



# Simulationen

zum

# Elektromagnetischen Design des KATRIN Hauptspektrometers



- Designkriterien für das KATRIN-Spektrometer
- Computersimulationen
- Status
- Zusammenfassung

*Schule für Astroteilchenphysik  
Obertrubach-Bärnfels, 11. Okt. 2004*

*Kathrin Valerius  
Helmholtz-Institut für Strahlen- und Kernphysik  
Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn*



VIDMAN  
Virtual Institute for  
Dark Matter And Neutrinos



# 1) Einführung:

## Das Karlsruhe TRitium Neutrino Experiment



Direkte Bestimmung von  $m(\nu_e)$  mit hoher Sensitivität

Entdeckungspotential  $m(\nu_e) = 0.35 \text{ eV}$  ( $5\sigma$ )

$m(\nu_e) = 0.30 \text{ eV}$  ( $3\sigma$ )

Obergrenze  $m(\nu_e) < 0.2 \text{ eV}$  (90% C.L.)

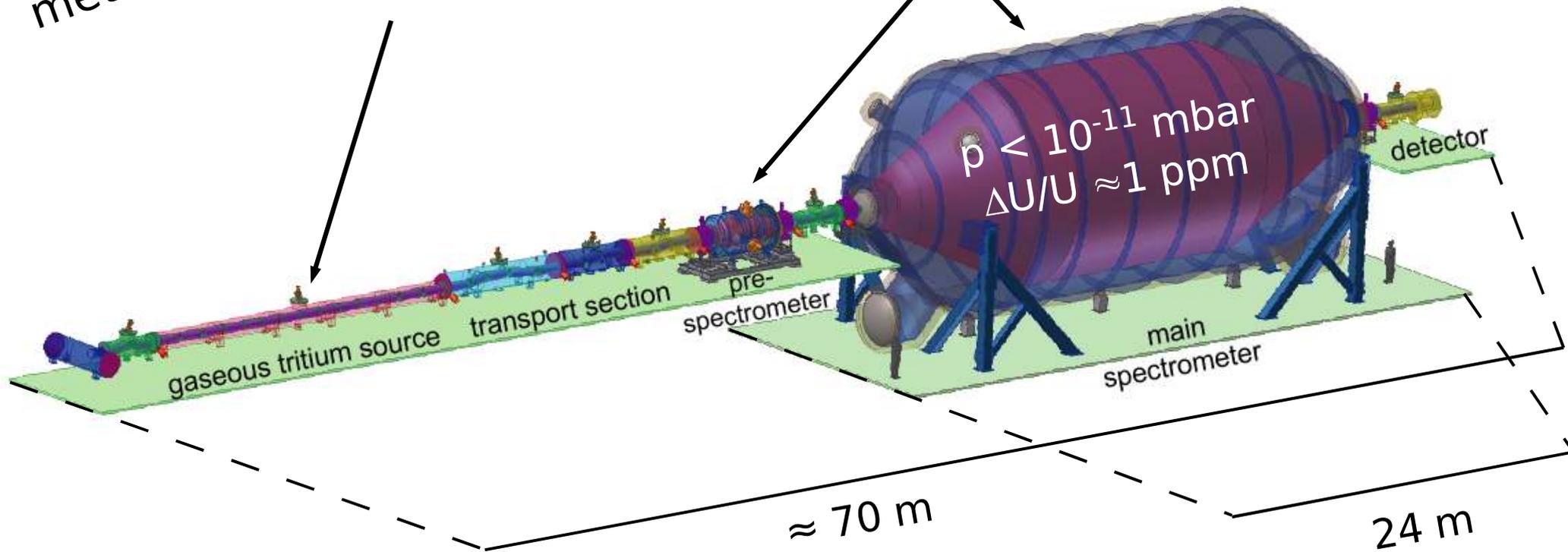
momentan:  
 $m(\nu_e) < 2.3 \text{ eV}$   
(Mainz)

Ziel:

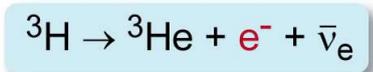
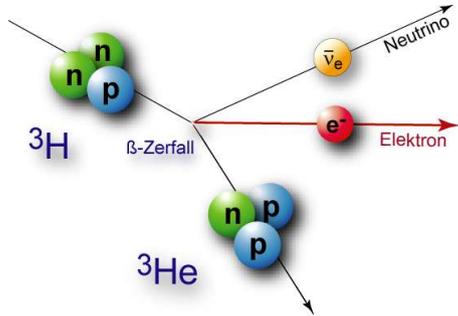
Mess-  
methode:

Kinematik des  
Tritium- $\beta$ -Zerfalls

Elektronenspektrometer:  
elektrostatischer Filter mit  
magn. adiab. Kollimation (MAC-E)



# 1) Einführung: Tritium- $\beta$ -Zerfall und Neutrinomasse



Form des Spektrums:

$$\frac{dN}{dE_\beta} \propto (E_0 - E) \sqrt{(E_0 - E)^2 - m^2(\nu_e) c^4}$$

Einfluss eines nicht-verschwindenden  $m^2(\nu_e)$

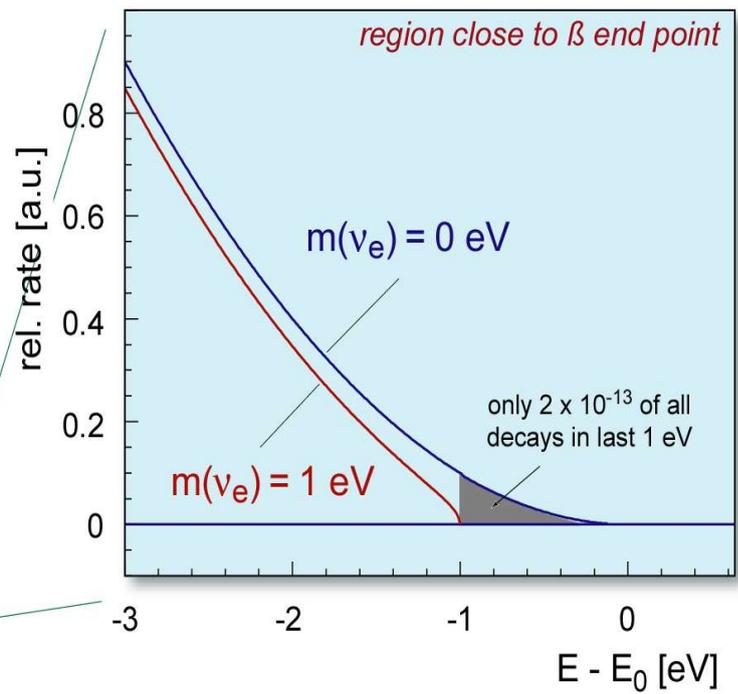
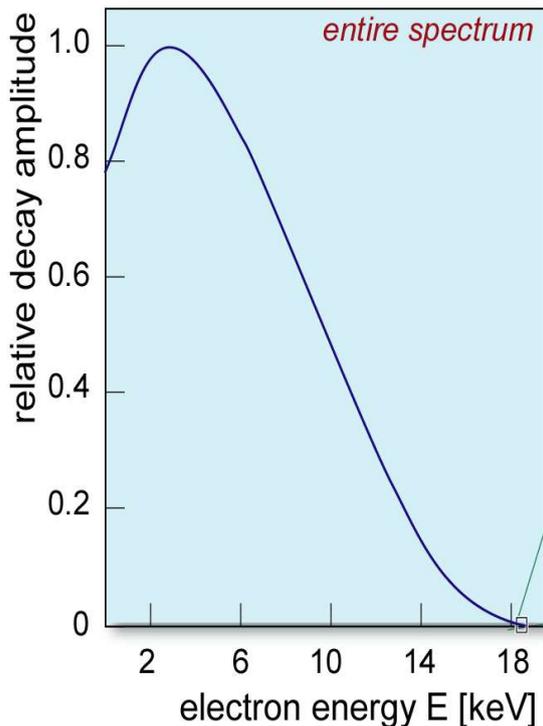
Tritium hat niedrige Endpunktenergie von 18.6 keV  
 → vergleichsweise hohe Zählrate im Endbereich

Trotzdem winziger Anteil:  
 $2 \times 10^{-13}$   
 im Intervall 1 eV unterhalb  $E_0$ !

benötige

- hohe Energieauflösung
- hohe Luminosität
- geringen Untergrund

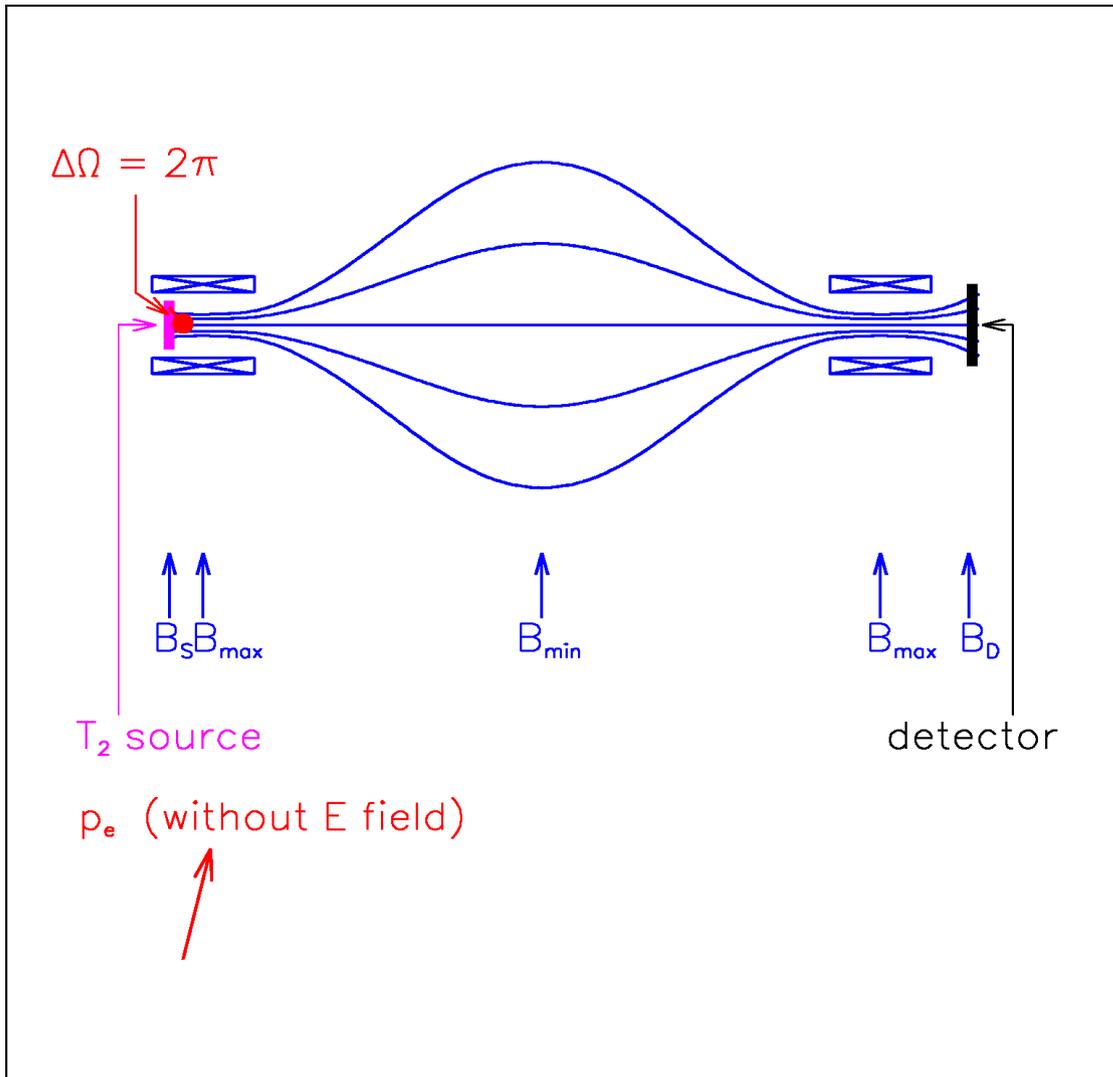
**MAC-E-Filter !**



# 1) Einführung:

## Das Konzept des MAC-E-Filters

### *Magnetic Adiabatic Collimation with Electrostatic Filter*



- ◆ **magn. Führung:** Feld erzeugt durch 2 supraleitende Spulen  
→ Zyklotronbahnen der Elektronen entlang Magnetfeldlinien
- ◆ magnetische Gradientenkraft: **adiabatische Transformation**

$$\begin{array}{l} p_{\perp} \rightarrow p_{\parallel} \\ E_{\perp} \rightarrow E_{\parallel} \end{array}$$

aufgrund der adiab. Invarianten

$$\mu = E_{\perp} / B = \text{const.}$$

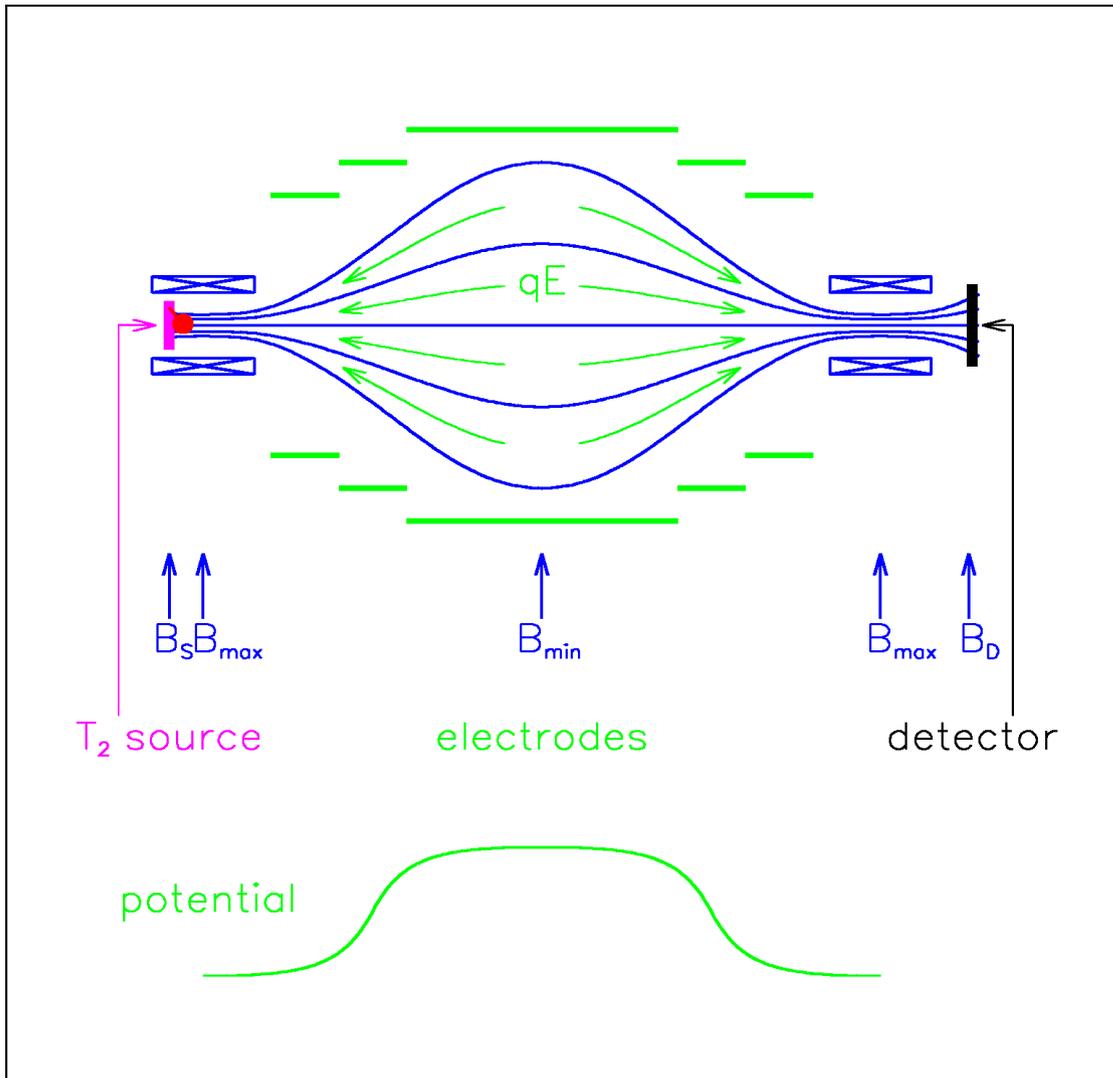
(nicht-relativist. Näherung)

A. Picard et al.,  
Nucl. Instr. Meth. B 63 (1992)

# 1) Einführung:

## Das Konzept des MAC-E-Filters

### *Magnetic Adiabatic Collimation with Electrostatic Filter*



- ◆ **magn. Führung:** Feld erzeugt durch 2 supraleitende Spulen
- ◆ **adiabatische Transformation**

$$E_{\perp} \rightarrow E_{\parallel}$$

- ◆ **Analyse** der long. Komponente der **Elektronenenergie**  $E_{\parallel}$  durch elektrostatisches Retardierungspotential

- ◆ Ermöglicht **Energieauflösung**  
 $\Delta E = E \cdot B_{\min} / B_{\max} \approx 1 \text{ eV}$
- ◆ magn. adiab. Kollimation:  
großer akzeptierter **Raumwinkel**

## 2) Das Hauptspektrometer: Spezifikationen und Designkriterien

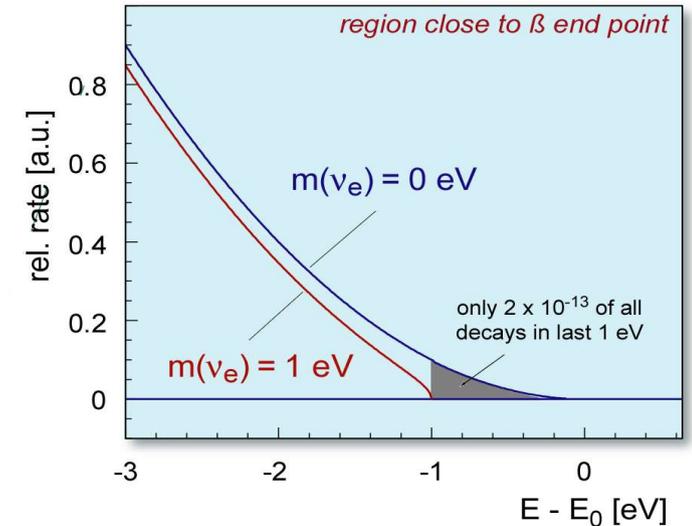
### Wodurch sind Form und Größe des Hauptspektrometers bestimmt ?

#### 1) Energieauflösung

benötige extrem präzise Vermessung des  ${}^3\text{H}$ - $\beta$ -Spektrums

$$\frac{0.93 \text{ eV}}{18600 \text{ eV}} = \frac{\Delta E}{E} = \frac{B_{\min}}{B_{\max}} = \frac{1}{20000}$$

- großes  $B_{\max}$  : benötige supraleitende Magnete
- kleines  $B_{\min}$  : sollte größer sein als Erdmagnetfeld



## 2) Das Hauptspektrometer: Spezifikationen und Designkriterien

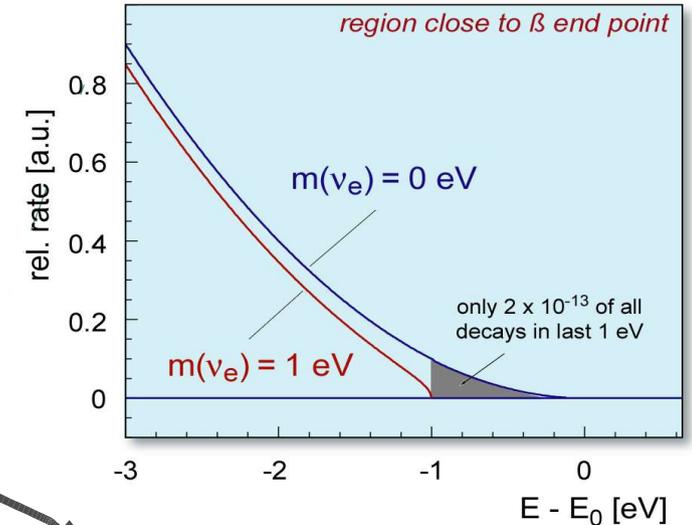
### Wodurch sind Form und Größe des Hauptspektrometers bestimmt ?

#### 1) Energieauflösung

benötige extrem präzise Vermessung des  $^3\text{H}$ - $\beta$ -Spektrums

$$\frac{0.93 \text{ eV}}{18600 \text{ eV}} = \frac{\Delta E}{E} = \frac{B_{\min}}{B_{\max}} = \boxed{\frac{1}{20000}}$$

- großes  $B_{\max}$  : benötige supraleitende Magnete
- kleines  $B_{\min}$  : sollte größer sein als Erdmagnetfeld



$$6 \text{ T} = B_{\max}$$
$$3 \text{ Gauss} = B_{\min}$$

## 2) Das Hauptspektrometer: Spezifikationen und Designkriterien

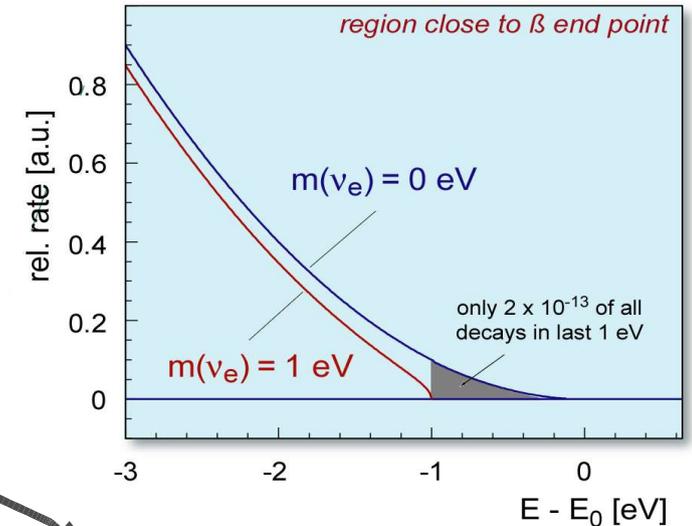
### Wodurch sind Form und Größe des Hauptspektrometers bestimmt ?

#### 1) Energieauflösung

benötige extrem präzise Vermessung des  $^3\text{H}$ - $\beta$ -Spektrums

$$\frac{0.93 \text{ eV}}{18600 \text{ eV}} = \frac{\Delta E}{E} = \frac{B_{\min}}{B_{\max}} = \boxed{\frac{1}{20000}}$$

- großes  $B_{\max}$  : benötige supraleitende Magnete
- kleines  $B_{\min}$  : sollte größer sein als Erdmagnetfeld



$$6 \text{ T} = B_{\max}$$

$$3 \text{ Gauss} = B_{\min}$$

Beachte Erhaltung des magnetischen Flusses:  $\Phi = \int B \, dA = \text{const.}$

$$\Rightarrow \frac{A_{\text{analysing plane}}}{A_{\text{source, eff}}} = \frac{B_{\max}}{B_{\min}} = 20000 \quad \text{mit} \quad A_{\text{source, eff}} = 32 \text{ cm}^2$$

⇒ **riesiger Durchmesser** des Flussschlauchs  
in der Analysierebene:

$$\boxed{\varnothing = 9 \text{ m !!}}$$

Spektrometer-  
Durchmesser

## 2) Das Hauptspektrometer: Spezifikationen und Designkriterien

### Wodurch sind Form und Größe des Hauptspektrometers bestimmt ?

1) Energieauflösung

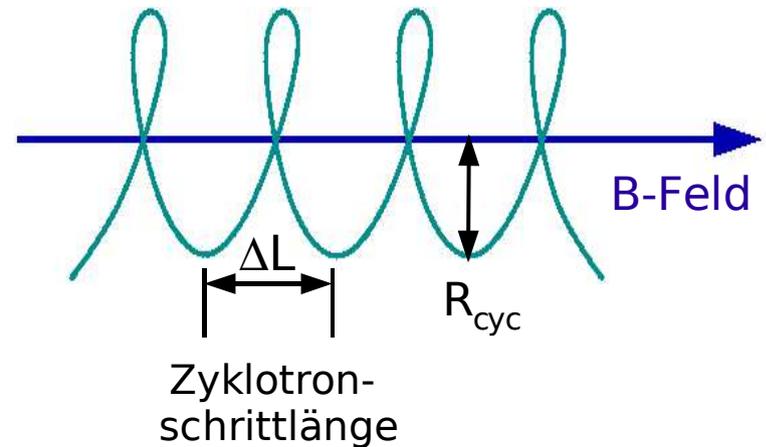
2) Gewährleistung der adiabatischen Energietransformation  $E_{\perp} \rightarrow E_{\parallel}$

Ist  $\mu = E_{\perp} / B$  wirklich konstant?

→ erfordert "langsame" Änderung  
der Magnetfeldstärke

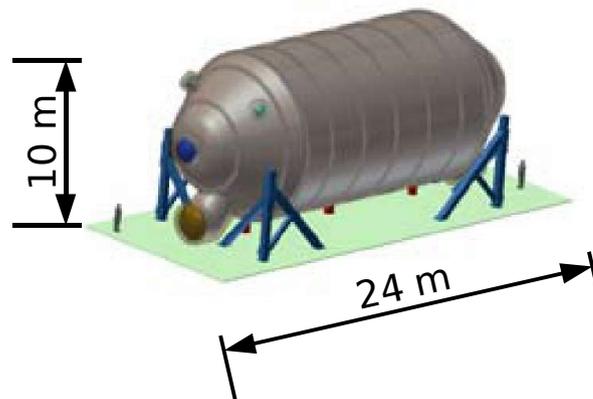
$\Delta B/B$  klein entlang jeder  
Zyklotronschrittlänge  $\Delta L$

→ **langes Spektrometer** !



Spektrometer-  
Länge

geeignete  
Dimensionen



Studien zur Adiabasie  
→ detaillierte Simulationen!

## 2) Das Hauptspektrometer: Spezifikationen und Designkriterien

### Wodurch sind Form und Größe des Hauptspektrometers bestimmt ?

- 1) Energieauflösung
- 2) Adiabasiebedingung für Energietransformation

Dimensionen des  
Spektrometers

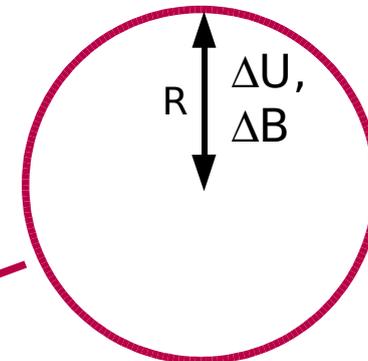
- 3) Transmissionseigenschaften:  
Energietransfer  $E_{\perp} \rightarrow E_{\parallel}$  vs.  
Abnahme von  $E_{\parallel}$  durch elektrost. Retardierung  
 $\Rightarrow E_{\parallel}(x) > 0$  in jedem Punkt der Trajektorie

- 4) Homogenität der elektr. & magnet. Felder  
entlang der Analysierebene:

Form & Konfig. der  
Elektroden und  
Magnete

Variation des Retardierungspotentials  $\Delta U < 0.5 \text{ V}$   
Variation des Magnetfeldes  $\Delta B/B < 20\%$

$U = -18600 \text{ V}$



### 3) Das Hauptspektrometer: Ziele und Methoden der Computersimulationen

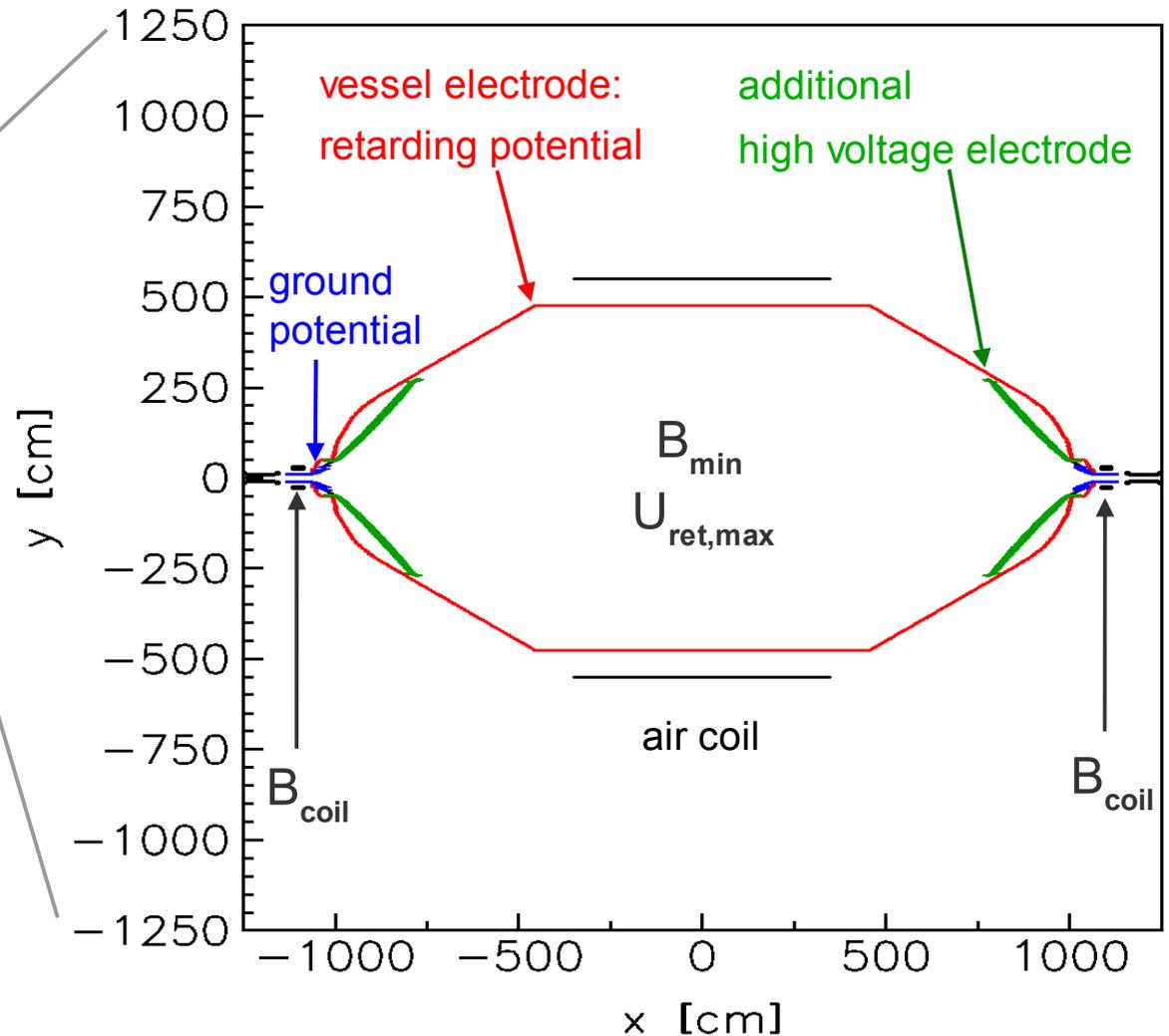
- Zweck der Simulationen: Prüfung und Optimierung des Spektrometerdesigns

#### **Schritt 1:**

*Spezifikation und Visualisierung der Elektroden- und Magnetkonfiguration*

#### **Schritt 2:**

*Berechnung der elektrischen und magnetischen Felder aus gegebener Geometrie*

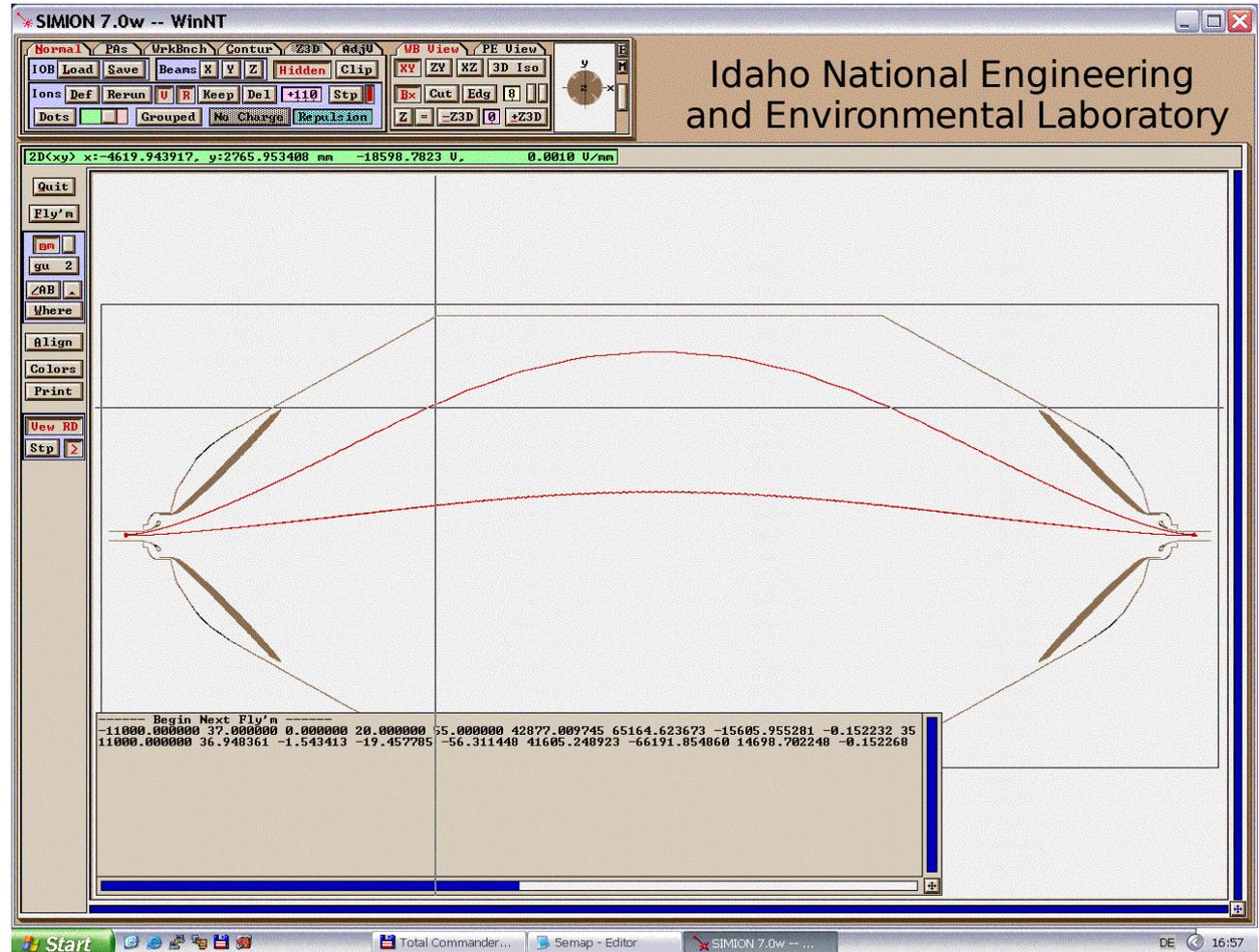


# 3) Das Hauptspektrometer: Ziele und Methoden der Computersimulationen

## ▪ Schritt 3:

*Bahnverfolgung geladener  
Teilchen in kombinierten  
elektr. und magn. Feldern*

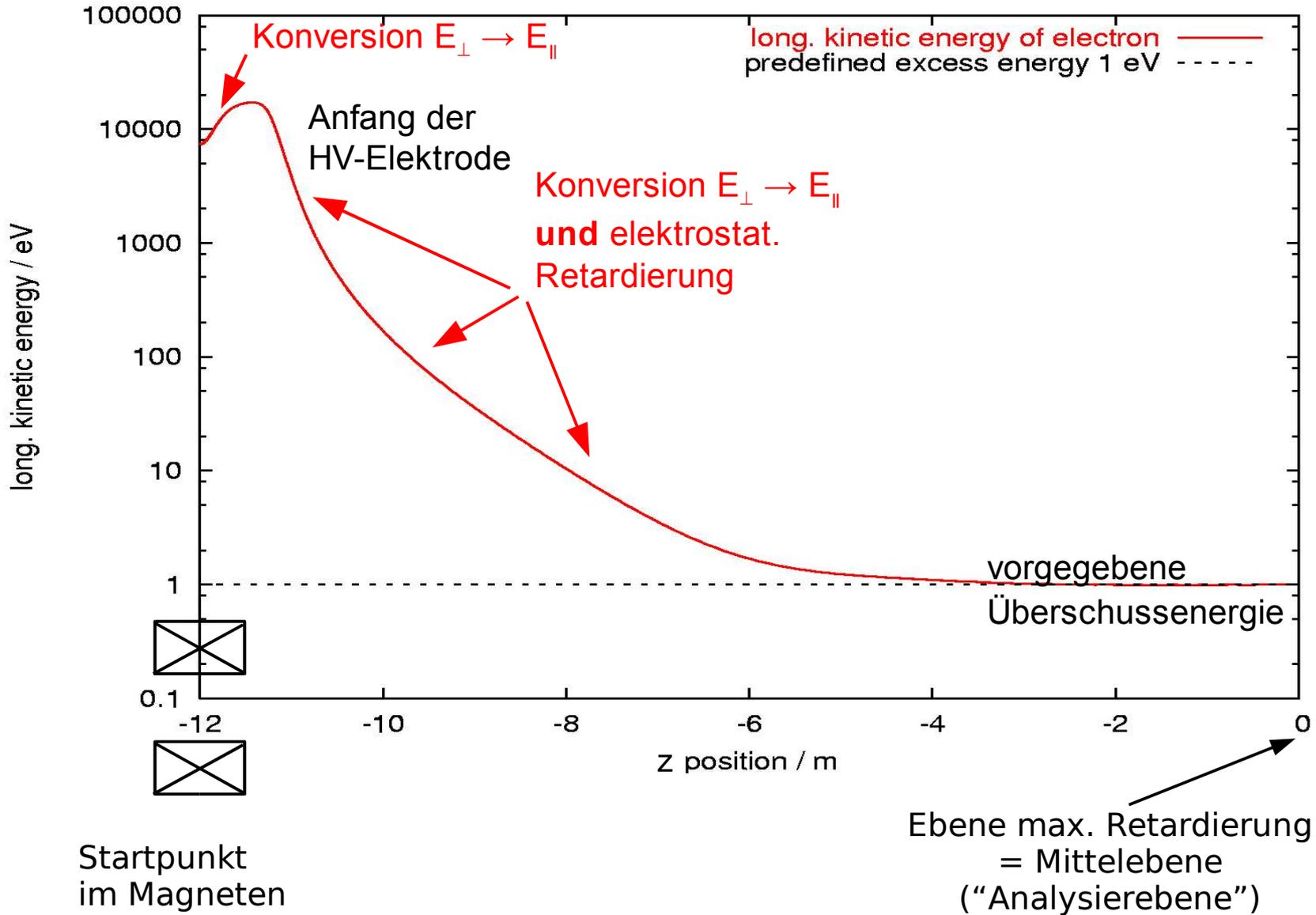
⇒ z.B. mit  
kommerzieller Software  
**SIMION 3D Version 7.0**



- ⇒ wurde sehr erfolgreich zur Simulation kleinerer Spektrometer eingesetzt  
aber: Akkumulation numerischer Fehler beim großen KATRIN Hauptspektrometer
- ⇒ Entwicklung speziell angepasster C-Programme (**F. Glück**)

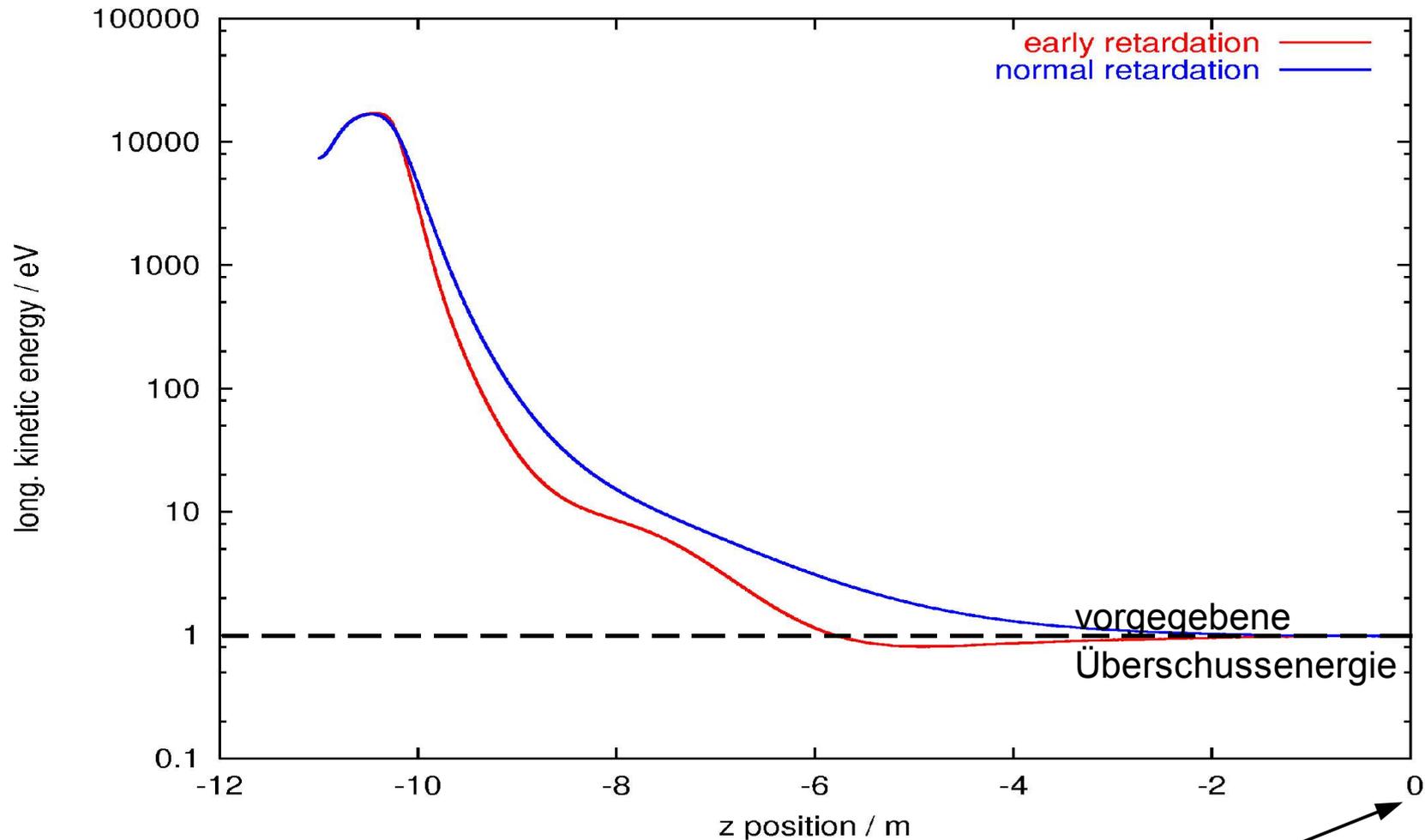
## Anwendung 1: Prüfung der Transmissionseigenschaften

- simuliere Elektron mit (kleiner) Überschussenergie  $\varepsilon$  über Filterschwelle
- kontrolliere, ob  $E_{\parallel} > \varepsilon$  in jedem Bahnpunkt



## Anwendung 1: Prüfung der Transmissionseigenschaften

- simuliere Elektron mit (kleiner) Überschussenergie  $\varepsilon$  über Filterschwelle
- kontrolliere, ob  $E_{\parallel} > \varepsilon$  in jedem Bahnpunkt  
sonst: **zu frühe Retardierung**



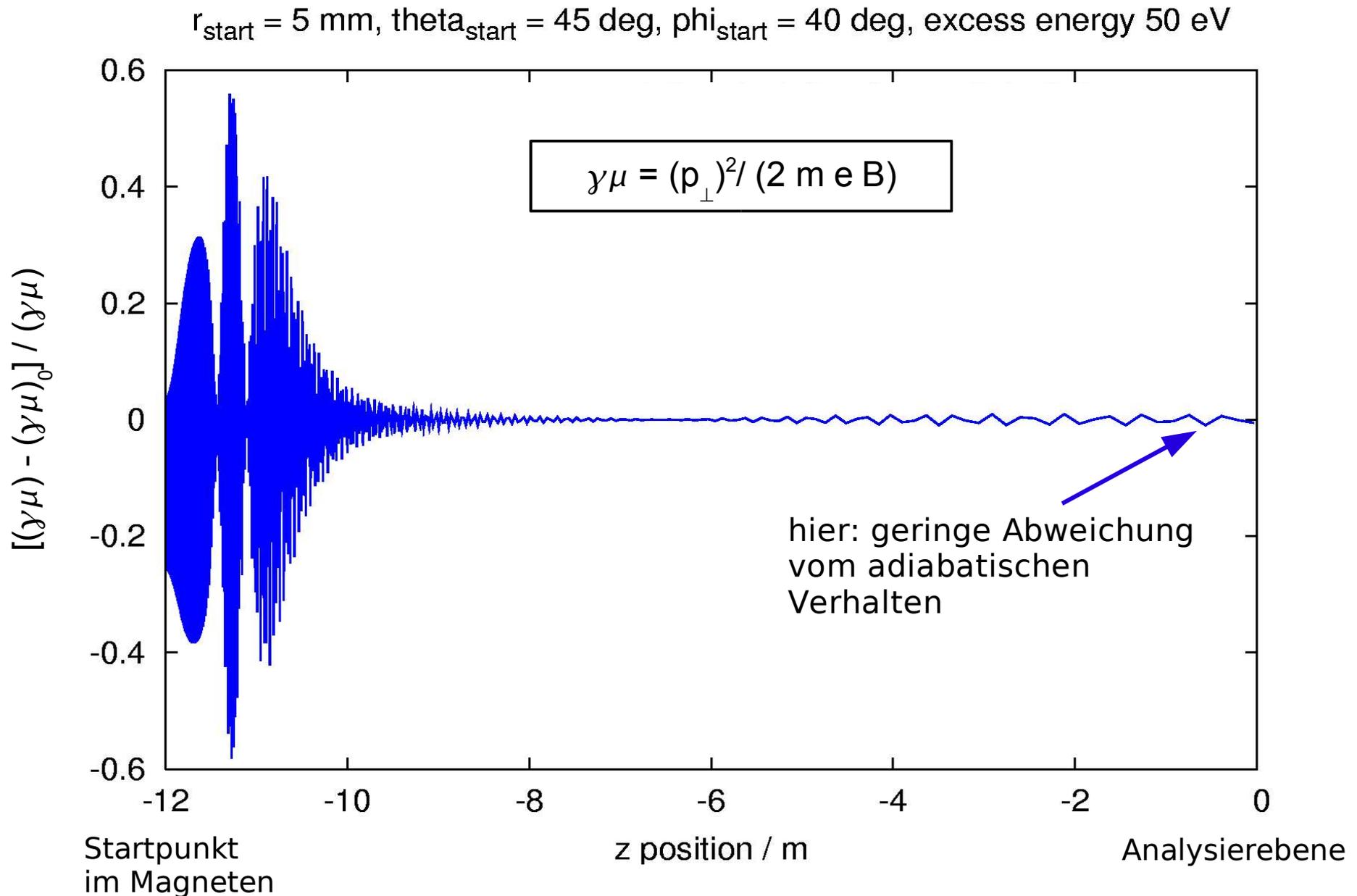
Startpunkt  
im Magneten

Ebene max. Retardierung  
= Mittelebene  
("Analyseebene")

## Anwendung 2: Prüfe Gültigkeit der adiabatischen Näherung $\gamma\mu = \text{const.}$

→ Bedingung:  $\Delta B/B$  klein über jeden Zyklotronschritt mit Länge  $\Delta L$

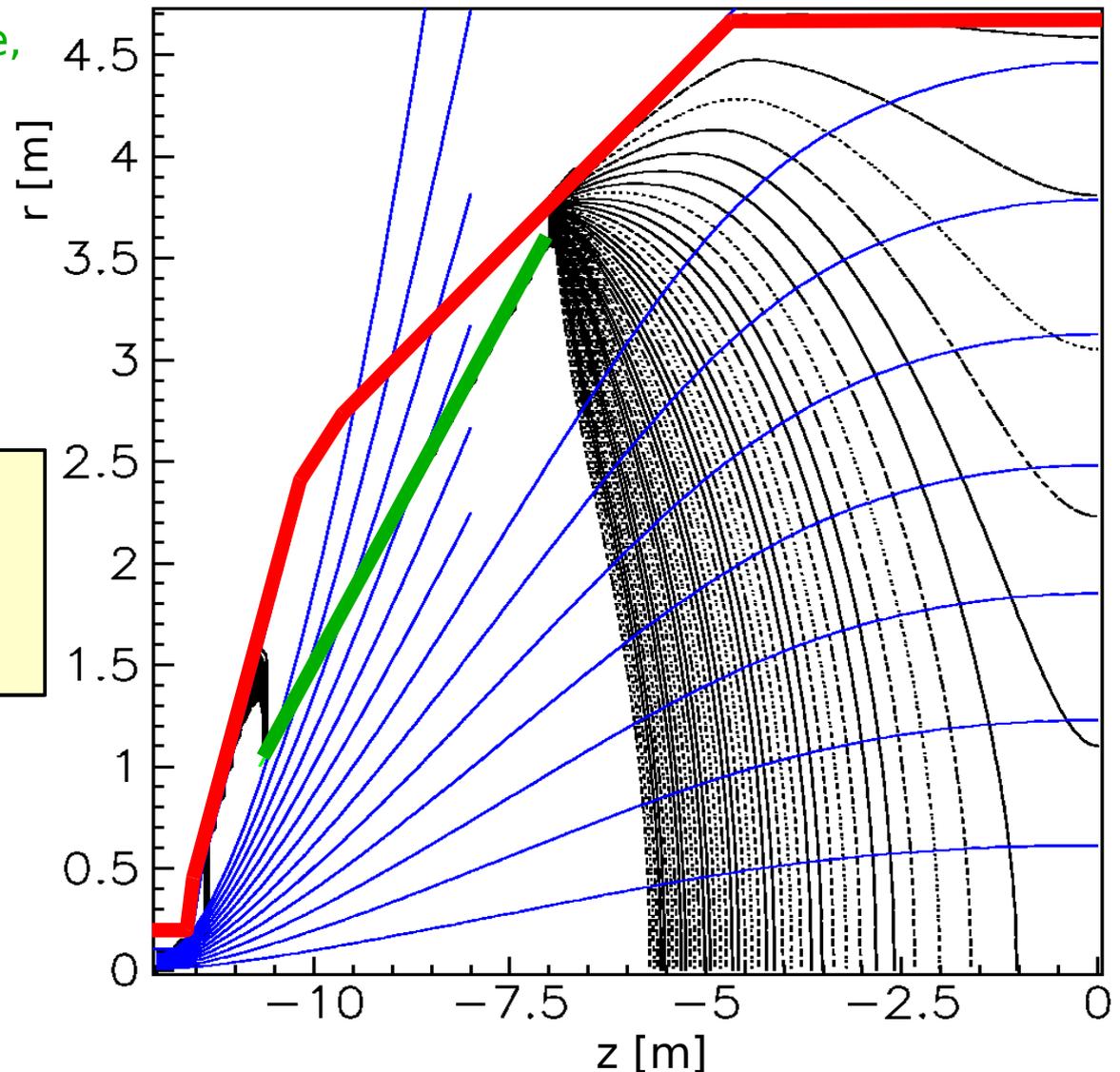
→ adiabatischer Elektronentransport nötig für korrekte Transformation  $E_{\perp} \rightarrow E_{\parallel}$



## 4) Design des Hauptspektrometers: Ergebnisse des Simulationsprozesses

- rot: Tankelektrode,  
 $U = -18600 \text{ V}$
- grün: zusätzliche HV-Elektrode,  
 $U \approx -18575 \text{ V}$
- blau: Magnetfeldlinien  
( $\rightarrow$  Teilchenbahnen)
- schwarz: Äquipotentiallinien  
in Schritten von  $0.1 \text{ V}$

equipotential lines in  $0.1 \text{ V}$  steps, bfield lines



### Status:

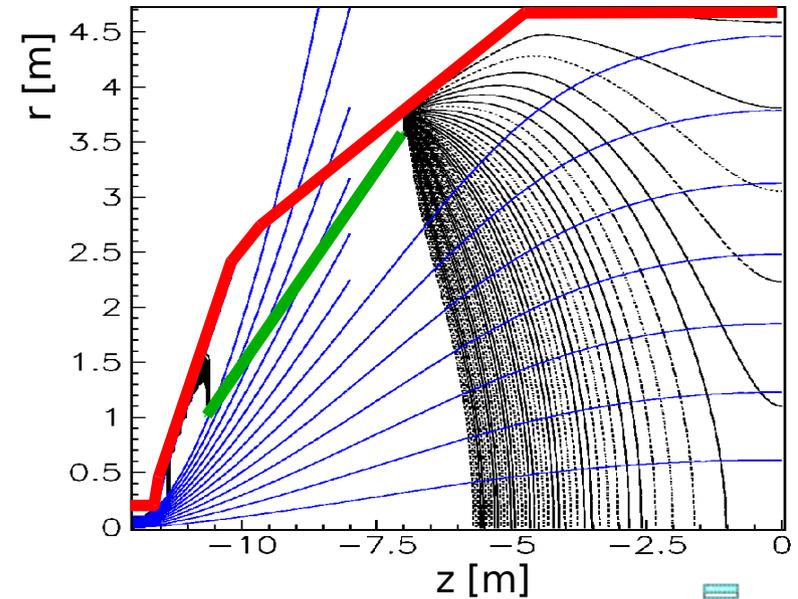
- Designstudien des Vakuumtanks beendet
- Ausschreibungsverfahren läuft

# 4) Design des Hauptspektrometers: Ergebnisse des Simulationsprozesses

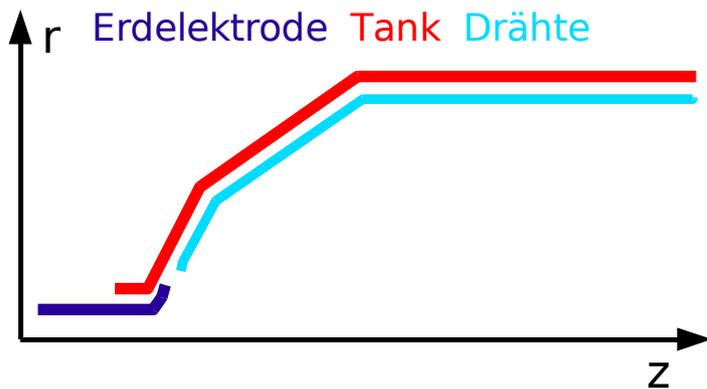
- rot: Tankelektrode,  $U = -18600 \text{ V}$
- grün: zusätzliche HV-Elektrode,  $U \approx -18575 \text{ V}$
- blau: Magnetfeldlinien ( $\rightarrow$  Teilchenbahnen)
- schwarz: Äquipotentiallinien in Schritten von  $0.1 \text{ V}$

**To do:** Entwurf einer Drahtelektrode zur Untergrundreduktion

equipotential lines in 0.1V steps, bfield lines

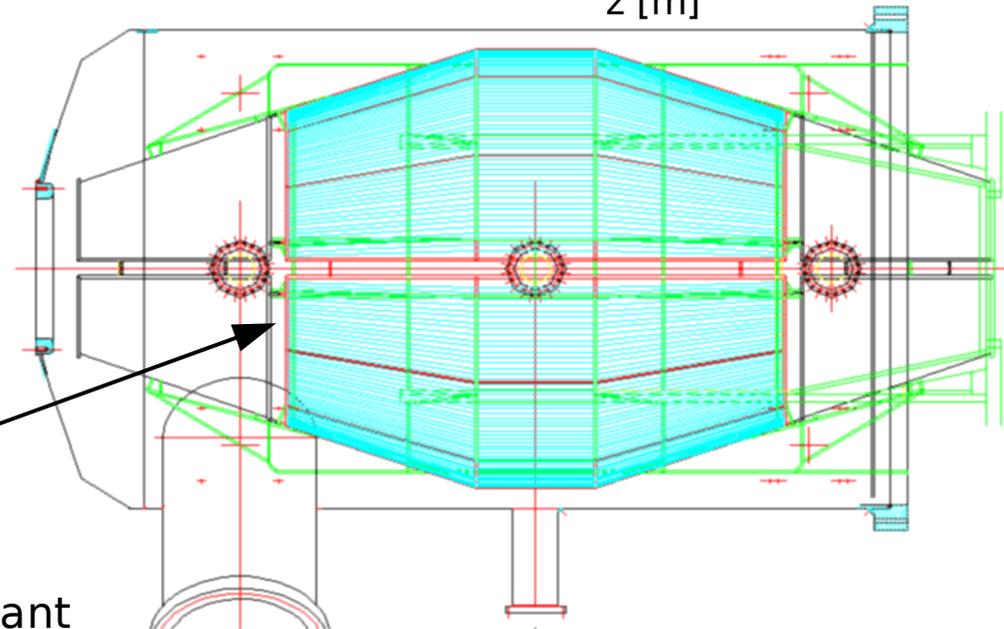


Hauptspektrometer



Vorspektrometer:  
Drahtelektrode bereits im Bau

Hauptspektrometer: Simulationen geplant



Vorspektrometer

## 5) Zusammenfassung und Ausblick



- KATRIN: Information über  $m(\nu_e)$  aus Hochpräzisionsmessung des  ${}^3\text{H}$ - $\beta$ -Spektrums
- höchste Empfindlichkeit: MAC-E-Filter  
→ extrem gute Energieauflösung  
und hohe Luminosität
- ehrgeiziges Ziel hoher Sensitivität bzgl.  $m^2(\nu_e)$  erfordert großen technischen Aufwand (riesiges Spektrometer)
- Komplexer Aufbau → detaillierte Computersimulationen zur Optimierung des EM Designs
- Designstudien der Hauptspektrometer-Tankelektrode abgeschlossen, Drahtelektrodenberechnungen geplant

