

## DESY BBS–2018 Travemünde 19.-22.02.2018

### Magnete, Modellierung, Vermessung, Cycling

Johann Zemella (MPY) & Mathias Vogt (MFL)

- Motivation : Strahloptik und Magnete
- Modellierung: Hysterese & Massage-Cycle
- Magnetvermessung
- Modellimplementation bei FLASH





Motivation (2) : Schlussfolgerung

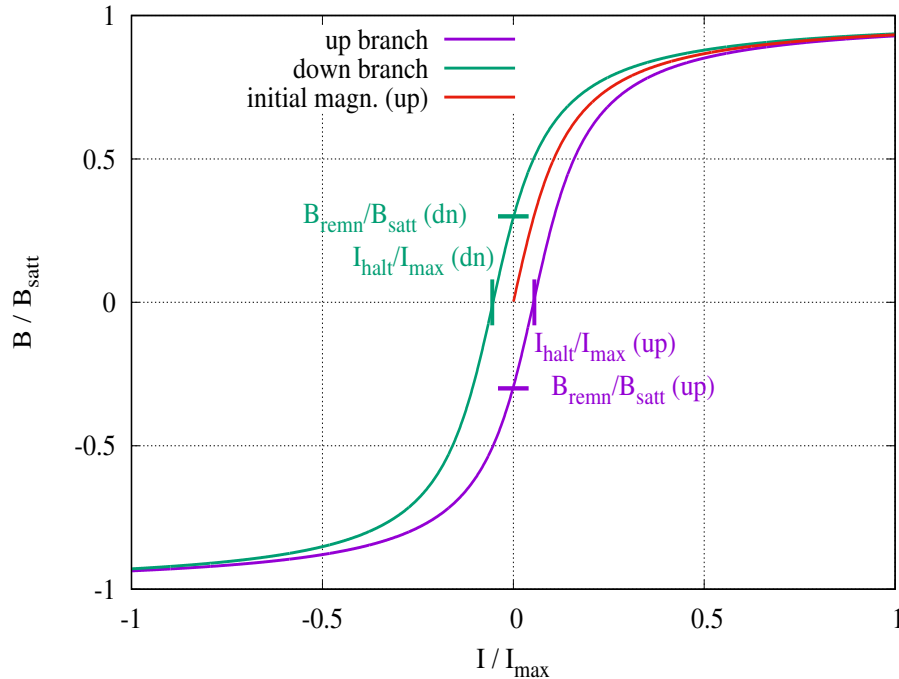
Um zu verstehen, was ein **Magnet mit dem Strahl** macht ( $\phi, \kappa$ ), muss man die Geometrie (Länge  $L$ ), das “Feld” ( $B, g$ ), und den Impuls  $p$ , genauer: die Steifigkeit kennen.

Dabei ist  $p = E \sqrt{1 - \frac{m^2}{E^2}} = E\beta_L \approx$  (für  $e^\pm$  sehr schnell)  $\rightarrow E$  !

Aber wo bleibt hier der **Magnetstrom  $I$**  ???

## Feld vs. Strom : Hysterese

- **Schön wäre eine Kalibrationsfunktion**, z.B.  $B(I)$ , oder  $g(I)$  ...
- ... **Iss sich nich !!!**  
Das **“Feld”** hängt von der **Historie** des **Stroms** ( $I$ ) ab !!!



- Wenn der Magnet “entmagnetisiert” war:  
→ **Neukurve (aufwärts)**  
→ **[\*]** bis in Sättigung ↑  
→ danach **abwärts (down branch)**  
→ bis in Sättigung ↓  
→ danach **aufwärts (up branch)**  
→ goto **[\*]**
- kommt “nie” wieder auf die **Neukurve!**

## Feld vs. Strom : Hysterese (2)

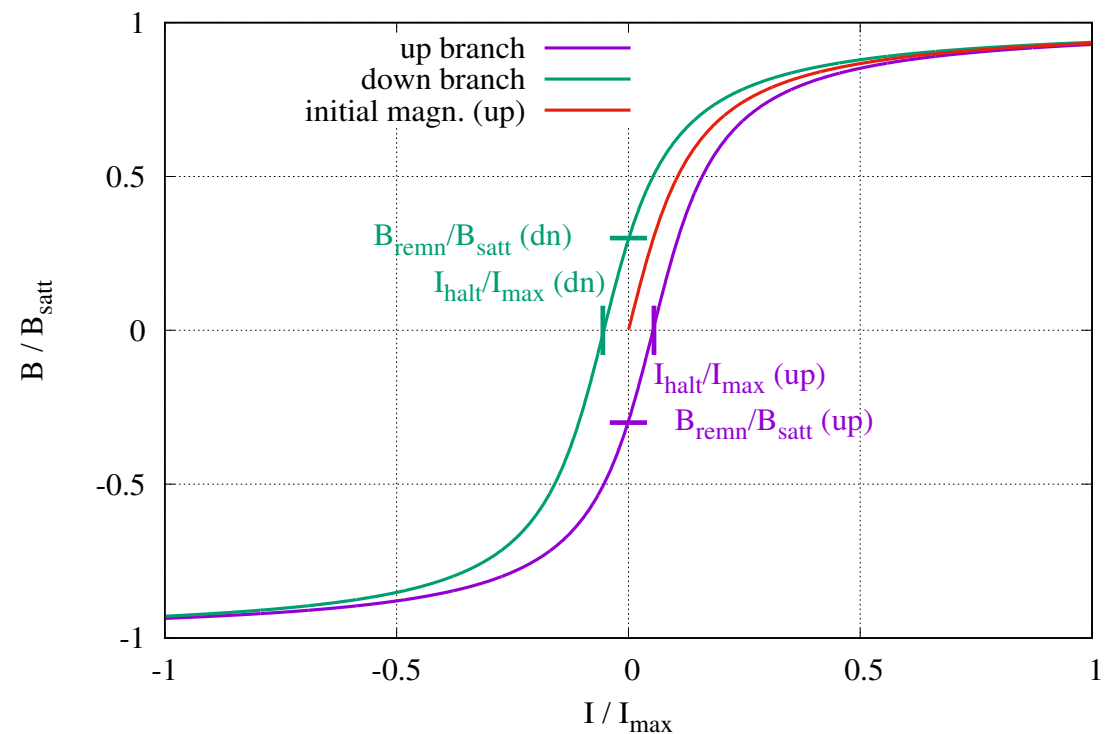
- ... und wenn man **nicht jedes mal in Sättigung fährt**, landet man in einem undefinierten Zustand (**“entcycled”**), der **bestenfalls** irgendwo **zwischen** der **down branch** und der **up branch** liegt! → Shazbot!!
- Glücklicherweise:  
wenn man den cycle immer brav durchfährt:
- gibt es **zwei ein-eindeutige** Funkt.  $B_{\text{up}}(I)$ ,  $B_{\text{dn}}(I)$  mit ihren **Inversen**  $I_{\text{up}}(B)$  &  $I_{\text{dn}}(B)$
- mit (siehe plot →):

$$B_{\text{remn}}^{(\text{up})} := B_{\text{up}}(0),$$

$$B_{\text{remn}}^{(\text{dn})} := B_{\text{dn}}(0),$$

$$I_{\text{halt}}^{(\text{up})} := I_{\text{up}}(0),$$

$$I_{\text{halt}}^{(\text{dn})} := I_{\text{dn}}(0)$$



## Hysterese ↔ Massage–Cycle

- Die **remanenten Felder**  $B_{\text{remn}}^{(\text{up})}$  &  $B_{\text{remn}}^{(\text{dn})}$  sowie die **Halteströme**  $I_{\text{halt}}^{(\text{up})}$  &  $I_{\text{halt}}^{(\text{dn})}$  hngen stark von der **Geometrie** und dem **verwendeten Eisen** ab.
  - Es muss gelten:  $B_{\text{up}}(I) = -B_{\text{dn}}(-I) \forall I$ ,  
insbes.:  $B_{\text{remn}}^{(\text{up})} = -B_{\text{remn}}^{(\text{dn})}$  &  $I_{\text{halt}}^{(\text{up})} = -I_{\text{halt}}^{(\text{dn})}$
- ← sonst enthält der Elektromagnet irgendwelche permanent-Magneten **oder** er wurde nicht korrekt demagnetisiert / gecycled! (gecyclet?)
- überhaupt: das ganze “Gecycle” funktioniert am besten, wenn die Magnete wirklich in Sättigung gefahren werden, d.h.  $I_{\text{max}}$  nicht zu klein bemessen ist:
    - PETRA: 7/8-Magnete für 20 GeV ausgelegt.  
Können nur noch bis knapp über 6GeV erregt werden :-)
    - FLASH: 300 A Magnete können z.T. nur mit  $\pm 60$  A gefahren werden :-)
    - XFEL ????
    - Teilweise Abhilfe: mehrfach ( $n \gg 1$ ) den zu engen cycle fahren!
  - Zurück zur **Neukurve** durch de–Gaussen := ganz oft mit exponentiell abfallender Amplitude cyclen.

## Die Magnetlänge $L$

- zur Erinnerung:

Brennkraft  $\kappa = gL \frac{e}{p}$

- und was ist jetzt  $L$ ?

→ Jochlänge?

→ Einbaulänge?

- Nej!

Es gibt versch. Modelle

f.d. **magn. Länge  $L$** :

1.: "effektive Länge"

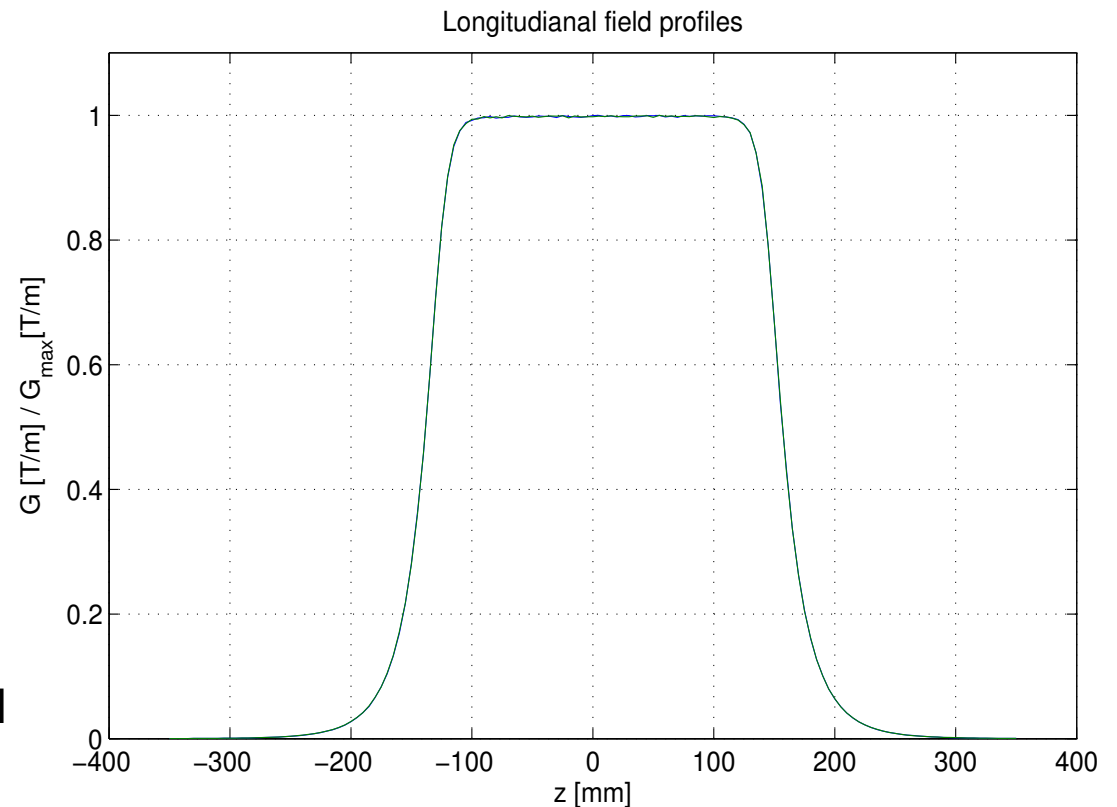
$$l_{\text{eff}} := \frac{1}{g_{\text{max}}} \int_{-\infty}^{+\infty} g(s) ds$$

2.: "Steffen Länge":

Korrektur zu  $l_{\text{eff}} \rightarrow l_0$  und

$g \rightarrow gr_0$

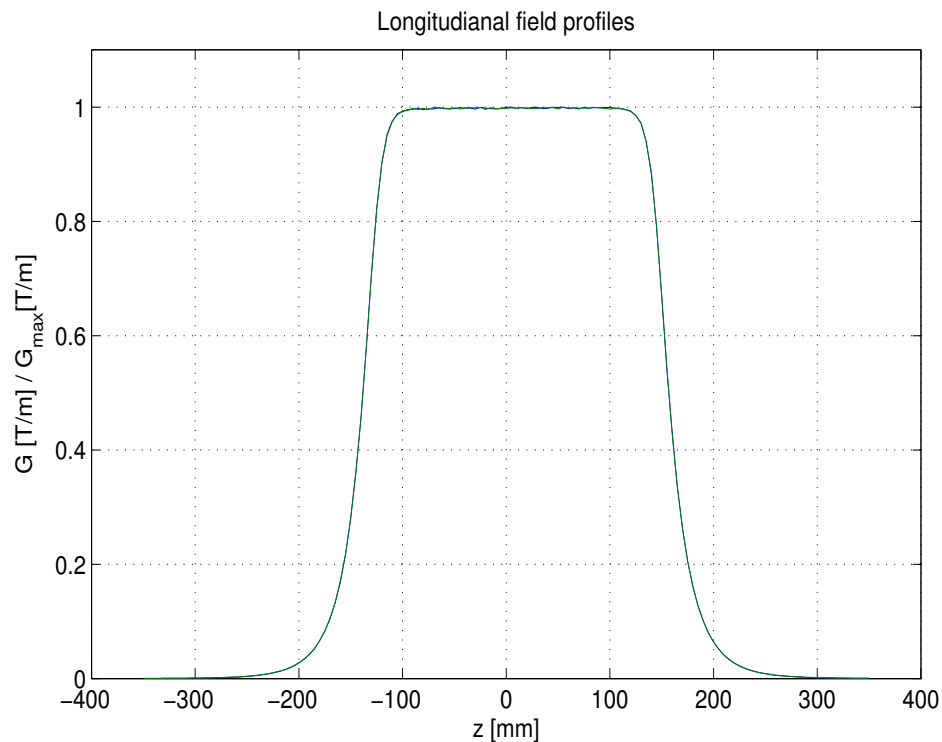
—	$I = 20 \text{ A}; G_{\text{max}}[\text{T/m}] = 2.7387; l_{\text{eff}}[\text{m}] = 0.30454; l_0[\text{m}] = 0.31766; r_0 = 0.95868$
—	$I = 150 \text{ A}; G_{\text{max}}[\text{T/m}] = 5.5588; l_{\text{eff}}[\text{m}] = 0.30464; l_0[\text{m}] = 0.31773; r_0 = 0.9588$



## Die Magnetlänge $L$ (2)

### Long. Feldprofile von Quad TQD:

<span style="color: blue;">—</span>	$I = 20 \text{ A}; G_{\text{max}} [\text{T/m}] = 2.7387; l_{\text{eff}} [\text{m}] = 0.30454; l_0 [\text{m}] = 0.31766; r_0 = 0.95868$
<span style="color: green;">—</span>	$I = 150 \text{ A}; G_{\text{max}} [\text{T/m}] = 5.5588; l_{\text{eff}} [\text{m}] = 0.30464; l_0 [\text{m}] = 0.31773; r_0 = 0.9588$



← jeweils 1 long. Feldprofil  $g(s)$  für  $I = 20 \text{ A}$ ,  $150 \text{ A}$ .

→ Wie man sieht: wenn er Magnet was taugt, und nicht stark in Sättigung ist, hängt d. Profil ( $\rightarrow l_{\text{eff}}$ ,  $l_0, \dots$ ) nicht stark vom Strom  $I$  ab.

- In Sättigung oder bei Schrott-Magneten ev. schon!



## MagnetKalibrationsDaten : Common /Wisdom/

- Für jeden Magnet-Typ (e.g. TQA, TQG70, TDB, Septum, TCA40S, ...) braucht man (als **Minimalstandard!**) :
  1. **long. Feldprofil** zur Bestimmung von  $\int B dl$ ,  $l_{\text{eff}}$ ,  $l_0$ , etc.  
— mindestens für einen relevanten Strom
  2. **Hysteresekurve**, kompatibel zum **verwendeten cycle** und dem **verwendeten Strombereich** ( $\pm I_{\text{max}}$ ). Selbstverständlich beide branches!  
→  $n$  verschiedene cycles oder Strombereiche  $\Rightarrow n$  **Hysteresekurven!**
  3. **Abschätzung der statistischen Streuung** der Daten über die Magnete des Types.
  4. **Qualitätskontrolle**: wiederhole die Messungen, wenn neue Magnete des “gleichen” **Typs** zu einem **späteren Zeitpunkt** / von einem **anderen Hersteller** bestellt werden.
- U.U. reicht obiges nicht aus, aber:  
darunter macht's definitiv **keinen** Sinn !!

### Haben wie jetzt “alles” ???

- Hysteresekurven für **jeden** Magnet-  $\otimes$  cycle–Typ
- $B_{\text{up}}$  &  $B_{\text{dn}}$  bzw,  $g_{\text{up}}$  &  $g_{\text{dn}}$
- longitudinales Feldprofil (für ein paar relevante Ströme)
- $l_{\text{eff}}$ ,  $l_0$ ,  $r_0$  — hoffentlich unabhängig von  $I$ !
- **Das genaue  $p$ - bzw.  $E$ –Profil über die Maschine** (oder die Rampe)
- Synchrotron : relativ einfach  $\leftarrow p \equiv p(B_{\text{up/dn}}(I))$
- LINAC: schwierig zw. den cavities/Modulen...
- ⇒ **“Alles”** heißt  $B/g$ ,  $L$ , **und**  $p$  !
- Nicht vergessen:  $\phi/e = \frac{B_{\text{up/dn}}(I) L}{p}$  &  $\kappa/e = \frac{g_{\text{up/dn}}(I) L}{p}$
- Jetzt können wir jeden Magneten im Lattice / in der Optik verstehen.

## Modellierung der Hysterese–Cycle bei FLASH

- Alle\* Quads: bipolarer cycle:  
Injektor: Setzwert immer **down**  
linac/beamlines:  
von 0A → Setzwert (**up/down**)
- Parametrisierung des cycle:  
2× **5ter Ordnung** Polynome

- $B_{\text{up}}(I) :=$   
 $a_0 + a_1 I + a_2 I^2 + a_3 I^3 + a_4 I^4 + a_5 I^5$

- $B_{\text{dn}}(I) :=$   
 $-a_0 + a_1 I - a_2 I^2 + a_3 I^3 - a_4 I^4 + a_5 I^5$

$$\Rightarrow B_{\text{up}}(I) = -B_{\text{dn}}(-I)$$

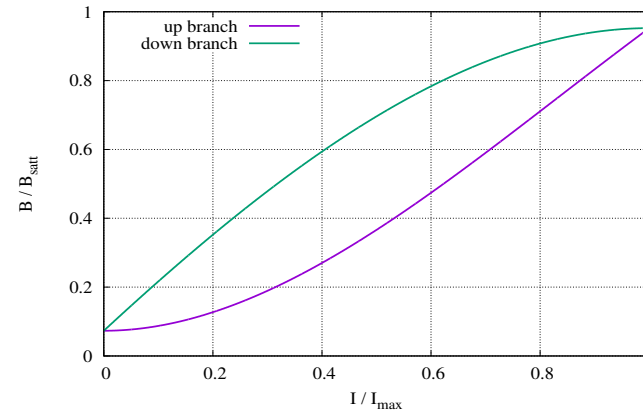
- V.Balandin: Fit–Koeff's erfüllen

$$B_{\text{up}}(I_{\text{max}}) = B_{\text{dn}}(I_{\text{max}})$$

- Alle<sup>o</sup> Dipole: unipolarer cycle  
Setzwerte anfahren wie Quads
- Die Punktsymmetrie der branches nützt hier nix, weil man das Vorzeichen des Stroms ja nicht wechseln darf/kann!

⇒ 2 **unabhängige** Polynome **5ter Ordnung**

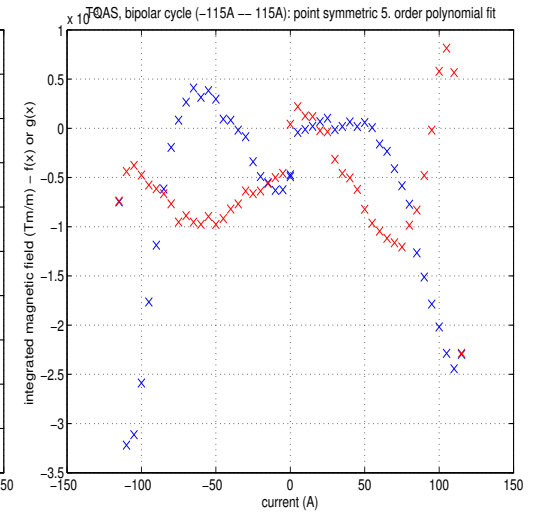
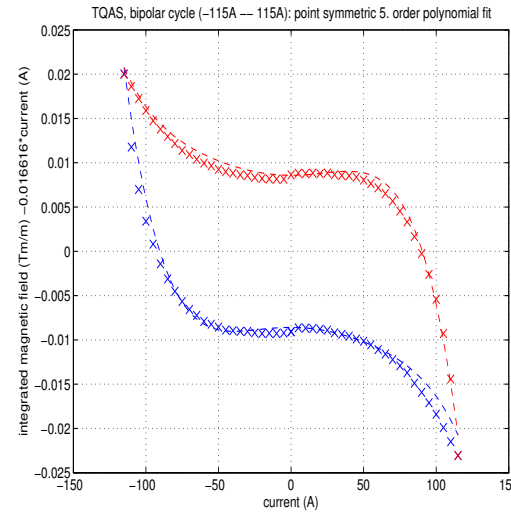
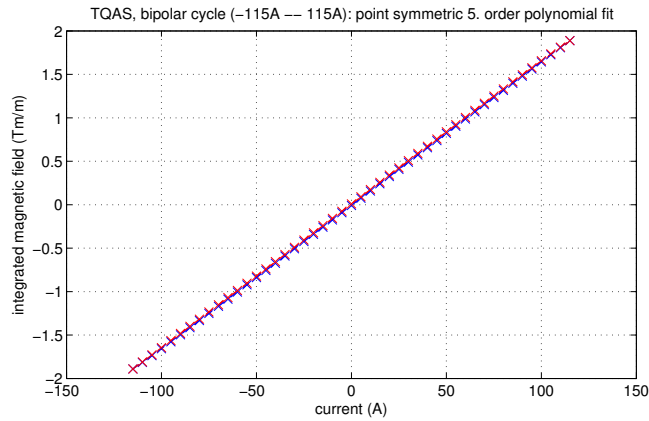
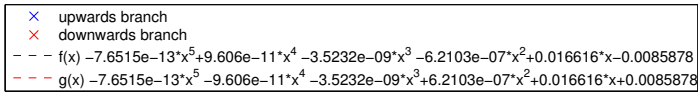
- XFEL: Parametrisierung = FLASH  
/ Cycle = anders!



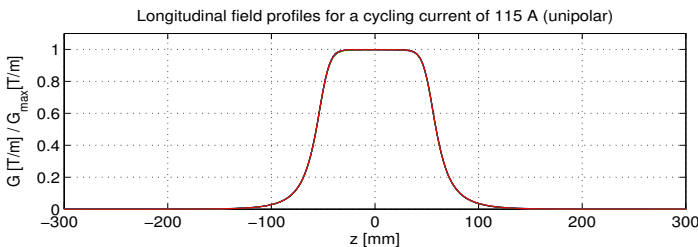
\*: bis auf Q2/5ECOL und Q4ECOL. Warum????

<sup>o</sup>: bis auf FLASH–Fwd. Warum????

## Ein Beispiel: TQAS / ±115 A Cycle



<span style="color: blue;">—</span>	$I_+ = +100A$ : $G_{max}$ [T/m]=13.02080 ; $l_{eff}$ [m]=0.12218 ; $l_0$ [m]=0.13883 ; $r_0$ =0.88006
<span style="color: green;">—</span>	$I_+ = +100A$ : $G_{max}$ [T/m]=13.10220 ; $l_{eff}$ [m]=0.12282 ; $l_0$ [m]=0.14138 ; $r_0$ =0.86868
<span style="color: red;">—</span>	$I_+ = +075A$ : $G_{max}$ [T/m]= 9.79280 ; $l_{eff}$ [m]=0.12228 ; $l_0$ [m]=0.13947 ; $r_0$ =0.87673
<span style="color: cyan;">—</span>	$I_+ = +075A$ : $G_{max}$ [T/m]= 9.89790 ; $l_{eff}$ [m]=0.12284 ; $l_0$ [m]=0.14232 ; $r_0$ =0.86310
<span style="color: magenta;">—</span>	$I_+ = +050A$ : $G_{max}$ [T/m]= 6.56240 ; $l_{eff}$ [m]=0.12233 ; $l_0$ [m]=0.14044 ; $r_0$ =0.87109
<span style="color: yellow;">—</span>	$I_+ = +050A$ : $G_{max}$ [T/m]= 6.62560 ; $l_{eff}$ [m]=0.12307 ; $l_0$ [m]=0.14389 ; $r_0$ =0.85531
<span style="color: black;">—</span>	$I_+ = +025A$ : $G_{max}$ [T/m]= 3.32130 ; $l_{eff}$ [m]=0.12241 ; $l_0$ [m]=0.14263 ; $r_0$ =0.85822
<span style="color: blue;">—</span>	$I_+ = +025A$ : $G_{max}$ [T/m]= 3.35110 ; $l_{eff}$ [m]=0.12328 ; $l_0$ [m]=0.14622 ; $r_0$ =0.84310
<span style="color: green;">—</span>	$I_- = -100A$ : $G_{max}$ [T/m]=12.87480 ; $l_{eff}$ [m]=0.12219 ; $l_0$ [m]=0.13820 ; $r_0$ =0.88413
<span style="color: red;">—</span>	$I_- = -100A$ : $G_{max}$ [T/m]=12.93500 ; $l_{eff}$ [m]=0.12267 ; $l_0$ [m]=0.13871 ; $r_0$ =0.88441



- Halber TQA (neu für UBC2!)

← Feldprofil wunderbar skalierbar mit Strom

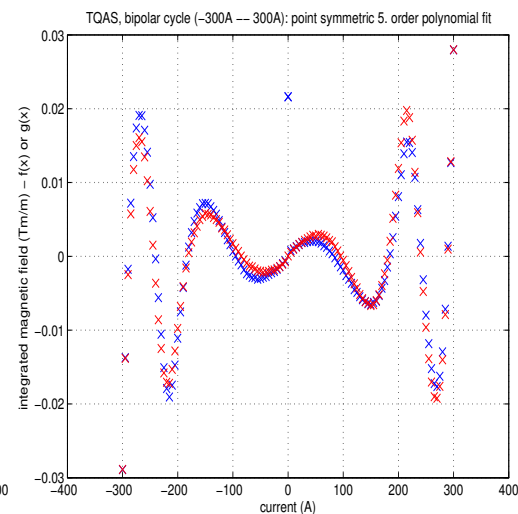
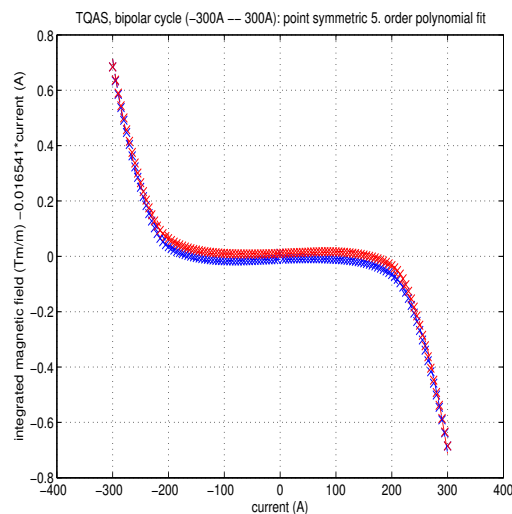
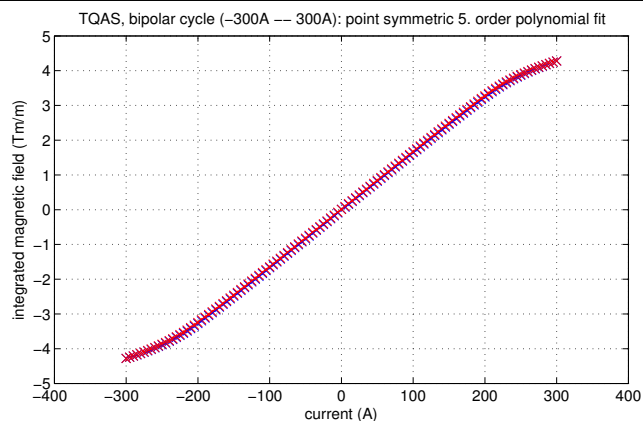
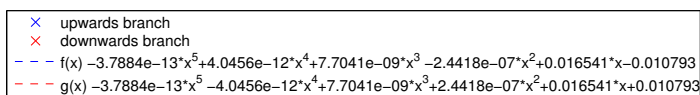
↙ kaum Remanenz, ziemlich lineare Kurven

⇒ kaum Sättigung ⇒ cycle nicht ideal

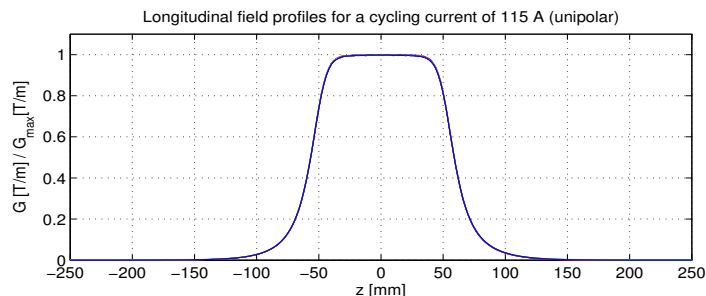
↑ integr. Fitfehler  $< 1.0 \cdot 10^{-3}$  Tm/m

innerhalb von  $\pm 80$  A

## Noch 'n Beispiel: TQAS / ±300 A Cycle



<span style="color: blue;">—</span>	$I_+ = +300A$ : $G_{max}$ [T/m]=33.75650 ; $I_{eff}$ [m]=0.12182 ; $I_0$ [m]=0.13657 ; $r_0$ =0.89200
<span style="color: green;">—</span>	$I_- = -300A$ : $G_{max}$ [T/m]=33.88910 ; $I_{eff}$ [m]=0.12230 ; $I_0$ [m]=0.13824 ; $r_0$ =0.88470
<span style="color: red;">—</span>	$I_+ = +200A$ : $G_{max}$ [T/m]=33.75650 ; $I_{eff}$ [m]=0.12182 ; $I_0$ [m]=0.13657 ; $r_0$ =0.89200
<span style="color: cyan;">—</span>	$I_- = -200A$ : $G_{max}$ [T/m]=25.87360 ; $I_{eff}$ [m]=0.12248 ; $I_0$ [m]=0.13899 ; $r_0$ =0.88117
<span style="color: magenta;">—</span>	$I_+ = +100A$ : $G_{max}$ [T/m]=13.07470 ; $I_{eff}$ [m]=0.12221 ; $I_0$ [m]=0.13723 ; $r_0$ =0.89060
<span style="color: yellow;">—</span>	$I_- = -100A$ : $G_{max}$ [T/m]=13.18280 ; $I_{eff}$ [m]=0.12270 ; $I_0$ [m]=0.13986 ; $r_0$ =0.87735
<span style="color: blue;">—</span>	$I_+ = +300A$ : $G_{max}$ [T/m]=33.57580 ; $I_{eff}$ [m]=0.12192 ; $I_0$ [m]=0.13698 ; $r_0$ =0.89012
<span style="color: blue;">—</span>	$I_- = -300A$ : $G_{max}$ [T/m]=33.76390 ; $I_{eff}$ [m]=0.12216 ; $I_0$ [m]=0.13746 ; $r_0$ =0.88869



- Fahrbereich ± 300 A

← Feldprofil wunderbar skalierbar mit Strom

↙ kaum Remanenz, aber: Sättigung

⇒ cycle kann Historie auslöschen (gut!)

↑ integr. Fitfehler <  $1.0 \cdot 10^{-2}$  Tm/m

innerhalb von ±150 A

## Die tpkc2 i / tpic2k Utilities

- Stand-alone shell Programme
- in /home/ttflinac/bin/
- tpkc2i heißt **Type-Impuls(P)-KWert-CType-to(2)-Strom(I)** und konvertiert  $k$  oder  $kL$  nach  $I$  (in A)
- tpic2k heißt **Type-Impuls(P)-Strom(I)-CType-to(2)-KWert** und konvertiert  $I$  (in A) nach  $k$  oder  $kL$
- (main)-Dipol:  
 $\phi = 2 \arcsin(L/2/\rho)$  in **(alt)-Grad**  
 Steerer:  $\phi = k_0 L$  in **mrاد**  
 Quadrupol/Sextupol:  
 $k_1/k_2$  in **m<sup>-2</sup>/m<sup>-3</sup>**
- Aufruf (auf den **MAC** Konsolen!):  
 tpkc2i type p k cycle (return)  
 prompt\$ i  
 tpic2k type p i cycle (return)  
 prompt\$ k
- auf den **LINUX** Konsolen  
 tpkc2i → tpkc2i\_lnx  
 tpic2k → tpic2k\_lnx
- Dipole haben bis jetzt nur **eine** (=alte) Kalib.-Kurve!
- **J.Z., M.S., F.C., S.W., V.L., (...)** haben schon viele Magnete neu vermessen! Trotzdem: **work in progress!** Wir (J.Z.,M.V.) pflegen die Daten a.s.a.p ein!

## Der Magnet Middle Layer Server

- Das gleiche (wir pflegen die Daten ein wenn wir sie haben) gilt auch für den **Magnet Middle Layer Server** von Lars Fröhlich.

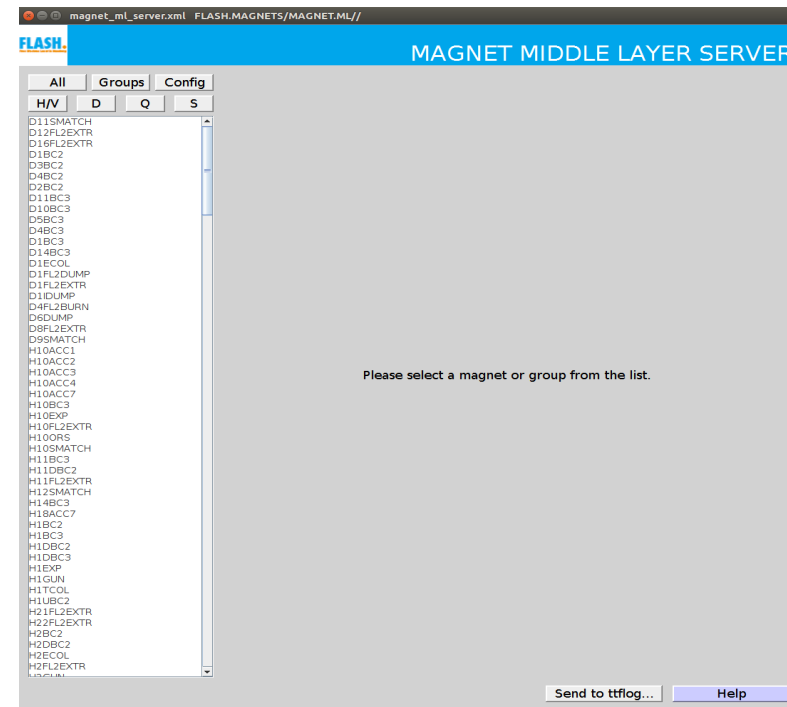
- Magnet Server?

Kommt der nicht von M.W./P. "K." B.?

**DESY-slang:** wenn DESYaner(innen) von "Magneten" sprechen meinen sie in 90% der Fälle "Power Supplies\*".

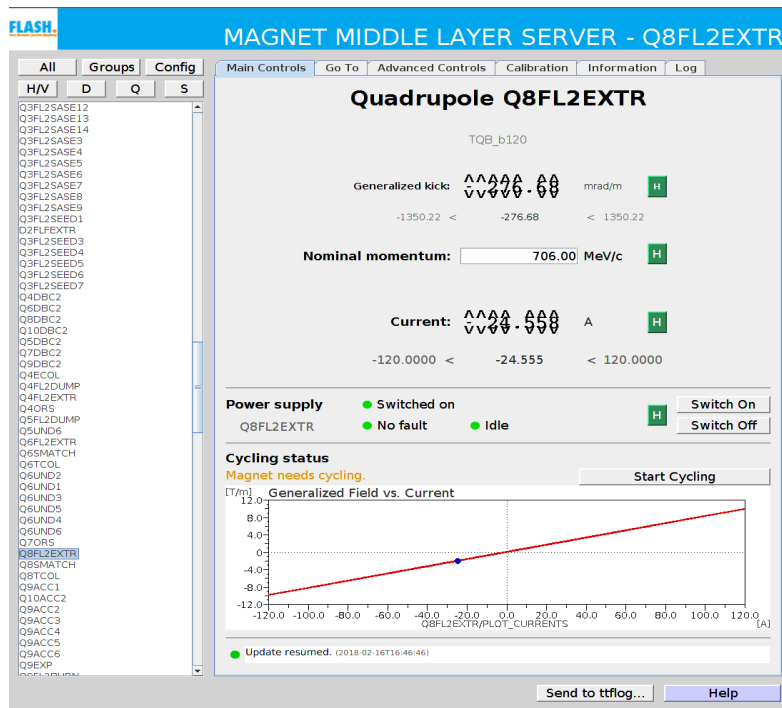
Marcus'/Karol's server müsste eigentlich: "Power Supply Server" heissen.

- Der "Magnet **Middle Layer Server**" betut tatsächlich Magnete! indem er mit dem **Magnet Server** spricht.



\*: die international übrigens "power converter" heißen:-)

## Magnet Middle Layer Server (2)

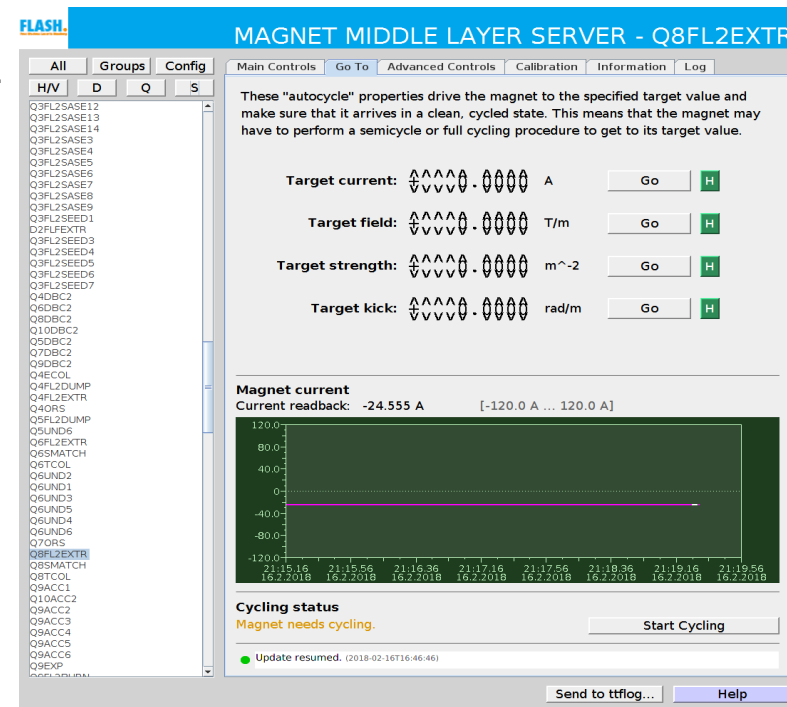


- Magnet (Q8FL2EXTR) angewählt und den MainControls tab aktiviert:
- man kann, **bei gegebenem nominalem Impuls  $p$**  den Magneten, sowohl über den  $k$ -Wert, als auch über den Strom  $I$  fahren.
- und unten sehen wie man auf der Hysteresekurve herumfährt.
- ich glaube, wenn man  $p$  ändert, bleibt (mittlerweile :-), der **Strom** gleich, und der  $k$ -Wert wird entsprechend neu berechnet.
- Das war nicht immer so :-)

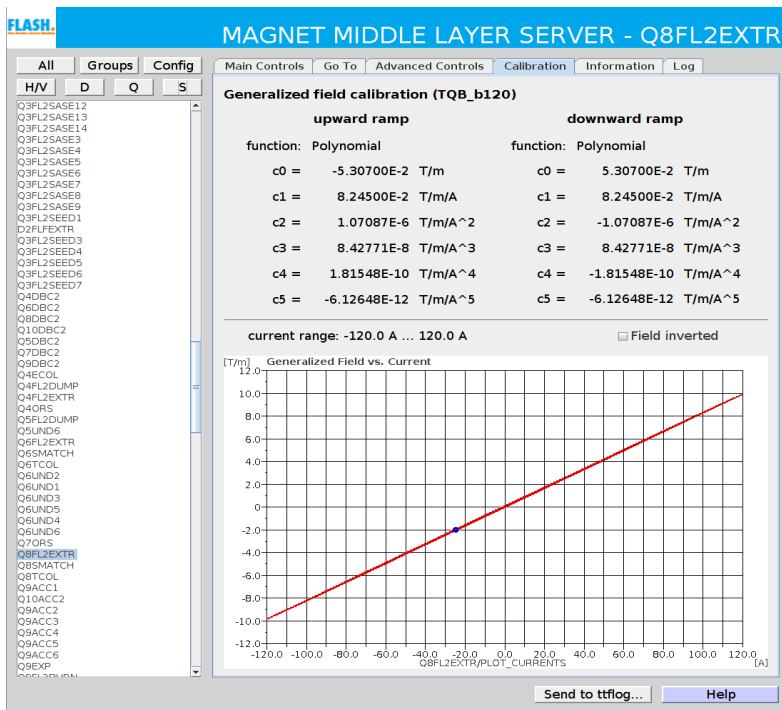


## Magnet Middle Layer Server (3)

- Man kann sich den  $k$ -Wert / **Strom** auch durch den server gemähs der **XFEL cycle Konvention** anfahren lassen...
- Davon würde ich bei **FLASH** im Moment eher abraten!!
- ...es sei denn, man weiß genau was man tut!
- ...und **ich** weiß es nicht so genau...



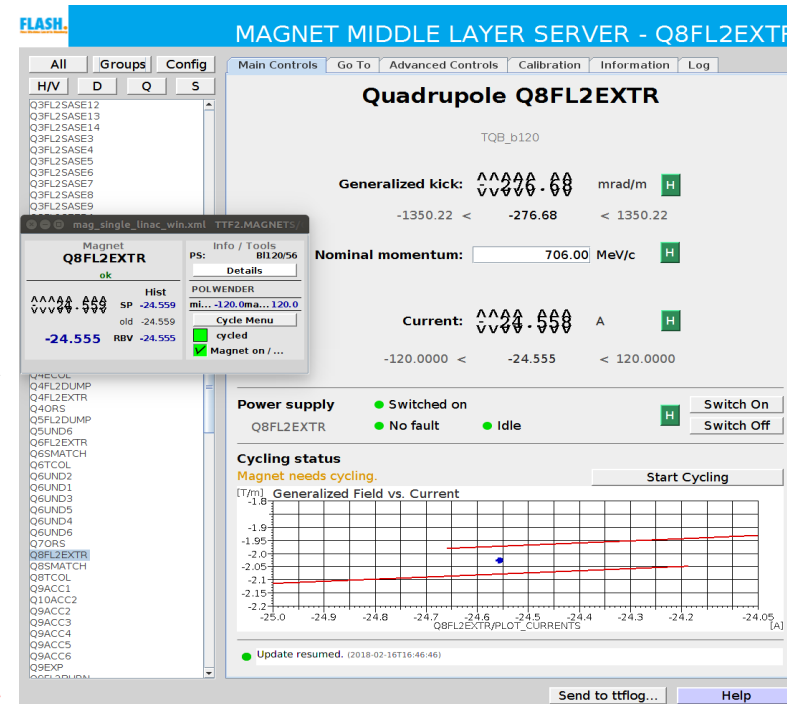
## Magnet Middle Layer Server (4)



- Mann kann sich aber auch ganz harmlos die Kalibrationsdaten anzeigen lassen.
- Sind wie gesagt konsistent mit den shell utilities.

## Magnet Middle Layer Server (5)

- Es gibt noch ein klitzekleines Problem:
- Der “MMLS” ist eigentlich XFEL software,
- und nach den XFEL Konventionen optimiert.
- Bei XFEL übernimmt er **komplett** das cycling.
- Bei FLASH machen das im Normalfall die PSCs.
- Daher kann der MMLS auch **nicht** die cycle-valid flags vom Magnet (**PS**) Server sehen.



## Zusammenfassung

- Was Magnete mit dem Strahl machen, kann man nur beurteilen wenn man das “**Feld**” und die magnetische **Länge** und den Strahl–Referenz–**Impuls** am Ort des Magneten **möglichst genau** kennt!
- Die ersten beiden Parameter erhält man durch adäquate Magnetvermessung! Den letzten durch geschickte Kombination von präziser Strahldiagnose und präzise RF–Ansteuerung/Kontrolle.
- Es gibt wieder einen **fulltime**–Physiker als Chef der Magnetmessung. Damit sollte es bei DESY-M jetzt / in naher Zukunft alle 3 **Parameter** für jeden Beschleuniger in hinreichender Präzision geben.  
— Wenn die Beteiligten sich nicht allzu beratungsresistent anstellen. . .
- Bei FLASH haben wir viele Magnete nach-vermessen, sind aber noch nicht fertig.
- Die Tools um die Daten zu nutzen, existieren bereits.
- Elektro–Magnete sind für (fast) alle Teilchen–beschleuniger/–speicher wichtig!

Vielen Dank für's Zuhören!