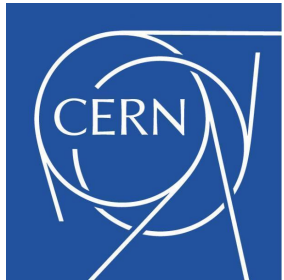


AWAKE: Advanced Proton Driven Plasma Wakefield Acceleration Experiment at CERN



Marlene Turner, CERN

Übersicht



- ❑ Was ist das **AWAKE Experiment**, und warum ist dieses Experiment interessant?
- ❑ **Plasma Kiefeld Beschleunigung** Physik
- ❑ Technisches Konzept und **experimenteller Aufbau** von dem AWAKE Experiment
- ❑ Neueste **Ergebnisse** von AWAKE

Advanced Wakefield Experiment

Advanced Proton Driven Plasma Wakefield Acceleration Experiment

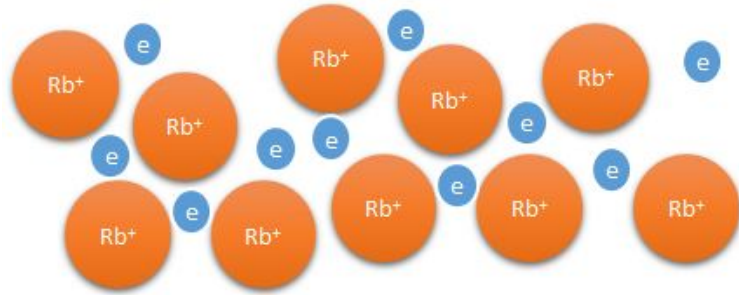
Plasma Kiefeld Beschleunigungs Experiment,
angetrieben durch einen Protonenstrahl



- Plasma ?
- Angetrieben von einem Protonenstrahl ?
- Kiefeld Beschleunigung ?

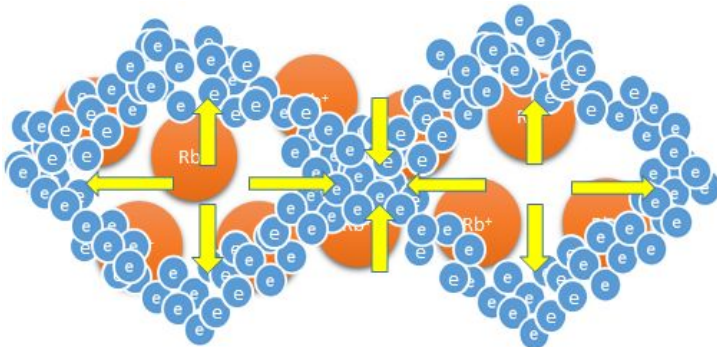
Starten wir mit den Grundlagen:

Was ist ein Plasma?



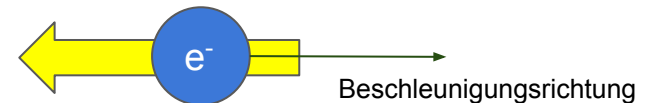
- '4-te Aggregatzustand → ionisiertes Gas'
 - **Quasi-neutral:** die Summe aller Ladungen ist ~ 0 .
 - **Kollektives Verhalten:** Der Abstand zwischen geladene Teilchen ist gering, sodass ein Teilchen viele naheliegende Teilchen beeinflusst.
 - **Elektrostatischen Kräfte dominieren** über z.B. Kollisionen oder Gas Kinetik.

Was sind Plasma-Kiefelder?



- **Elektrische Felder**, die durch die kollektive Bewegung von geladenen Teilchen im Plasma entstehen
- In unserem Fall : angeregt durch einen **hochenergetischen Protonen Strahl**

Um geladene Teilchen zu beschleunigen benötigen wir ein longitudinales elektrisches Feld



Plasma Kiefelder zur Beschleunigung von Geladenen Teilchen

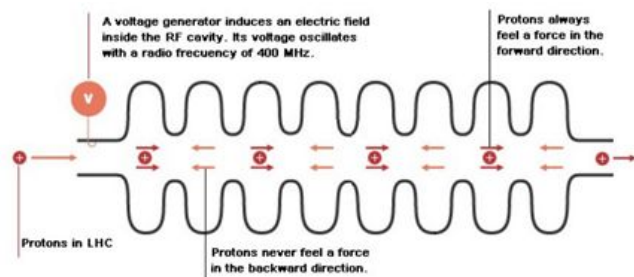
Warum?

Es geht um den

Beschleunigungsgradienten...

Standard-Technologie:

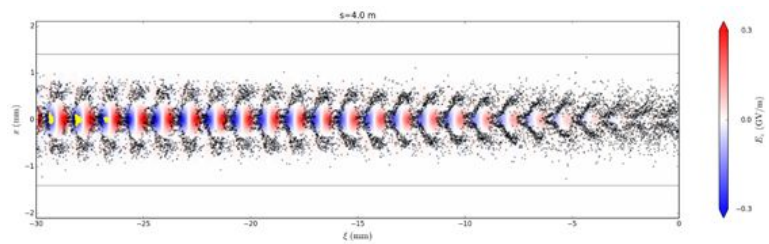
Max. Beschleunigungsgradient:
~100 MV/m, wegen Ionisierung



Plasma Kiefeld Beschleunigung:

Plasma, als Medium, ist bereits ionisiert und kann daher viel höheren elektrischen Feldern erzeugen

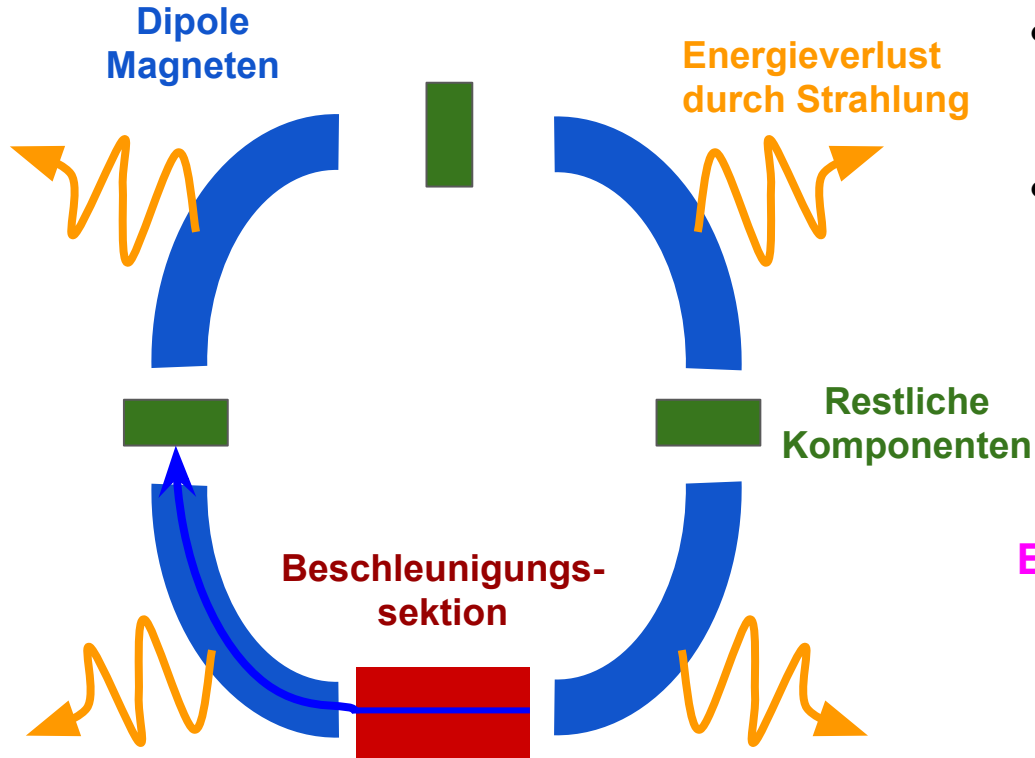
$$eE_{max} \approx 1 [\text{eV/cm}] \cdot n^{1/2} [\text{cm}^{-3}]$$



$$E = U/d$$



Ring-Beschleuniger



Schematische Skizze

- **Grosse Vorteil:** geladenen Teilchen passieren die Beschleunigungssektion viele male.
- **Dipol-Magneten** biegen den Strahl auf eine Kreisbahn:
 - \Rightarrow Synchrotronstrahlung $\propto E^4/r^2m^4$

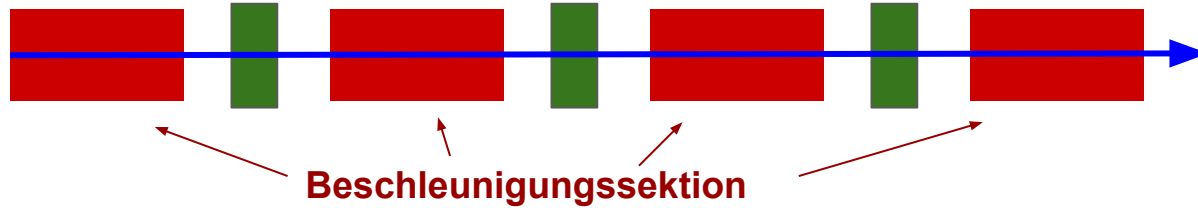
Man beschleunigt bis:

**Energiegewinn durch Beschleunigung =
Energieverlust durch
Synchrotronstrahlung**

z.b.: CERN's LHC, SPS

Linear-Beschleuniger

Schematische Skizze



- Geladenen Teilchen passieren die Beschleunigungssektionen nur einmal.

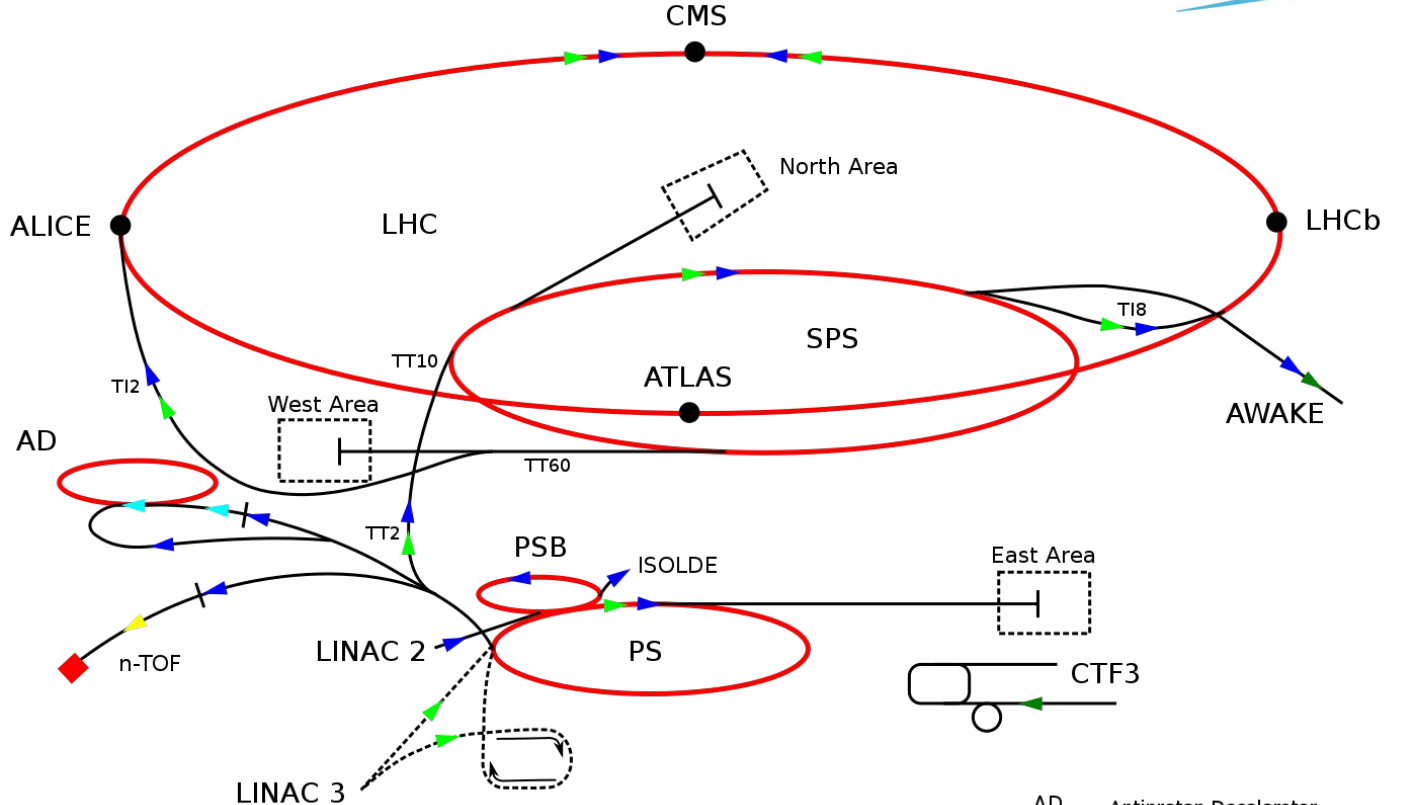
Teilchenenergie = Beschleunigungsgradient*Beschleunigungsdistanz

zB. um Elektronen auf 1 TeV zu beschleunigen (10^{12} eV):

100 MeV/m x 10000 m oder

100 GeV/m x 10 m

Beispiele:



- ▶ protons
- ▶ antiprotons
- ▶ ions
- ▶ electrons
- ▶ neutrons
- ▶ neutrinos

- PS Proton Synchrotron
- SPS Super Proton Synchrotron
- LHC Large Hadron Collider

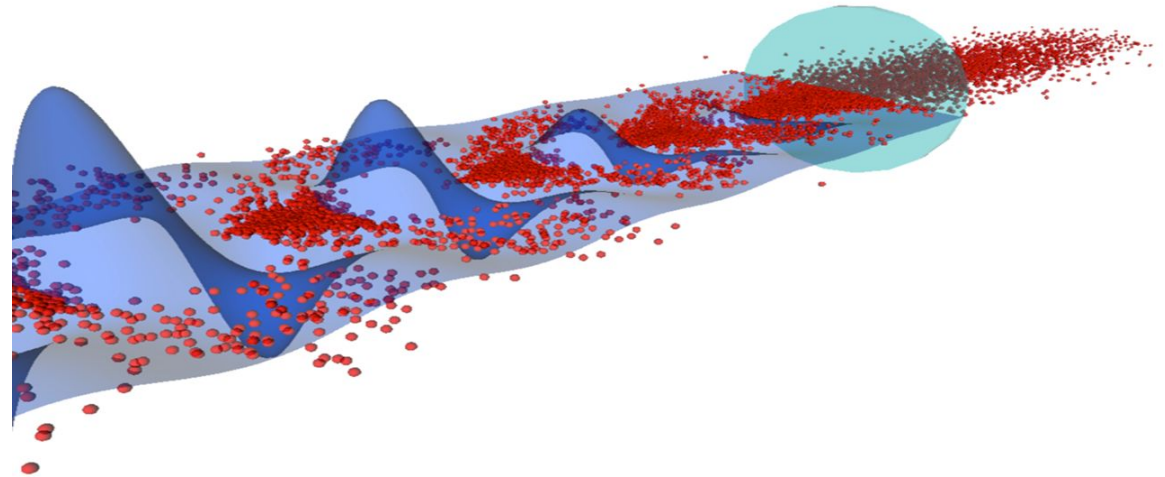
- AD Antiproton Decelerator
- n-TOF Neutron Time Of Flight
- AWAKE Advanced Wakefield Experiment
- CTF3 CLIC Test Facility 3

Wichtige Punkte:

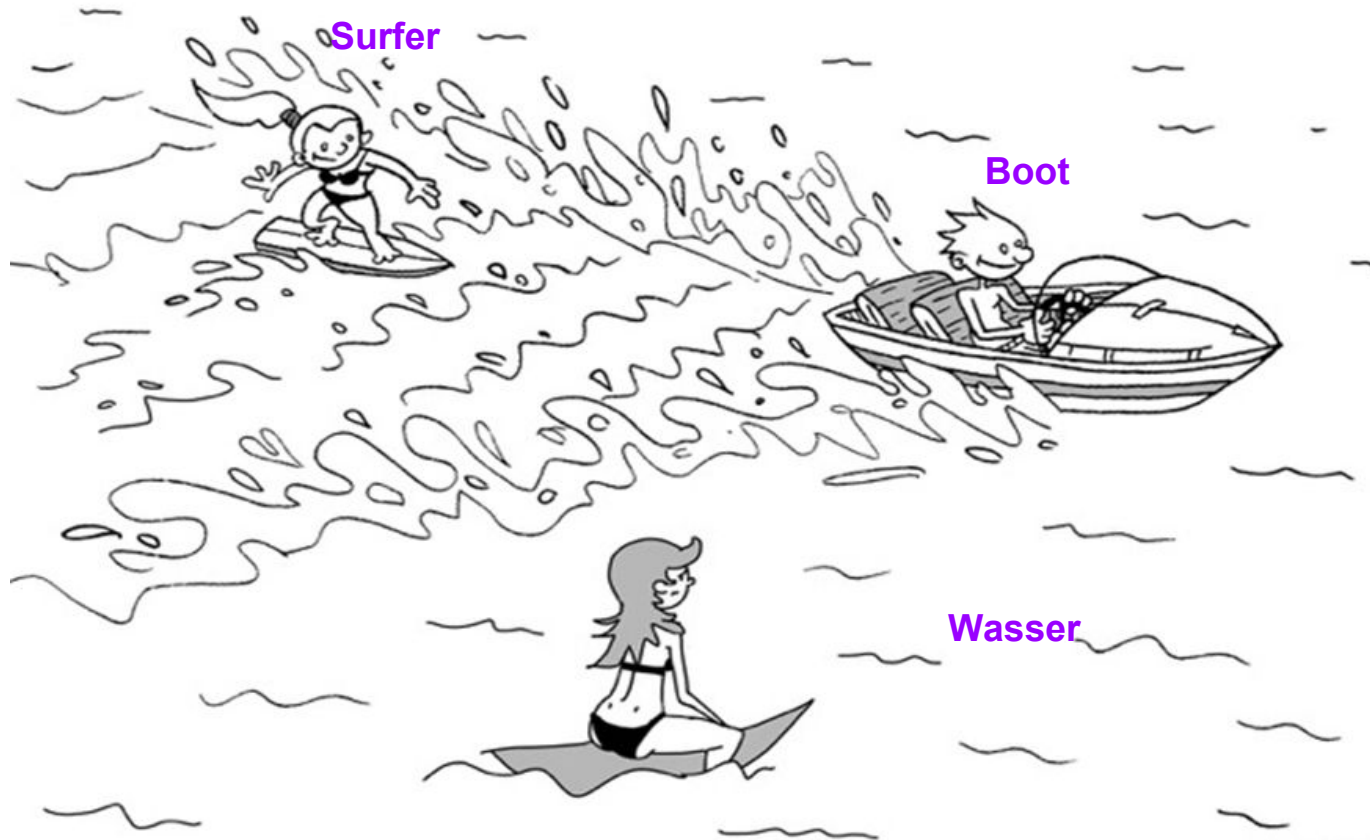


- ❑ Was sind **Plasma Kiefelder** ?
- ❑ Warum wollen wir Plasma zur **Beschleunigung** von geladenen Teilchen verwenden ?
- ❑ Warum / Wann ist ein **Linearbeschleuniger** vorteilhaft ?

Wie erzeugt man Plasma Kiefelder?



Graphischen Analogon



Analogie:

Wasser ⇒ Plasma

Boot ⇒ Teilchenstrahl

Surfer ⇒ zu beschleunigenden Teilchen

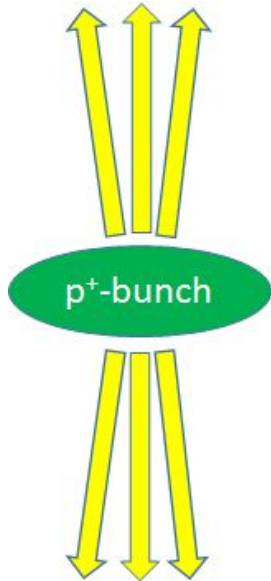
Graphischen Analogon



Unser Boot: ein hochenergetischer Protonenstrahl



Verfügbar hier am CERN:



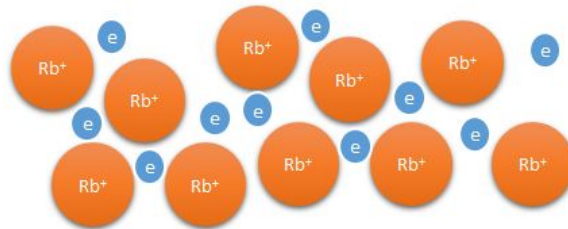
Hochenergetische
Protonenstrahlen
(Energie: kJ to MJ!)

Relativistische, geladene Teilchenstrahlen erzeugen ein fast ausschließlich **transverses elektrisches Feld**:

Was wir zum Beschleunigen brauchen:

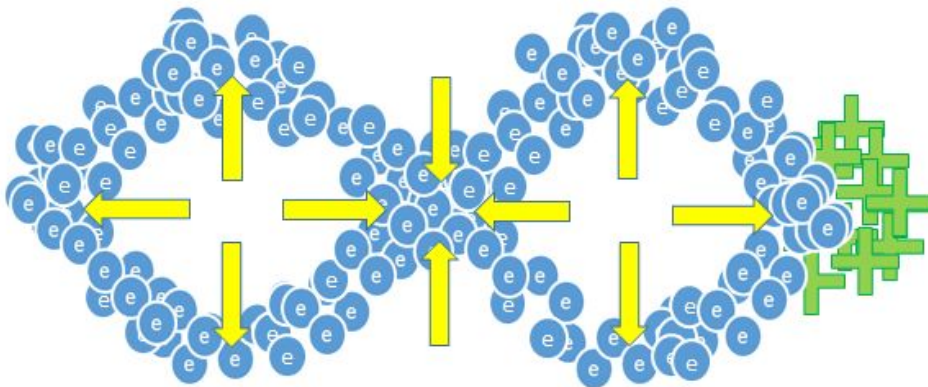
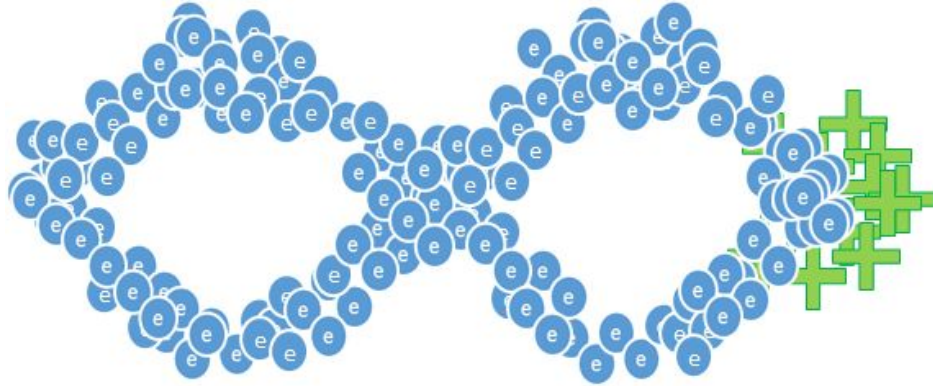
Longitudinales elektrisches Feld.

Unser Transformator:



- Plasma 'konvertiert' die Energie die in den transversen Feldern steckt, und erzeugt longitudinale Felder.
- Je mehr Energie der geladene Teilchenstrahl hat, desto länger (in Distanz) können die longitudinalen Plasma Kiefelder aufrecht erhalten bleiben ('je mehr Benzin im Auto, desto weiter fährt das Auto..')

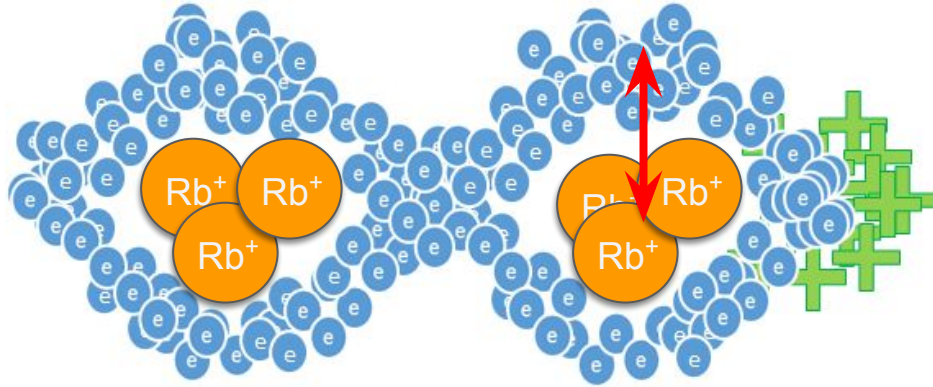
Wie erzeugt man ein Plasma Kiefeld?



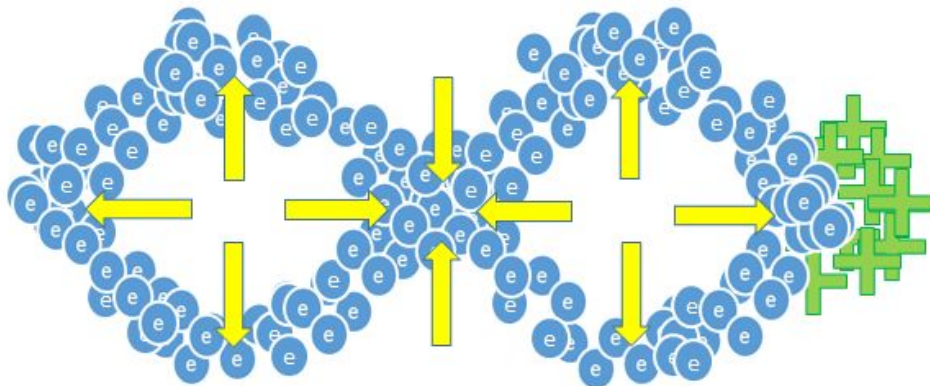
Wichtig:

- Bewegung der Plasmaelektronen ist überwiegend **transversal** (minimal longitudinal).
- Plasmaionen (nicht in der Skizze) sind schwer und bewegen sich wenig im Vergleich zu den Elektronen.

Wie erzeugt man ein Plasma Kiefeld?



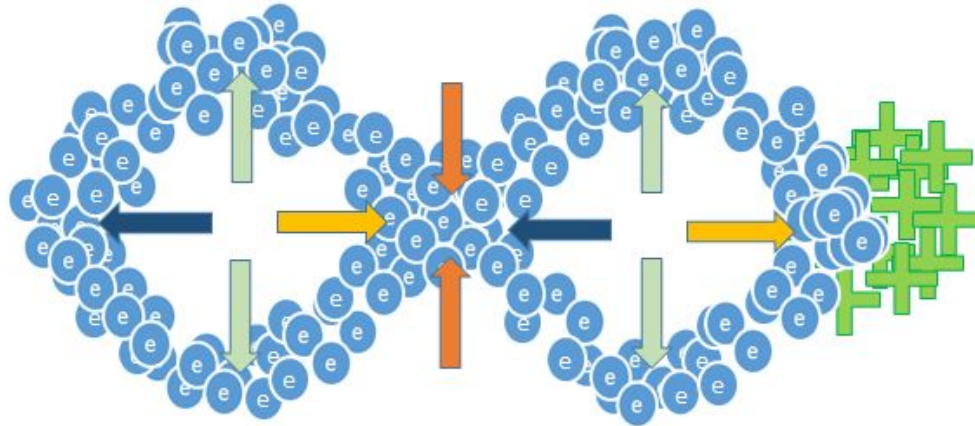
Ladungsseparation → Elektrisches Feld



Wo platzieren wir
Elektronen um sie zu
Beschleunigen?



Plasma Kiefelder



- ← Accelerating for e^-
- Decelerating for e^-
- ↑ Focusing for e^-
- ↓ Defocusing for e^-

Wichtige Punkte:



- ❑ Was brauchen wir um Plasma Kiefelder zu **erzeugen** ?
- ❑ Warum **beschleunigen** Plasma Kiefelder geladenen Teilchen?

Physik Konzepte in AWAKE:

- **Angeregte Protonenstrahl**
Selbstmodulierung
- **Beschleunigung von Elektronen**

Die angeregte Protonenstrahl Selbstmodulierung in Plasma

Voraussetzung:

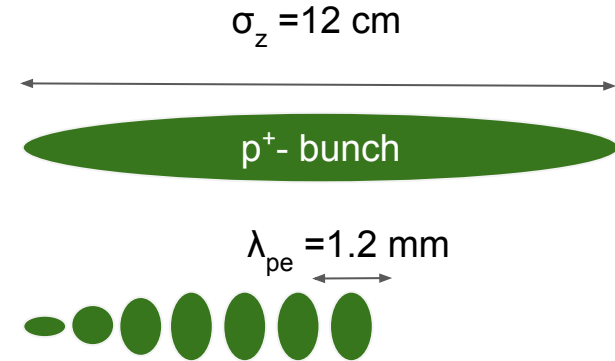
Um Plasma Kiefelder effektiv zu erzeugen, muss die Länge des Teilchenstrahles in der Größenordnung der Plasmawellenlänge sein.

Problem:

Der SPS Protonenstrahl ist 12 cm lang,
die Plasma Wellenlänge für unsere Plasmadichten allerdings nur ~ 1.2 mm.

Lösung:

Das Experiment regt eine Plasmainstabilität an, diese Instabilität moduliert den langen Teilchenstrahl in eine Sequenz von kurzen Strahlen (micro-bunches).



Die angeregte Protonenstrahl Selbst-Modulierung in Plasma

Voraussetzung:

Um Plasma Kiefelder effektiv zu erzeugen, muss die Länge des Teilchenstrahles in der Größenordnung der Plasmawellenlänge sein.

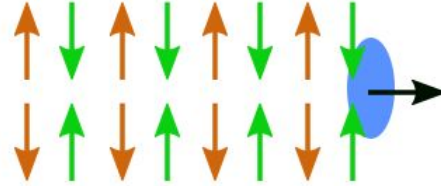
Problem:

Der SPS Protonenstrahl ist 12 cm lang,
die Plasma Wellenlänge für unsere Plasmadichten allerdings nur ~ 1.2 mm.

Lösung:

Das Experiment regt eine Plasmainstabilität an, diese Instabilität moduliert den langen Teilchenstrahl in eine Sequenz von kurzen Strahlen (micro-bunches).

short bunch:



Die angeregte Protonenstrahl Selbst-Modulierung in Plasma

Voraussetzung:

Um Plasma Kiefelder effektiv zu erzeugen, muss die Länge des Teilchenstrahles in der Größenordnung der Plasmawellenlänge sein.

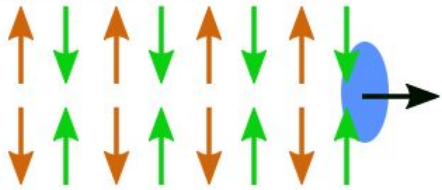
Problem:

Der SPS Protonenstrahl ist 12 cm lang, die Plasma Wellenlänge für unsere Plasmadichten allerdings nur ~1.2 mm.

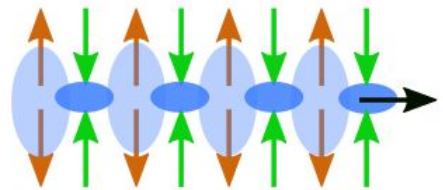
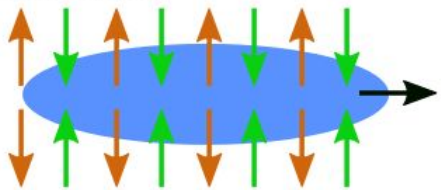
Lösung:

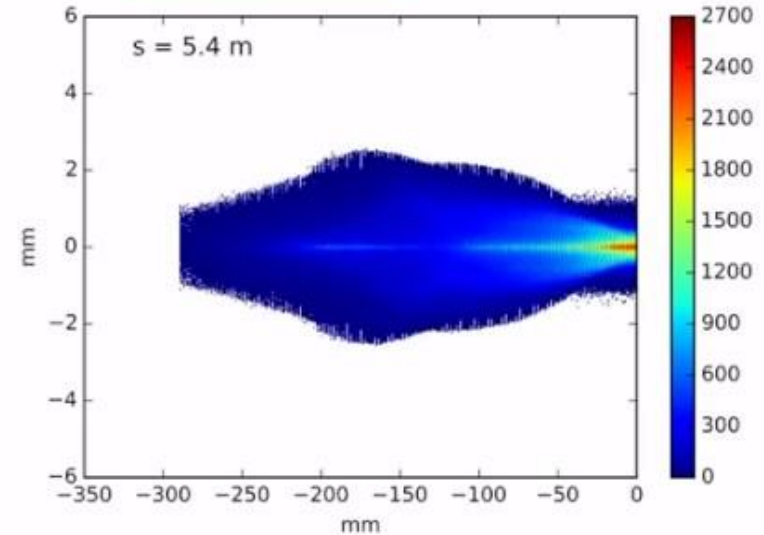
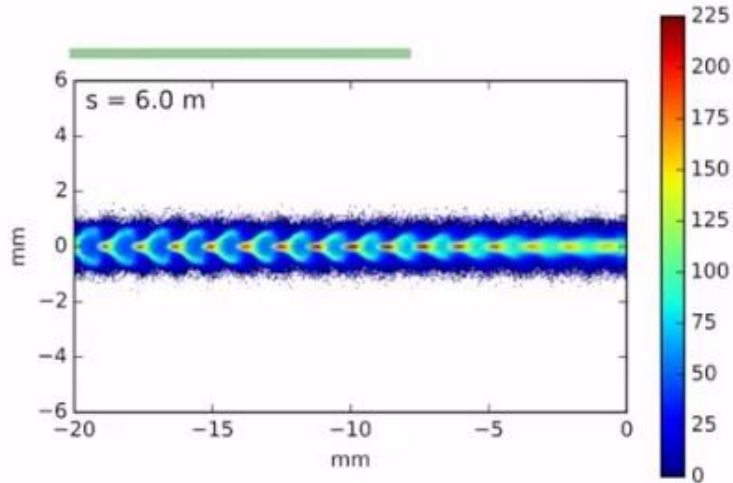
Das Experiment regt eine Plasmainstabilität an, diese Instabilität moduliert den langen Teilchenstrahl in eine Sequenz von kurzen Strahlen (micro-bunches).

short bunch:



long bunch:





Simulationsfenster bewegen sich mit
Lichtgeschwindigkeit (mit dem
Protonenstrahl mit)

Simulationsergebnis:

Kiefelfeld (Blau)

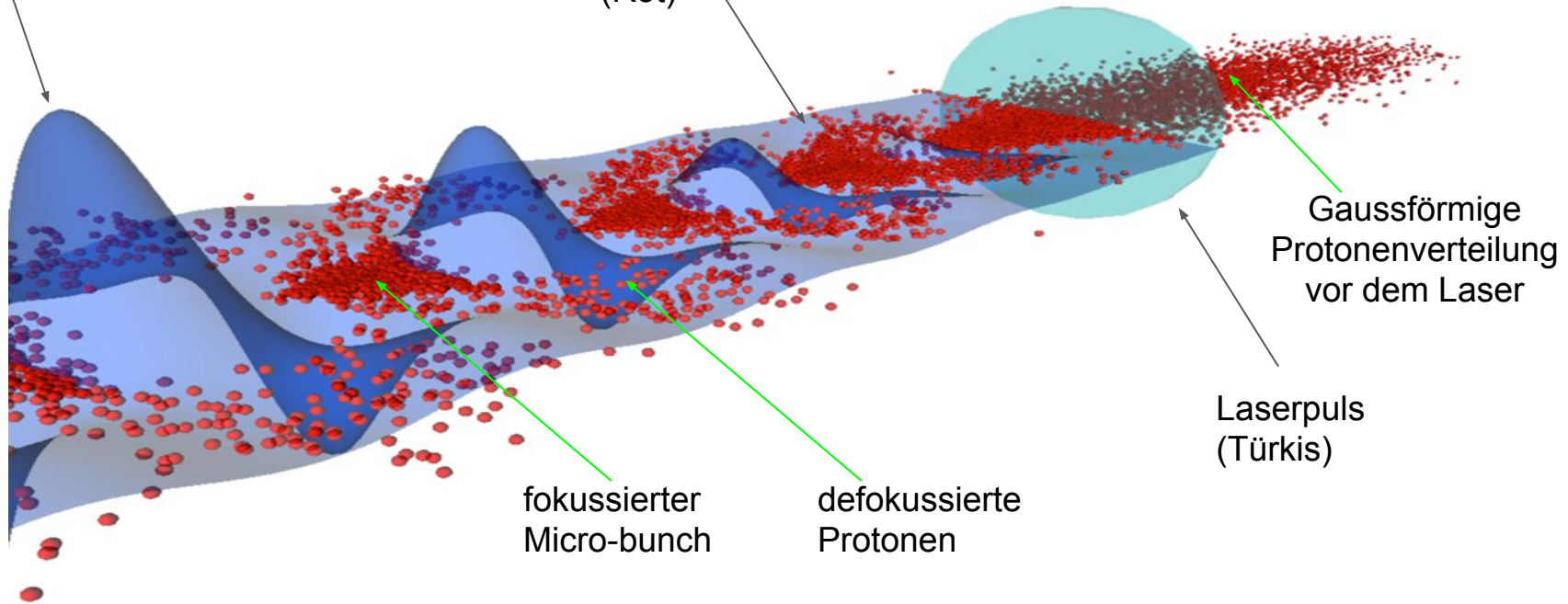
Protonen
(Rot)

Gaussförmige
Protonenverteilung
vor dem Laser

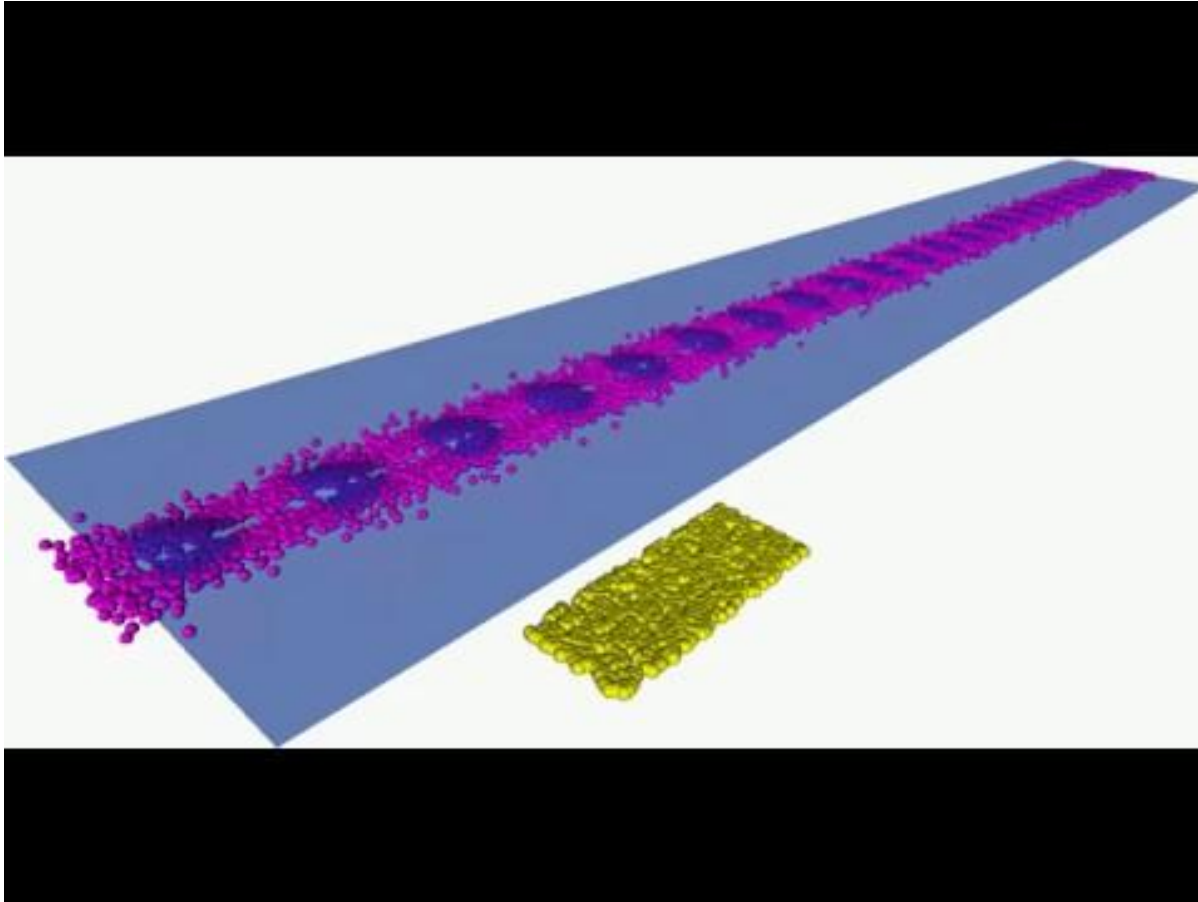
Laserpuls
(Türkis)

fokussierter
Micro-bunch

defokussierte
Protonen



Elektronenbeschleunigung im Kiefelfeld

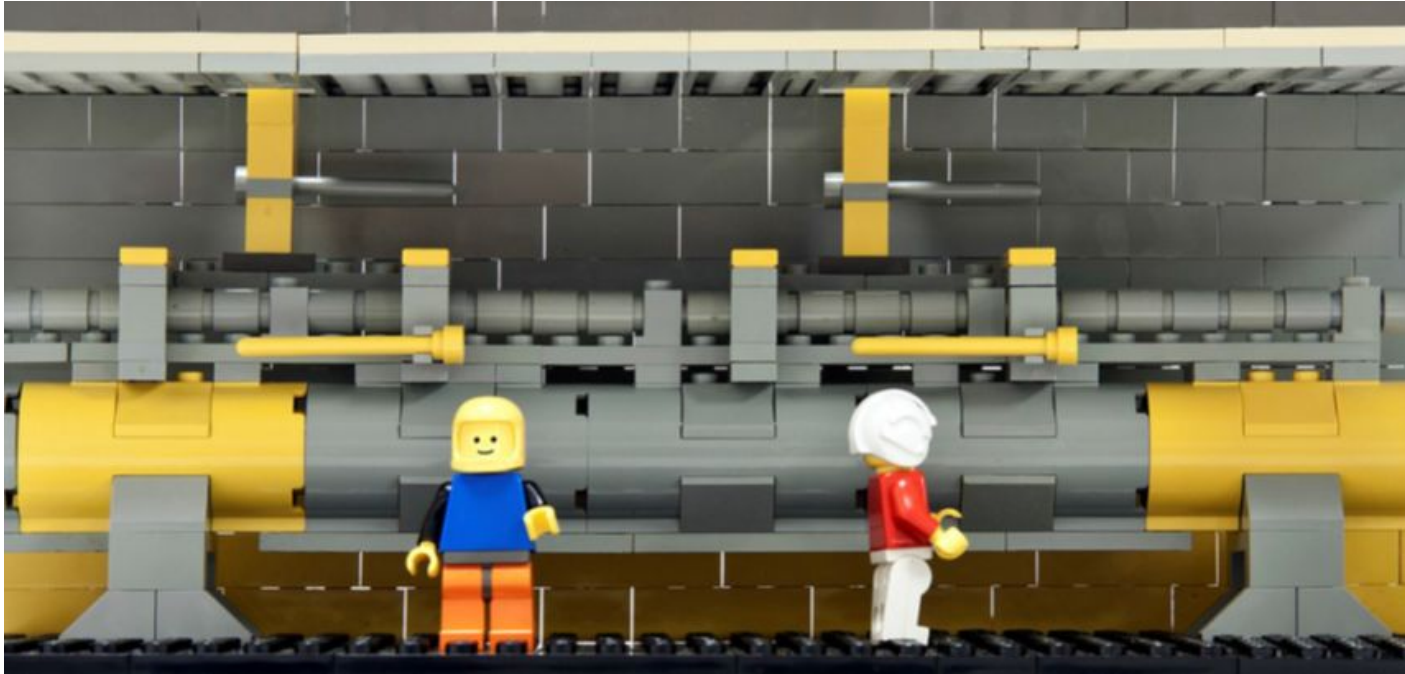


Wichtige Punkte:



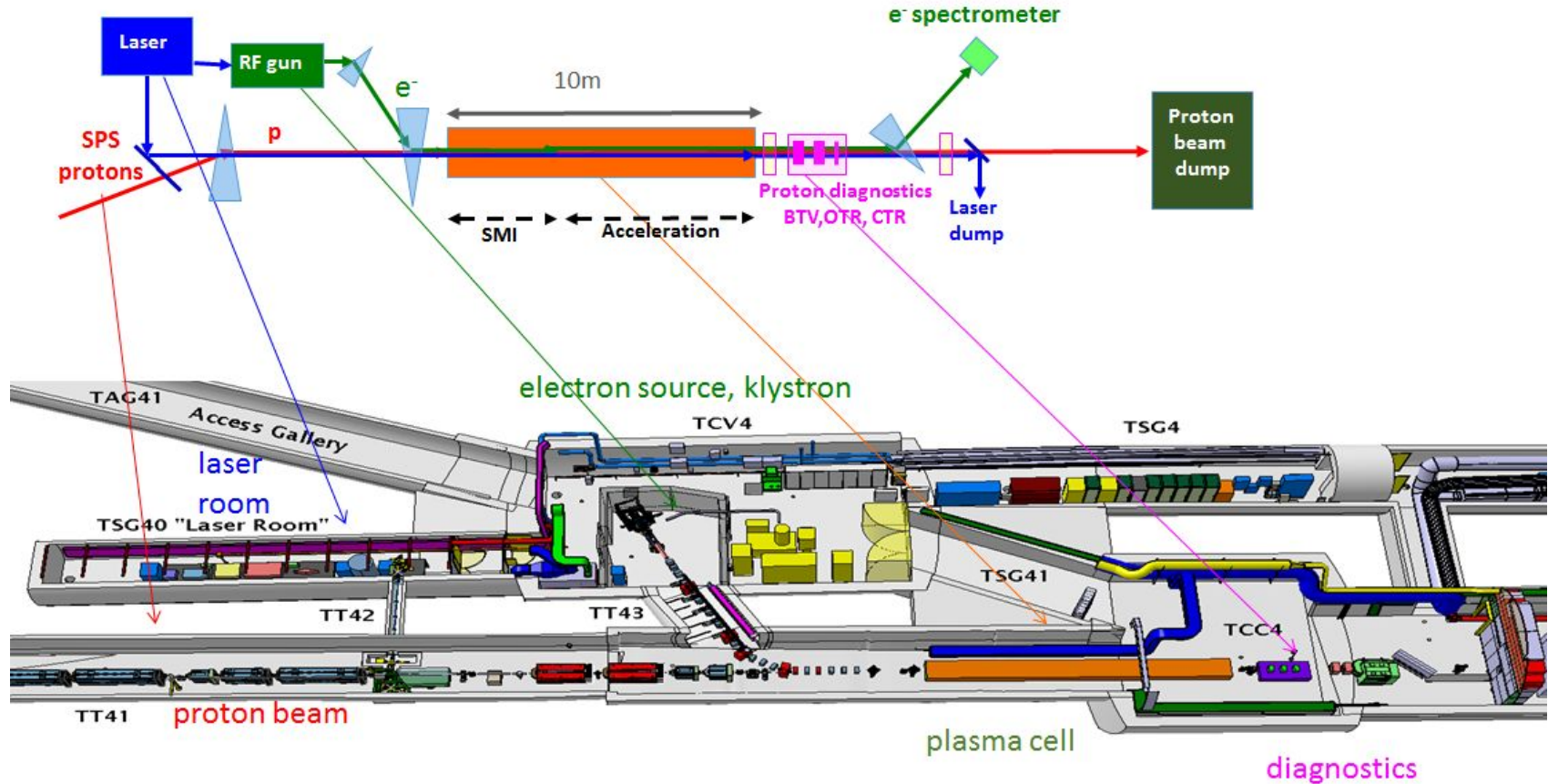
- ❑ Warum muss der Protonenstrahl **selbstmodulieren**?
- ❑ Was ist die Physik hinter dem **Modulationsprozess**?

Experimenteller Aufbau des AWAKE Experiments am CERN

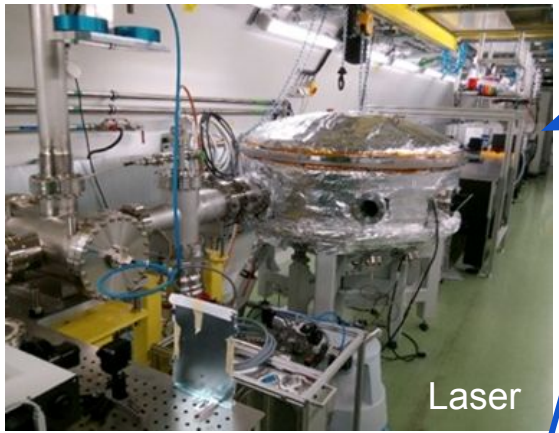


Von einer Idee zur Realität!

Schematische Übersicht



Komponenten von dem AWAKE Experiment



Laser

Plasma:

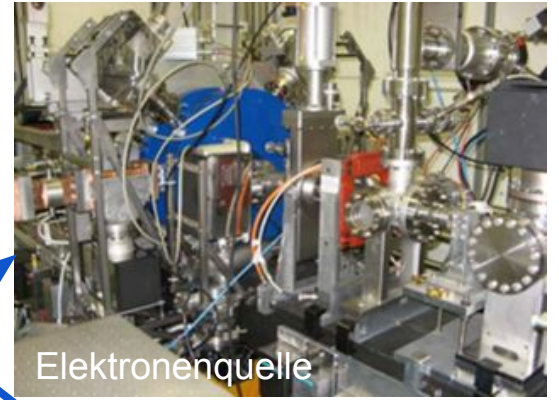
- Laser
- Rubidium Gas

Teilchenstrahl:

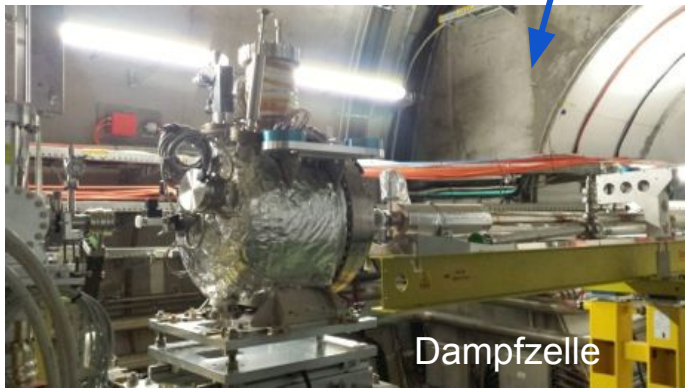
- Protonen (400 GeV/c)
- Elektronen (10-20 MeV)

Teilchen zu Beschleunigen:

- Elektronen (10-20 MeV)



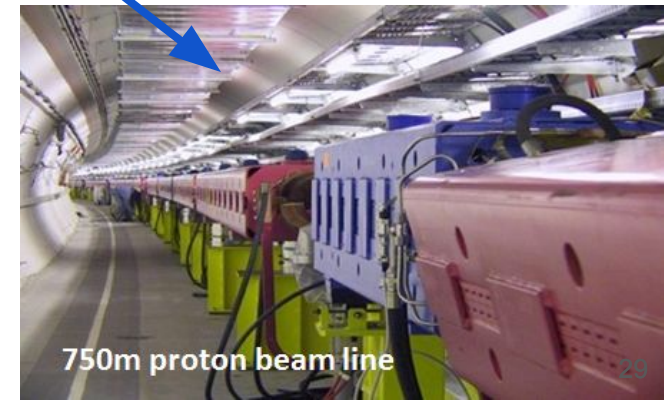
Elektronenquelle



Dampfzelle

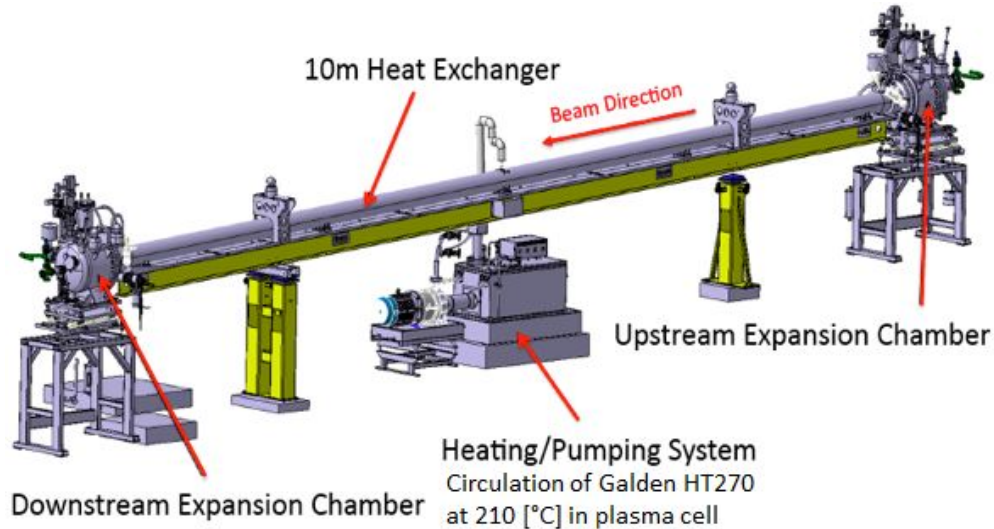
Diagnostik fuer:

- Protonen
- Laser
- Elektronen

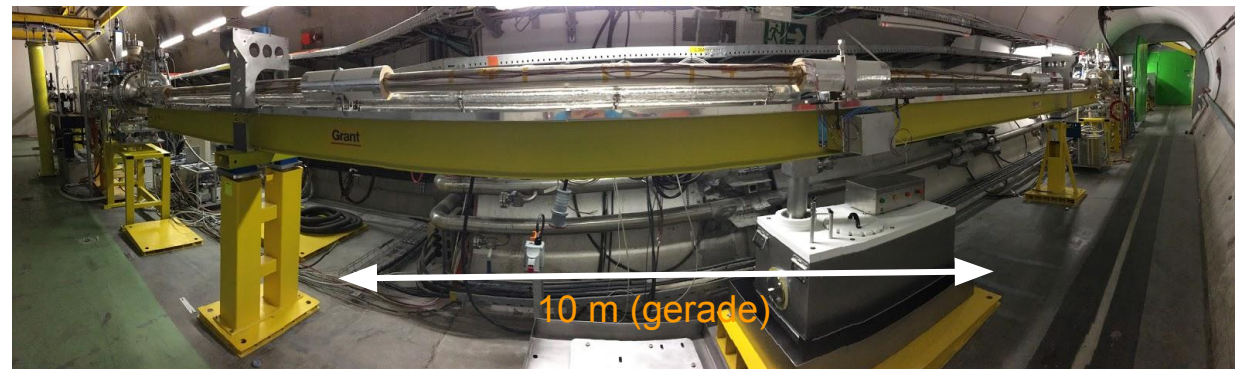


750m proton beam line

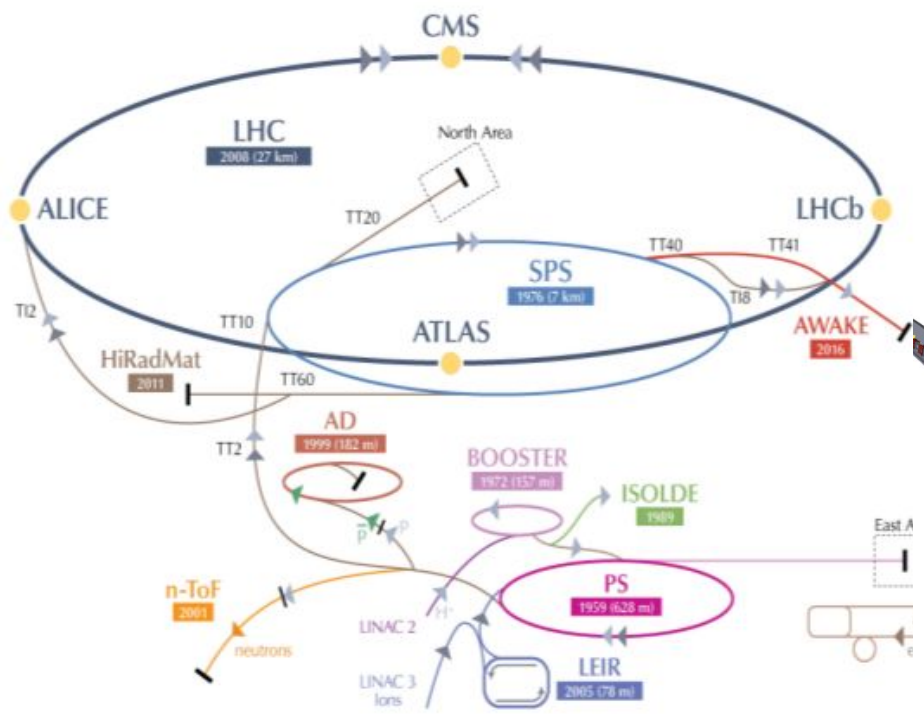
Das AWAKE Plasma



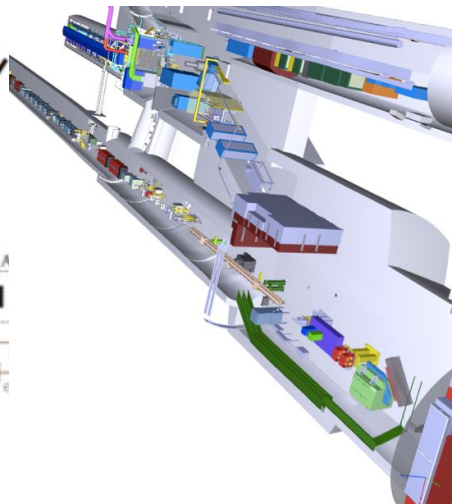
- ❑ **10 m lange Rubidium Dampfzelle.**
- ❑ Laserpuls ionisiert das äußerste Elektron von jedem Rubidium Atom.
- ❑ Gewünschte **Plasmadichten:**
 $\sim 1-10 \times 10^{14}$
Elektronen/cm³.



Das AWAKE Experiment am CERN



- ❑ Protonstrahl **Energie** ~400 GeV
- ❑ $3 \cdot 10^{11}$ Protonen/Strahl
- ❑ **Strahllänge:** $\sigma_z = 12$ cm

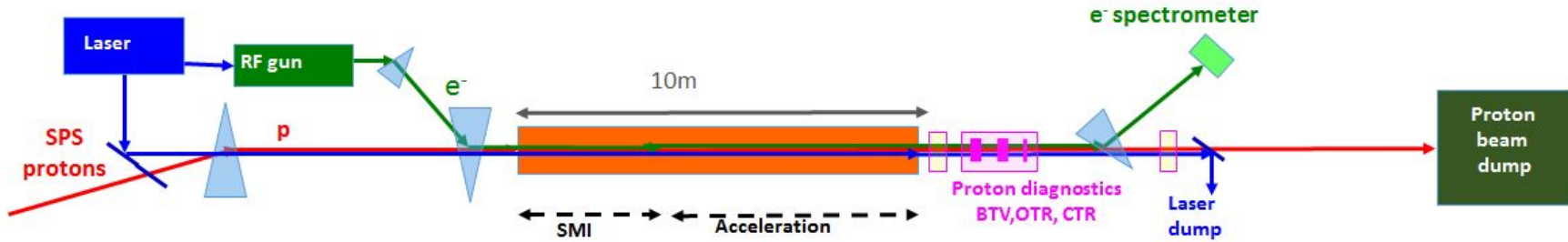


Strahlradius am Plasmaeingang:

- ❑ $\sigma_r = 0.2$ mm

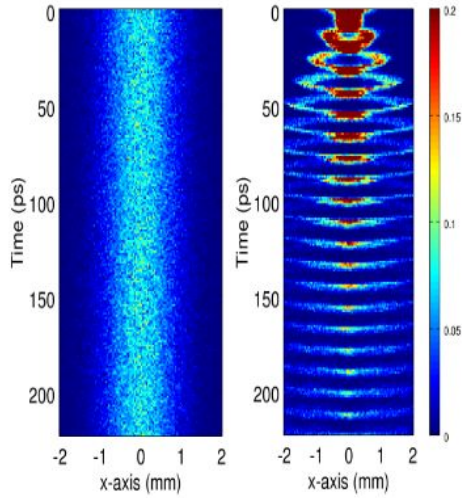
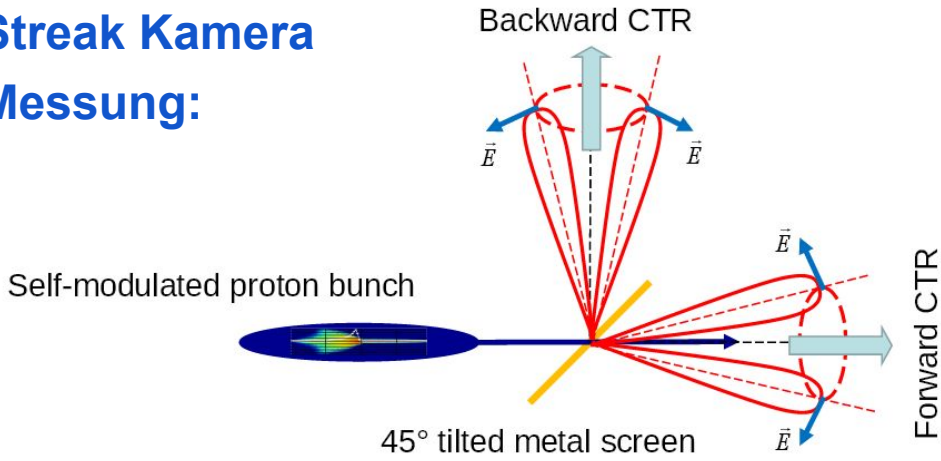
Fragen, die wir während des Experimentes beantworten müssen:

- Wie hoch ist die Plasmadichte?
- Hat die Instabilität den Protonenstrahl moduliert?
- Wie hoch ist die Energie der beschleunigten Elektronen?



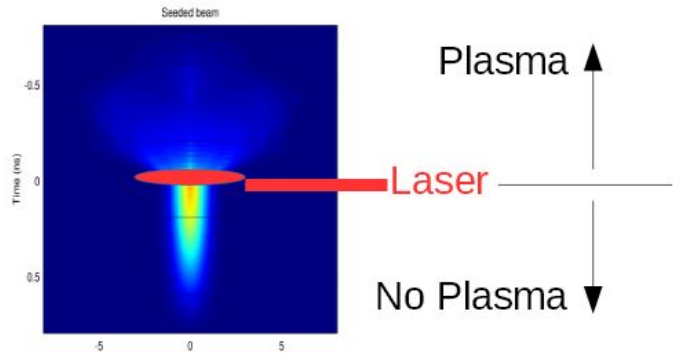
Hat die Instabilität den Protonenstrahl moduliert?

Streak Kamera Messung:

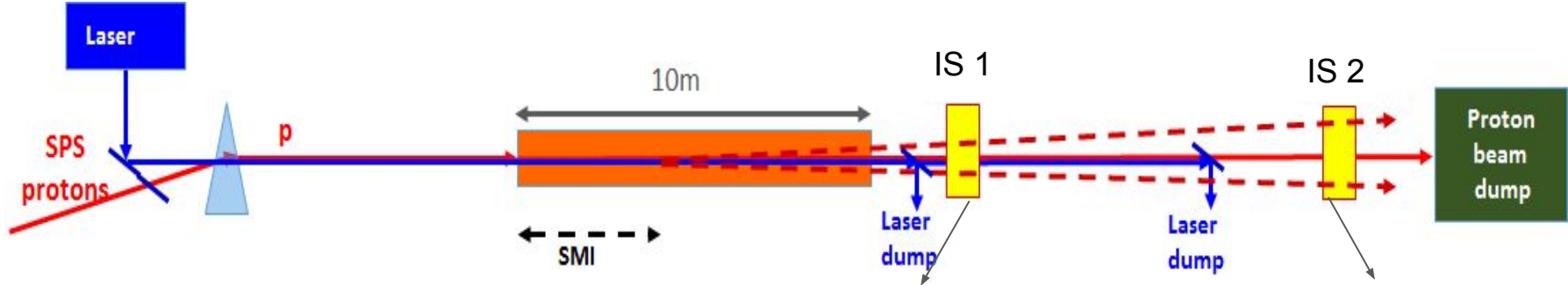


Metallfolie emittiert EM Strahlung mit einer max. Freq. korrespondierend zur Plasmafrequenz.

- Teil davon ist im optischen Bereich



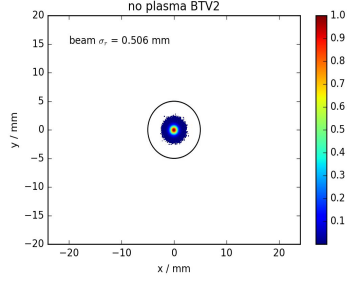
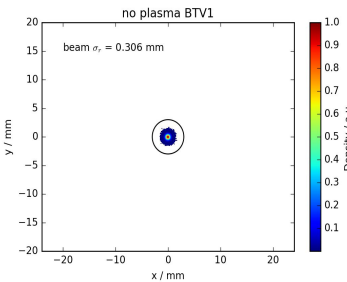
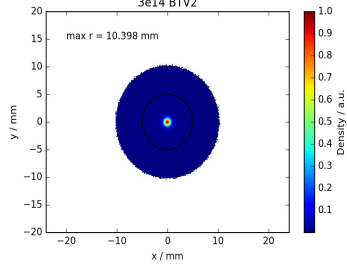
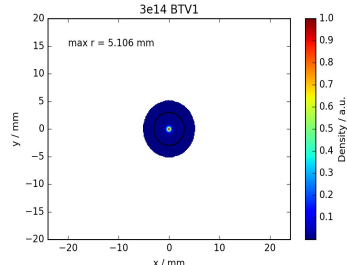
Hat die Instabilität den Protonenstrahl moduliert?



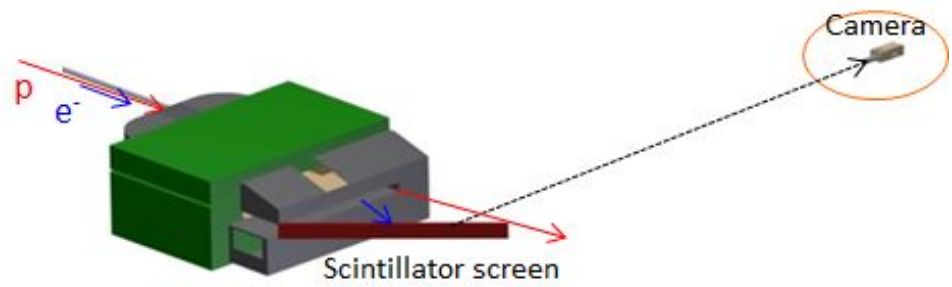
Zwei-Schirm Messkonfiguration

Ziel: Messung der Protonen die von den transversen Feldern defokussiert wurden.

→ um zu beweisen, dass starke elektrische Felder im Plasma erzeugt wurden.

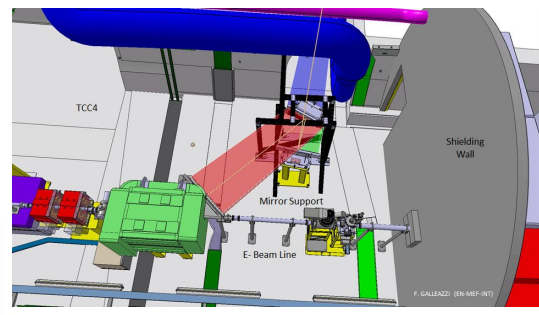
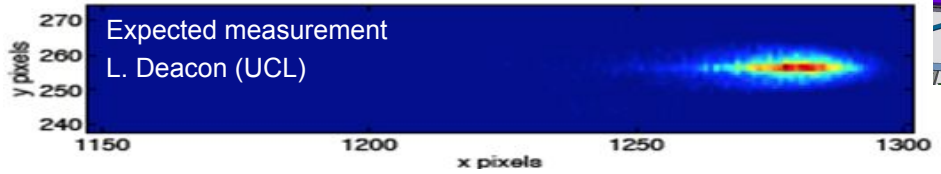
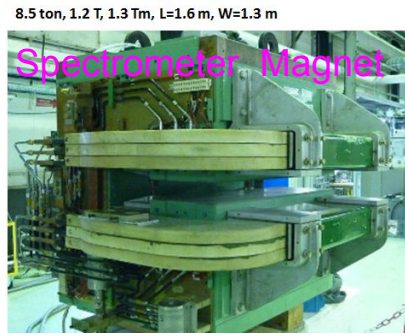
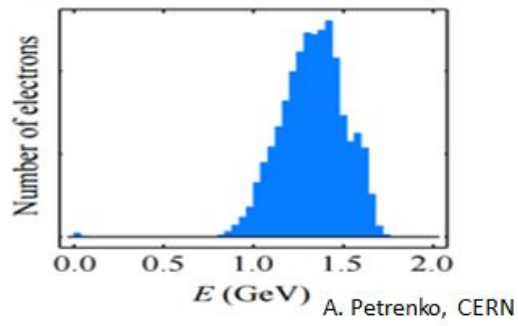


Was ist die Energie der beschleunigten Elektronen?



- Wir injizieren Elektronen mit einer Energie von 10-20 MeV.
- Beschleunigten Elektronen werden durch ein Spektrometer (Dipolmagnet) geschickt und deponieren Energie in einem szintillierenden Schirm, der von einer Kamera abgebildet wird.

Typical final energy distribution of the accelerated electron beam after 10 m plasma:



Wichtige Punkte:



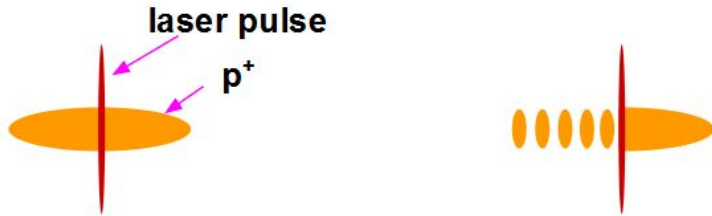
- ❑ Wie erzeugen wir unser Plasma **experimentell**?
- ❑ Wie beweisen wir experimentell, dass der **Strahl selbstmoduliert** und **Elektronen beschleunigt** werden?

AWAKE Ergebnisse

AWAKE Experiment Ziele (Run 1)



1. **Selbstmodulation** des 400 GeV/c Protonenstrahls in Plasma (2017).

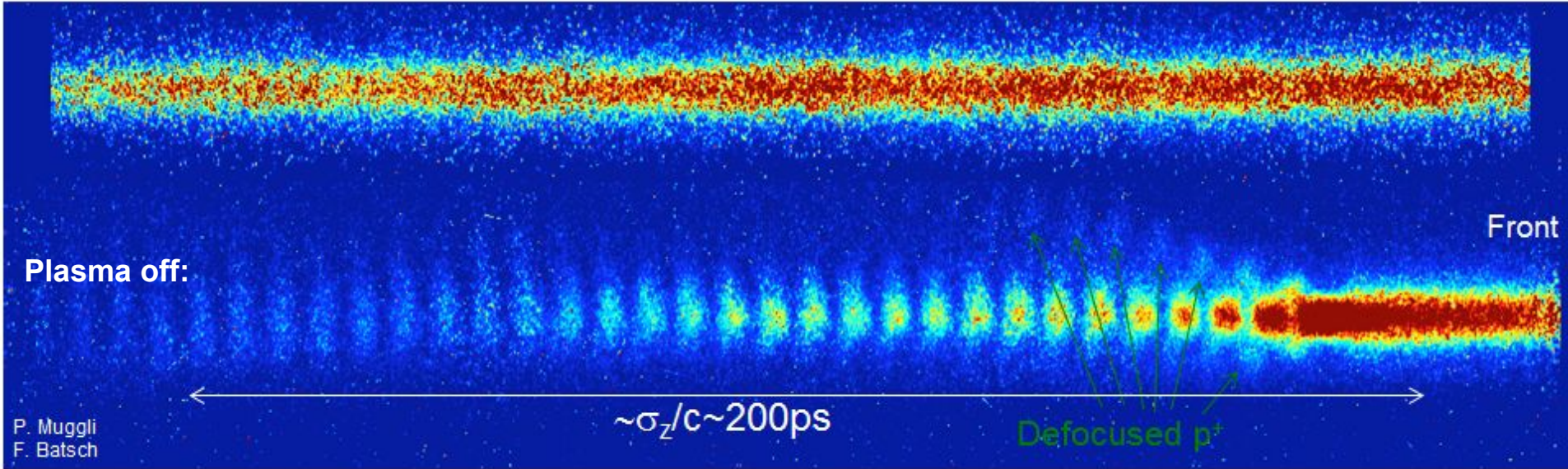


1. **Beschleunigung** von extern eingebrachten Elektronen im Kiefeld (2018).

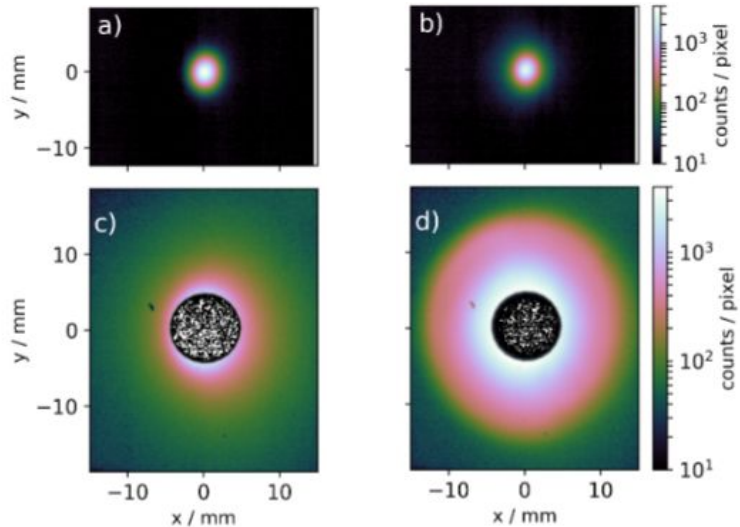
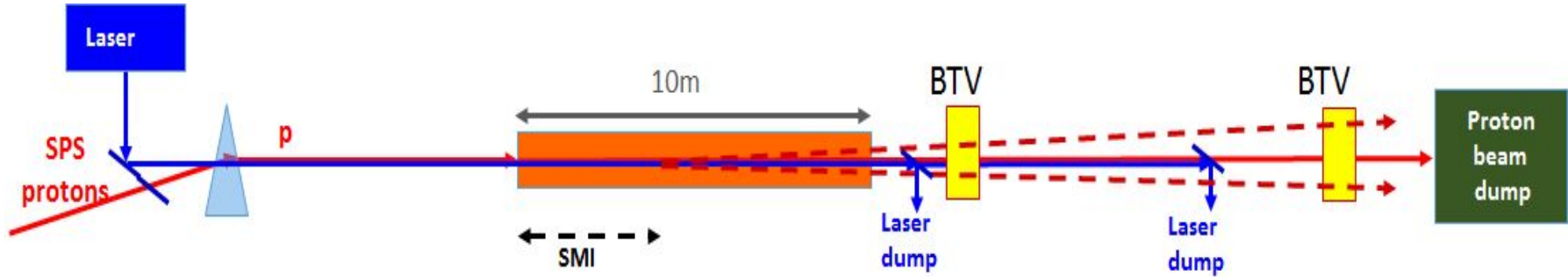


Streak Kamera Ergebnisse

Plasma off:



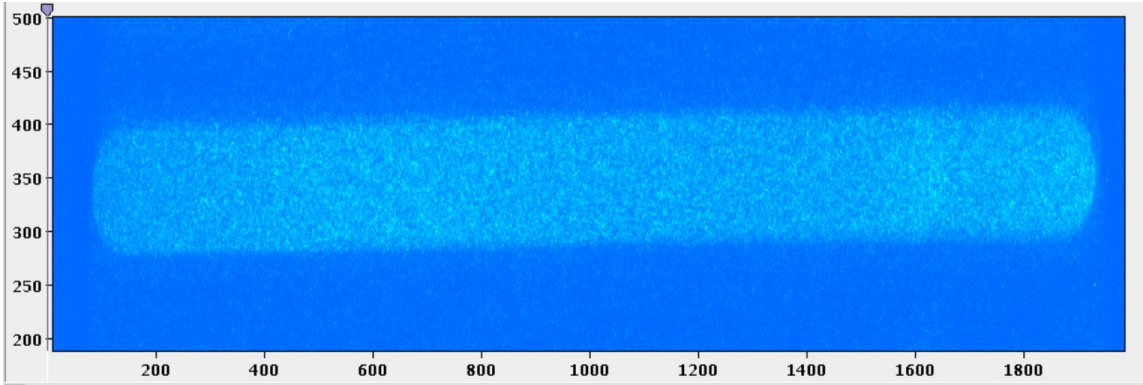
Zwei Schirm Messkonfiguration



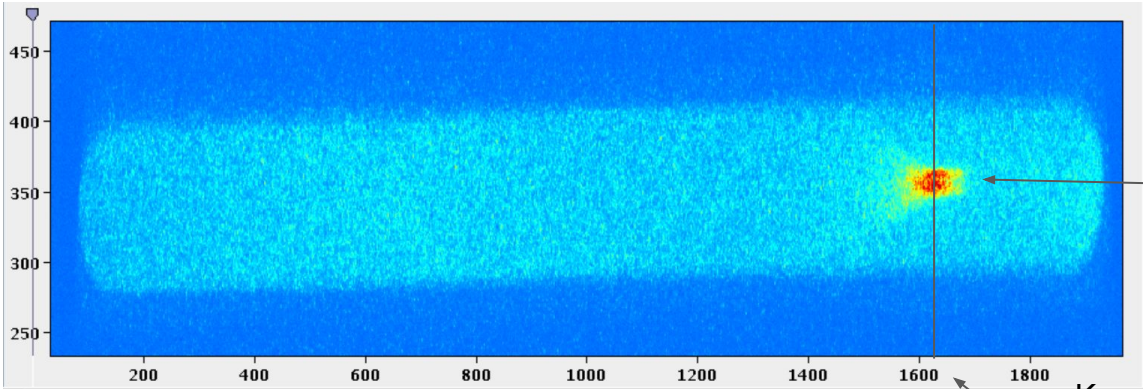
Im CERN Control Centre (CCC), kurz nach der ersten Beobachtung der Protonenstrahl Selbstmodulierung



Beschleunigung von Elektronen



Keine Elektronen beschleunigt



Beschleunigte Elektronen

Konvertieren Pixel+Dipol
Einstellung in Energie.
~ GeV Beschleunigung

Erste Elektronen Beschleunigt!



Mai 2018!

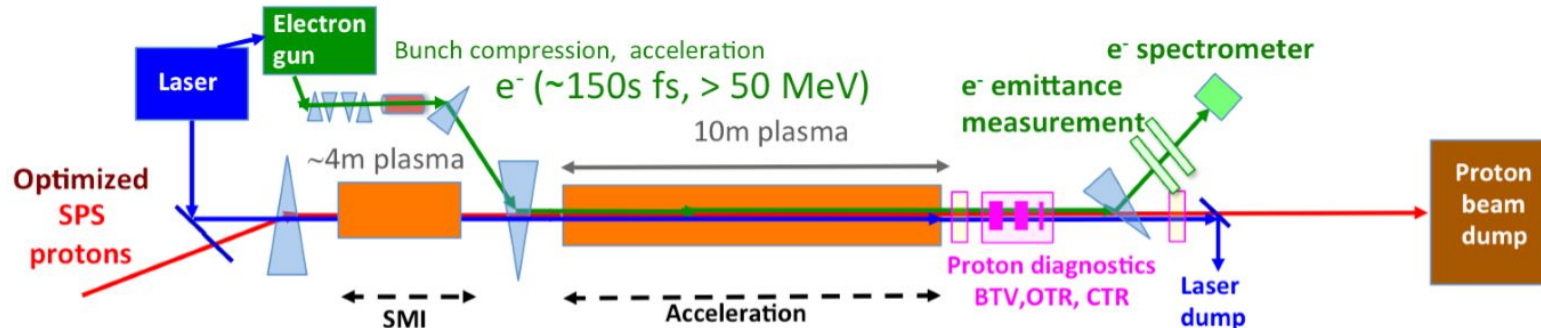
Die Zukunft von AWAKE

AWAKE ist ein **F&E Experiment** um eine Beschleunigungstechnologie (für geladene Teilchen) basierend auf Plasmakielfeldern (erzeugt von einem Protonenstrahl) zu entwickeln.

Nächster Schritt:

AWAKE run 2: (nach LS2, ie ab 2021) Vorbereitungen für Verwendungen in der Hochenergiephysik:

- Zeigen dass das Konzept **skalierbar** ist.
- Zeigen das wir die **Qualität** eines Elektronenstrahls erhalten können.
- Erzeugung von einem Elektronenstrahl mit **50-100 GeV/c**.

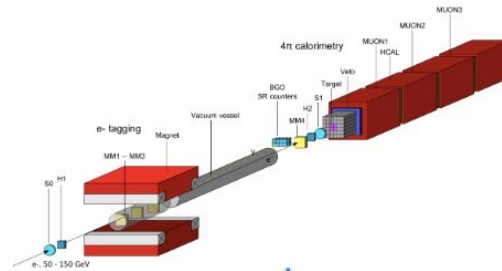


Die Zukunft von AWAKE

Anwendungen:

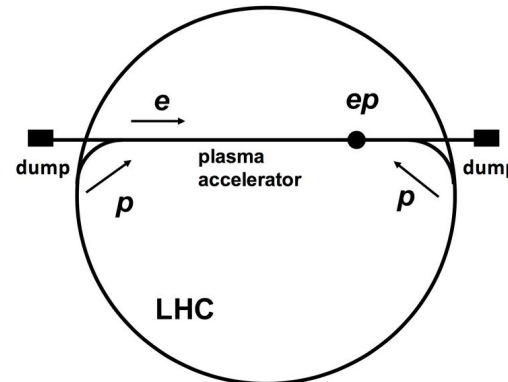
→ Fixed Target Experiment

E.g. für die suche nach der dunklen Materie



→ Elektron - Proton/Ion Collider

E.g. für Untersuchungen der Feinstruktur von Materie



- ❑ **AWAKE** ist ein F&E Beschleunigungsexperiment, derzeit in Betrieb hier am CERN.
 - ❑ **Erstes** Plasma Kiefeld Experiment, das einen Protonenstrahl verwendet.
 - ❑ Dieses Experiment soll die Tür für einen **Plasma basierenden TeV Lepton Beschleuniger** öffnen.

- ❑ **Ziel:** Design von einem hochqualitativen & Hochenergie Elektronenbeschleuniger basierend auf Erkenntnisse, die mit den Experimenten gewonnen wurden.

- ❑ AWAKE zeigte vor kurzem:
 - ❑ Ein Protonenstrahl in Plasma selbstmoduliert und erzeugt Plasma Kiefelder mit mehreren 100 MV/m.
 - ❑ Diese Felder können zur Elektronenbeschleunigung genutzt werden.