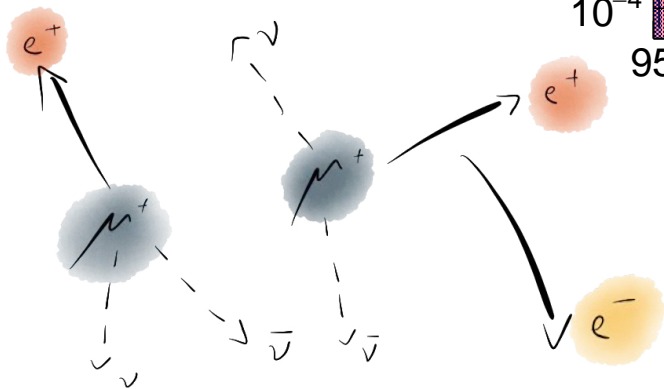
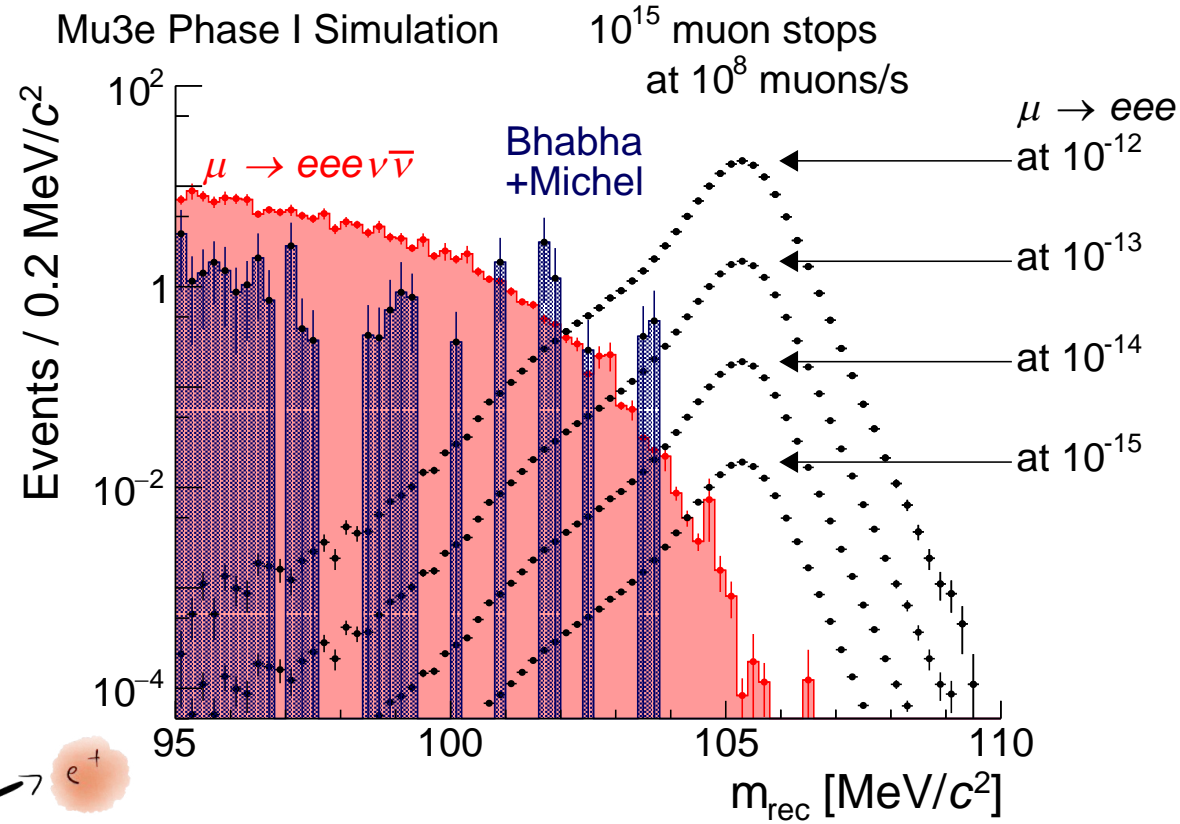
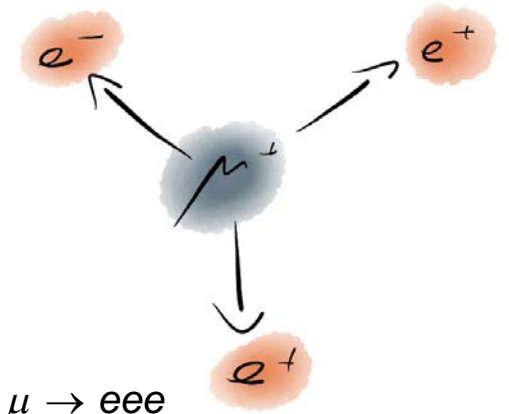


# Mehr und mehr Muonen

- PSI liefert im Moment bis zu  $10^8$  Muonen/s
- Wir bauen ein Experiment (Phase I) dafür
- PSI baut 2027/28 eine neue Strahlline, die High-intensity Muon Beamline (HiMB)
- Wir müssen beim Experiment dann nochmal nachlegen... - Mu3e Phase II



# Simulation für Phase I

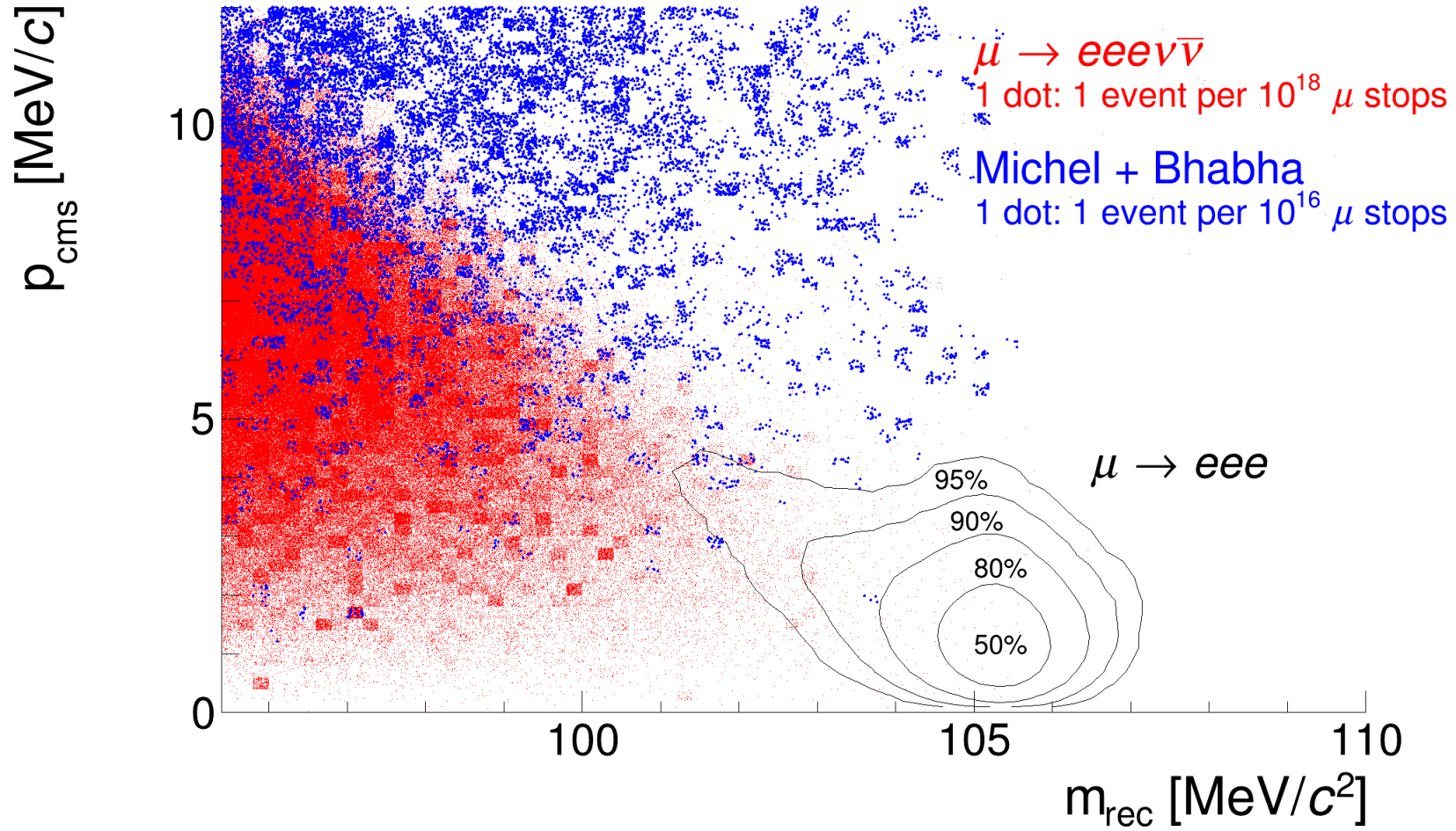






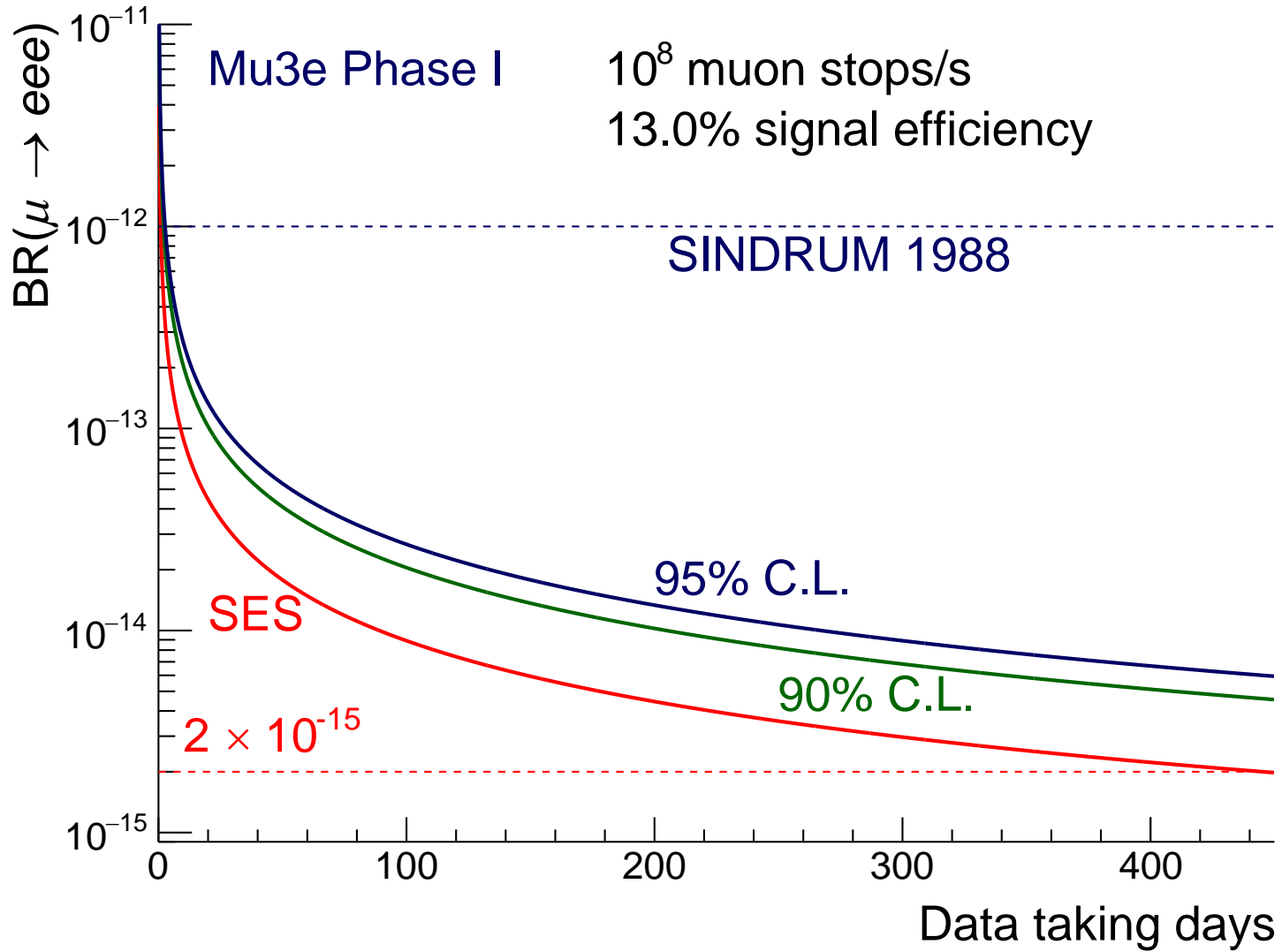
# Simulation für Phase I

## Mu3e Phase I Simulation





# Sensitivität





# Zusammenfassung/Ausblick

Das Mu3e-Experiment sucht nach dem Zerfall  $\mu \rightarrow eee$

- Sensitivität 1 in  $10^{16}$
- Eine Milliarde Zerfälle pro Sekunde
- 300 Millionen Pixel
- Sensoren so dünn wie ein Haar

Viele weitere spannende Technologien...

- Zusammenbau und Inbetriebnahme laufen

Team von Instituten aus Deutschland, der Schweiz und England

