

Elektronenkühlung @ GSI/FAIR

Operateurschulung

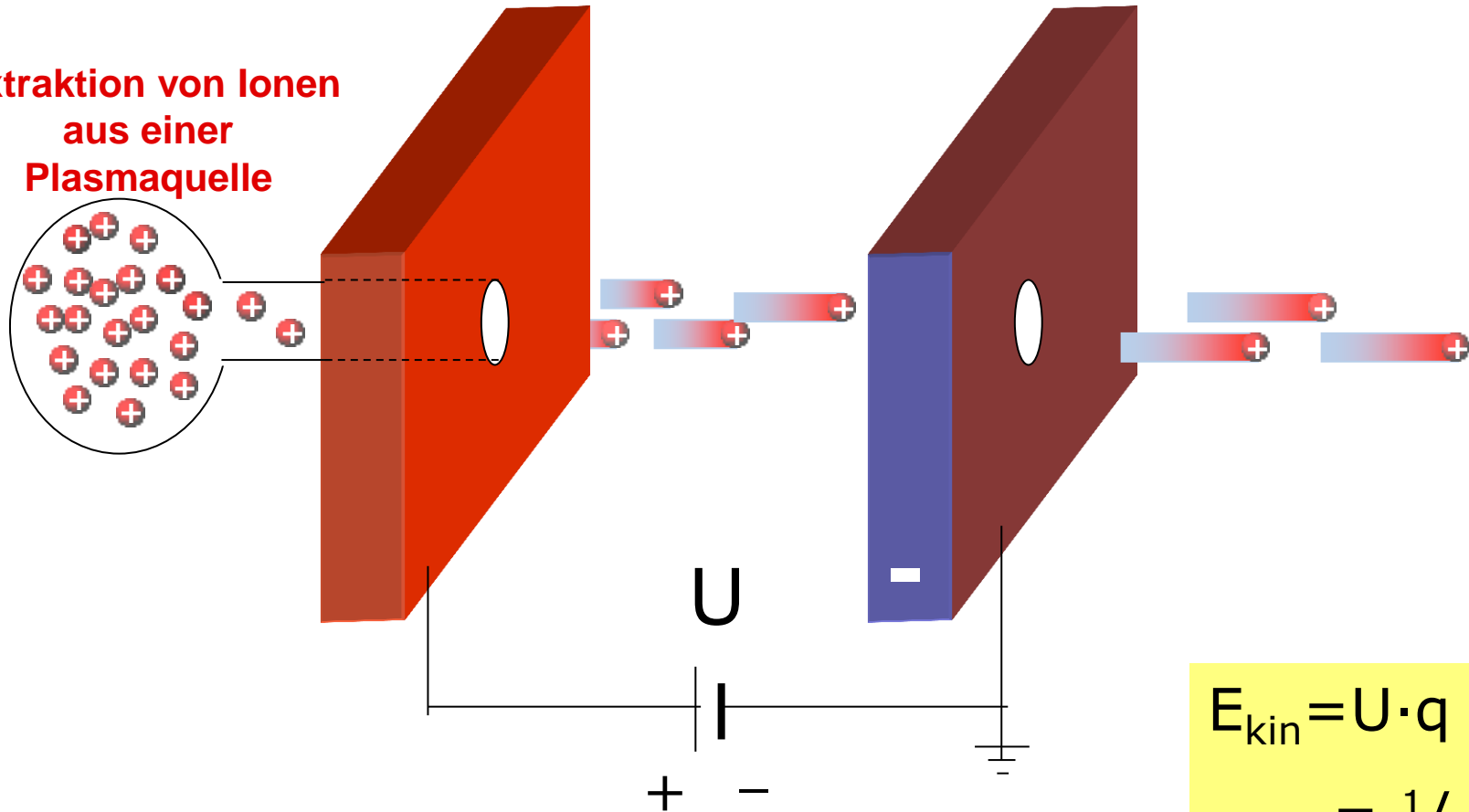
R. Heß (Abteilung Strahlkühlung BCO)

April 2018

- Wozu benötigen wir Strahlkühlung?
- Methoden zur Messung des Kühleffektes
- Prinzip der Elektronenkühlung
- Betrieb eines Elektronenkühlers
- Beispiele von Messungen
- aktueller Status GSI Elektronenkühler
- Zusammenfassung

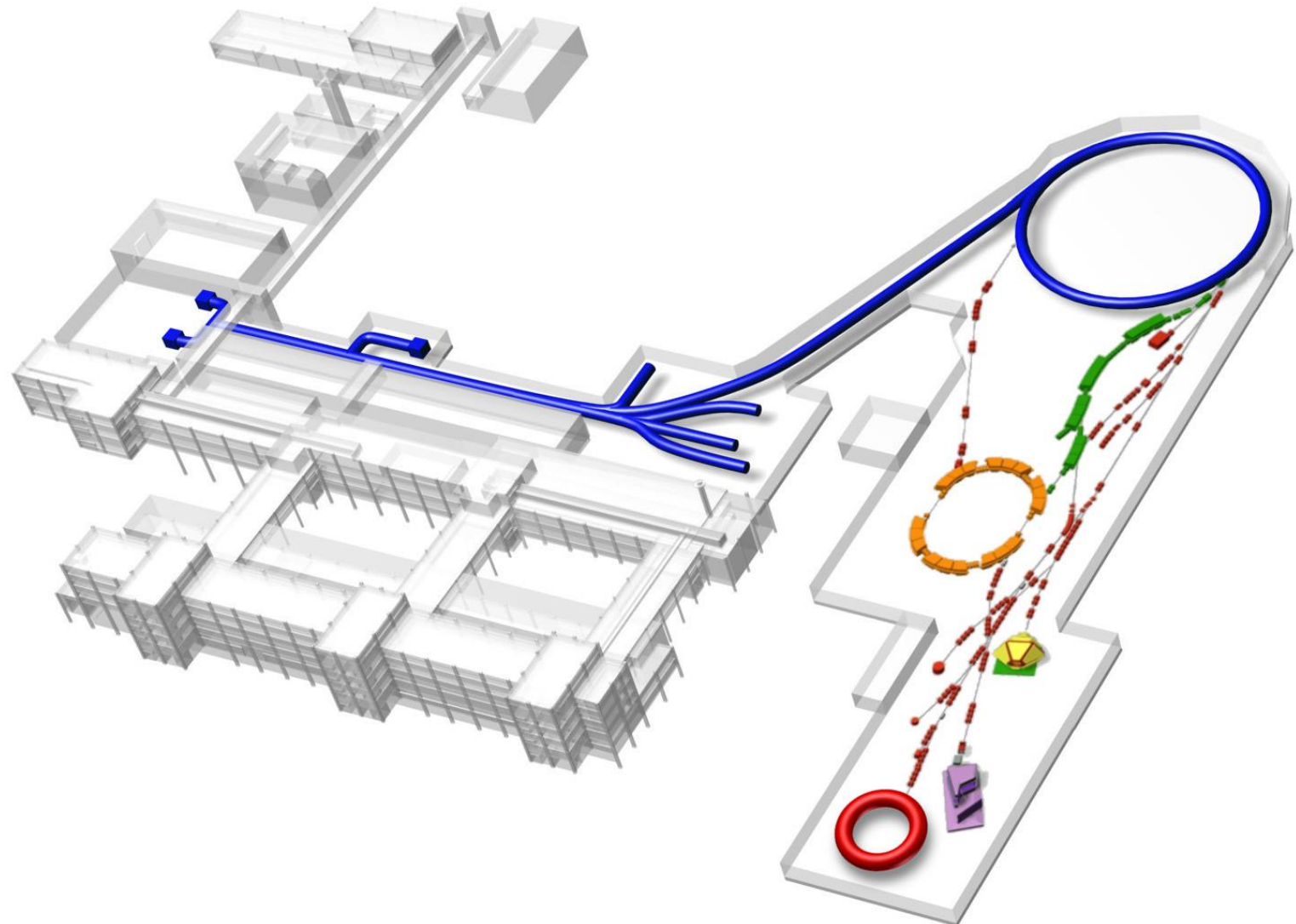
Beschleunigungsprinzip

Extraktion von Ionen
aus einer
Plasmaquelle



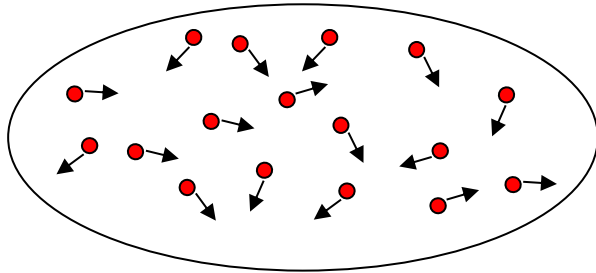
$$E_{\text{kin}} = U \cdot q$$
$$= \frac{1}{2} m v^2$$

Ein Proton ist 1840 mal schwerer als ein Elektron.
Ein Proton mit $E_{\text{kin}} = 400 \text{ MeV}$ hat dieselbe Geschwindigkeit v
wie ein Elektron mit $E_{\text{kin}} = 220 \text{ keV}$.



Gespeicherte Strahlen: Cool before using!

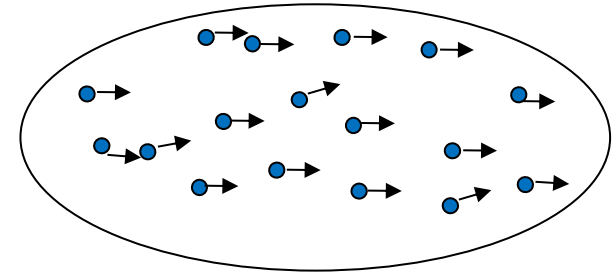
heißes Gas



Strahlkühlung



kaltes Gas

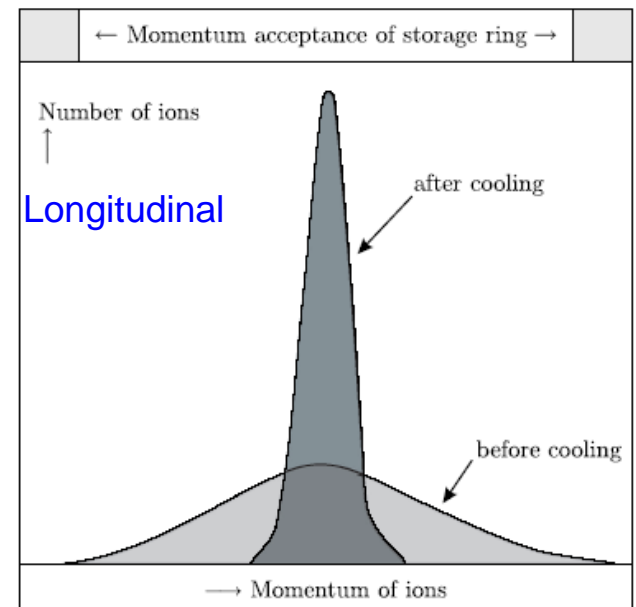
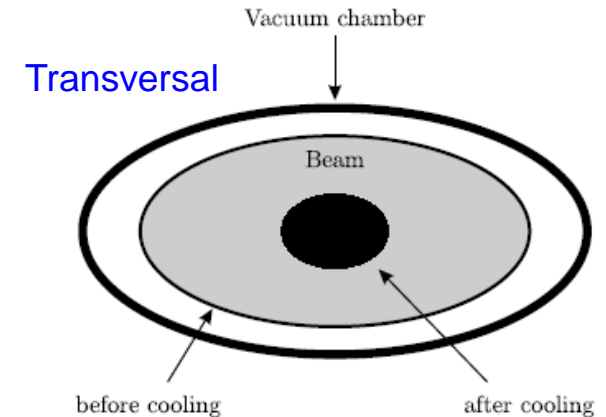


ungeordnete Bewegung von Ionen im Strahl, hohe innere Energie

geordnete Bewegung, alle Ionen im Strahl bewegen sich mit derselben nominalen Geschwindigkeit, niedrige innere Energie

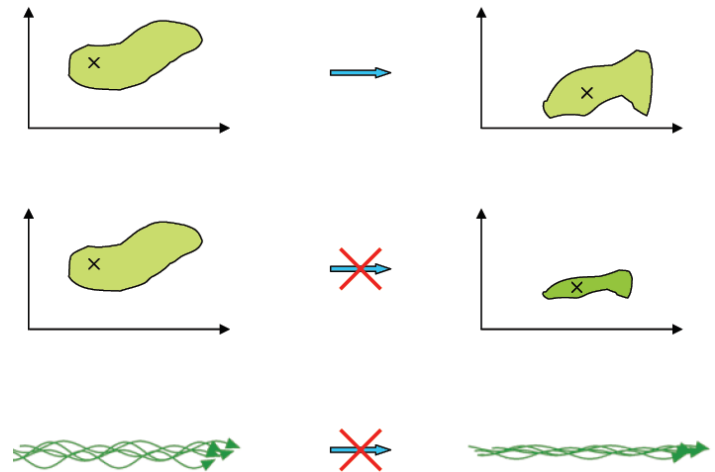
Anwendungen von Strahlkühlung

- Secondary beams von Produktionstargets (Antiprotonen, seltene Isotope)
- Verbesserte Strahlqualität
 - Präzisionsexperimente (sehr gute Energiedefinition, kleine Strahlgröße)
 - Luminositätserhöhung in Kollidern
- Wirkt Heizeffekten im Strahl entgegen
 - Experimente mit internen Targets
 - kollidierende Strahlen
- Abgebremste Strahlen: kompensiert wachsende Strahlemittanz
- Intensitätserhöhung durch Akkumulation
 - schwache Strahlen oder Teilchen mit niedriger Ausbeute von der Quelle z.B. Multiturninjektion!



Ein Strahl im Phasenraum ist wie eine nicht komprimierbare kontinuierliche Flüssigkeit.

Der Einsatz von Magneten, HF Kavitäten, elektromagnetischen Geräten etc. kann das Phasenraumvolumen des Strahls nicht ändern.



Wie funktioniert dann Kühlung? Wirkung auf Einzelteilchen!

→EM-Kräfte auf Strahlausschnitte: stochastische Kühlung
(S. van der Meer 1972)

→Einsatz von Reibung zur Entfernung von innerer Energie aus dem Strahl:
Elektronenkühlung (G. Budker 1966)

→in der Umsetzung beide schwierig

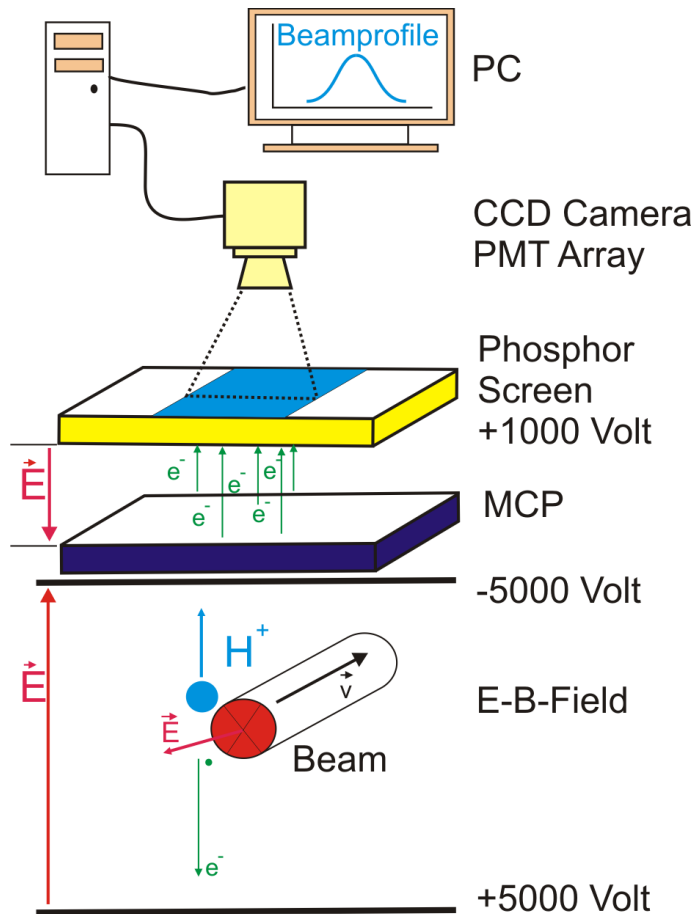


	Stochastische Kühlung	Elektronenkühlung
Teilchenart	Alle	Ionen
bevorzugte Strahlgeschwindigkeit	Hoch	Mittel/ niedrig ($\beta_0 \gamma_0 \leq 1$)
Strahlintensität	niedrig	alle
Kühlzeit	$N \cdot 10^{-8} s$ $N \geq 10^8$	$1 - 10^{-2} s$
Bevorzugte Strahltemperatur	hoch	niedrig

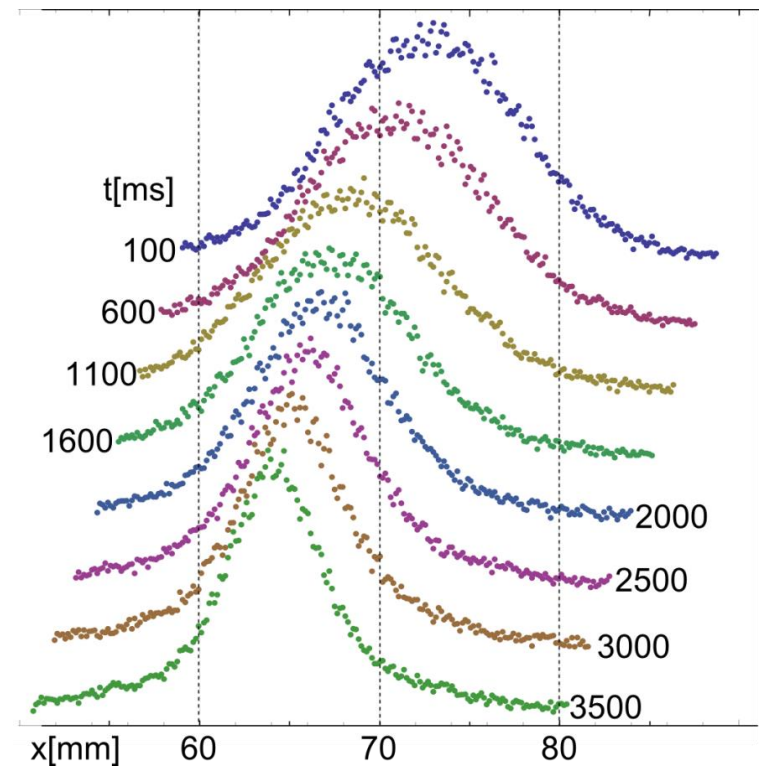
- Wozu benötigen wir Strahlkühlung?
- **Methoden zur Messung des Kühleffektes**
- Prinzip der Elektronenkühlung
- Betrieb eines Elektronenkühlers
- Beispiele von Messungen
- aktueller Status GSI Elektronenkühler
- Zusammenfassung

Nicht-destruktive Diagnose: transversal

Profil der transversalen Verteilung
des ionisierten Restgases

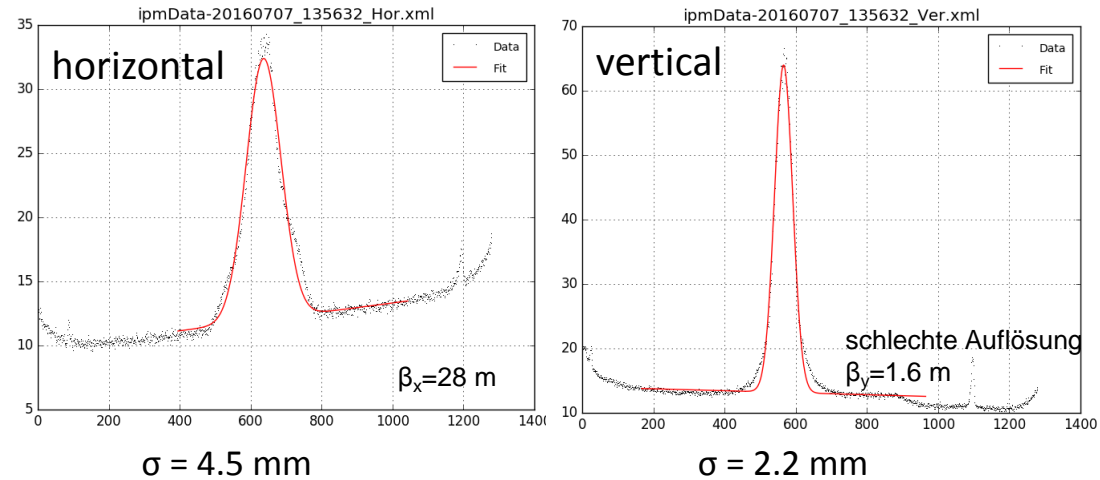
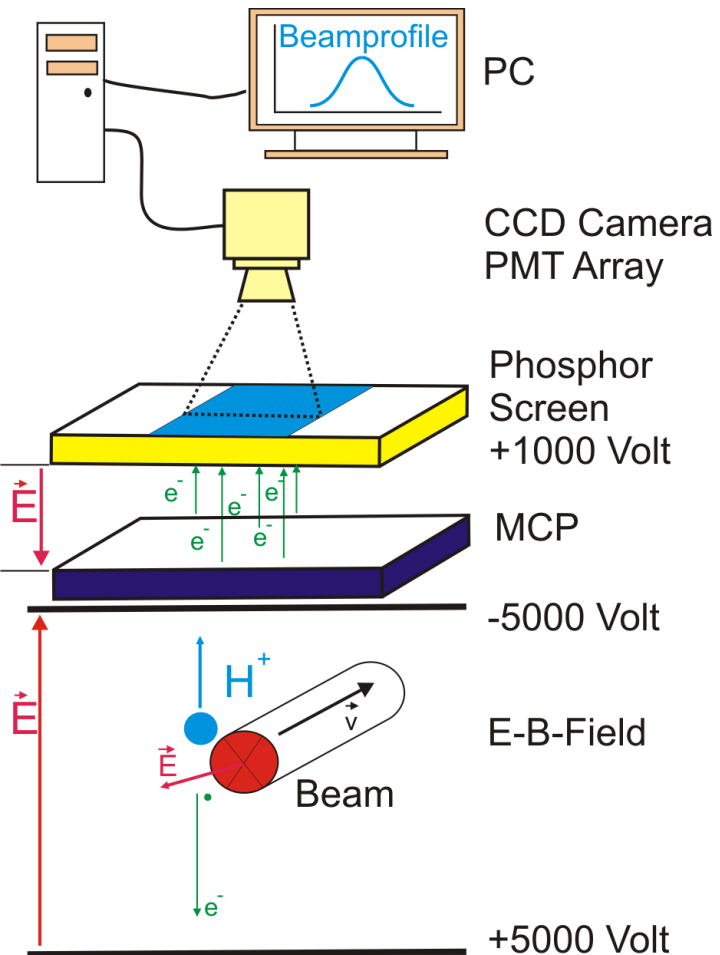


transversale Kühlung des Ionenstrahls
nach Injektion in den ESR



Ionization Profile Monitor (IPM)

Profil der transversalen Verteilung,
gemessen wird die Ionisation des Restgases

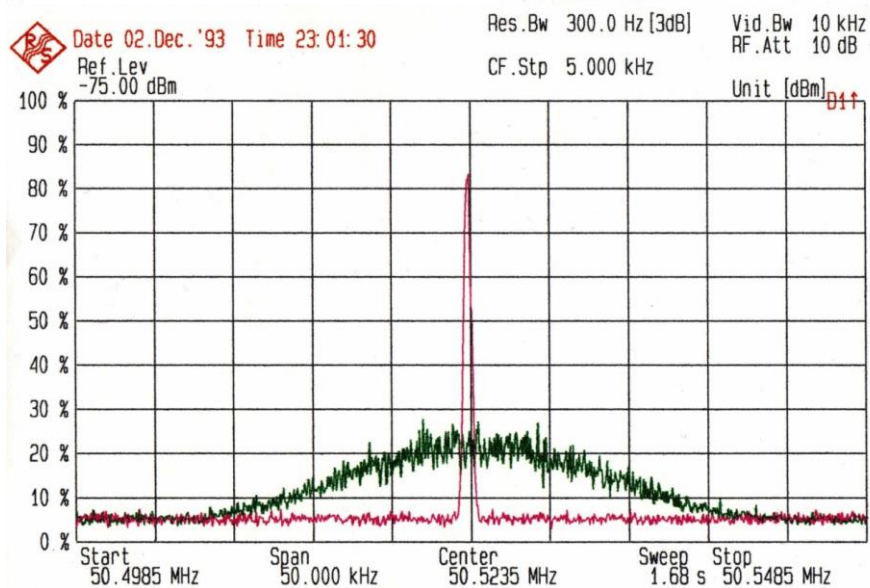


Beispiel: C^{6+} @ 122 MeV/u
gebuncht (RF = 300V)
und Elektronen gekühlt ($I_e = 250 \text{ mA}$)

longitudinale Kühlung

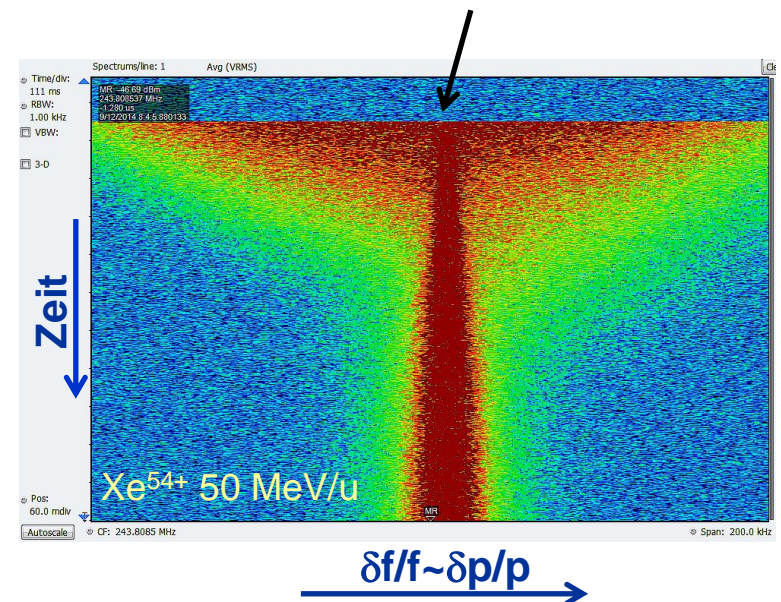
U⁹²⁺ bei 300 MeV/u **vor** und **nach** Elektronenkühlung (I = 0.25 A)

Einschuss in den Speicherring

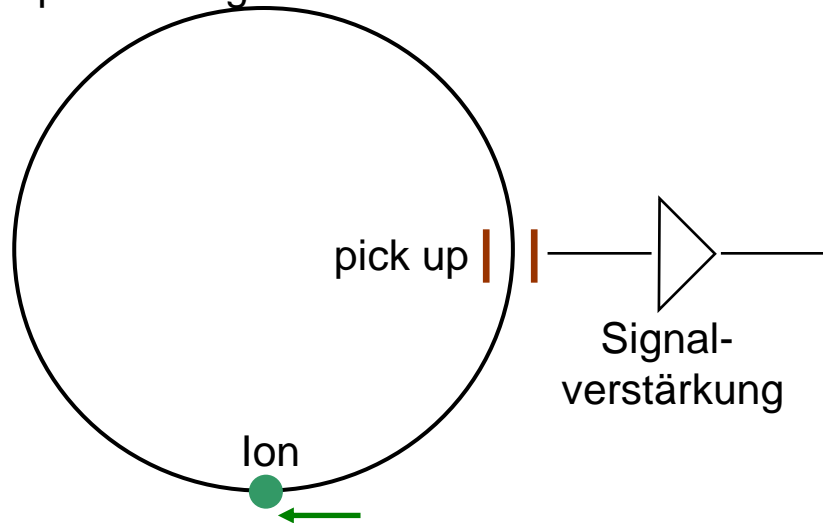


J92+
250mA

anfängliche Impulsverteilung: etwa 10^{-3}
finale Impulsverteilung: $10^{-6} - 10^{-4}$



Speicherring



Frequenzanalyse

Schottky-Diagnose:
Bestimmung der Impulsverteilung für
umlaufende Strahlen

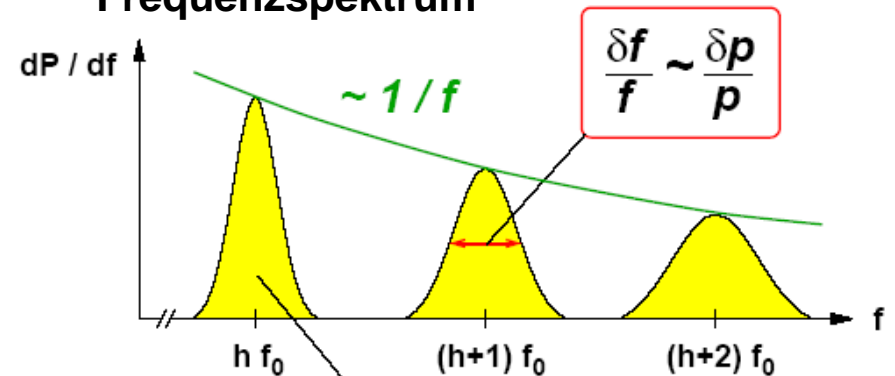
η -Parameter:

$$\eta = \frac{1}{\gamma^2} - \frac{1}{\gamma_t^2}$$

Übergangsenergie γ_t

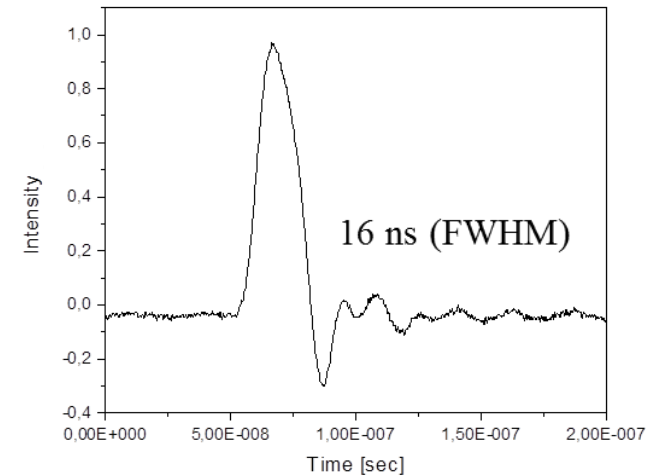
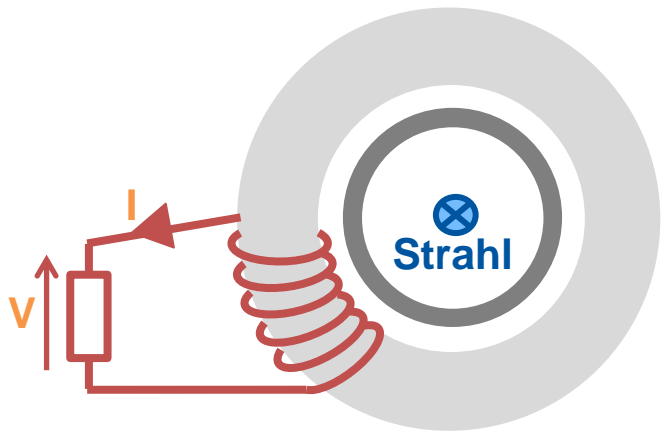
$$\frac{\Delta p}{p} = \frac{1}{\eta} \frac{\Delta f}{f}$$

Frequenzspektrum



$P \sim N Q^2 f_0^2$

Fast Current Transformer (FCT) Bestimmung der Impulsverteilung (gebunchte Strahlen)



gute Zeitauflösung (experimentell): bis zu 7ns

für kürzere Bunchlängen wird die Zeitauflösung durch die intrinsische Auflösung beeinträchtigt

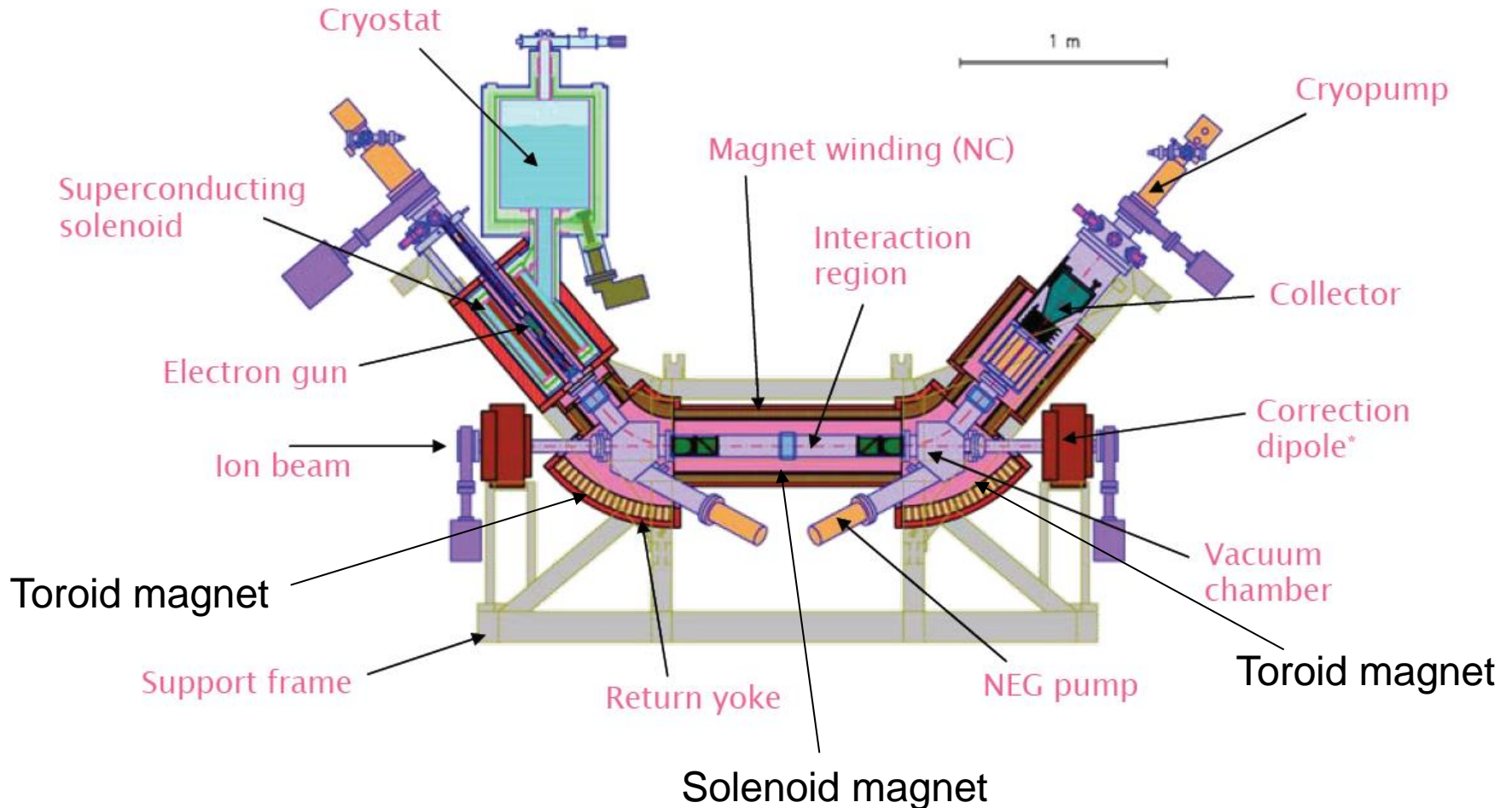
$$\frac{\sigma_t}{T_{rev}} = \sqrt{\frac{\beta_0^2 \eta E_{0 tot}}{2\pi Q h \dot{V}}} \frac{\sigma_p}{p}$$

Beispiel: C⁶⁺ @ 122 MeV/u
gebuncht (RF = 300V)
und gekühlt (I_e = 250 mA)

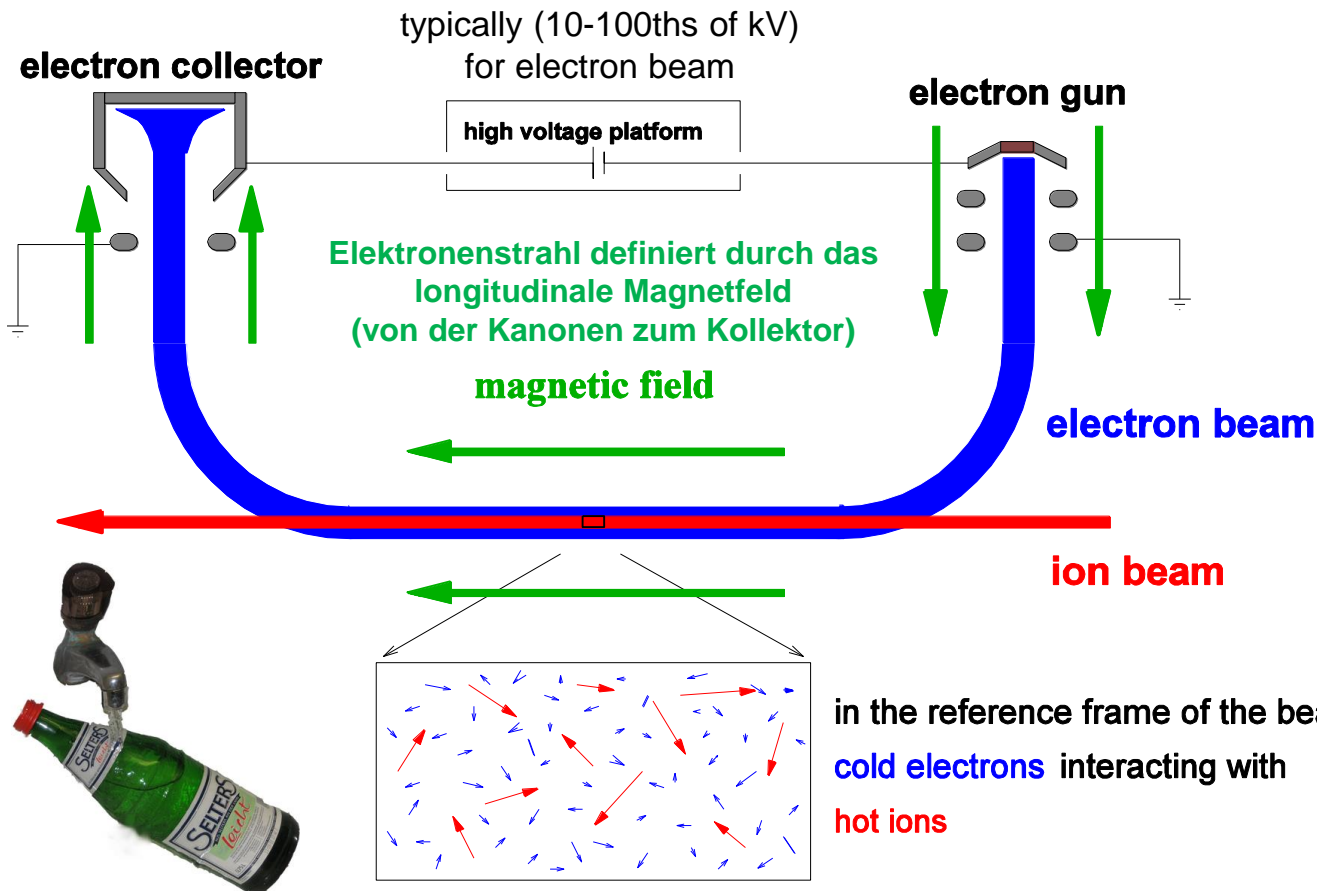
- Wozu benötigen wir Strahlkühlung?
- Methoden zur Messung des Kühleffektes
- **Prinzip der Elektronenkühlung**
- Betrieb eines Elektronenkühlers
- Beispiele von Messungen
- aktueller Status GSI Elektronenkühler
- Zusammenfassung

Woraus besteht ein Kühler?

Beispiel: CRYRING-Elektronenkühler



Elektronenkühlung: Grundprinzip



Ionen und **Elektronen** müssen dieselbe nominale Geschwindigkeit v_0 haben

$$v_0 = v_{e\parallel} = v_{i\parallel}$$

$$E_e = m_e / M_i \cdot E_i$$

z.B.: 220 keV Elektronen kühlen 400 MeV Protonen

Elektronentemperatur
 $kT_{\perp} \approx 0.1 \text{ eV}$ (1100 K)
 $kT_{\parallel} \approx 0.1 - 1 \text{ meV}$



Impulsübertrag durch Coulombstöße

Aber, Elektronen und positiv geladene Ionen rekombinieren !?

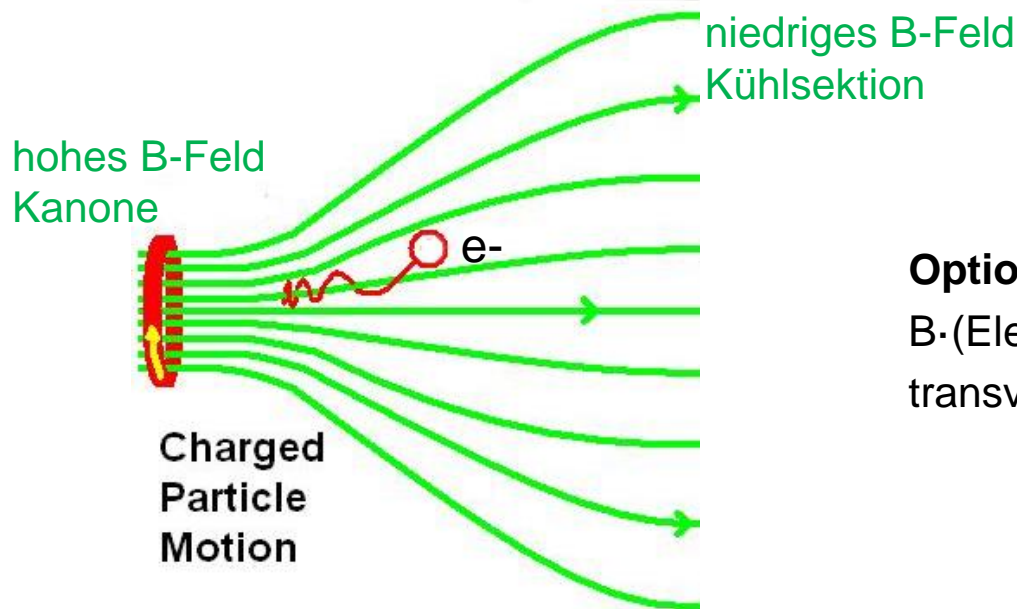
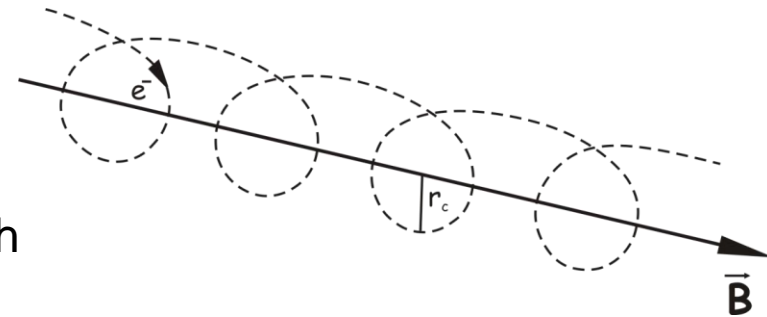
Elektronenbewegung im Führungsfeld

Zyklotronbewegung eines Einzelteilchens

Zyklotronfrequenz $\omega_c = eB/\gamma_0 m_e$

Zyklotronradius $r_c = v_{\perp}/\omega_c = (kT_{\perp} m_e)^{1/2} \gamma_0/eB$

Elektronen folgen den Magnetfeldlinien adiabatisch



Option: adiabatische magnetische Expansion

$B \cdot (\text{Elektronstrahlradius})^2 = \text{invariant}$

transversale Elektronentemperatur / $B = \text{invariant}$

B-Feld: Kanone 3 T → Kühlsektion 0.03 T
 e-Strahldurchmesser : 4 mm → 40 mm

Elektronenkühler bei GSI

Länge der Kühlsektion / Ringumfang = 2%

SIS18 (216 m)



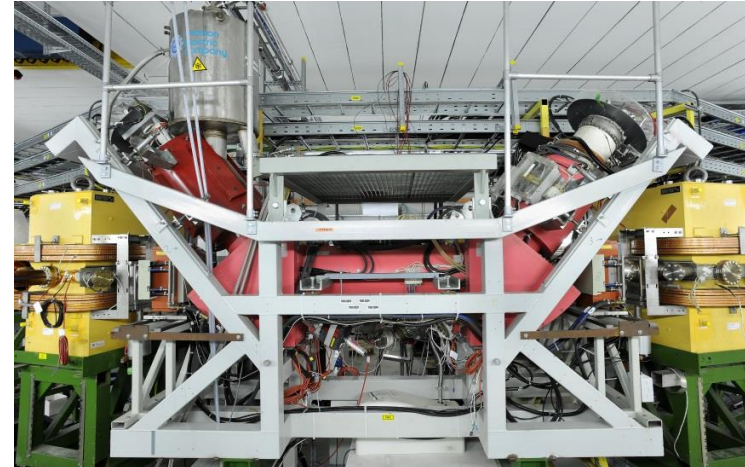
Kühlung bei Injektionsenergie des Synchrotron
Akkumulation im transversalen Phasenraum über
multiple Multiturninjektion (MMTI)

ESR (108 m)



Kühlung für interne Experimente
Kühlung von abgebremsten
Strahlen
ESR: auch Akkumulation

CRYRING (54 m)



- Wozu benötigen wir Strahlkühlung?
- Methoden zur Messung des Kühleffektes
- Prinzip der Elektronenkühlung
- **Betrieb eines Elektronenkühlers**
- Beispiele von Messungen
- aktueller Status GSI Elektronenkühler
- Zusammenfassung

Typische Betriebsparameter

SIS18 (216 m)

e- accelerating voltage (HV) up to 7kV
e- current 0-1 A
cathode diameter 1 inch
guiding magnetic field (expansion)
gun 0.18 T → cooling section 0.06 T

ESR (108 m)

e- accelerating HV 2-220 kV (± 1 V)
e- current 0-1 A
cathode diameter 2 inch
guiding magnetic field
(no expansion) 0.02-0.1 T

CRYRING (54 m) (Sweden)

e- accelerating HV up to 6 kV
e- current up to 0.15 A
cathode diameter 0.16 inch
guiding magnetic field (expansion)
gun 3 T → cooling section 0.03 T

Fixed-energy operation
at injection from TK
11.4 MeV/u Ionen
→ 6.3 kV Cooler accelerating HV

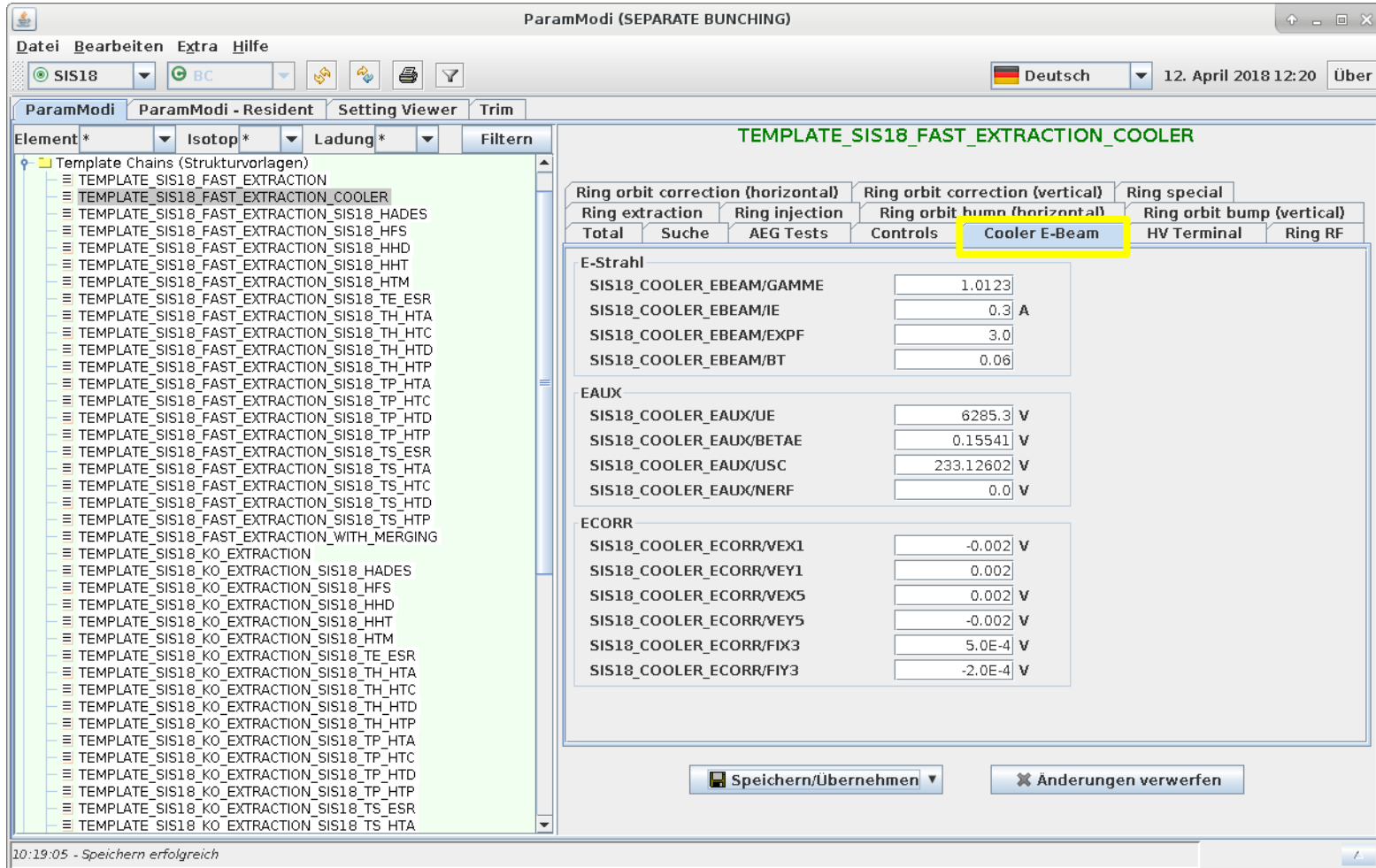
Fixed energy (DC) or
ramped-energy operation
e.g. deceleration of ion beam
Multiplexed (ramped) cycle:
Cooler accelerating HV (scalar)
+
Cooler magnetic field (FG ramp)
+
Cooler electron current (scalar)

Event mode,
complex operation LSA/MODI+Cooler

SIS Kühler alt

S14	U13	TE/ESR	12C	3+	400.00	schnell_1H1	2 HF-Kavi	Normal						
iEnergie [MeV]:	11.498	eEnergie [MeV]:	400.0	Profilgit.Trig Inj.										
iB-Rho [Tm]:	0.97915	eB-Rho [Tm]:	6.34545	Wartezeit [ms]: 0.0										
iFrequenz[kHz]:	861.5	eFrequenz[kHz]:	3953.781	Zyklus-Zeit [s]: 4.281										
i[Teilchen/μA]:	0.483E+07			U-Injektion[kV]: 0.0										
iQH:	4.3	eQH:	4.29	U-RampA [kV]: 9.0										
iQU:	3.26	eQU:	3.26	U-RampE [kV]: 20.0										
iRad.Pos. [mm]:	-2.0	eRad.Pos. [mm]:	0.0	U-Flattop [kV]: 20.0										
IstFrequ. [kHz]:	861.5	SpillZeit [μs]: 100.0		t-Ramp [ms]: 64.0										
Bump.Flank[μs]:	200.0													
Bump.Ampl [mm]:	70.0													
BpTacho[mm/μs]:	0.35													
Chop.Verz. [μs]:	30.0													
ChopFenst. [μs]:	160.0													
BpWeglänge[mm]:	56.0													
dU-Ready:	10030													
dTK7BC1L[mrad]:	0.0	extr.Bunche 1 2: 1												
dTK7MU5 [mrad]:	0.0	B-Punkt [T/s]: 1.30831												
dS12MU3I[mrad]:	3.5	Taupunkt [ms]: 0.0												
dS12ME1I[mrad]:	1.0	BunchRot [μs]: 400.0												
AnzInjekt.:		3	Bypass [mrad]: 4.5											
e-Kühler 0/1:		1	nSepBumpAnf [mm]: 5.0											
MMIKüh12. [ms]:		800.0												
Kühler dp/p:		1.25												
Kühlerf.Inj.:		600.0	Kickw. [mrad]:		8.0									
Kühlerstron[A]:		0.3	Kickstart [°]:		76.5									
KüBumpX [mm]:		0.0	HF-Trigg:1 2 3:		3									
KüBumpX' [mrad]:		0.0	ESR-Synch.:0 1:		0									
KüBumpY [mm]:		0.0	Synch-Zeit[μs]:		0									
KüBumpY' [mrad]:		0.0												
<table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr><td>INIT</td></tr> <tr><td>SAVE</td></tr> <tr><td>RESTORE</td></tr> <tr><td>SOLL_SOLL</td></tr> <tr><td>COPY</td></tr> <tr><td>EXIT</td></tr> </table>									INIT	SAVE	RESTORE	SOLL_SOLL	COPY	EXIT
INIT														
SAVE														
RESTORE														
SOLL_SOLL														
COPY														
EXIT														
an Geraete			InitWerte		alter Zustand		BF aktualis							

SIS Kühler neu



The screenshot shows the Paramodi (SEPARATE BUNCHING) software interface. The main window displays the configuration for the 'TEMPLATE_SIS18_FAST_EXTRACTION_COOLER'. The interface includes a menu bar (Datei, Bearbeiten, Extra, Hilfe), a toolbar, and a status bar (Deutsch, 12. April 2018 12:20, Über). The main area is divided into a left sidebar with a tree view of 'Template Chains (Strukturvorlagen)' and a right pane showing the configuration parameters for the selected template.

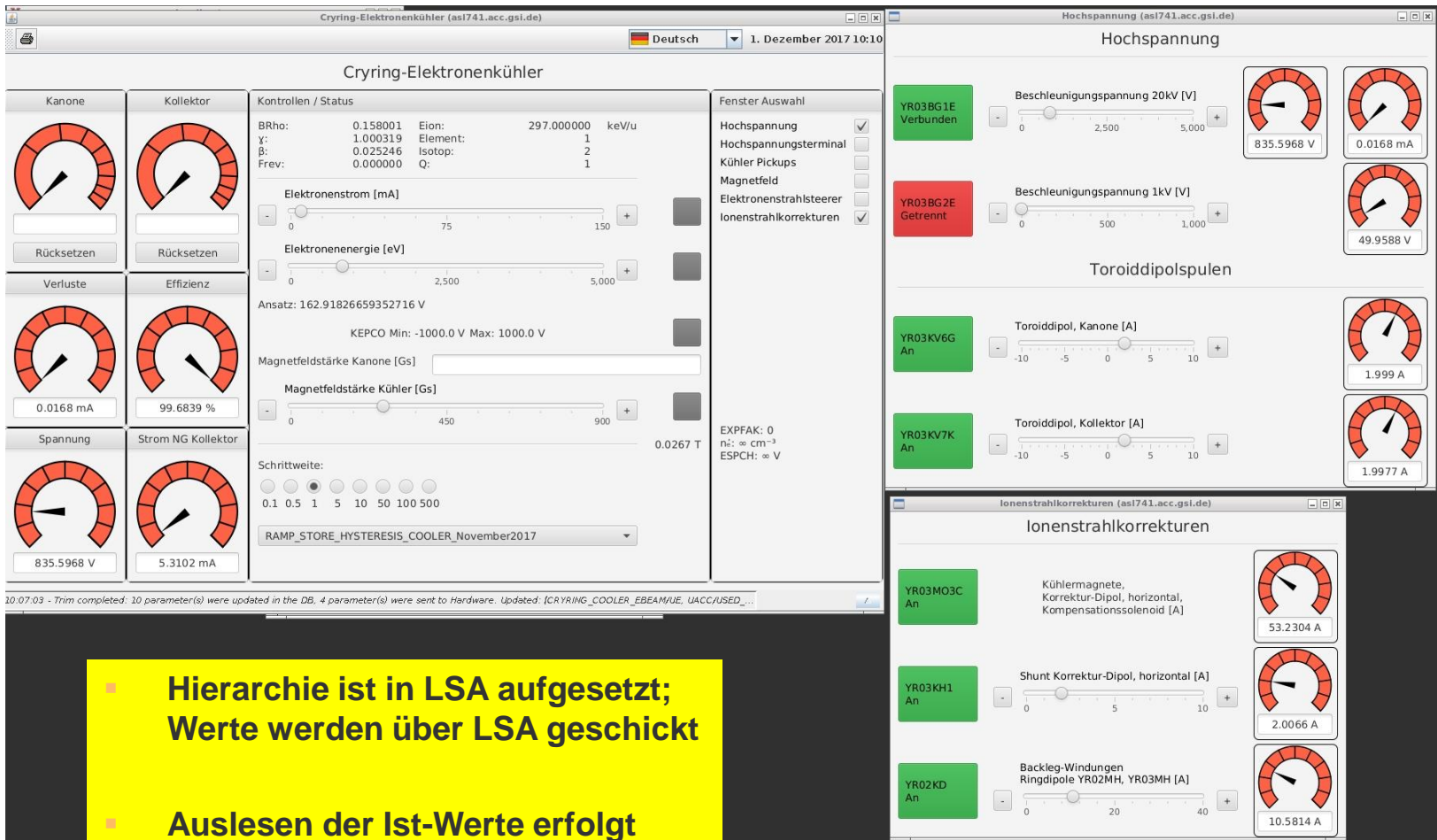
The configuration parameters are organized into several sections:

- Ring orbit correction (horizontal)**: Ring extraction, Ring injection, Ring orbit bump (horizontal), Ring special, Ring orbit bump (vertical), HV Terminal, Ring RF.
- Ring extraction**: Total, Suche, AEG Tests, Controls, Cooler E-Beam.
- E-Strahl**:
 - SIS18_COOLER_EBEAM/GAMME: 1.0123
 - SIS18_COOLER_EBEAM/IE: 0.3 A
 - SIS18_COOLER_EBEAM/EXPF: 3.0
 - SIS18_COOLER_EBEAM/BT: 0.06
- EAUX**:
 - SIS18_COOLER_EAUX/UE: 6285.3 V
 - SIS18_COOLER_EAUX/BETA E: 0.15541 V
 - SIS18_COOLER_EAUX/USC: 233.12602 V
 - SIS18_COOLER_EAUX/NERF: 0.0 V
- ECORR**:
 - SIS18_COOLER_ECORR/VEY1: -0.002 V
 - SIS18_COOLER_ECORR/VEY1: 0.002
 - SIS18_COOLER_ECORR/VEY5: 0.002 V
 - SIS18_COOLER_ECORR/VEY5: -0.002 V
 - SIS18_COOLER_ECORR/FIX3: 5.0E-4 V
 - SIS18_COOLER_ECORR/FIY3: -2.0E-4 V

Buttons at the bottom include 'Speichern/Übernehmen' and 'Änderungen verwerfen'. A status bar at the bottom left shows '10:19:05 - Speichern erfolgreich'.

erster Entwurf; Anpassungen sind nötig, z.B. Einheiten müssen korrigiert werden

CRYRING Kühlerapplikation



The screenshot displays the control interface for the CRYRING cryogenic cooling system, organized into several panels:

- Cryring-Elektronenkühler (asi741.acc.gsi.de):** The main control panel, showing parameters like BRho (0.158001), Eion (297.000000 keV/u), and Elektronenstrom (0 mA). It includes sliders for Elektronenstrom [mA] and Elektronenenergie [eV], and buttons for 'Rücksetzen'.
- Hochspannung (asi741.acc.gsi.de):** Controls for high voltage, featuring sliders for Beschleunigungsspannung 20kV [V] (835.5968 V) and 1kV [V] (49.9588 V), and status indicators for YR03BG1E (Verbunden) and YR03BG2E (Getrennt).
- Toroiddipolspulen:** Controls for toroidal dipole magnets, showing sliders for Toroiddipol, Kanone [A] (1.999 A) and Toroiddipol, Kollektor [A] (1.9977 A), with status indicators for YR03KV6G (An) and YR03KV7K (An).
- Ionenstrahlkorrekturen (asi741.acc.gsi.de):** Controls for ion beam corrections, showing sliders for Kühlermagnete (53.2304 A), Shunt Korrektur-Dipol (2.0066 A), and Backleg-Windungen (10.5814 A), with status indicators for YR03MO3C (An), YR03KH1 (An), and YR02KD (An).

At the bottom left, a status bar indicates: 10:07:03 - Trim completed: 10 parameter(s) were updated in the DB, 4 parameter(s) were sent to Hardware. Updated: [CRYRING_COOLER_EBEAM/E, UAC/USED, ...]

- Hierarchie ist in LSA aufgesetzt; Werte werden über LSA geschickt
- Auslesen der Ist-Werte erfolgt über JAPC aus FESA

Betriebsgrundlagen I:

Kühler einstellen



Vakuum Druckanzeige Gun/Collector	OK	
Kühlwasser Gun/Collector	OK	
Kathodenheizung	AN	
Elektronen HV Beschleunigerspannung = Ground – Kathodenspannung (negativ)		AN
wird gesetzt $U_e [kV] = \left(\frac{1}{1823}\right) \cdot 1000 \cdot E_{ion} \left[\frac{MeV}{u}\right]$		
1. Ansatz für Ionenstrahl und Elektronen gleicher Geschwindigkeit v_0		
Kühlermagnetfeld (Stromversorgung Magnete)	AN	
HV-Netzgeräte Kollektor Anode, Kollektor	AN	
Elektronenstrom (bestimmt durch die HV Anodenspannung; gemessen am Kollektor HV Netzgerät)	AN	

-> HV Netzgerät Anode = mehrere Hardware Interlocks
(HV Beschleunigerspannung, Vakuum, Kühlwasser Kollektor)

Was passiert wenn Elektronen an die Wand gehen z.B. Ausfall Magnetstromversorgung?

1. Ie Verlust → Strombegrenzung HV Netzgerät Beschleunigerspannung → **AUS**
dann Interlock → Anode **AUS** d.h. keine Elektronen mehr...
2. Vakuumdruck schlechter, Vakuum Interlock → Anode **AUS** d.h. keine Elektronen mehr...

Ionenstrahlbahnstörung (wegen Toroid Kicks im Kühler)

$$\theta_x \sim \int_{toroids} \frac{B_{cooler} \cdot ds}{(B\rho)_{ion}}$$

z.B: SIS18 1.5 Tm Strahl
 $\theta_x \sim 13 \text{ mrad}$

Bahnkorrektur (Kühlerbump) Schema

ESR, SIS18

mit 2 Kühler KX Steerern + 2 (4) benachbarten Ring KX Steerern.

CRYRING

mit 2 Kühler KH Steerern + 2 benachbarten Backlegs KD Steerern (in Dipolen).

muss je nach Kühler-B Feld und Ionenstrahlsteifigkeit angepasst werden!

Betriebsgrundlagen III: Kühlung optimieren

Feinanpassung δU_e um die gesetzte Spannung U_e : Cooler AN, Ionenstrahlsignal im Schottky

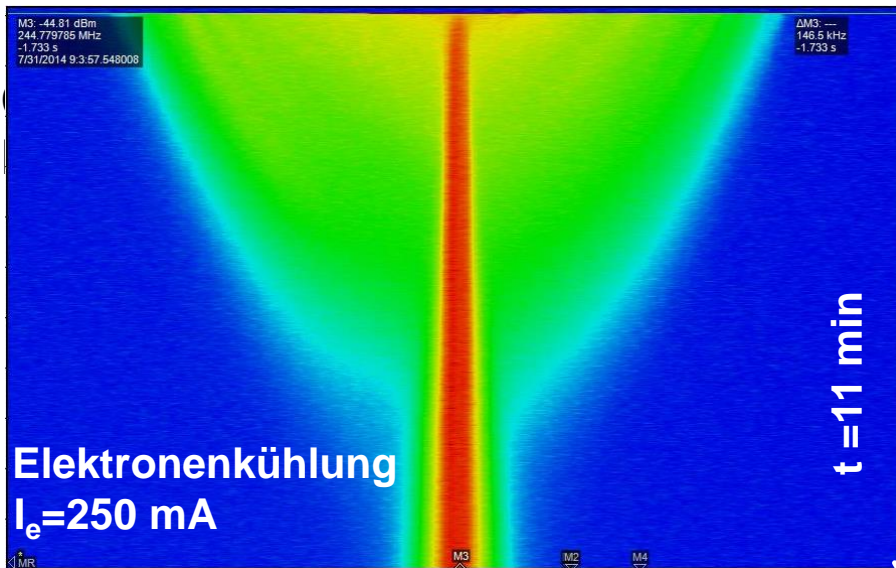
- absolutes Feintuning U_e Elektronenenergie (HV Spannung) Knopf ESR
- Relatives Feintuning $\frac{\delta p}{p}$ Knopf (SIS)

→ Ionenstrahlen und Elektronen gleicher Geschwindigkeit → effiziente Kühlung

Kühlzeit (wie lange sollte die Kühlung = der Elektronenstrom AN sein ?)

~10-100 ms für U92+, ~sec für C6+, ~Minuten für Protonen

ESR Protonen bei 400 MeV



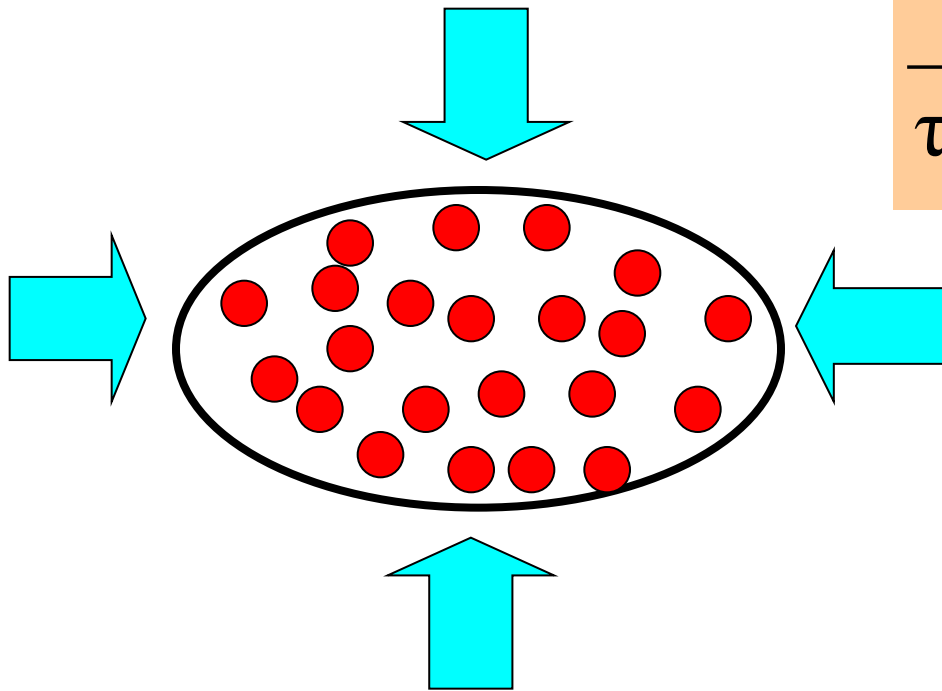
Cooling time (lab frame):

$$\frac{1}{\tau_{\text{cool}}} = - \frac{F}{m_i v_i} \propto \frac{Q^2}{A} \cdot \frac{n_e l_{\text{cool}} c^3}{v_0^3 \gamma_0^5 \theta_{\text{rel}}^3}$$

Kühler AN, Ionenstrahlsignal im Schottky:
Keine Änderung → Strahl gekühlt

Gleichgewicht

Intrabeam scattering (IBS) - die Streuung/ Stöße geladener Teilchen im Ionenstrahl



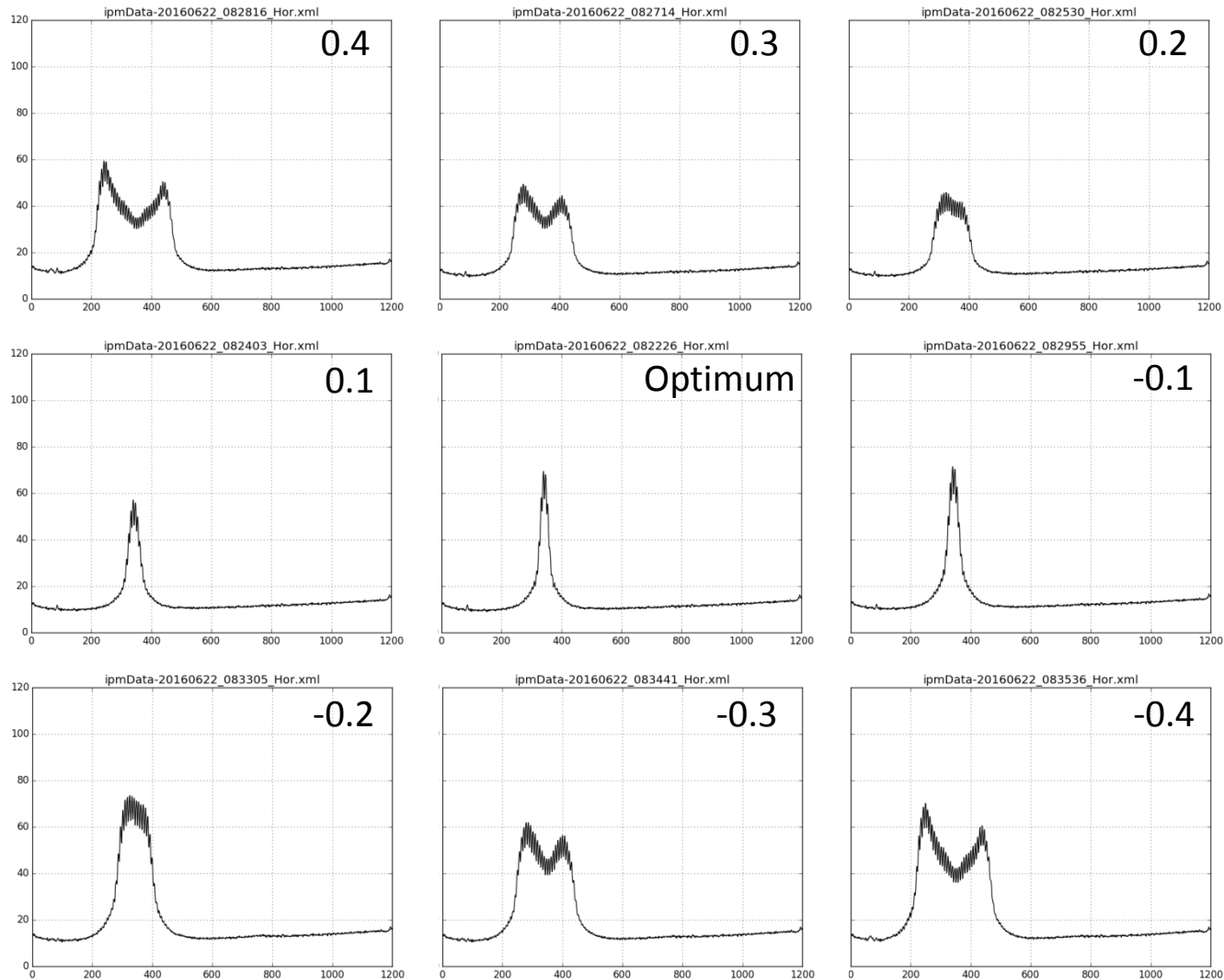
$$\frac{1}{\tau_{\text{IBS}}} \propto \frac{Q^4}{A^2} \cdot \frac{N_i c^3}{v_0^3 \gamma_0^4 \epsilon_x \epsilon_y (\Delta p/p)}$$

$$\frac{1}{\tau_{\text{cool}}} \propto \frac{Q^2}{A} \cdot \frac{n_e l_{\text{cool}} c^3}{v_0^3 \gamma_0^5 \theta_{\text{rel}}^3}$$

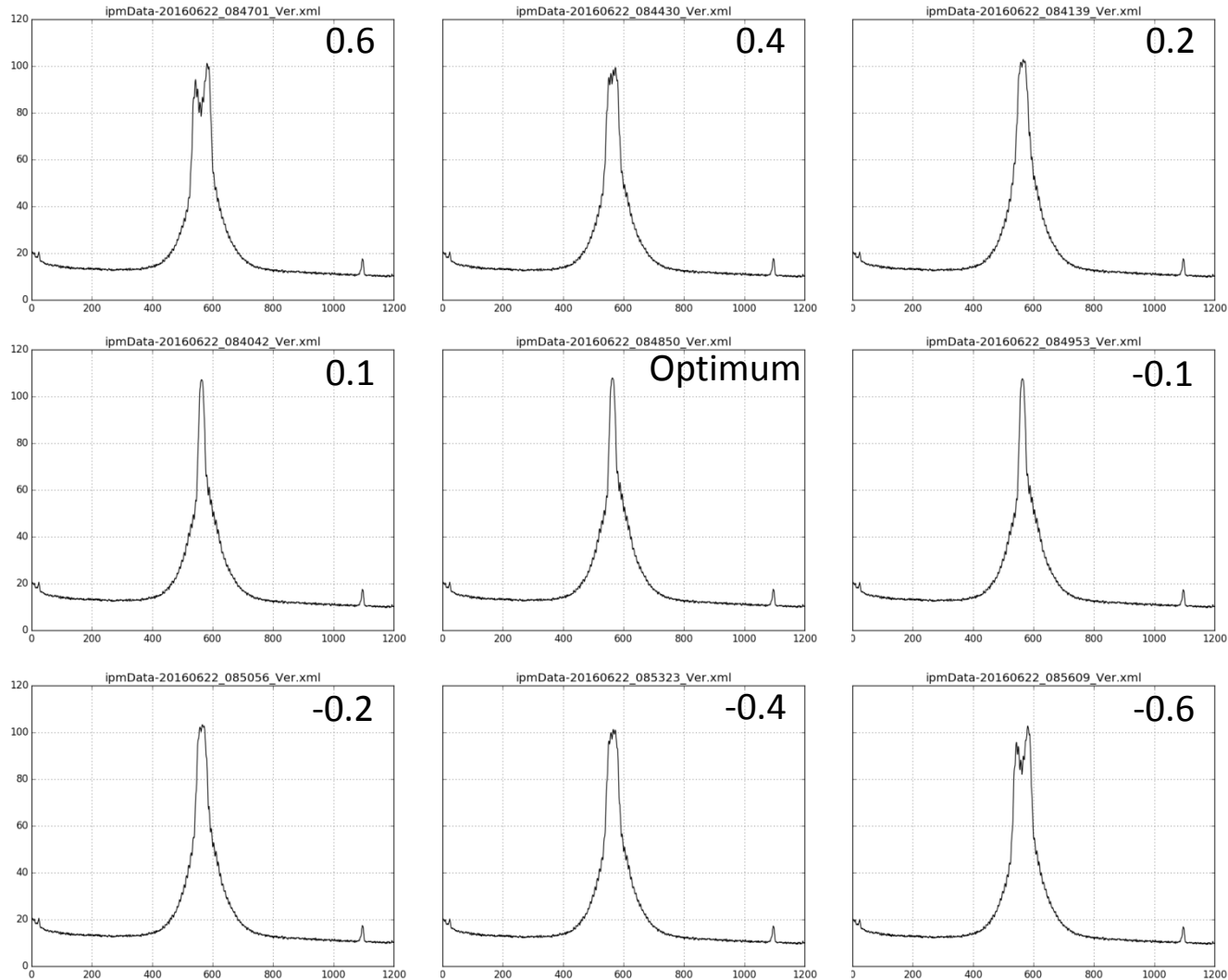
Equilibrium $\frac{1}{\tau_{\text{cool}}} = \frac{1}{\tau_{\text{IBS}}}$

- Wozu benötigen wir Strahlkühlung?
- Methoden zur Messung des Kühleffekts
- Prinzip der Elektronenkühlung
- Betrieb eines Elektronenkühlers
- **Beispiele von Messungen**
- aktueller Status GSI Elektronenkühler
- Zusammenfassung

Steereroptimierung horizontal



Steereroptimierung vertikal



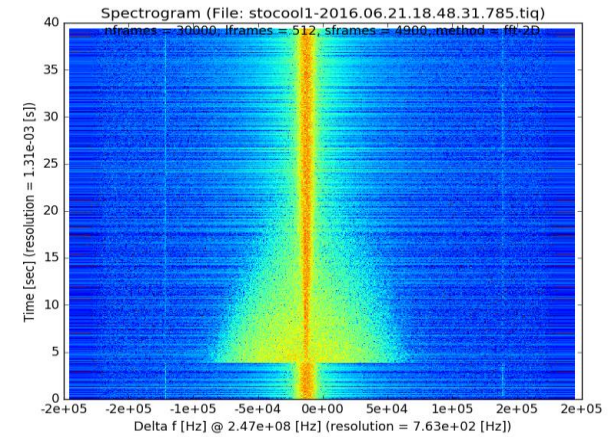
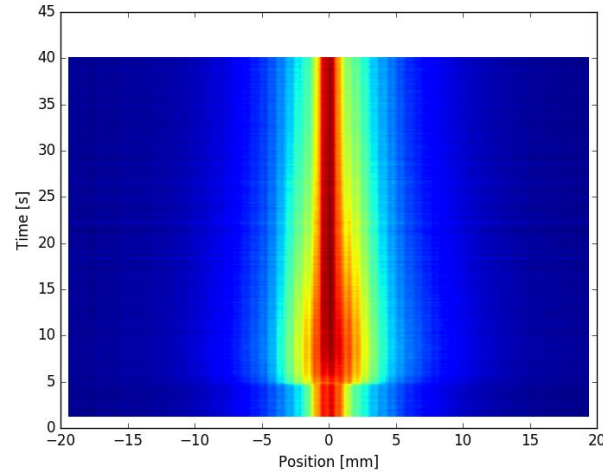
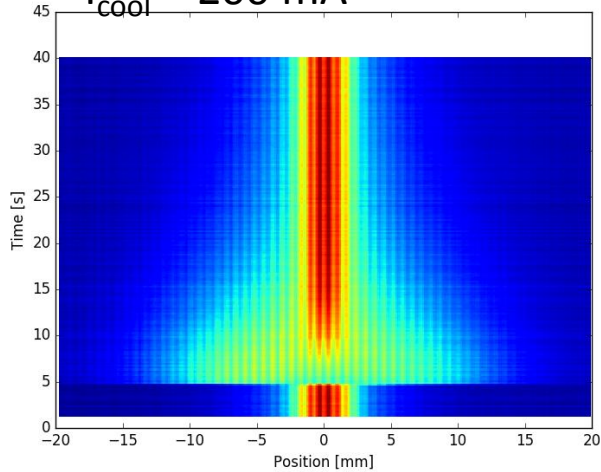
Kühlverlauf nach Injektion (ESR)

horizontal

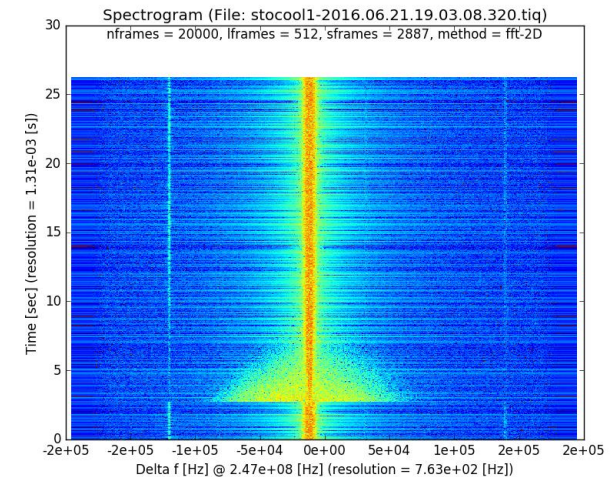
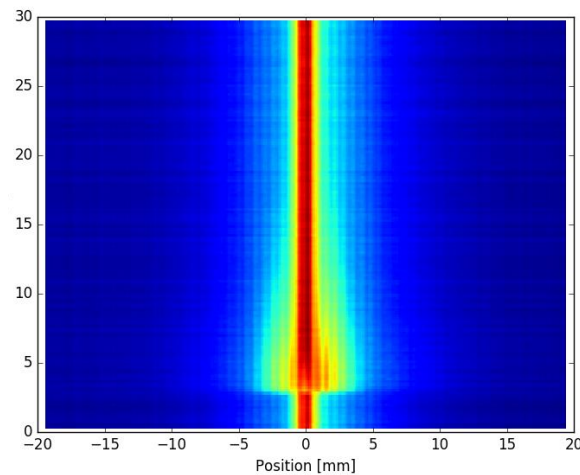
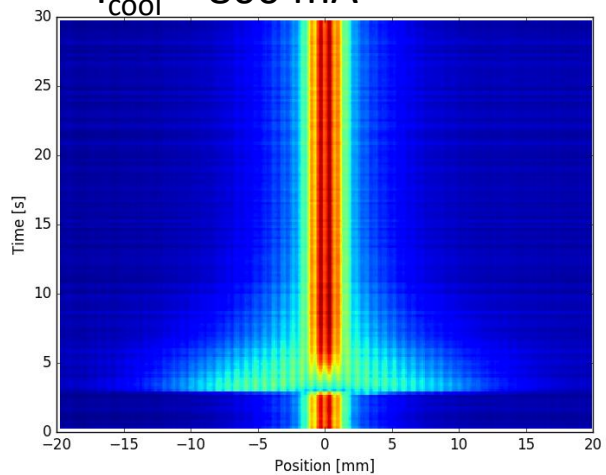
vertikal

longitudinal

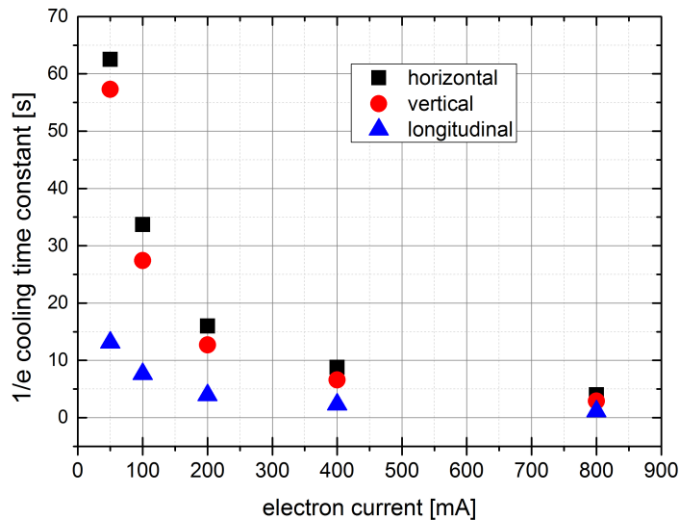
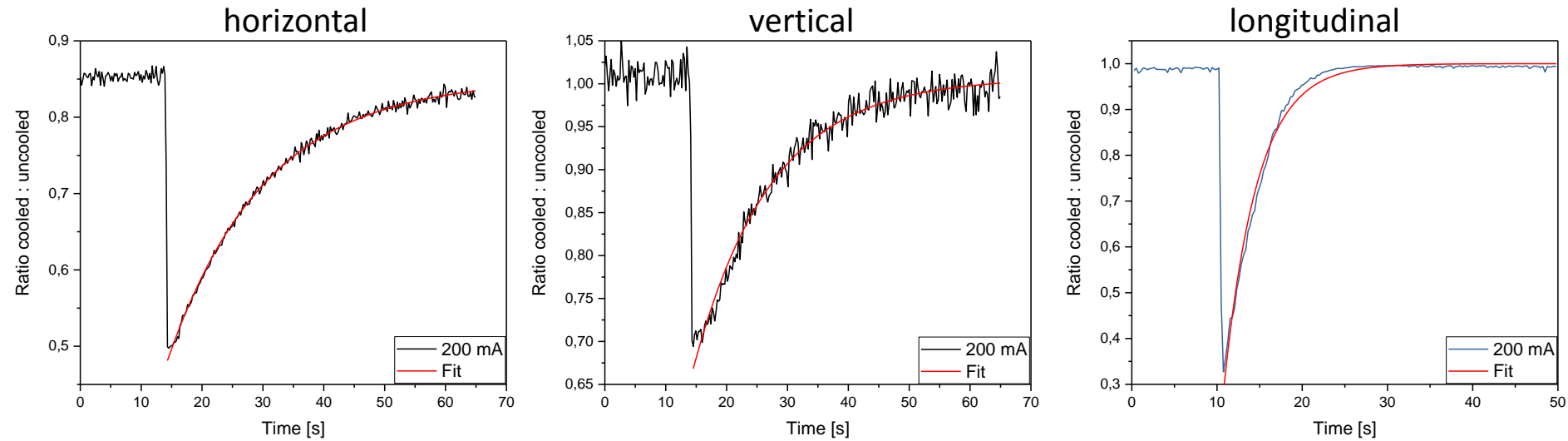
$I_{\text{cool}} = 200 \text{ mA}$



$I_{\text{cool}} = 800 \text{ mA}$



Kühlzeiten in allen 3 Ebenen



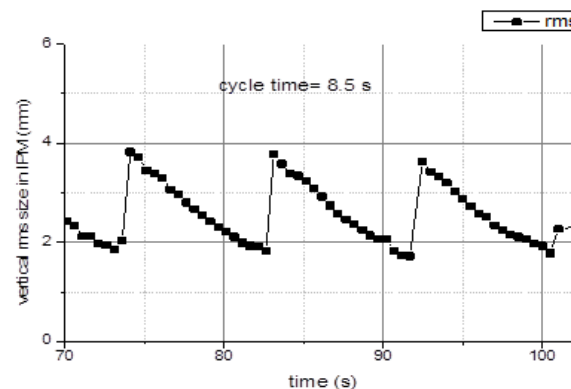
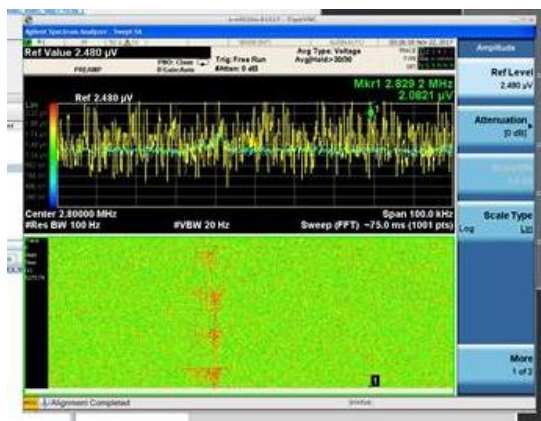
$$\tau_{cool} \propto 1/I_e \text{ wie erwartet}$$

Longitudinale Kühlung ist schneller als transversale Kühlung

- SIS: - Bedienprogramm wird entwickelt
- ESR: - Bedienprogramm wird auf Basis von SIS Programm erstellt
 - Kathode wird getauscht
 - Kühler muss wieder zusammengebaut, ausgeheizt, konditioniert werden



- CRYRING: - November 2017 systematische „standalone“ Inbetriebnahme (nur Elektronenstrahl)
→ Einstellungen optimiert auf maximalen Strom im Kollektor und minimalen Verluststrom; verschiedene Spannungen und Magnetfelder
- November/ Dezember 2017: Kühlung mit gespeichertem Strahl



- bis August 2018: Änderung des Kühlerbetriebs in gerampten Modus

- Bei GSI gibt es aktuell 3 Elektronenkühler
- Aufgabe der Strahlkühlung ist die Reduktion der Emittanz und Impulsverbreiterung des Ionenstrahls => Verlängerung der Strahllebensdauer
- Die Elektronenkühlung funktioniert aufgrund von Impulsübertrag zwischen Elektronen und Ionen
- In Speicherringen bestimmt die Kühlerspannung die Strahlenergie

- Dank an C. Dimopoulou, M. Steck und D. Winters für Folien und Fotomaterial