

Das MESA Projekt

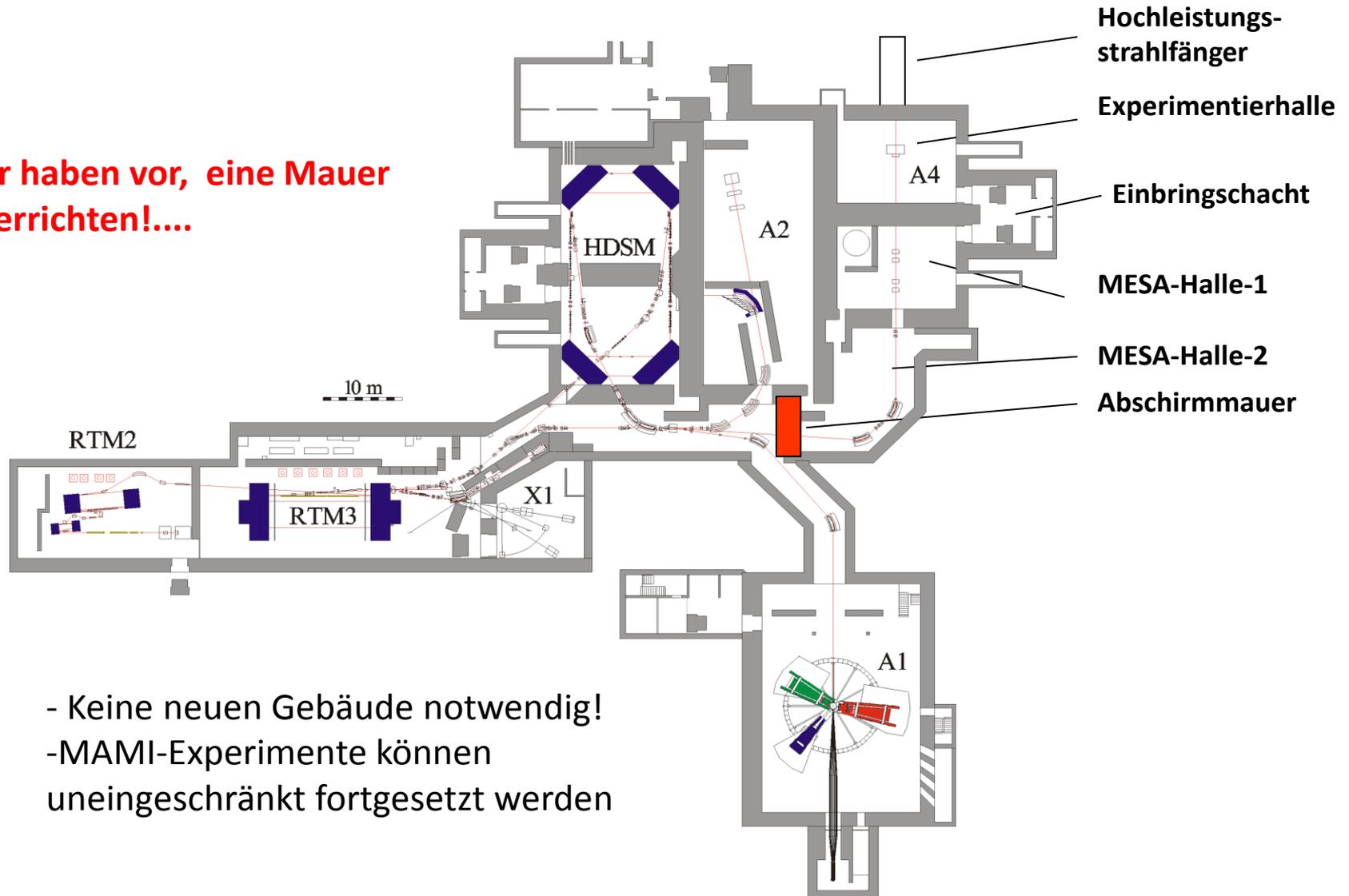
Mainz Energy recovering Superconducting Accelerator:

Ein supraleitender Elektronenbeschleuniger
mit Energierückgewinnung
für die Teilchen- und Kernphysik

Kurt Aulenbacher
für das MESA-Projektteam

- Projektüberblick : Beschleuniger und Experimente
- F&E Bereich: SRF-Technologie
- F&E Bereich: Strahldynamik/Lattice
- Ausblick

..wir haben vor, eine Mauer zu errichten!....



- Keine neuen Gebäude notwendig!
- MAMI-Experimente können uneingeschränkt fortgesetzt werden

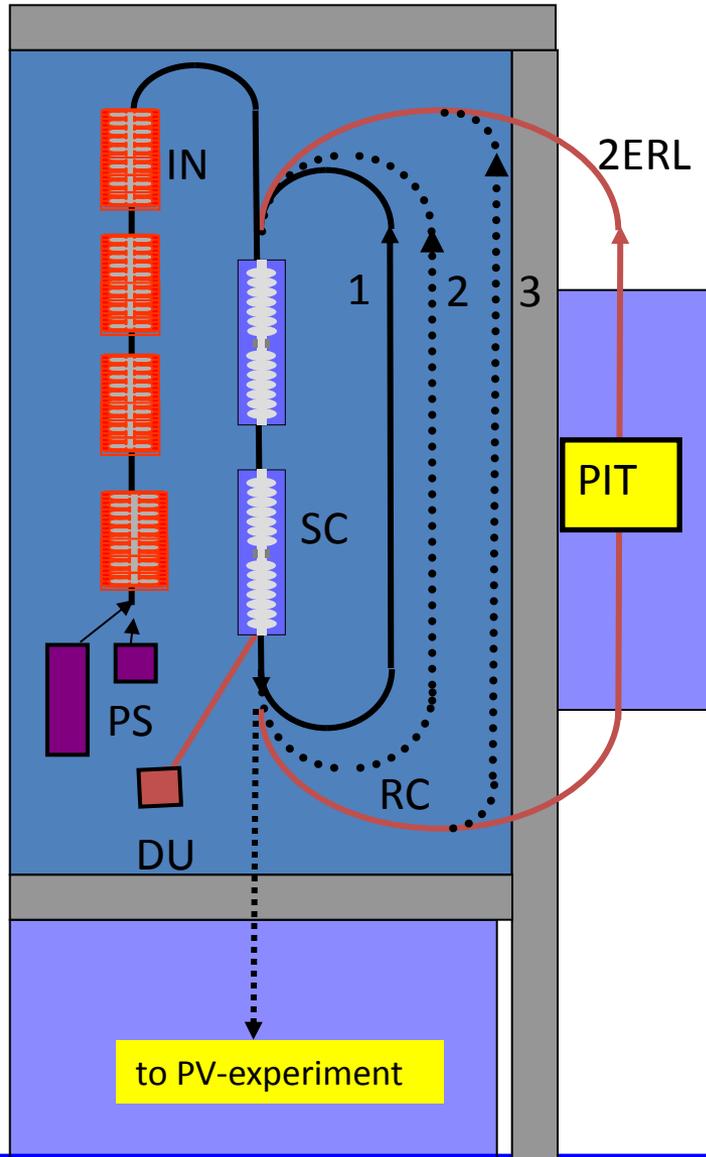
- Neuer und innovativer Beschleuniger soll neuartige Experimente erlauben
- Niedrige Energie (100-200MeV) → realisierbare Investitions- und Laufkosten!
- MAMI Beschleunigerteam ist unverzichtbare Basis für F&E
- Projekt macht Beschleunigerphysik attraktiv für Studenten & Nachwuchswiss.

Zusatzforderung: MESA sollte Vorteile im Verhältnis zu bestehenden kleinen c.w. Beschleunigern bieten können.

Aber wie?

- Nutze seither (> 2000) erzielte Fortschritte der Beschleunigerphysik

1. Energy Recovery Linac (ERL)
2. Mehr als verdoppelte Gradienten in c.w. operierenden SRF-Systemen



- PS: Photoquelle-1: 200keV polarisiert
(Strahlstrom 0.15mA "External Beam mode" (EB))
- Photoquelle-2: 200keV, unpolarisiert
(Strahlstrom 10mA "Energy Recov. Linac Mode"(ERL))
- IN: 5 MeV – normaleitender Injektor
- SC: 4 Supraleitende Kavitäten
Energiegewinn: 50 MeV pro Durchlauf.
- RC 1-3 Rezirkulationen für EB-Betrieb
Orbit 1 gemeinsam ERL und EB,
Orbit 2 separat für ERL and EB
- PIT: Pseudo Internes Target (ERL-experiment)
- PV: Paritätsverletzungs-Experiment (EB-mode)
- DU: 5 MeV beam dump in ERL-mode

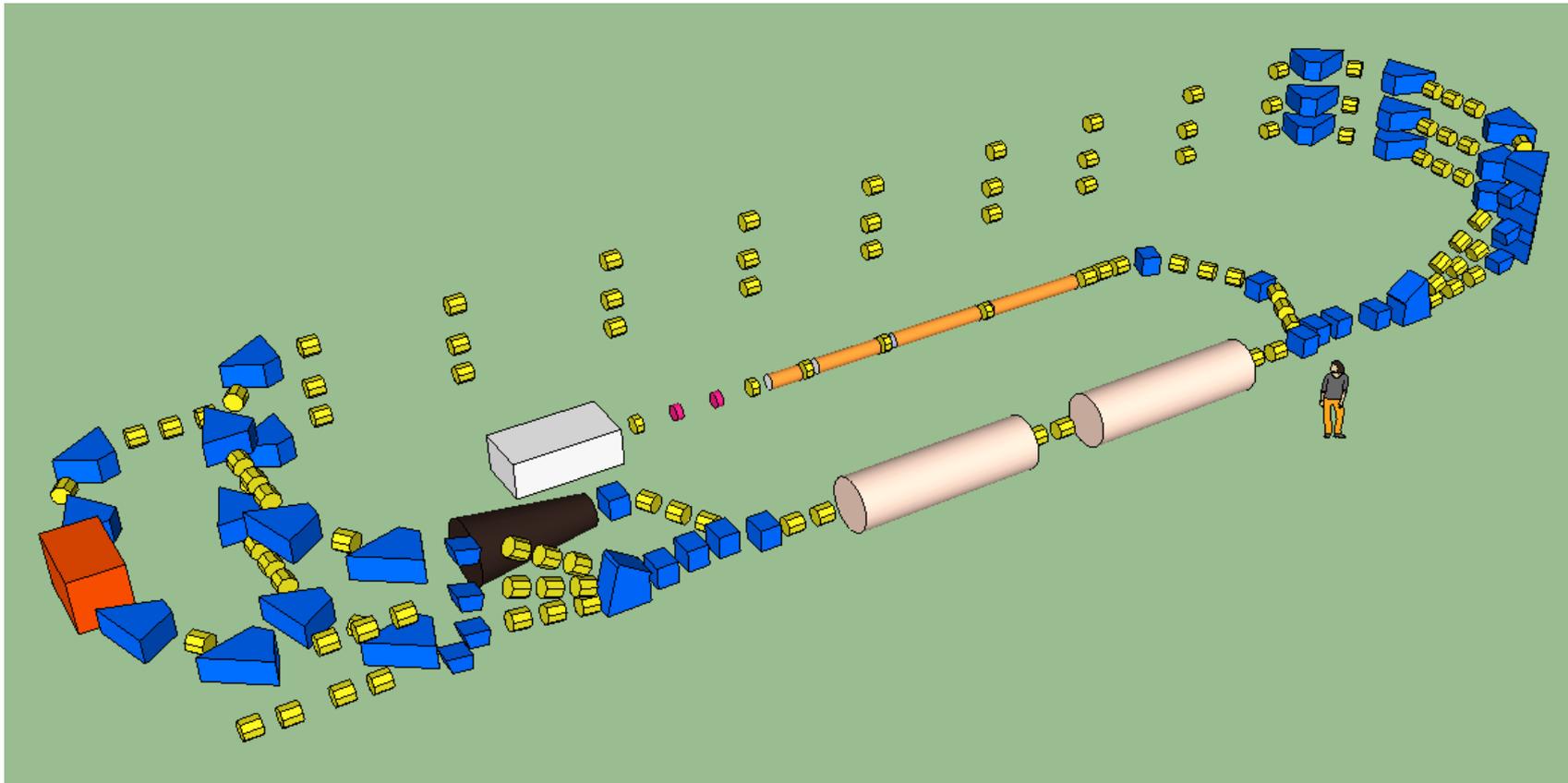
■ Existierende Abschirmwände : 2-3m Schwerbeton

Strahlparameter:

1.3 GHz c.w.

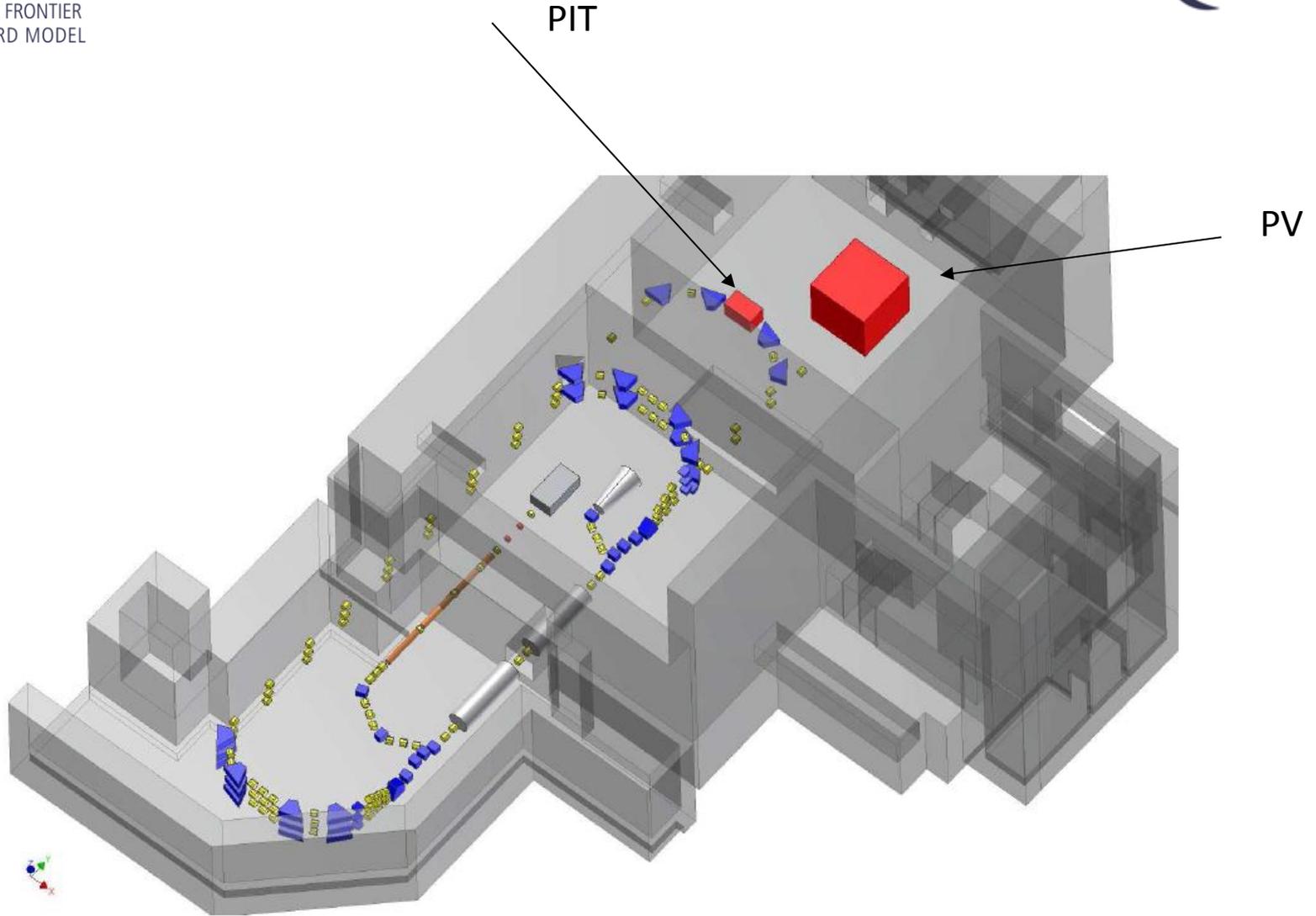
EB-mode: 150 μ A, 200 MeV spinpolarisiert
(Flüssig Wasserstofftarget $L \sim 10^{39}$)

ERL-mode: 10mA, 100 MeV unpolarized beam
(Pseudo-Internes Target, $L \sim 10^{35}$)



Ralf Eichhorn

Horizontale Begrenzung der Orbits kann durch vertikale Anordnung
“a la CEBAF” gemildert werden!



V. Bechthold/R. Heine

Angestrebte Strahlparameter:

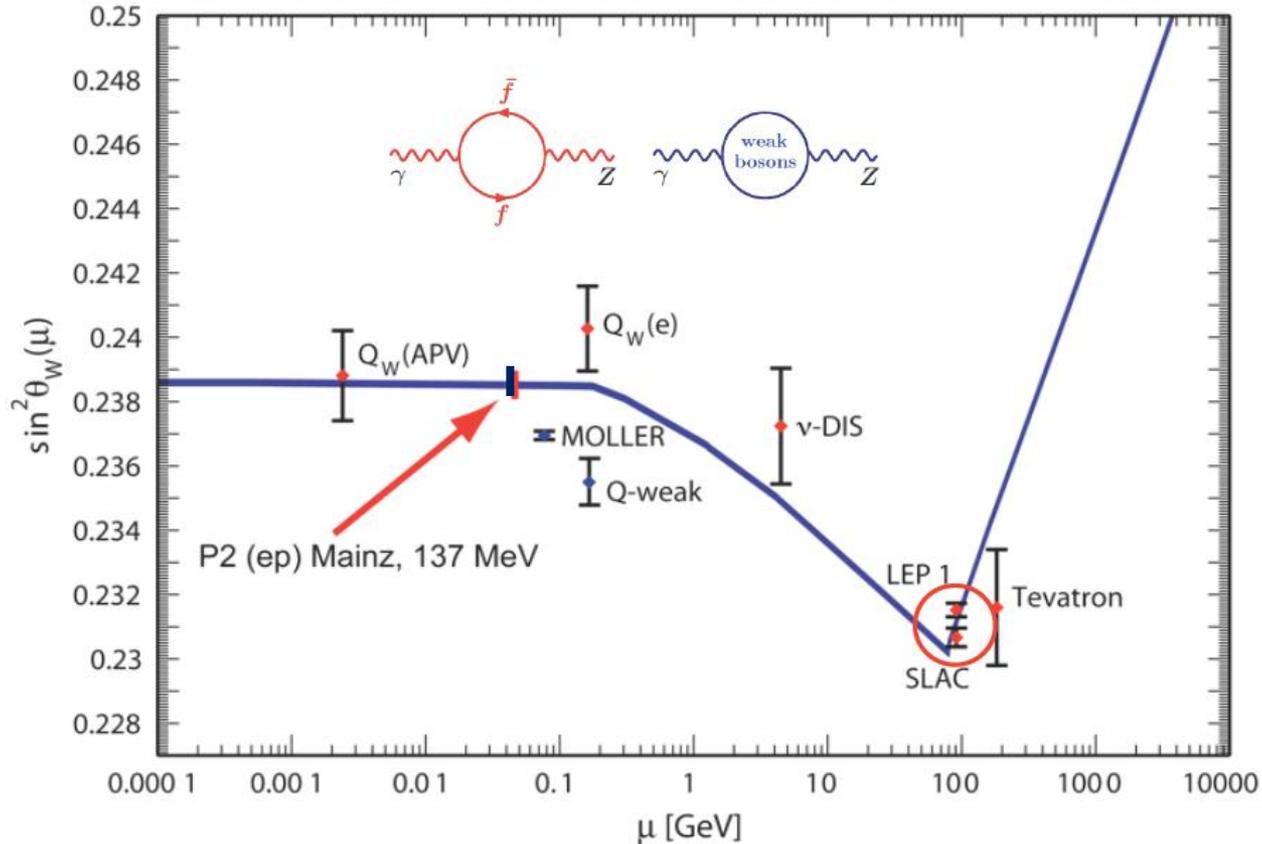
- 1.) **EB-mode** Externer spin-polarisierter c.w. Strahl mit 200 MeV
- 2.) **ERL-mode**: 10mA at 100 MeV (Pseudo Internes Target)

Forschung:

- Beschleunigerphysik: Erster supraleitender multiturn ERL
- → Teststand für Elektronenbeschleuniger von Kollidern (LHeC, eRHIC)
- Hadronenphysik, Kernphysik
- → Astrophysik, Neutronskins, Formfaktor, etc....

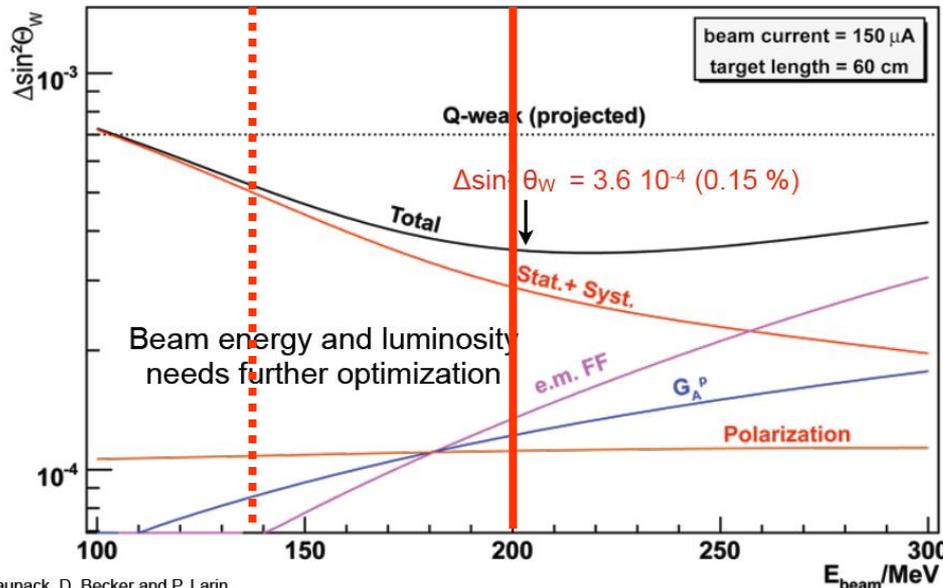
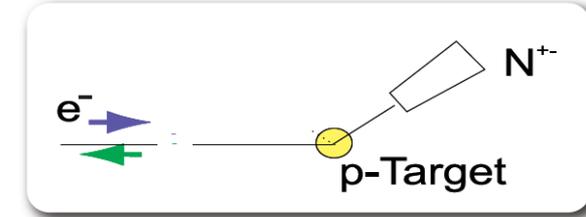
Welche über Beschleuniger-, Kern- und Hadronenphysik hinausweisenden Experimente werden außerdem möglich ?

Präzisionsmessung des elektroschwachen Mischungswinkels bei kleinem Q^2



Rot: existierende Resultate, Blau: Geplante bzw. In Auswertung befindliche Experimente

- 150 μA Strahlstrom , 60cm lq. H₂,Strahlpol: 85%.
- 10000 h Datennahme (~13-15000 h Laufzeit)
- Hohe Genauigkeit der Pol-Messung: ($\Delta P/P=0.5\%$!!)
- Extreme Anforderung an Kontrolle der HC-Strahlschwankungen!



S. Baunack, D. Becker and P. Larin

E_{Beam}	200 MeV
Q^2/θ_e	$0.0048 \text{ GeV}^2/20^\circ$
Time/current/target	10000h/150 μA /60cm
A_{phys}	-20.25 ppb
ΔA_{tot}	0.34 ppb (1.7 %)
ΔA_{stat}	0.25 ppb
ΔA_{sys}	0.19 ppb (0.9%)
Polarization	$(85 \pm 0.5) \%$
Rate	$0.44 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$
$\Delta \sin^2 \theta_W \text{ stat}$	$2.8 \cdot 10^{-4}$
$\Delta \sin^2 \theta_W \text{ tot}$	$3.6 \cdot 10^{-4} (0.15 \%)$

- ~4000h/Jahr Laufzeit
- Beschleuniger muss im Hinblick auf Zuverlässigkeit und Stabilität optimiert werden

→ **Paritätsverletzung ist Hauptnutzer von MESA!** ←

MESA im ERL-modus : Pseudo Interne Targets

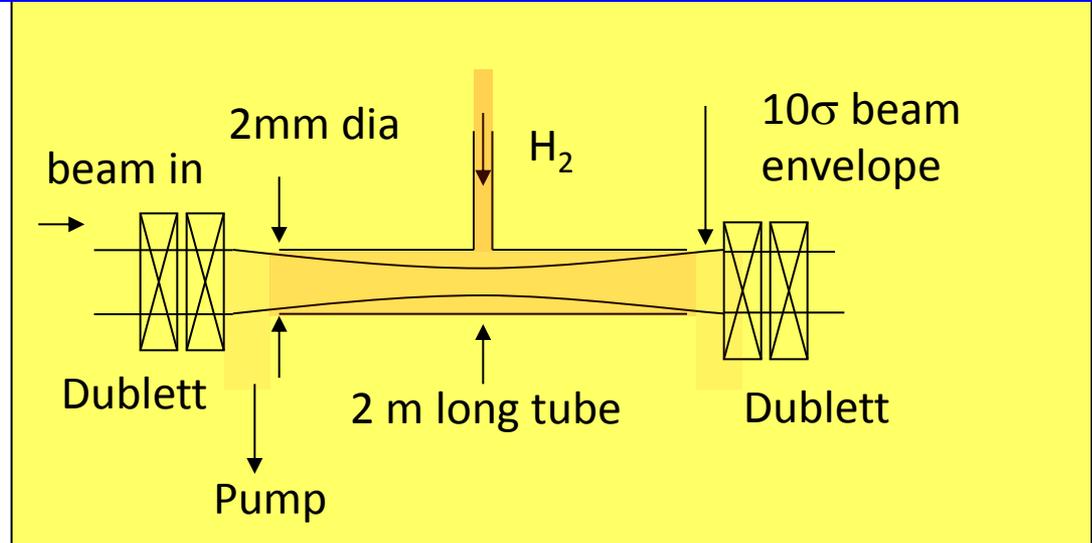
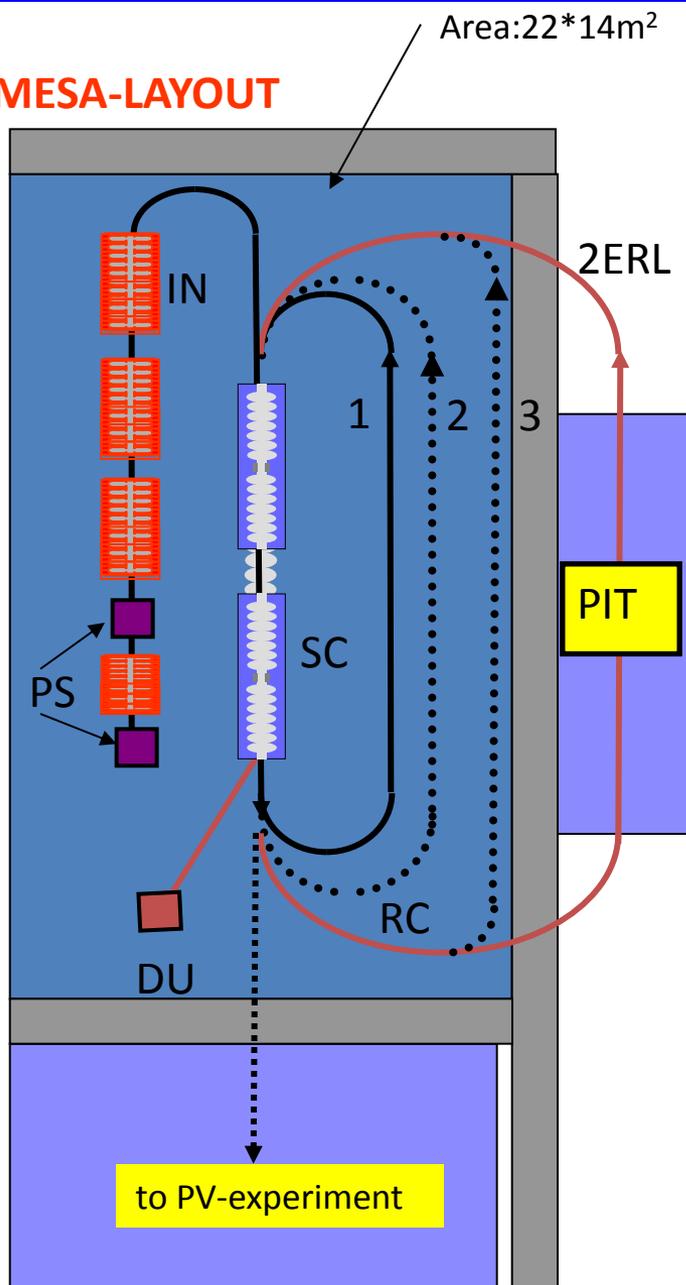
Ein internes Target ohne Fenster kann in einen Speicherring oder ERL integriert werden

Aber: Bei niedrigen Energien $<1\text{GeV}$ ist die Aufstreuung groß & $\sim 10^5$
Passagen pro Sekunde \rightarrow Kleine Lebensdauer der gespeicherten Ladung.

In einem ERL passieren die Teilchen das Target **nur einmal** (Pseudo Internal Target, **PIT**)

\rightarrow Stationärer Zustand mit optimalen Untergrundverhältnissen möglich

MESA-LAYOUT



- Target dichte $N = 2 \times 10^{18} \text{ atoms/cm}^2$ ($3.2 \mu\text{g/cm}^2$, $5 \times 10^{-8} X_0$)
- $\rightarrow I_0 = 10^{-2} \text{ A}$: $L = 1.2 \times 10^{35} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$
- \rightarrow (mittlerer) Energieverlust (Ionisation): $\sim 17\text{eV}$
- \rightarrow RMS Streuwinkel (Vielfachstreuung): $10 \mu\text{rad}$
- \rightarrow **Single pass** Strahlverschlechterung ist akzeptabel

Bei Bunchladung 7.7pC (10mA): $\epsilon_{\text{norm}} \approx 1 \mu\text{m}$
 Strahldurchmesser prop. der strahl optischen Funktion β :

$$r_{\text{beam}}^2(z) = \epsilon_{\text{Geo}} * \beta(z)$$

mit $\epsilon_{\text{Geo}} = \frac{\epsilon_{\text{Norm}}}{\sqrt{\gamma^2 - 1}} \Rightarrow \epsilon_{\text{Geo}}(100\text{MeV}) \sim 5\text{nm}$.

In der feldfreien Region um den Punkt $z^* = 0$

$$\beta(z) = \beta(z^*) + \frac{z^2}{\beta(z^*)} = \beta^* (1 + (z/\beta^*)^2) \text{ wähle: } \beta^* = 1\text{m}$$

\Rightarrow Maximaler Strahldurchmesser $\leq 0.2\text{mm}$ ($z = \pm 1\text{m}$)

- Wand und Vielfachstreuung streuung minimiert & (bei H2-Target) keine Neutronen
→ optimales S/U
- Wg. Hohem Strahlstrom trotzdem $L > 10^{35}$
→ auch kleine Produktionsquerschnitte sind zugänglich

Vorschlag von Heinemayer et al. (2007): arXiv:0705.4056v2

Benutze ein PIT am ERL um 'dark matter' zu suchen.

Björken (2009): Anomalien auch durch neue U1-Eichbosonen
zu erklären: "Dunkle Photonen"

- Wand und Vielfachstreuung streuung minimiert & (bei H₂-Target) keine Neutronen
→ optimales S/U
- Wg. Hohem Strahlstrom trotzdem $L > 10^{35}$
→ auch kleine Produktionsquerschnitte sind zugänglich

Vorschlag von Heinemayer et al. (2007): arXiv:0705.4056v2

Benutze ein PIT am ERL um 'dark matter' zu suchen.

Björken (2009): Anomalien auch durch neue U1-Eichbosonen
zu erklären: "Dunkle Photonen"

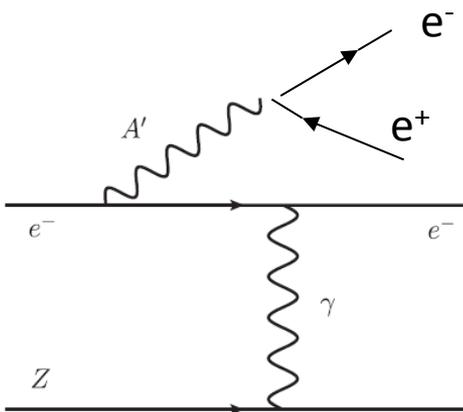
Chr. Morgenstern (1909):

**„ Korff erfindet die Tag/Nachtlampe,
die einmal angezündet,
selbst den hellsten Tag
in dunkle Nacht verwandelt....“**

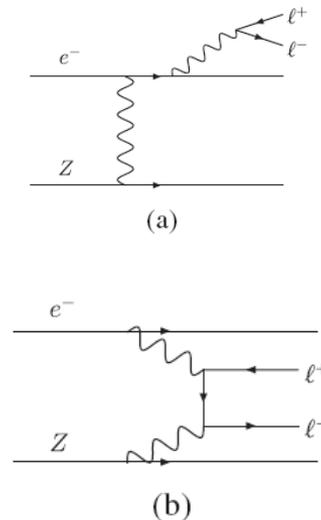
1.) 'Anomalien' astrophysikalischer Beobachtungen - and andere Abweichungen von SM-Erwartungen, z.B., $(g-2)_\mu$ **wollen erklärt werden:**

Ein Ansatz: Das 'dark photon' : U1 Eichboson A' (a.k.a. 'U-boson')
mit Masse $m_{A'} < 1\text{GeV}$; Kopplung ε an geladenen 'sichtbare' Teilchen via 'kinetic mixing')

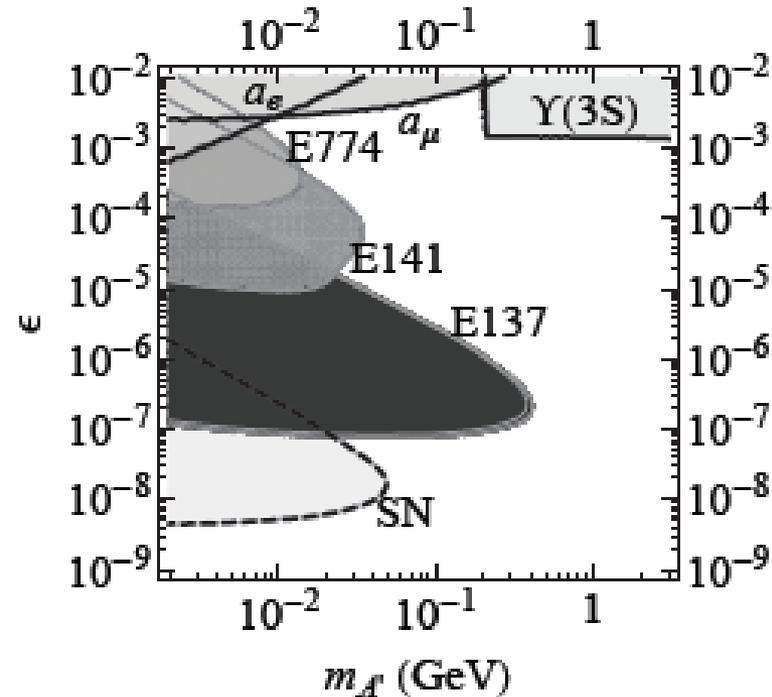
Signal (Beispiel):



QED Untergrund



A' Status: Ausschließungsflächen



$$\sigma(\varepsilon, m_{A'}) \approx 100 \text{ pb} (\varepsilon / 10^{-4})^2 (100 \text{ MeV} / m_{A'})^2$$

$$c\tau = 0.1 \text{ mm} (10^{-4} / \varepsilon)^2 (100 \text{ MeV} / m_{A'})$$

$$\sigma_{QED} \approx 10^5 \sigma(\varepsilon, m_{A'})$$

$$c\tau = 0$$

Strahl Energie ERL/EB [MeV]	105/155 (105/205)
Strahlbetriebsmodus	1300 MHz, c.w.
Elektronenquellen	1.) Polarisiert: NEA GaAsP/GaAs superlattice , 200keV 2.) Unpolarisiert KCsSb, 200keV
Bunch Ladung EB/ERL [pC]	0.15/0.77 (0.15/7.7) 7.7pC=10mA@1300MHz
Norm. Emittanz EB/ERL [μm]	0.2/<1 (0.2/<1)
Spin Polarisation (nur EB-mode)	> 0.85
Strahl Rezirkulationen	2 (3)
Strahlleistung am Exp. ERL/EB [kW]	100/22.5 (1050/30)
Installierte R.f.-Leistung [kW]	140 (180)

Warum zwei Ausbaustufen für MESA ?

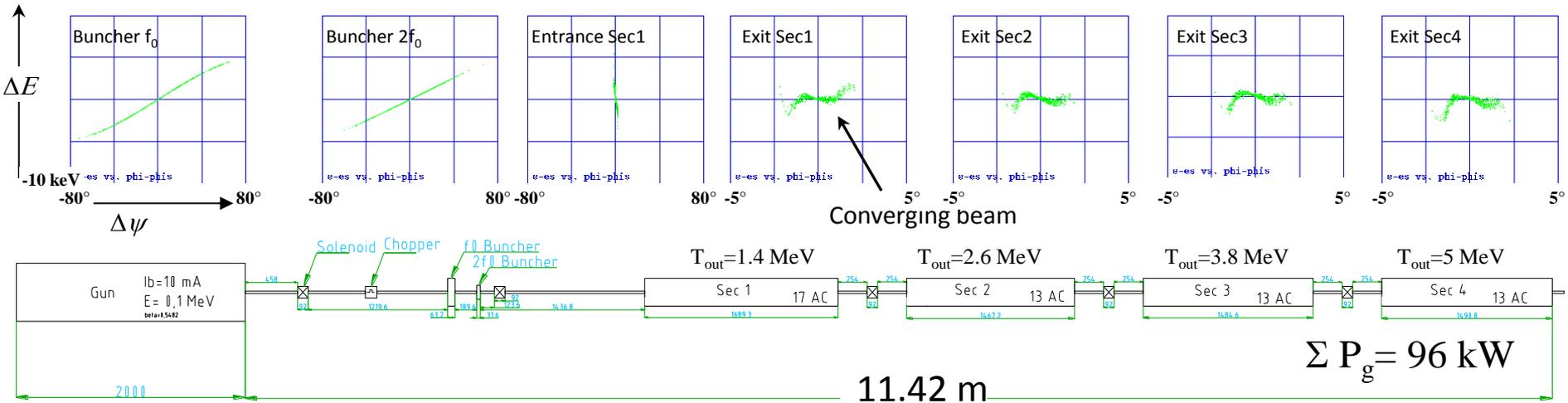
Physik:

- Injektor
- BBU Instabilität
- Rezirkulator (Lattice) Design

Technologie:

- Kryogenische Infrastruktur
- Hauptbeschleuniger: Kryomodule

Einschränkungen durch Budget und verfügbaren Raum. Außerdem: ambitionierter Zeitplan!

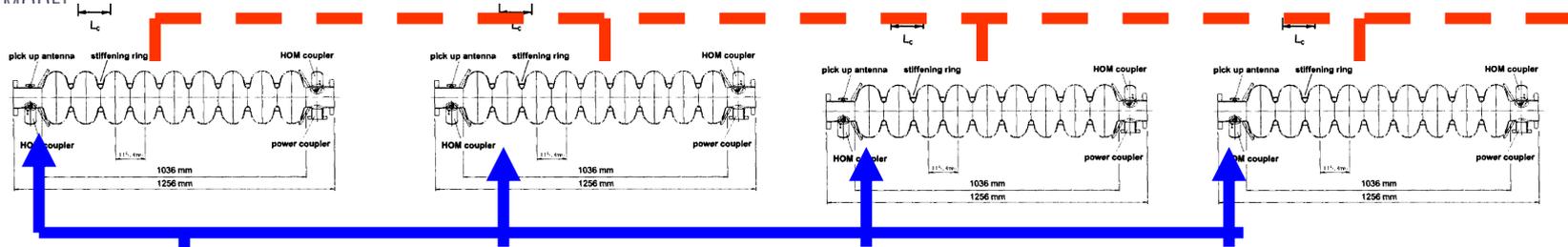


Design: R.Heine, basierend auf Th. Weis

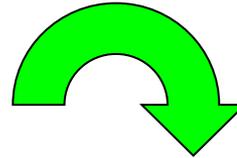
- Skalierte Version des MAMI-ILAC: 2.5GHz \rightarrow 1,3GHz.
- 96 KW RF Leistung (Inklusive 50kW beam loading)
- $T=5$ MeV, $\Delta\psi_{100\%} < \pm 2.3^\circ$ $\Delta E/E_{rms} = 0.01\%$
- Graded beta + SRF-Modul: („Hybrid“) ähnl. Parameter mit 7,5m und 75kW

Vorteile NC-ILAC:

Überschaubare Komplexität, leichte Wartbarkeit, keine kryogenische Last, Fehlertoleranz
ILAC ist bereits für Ausbaustufe-2 Parameter ausgelegt.



200l /h, fl.
Helium



g-He, 300K, 1bar
200m³/h



Echte c.w.-operation mit SRF: CEBAF (1.5GHz), **ELBE(1.3GHZ)**, S-DALINAC (3GHz)

Nicht : E-XFEL, FLASH, TESLA/ILC. (>30MV/m möglich)

c.w. operation erzwingt reduzierte Gradienten (<20MV/m) wg. kont. Wärmeentwicklung

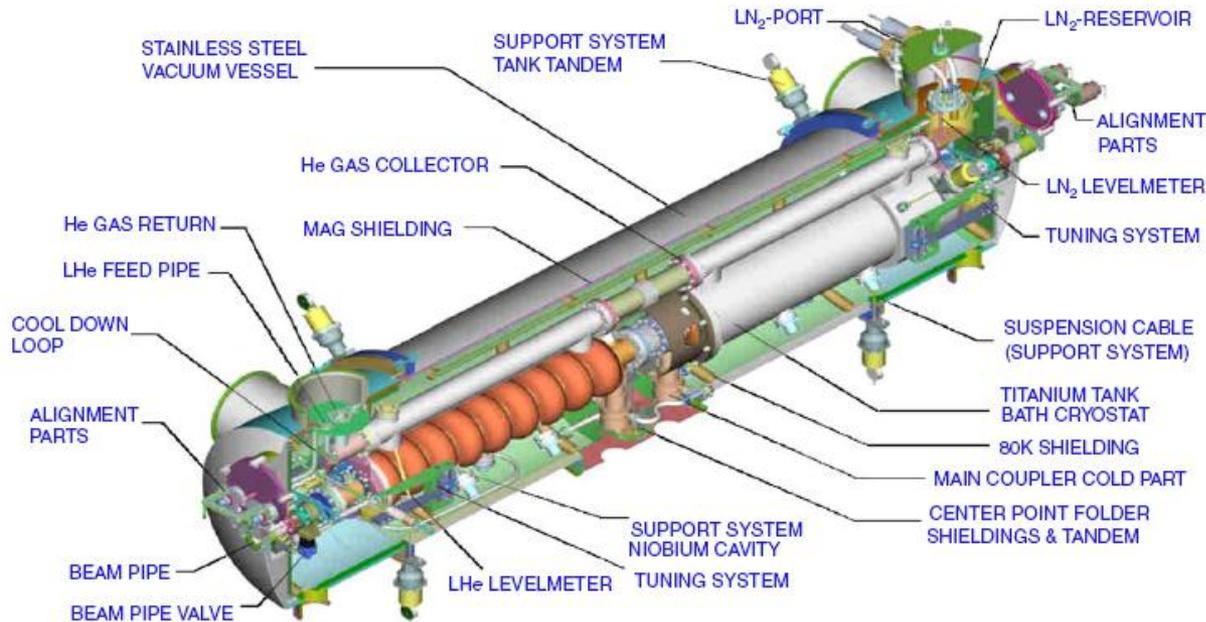


Fig. 1. Three-dimensional drawing of the ELBE cryomodule.

J. Teichert et al. NIMA 557 (2006) 239

“Rossendorf” –Module werden von Industrie angeboten.

Kosten & Lieferzeit sind einigermaßen vorhersagbar

Anforderung: Limitierte Kryoleistung erfordert $Q_0=10^{10}$ bei 14MeV/m

9 zellige 'TESLA' (E-XFEL) π -mode Struktur:

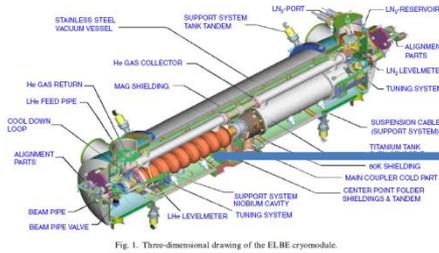
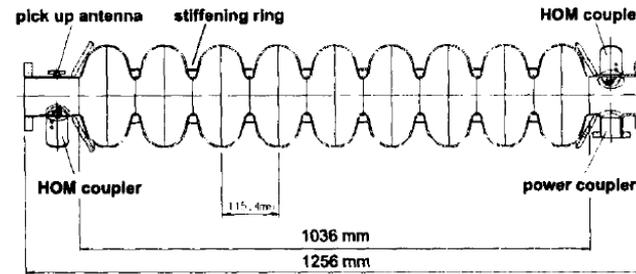
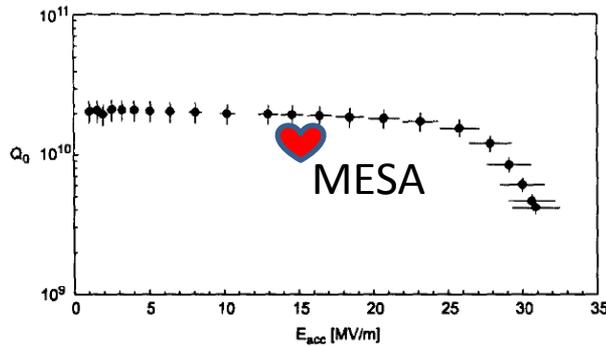
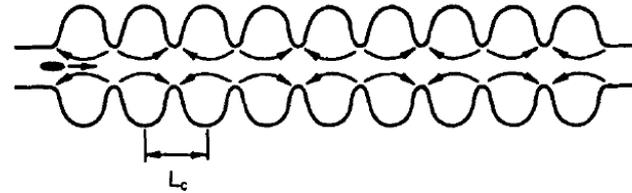


Fig. 1. Three-dimensional drawing of the ELBE cryomodule.



Gekoppelte Resonatoren besitzen Higher order modes (HOMs)
 HOM's z.B. als TM₁₁-Deflector Moden. → BBU- Instabilität, wenn Strahlstrom > I_s
 In REZIRKULIERENDEN Linacs: Feedback-Schleife! → Vereinfachte Formel

$$I_s = - \frac{2c^2}{e \left(\frac{R}{Q} \right)_{HOM} Q_{HOM} \omega_{HOM}} \frac{1}{T_{12} \sin(\omega_{HOM} t_r)}$$

T_{12} = Abbildung von Winkel nach Ort

t_r = Rezirkulationszeit

Allgemeine Ableitung für ERL's
 G.H. Hoffstaetter, I. Bazarov: PRSTAB 7 054401 (2004)

$$I_T = - \frac{2c^2}{e \left(\frac{R}{Q} \right)_{HOM} Q_{HOM} \omega_{HOM}} \frac{1}{T_{12} \sin(\omega_{HOM} t_r)}$$

T_{12} = Horizontale Abbildung von Winkel nach Ort

T_{34} = Vertikal, T_{56} = Longitudinal (Energie nach Zeit)

t_r = Rezirkulationszeit

Hochstrom- Rezirkulatoren benötigen:

- Gute HOM Dämpfung (TESLA-Kavitäten nur bedingt geeignet!)
- Flexible Rezirkulationsoptik zur Optimierung von T_{12} , T_{34} aber evtl. auch T_{56}

Schlußfolgerungen:

Der erste Punkt spricht für die Fertigung eines „Nicht-Tesla“-Kryomoduls

→ Aber: Kosten, Zeitplan?

Der zweite Punkt spricht eher gegen einen polytronartiges lattice (Segmentmagnete)

→ Aber: Polytronrezirkulator ist kompakter, Stabilitätsvorteile

Referenz-Plan: MESA : TESLA/Rosendorf Module („Ausbaustufe-1“: limitierter Strom)

Alternativ-Plan: Nachbau und/oder Modifikation einer HOM-gedämpften Kavität & Kryomodul (z.B. DICC 1300 MHz, BNL 700MHz) zusammen mit Partnern aus

Großforschung. Option nur noch 2013 „offen“ → Überspringen von Stufe-1!

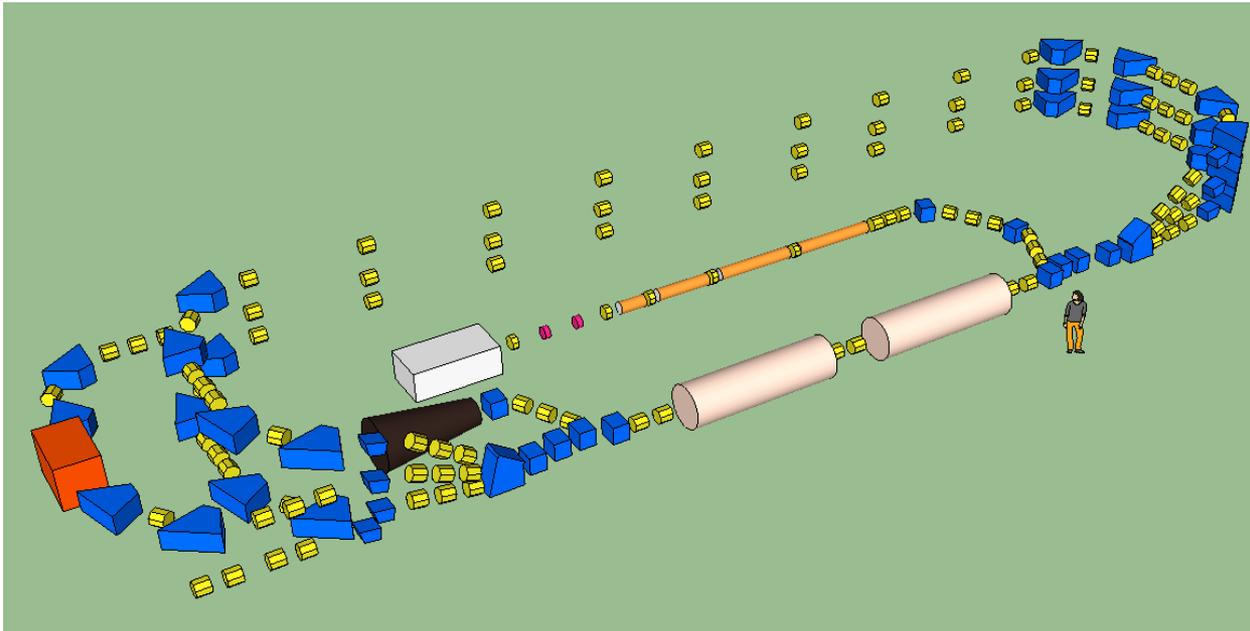


Bild:
„Vertikal gestapelte“
Rezirkulatoren
a la CEBAF

- 1.) “CEBAF-artiges” lattice: Identische 180 Grad Ablenker möglich, ABER vertikale Dispersion schwieriger kontrollierbar als bei großen Rezirkulatoren
- 2.) “Darmstadt-artiges”-Lattice: Ebenes lattice. ABER: 3 verschiedene 180 Grad Ablenker, aber gedrängterer Aufbau
- 3.) “Mainz-artiges” Polytron-Lattice: Kompakter, als 2) & inhärente Stabilität ABER: komplexes Magnetdesign & strahloptisch weniger flexibel!

“Nullte-Ordnung” (Sollbahn+realistische Dimensionen) Pläne werden erstellt (bis 5/2013)
Erste Ordnung Rechnungen bis Sommer/Herbst 2013

Vergleichende Tracking und BBU Rechnungen bis Frühjahr 2014 → Entscheidung über Lattice

- Bis Ende 2013 Entscheidung Kryomodul
- Frühjahr 2014 Entscheidung Lattice
- Sommer 2014 Gebäudemodifikationen (Wanddurchbrüche...)
- Ende 2014 Beginn Aufbau Injektor
- Ende 2015: Inbetriebnahme Reinraum (HIM-Institutsgebäude)
- 2015/16 Aufbau Lattice, Betrieb Injektor
- Ende 2016 Fertigstellung/Auslieferung Kryomodule
- 2017 Inbetriebnahme Kryomodule
- Ende 2017 Inbetriebnahme MESA

MESA-Projektteam:

I. Alexander, K. Aulenbacher, V. Bechthold, Ma. Dehn, Mo. Dehn,
F. Fichtner, S. Heidrich, R. Heine, K.H. Kaiser, E. Kirsch, H.J.-Kreidel,
Ch. Matejcek, U. Ludwig-Mertin, V. Schmitt, D. Simon

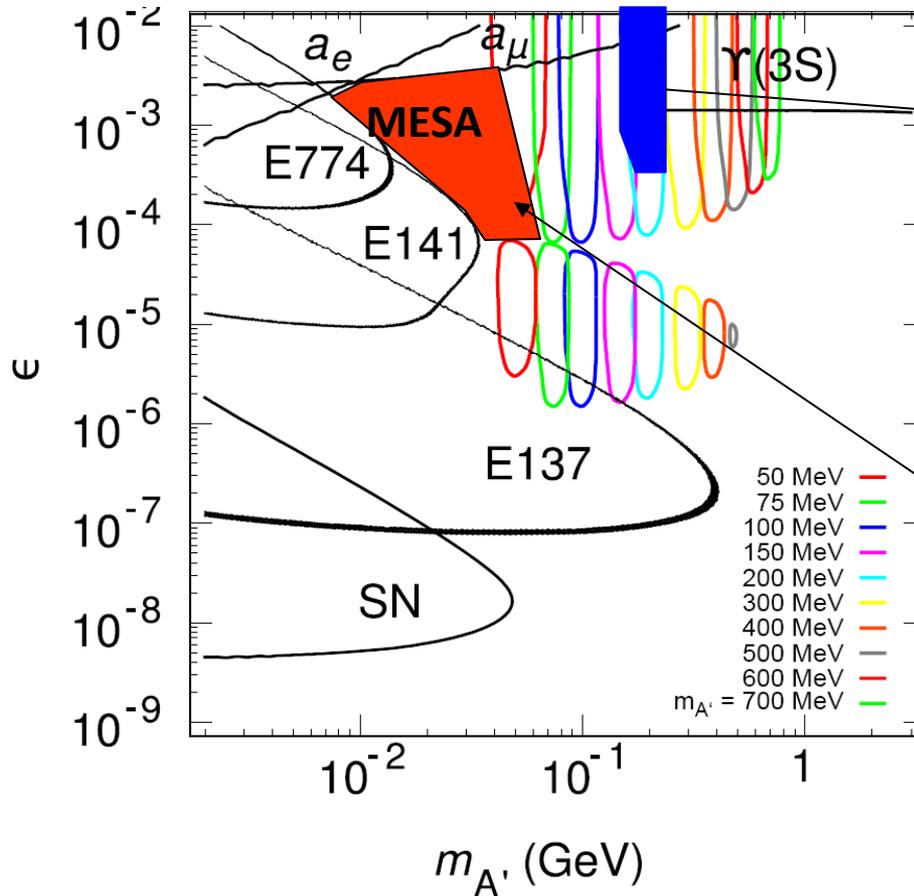
Weitere erhebliche Expansion des Projektteams in nächster Zukunft!

MESA wird unterstützt von :

- Land Rheinland-Pfalz
- Exzellenzinitiative des Bundes: PRISMA-Exzellenzcluster
- DFG: SFB 1044
- BMBF-Verbundforschung: Photocathodes for high brilliance beams

Danke für Ihre
Aufmerksamkeit!

“Bump-hunt” Experimente können ($M_{A'} > 100\text{MeV}$) sofort begonnen werden:
MAMI/A-1 und JLAB/Aspect



Demonstrationsexperiment an
MAMI: $100\mu\text{A}/855\text{MeV}$ auf
 0.4% rad. length Tantal
(2 Wochen Laufzeit)
(H. Merkel et al. PRL **106** 251802 (2011))

Region interessant wg. $(g-2)_\mu$
Abweichung