Detector Physics of Resistive Plate Chambers

Disputation von
Christian Lippmann
über die

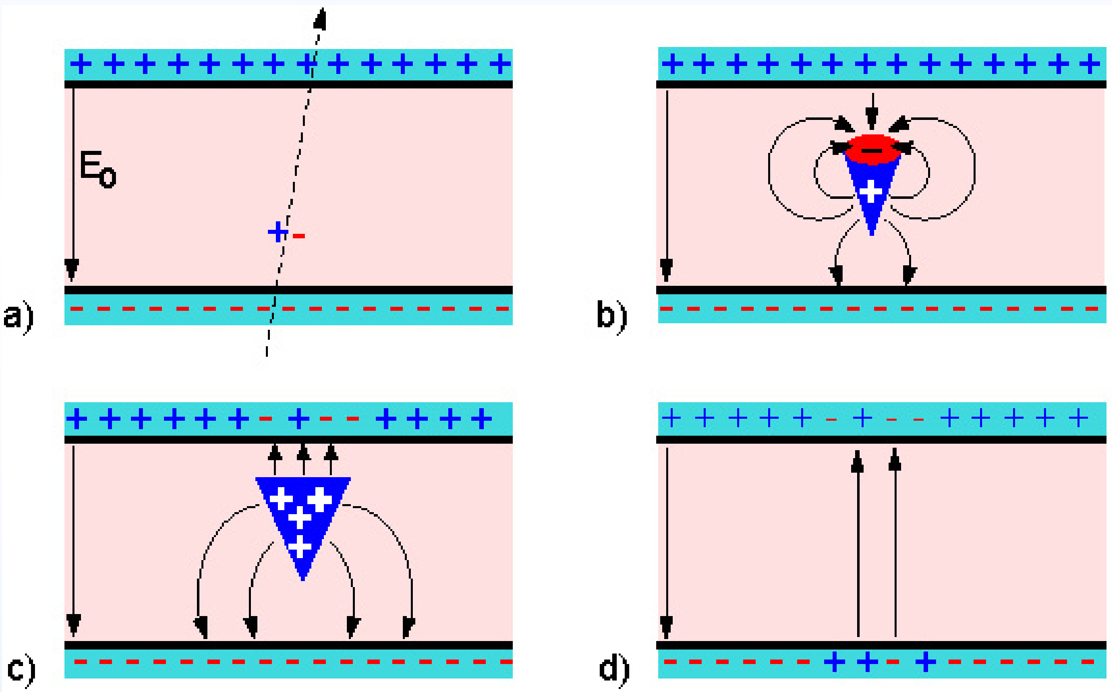
Detektorphysik von Widerstandsplattenkammern (RPCs)

- *Über RPCs*
- *Problemstellung*
- *Simulation von RPCs*
- *Ergebnisse*
  - *Zeitauflösung, Effizienz*
  - *Ladungsspektren*
- *Detaillierte 2-D Simulationen einzelner Elektronenlawinen*
- *Zusammenfassung + Schlussfolgerungen*

Über RPCs

Entwickelt von R. Santonico, R. Cardarelli

[NIM 187 (1981) 377, NIM A263 1988) 20]



a) **Gasionisation**

b) **Lawinenentwicklung, Raumladungseffekte**

c) **Ionendriftgeschwindigkeit langsamer**

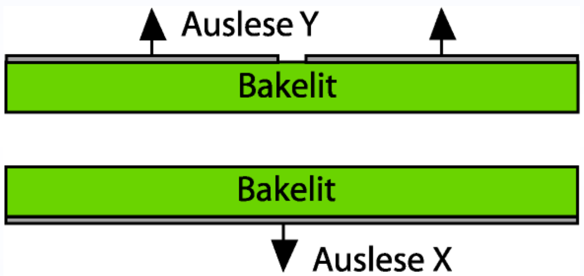
d) **Ladungen in den Elektrodenplatten beeinflussen elektrisches Feld (Zeitkonstante:** $\tau = \rho\, \varepsilon_0\, \varepsilon_r$ **)**

ρ = Volumenwiderstand
ε_0 = Dielektr. Konstante
ε_r = rel. Permittivität

Verschiedene Konfigurationen

Trigger RPC

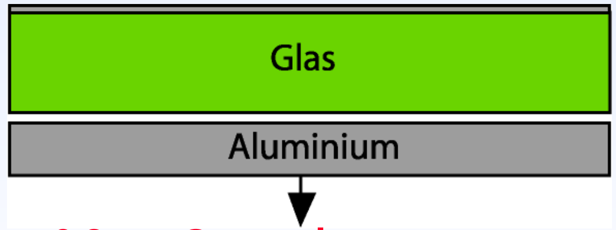
R. Santonico, R. Cardarelli



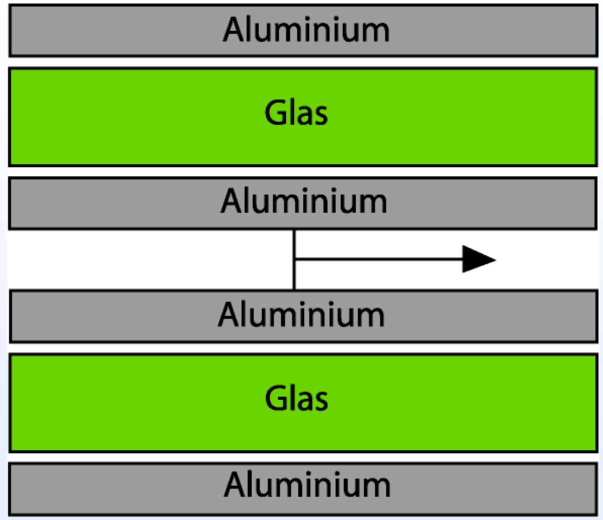
- 2mm Gasspalte
- Resistives Material: 2mm Bakelit, $\rho \approx 10^{10}\ \Omega$cm
- $C_2F_4H_2$/ i-C_4H_{10}/ SF_6 (96.7/3/0.3)
- HV: 10kV $\Rightarrow$ E: $\approx$50kV/cm

Timing RPC

P. Fonte, V. Peskov et al.

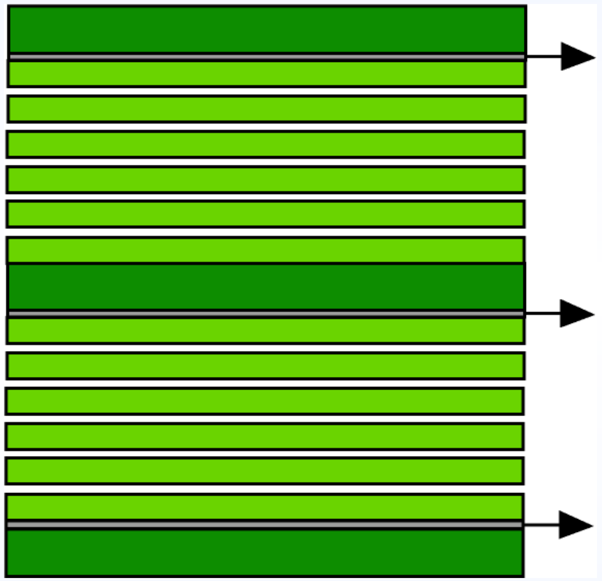


- 0.3mm Gasspalte
- Resistives Material: 3mm Glas, $\rho \approx 2\text{x}10^{12}\ \Omega$cm
- 2mm Aluminium
- $C_2F_4H_2$/ i-C_4H_{10}/ SF_6 (85/5/10)
- HV: 3(6)kV $\Rightarrow$ E: $\approx$100kV/cm



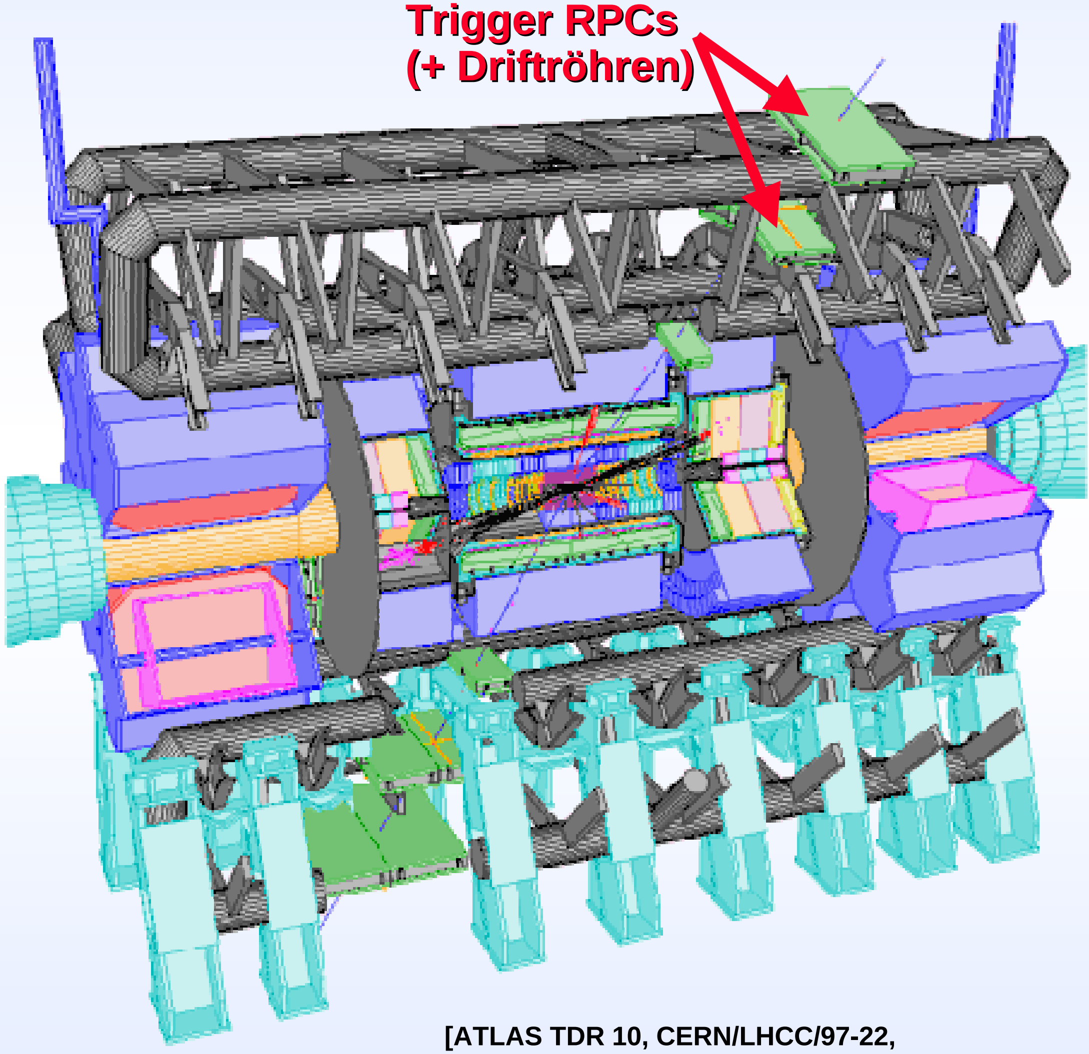
Multi Gap Timing RPC

M.C.S. Williams et al.



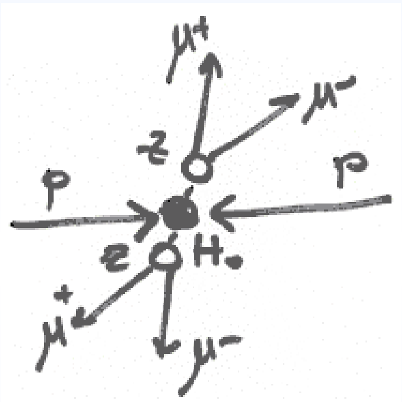
- 0.25mm Gasspalte
- Resistives Material: 0.4mm Glas, $\rho \approx 10^{13}\ \Omega$cm
- $C_2F_4H_2$/ i-C_4H_{10}/ SF_6 (90/5/5)
- HV: 12.5kV $\Rightarrow$ E: $\approx$100kV/cm

Ein Experiment mit Trigger RPCs: ATLAS am CERN



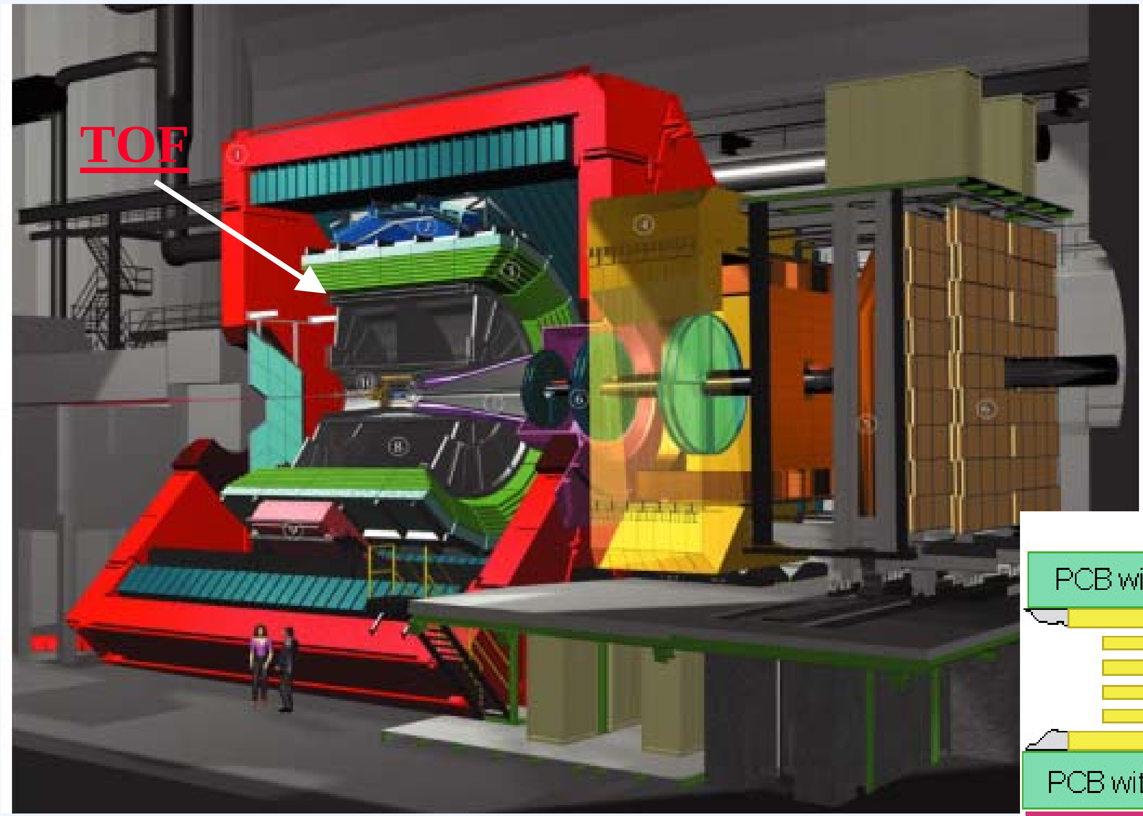
[ATLAS TDR 10, CERN/LHCC/97-22,
http://atlas.web.cern.ch/Atlas/Welcome.html]

- p-p Kollisionen bei 14TeV Energie, z. B. Suche nach dem Higgs-Teilchen H_0:

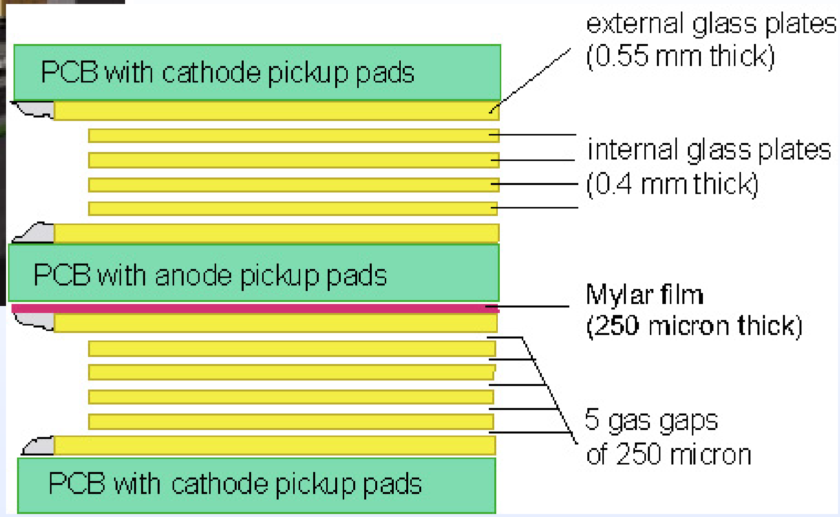


- RPCs im Muonen-Trigger
- Man verwendet **Trigger RPCs**
  - Fläche: 3650m^2
  - 355.000 Auslesekanäle
  - Nachweiseffizienz: >95%
  - Zeitauflösung: <3ns
  - Ratenfestigkeit: bis 1kHz/cm^2

Ein Experiment mit Timing RPCs: ALICE am CERN



- Man verwendet **Multigap Timing RPCs** zur Teilchen-identifizierung (e/π-, π/K-, K/p- Separation) über die Flugzeit (**TOF**)
  - Fläche: 176m^2
  - 160.000 Auslesezellen
  - Nachweiseffizienz: >98%
  - Zeitauflösung: <70ps
  - Ratenfestigkeit: bis 50Hz/cm^2



[http://alice.web.cern.ch/Alice]

Problemstellung

Für RPCs mit 0.3mm breiten Gasspalten gefüllt mit purem Isobutan oder einer $C_2F_4H_2$ Gasmischung findet man ≈75% Nachweiseffizienz.

Dies verlangt etwa 10 Primärionisationszentren pro mm und einen Townsend Koeffizienten um 100/mm.

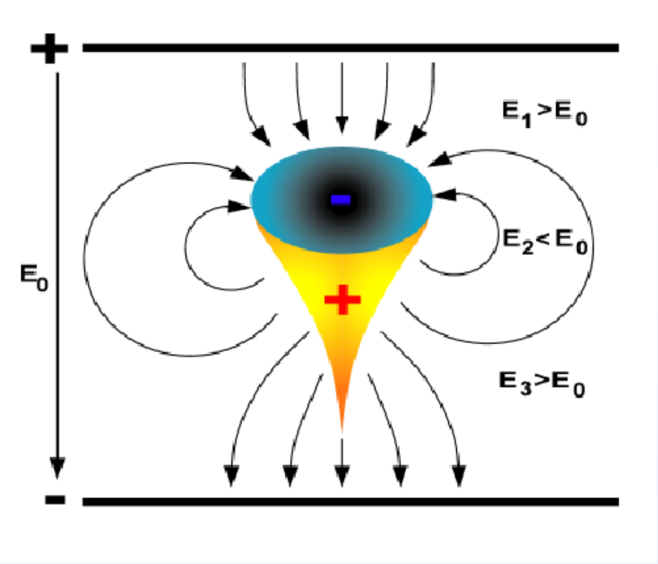
Ein häufig verwendeter Wert für Isobutan ist 5 Primärionisationszentren pro mm [SAULI, CERN 77-09] . Wie erklärt sich so die Effizienz?

Sogar wenn die genannten Werte zuträfen: Die erwartete mittlere induzierte Ladung läge um 5 x 10^7 pC, während man Werte um 0.5 pC misst.

Kann ein Raumladungseffekt zu einem derart großen Unterdrückungsfaktor führen?

Wenn es Regionen mit erniedrigtem elektrischem Feld gibt, so muss es auch Regionen mit erhöhtem Feld geben: Hier erwartet man extrem starke Multiplikation.

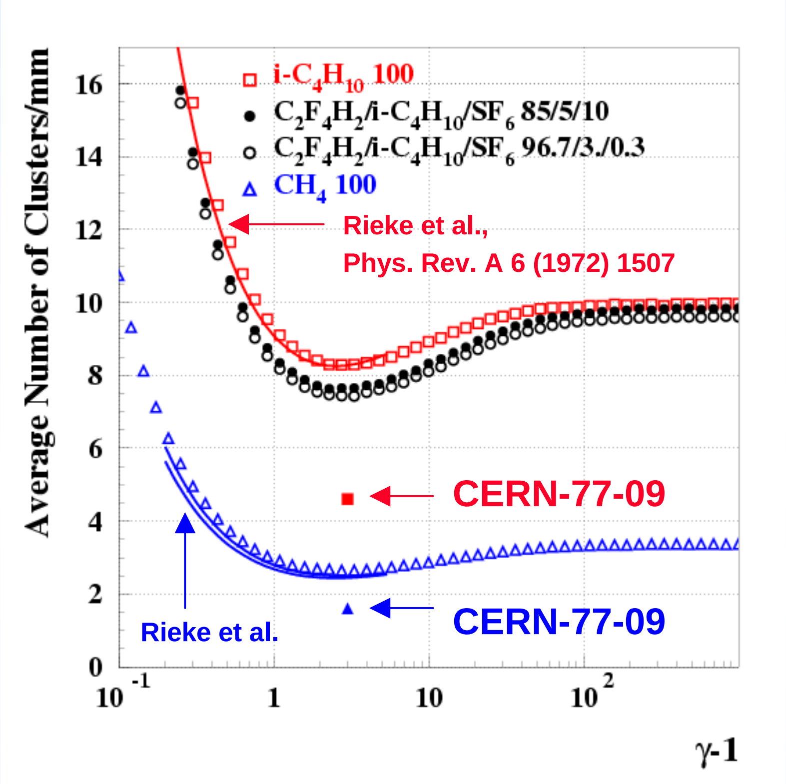
Können so die mittleren Ladungen erklärt werden?

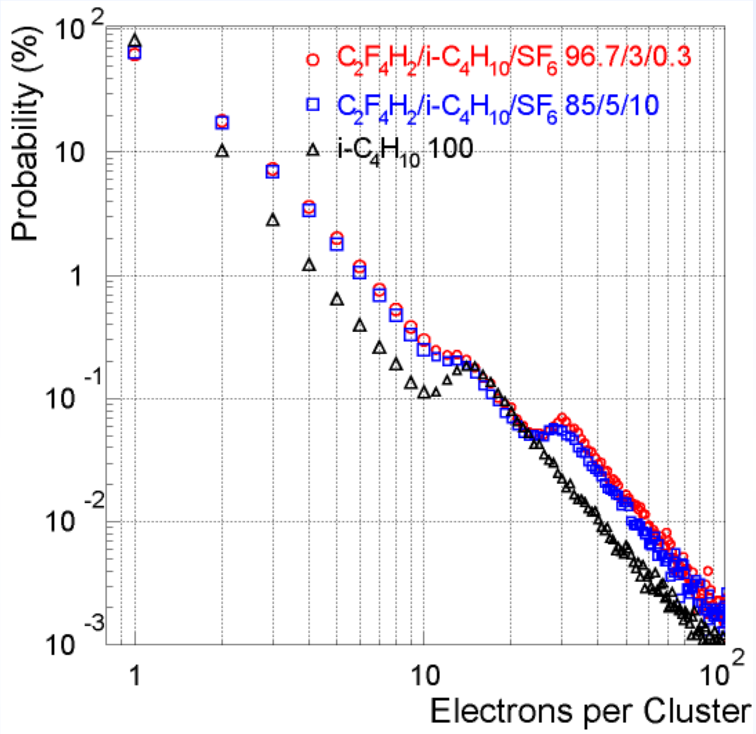


Input für Simulationen

- Primärionisation: **HEED** (I. Smirnov)
- Townsend- und Elektronenanlagerungskoeffizienten: **IMONTE** (S. Biagi)
- Diffusionskoeffizienten und Driftgeschwindigkeit: **MAGBOLTZ 2** (S. Biagi)
- Lawinenfluktuationen: **W. Legler** (1960)
- Raumladungsfeld: analytische Lösungen [CERN-OPEN-2001-074]
- Elektronik: Analytisch
- Induziertes Signal: **S. Ramo** (1939) [PROC. IRE 27 (1939), 58]

Primärionisationsparameter (HEED)



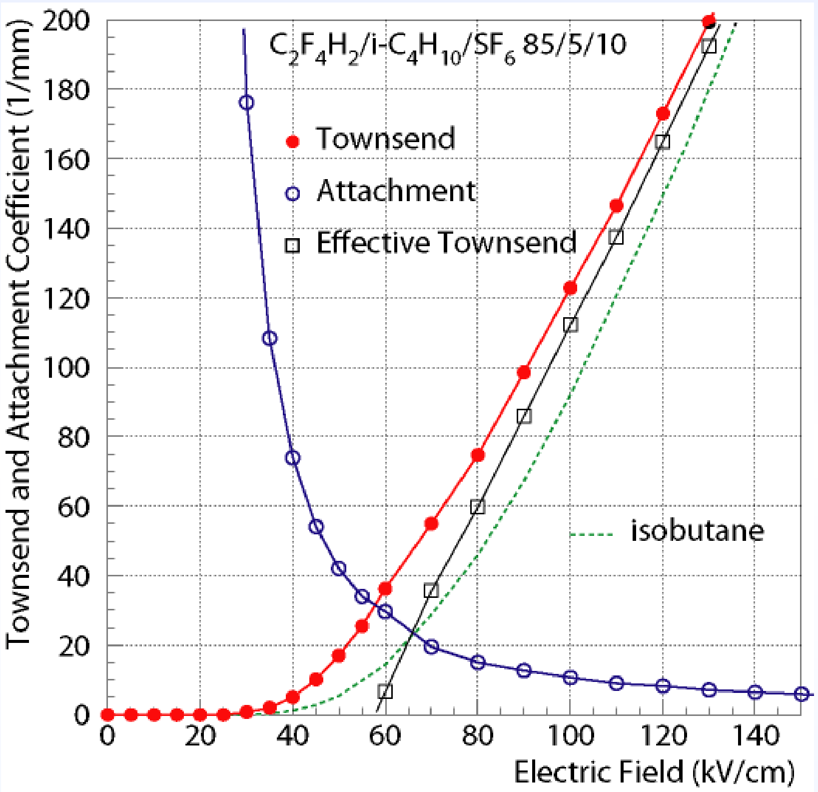


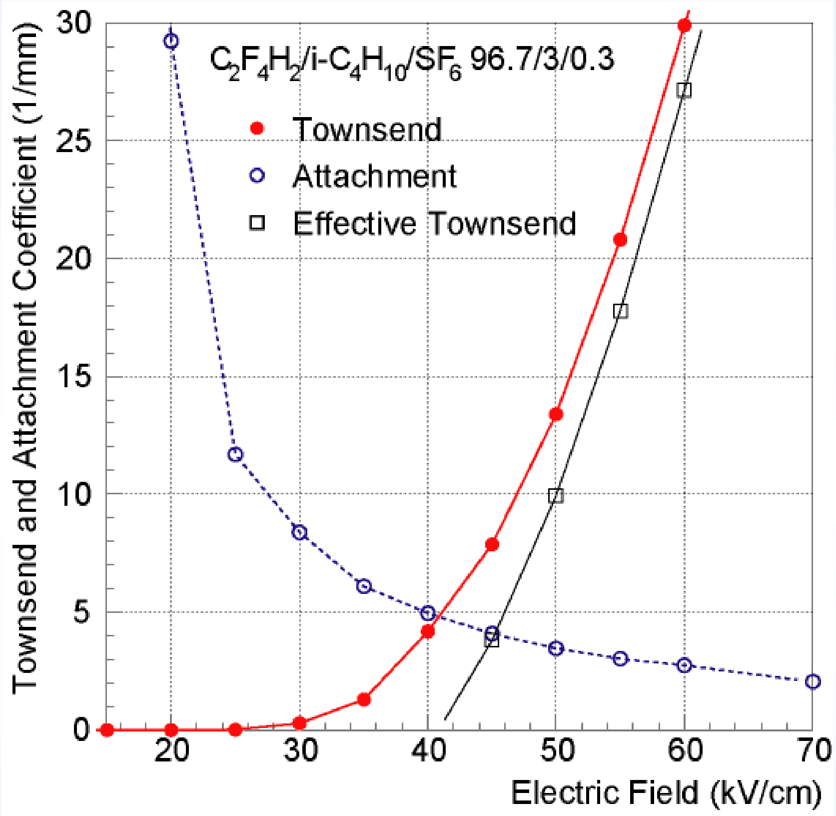
- **Mittlere Anzahl der Primärionisationszentren / mm**
- **$C_2F_4H_2$ gas:**

  Für ein 7GeV Pion ($\gamma \approx 50$) findet man etwa 10/mm

- **Anzahl der freigesetzten Elektronen pro Primärionisationszentrum**
- **$C_2F_4H_2$-Gas: Im Mittel etwa**
  - **2.6 Elektronen (Timing RPC)**
  - **2.8 Elektronen (Trigger RPC)**

Mehr Gasparameter (IMONTE)





- **Effektiver Townsend Koeffizient für Timing RPC:**
  ≈ 110/mm
- **Effektiver Townsend Koeffizient für Trigger RPC:**
  ≈ 10/mm

Lawinenfluktuationen

[W. Legler, 1960: Die Statistik der Elektronenlawinen in elektronegativen Gasen bei hohen Feldstärken und bei grosser Gasverstärkung]

Annahme: Ionisationswarscheinlichkeit ist unabhängig von der letzten Ionisation

$$\frac{dP(n,x)}{dx} = -P(n,x)n(\alpha+\eta) + P(n-1,x)(n-1)\alpha + P(n+1,x)(n+1)\eta$$

General solution:

$$\overline{n}(x) = e^{(\alpha-\eta)x} \qquad k = \frac{\eta}{\alpha}$$

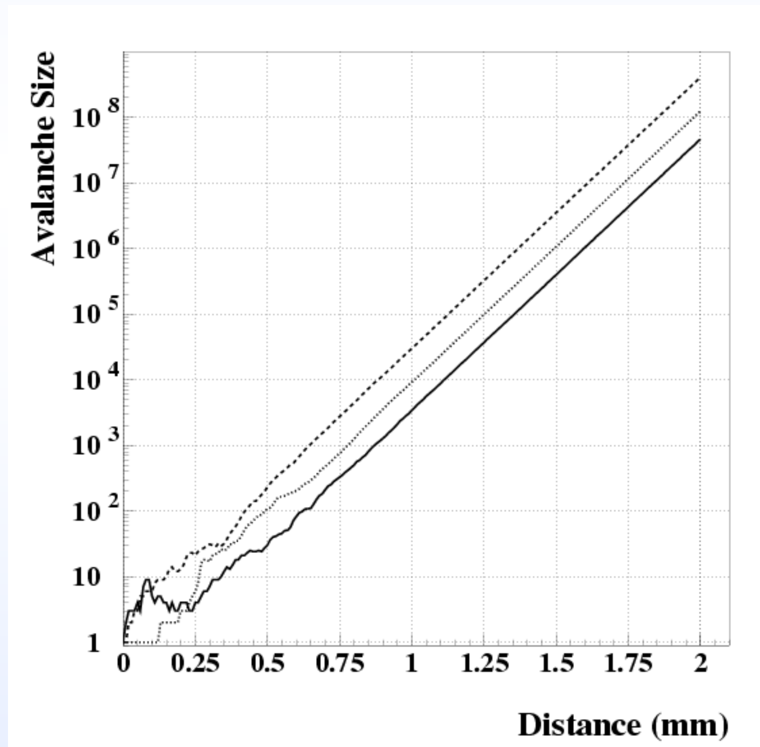
$$P(n,x) = k\frac{\overline{n}(x)-1}{\overline{n}(x)-k} \qquad n = 0$$

$$= \overline{n}(x)\left(\frac{1-k}{\overline{n}(x)-k}\right)^2\left(\frac{\overline{n}(x)-1}{\overline{n}(x)-k}\right)^{n-1} \qquad n > 0$$

Variance:

$$\sigma^2(x) = \left(\frac{1+k}{1-k}\right)\overline{n}(x)\left(\overline{n}(x)-1\right)$$

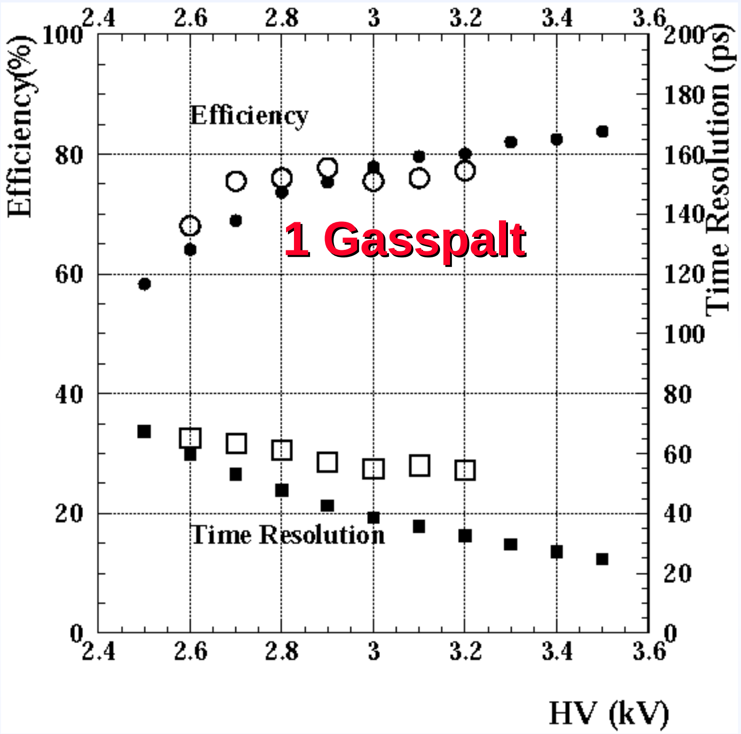
Lawinen ausgelöst durch ein einzelnes Elektron:

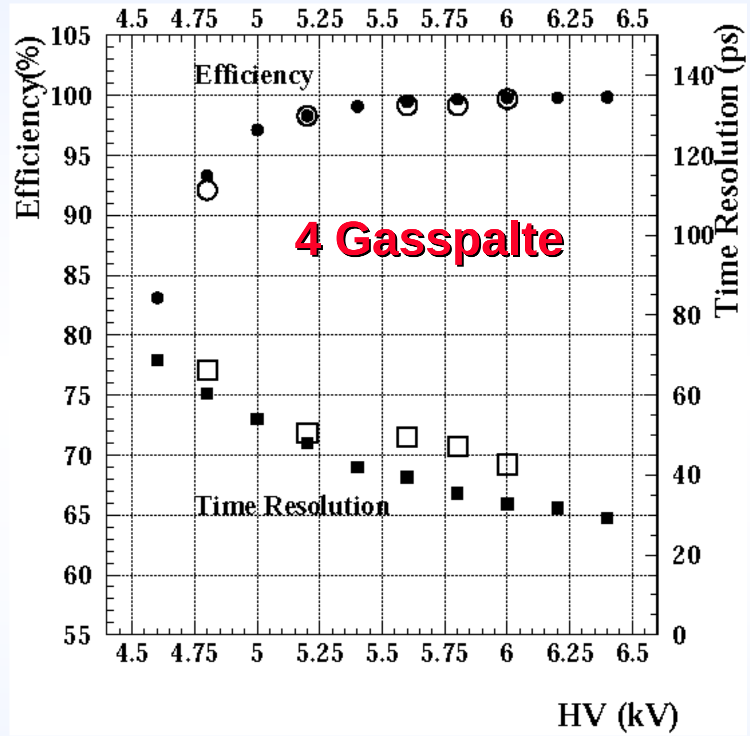


α = Townsendkoeffizient,
η = Elektronenanlagerungskoeffizient

1D-Simulationsergebnisse: Effizienz und Zeitauflösung

Beispiel: Timing RPC





- **Offene Symbole: Messungen, gefüllte Symbole: Simulation**
- **(7GeV Pionen, 20fC Schwellwert, 200ps Verstärker-Anstiegszeit, 1fC Noise, T=296.15K, p=970mb)**

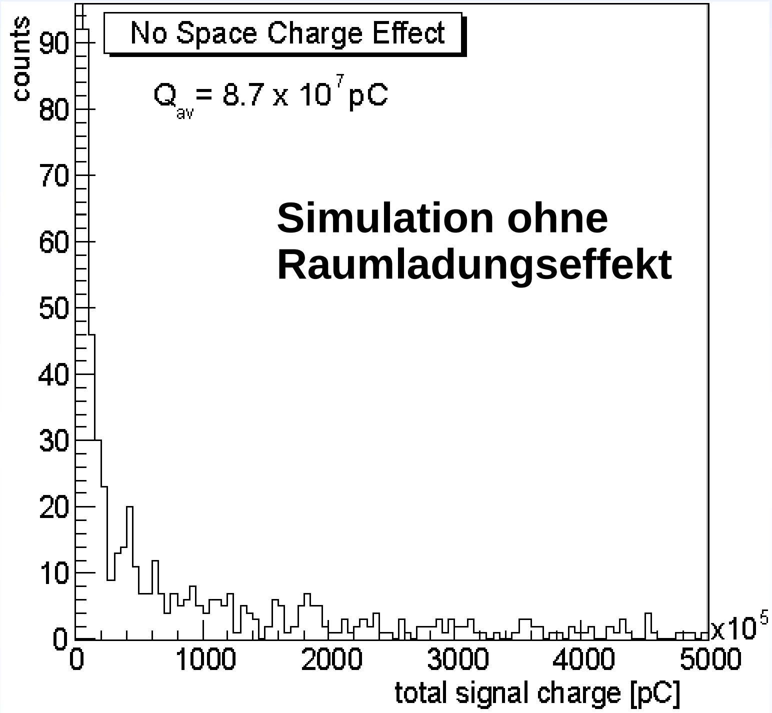
Lawinenladungen
(kein Raumladungseffekt simuliert)

Mittlere induzierte Ladungen (0.3mm Timing RPC):

	simuliert	gemessen
$Q_{ind}=$	$5 \cdot 10^7$ pC	0.5 pC

Mittlere induzierte Ladungen (2mm Trigger RPC):

	simuliert	gemessen
$Q_{ind}=$	$8 \cdot 10^3$ pC	2 pC



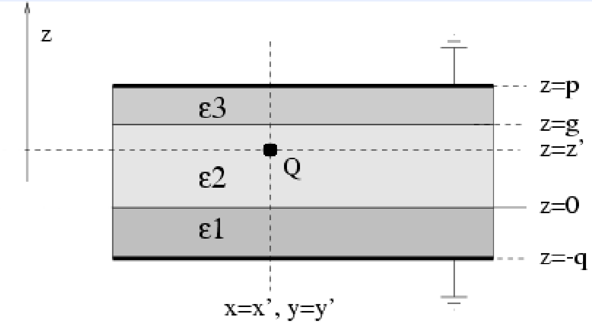
Simuliertes Spektrum ist exponentiell abfallend!

Messungen zeigen aber einen Scheitel-punkt!!

$\Rightarrow$ Raumladungs-/ Sättigungseffekt?

Raumladungsfeld

Benötigt wird eine analytische Lösung für das elektrische Feld einer Punktladung in einer RPC.



$$\Phi(\rho,\phi,z) = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_2}\Big[\frac{1}{\sqrt{P^2+(z-z')^2}} + \frac{(\varepsilon_2-\varepsilon_3)}{(\varepsilon_2+\varepsilon_3)\sqrt{P^2+(2g-z-z')^2}} - \frac{(\varepsilon_1-\varepsilon_2)}{(\varepsilon_1+\varepsilon_2)\sqrt{P^2+(z+z')^2}}$$

$$+ \frac{1}{(\varepsilon_1+\varepsilon_2)(\varepsilon_2+\varepsilon_3)}\int_0^\infty d\kappa\; J_0(\kappa P)\,\frac{R(\tau,z,z')}{D(\kappa)}\Big], \qquad 0 \le z \le g$$

$$\begin{aligned} D(\kappa) = {} & (\varepsilon_1+\varepsilon_2)(\varepsilon_2+\varepsilon_3)\,(1-e^{-2\kappa(p+q)}) - (\varepsilon_1-\varepsilon_2)(\varepsilon_2+\varepsilon_3)(e^{-2\kappa p}-e^{-2\kappa q}) \\ & - (\varepsilon_1+\varepsilon_2)(\varepsilon_2-\varepsilon_3)(e^{-2\kappa(p-g)}-e^{-2\kappa(q+g)}) + (\varepsilon_1-\varepsilon_2)(\varepsilon_2-\varepsilon_3)(e^{-2\kappa g}-e^{-2\kappa(p+q-g)}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R(\kappa;z,z') = {} & (\varepsilon_1+\varepsilon_2)^2(\varepsilon_2+\varepsilon_3)^2\,\left[e^{\kappa(-2p-2q+z-z')} + e^{\kappa(-2p-2q-z+z')}\right] \\ & -(\varepsilon_1+\varepsilon_2)^2\,(\varepsilon_2-\varepsilon_3)^2\,e^{\kappa(-4g-2q+z+z')} - 4\varepsilon_1\varepsilon_2(\varepsilon_2+\varepsilon_3)^2\,e^{\kappa(-2q-z-z')} \\ & -(\varepsilon_1-\varepsilon_2)^2\,(\varepsilon_2+\varepsilon_3)^2\,e^{\kappa(-2p-z-z')} - \left({\varepsilon_1}^2-{\varepsilon_2}^2\right)(\varepsilon_2-\varepsilon_3)^2\,e^{\kappa(-4g+z+z')} \\ & + \left({\varepsilon_1}^2-{\varepsilon_2}^2\right)(\varepsilon_2+\varepsilon_3)^2\,\left[-e^{\kappa(-2p-2q-z-z')} + e^{\kappa(-2p+z-z')} + e^{\kappa(-2p-z+z')}\right] \\ & -4\,\left({\varepsilon_1}^2-{\varepsilon_2}^2\right)\,\varepsilon_2\varepsilon_3\,e^{\kappa(-2p-2q+z+z')} - 4\,(\varepsilon_1+\varepsilon_2)^2\varepsilon_2\varepsilon_3\,e^{\kappa(-2p+z+z')} \\ & +(\varepsilon_1-\varepsilon_2)^2\left({\varepsilon_2}^2-{\varepsilon_3}^2\right)\,e^{\kappa(-2g-z-z')} + 4\,\varepsilon_1\varepsilon_2\left({\varepsilon_2}^2-{\varepsilon_3}^2\right)\,e^{\kappa(2g-2p-2q-z-z')} \\ & +(\varepsilon_1+\varepsilon_2)^2\left({\varepsilon_2}^2-{\varepsilon_3}^2\right)[-e^{\kappa(-2g-2q+z-z')} - e^{\kappa(-2g-2q-z+z')} + e^{\kappa(-2g-2p-2q+z+z')}] \\ & + \left({\varepsilon_1}^2-{\varepsilon_2}^2\right)\left({\varepsilon_2}^2-{\varepsilon_3}^2\right)[e^{\kappa(-2g-2q-z-z')} - e^{\kappa(-2g+z-z')} - e^{\kappa(-2g-z+z')} + e^{\kappa(-2g-2p+z+z')}] \end{aligned}$$

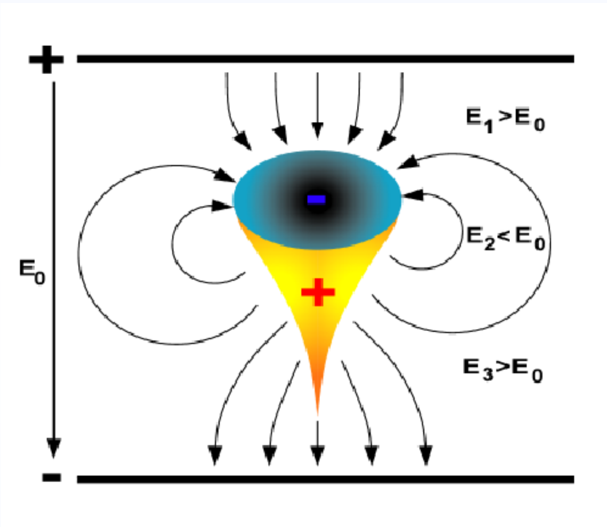
“1.5-D” Simulation

- Die Lawine wird simuliert, indem ihre Entwicklung in Zeitschritte unterteilt wird, und das Raumladungsfeld an jedem Punkt innerhalb der Lawine zu jedem Schritt berechnet wird.

- Die Raumladung wird in Gaußischen radialen Ladungsverteilungen untergebracht. Die Lawinensimulation erfolgt aber nur in einer Dimension (longitudinal)
$\Rightarrow$ “1.5-D Modell”.

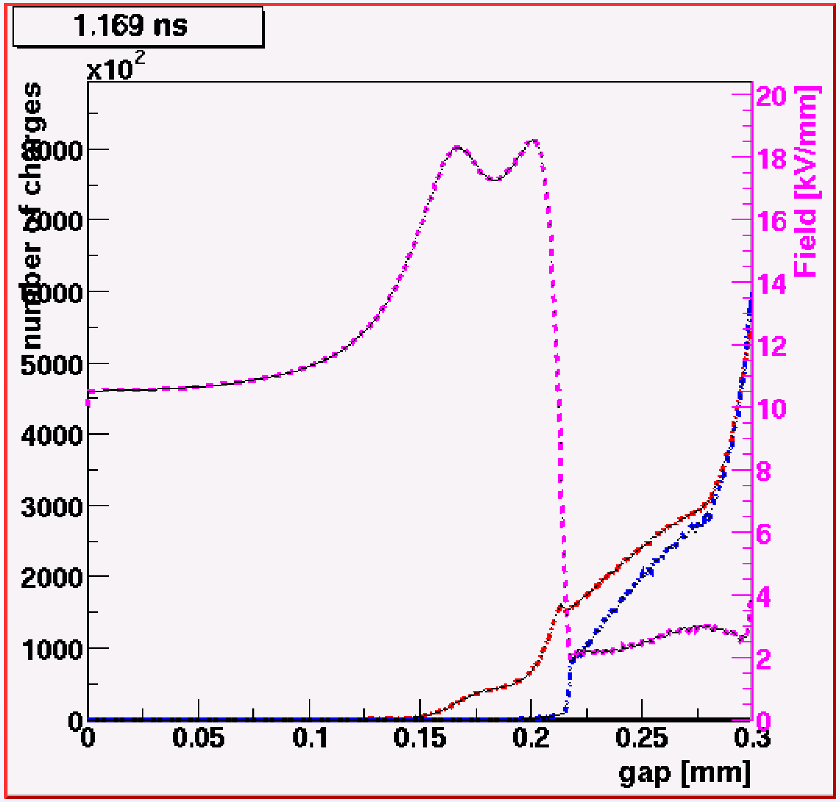
- Die genannte Prozedur erlaubt eine dynamische Berechnung der Gasparameter (Townsend Koeffizient, Elektronenanlagerungskoeffizient, Driftgeschwindigkeit).

Raumladungseffekte



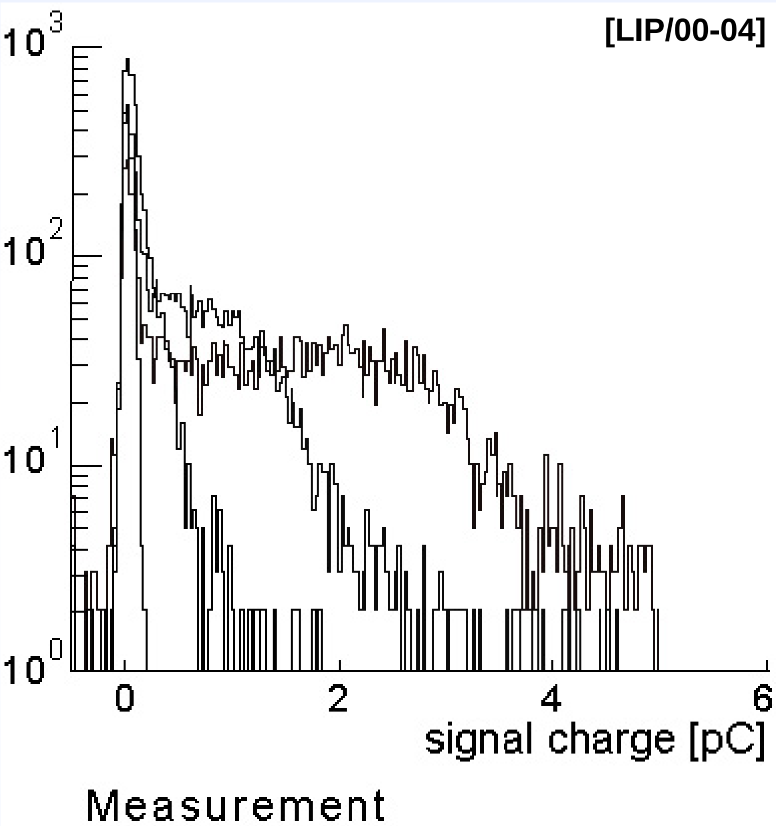
0.3mm Timing RPC, HV=3kV

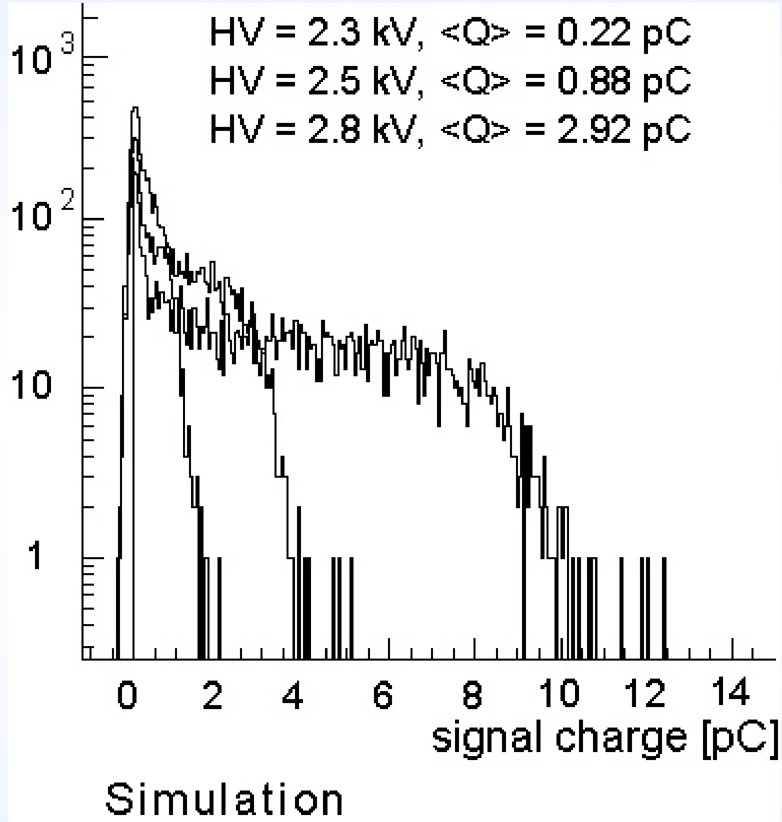
Electronen, positive Ionen, negative Ionen, Feld



Simulationsergebnisse: Ladungsspektren

Beispiel: Timing RPC



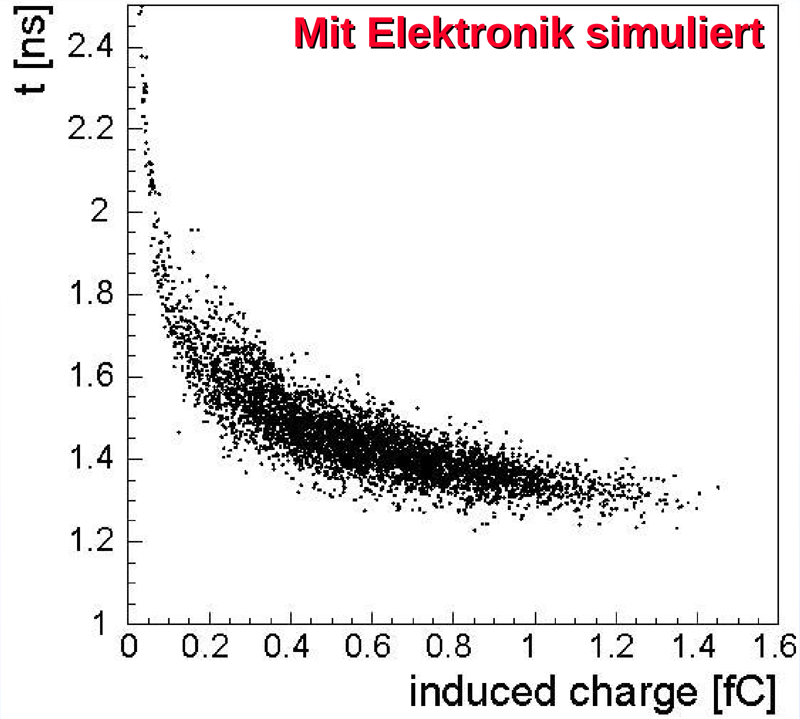


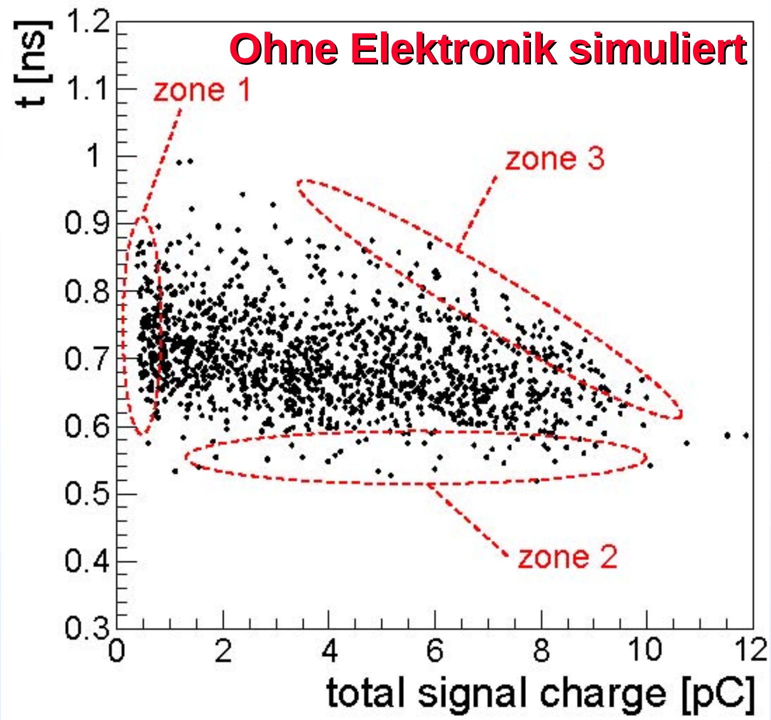
- **Abweichung in den mittleren Ladungen von etwa einem Faktor 2.**
- **Zu vergleichen mit Faktor 10^7 ohne Raumladungseffekt!**
- **(7GeV Pionen, T=296.15K, p=970mb)**

1.5D Simulation

Simulationsergebnisse: Ladung-Zeit-Korrelation

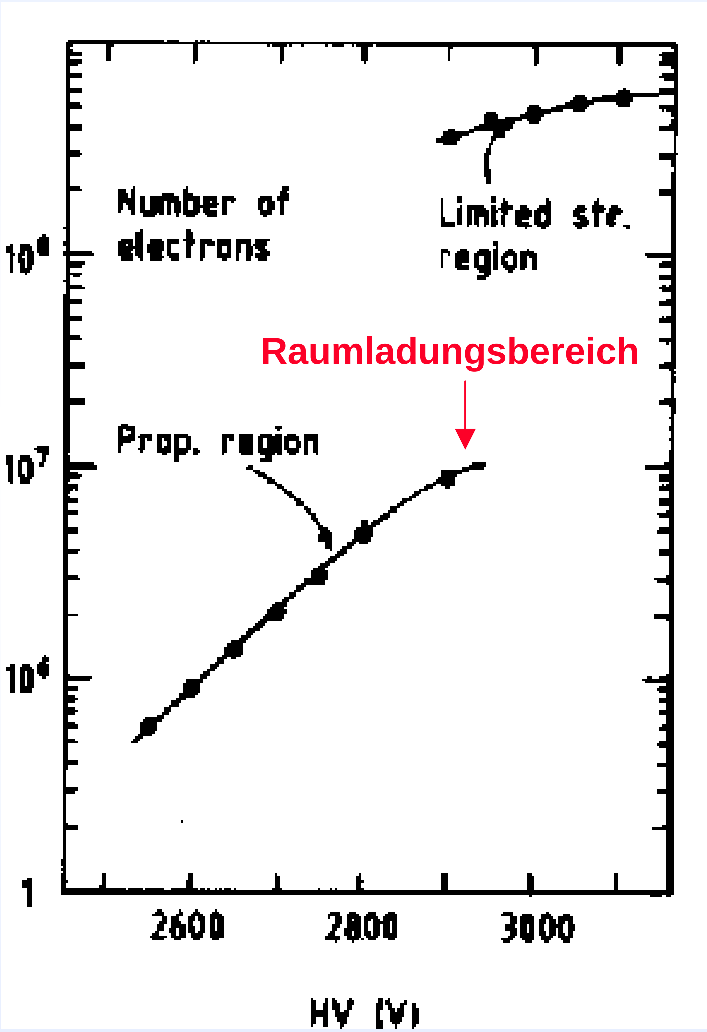
- Ladung-Zeit-Korrelationen werden bei Timing RPCs verwendet, um die Zeitauflösung zu verbessern.
- Gründe sind Elektronik und intrinsische Detektoreffekte
  - Zone 1: Grenze gegeben durch Schwellwert
  - Zone 2: Signale mit schneller Anstiegszeit sind nicht mit Ladung korreliert.
  - Zone 3: Signale mit langsamer Anstiegszeit sind mit Ladung korreliert.





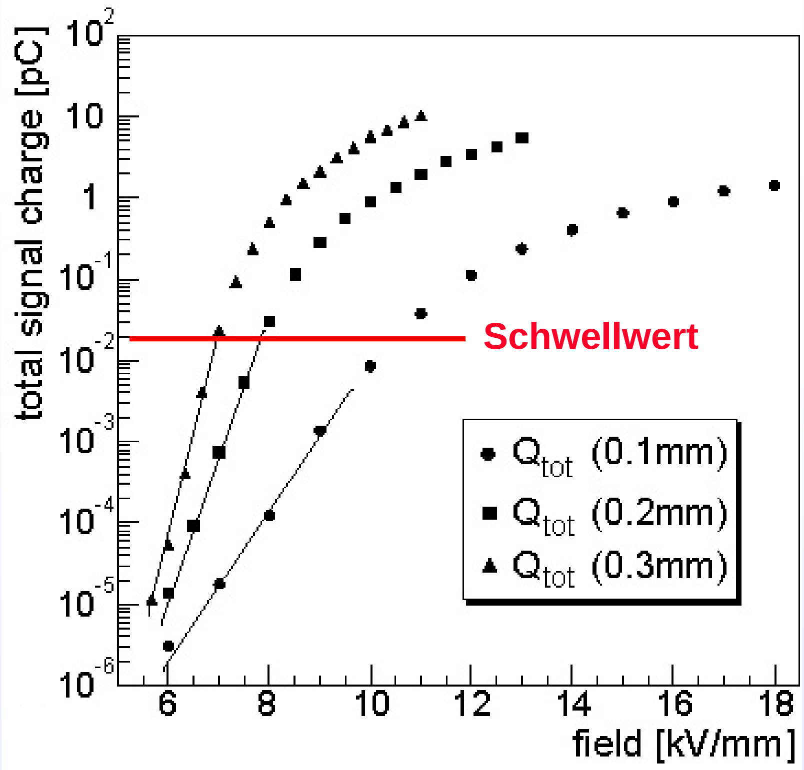
Vergleich des Betriebsmodus von Drahtkammer und RPC

Drahtkammer/ Geiger-Müller-Rohr:



[NIM 200, 345 (1982)]

- **Timing RPC (Simulation)**
- **Homogenes angelegtes Feld**
- **Proportionalitätsregion ist unterhalb jeden Schwellwerts**
- **Weiter Raumladungsbereich**



2-D Simulationen

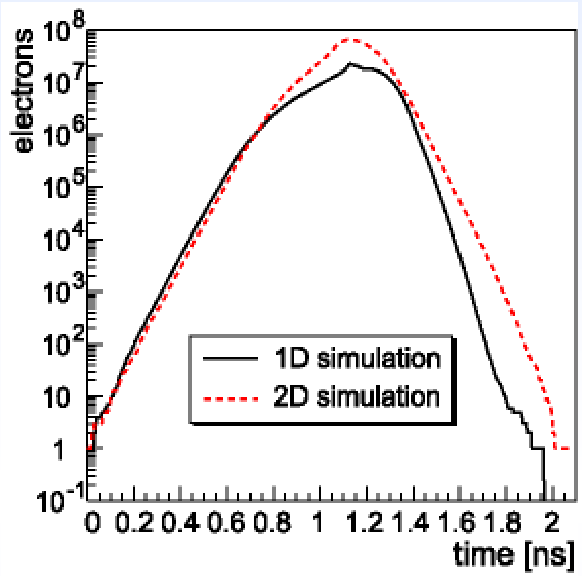
- Der Gasspalt wird in ein zweidimensionales Netz der longitudinalen und der radialen Koordinaten geteilt.

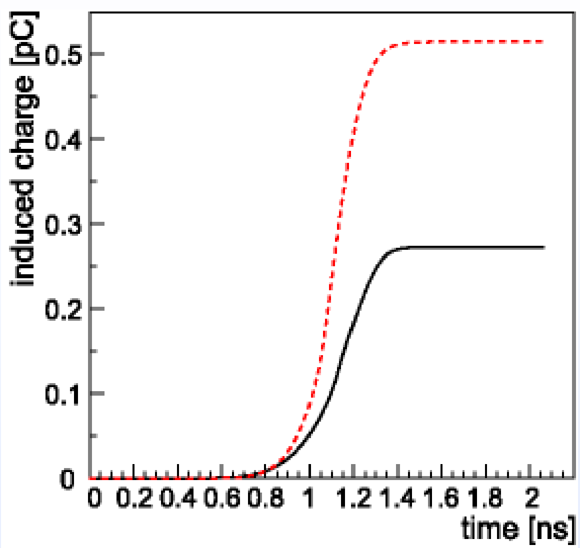
- Die Lawine wird simuliert, indem ihre Entwicklung in Zeitschritte unterteilt wird, und das Raumladungsfeld (longitudinale und radiale Komponenten) an jedem Netzpunkt innerhalb der Lawine zu jedem Schritt berechnet wird.

- Die Gasparameter (Townsend Koeffizient, Elektronenanlagerungskoeffizient, Driftgeschwindigkeit, Diffusionskoeffizienten) werden dynamisch an jedem Netzpunkt berechnet.

1.5D Simulation

Vergleich der 1.5-D und 2-D Simulationen



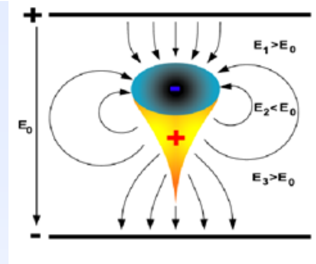


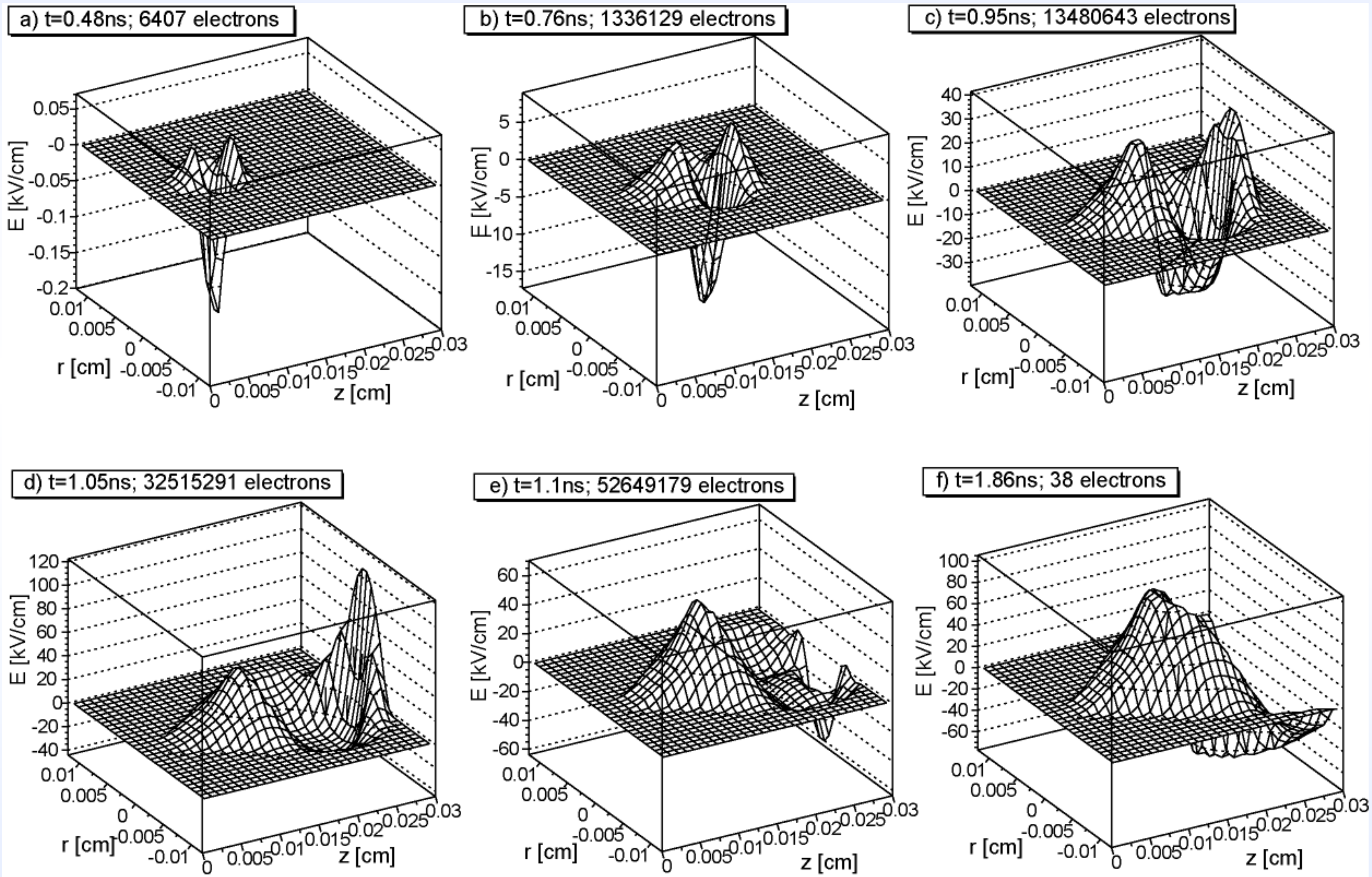
- **Lawinen jeweils mit 1 Elektron an Kathode gestartet in 0.3 mm Timing RPC bei HV=2.8kV**
- **Sättigungseffekt (Raumladungseffekt) ist stärker bei 1.5-D Simulation:**
  1) **Feldberechnung nur im Zentrum der Lawine**
  2) **Keine radiale Abstoßung der Elektronen**

⇒ Berechnetes Raumladungsfeld ist im 1.5-D Fall etwas höher.

- **Induzierte Ladung weicht etwa um Faktor 2 ab.**

2D- Simulation: Raumladungsfeld



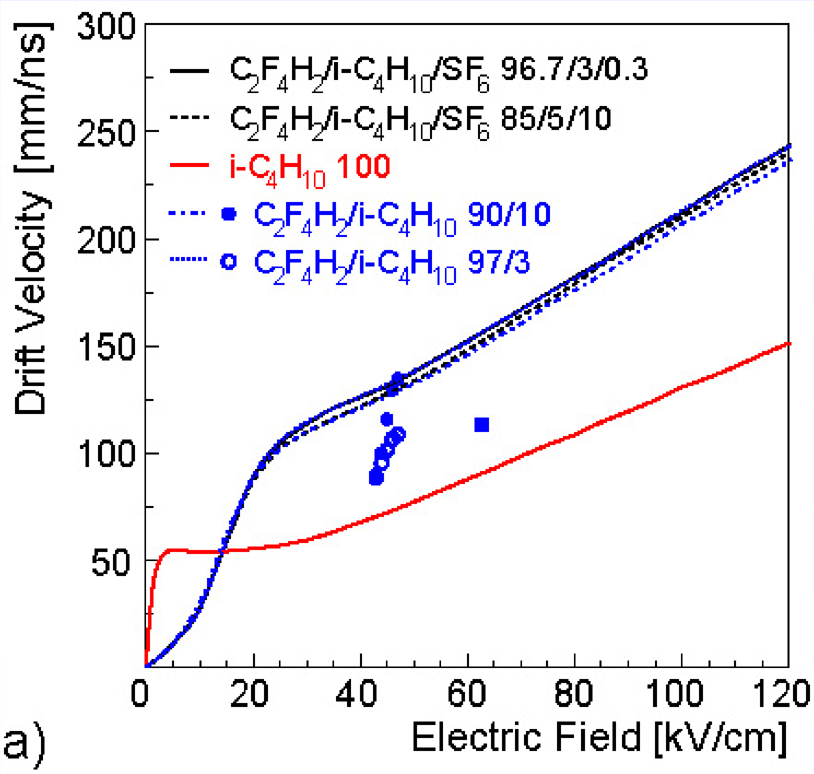


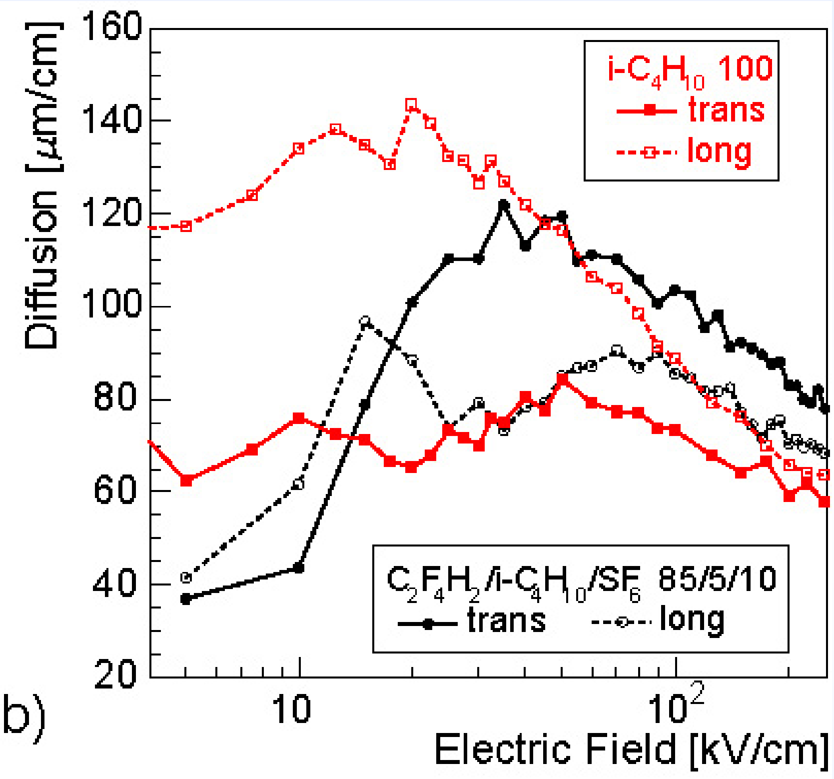
Das Raumladungsfeld erreicht die Größenordnung des exteren angelegten Feldes!

Zusammenfassung/ Schlussfolgerungen

- **RPCs werden heute großflächig in Hochenergiephysikexperimenten eingesetzt.**
- **Fundamentale Fragen betreffend ihrer Effizienz und Ladungsspektren waren ungeklärt.**
- **Wir wenden Standarddetektorphysiksimulationen auf Timing und Trigger RPCs an und finden gute Übereinstimmung mit Messungen von Effizienz, Zeitauflösung und Ladungsspektren.**
- **Die Effizienz von Timing RPCs mit 0.3mm breiten Gasspalten wird erklärt durch etwa 10 Primärionisationszentren pro mm und einen Townsend-koeffizienten um 110/mm.**
- **RPCs werden im Gegensatz zu Drahtkammern in einem starken Raumladungsmodus betrieben. Der Unterdrückungsfaktor beträgt viele Größenordnungen!**
- **Die Ladung-Zeit-Korrelation hat elektronische und Detektor-intrinsische Ursachen.**
- **Detaillierte 2-D Simulationen unterstützen die Ergebnisse.**

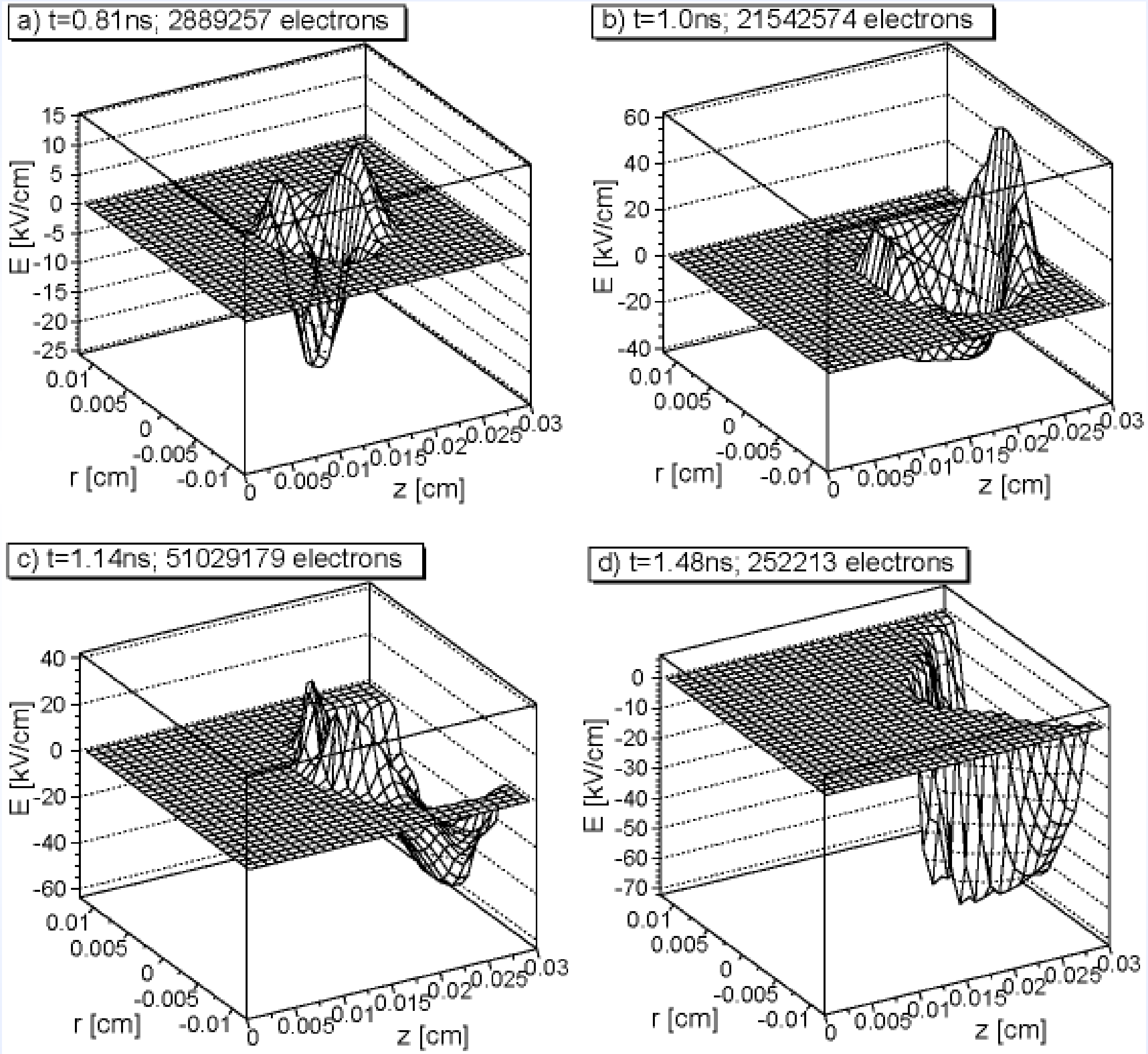
Input 3: Mehr Gasparameter





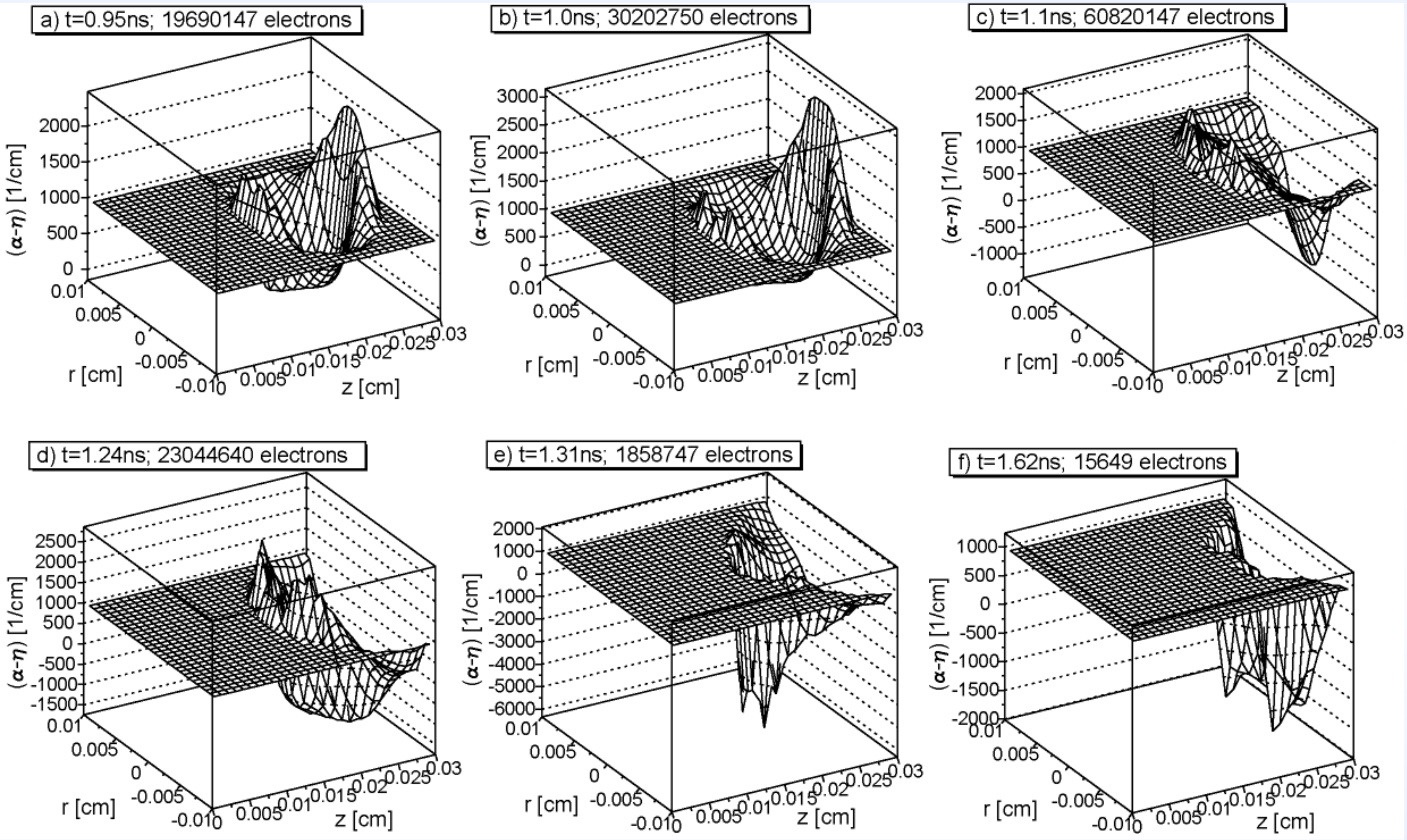
- **Driftgeschwindigkeiten:**
  - **Trigger RPC ≈ 130 μm/ns, T ≈ 15ns**
  - **Timing RPC ≈ 220 μm/ns, T ≈ 1.4ns**
- **Diffusion: ≈ 60-120 μm/cm**

2D- Simulation: Elektrisches Feld an Positionen mit Elektronen



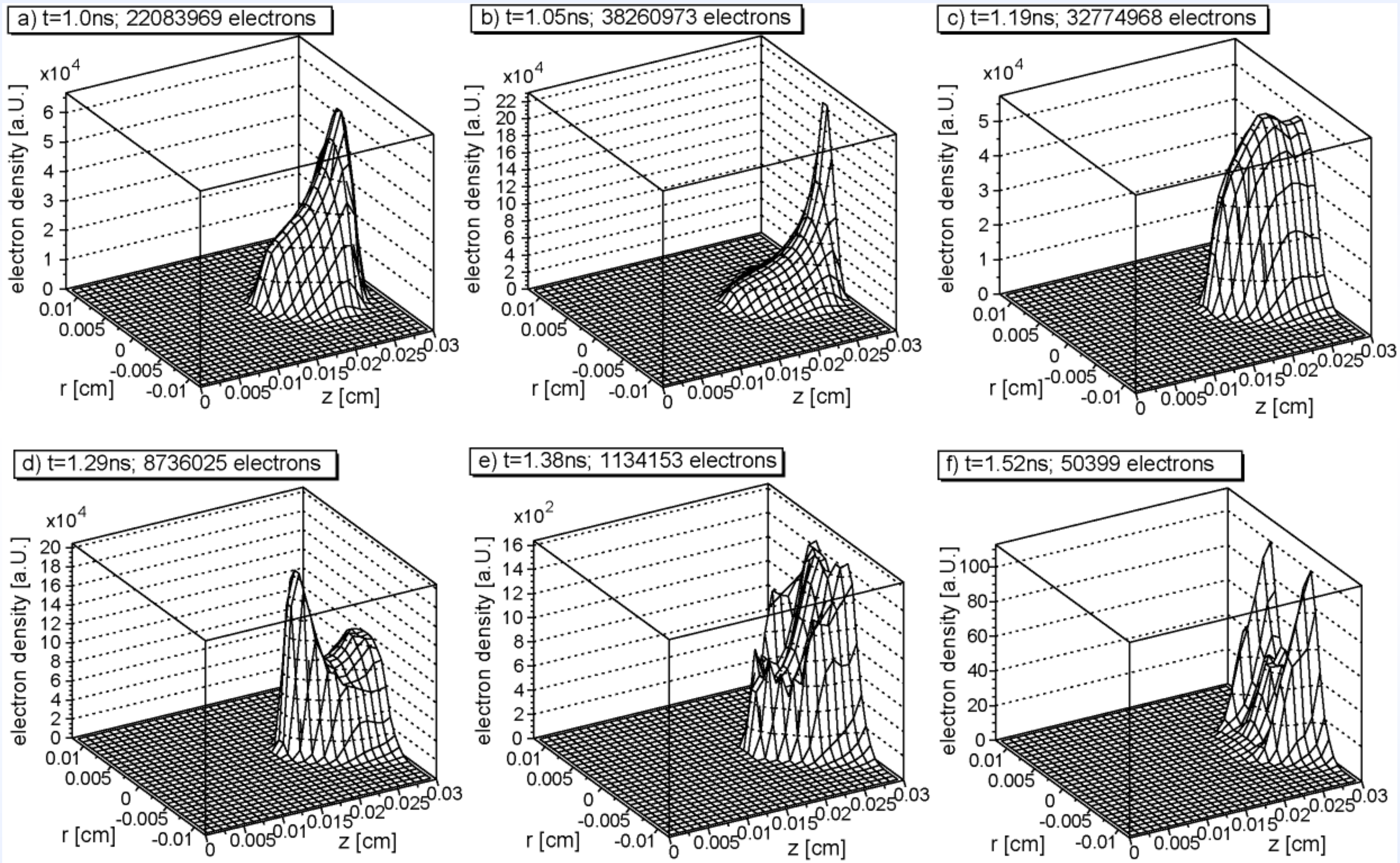
Das elektrische Feld ist an fast allen Stellen, an denen sich Elektronen befinden, stark erniedrigt, insbesondere im Endstadium!

2D- Simulation: Effektiver Townsend-Koeffizient



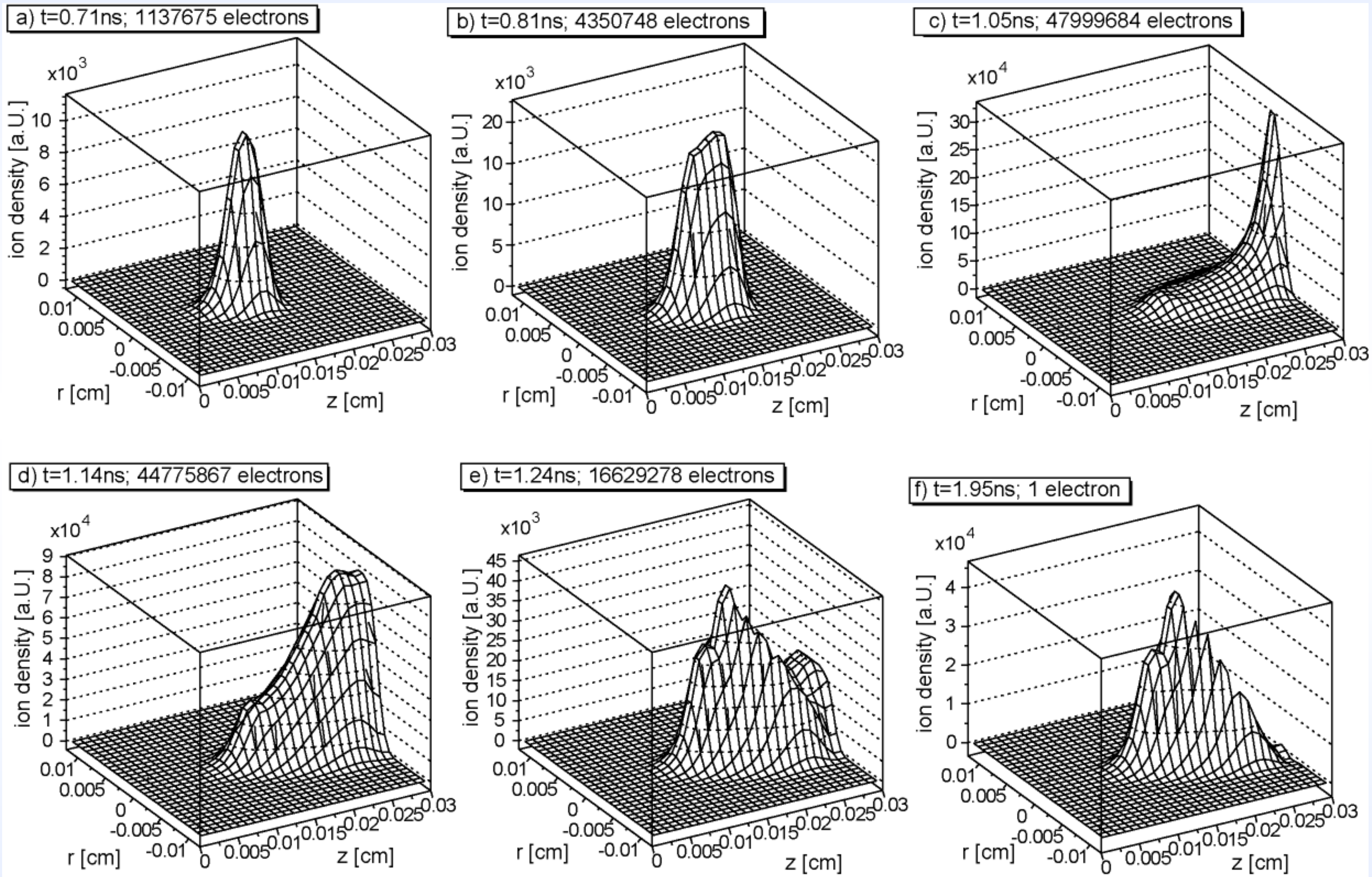
Der effektive Townsend Koeffizient schwankt zwischen +3000/cm und –6000/cm!

2D- Simulation: Elektronendichte



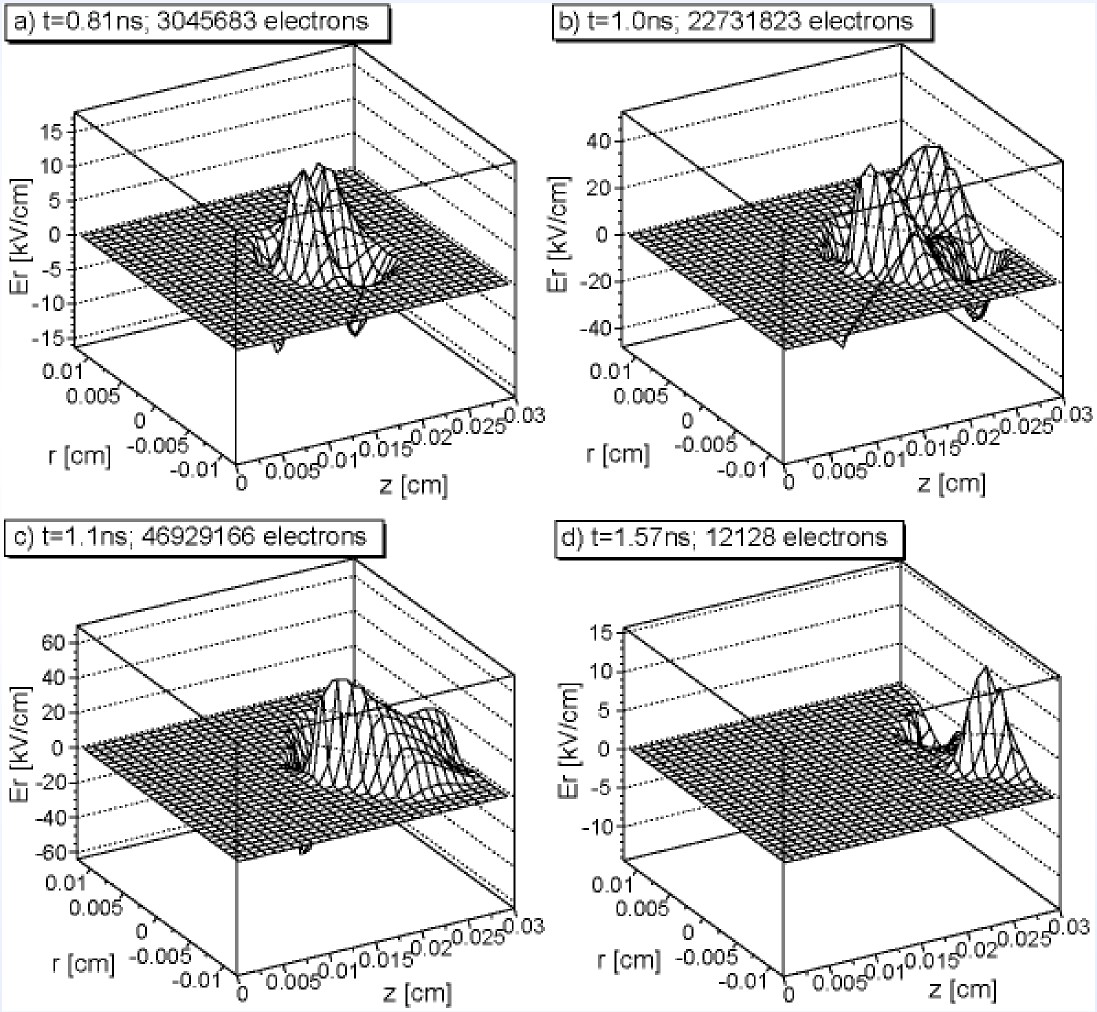
Im Endstadium der Lawine gibt es extrem starke Elektronenanlagerung.

2D- Simulation: Ionendichte



Durch Elektronenanlagerung entstehen viele negative Ionen in der Endphase.

2D- Simulation: Radiales Feld



Das radiale Raumladungsfeld erreicht die Größenordnung des extern angelegten elektrischen Feldes