

Nanosekunden Bunch-Kompression für intensive Protonenstrahlen

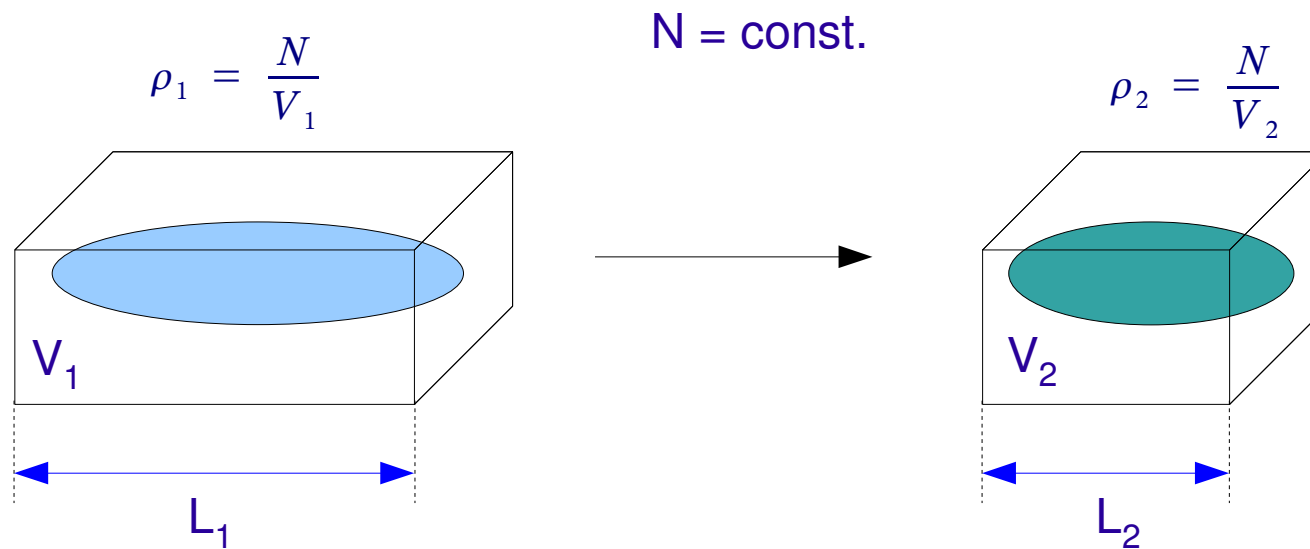
Long Phi Chau

Überblick

- Einführung:
 - Definition von Bunch-Kompression
 - Anwendungsbereiche für Bunch-Kompression
 - Anforderung für FRANZ
- Möglichkeiten der Bunch-Kompression:
 - Grundidee
 - Rebuncher-Konzept: Energiedifferenz
 - Kombination: Energie- und Wegdifferenz
- Untersuchte Geometrien:
 - 1-Dipol-System: ohne Gradienten (Moblely-Konzept)
 - 2-Dipol-System: Rechteck-Magnete mit Gradienten
 - 3-Dipol-System: Rechteck-Magnete 2 homogen und 2 mit Gradienten
 - 4-Dipol-System: Sektor-Magnete 2 homogen und 2 mit Gradienten
- Kantenfokussierung
- Numerik

Überblick

- Einführung:
 - Definition von Bunch-Kompression
 - Anwendungsbereiche für Bunch-Kompression
 - Anforderung für FRANZ
- Möglichkeiten der Bunch-Kompression:
 - Grundidee
 - Rebuncher-Konzept: Energiedifferenz
 - Kombination: Energie- und Wegdifferenz
- Untersuchte Geometrien:
 - 1-Dipol-System: ohne Gradienten (Moblely-Konzept)
 - 2-Dipol-System: Rechteck-Magnete mit Gradienten
 - 4-Dipol-System: Rechteck-Magnete 2 homogen und 2 mit Gradienten
 - 4-Dipol-System: Sektor-Magnete 2 homogen und 2 mit Gradienten
- Strahldynamik, Numerik:



Kompression:

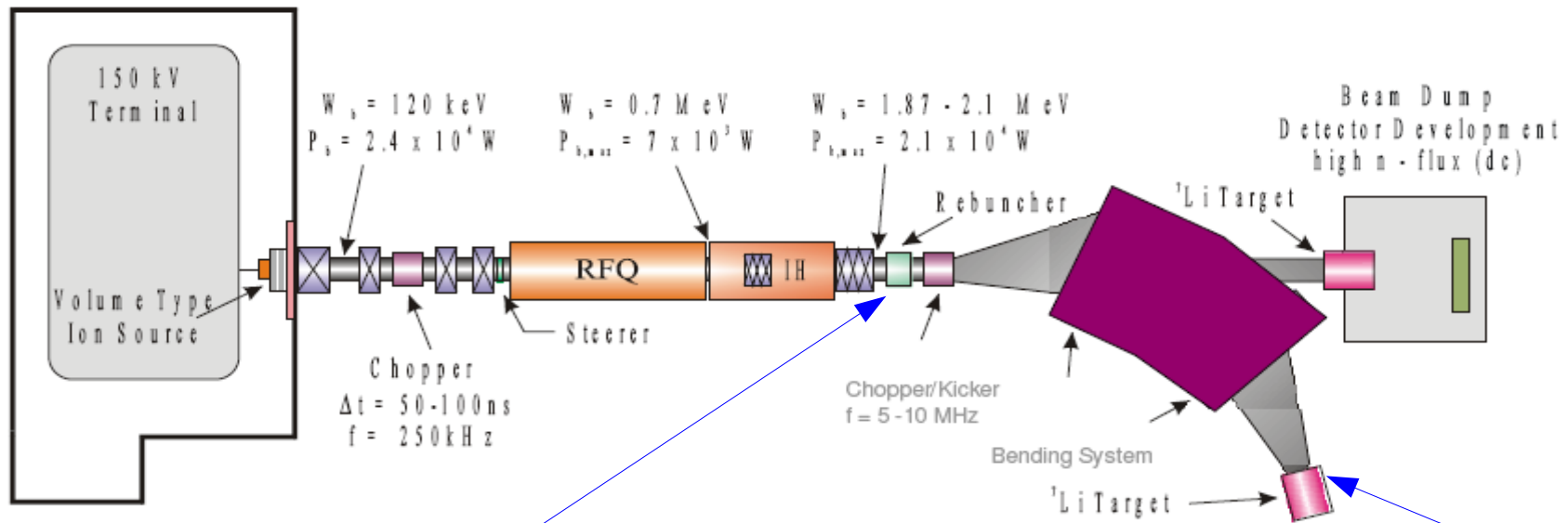
$$\kappa_V = \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{V_1}{V_2} > 1$$

longitudinale Kompression:

$$\kappa_L = \frac{L_1}{L_2} > 1$$

- **Anpassung der longitudinalen Akzeptanz für LINAC's**
 - „Free Electron Laser“ (FLASH, TESLA)
 - „Linear Collider“ (in Planung ILC)
- **Intensitätserhöhung von geladenen Strahlen:**
 - „Warm Dense Matter“
 - „Heavy Ion Fusion“
 - Treiberstrahl für intensive Neutronenquellen (FRANZ, ...)

Motivation: Anforderung von FRANZ



Zeit-Struktur

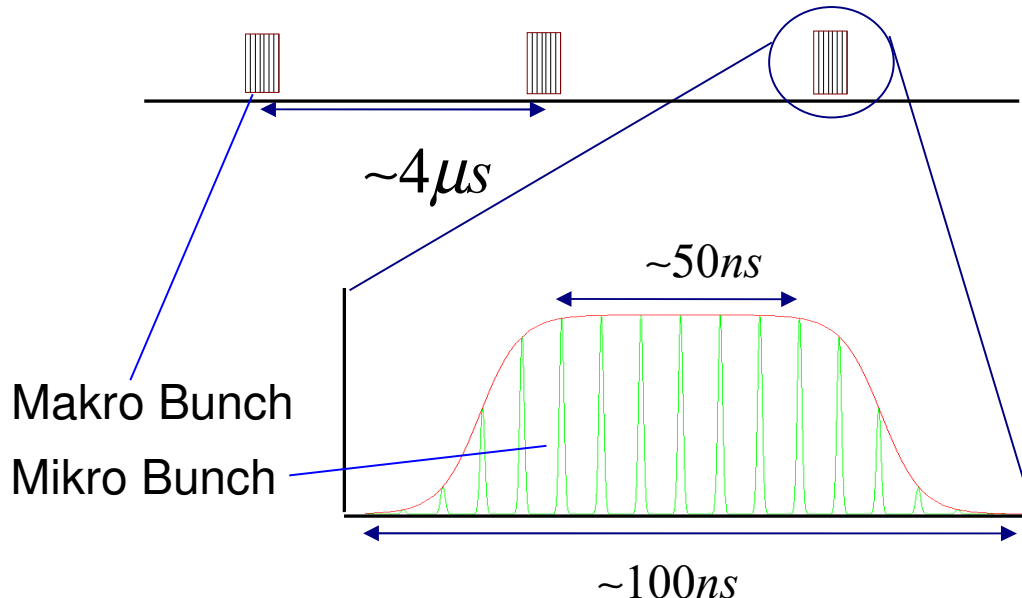
175MHz-DTL



rep.rate = 250kHz

$E \sim 2.0 \text{ MeV}$

$I = 150 \text{ mA}$



Makro Bunch

Mikro Bunch

Parameter am Target:

- $N = 9$
- $\Delta t = 1 \text{ ns} \Rightarrow \kappa_L = 50$
- $I_{\langle \text{peak} \rangle} \sim 7.5 \text{ A}$
- $Q_{\langle \text{peak} \rangle} = 9 * 0.855 \text{ nC}$
- $A < 3 \times 3 \text{ cm}^2$

Überblick

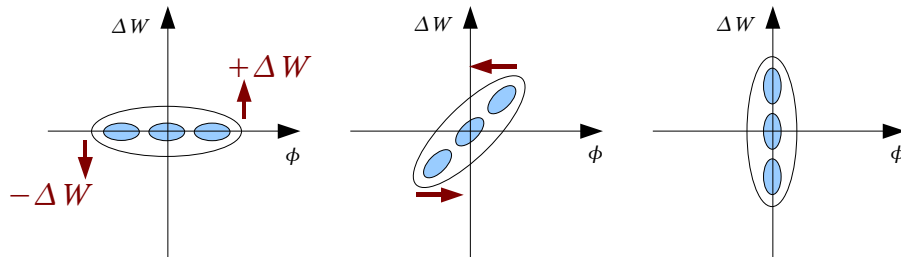
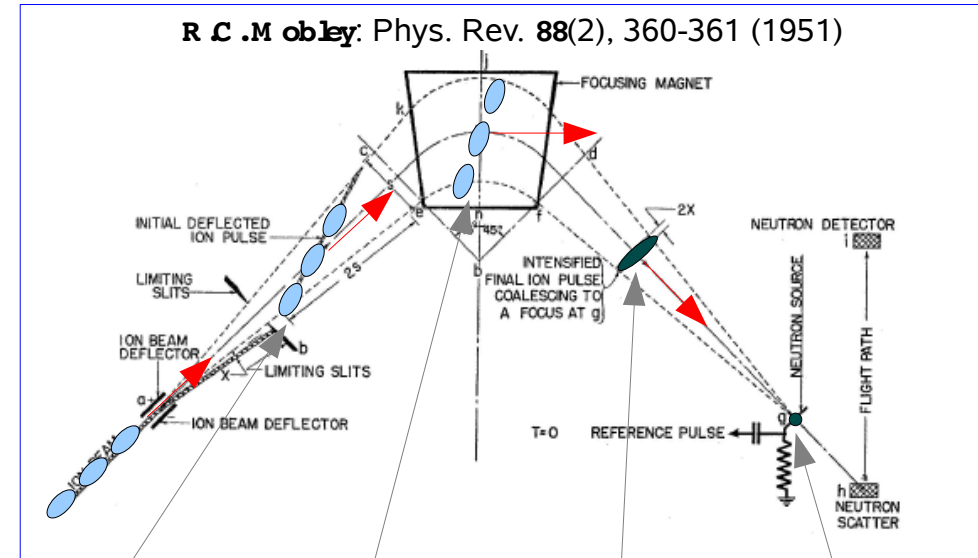
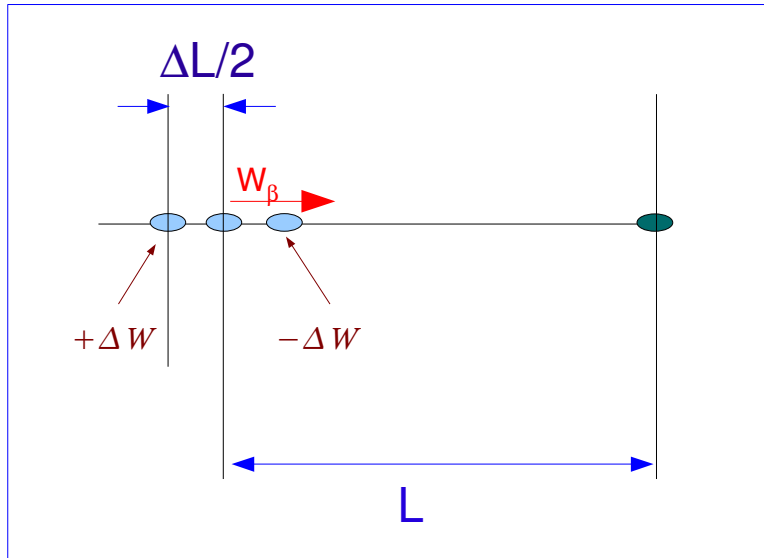
- Einführung:
 - Definition von Bunch-Kompression
 - Anwendungsbereiche für Bunch-Kompression
 - Anforderung für FRANZ
- Möglichkeiten der Bunch-Kompression:
 - Grundidee
 - Rebuncher-Konzept: Energiedifferenz
 - Kombination: Energie- und Wegdifferenz
- Untersuchte Konzepte:
 - 1-Dipol-System: ohne Gradienten (Moblely-Konzept)
 - 2-Dipol-System: Rechteck-Magnete mit Gradienten
 - 3-Dipol-System: Rechteck-Magnete 2 homogen und 2 mit Gradienten
 - 4-Dipol-System: Sektor-Magnete 2 homogen und 2 mit Gradienten
- Kanfokussierung
- Numerik

Grundideen der Bunch-Kompression

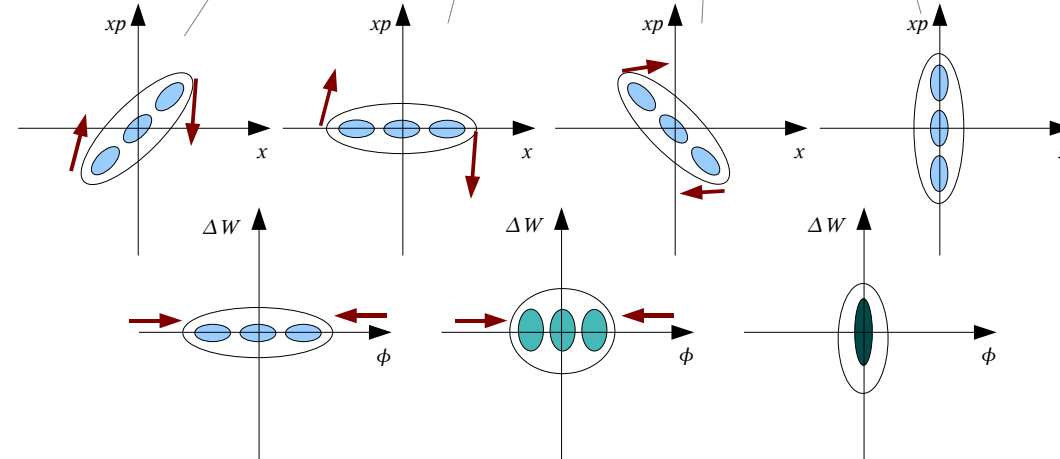
Energiedifferenz

Laufzeitunterschied

Wegdifferenz



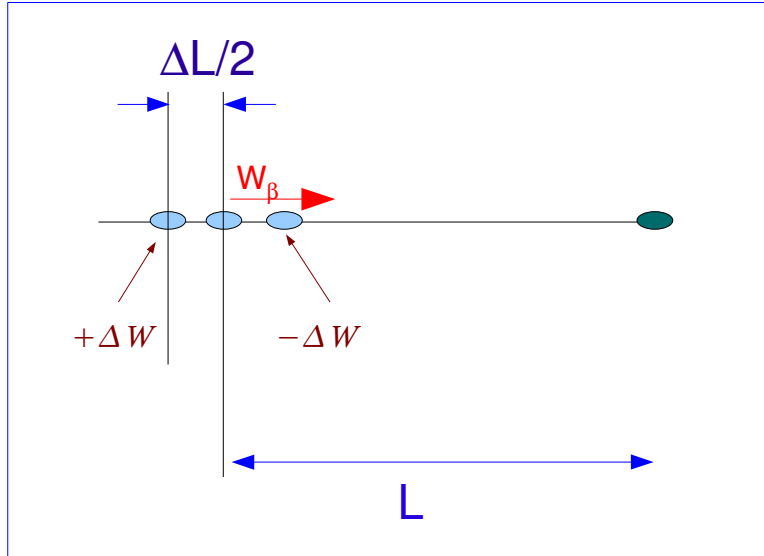
Zusätzliche Energieverschmierung



Minimale zusätzliche Energieverschmierung

Abschätzung der *minimalen* Energievariation für das erste Kompressionskonzept

(ohne Raumladung, keine intrinsische Energievariation der Mikro-Bunche)



$$\left. \begin{aligned} \gamma &= \frac{W_\beta}{E_0} + 1, \quad \beta = \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma^2}} \\ \frac{\Delta L}{2} &= (\Delta\beta \cdot c) \underbrace{\left(\frac{L}{\beta \cdot c} \right)}_{\Delta\tau} \\ \Delta W &= W_{\beta+\Delta\beta} - W_\beta \end{aligned} \right\}$$

$$\Delta W = \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2} \left(1 + \frac{\Delta L}{2L} \right)^2} - \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \right) \cdot E_0$$

$W_\beta = 2.07 [MeV]$

Sollenergie des zentralen Bunches

$\beta = 0.066$

Sollgeschwindigkeit des zentralen Bunches

$E_0 = 938.3 [MeV]$

Ruheenergie der Protonen

$\Delta L = (N-1) \cdot \beta \lambda \approx 1.0 [m]$ Länge des Makro-Bunches

$N = 9$

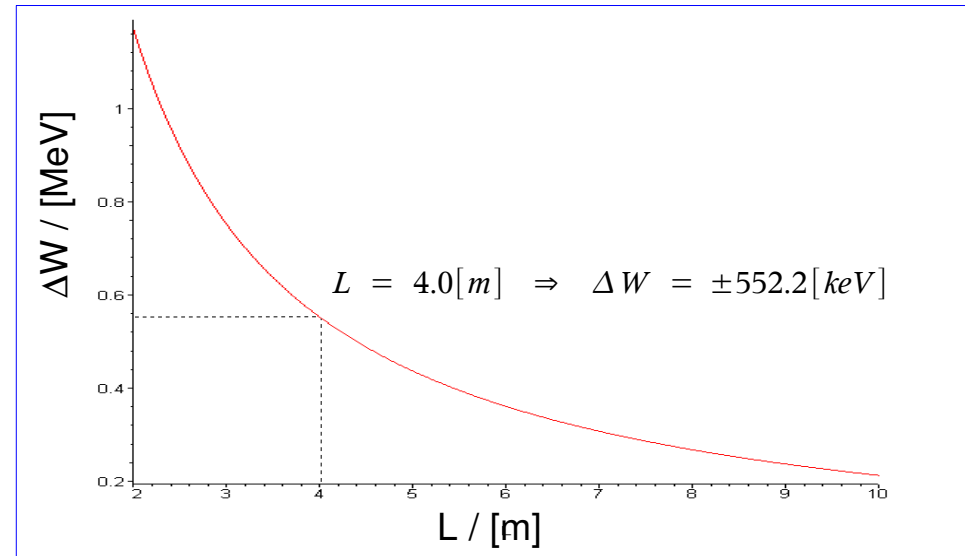
Anzahl der Bunche

$f = 175 [MHz]$

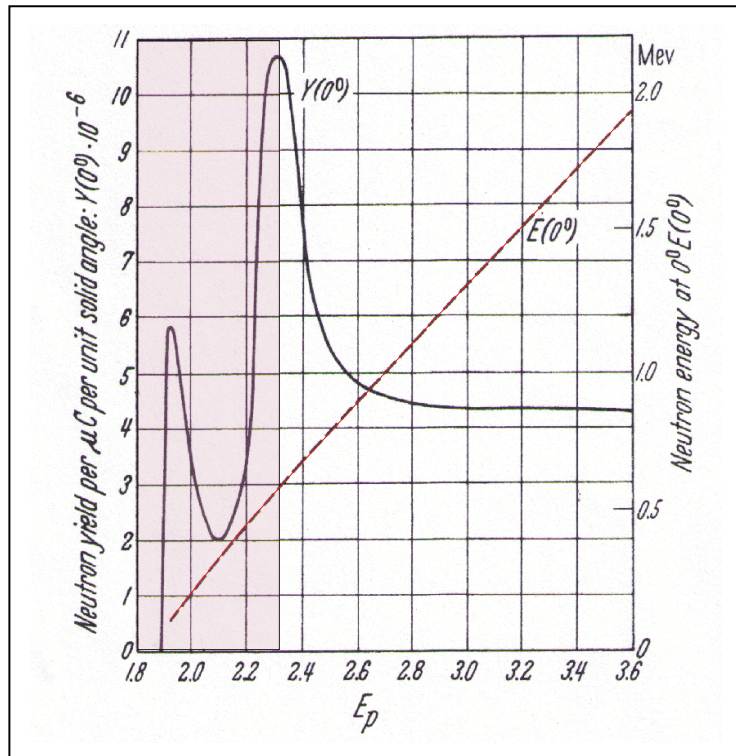
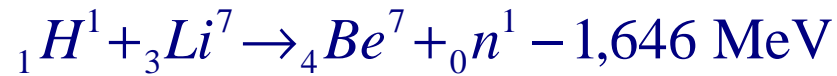
Frequenz der Mikro-Bunche

$L = 2 \dots 10 [m]$

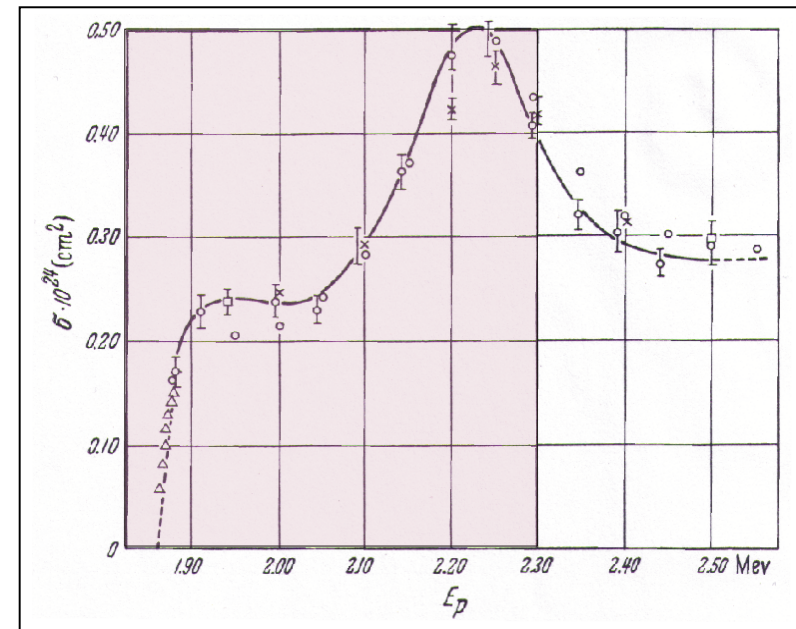
Fokusslänge



Definition einer sinnvollen Energie-Unschärfe des Protonenstrahls



Neutronen-Ausbeute in Vorwärts-Richtung.

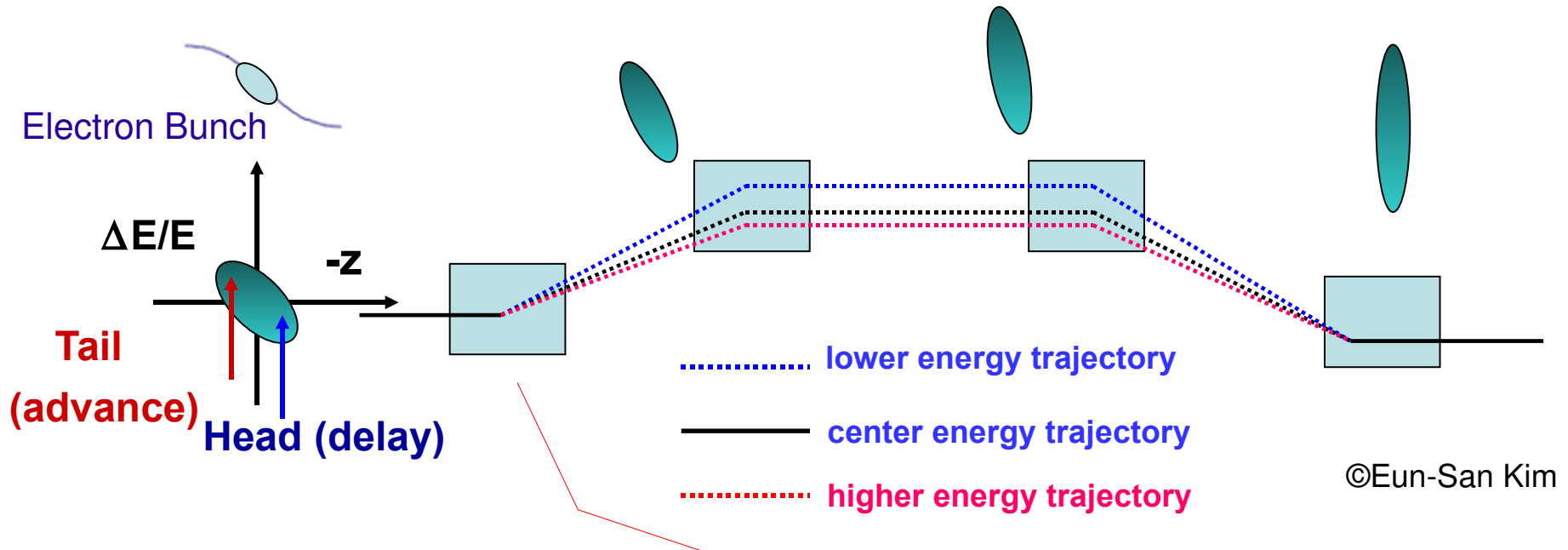


Neutronen-Produktionsquerschnitte.

=> akzeptable Energie-Unschärfe im Protonen-Strahl: $\Delta W = \pm 100[\text{keV}]$

=> Konzept der Bunch-Kompression durch Energiedifferenz ist **ungeeignet!**

1 Bunch Kompressor Konzept für den „International Linear Collider“ :



Parameter im Bunch-Kompressor :

$$E = 5 \text{ GeV} \Rightarrow \beta = 1 \text{ (Elektronen!)}$$

$$z_{\text{rms,in}} = 6 \text{ mm}$$

$$z_{\text{rms,out}} = 0.15 \text{ mm}$$

$$\kappa_L = 40$$

$$Q_{\text{Bunch}} = 3.2 \text{ nC} \Leftrightarrow N(e) = 2 \times 10^{10}$$

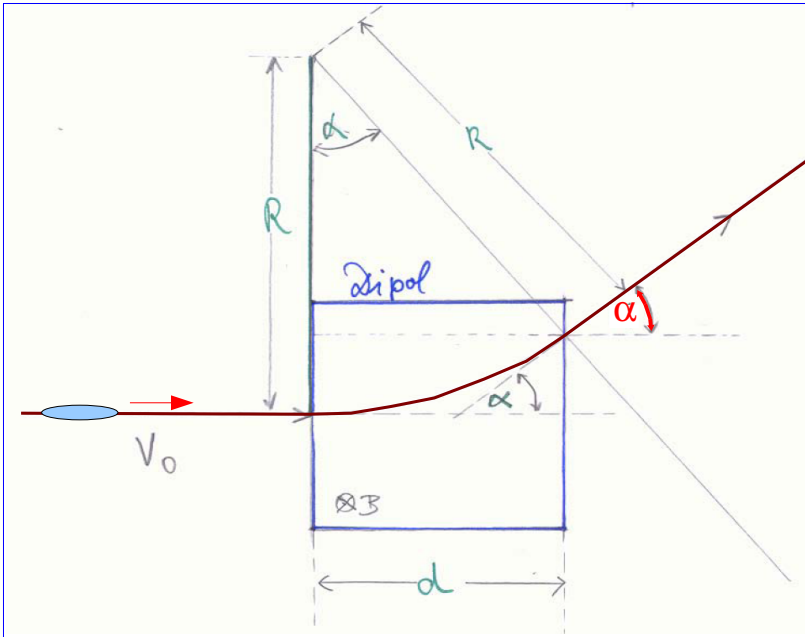
Keine Kicker notwendig => **statische** Felder

Weniger Probleme mit Raumladung

Vergleichbare Kompressionsrate

Weniger Ladung

Trajektorien-Separation durch Energievariation kombiniert mit einem Dipol



2MeV Protonen $\Rightarrow \beta = 0.065$

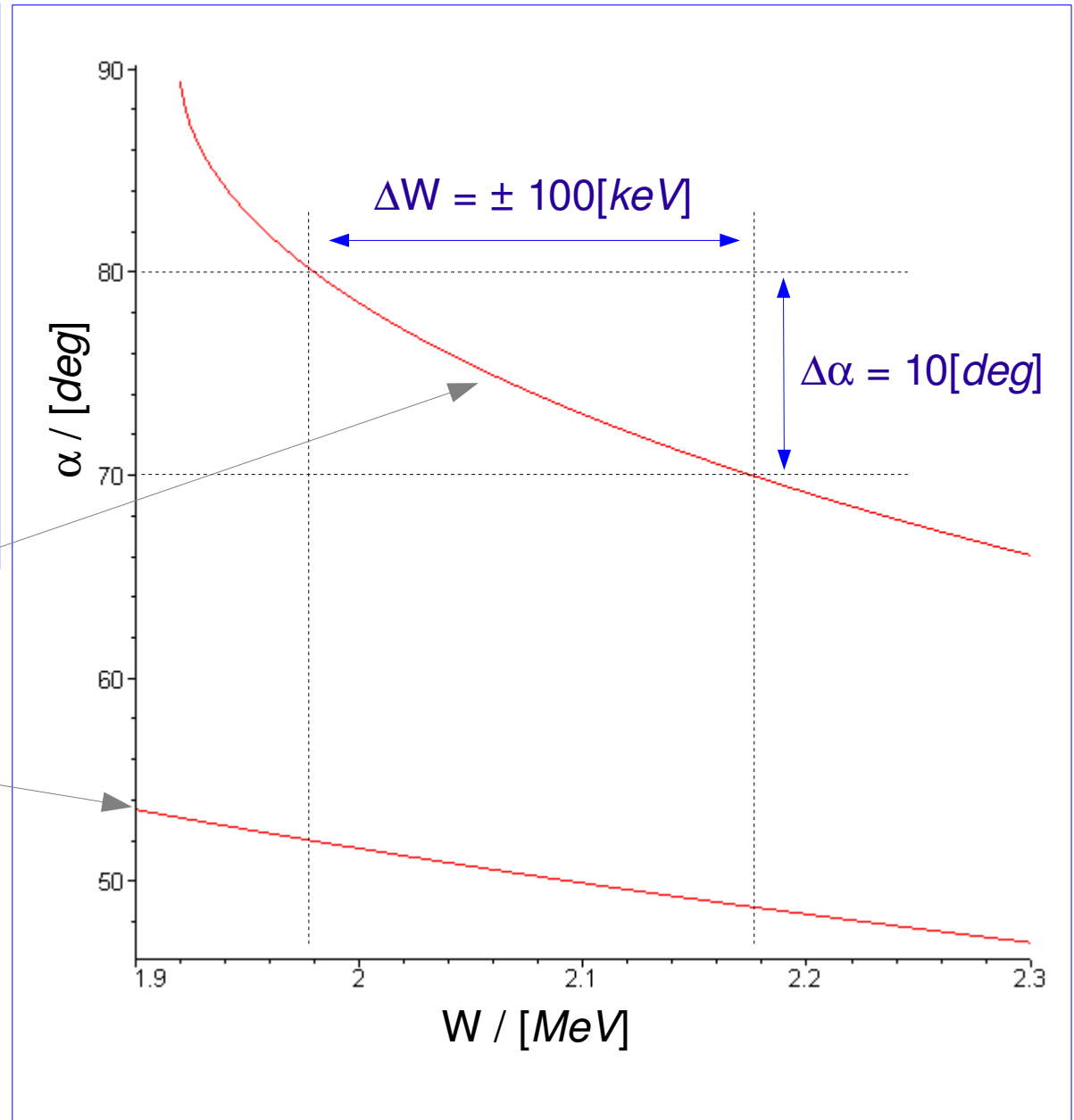
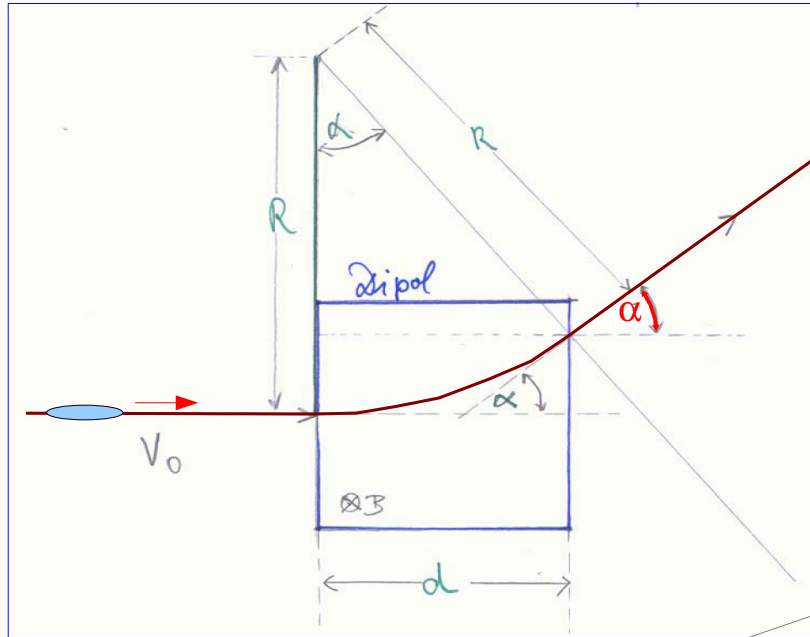
\Rightarrow nicht relativistische Abschätzung für $R > d$:

$$R = \cancel{\gamma} \cdot \frac{E_0}{e} \cdot \frac{\beta}{c \cdot B} ; \quad \beta = \sqrt{1 - \frac{1}{(W/E_0 + 1)^2}}$$

$$\Rightarrow \alpha = \arcsin\left(\frac{B \cdot c \cdot d}{\beta} \cdot \frac{e}{E_0}\right)$$

Ablenkwinkel
als Funktion der
Geschwindigkeit

Trajektorien-Separation durch Energievariation kombiniert mit einem Dipol



$$B_1 = 0.5 T = \text{konstant}$$

$$B_2 = 0.4 T = \text{konstant}$$

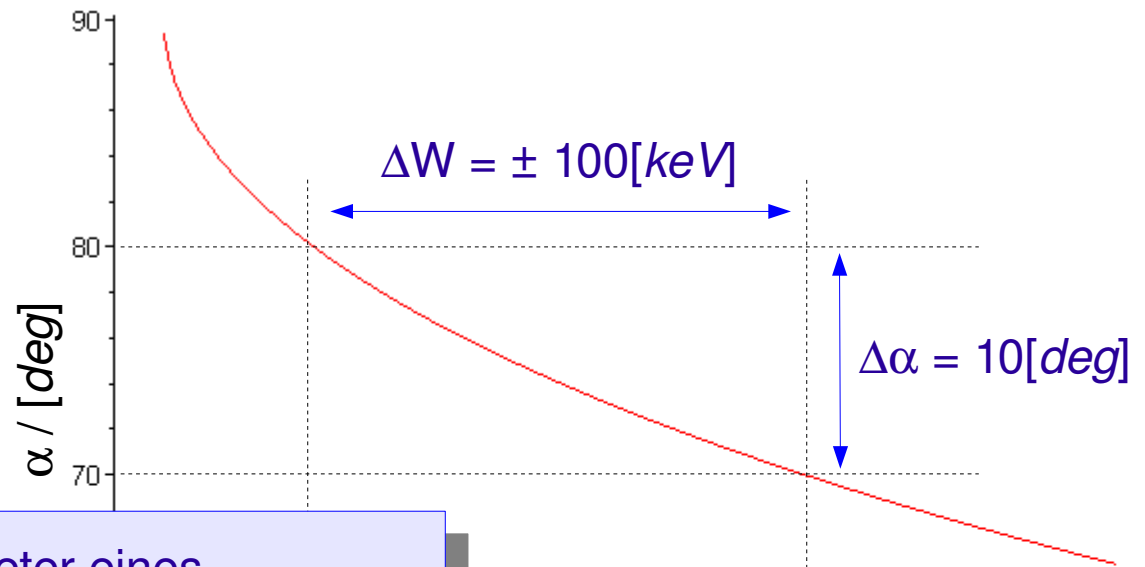
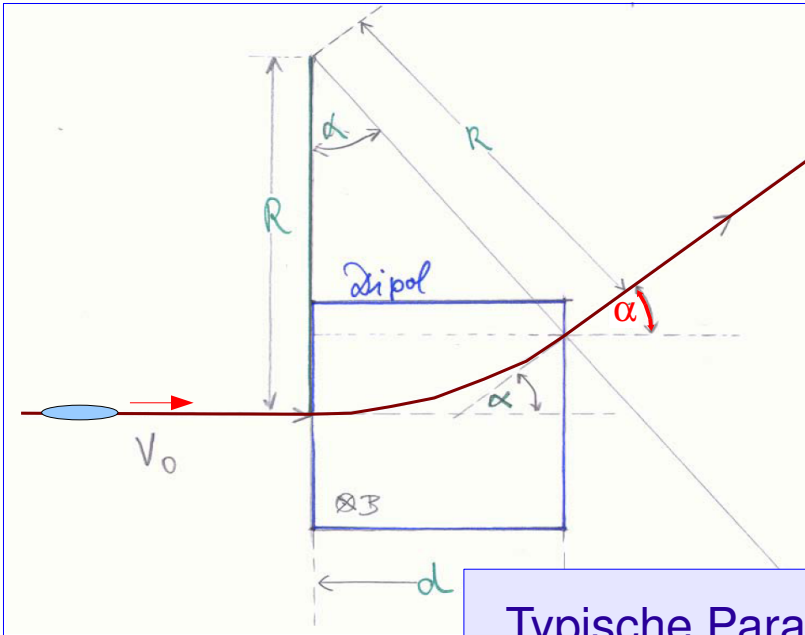
$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$$d = 0.4 \text{ m}$$

$$e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$E_0 = 938.3 \text{ MeV}$$

Trajektorien-Separation durch Energievariation kombiniert mit einem Dipol



Typische Parameter eines **kompakten(!)** Bunch-Kompressors für intensive Protonstrahlen:

$$B_1 = 0.5 T = \text{konstant}$$

$$B_2 = 0.4 T = \text{konstant}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$$d = 0.4 \text{ m}$$

$$e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

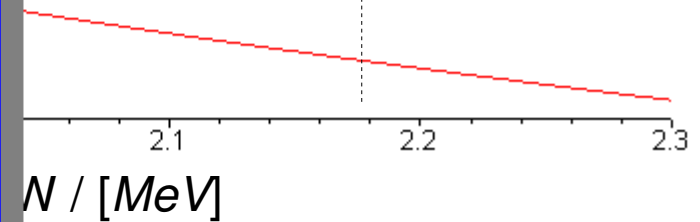
$$E_0 = 938.3 \text{ MeV}$$

Winkeldiff. $\Delta\alpha = 20 \text{ [deg]}$

maximale Wegdiff. $\Delta L = 1.0 \text{ [m]}$

maximale Trajektorie $L = 4.0 \text{ [m]}$

=> interessantes Konzept,
aber **nicht ausreichend!**



Zusammenfassung: Möglichkeiten der Bunch-Kompression

Bunch-Kompression durch Energievariation des Makro-Bunchs:

- $\Delta W/W \sim \pm 25\%$, 2MeV Protonen, $\Delta L = 1.0\text{m}$, $L = 4.0\text{m}$
=> Einschränkung durch (Neutronausbeute / Protonen-Energie)
- Frequenz der Buncher-Kavität $< 10\text{MHz}$
bzw. 50ns -Rampe mit einer Repititionsrate von 250kHz
=> Im Prinzip möglich : „*Mutli harmonic Buncher*“

„schwierig“
bis
„ungeeignet“

Bunch-Kompression durch Energievariation des Makro-Bunchs mit Dipolmagneten:

- Kein Kicker notwendig(!), $B = \text{konstant}$
- Separation der Trajektorie für die Parameter von FRANZ bis zu
 $\Delta\alpha = 10[\text{deg}]$ bei $\Delta W/W = \pm 5\%$ möglich

„interessant“
aber nicht
„ausreichend“

Bunch-Kompression durch Wegdifferenz im Dipol-System:

- Konzept hat sich für 2MeV Protonen im μA -Bereich bewährt
- Kicker notwendig...
- Erweiterung des Konzepts für Transport von 150mA Protonen notwendig

„herausfordernd“

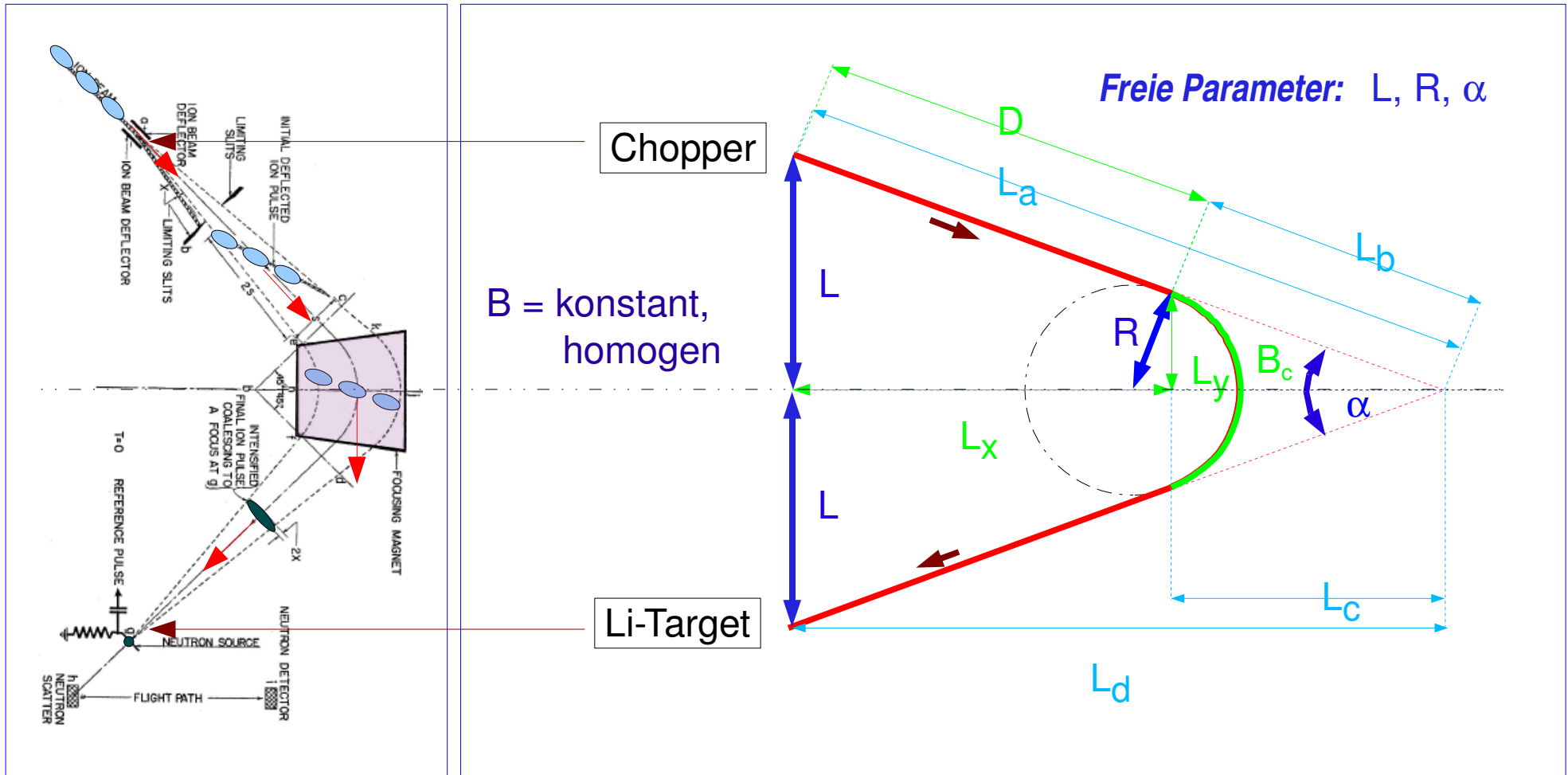
Überblick

- Einführung:
 - Definition von Bunch-Kompression
 - Anwendungsbereiche für Bunch-Kompression
 - Anforderung für FRANZ
- Möglichkeiten der Bunch-Kompression:
 - Grundidee
 - Rebuncher-Konzept: Energiedifferenz
 - Kombination: Energie- und Wegdifferenz
- Untersuchte Geometrien:
 - 1-Dipol-System: ohne Gradienten (Moblely-Konzept)
 - 2-Dipol-System: Rechteck-Magnete mit Gradienten
 - 3-Dipol-System: Rechteck-Magnete 2 homogen und 1 mit Gradienten
 - 4-Dipol-System: Sektor-Magnete 2 homogen und 2 mit Gradienten
- Numerik, Strahldynamik:

1-Dipol-System: ohne Gradienten (Mobley-Konzept)

R. C. Mobley: Phys. Rev. **88**(2), 360-361 (1951)

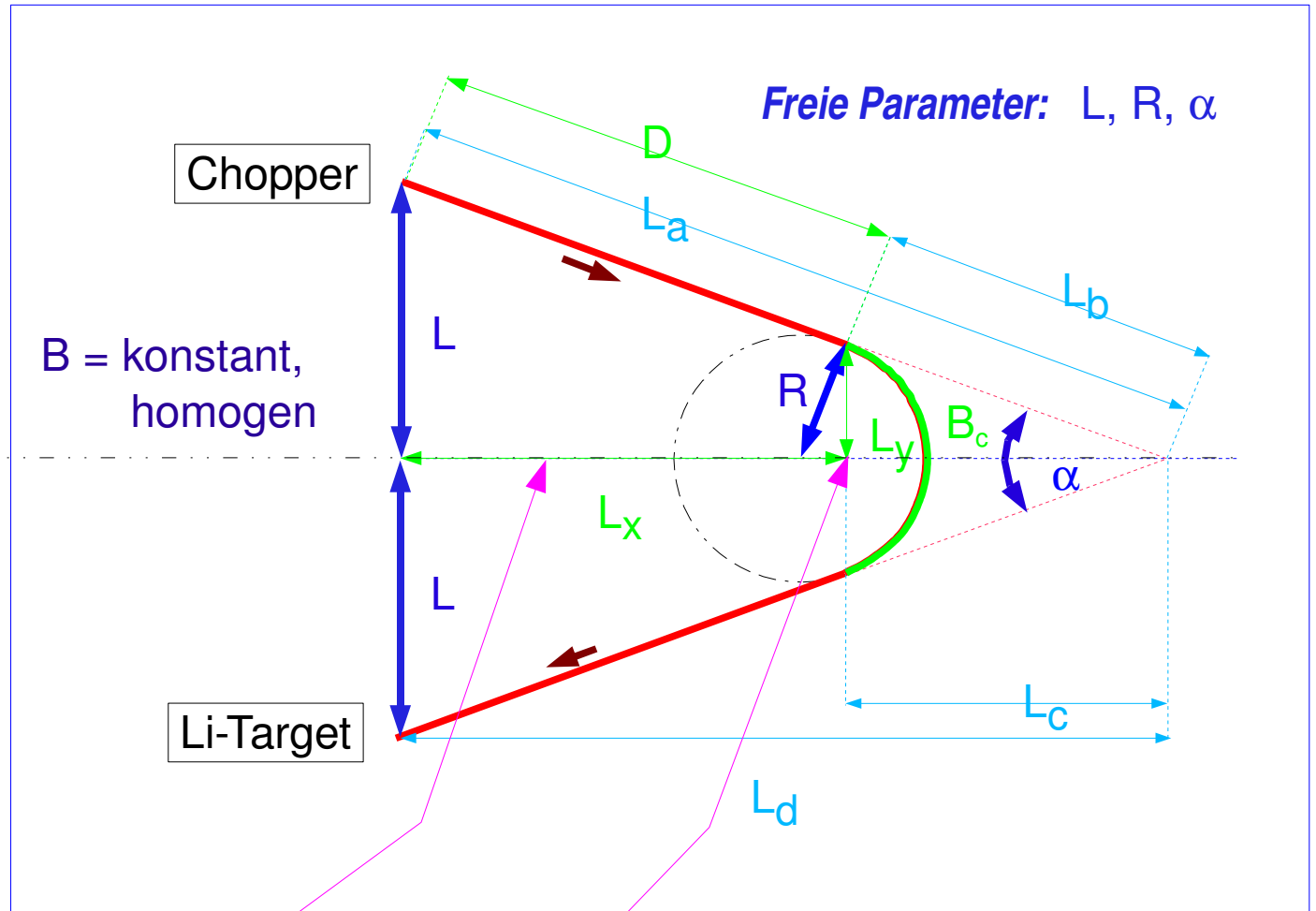
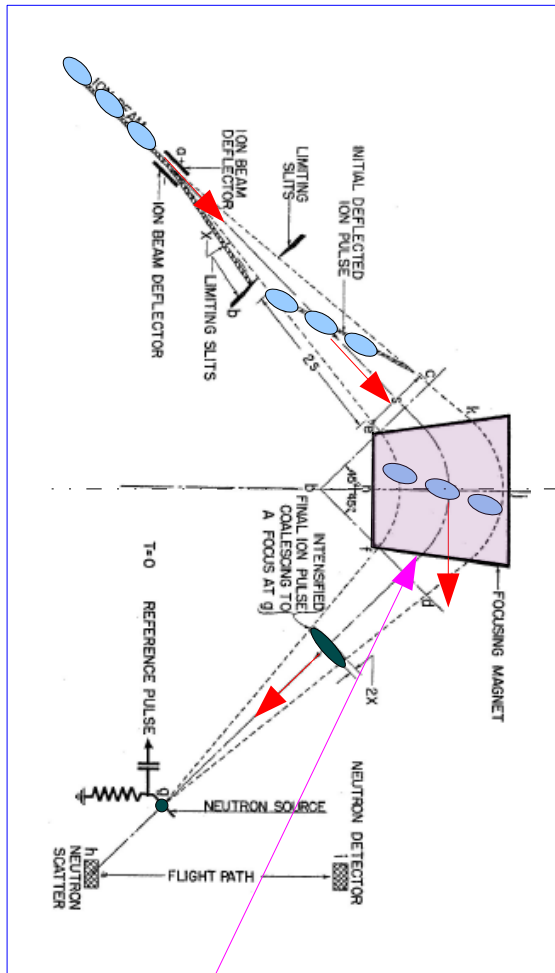
Präsentiert in Riezlern 2006



1-Dipol-System: ohne Gradienten (Mobley-Konzept)

R. C. Mobley: Phys. Rev. **88**(2), 360-361 (1951)

Präsentiert in Riezlern 2006



Kante des Dipols
in erster Näherung „eben“.
Genauere Betrachtung liefert:

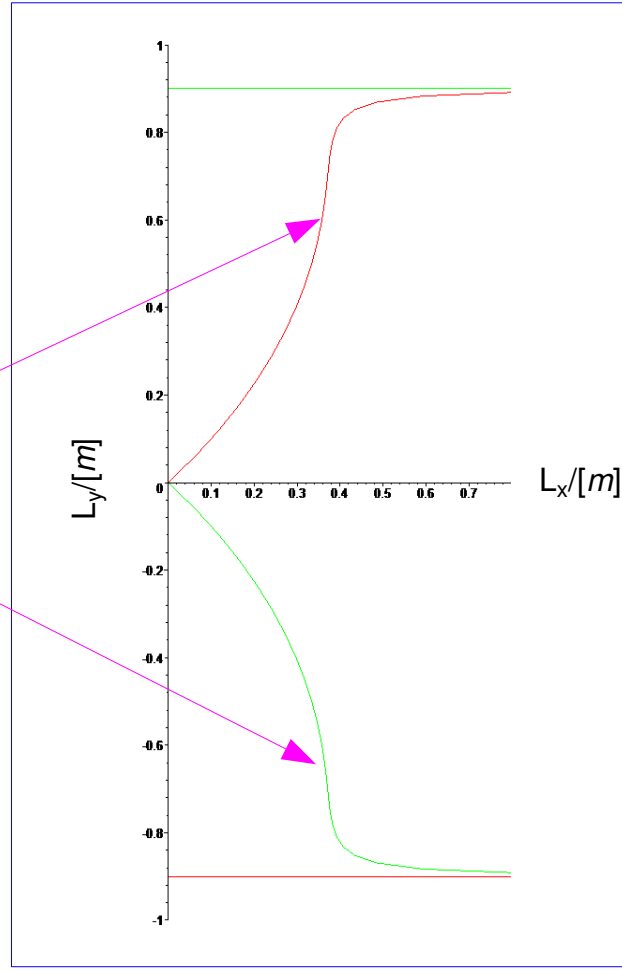
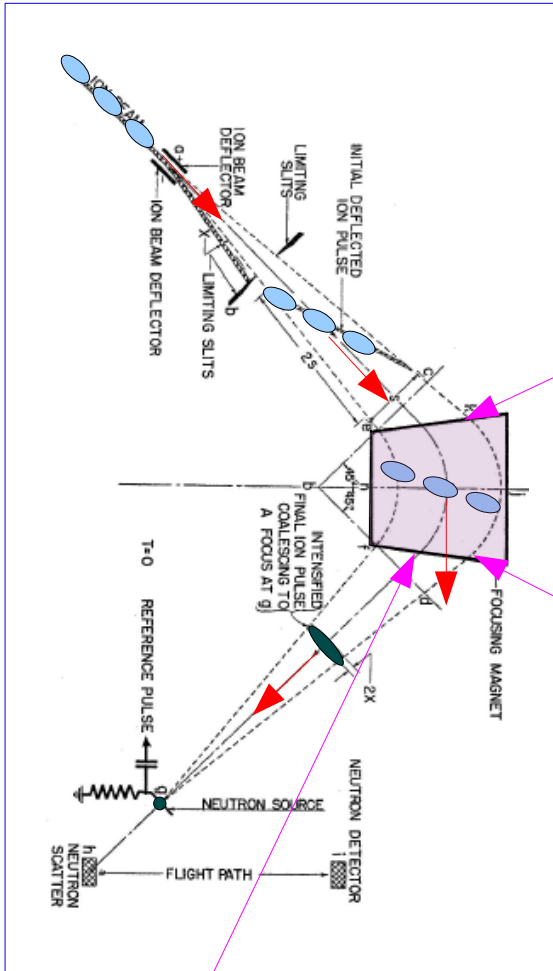
$$L_x(L_y, L, R) = \frac{L - L_y}{\sqrt{\frac{R^2}{L_y^2} - 1}}$$

Kantenwinkel ist fix.
**Transversale Fokussierung
nicht frei wählbar!**

1-Dipol-System: ohne Gradienten (Mobley-Konzept)

R. C. Mobley: Phys. Rev. 88(2), 360-361 (1951)

Präsentiert in Riezlern 2006



Dipol-Kante

2MeV (Protons) $\Leftrightarrow \beta=0.065$
 $L=1.00\text{ m}$
 $R=m_p \cdot v / (e \cdot B)$
 $R=0.90\text{ m} \Leftrightarrow B=0.22\text{ T}$

- Länge des Weges im Dipol unterscheidet sich stark
- Stark gekrümmte Kante

Kante des Dipols
in erster Näherung „eben“.
Genauere Betrachtung liefert:

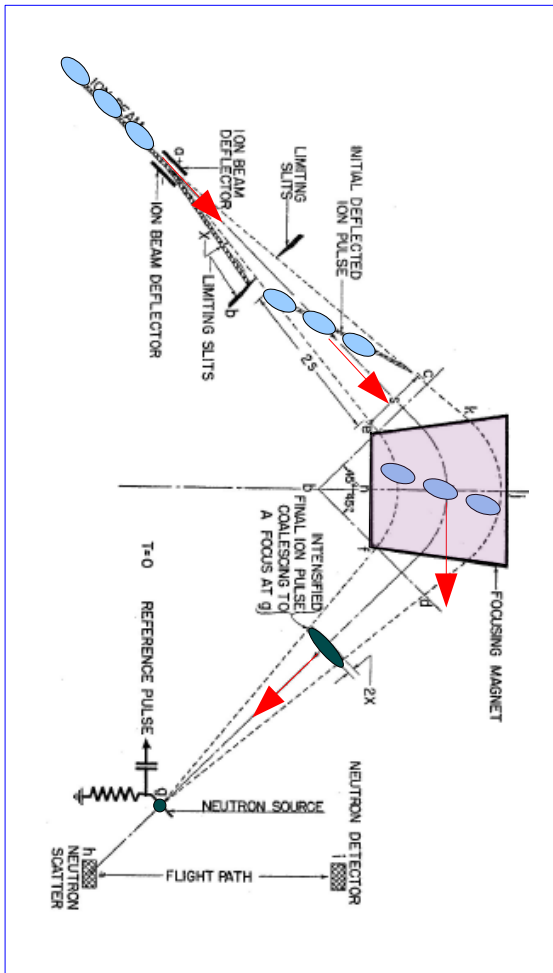
$$L_x(L_y, L, R) = \frac{L - L_y}{\sqrt{\frac{R^2}{L_y^2} - 1}}$$

Kantenwinkel ist fix.
Transversale Fokussierung
nicht frei wählbar!

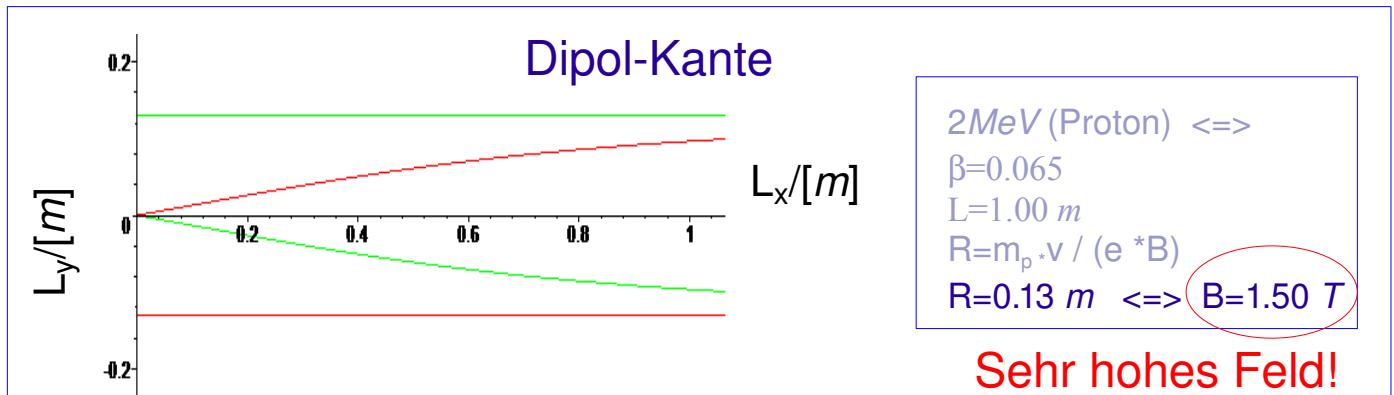
1-Dipol-System: ohne Gradienten (Mobley-Konzept)

R C .M obley: Phys. Rev. 88(2), 360-361 (1951)

Präsentiert in Riezlern 2006



Bunch (i)	α_i [deg]	$\Delta\alpha_{i,i+1}$ [deg]	D_i [m]	$B_{c,i}$ [m]	s_i [m]
1	139.7	14.1	1.017	0.091	2.126
2	125.7	10.4	1.057	0.123	2.238
3	115.3	8.3	1.101	0.147	2.350
4	107.0	6.9	1.148	0.166	2.461
5	100.1	5.9	1.196	0.181	2.573
6	94.1	5.2	1.245	0.195	2.685
7	89.0		1.295	0.207	2.796



Kante des Dipols
in erster Näherung „eben“.
Genauere Betrachtung liefert:

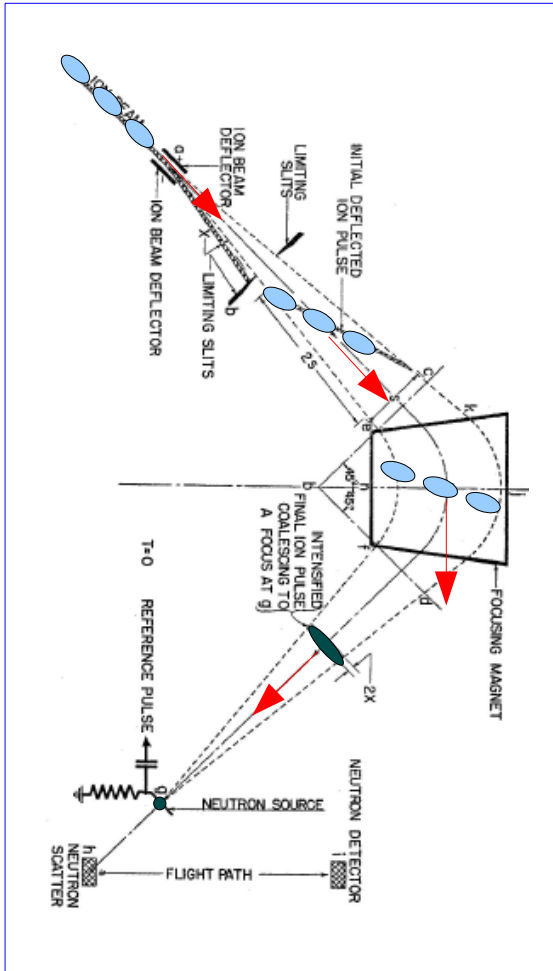
$$L_x(L_y, L, R) = \frac{L - L_y}{\sqrt{\frac{R^2}{L_y^2} - 1}}$$

Kantenwinkel ist fix.
**Transversale Fokussierung
nicht frei wählbar!**

1-Dipol-System: ohne Gradienten (Mobley-Konzept)

R. C. Mobley: Phys. Rev. **88**(2), 360-361 (1951)

Präsentiert in Riezlern 2006



Bunch (i)	α_i [deg]	$\Delta\alpha_{i,i+1}$ [deg]	D_i [m]	$B_{c,i}$ [m]	s_i [m]
1	139.7	14.1	1.017	0.091	2.126
2	125.7	10.4	1.057	0.123	2.238
3	115.3	8.3	1.101	0.147	2.350
4	107.0	6.9	1.148	0.166	2.461
5	100.1	5.9	1.196	0.181	2.573
6	94.1	5.2	1.245	0.195	2.685
7	89.0		1.295	0.207	2.796

**Alte Parameter:
7 Bunche à 200mA**

**Winkeldifferenz:
nicht konstant
Winkel am Kicker:
 $\Delta\alpha_{\max} = 25.4 \text{ deg}$**

große Driften!

**Kante des Dipols
in erster Näherung „eben“.
Genauere Betrachtung liefert:**

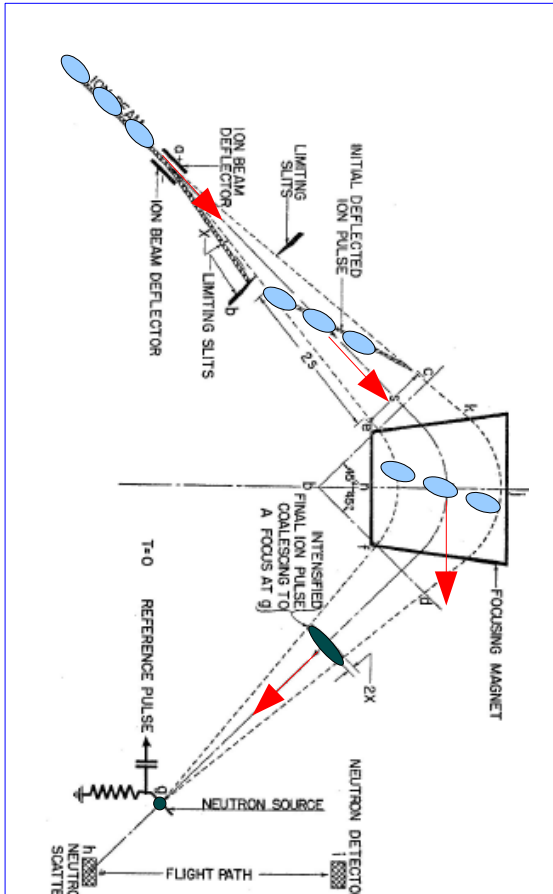
$$L_x(L_y, L, R) = \frac{L - L_y}{\sqrt{\frac{R^2}{L_y^2} - 1}}$$

**Kantenwinkel sind fix.
*Transversale Fokussierung
nicht frei wählbar!***

1-Dipol-System: ohne Gradienten (Mobley-Konzept)

R. C. Mobley: Phys. Rev. 88(2), 360-361 (1951)

Präsentiert in Riezlern 2006



Bunch (i)	α_i [deg]	$\Delta\alpha_{i,i+1}$ [deg]	D_i [m]	$B_{c,i}$ [m]	s_i [m]
1	139.7	14.1	1.017	0.091	2.126
2	125.7	10.4	1.057	0.123	2.238
3	115.3	8.3	1.101	0.147	2.350
4	107.0	6.9	1.148	0.166	2.461
5	100.1	5.9	1.196	0.181	2.573
6	94.1	5.2	1.245	0.195	2.685
7	89.0		1.295	0.207	2.796

Alte Parameter:
7 Bunche à 200mA

Winkeldifferenz:
nicht konstant
Winkel am Kicker:
 $\Delta\alpha_{\max} = 25.4 \text{ deg}$

große Driften!

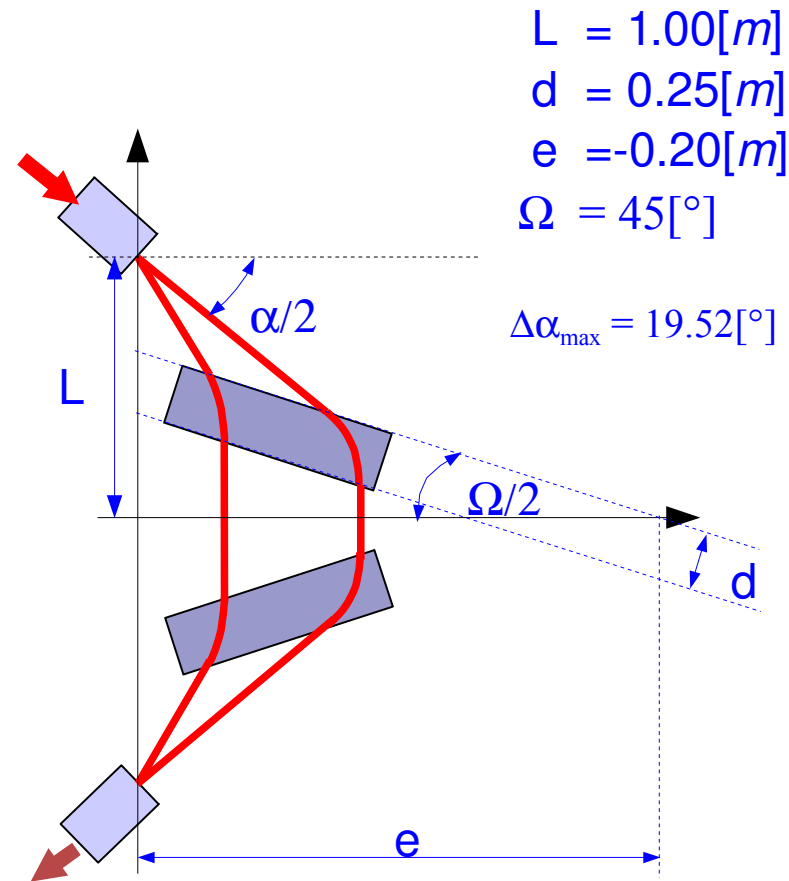
Neues Konzept wird benötigt, bei dem die Form der Kante des Dipol nicht kritisch ist. Der im Dipol zurückgelegte Weg soll nur wenig zum Gesamtwegunterschied beitragen:

=> System mit Rechteck-Dipol (Skew-Magnet)

Kantenwinkel sind fix.
Transversale Fokussierung
nicht frei wählbar!

2-Dipol-System: Rechteck-Magnete mit Gradienten

Präsentiert in Riezlern 2007



$L = 1.00[m]$
 $d = 0.25[m]$
 $e = -0.20[m]$
 $\Omega = 45[^\circ]$

$\Delta\alpha_{\max} = 19.52[^\circ]$

- Freie Parameters: α , Ω , d , e , L
- Gradienten notwendig für symmetrische Abbildung

$\alpha [^\circ]$	$w_g[m]$	$w1[m]$	$w2[m]$	$b1[m]$	$\psi [^\circ]$	$\beta [^\circ]$	$m_f[T]$	$R[m]$
40.00	3.5656	1.0940	0.4161	0.2727	47.50	70.00	0.91610	0.2232
43.45	3.4543	1.0597	0.3965	0.2710	45.77	68.27	0.89918	0.2274
47.22	3.3423	1.0256	0.3764	0.2692	43.89	66.39	0.88011	0.2323
51.30	3.2309	0.9922	0.3558	0.2674	41.85	64.35	0.85875	0.2381
55.78	3.1193	0.9594	0.3346	0.2656	39.61	62.11	0.83453	0.2450
60.69	3.0079	0.9273	0.3128	0.2638	37.15	59.65	0.80704	0.2534
66.14	2.8963	0.8961	0.2901	0.2620	34.43	56.93	0.77550	0.2637
72.20	2.7849	0.8659	0.2663	0.2602	31.40	53.90	0.73919	0.2766
79.04	2.6730	0.8369	0.2410	0.2586	27.98	50.48	0.69677	0.2935

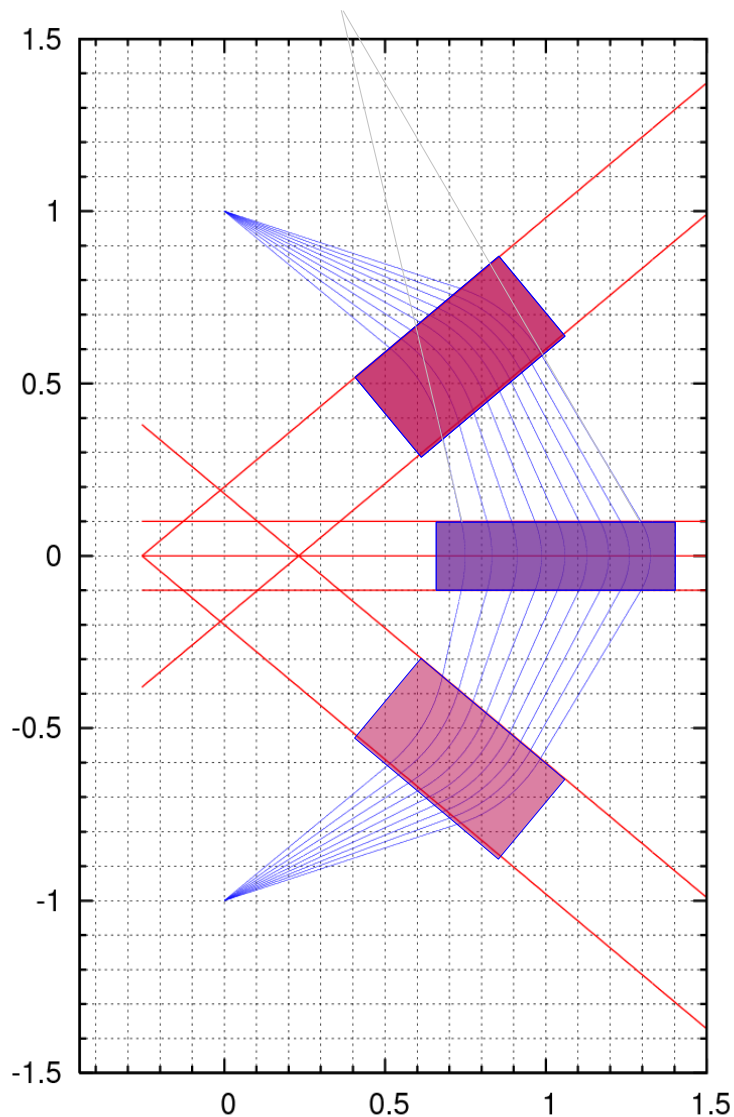
Verbesserung:

- 4 Kanten für Fokussierung
- erste Drift: - 24%
- Winkel am Kicker: - 25%
- maximales Feld < 1T

Unzufrieden stellend:

- Winkeldifferenz
- Trans. Abstände
- Großen Gradient
- Gesamtweg: +30%
(9 Bunche à 150mA)

3-Dipol-System: Rechteck-Magnete 2 homogen und 1 mit Gradienten

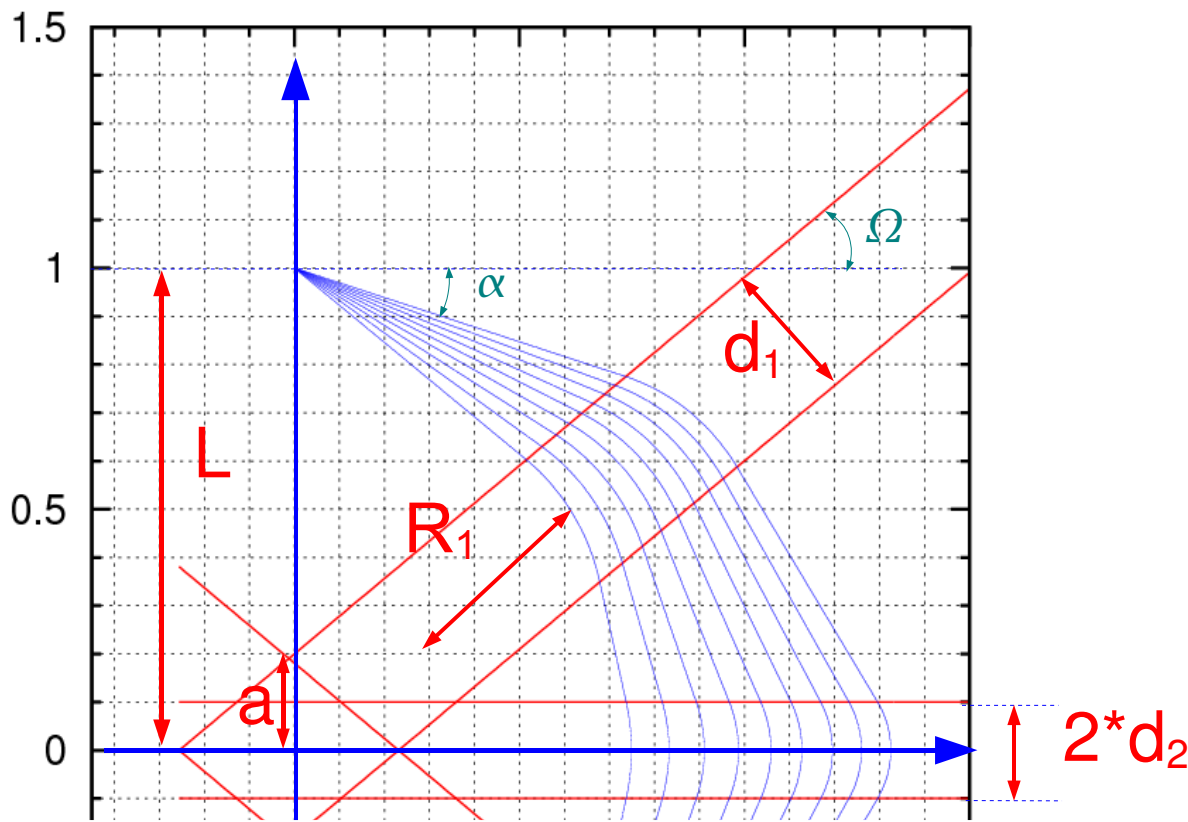


Neues Konzept:

- 2 homogene Dipole
- 1 Dipol mit Gradienten

Vorteile:

- Konstantes Gap
im ersten und letzten Dipol
- Größerer transversaler Abstand im
Dipol mit Gradient
- Nur 1 Dipol mit Gradient
- Kompaktere Geometrie
- Mehr Parameter zur transversalen
Fokussierung



Parameter:

- 2 Winkeln: α , Ω
- 5 Längen: L , a , d_1 , d_2 , R_1

Geometrie-Optimierung:

- Erste Drift $< 1[m]$
- Gesamtweglänge pro Bahn $< 4.0[m]$
- Abstand der Trajektorien maximieren
- max. Ablenkung $\Delta\alpha < 20[deg]$
- $|\alpha_i - \alpha_{i+1}| \sim \text{const}$

$$L = 1.000[m]$$

$$a = 0.200[m]$$

$$d_1 = 0.300[m] \quad d_2 = 0.100[m]$$

$$R_1 = 0.450[m] \quad \Leftrightarrow \quad B_1 = 0.46473[T]$$

$$\text{OMEGA} = -38.000[deg]$$

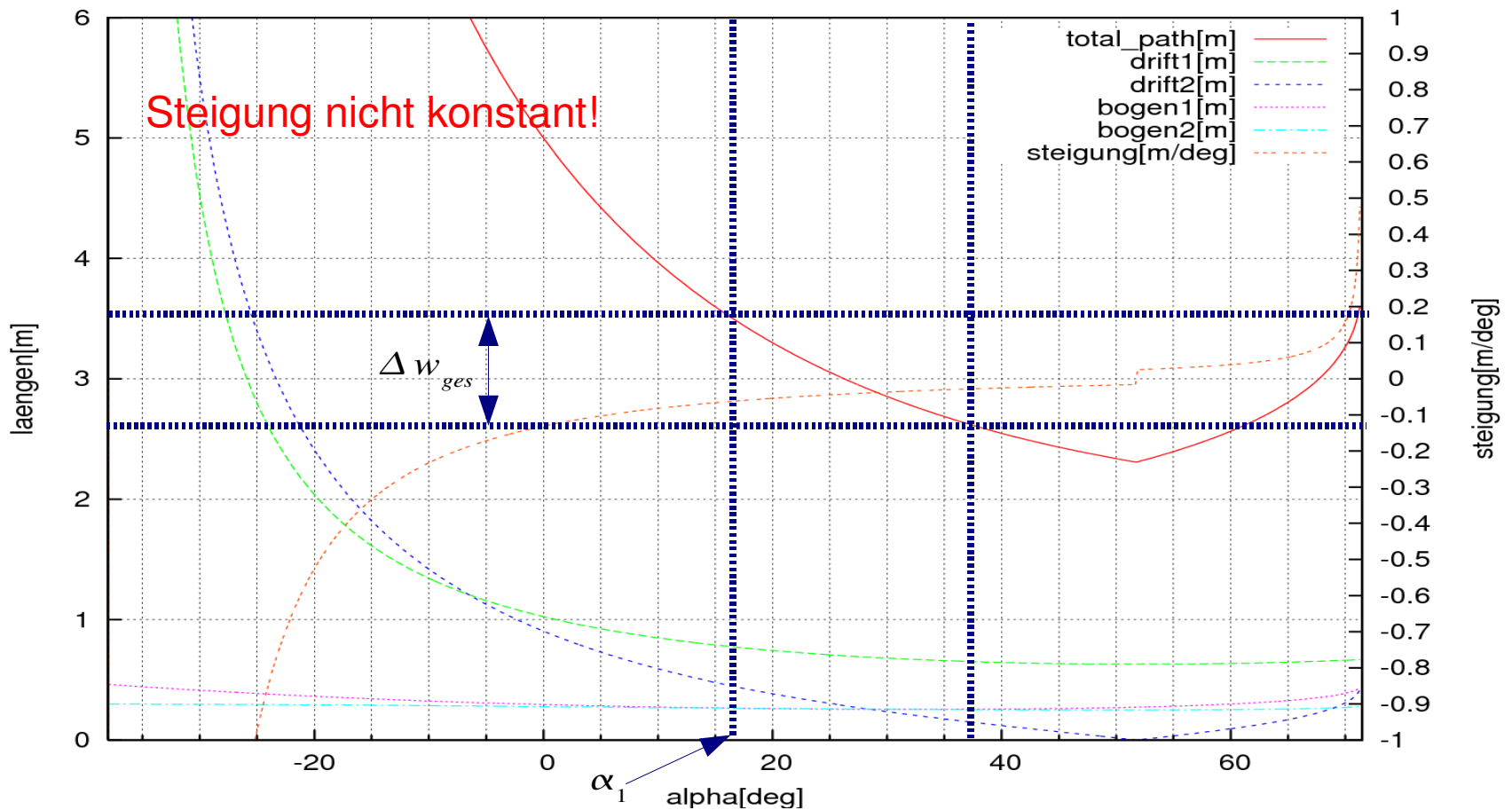
$$ff = a/L = 0.200 \quad R_1/d_1 = 1.500$$

3-Dipol-System: Trajektorien-Länge als Funktion von „alpha“

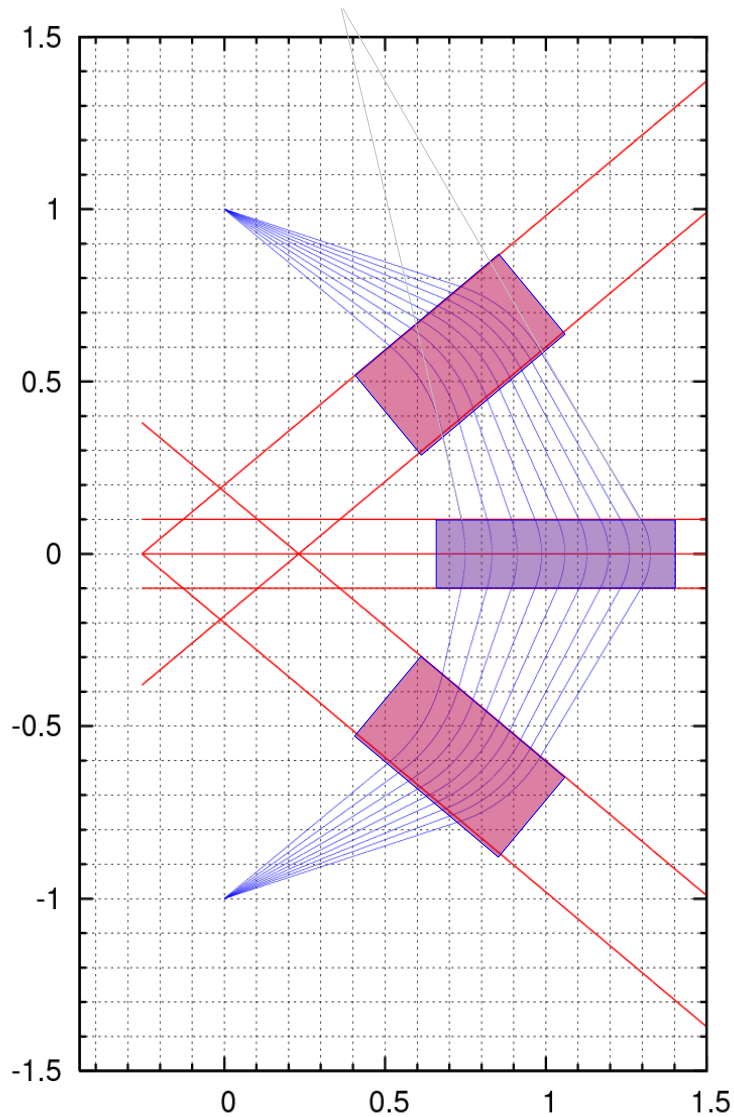
Anzahl der Bunche: $N = 9$

Gesamtwegunterschied: $\Delta w_{ges} = (N-1) \cdot \beta \lambda = 0.9137 [m]$

Anfangswinkel: $\alpha_1 = 17 [deg]$



3-Dipol-System: Rechteck-Magnete 2 homogen und 1 mit Gradienten



al	tp	dr1	dr2	b1	b2	bet1	bet2	R2	B2	d_x1	d_x2	d_x3	d_x4	d_a	d_x1p
[deg]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[deg]	[deg]	[m]	[T]	[m]	[m]	[m]	[m]	[deg]	[m]
17.000	3.5422	0.7696	0.5790	0.3168	0.1056	40.341	32.659	0.1853	1.1285	0.0297	0.0392	0.0637	0.0651	1.853	0.0249
18.853	3.4273	0.7529	0.5412	0.3144	0.1051	40.032	31.115	0.1935	1.0807	0.0297	0.0396	0.0629	0.0644	1.935	0.0254
20.789	3.3161	0.7371	0.5042	0.3122	0.1045	39.750	29.462	0.2033	1.0286	0.0317	0.0426	0.0660	0.0677	2.152	0.0277
22.940	3.2019	0.7212	0.4657	0.3101	0.1040	39.485	27.575	0.2160	0.9681	0.0328	0.0446	0.0671	0.0690	2.325	0.0293
25.265	3.0889	0.7059	0.4269	0.3083	0.1034	39.256	25.479	0.2325	0.8996	0.0349	0.0481	0.0700	0.0722	2.588	0.0319
27.853	2.9743	0.6909	0.3866	0.3069	0.1028	39.074	23.073	0.2552	0.8196	0.0375	0.0524	0.0733	0.0758	2.900	0.0350
30.753	2.8586	0.6764	0.3448	0.3060	0.1021	38.962	20.285	0.2884	0.7250	0.0399	0.0567	0.0756	0.0785	3.214	0.0380
33.967	2.7445	0.6630	0.3018	0.3060	0.1015	38.955	17.078	0.3405	0.6141	0.0439	0.0637	0.0801	0.0835	3.680	0.0426
37.647	2.6298	0.6507	0.2561	0.3072	0.1009	39.110	13.243	0.4365	0.4791	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000	0.0000

L = 1.000[m]
a = 0.200[m]

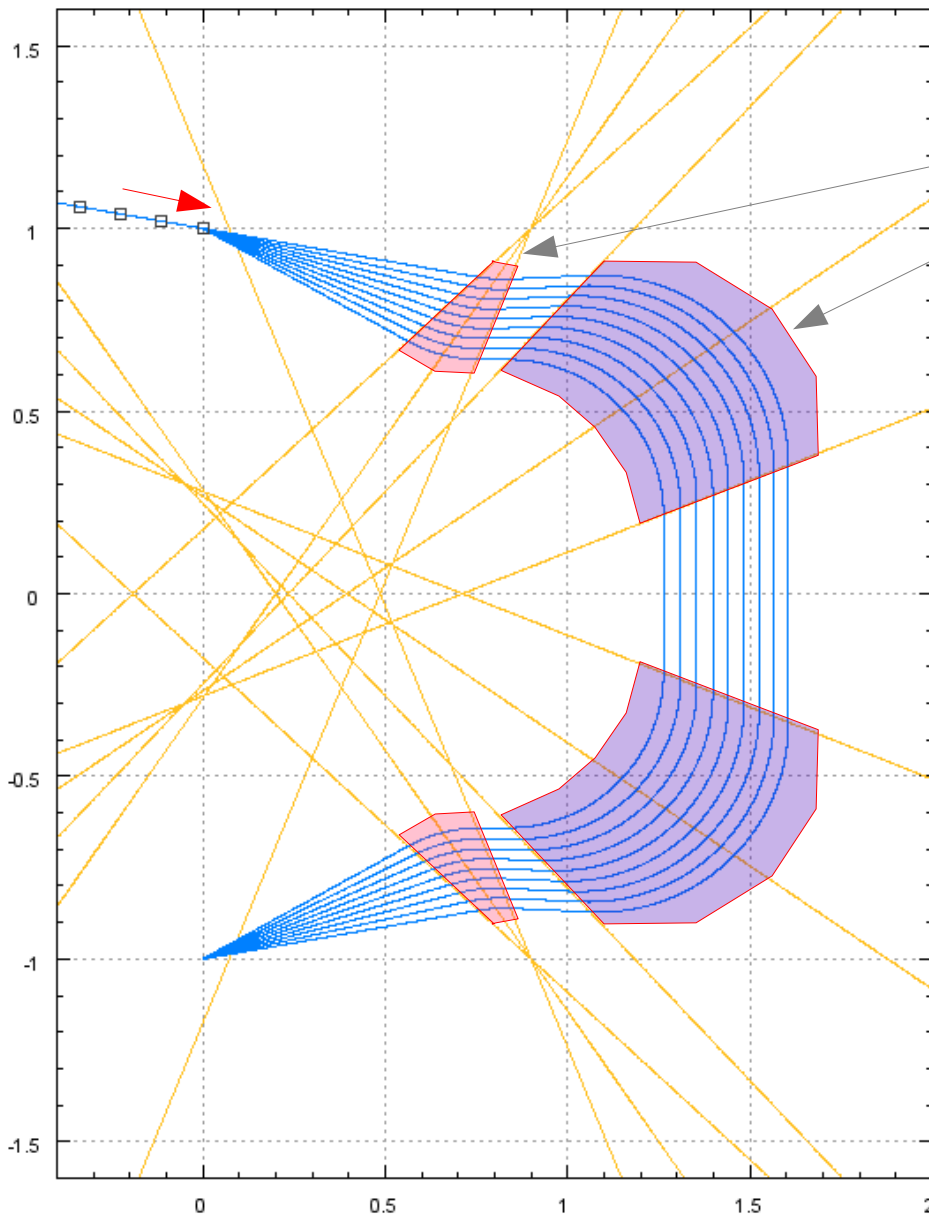
$\Rightarrow \Delta\alpha_{\max} = 20.647[\text{deg}]$

d1 = 0.300[m]
d2 = 0.100[m]

R1 = 0.450[m] \Leftrightarrow B1 = 0.46473[T]

- 7 freie Parameter (α , Ω , L, a, d₁, d₂, R₁)
 \Rightarrow gute Kontrolle der Längen und Abstände
- **Winkeldifferenz \neq konstant**
- **Großer Gradient im Dipol2**

4-Dipol-System: Sektor-Magnete 2 homogen und 2 mit Gradienten



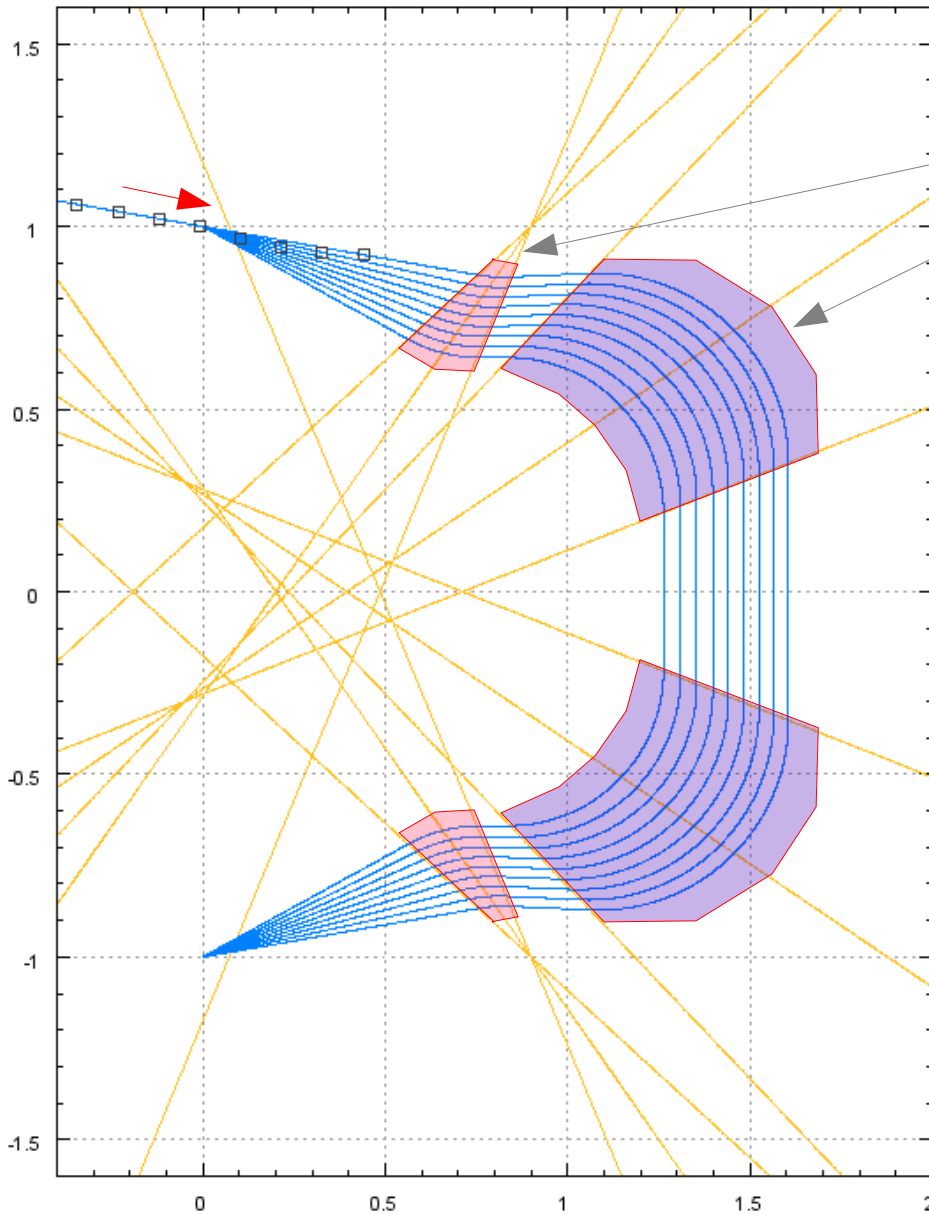
Neues Konzept:

- 2 homogene Sektor-Magnete
- 2 Sektor-Magnete mit Gradienten

Vorteile:

- Konstantes Gap
im ersten und letzten Dipol
- Größerer transversaler Abstand im
Dipol mit Gradient
- Bessere Kontrolle über Gradienten
- Kompaktere Geometrie
- Mehr Parameter zur transversalen
Fokussierung
- Mehr Kontrolle über
alle(!) geometrischen Parameter

4-Dipol-System: Sektor-Magnete 2 homogen und 2 mit Gradienten



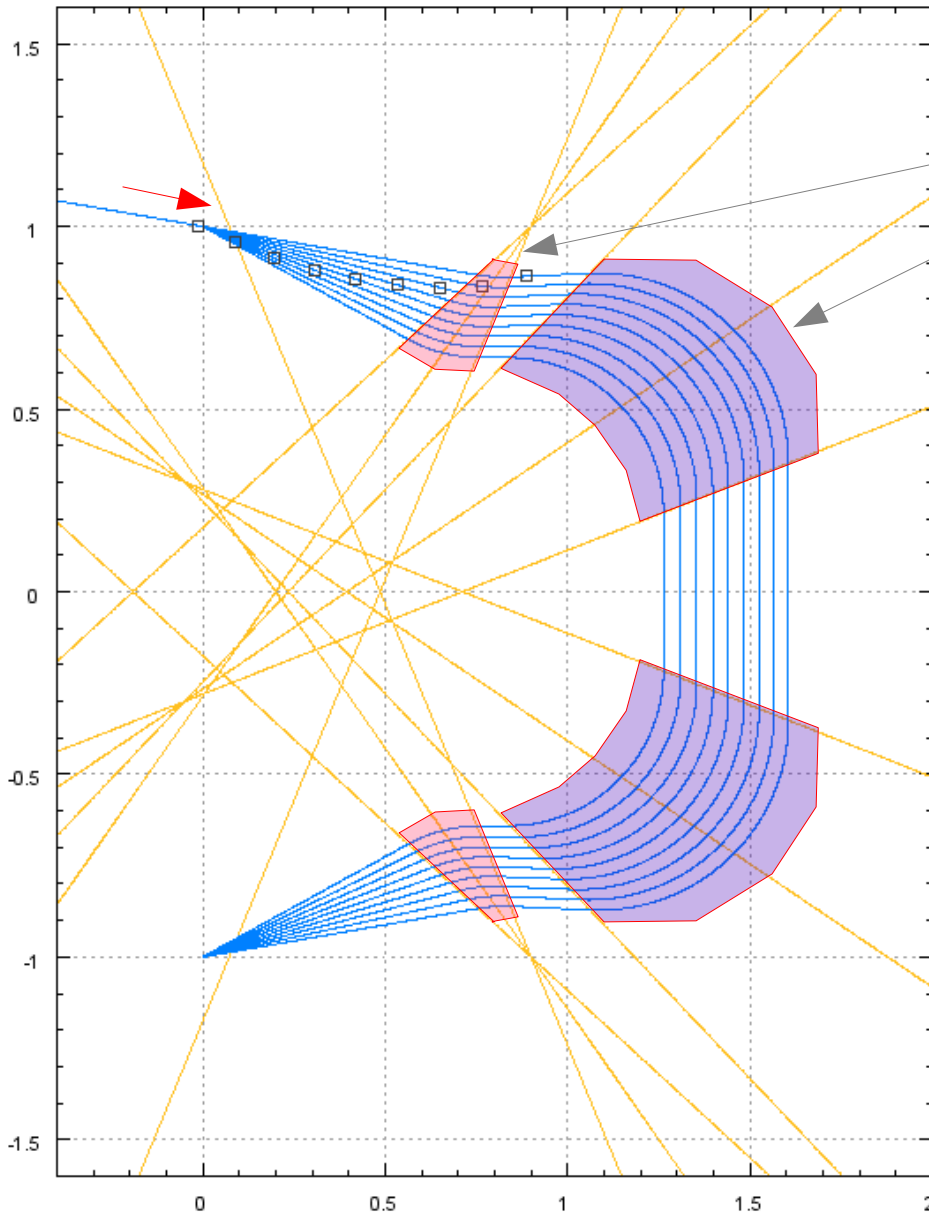
Neues Konzept:

- 2 homogene Sektor-Magnete
- 2 Sektor-Magnete mit Gradienten

Vorteile:

- Konstantes Gap
im ersten und letzten Dipol
- Größerer transversaler Abstand im
Dipol mit Gradient
- Bessere Kontrolle über Gradienten
- Kompaktere Geometrie
- Mehr Parameter zur transversalen
Fokussierung
- Mehr Kontrolle über
alle(!) geometrischen Parameter

4-Dipol-System: Sektor-Magnete 2 homogen und 2 mit Gradienten



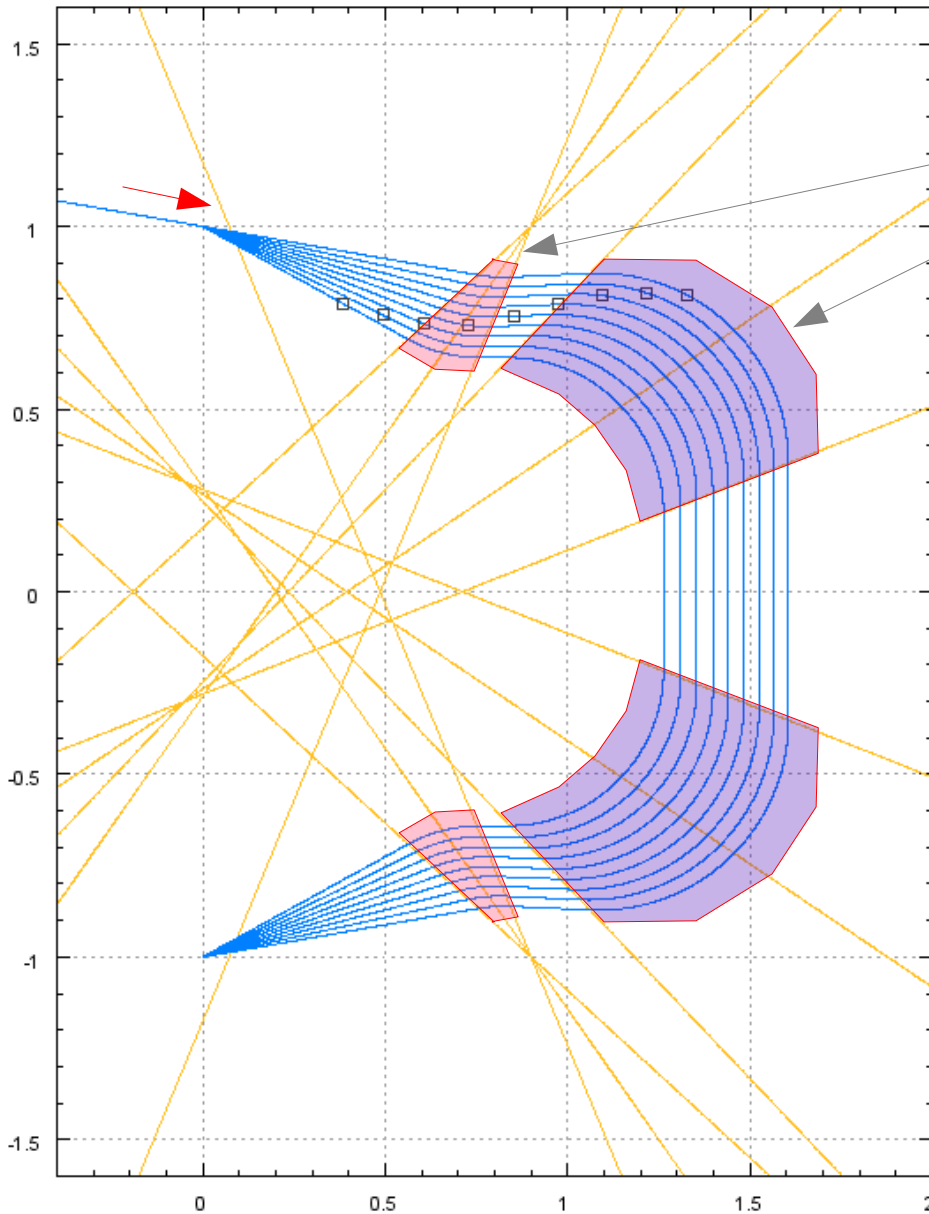
Neues Konzept:

- 2 homogene Sektor-Magnete
- 2 Sektor-Magnete mit Gradienten

Vorteile:

- Konstantes Gap
im ersten und letzten Dipol
- Größerer transversaler Abstand im
Dipol mit Gradient
- Bessere Kontrolle über Gradienten
- Kompaktere Geometrie
- Mehr Parameter zur transversalen
Fokussierung
- Mehr Kontrolle über
alle(!) geometrischen Parameter

4-Dipol-System: Sektor-Magnete 2 homogen und 2 mit Gradienten



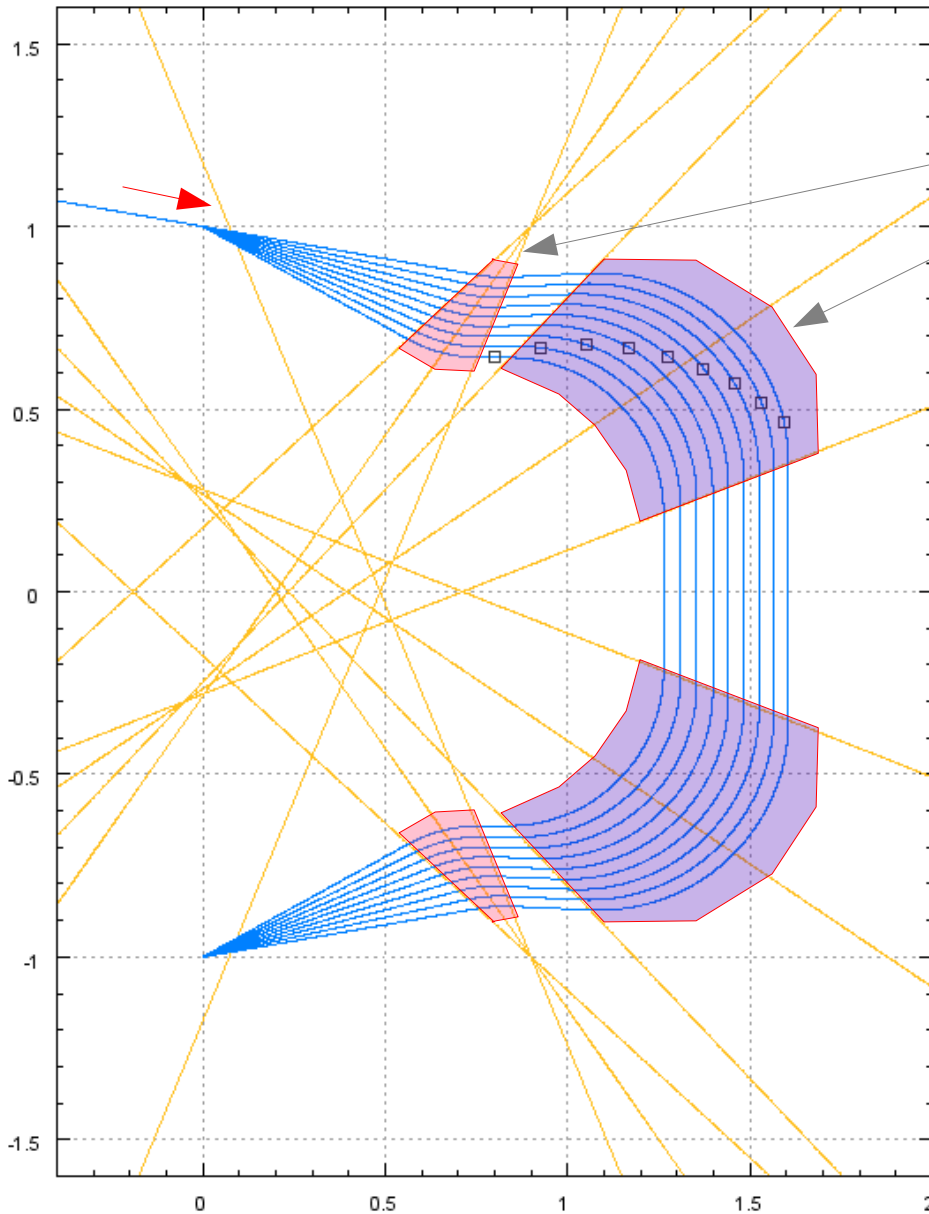
Neues Konzept:

- 2 homogene Sektor-Magnete
- 2 Sektor-Magnete mit Gradienten

Vorteile:

- Konstantes Gap
im ersten und letzten Dipol
- Größerer transversaler Abstand im
Dipol mit Gradient
- Bessere Kontrolle über Gradienten
- Kompaktere Geometrie
- Mehr Parameter zur transversalen
Fokussierung
- Mehr Kontrolle über
alle(!) geometrischen Parameter

4-Dipol-System: Sektor-Magnete 2 homogen und 2 mit Gradienten



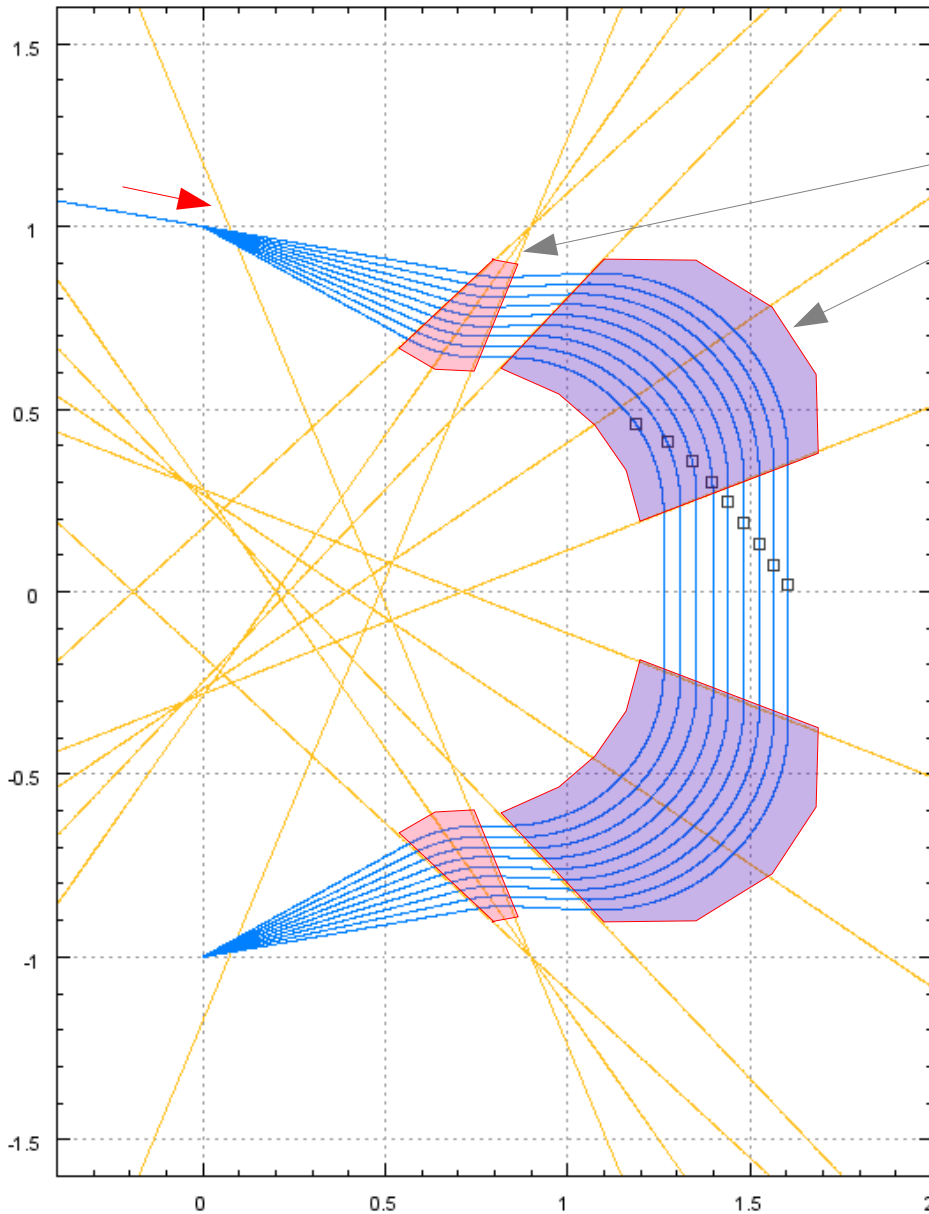
Neues Konzept:

- 2 homogene Sektor-Magnete
- 2 Sektor-Magnete mit Gradienten

Vorteile:

- Konstantes Gap
im ersten und letzten Dipol
- Größerer transversaler Abstand im
Dipol mit Gradient
- Bessere Kontrolle über Gradienten
- Kompaktere Geometrie
- Mehr Parameter zur transversalen
Fokussierung
- Mehr Kontrolle über
alle(!) geometrischen Parameter

4-Dipol-System: Sektor-Magnete 2 homogen und 2 mit Gradienten



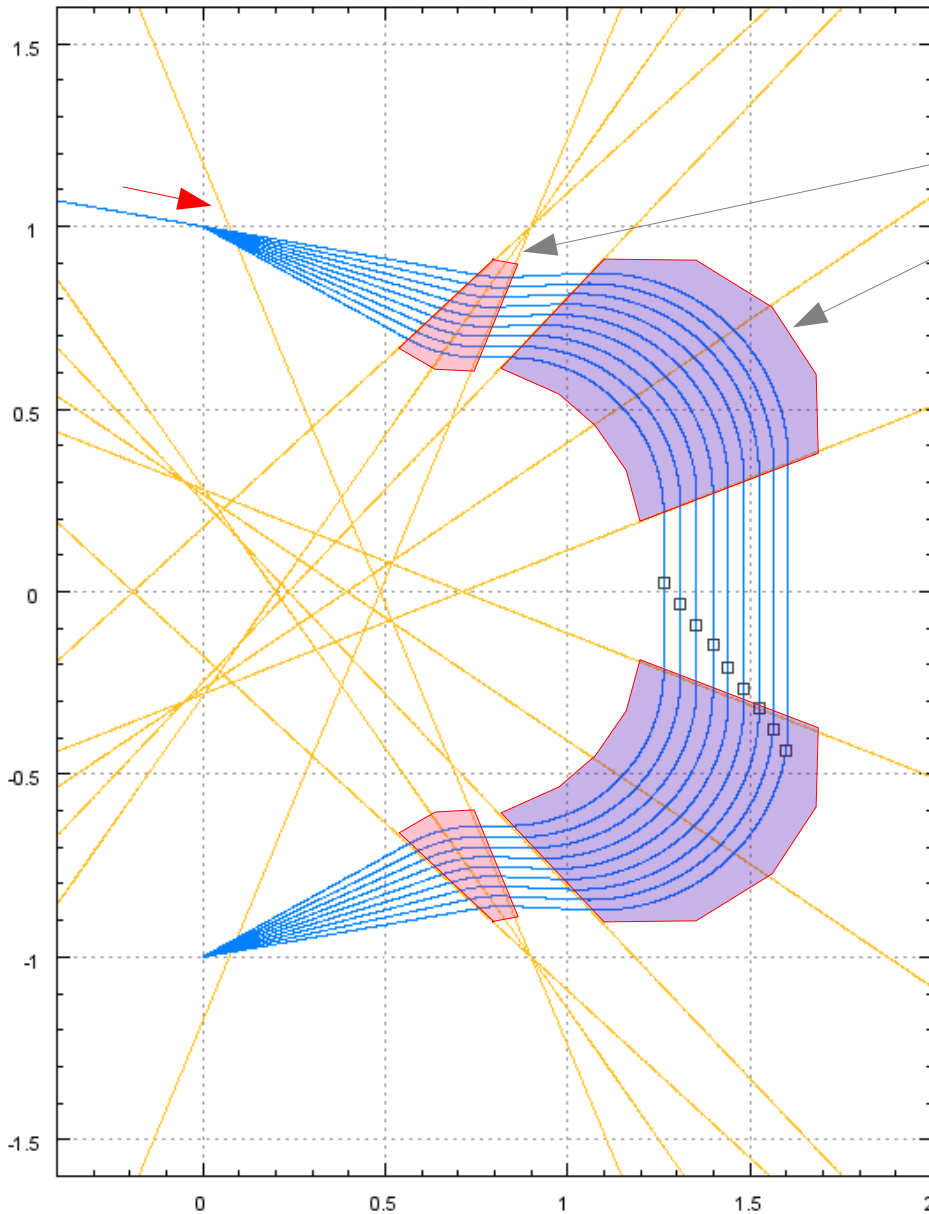
Neues Konzept:

- 2 homogene Sektor-Magnete
- 2 Sektor-Magnete mit Gradienten

Vorteile:

- Konstantes Gap
im ersten und letzten Dipol
- Größerer transversaler Abstand im
Dipol mit Gradient
- Bessere Kontrolle über Gradienten
- Kompaktere Geometrie
- Mehr Parameter zur transversalen
Fokussierung
- Mehr Kontrolle über
alle(!) geometrischen Parameter

4-Dipol-System: Sektor-Magnete 2 homogen und 2 mit Gradienten



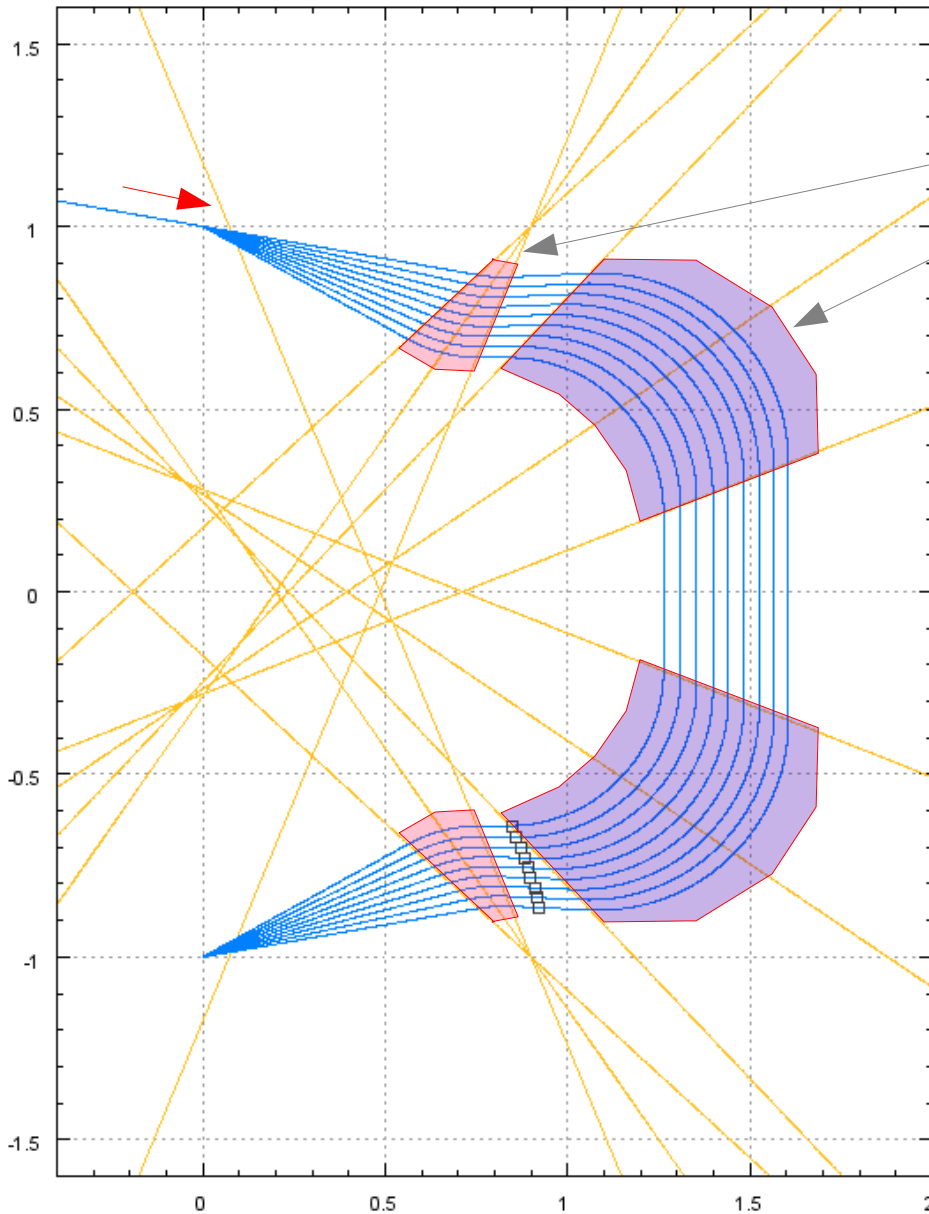
Neues Konzept:

- 2 homogene Sektor-Magnete
- 2 Sektor-Magnete mit Gradienten

Vorteile:

- Konstantes Gap
im ersten und letzten Dipol
- Größerer transversaler Abstand im
Dipol mit Gradient
- Bessere Kontrolle über Gradienten
- Kompaktere Geometrie
- Mehr Parameter zur transversalen
Fokussierung
- Mehr Kontrolle über
alle(!) geometrischen Parameter

4-Dipol-System: Sektor-Magnete 2 homogen und 2 mit Gradienten



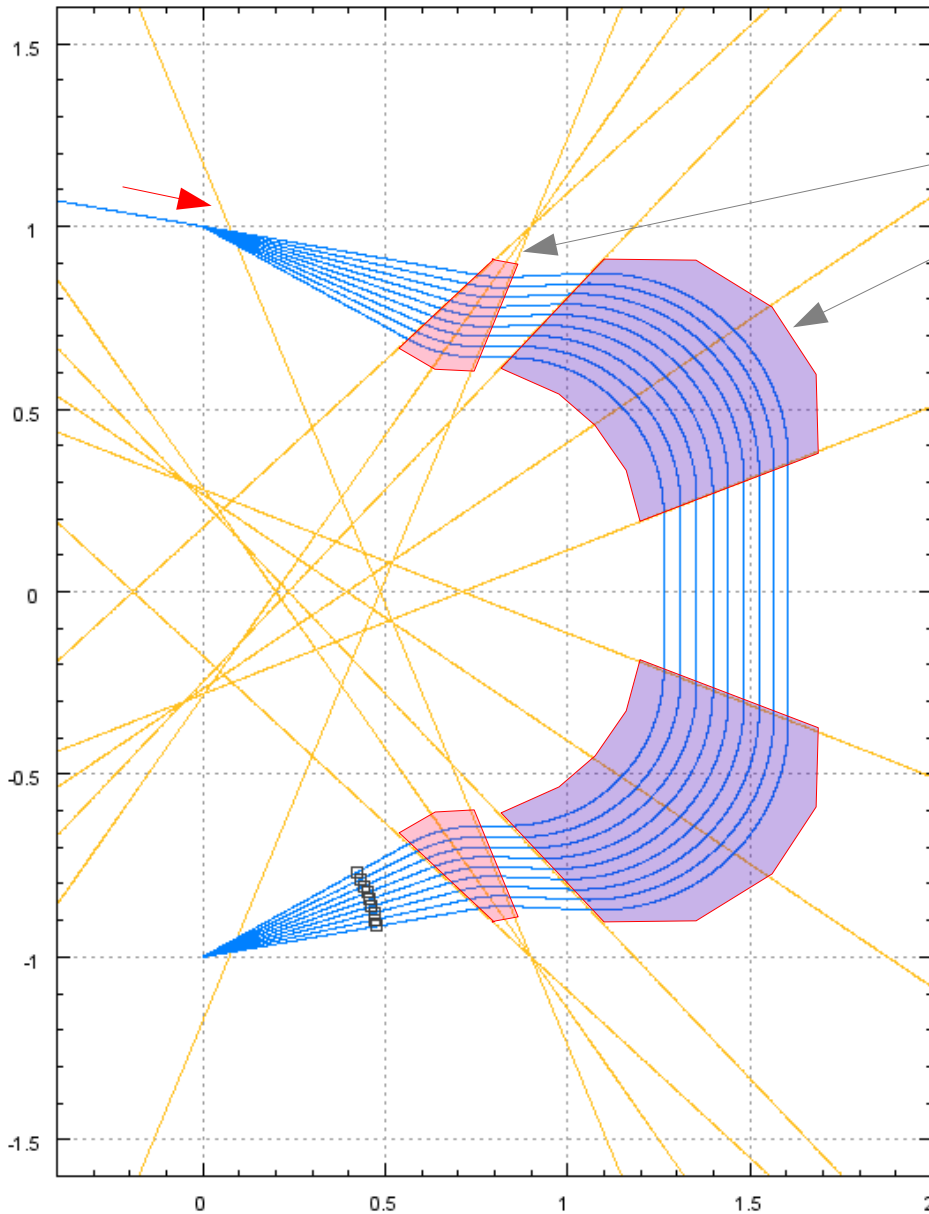
Neues Konzept:

- 2 homogene Sektor-Magnete
- 2 Sektor-Magnete mit Gradienten

Vorteile:

- Konstantes Gap
im ersten und letzten Dipol
- Größerer transversaler Abstand im
Dipol mit Gradient
- Bessere Kontrolle über Gradienten
- Kompaktere Geometrie
- Mehr Parameter zur transversalen
Fokussierung
- Mehr Kontrolle über
alle(!) geometrischen Parameter

4-Dipol-System: Sektor-Magnete 2 homogen und 2 mit Gradienten



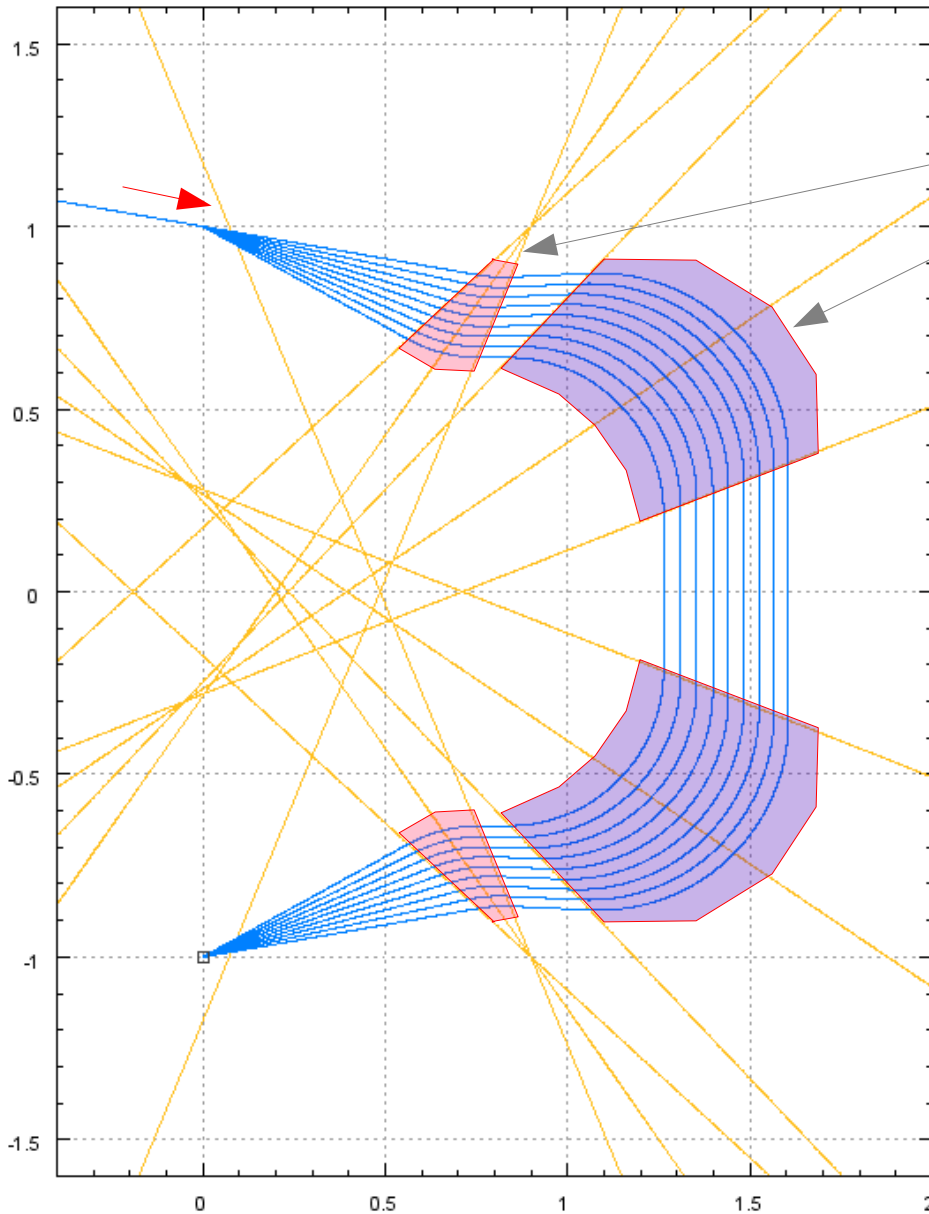
Neues Konzept:

- 2 homogene Sektor-Magnete
- 2 Sektor-Magnete mit Gradienten

Vorteile:

- Konstantes Gap
im ersten und letzten Dipol
- Größerer transversaler Abstand im
Dipol mit Gradient
- Bessere Kontrolle über Gradienten
- Kompaktere Geometrie
- Mehr Parameter zur transversalen
Fokussierung
- Mehr Kontrolle über
alle(!) geometrischen Parameter

4-Dipol-System: Sektor-Magnete 2 homogen und 2 mit Gradienten



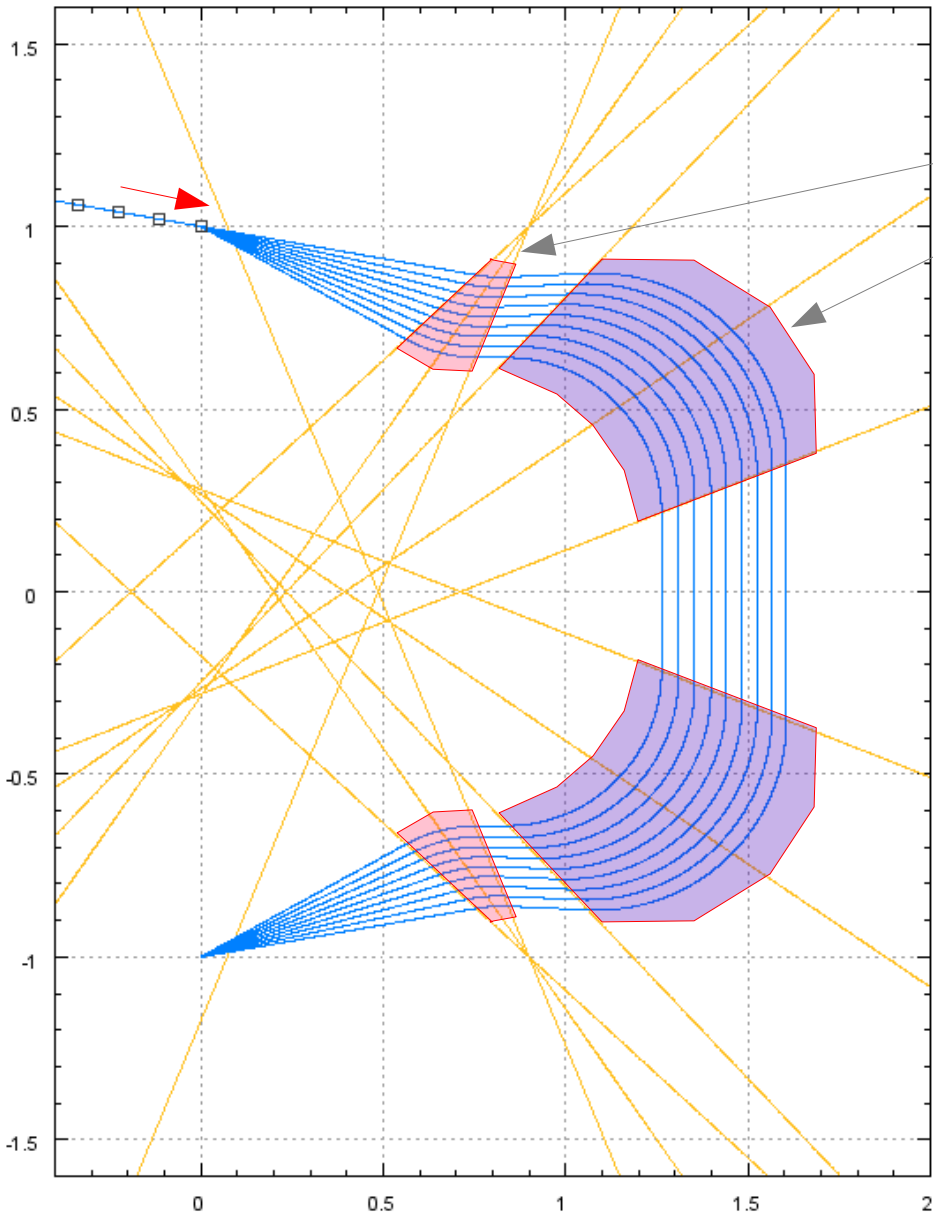
Neues Konzept:

- 2 homogene Sektor-Magnete
- 2 Sektor-Magnete mit Gradienten

Vorteile:

- Konstantes Gap
im ersten und letzten Dipol
- Größerer transversaler Abstand im
Dipol mit Gradient
- Bessere Kontrolle über Gradienten
- Kompaktere Geometrie
- Mehr Parameter zur transversalen
Fokussierung
- Mehr Kontrolle über
alle(!) geometrischen Parameter

4-Dipol-System: Sektor-Magnete 2 homogen und 2 mit Gradienten



Neues Konzept:

- 2 homogene Sektor-Magnete
- 2 Sektor-Magnete mit Gradienten

Parameter (2*4 + 1 + 1) :

α → Winkel der Trajektorie

Sektor-Magnet(1):

$\alpha_m(1)$ → Winkel d. Mittelgeraden

$\alpha_s(1)$ → Scherungswinkel

$p_x(1)$ } → Koordinate d. Ecke

$p_y(1)$ }

$R(1) \Leftrightarrow B(1)$ konstantes Feld

Sektor-Magnet(2):

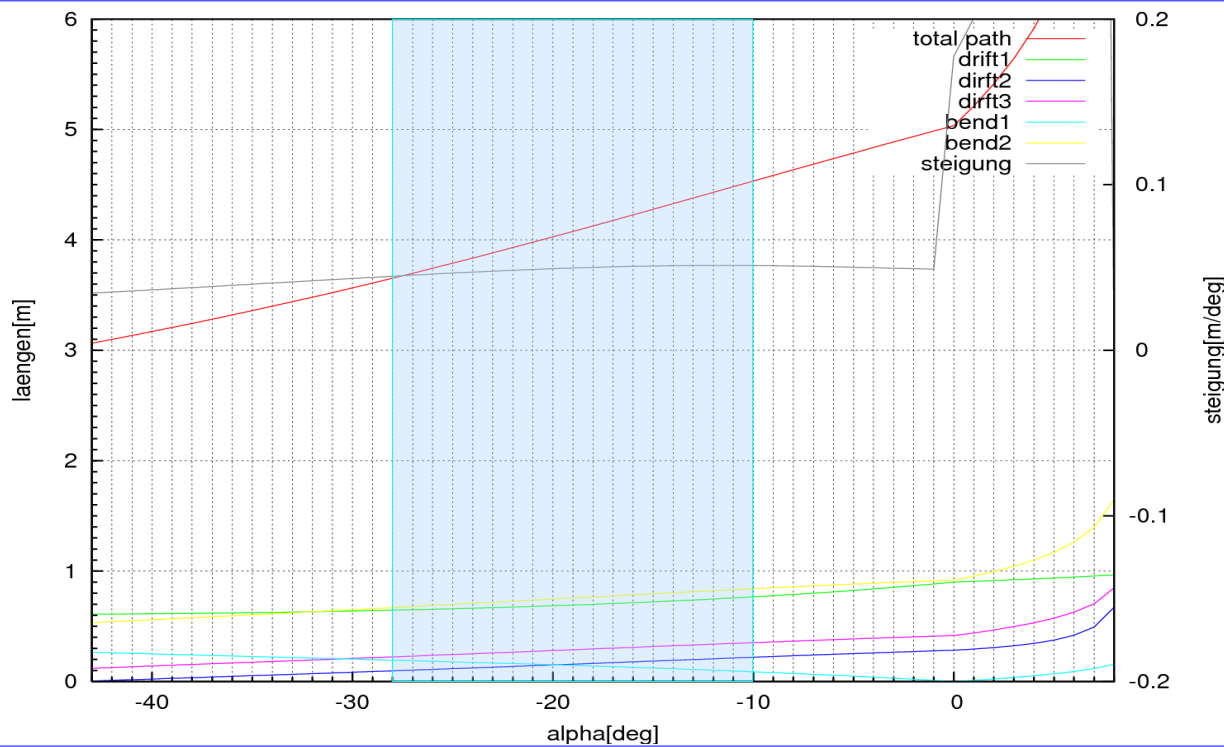
$\alpha_m(2)$ → Winkel d. Mittelgeraden

$\alpha_s(2)$ → Scherungswinkel

$p_x(2)$ } → Koordinate d. Ecke

$p_y(2)$ }

4-Dipol-System: Sektor-Magnete 2 homogen und 2 mit Gradienten



10 freie Parameter:

=> hinreichend flexibles System

Kritische Parameter unter Kontrolle:

- maximale drift₁ < 0.8m
- $\Delta B < 0.1 T$
- $\Delta\alpha_{i,i+1} \approx \text{konstant}$
- $\Delta\alpha_{\text{max}} < 20 \text{ deg}$

Strahldynamik bestimmt das endgültige Design

al	tp	dr1	dr2	b1	b2	bet1	bet2	R2	B2	d_x1	d_x2	d_x3	d_x4	d_x5	d_a	d_x1p	d_tp
[deg]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[deg]	[deg]	[m]	[T]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[[deg]	[m]	[m]
-10.000	4.5322	0.7664	0.2192	0.0881	0.8404	12.623	-92.623	0.5199	0.4023	0.0365	0.0300	0.0390	0.0428	0.0398	2.230	0.0298	-0.1142
-12.230	4.4180	0.7447	0.2038	0.1039	0.8202	14.882	-92.651	0.5072	0.4123	0.0347	0.0293	0.0389	0.0437	0.0406	2.238	0.0291	-0.1143
-14.468	4.3038	0.7253	0.1883	0.1187	0.7994	16.998	-92.530	0.4950	0.4225	0.0332	0.0290	0.0389	0.0445	0.0414	2.256	0.0286	-0.1142
-16.725	4.1895	0.7077	0.1725	0.1327	0.7779	19.004	-92.279	0.4830	0.4330	0.0322	0.0289	0.0391	0.0454	0.0422	2.288	0.0283	-0.1142
-19.013	4.0753	0.6918	0.1566	0.1461	0.7558	20.924	-91.911	0.4712	0.4439	0.0314	0.0291	0.0395	0.0463	0.0431	2.334	0.0282	-0.1142
-21.347	3.9611	0.6774	0.1406	0.1591	0.7331	22.785	-91.438	0.4594	0.4552	0.0309	0.0296	0.0400	0.0473	0.0440	2.394	0.0283	-0.1142
-23.741	3.8469	0.6643	0.1244	0.1718	0.7099	24.608	-90.867	0.4476	0.4672	0.0307	0.0304	0.0407	0.0484	0.0451	2.467	0.0286	-0.1142
-26.208	3.7327	0.6526	0.1079	0.1844	0.6861	26.416	-90.208	0.4358	0.4799	0.0307	0.0314	0.0417	0.0497	0.0462	2.556	0.0291	-0.1142
-28.764	3.6184	0.6421	0.0913	0.1971	0.6617	28.230	-89.467	0.4238	0.4935	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

maximale Winkeldifferenz = 18.764[deg]
mittlere Winkeldifferenz = 2.345[deg]

- Die Entwicklung vom Mobley-Konzept bis zum favorisierten 4-Dipol-System wurde präsentiert.
- Hinreichend flexibles System wurde gefunden.
- Kontrolle über kritische Parameter möglich.
- Einführung von weiteren Parameter wird durch den Aufwand nicht gerechtfertigt
- Endgültiges Design wird durch Strahldynamik festgelegt.

Überblick

- Einführung:
 - Definition von Bunch-Kompression
 - Anwendungsbereiche für Bunch-Kompression
 - Anforderung für FRANZ
- Möglichkeiten der Bunch-Kompression:
 - Grundidee
 - Rebuncher-Konzept: Energiedifferenz
 - Kombination: Energie- und Wegdifferenz
- Untersuchte Geometrien:
 - 1-Dipol-System: ohne Gradienten (Moblely-Konzept)
 - 2-Dipol-System: Rechteck-Magnete mit Gradienten
 - 4-Dipol-System: Rechteck-Magnete 2 homogen und 2 mit Gradienten
 - 4-Dipol-System: Sektor-Magnete 2 homogen und 2 mit Gradienten
- **Kantenfokussierung**
- **Numerik**

Kantenfokussierung

Beim Durchlaufen der Kante eines Dipols erfahren die Teilchen eine **Impulsänderung** abhängig vom β , g , ρ_0 , K und ihrer Positionen (x_0, y_0) bezüglich des Sollteilchen.

$$x = x_0 \quad , \quad x' = \Delta x' + x'_0$$

$$y = y_0 \quad , \quad y' = \Delta y' + y'_0$$

radialer Kick: $\Delta x' = + \frac{\tan(\beta)}{\rho_0} \cdot x_0 = k_x \cdot x_0$

axialer Kick: $\Delta y' = - \frac{\tan(\beta_{eff})}{\rho_0} \cdot y_0 = k_y \cdot y_0$

$$\tan(\beta_{eff}) = \tan \beta - \underbrace{\left(\frac{g \cdot K}{\rho_0} \right) \cdot \frac{1 + \sin^2 \beta}{\cos^3 \beta}}_{\text{Korrektur in 1. Ordnung von } \left(\frac{g}{\rho_0} \right)} = \tan \beta - \tilde{K} \cdot \frac{1 + \sin^2 \beta}{\cos^3 \beta}$$

$$\tilde{K} = \frac{g \cdot K}{\rho_0}$$

$$\beta > 0 \quad , \quad x_0 > 0 \quad , \quad y_0 > 0$$

=> defokussierend in x-Richtung

=> fokussierend in y-Richtung

β = Kantenwinkel

g = Gap

ρ_0 = mittlerer Umlenkradius

K = Randfeld-Integral (später mehr...)

Kantenfokussierung

Beim Durchlaufen der Kante eines Dipols erfahren die Teilchen eine **Impulsänderung** abhängig vom β , g , ρ_0 , K und ihrer Positionen (x_0, y_0) bezüglich des Sollteilchen.

$$x = x_0 \quad , \quad x' = \Delta x' + x'_0$$

$$y = y_0 \quad , \quad y' = \Delta y' + y'_0$$

radialer Kick: $\Delta x' = + \frac{\tan(\beta)}{\rho_0} \cdot x_0 = k_x \cdot x_0$

axialer Kick: $\Delta y' = - \frac{\tan(\beta_{eff})}{\rho_0} \cdot y_0 = k_y \cdot y_0$

$$\tan(\beta_{eff}) = \tan \beta - \underbrace{\left(\frac{g \cdot K}{\rho_0} \right) \cdot \frac{1 + \sin^2 \beta}{\cos^3 \beta}}_{\text{Korrektur in 1. Ordnung von } \left(\frac{g}{\rho_0} \right)} = \tan \beta - \tilde{K} \cdot \frac{1 + \sin^2 \beta}{\cos^3 \beta}$$

$$\tilde{K} = \frac{g \cdot K}{\rho_0}$$

\tilde{K} => Symmetrie der Abbildung

ρ_0 => Stärke der Abbildung

β = Kantenwinkel

g = Gap

ρ_0 = mittlerer Umlenkradius

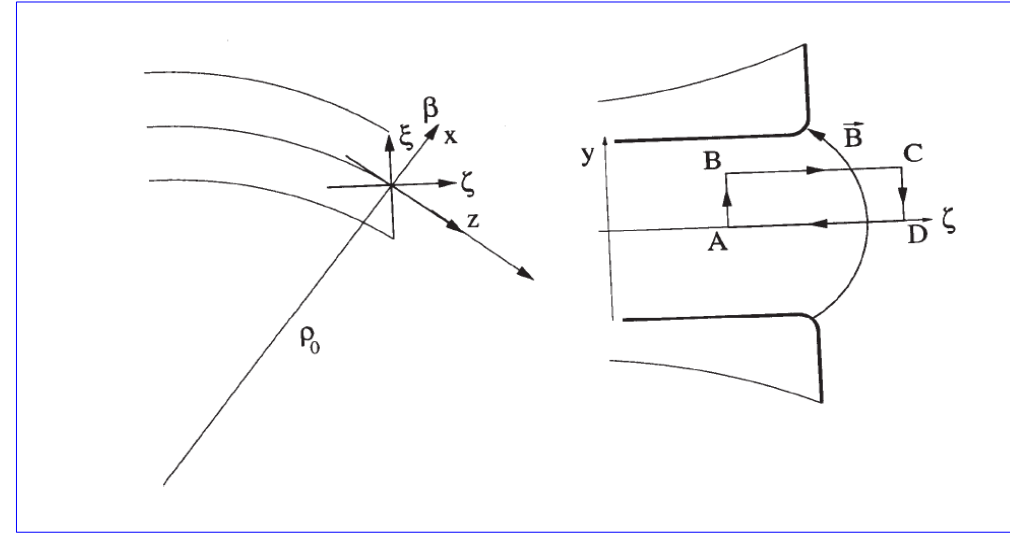
K = Randfeld-Integral (später mehr...)

Randfeld-Integral

$$K = \int_A^D d\zeta \frac{1}{g(\zeta)} \frac{B_y(\zeta) (B_0 - B_y(\zeta))}{B_0^2}$$

ξ = parallel zur Kante

ζ = senkrecht zur Kante

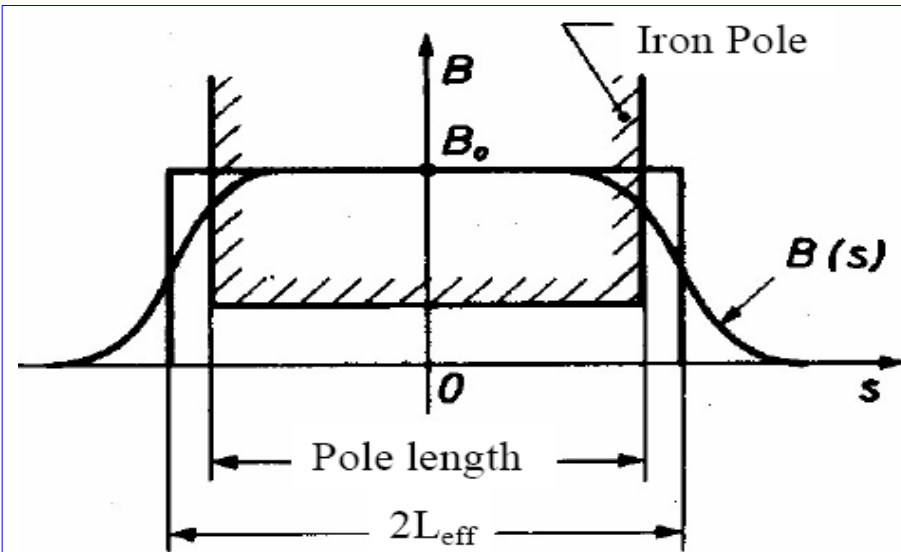


- Typische Werte für reale Kanten: $K = 0.3 \dots 1.0$, $K=0 \Leftrightarrow$ „hard edge“
- Für $g = \text{const} \Rightarrow K =$ „Maß für die Länge des Randfeld“

je größer K , desto länger ist das Randfeld

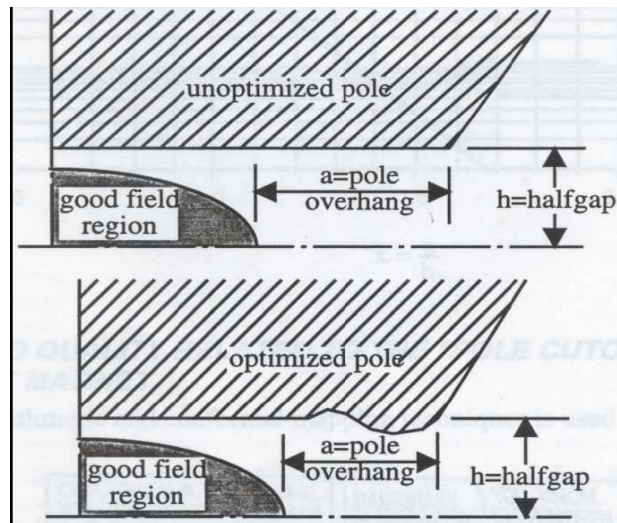
- K läßt sich berechnen, wenn die Feldverteilung in ξ -Richtung beispielsweise aus *Meßungen* oder aus *Simulationsprogrammen* bekannt ist

Randfeld-Integral



$$L_{eff} = \int_0^{\infty} ds \frac{B(s)}{B_0}$$

Rogowski profile $\Rightarrow 2 \cdot L_{eff} = \text{Pole Length}$



$$K \approx 0.45$$

Rogowski-Form:

$$K \approx 0.70$$

Kantenfokussierung mit den Paramter des 4-Dipol-System

$\rho=0.40[m] \Leftrightarrow B=0.5192[T]$
 Randfeld-Integral $K=0.45$

$$\tilde{K} = \frac{g}{\rho_0} \cdot K$$

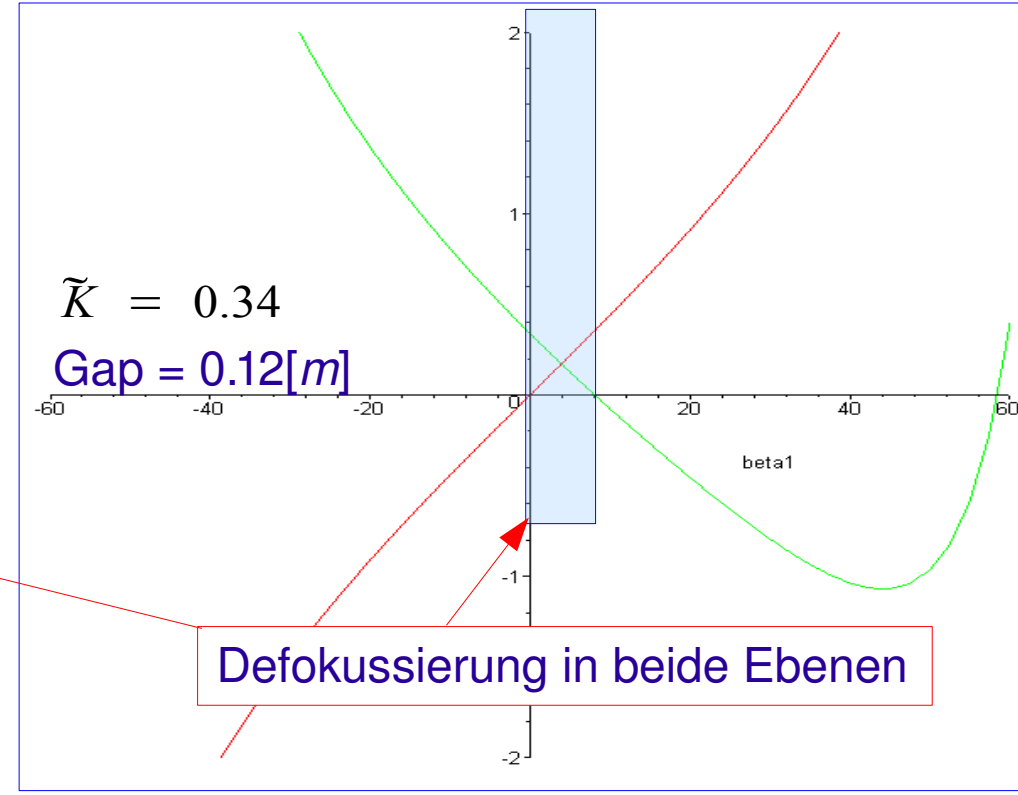
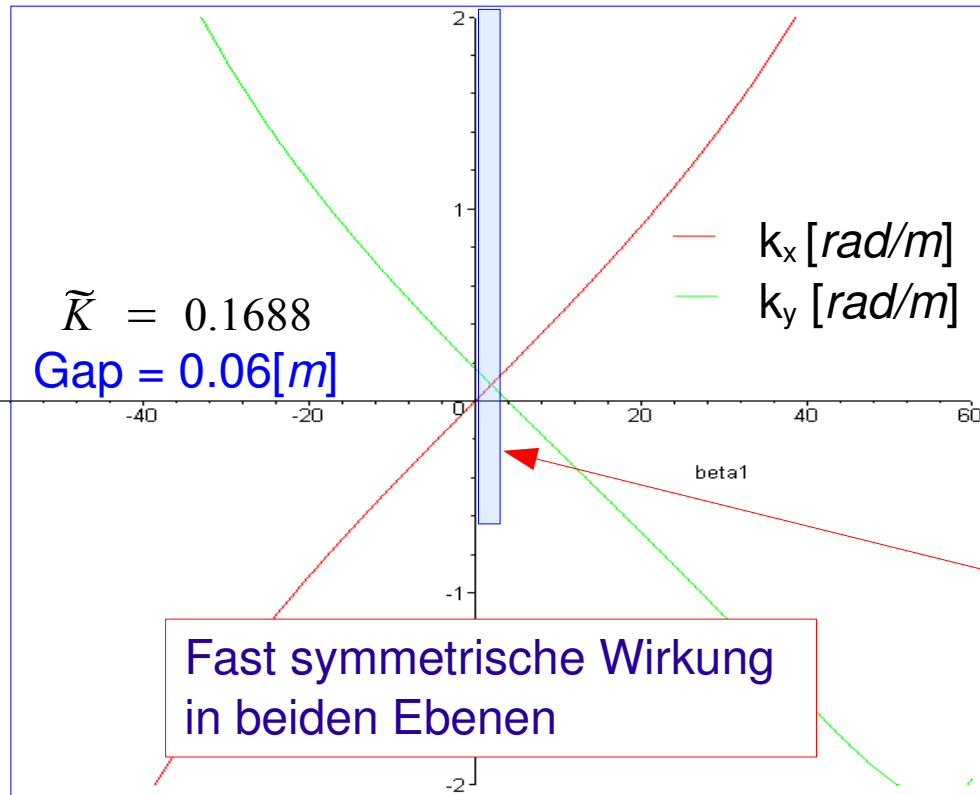
beta1=Kantenwinkel [deg]

$k_y = \text{Kick / Ablage [rad/m]} = (y'-y'_0)/y_0$

$k_x = \text{Kick / Ablage [rad/m]} = (x'-x'_0)/x_0$

$$\Delta x' = + \frac{\tan(\beta)}{\rho_0} \cdot x_0 = k_x \cdot x_0$$

$$\Delta y' = - \frac{\tan(\beta_{eff})}{\rho_0} \cdot y_0 = k_y \cdot y_0$$



Kantenfokussierung mit den Parameter des 4-Dipol-System

$$\rho=0.40[m] \Leftrightarrow B=0.5192[T]$$

Randfeld-Integral $K=0.45$

$$\tilde{K} = \frac{g}{\rho_0} \cdot K$$

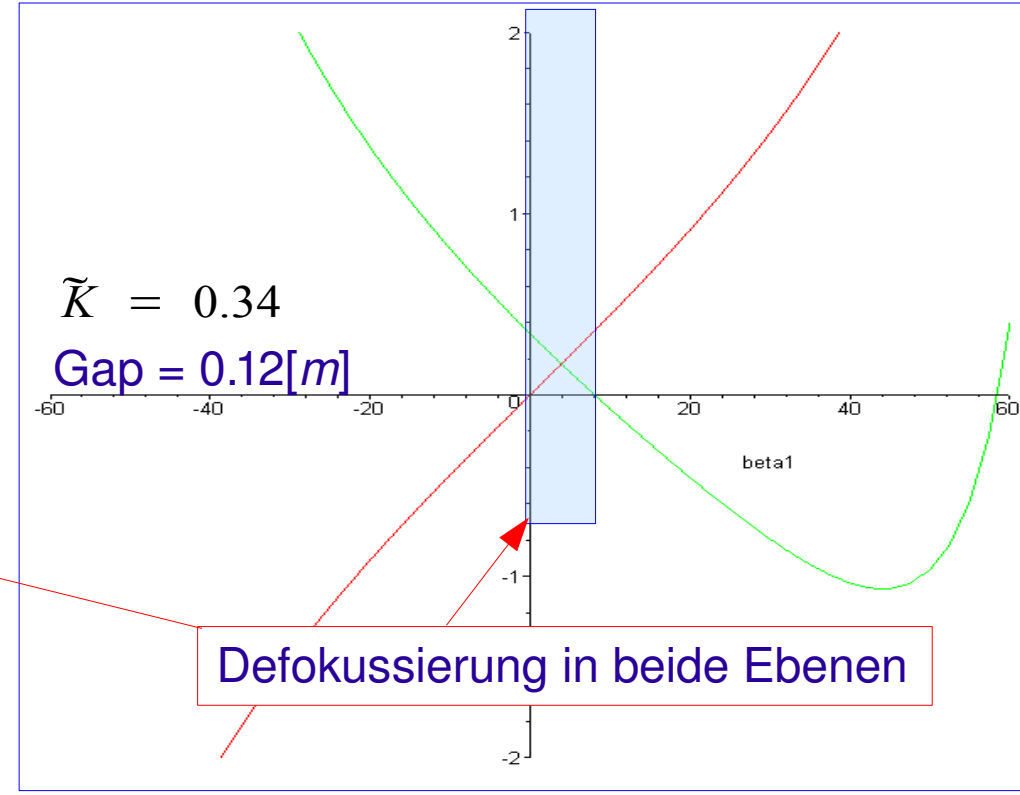
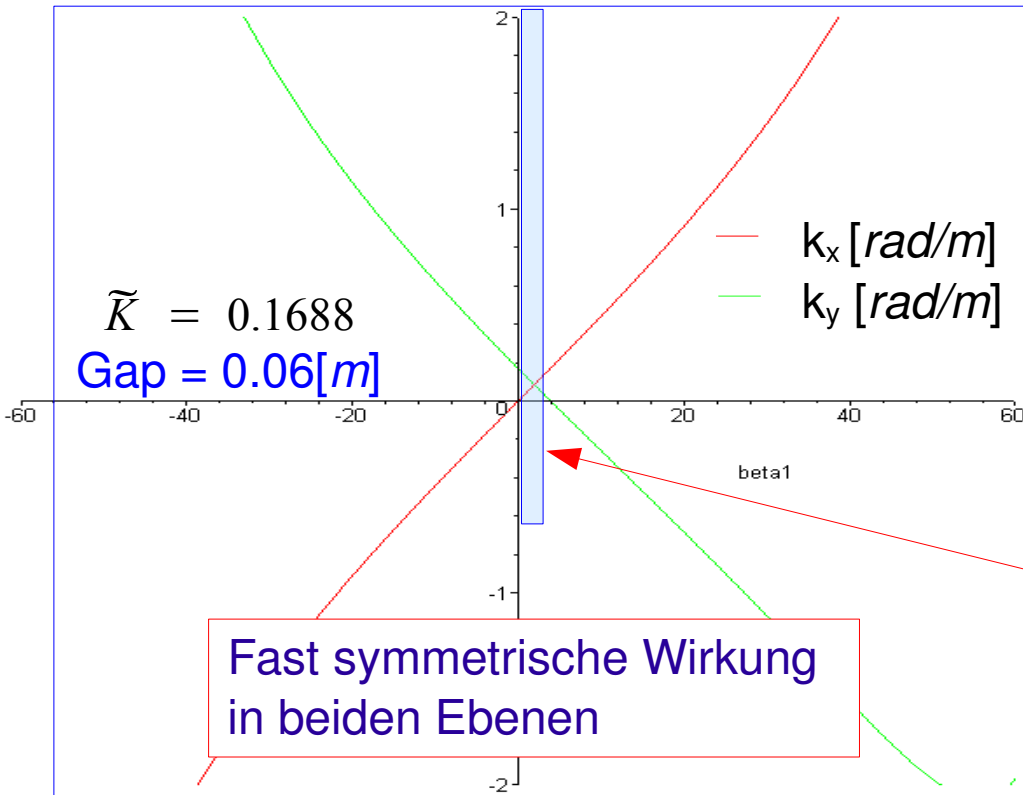
beta1=Kantenwinkel [deg]

$$k_y = \text{Kick / Ablage [rad/m]} = (y'-y'_0)/y_0$$

$$k_x = \text{Kick / Ablage [rad/m]} = (x'-x'_0)/x_0$$

- Kantenfokussierung mit den Parameter aus der **4-Dipol-Geometrie** ist möglich.

- Abbildungseigenschaften hängen von der Geometrie der Kante und des Randfelds ab.



Fast symmetrische Wirkung in beiden Ebenen

Defokussierung in beide Ebenen

Überblick

- Einführung:
 - Definition von Bunch-Kompression
 - Anwendungsbereiche für Bunch-Kompression
 - Anforderung für FRANZ
- Möglichkeiten der Bunch-Kompression:
 - Grundidee
 - Rebuncher-Konzept: Energiedifferenz
 - Kombination: Energie- und Wegdifferenz
- Untersuchte Geometrien:
 - 1-Dipol-System: ohne Gradienten (Moblely-Konzept)
 - 2-Dipol-System: Rechteck-Magnete mit Gradienten
 - 4-Dipol-System: Rechteck-Magnete 2 homogen und 2 mit Gradienten
 - 4-Dipol-System: Sektor-Magnete 2 homogen und 2 mit Gradienten
- Kantenfokussierung
- Numerik

Parallel zur Geometrie-Untersuchungen des Bunch-Kompressors wurden Strahldynamik-Rechnungen mit **TRACE3D**, **PARMILA** und **LORASR** durchgeführt.

Aufgrund der **Geometrie** und die **Strahleigenschaften** innerhalb des Bunch-Kompressors eignen sich die üblichen Transport-Programme zur LINAC-Entwicklung nicht für eine akkurate Beschreibung des Systems.

=> **Für den Bunch-Kompressor zugeschnittenes Transport-Programm wird benötigt.**

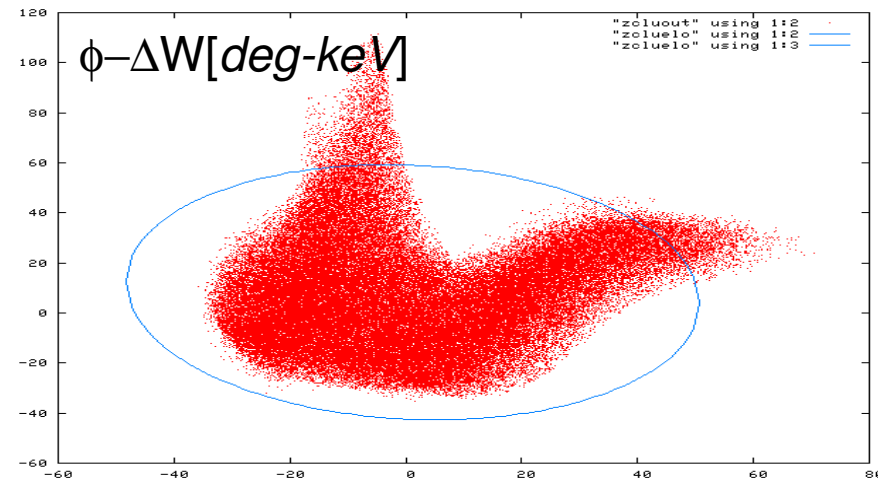
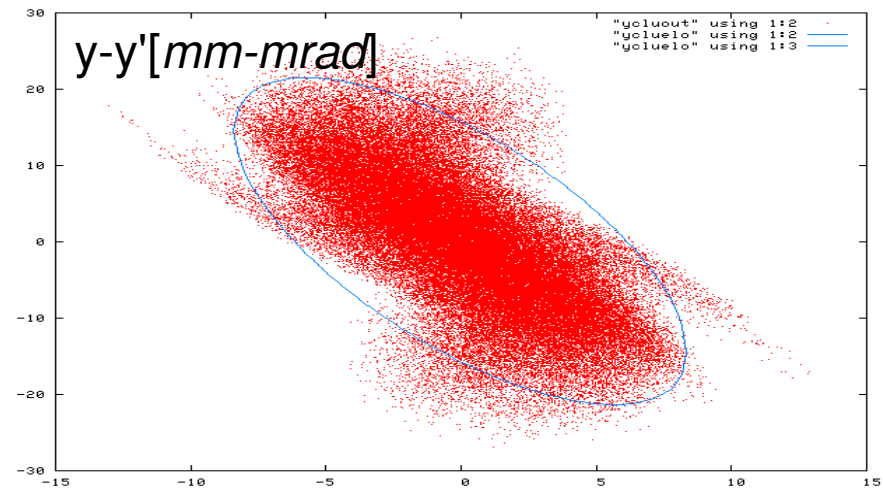
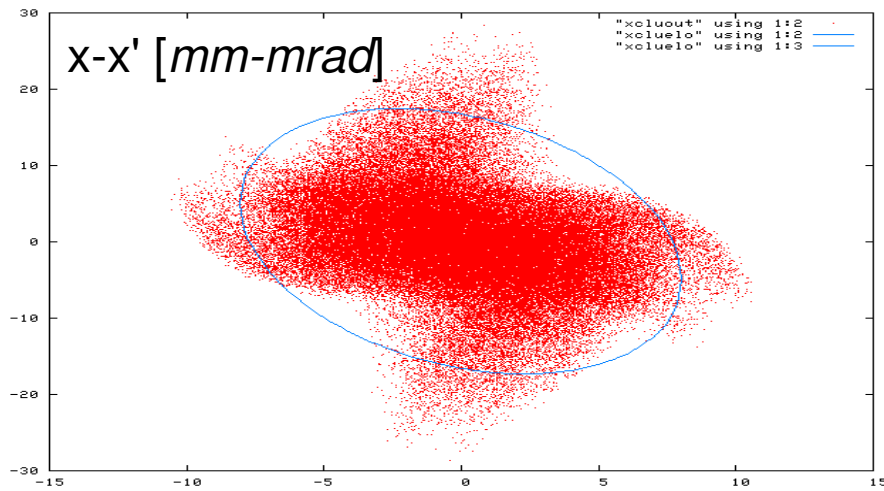
Anforderung an das Programm:

- „Multi-Particle“, Raumladung
- „Multi-Bunch“
- flexible Geometrie, „Merging“
- Einlesen von externen Felder

Strategie:

- mitbewegendes Gitter mit offenen Randbedignungen
- Orstfestes Koordiantensystem
- Numerisches Lösen der Poisson-Gleichung
und Bewegungsgleichung durch „finite Differenzen“

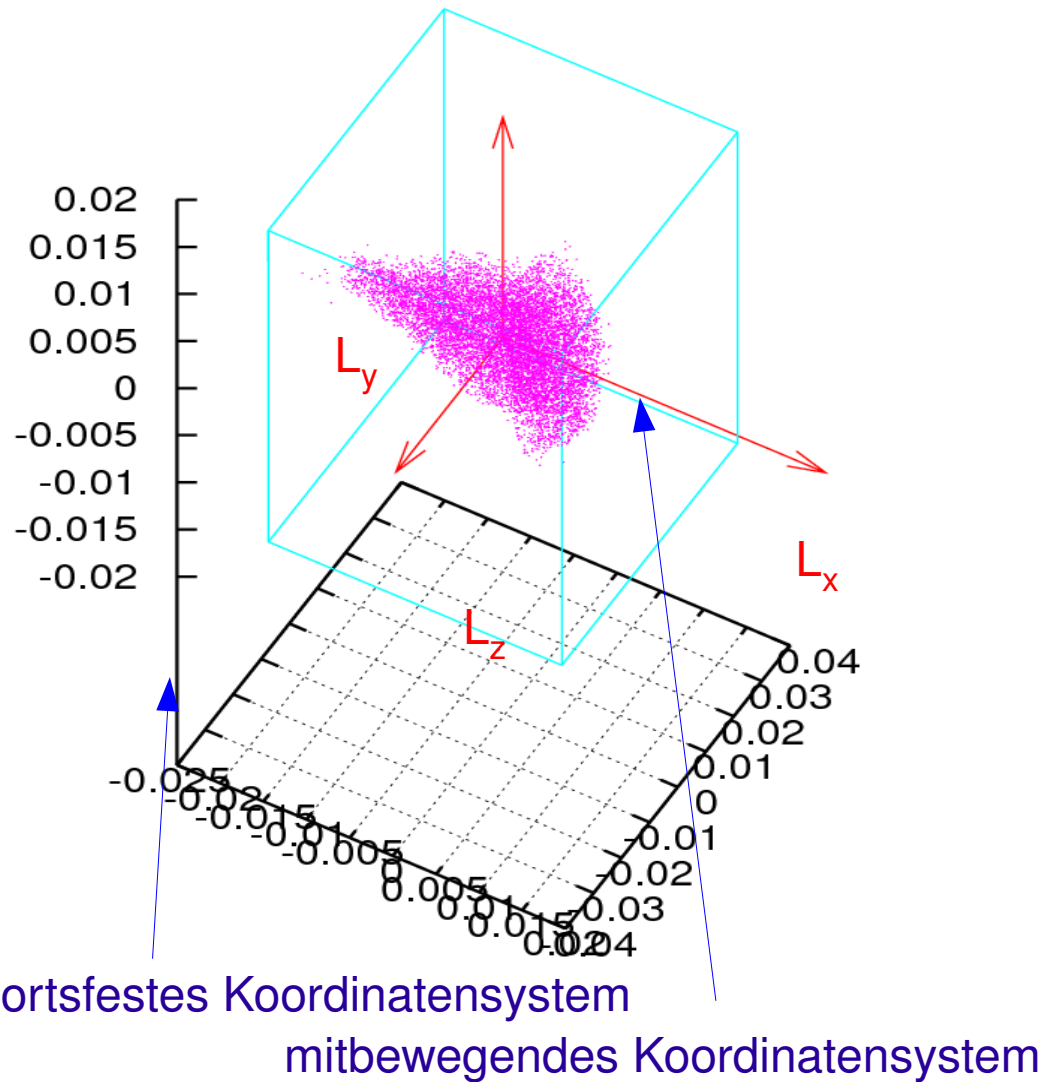
Numerik: Einlesen der HI-Ausgangsverteilung von LORASR



Bunch-Dimensionen:

x.max= 0.0129[m]
y.max= 0.0105[m]
z.max= 0.0221[m]

x.rms= 0.0062[m]
y.rms= 0.0032[m]
z.rms= 0.0033[m]



Definiere:

- Schwerpunkt-Position
- Schwerpunkt-Impuls
- Gitterkonstanten (g_x, g_y, g_z)

Gitterlängen(L_x, L_y, L_z)

werden durch RMS-Längen definiert, um Halo-Teilchen zu unterdrücken:

$$L_x = 10 * x.\text{rms}$$

$$L_y = 10 * y.\text{rms}$$

$$L_z = 10 * z.\text{rms}$$

Bunch-Längen:

$$x.\text{max} = 0.0129[\text{m}]$$

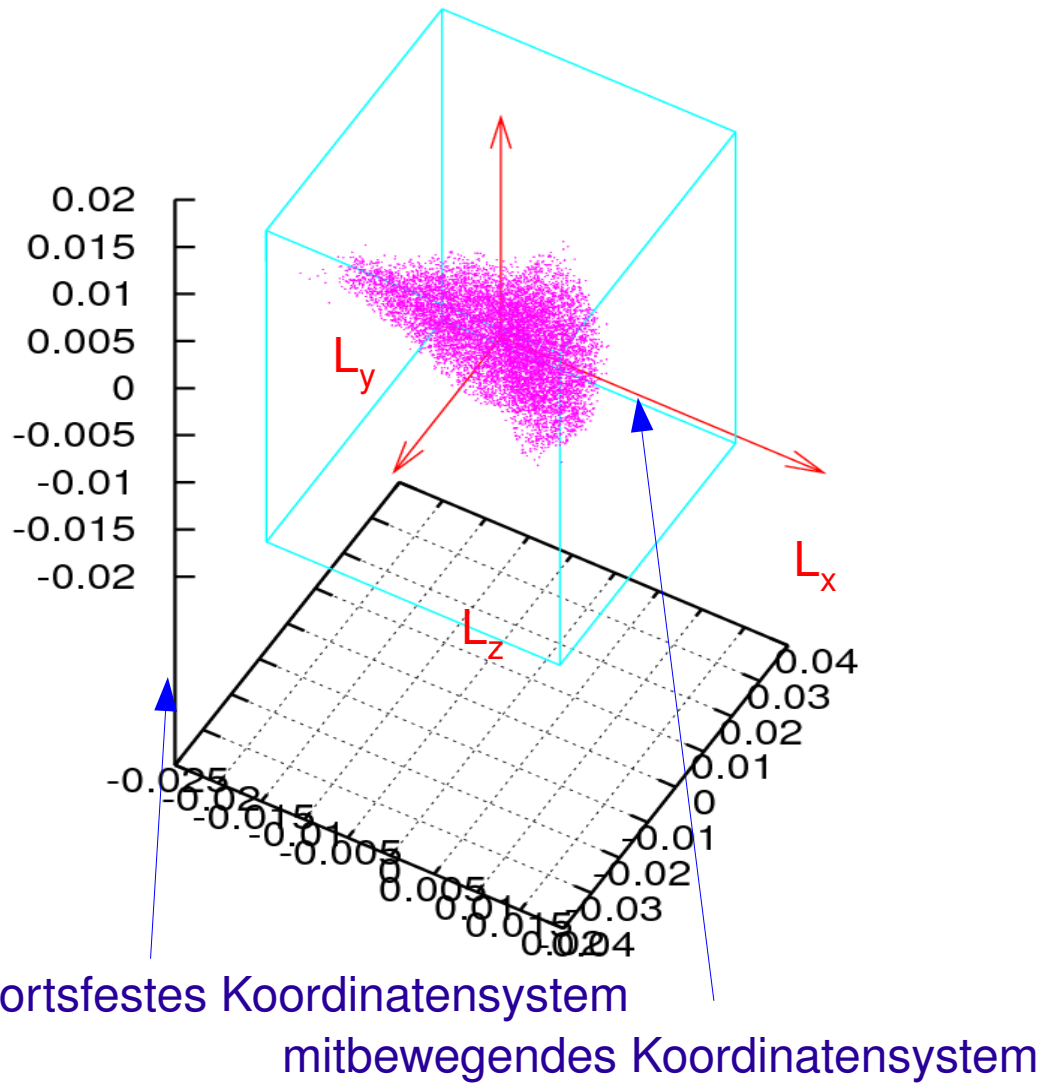
$$y.\text{max} = 0.0105[\text{m}]$$

$$z.\text{max} = 0.0221[\text{m}]$$

$$x.\text{rms} = 0.0062[\text{m}]$$

$$y.\text{rms} = 0.0032[\text{m}]$$

$$z.\text{rms} = 0.0033[\text{m}]$$



Verteile
Ladungsdichte
mit der „**Cloud in
Cell**“-Methode auf
die Gitterpunkte.

Gitterlängen(L_x, L_y, L_z)
werden durch
RMS-Längen definiert,
um Halo-Teilchen zu
unterdrücken:

$$L_x = 10 * x.rms$$

$$L_y = 10 * y.rms$$

$$L_z = 10 * z.rms$$

Bunch-Längen:

$$x.max = 0.0129[m]$$

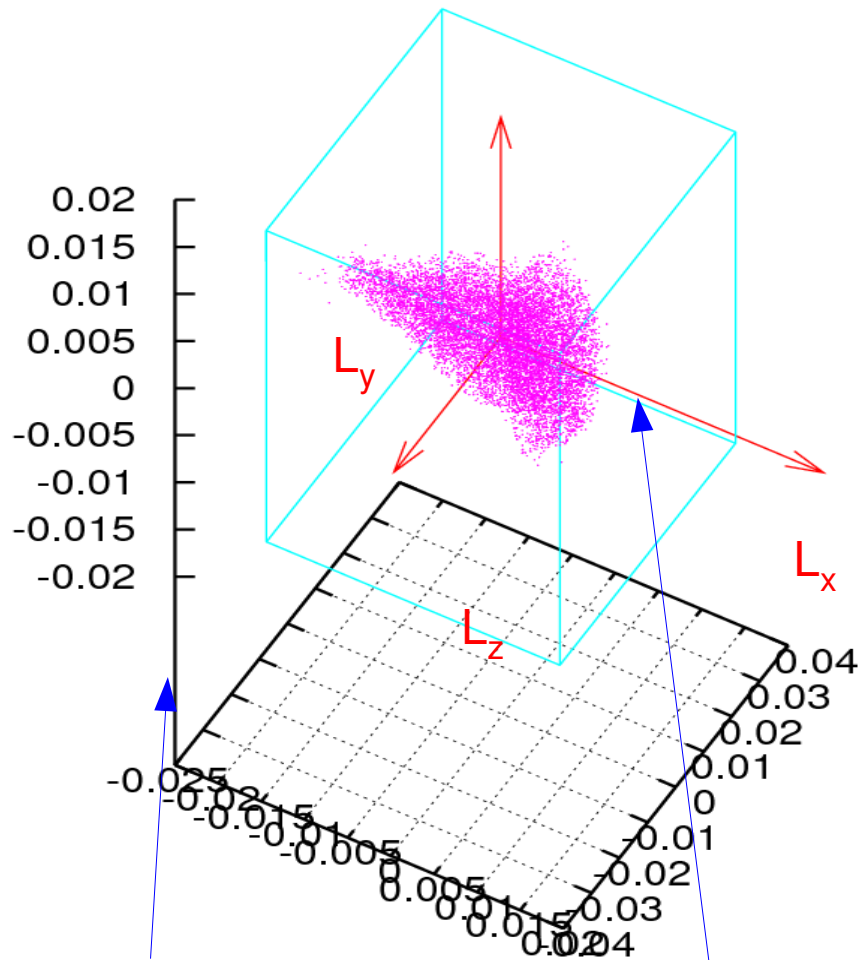
$$y.max = 0.0105[m]$$

$$z.max = 0.0221[m]$$

$$x.rms = 0.0062[m]$$

$$y.rms = 0.0032[m]$$

$$z.rms = 0.0033[m]$$



ortsfestes Koordinatensystem

mitbewegendes Koordinatensystem

Jede Ladung wird mit einem **Gewichtungsfaktor** auf jeden nächsten Gitterpunkt verteilt. Der Gewichtungsfaktor hängt vom **Abstand zum Gitterpunkt** ab.

Verteile Ladungsdichte mit der „**Cloud in Cell**“-Methode auf die Gitterpunkte.

Gitterlängen(L_x, L_y, L_z) werden durch RMS-Längen definiert, um Halo-Teilchen zu unterdrücken:

$$\begin{aligned} L_x &= 10 * x.\text{rms} \\ L_y &= 10 * y.\text{rms} \\ L_z &= 10 * z.\text{rms} \end{aligned}$$

Bunch-Längen:

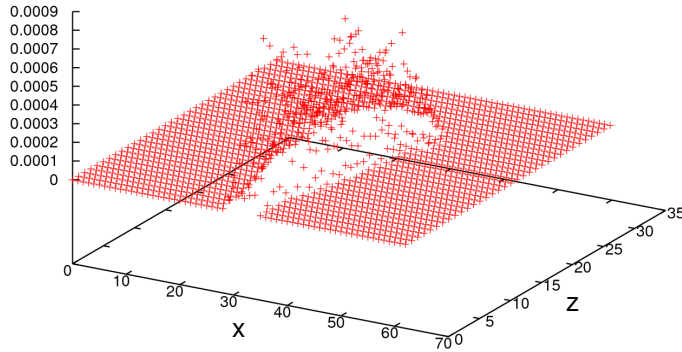
$$\begin{aligned} x.\text{max} &= 0.0129[\text{m}] \\ y.\text{max} &= 0.0105[\text{m}] \\ z.\text{max} &= 0.0221[\text{m}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x.\text{rms} &= 0.0062[\text{m}] \\ y.\text{rms} &= 0.0032[\text{m}] \\ z.\text{rms} &= 0.0033[\text{m}] \end{aligned}$$

Numerik: „Poisson-Solver“ durch Matrix-Methode

(x,z)-Ebene bei $y=N_y/2$

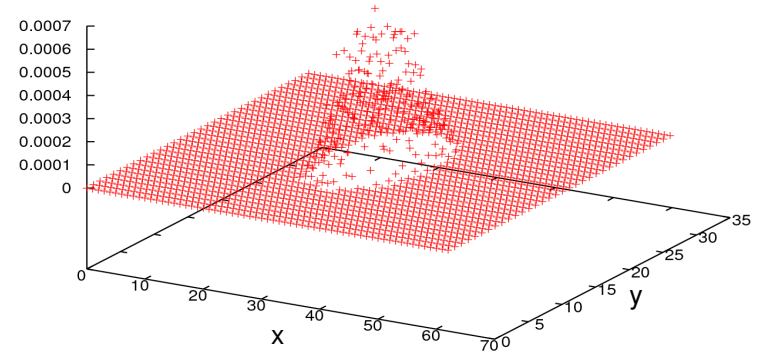
"pot_rho_l.dat" u (\$1):(\$2):(\$3) +



Ladungsdichte auf den Gitterpunkten

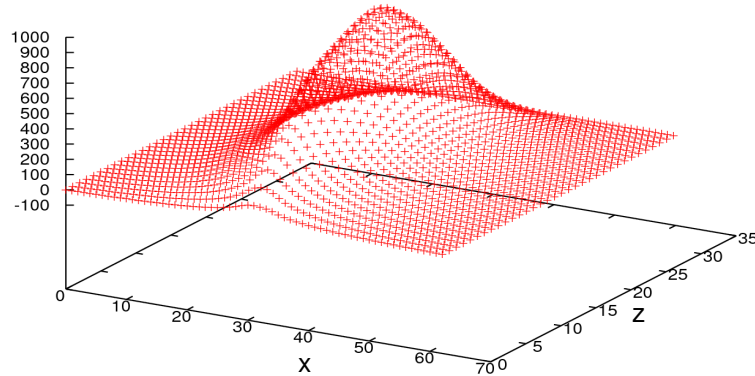
(x,y)-Ebene bei $z=N_z/2$

"pot_rho_t.dat" u (\$1):(\$2):(\$3) +



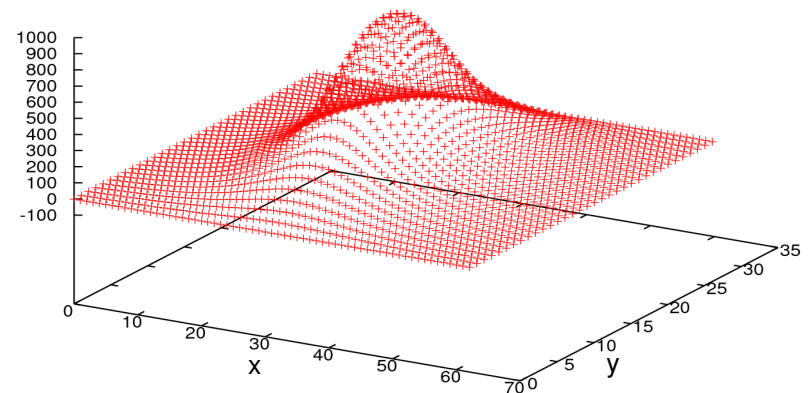
Ladungsdichte auf den Gitterpunkten

"pot_l.dat" u (\$1):(\$2):(\$3) +



Potential auf den Gitterpunkten

"pot_t.dat" u (\$1):(\$2):(\$3) +



Potential auf den Gitterpunkten

- Drift mit Raumladung.
- „Merging“ von zwei Bunchen.
- Einlesen von externen Feldern.
- Transport durch Dipol-Feld mit Raumladung bei beliebiger Geometrie.

- Verschiedene *Möglichkeiten der Bunch-Kompression* wurden präsentiert
- Die Entwicklung vom *Mobley-Konzept* bis zur *4-Dipol-Geometrie* wurde dargestellt.
- Das Prinzip der *Kantenfokussierung* wurde an Beispielen erläutert.
- Die *Entwicklung eines Transport-Programms* für den Bunch-Kompressor wurde gestartet.
- Vorläufige Ergebnisse des Poisson-Solver wurden präsentiert.

- Verschiedene *Möglichkeiten der Bunch-Kompression* wurden präsentiert
- Die Entwicklung vom *Mobley-Konzept* bis zur *4-Dipol-Geometrie* wurde dargestellt.
- Das Prinzip der *Kantenfokussierung* wurde an Beispielen erläutert.
- Die *Entwicklung eines Transport-Programms* für den Bunch-Kompressor wurde gestartet.
- Vorläufige Ergebnisse des Poisson-Solver wurden präsentiert.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit !