

DESY-Bericht A 1.9
Hamburg, den 9. 4. 62
Dr. Ha/Br

Die Polflächenwindungen für den DESY-Magneten

	Seite
1. Warum braucht man Polflächenwindungen?	2
2. Wie erhält man die richtigen Zusatzfelder?	3
3. Die PFW Anordnung des DESY-Magneten	7
4. Kurze Beschreibung der Ausführung der PFW	15
5. Literatur	18

1. Warum braucht man Polflächenwindungen?

Verschiedene Abweichungen vom idealen Verhalten machen es wünschenswert und z. T. notwendig, das Magnetfeld zum Zeitpunkt der Injektion zu korrigieren.

1.1 Anlaß für die Korrekturen sind:

Eine Änderung des Feldindex infolge der Remanenz der Magnetbleche. Wir haben etwa $\frac{\delta n}{n} = + 2 \%$ im D-Sektor, $\frac{\delta n}{n} = + 4 \%$ im F-Sektor bei Normal-Betriebsbedingungen.

1.2 Der Wunsch zur Unterdrückung der Satellitenstopbänder, die die Kopplung der Synchrotron- und Betatronschwingung als Ursache haben. Dies ist möglich durch Nichtlinearmachen der Maschine, d. h. durch Überlagerung von bestimmten n'_D und n'_F . Da die Auswanderung der Satellitenstopbänder mit zunehmender Teilchenenergie und der damit abnehmenden Synchrotronschwingungsfrequenz abnimmt, genügt es, das n' bei der Injektion zu haben. Wird es mit Gleichstrom gemacht, so nimmt es wie $\sim B^{-1}$ ab.

1.3 Die Beseitigung eines systematischen B-Fehlers, der als Hauptursache die verschieden großen remanenten Felder im F- und D-Sektor (infolge verschieden großen Entmagnetisierungsfaktor) hat. Eine weitere Ursache besteht darin, daß der Betrieb mit Sextupolwindungen, die für n'_D und n'_F notwendig sind, ebenfalls einen systematischen B-Fehler verursacht, wenn die Sextupolwindungen so geschaltet werden, daß in ihnen vom Feld keine Spannung induziert wird. Glücklicherweise ist das Vorzeichen so, daß sich die beiden systematischen B-Fehler subtrahieren, aber nicht aufheben.

1.4 Der Wunsch nach der Möglichkeit, statistische B-Fehler beseitigen zu können. Diese treten einmal auf, infolge der Schwankung des remanenten Feldes von Sektor zu Sektor wegen der schwankenden

effektiven Koerzitifkraft der Bleche, zum ändern durch die vertikale Komponente der Streufelder in den geraden Stücken. Die horizontale Komponente wird gesondert kompensiert. Es muß auch mit von Sektor zu Sektor variierenden Felder gerechnet werden, die von den kapazitiven Leckströmen der Energieversorgung herrühren, falls es nicht gelingt, von der Energieversorgungsseite her diese genügend klein bzw. gleich zu machen. Diese Fehler wirken sich ebenfalls bei der Injektion maximal aus.

2. Wie erhält man die richtigen Zusatzfelder?

2.1 Ein Feld, das ohne B-Änderung am Sollkreis nur den Feldindex n ändert, ist ein Quadrupolfeld mit dem Ursprung am Sollkreis. Ein Feld, das ohne B und n - Änderung am Sollkreis nur n' ändert, ist ein Sextupolfeld mit dem Ursprung am Sollkreis. Da die Polkontur nicht geändert werden soll, lassen sich diese Felder nur durch Zusatzströme aufbauen. Man hat die Wahl, die Drähte für diese Zusatzströme an der Polkontur oder an der Vakuumkammer anzubringen. Wir entschlossen uns dazu, die Polkontur zu verwenden, da wir noch nichts genaues über die Vakuumkammer wissen. Wie gelangt man nun zu der richtigen Drahtanordnung? Es erschien ähnlich wie bei der Polkontur wieder am einfachsten und am genauesten, die Drahtanordnung zu berechnen.

2.2 Überlagert man das erwünschte Zusatzfeld dem vom Magneten erzeugten Feld, so entsteht i. A. an der Polkontur eine tangentiale Feldkomponente $H_t(s)$ (s sei die Bogenlänge längs der Polkontur.) Nun ist ein Strombelag $\frac{\Delta y}{\Delta s}$ an der Polkontur dieser Tangentialkomponente gleichwertig (Flächenrotation der 2. Maxw. Gleichung). Man hat also

$$H_t(s) = \frac{\Delta y}{\Delta s} (s)$$

Ein kontinuierlicher Strombelag ist natürlich nicht realisierbar. Es müssen Einzeldrähte verwendet werden. Hier hat man die Wahl, entweder die Lage der Drähte vorzugeben und die Ströme einzeln

einzustellen, oder die Lage der Drähte so zu wählen, daß die Drähte alle gleichen Strom führen und hintereinandergeschaltet werden können. Die erste Möglichkeit ist äußerst unbequem, obwohl sich sehr allgemeine Zusatzfelder erzeugen lassen. Da aber irgendwo Rückleiter liegen müssen bzw. der betreffende Draht einen erheblichen Teil des magnetischen Wechselflusses umfaßt, werden erhebliche Spannungen induziert. Die Drähte für systematische Korrekturen sollen nämlich gemeinsam betrieben werden, d. h. alle Sektoren gleichen Typs werden hintereinandergeschaltet. Dann summieren sich aber bei beliebig einstellbaren Einzelströmen die induzierten Spannungen zu sehr auf. Im Falle, daß die Drähte gleichen Strom führen, hat man aber die Möglichkeit, die Rückleiter so anzuordnen, daß die gesamte induzierte Spannung verschwindet. Dann ist ein Betrieb mit Gleichstrom bequem möglich.

2.3 Wir rechnen uns die Tangentialkomponente H_t (s) an der Kontur aus als das innere Produkt des Zusatzfeldes, mit dem Einheitsvektor an der Polkontur. Hierbei legen wir zunächst die hyperbelförmige Kontur eines strengen Vierpolfeldes zugrunde. Die Bezeichnungen sind wie im DESY - Bericht A 1.5.

Der Einheitsvektor längs der Kontur ist $\frac{\bar{z}}{\sqrt{z \bar{z}}}$

Das Zusatzfeld sei $\Delta \mathcal{L}$

dann hat man $\mu H_t = B_t = \operatorname{Re} \left\{ \Delta \mathcal{L} \cdot \frac{\bar{z}}{\sqrt{z \bar{z}}} \right\} = \mu \frac{d \mathcal{Y}}{d s}$.

Für die weitere Berechnung ist $\frac{d \mathcal{Y}}{d x}$ einfacher zu handhaben,

weswegen die Gleichung mit $\frac{d s}{d x} = \frac{\sqrt{z \bar{z}}}{x}$ multipliziert wird.

Man erhält $\mu \frac{d \mathcal{Y}}{d x} = \operatorname{Re} \left\{ \Delta \mathcal{L} \cdot \frac{\bar{z}}{x} \right\} = \operatorname{Re} \left\{ \Delta \mathcal{L} \cdot \frac{z}{x} \right\}$

Da wir nach den Strömen fragen, die jeder das gleiche stückweise Integral $\int \frac{d \mathcal{Y}}{d x} dx = \Delta \mathcal{Y}$ repräsentieren sollen, wird über x integriert

$$\Delta \mathcal{Y} = \frac{1}{\mu} \int \operatorname{Re} \left\{ \Delta \mathcal{L} \cdot \frac{z}{x} \right\} dx .$$

2.4 Das Zusatzvierpolfeld ist

$$(\Delta \mathcal{L})_4 = i B_s \cdot \frac{\Delta n}{n_0} \cdot \frac{(\bar{z} - x_s)}{x_s}$$

das Sextupolfeld $(\Delta \mathcal{L})_6 = i B_s \cdot \frac{n'}{n_0} \frac{(\bar{z} - x_s)^2}{2 x_s}$, woraus man erhält

$$\text{hält} \left(\frac{d\mathcal{Y}}{dx} \right)_4 = B_s \frac{\Delta n}{n_0} \frac{y}{x} \text{ bzw. } \frac{d\mathcal{Y}}{dy} = \pm \frac{\Delta n}{n_0} \frac{\mathcal{Y}_{\text{ges}}}{y_s} \text{ mit } \mathcal{Y}_{\text{ges}} = \frac{B_s y_s}{\mu_0}$$

$$\text{und} \left(\frac{d\mathcal{Y}}{dx} \right)_6 = \mathcal{Y}_{\text{ges}} \frac{n'}{n_0} \frac{(z \bar{z} - x_s^2)}{2 x^2}$$

Für das Quadrupolfeld ist also einfach $\Delta y = \text{konst.}$, die Ströme haben alle gleiche Richtung. Beim Sextupolfeld liegen die Drähte um so dichter, je weiter sie vom Sollkreis entfernt sind, ihre Stromrichtung ist beiderseits des Sollkreises verschieden.

2.5 Man möchte nun mit möglichst wenig Drähten auskommen, Hierzu wird das wirkliche Δn ausgerechnet und mit dem idealen Δn verglichen. Dabei denkt man sich zunächst Rückleiter so angebracht, daß das Feld am Sollkreis nicht geändert wird. Möglich ist die Berechnung mit Hilfe der Formel 1.8.3 aus dem DESY - Bericht A 1.5. Es kann jedoch noch $\beta \equiv 1$ und $\varphi_s = \pi$ gesetzt werden, so daß man hat

$$\frac{\delta_B}{B} = \frac{\Delta \mathcal{Y}}{\mathcal{Y}_{\text{ges}}} \sum \frac{x_{c\nu}}{x_s} \left(\frac{1}{E(z_{c\nu}; x_A)^{-1}} - \frac{1}{E(z_{c\nu}; x_s)^{-1}} \right)$$

$$\text{mit } E(z; x_A) = - \exp \left(\frac{\pi}{2} \left(\frac{x^2}{x_s y_s} - \frac{x_s y_s}{x^2} - \frac{x_A^2}{x_s y_s} \right) \right)$$

Hieraus errechnet sich für den für das Quadrupolfeld zweckmäßigen Ausdruck

$$\frac{(\delta n)_{\text{real}}}{(\delta n)_{\text{ideal}}} = \frac{\Delta y}{y_s} \sum_{\nu} A(z_{c\nu}; x_A) \text{ mit}$$

$$A(z; x_A) = \frac{1}{E(z; x_A)^{-1}} \left(1 + \frac{\frac{\gamma x_A^2}{x_s y_s}}{1 - E^{-1}(z; x_A)} \right) - \frac{1}{E(z; x_s)^{-1}}$$

im Falle des Sextupolfeldes wurde $\frac{(\delta n)_{\text{real}}}{n' x_s}$ aufgetragen.

Man hat dann $\frac{(\delta n)_{\text{real}}}{n' x_s} = \alpha \sum A(z_{cv}; x_A)$.

α bestimmt den Abstand der Drähte und ist ein Parameter, den man aus dem Integral $\int \left(\frac{d\gamma}{d x} \right)_6 dx$ gewinnt. Es ist

$$\alpha = \frac{n_0}{n' x_s} \frac{\Delta \gamma}{\gamma_{\text{ges}}} = \frac{1}{2x_s} \Delta \left(x - \frac{(x_s y_s)^2}{3 x^3} + \frac{x_s^2}{x} \right).$$

Bei der numerischen Auswertung treten zwei Typen an Abweichungen vom idealen Zusatzfeld auf. Ein Typ bestimmt sich durch den nicht beliebig kleinen Abstand der Drähte, der andere Typ dadurch, daß man die errechnete Art der Drahtanordnung beiderseitig abbricht. Hiergegen hilft es, die äußersten Drähte nach innen zu verlagern, um so einen Ersatz für die fehlenden Drähte zu erhalten. Dies wurde direkt auf der Rechenmaschine ausprobiert. Der Abstand der Drähte ist beim Quadrupolsatz am kritischsten auf der engen Seite. Die kritische Grenze liegt bei $\Delta x \approx 0,8 y_s$. Beim Sextupolsatz ist die Umgebung des Sollkreises naturgemäß am kritischsten. Für die beiden innersten Drähte kann man etwa zulassen: $\Delta x \approx 1,8 y_s$

2.6 Wie transformiert man auf die reale Polkontur ?

Innerhalb des Plateaus ist die Abweichung zwischen dem realen und dem idealen Feld für die Korrekturzwecke vernachlässigbar klein. Betrachtet man Formel 1.8.3 aus DESY - Bericht A 1.5, so kann man also innerhalb des Plateaus $\beta(\xi_A) \equiv 1$ setzen. Die Lage des Strompunktes kommt aber nur in \int_{cc} vor, dessen Realteil Maß für den magnetischen Fluß pro Länge (1.4.2 aus A 1.5) ist. Es genügt

also dafür zu sorgen, daß der Draht denselben magnetischen Fluß mit (z.B.) dem Sollkreis beim hyperbelförmigen wie beim wirklichen Pol einschließt, um die gewonnenen Aussagen für den realen Pol beibehalten zu können. Den magnetischen Fluß pro Länge (Vektorpotential) gewinnt man beim Vierpolfeld leicht aus

$$U = \frac{x^2 - \frac{x_s^2 + y_s^2}{x^2}}{2x_s}$$

während andererseits das Vektorpotential für den realen Pol sehr genau von der Polberechnung her bekannt ist. Man hat also nur die Stelle im realen Pol mit demselben U aufzusuchen, um die Transformation auszuführen.

3. Die PFW Anordnung des DESY-Magneten

3.1 In den Zeichnungen 3. 1. a und 3. 1. b sind die für den DESY-Magneten gewählten Drahtlagen dargestellt. Man erkennt die für den D-Typ viel einfachere Anordnung, die mit insgesamt 20 Drähten auskommt, während für den F-Typ 40 Drähte verwendet werden.

Für das Quadrupolfeld haben wir die Drähte:

Q_1 bis Q_5 beim D - Typ

Q_1 bis Q_9 beim F - Typ.

Hierzu gehören die Rückleiter:

Q_{11} bis Q_{15} beim D - Typ

Q_{11} bis Q_{19} beim F - Typ.

Zur Erregung des Sextupolfeldes dienen die Drähte:

S_1 bis S_4 beim D - Typ

S_1 bis S_{12} beim F - Typ und zwei Rückleiter S_{13} u. S_{14}

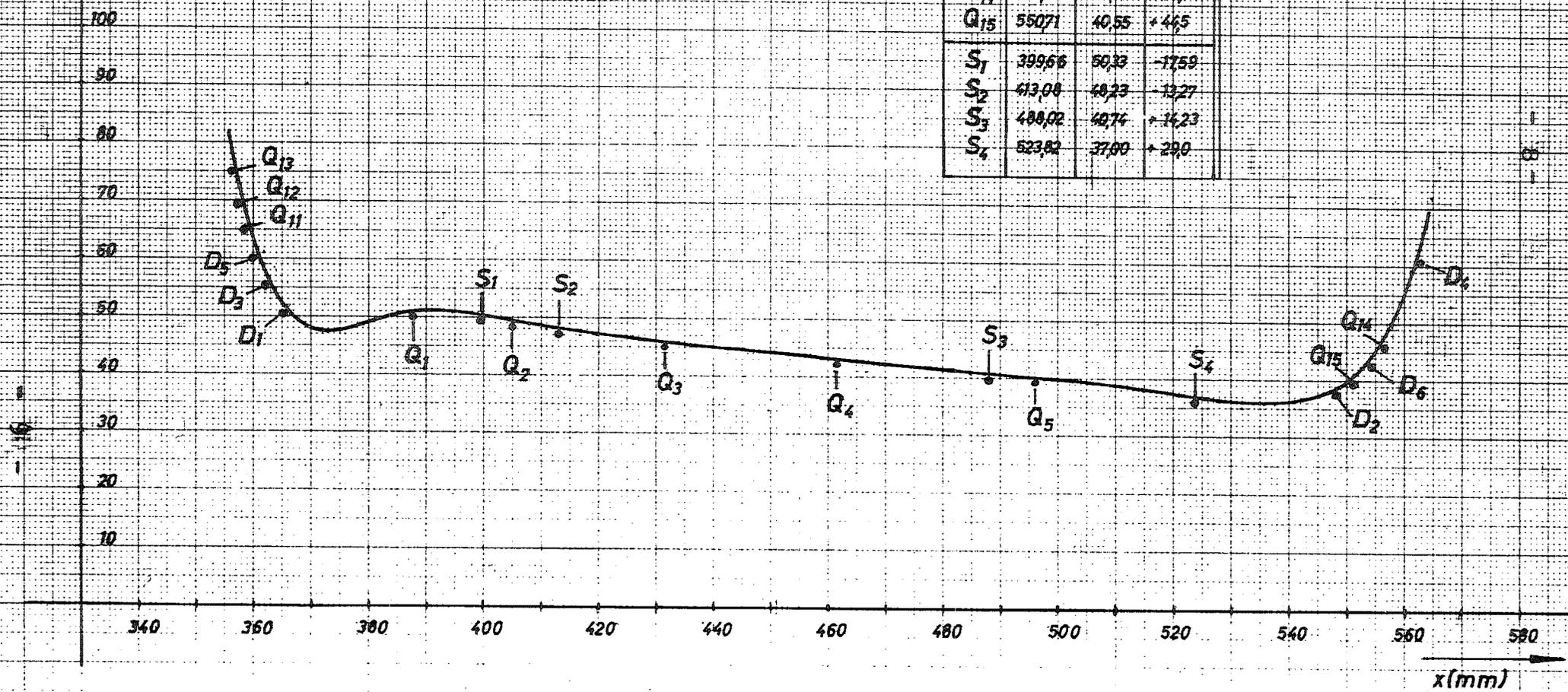
y(mm)

Abb.3.1.a

D-Typ

Anordnung der Drähte in den Polflächenwindungen

	x	y	16U		x	y	16U
Q ₁	387,95	50,90	-20,82	D ₁	365,78	51,22	-31,59
Q ₂	405,0	49,44	-15,94	D ₂	567,87	38,61	+42,5
Q ₃	431,54	46,03	-6,89	D ₃	362,85	56,05	-34,09
Q ₄	461,5	43,03	+4,01	D ₄	567,96	61,07	+53,50
Q ₅	496,08	40,11	+17,42	D ₅	360,95	60,68	-35,8
Q ₁₁	359,45	65,31	-37,2	D ₆	553,66	43,84	+46,7
Q ₁₂	358,22	69,95	-38,4				
Q ₁₃	357,04	75,23	-39,6				
Q ₁₄	555,96	46,81	+40,5				
Q ₁₅	550,71	40,55	+46,5				
S ₁	399,66	50,33	-17,59				
S ₂	413,04	48,23	-13,27				
S ₃	488,02	40,74	+14,23				
S ₄	523,82	37,00	+29,0				



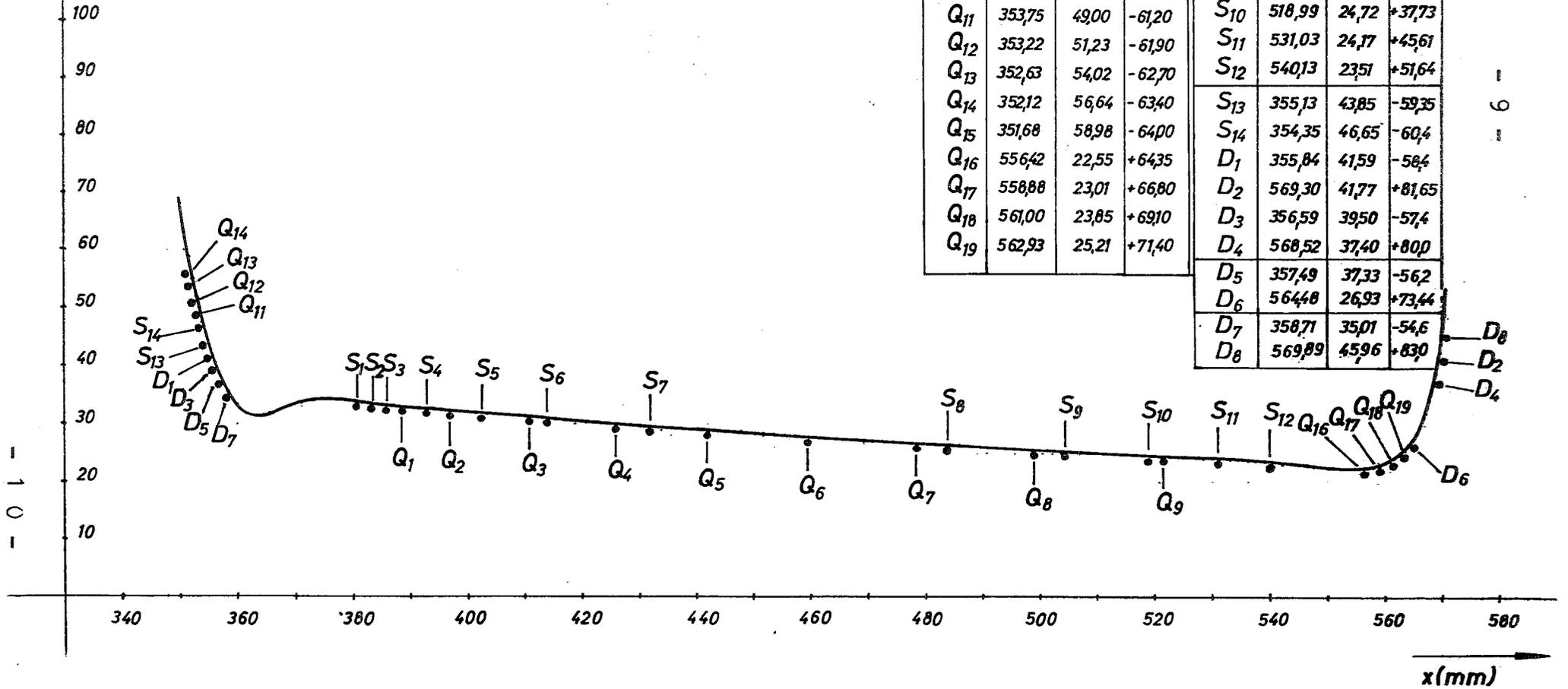
y(mm)

Abb. 3.1.b

F-Typ

Anordnung der Drähte in den Polflächenwindungen

	x	y	16U		x	y	16U
Q ₁	388,51	33,08	-36,44	S ₁	380,80	33,96	-40,07
Q ₂	397,0	32,32	-32,25	S ₂	383,44	33,64	-38,87
Q ₃	411,00	31,20	-25,15	S ₃	385,99	33,35	-37,66
Q ₄	425,98	30,11	-17,28	S ₄	392,99	32,66	-34,24
Q ₅	441,99	29,02	-8,57	S ₅	402,50	31,86	-29,49
Q ₆	459,49	27,91	+1,31	S ₆	413,99	30,98	-23,60
Q ₇	478,49	26,80	+12,46	S ₇	431,99	29,69	-14,05
Q ₈	498,99	25,70	+25,00	S ₈	484,00	26,50	+15,78
Q ₉	521,50	24,60	+39,36	S ₉	504,49	25,42	+28,45
Q ₁₁	353,75	49,00	-61,20	S ₁₀	518,99	24,72	+37,73
Q ₁₂	353,22	51,23	-61,90	S ₁₁	531,03	24,17	+45,61
Q ₁₃	352,63	54,02	-62,70	S ₁₂	540,13	23,51	+51,64
Q ₁₄	352,12	56,64	-63,40	S ₁₃	355,13	43,85	-59,35
Q ₁₅	351,68	58,98	-64,00	S ₁₄	354,35	46,65	-60,4
Q ₁₆	556,42	22,55	+64,35	D ₁	355,84	41,59	-58,4
Q ₁₇	558,88	23,01	+66,80	D ₂	569,30	41,77	+81,65
Q ₁₈	561,00	23,85	+69,10	D ₃	356,59	39,50	-57,4
Q ₁₉	562,93	25,21	+71,40	D ₄	568,52	37,40	+80,0
				D ₅	357,49	37,33	-56,2
				D ₆	564,48	26,93	+73,44
				D ₇	358,71	35,01	-54,6
				D ₈	569,89	45,96	+83,0



Um die in den Sextupolwindungen induzierte Spannung zu kompensieren, sind die folgenden Dipolwindungen vorgesehen, die in Serie mit den Sextupolwindungen geschaltet werden:

D_1 & D_2 beim D - Typ
 D_1 bis D_4 beim F - Typ

Weitere Dipolwindungen dienen zur Beseitigung systematischer B - Fehler :

D_5 & D_6 beim D - Typ
 D_5 & D_6 beim F - Typ

Sie werden abwechselnd in Serie geschaltet, so daß die induzierte Spannung über eine Feldperiode (D + F - Sektor) verschwindet.

Auf die genaue Lage aller dieser Drähte kommt es in hohem Maße an. Alle diese Drähte dienen zu systematischen Korrekturen und werden in Serie mit Gleichstromnetzgeräten betrieben.

Die Dipolwindungen

D_3 und D_4 beim D - Typ
 D_7 und D_8 beim F - Typ

dienen zu individuellen Korrekturen und können selbsterregt betrieben werden.

3.2 In den Zeichnungen 3. 2. a bis 3. 2. d ist $\left(\frac{\delta n}{\delta n}\right)$ real und $\left(\frac{\delta n}{x_s n}\right)$ real für jeweils den D- und F-Typ aufgetragen.
 $\left(\frac{\delta n}{\delta n}\right)$ ideal

Die Differenzen gegen 1 bei den Quadrupolsätzen und gegen die ideale Gerade bei den Sextupolsätzen werden zugelassen, um die Gesamtzahl der Drähte einzuschränken.

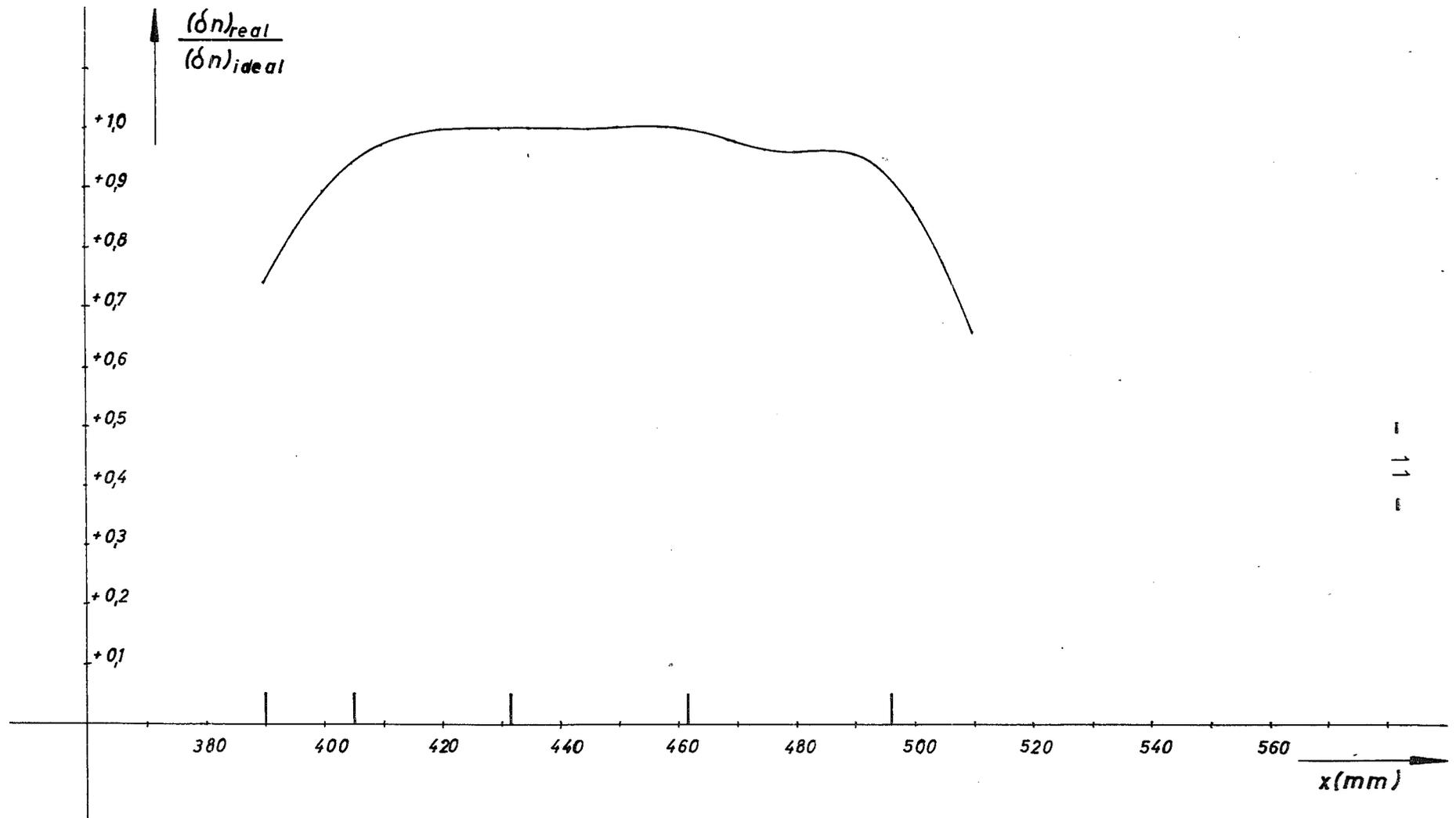


Abb.3.2.a D-Sektor
 Quadrupolwindungen $\Delta y = 3\text{mm}$

Strompunkte bei Hyperbelkontur: 390 , 405 , 431,5 , 461,5 , 496

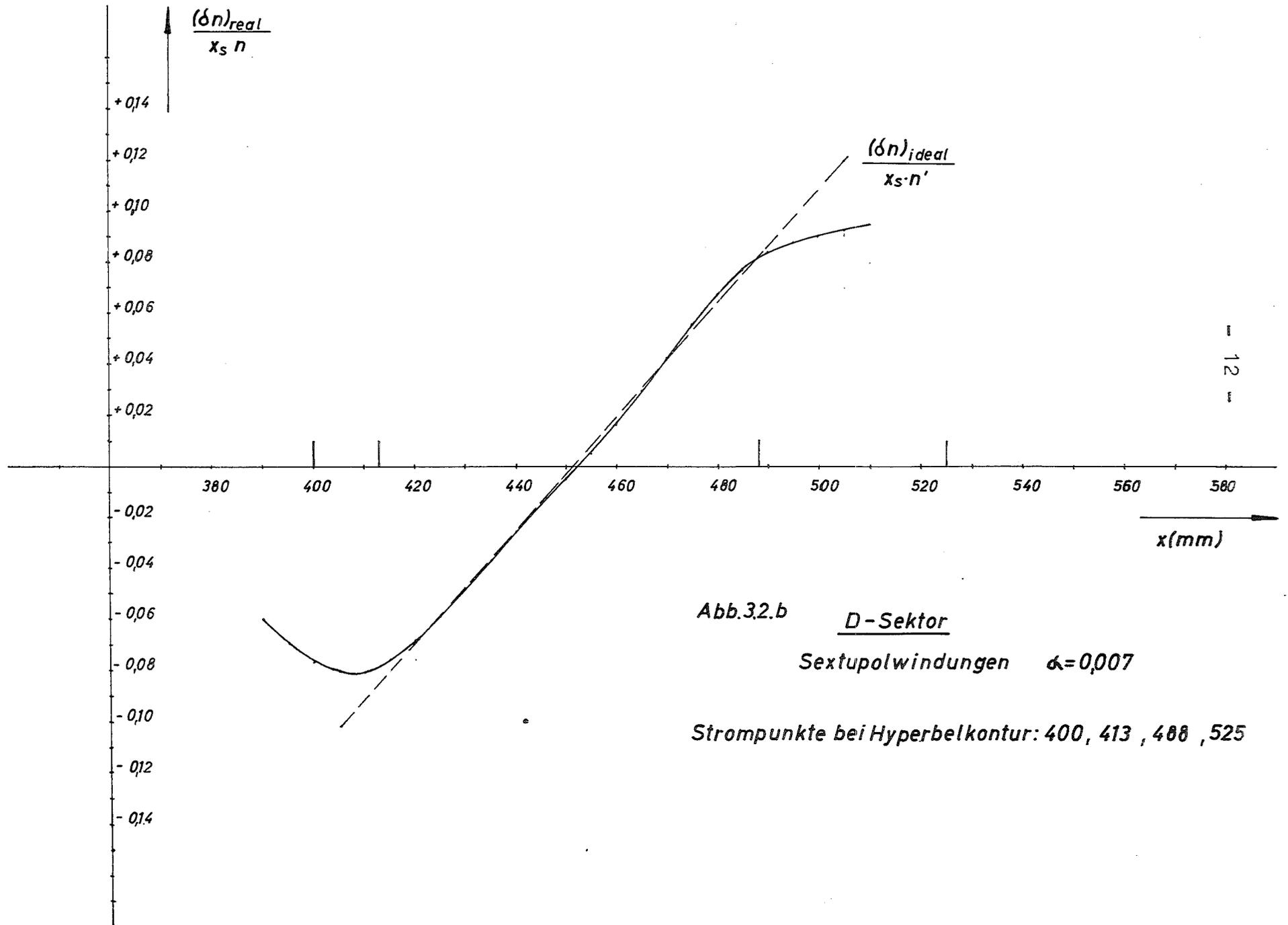


Abb.32.b D-Sektor
Sextupolwindungen $\alpha = 0,007$

Strompunkte bei Hyperbelkontur: 400, 413, 488, 525

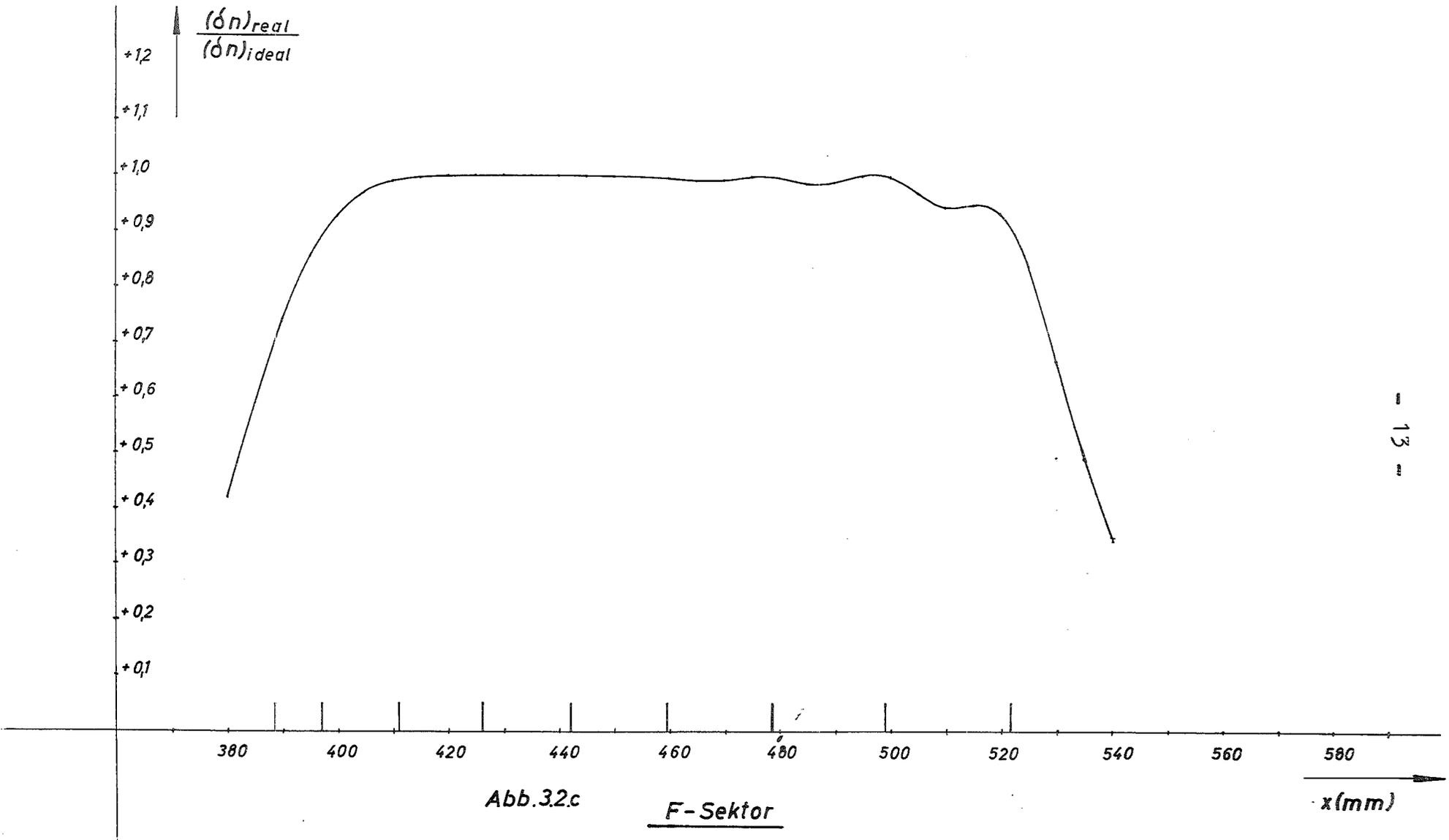


Abb.32c

F-Sektor

Quadrupolwindungen $\Delta y = 1,1$ mm

Strompunkte bei Hyperbelkontur: 300,5 , 397 , 411 , 426 , 442 , 459,5 470,5
499 , 521,5

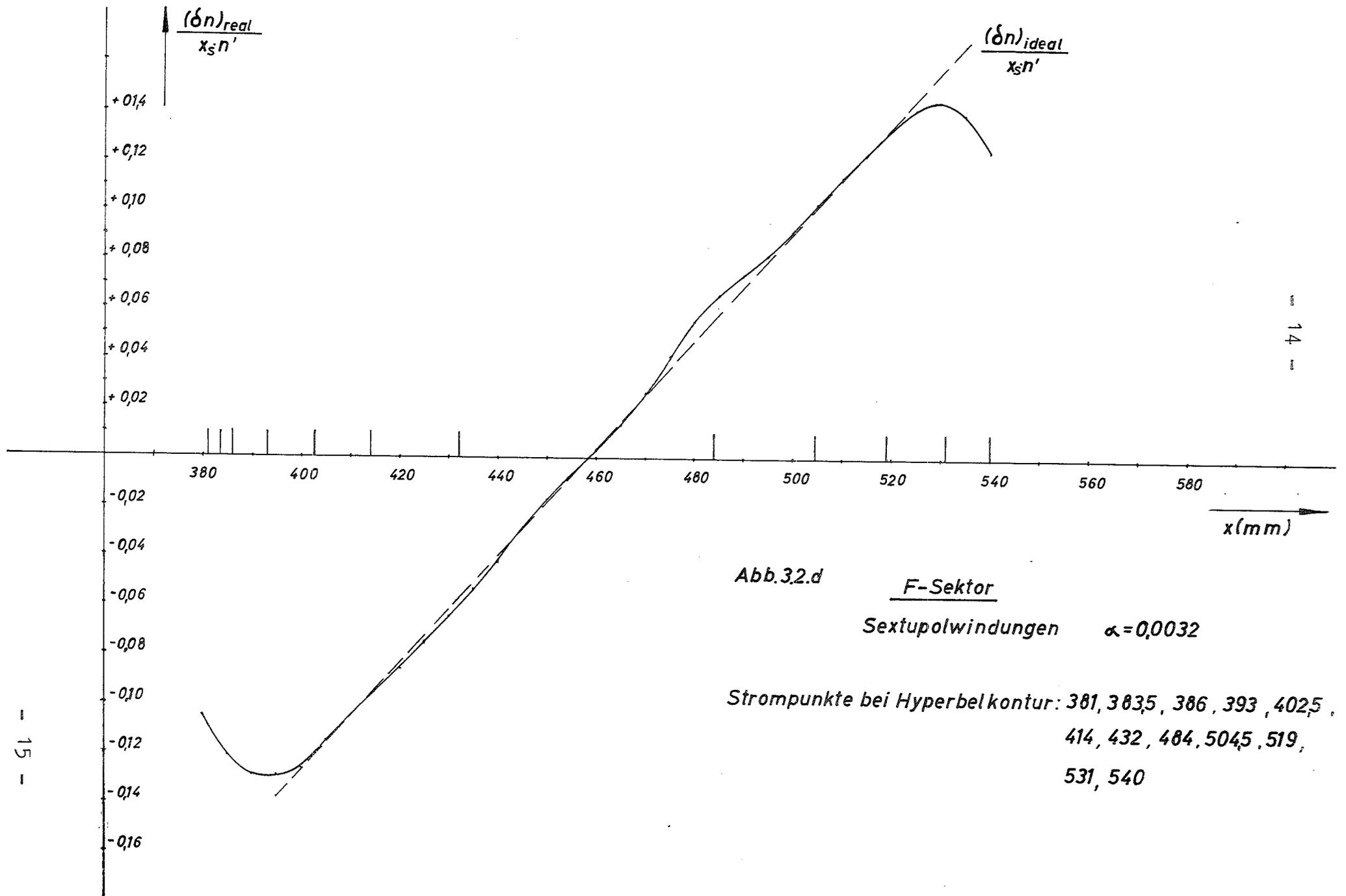


Abb.32.d

F-Sektor

Sextupolwindungen $\alpha = 0,0032$

Strompunkte bei Hyperbelkontur: 381, 383,5, 386, 393, 402,5,
 414, 432, 484, 504,5, 519,
 531, 540

4. Kurze Beschreibung der Ausführung der PFW

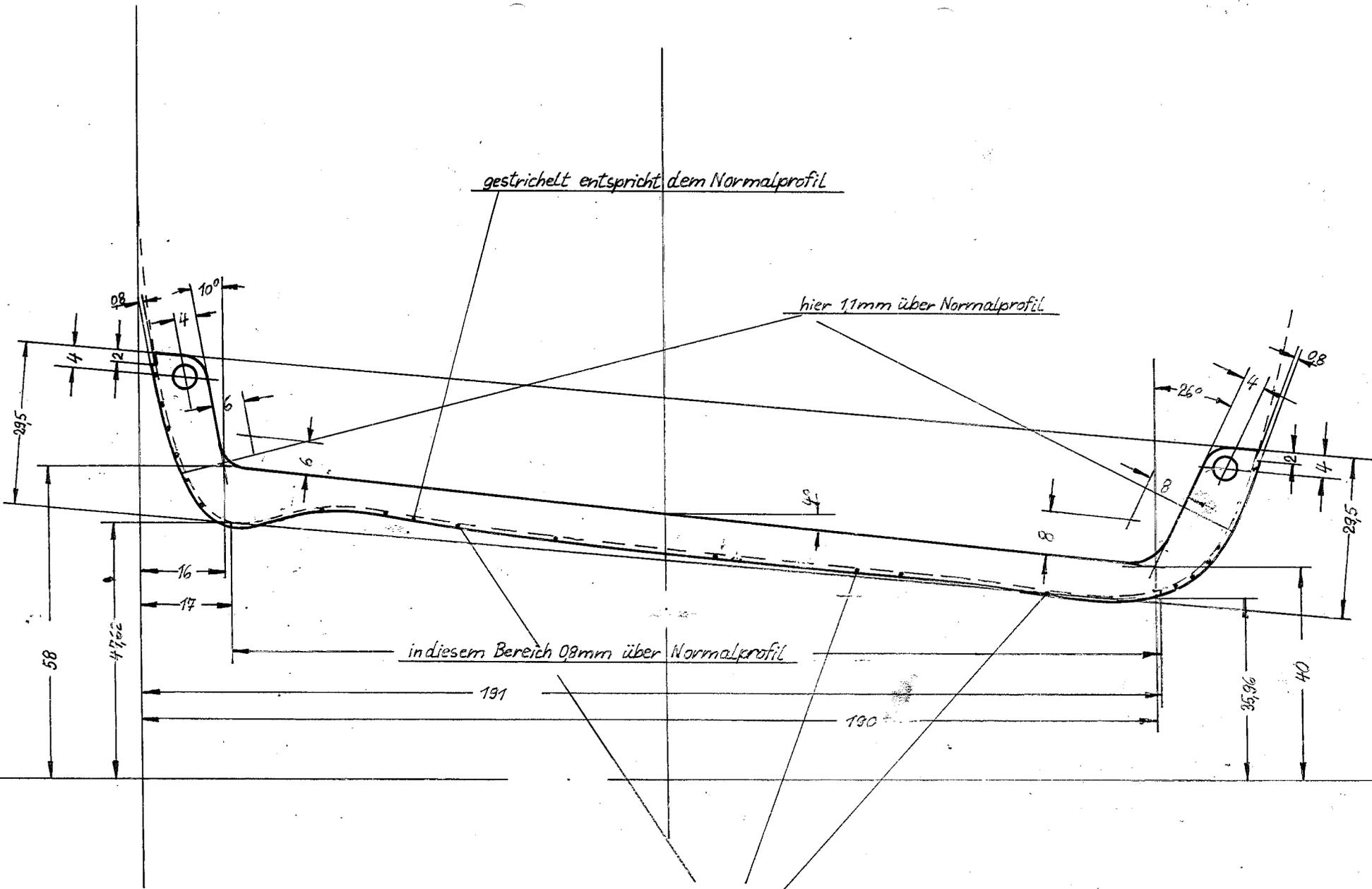
4.1 Die PFW sind der Form nach auf der Innenseite ein Abdruck der Polflächen der Magnetblocks, die auf einem Krümmungsradius von 31,7 m montiert sind. Die Magnetblocks und mit ihnen die PFW sind stückweise gerade (polygonförmig). Alle Drähte werden zu einem mechanisch einheitlichen und festen Gebilde zusammengefaßt, das leicht montiert werden kann.

4.2 An den Knickstellen befinden sich zwischen den Magnetblocks Spalte (7 - 9 mm breit), in die zu den PFW gehörige Spante (Zeichnungen 4. 2. a und 4. 2. b) aus Epoxydglashartgewebe (2 mm stark) hineinragen. Diese Spante haben die Aufgabe:

- 1.) die Cu-Drähte (0,5 mm \emptyset und seitlich 0,8 mm \emptyset) jeweils an den Knickstellen zu führen
- 2.) die PFW so zu versteifen, daß sie jeweils genau die Polform annehmen
- 3.) die Befestigung der PFW am Magneten zu ermöglichen.

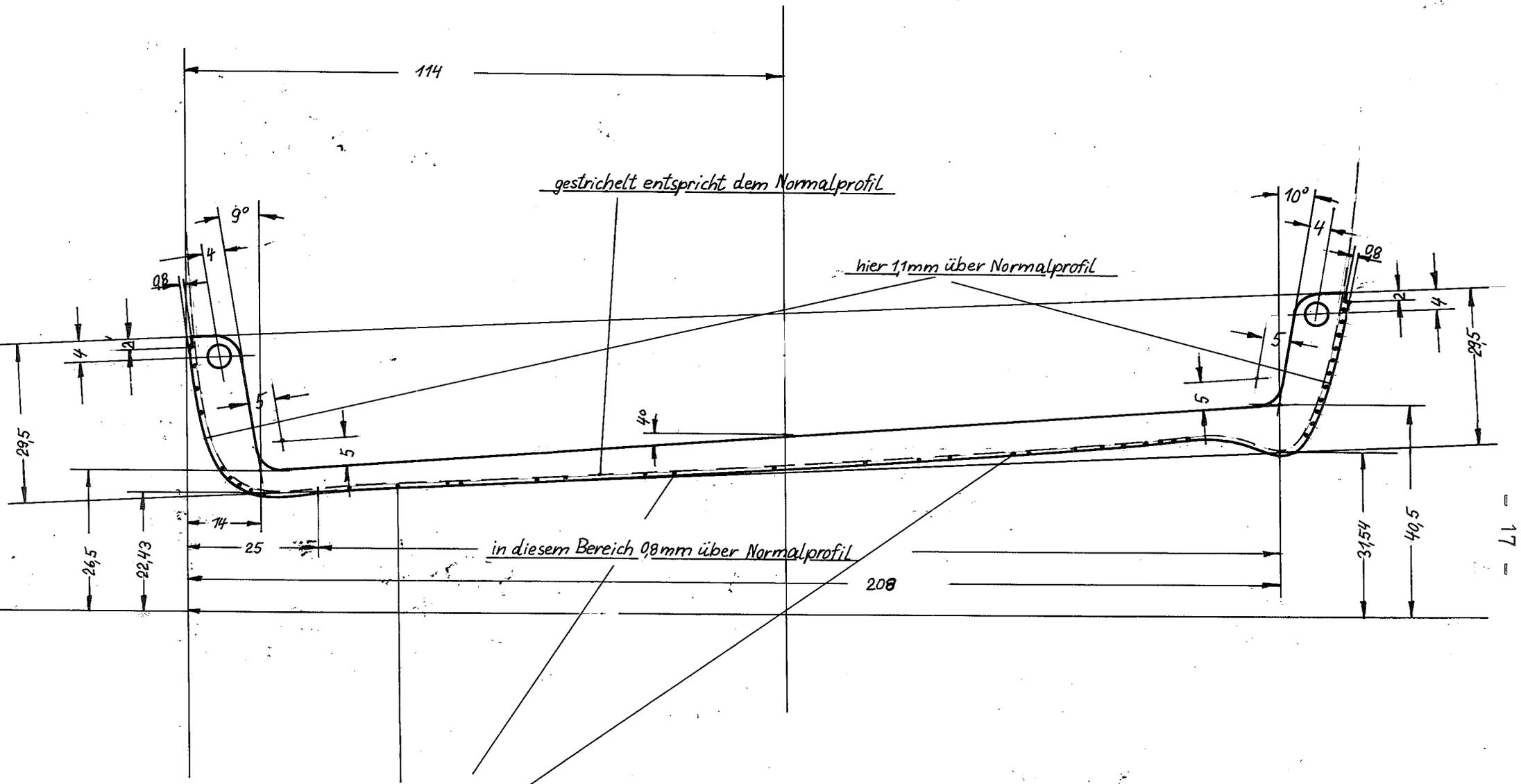
Die innere Isolation (Draht-Poloberfläche) besteht aus 0,3 mm Glasgewebe mit Epoxydharz. Sie wird jeweils in der Länge Spant - Spant aufgebracht. Die äußere Isolation (Draht-Vakuumkammer) besteht aus 0,2 mm Diagonalglasgewebe. Alles wird mit Epoxydharz (kein Polyesterharz) getränkt, wozu keine Vakuumimprägnierung vorgeschrieben ist. Die Stärke der mittleren Partie soll $1,00 \pm 0,10$ mm betragen, für die Wandung der seitlichen Partie ist $1,5 \pm 0,3$ mm als Stärke erlaubt.

4.3 In besonders ausgebildeten Kopfstücken werden die Drähte durch sorgfältige Weichlötung mit säurefreiem Flußmittel miteinander verlötet. Jeweils ein Kopfstück hat einen eingearbeiteten 10-Pol-Stecker (weiblich).



Spant für Polflächenwindung
Typ D.R. u. D.L.

Abb. 4.2. a



Bohrungen für Kupferleiter

Spant für Polflächenwindung
Typ F.R. u. F.L.

Abb. 4.2.b

4.4 Da je eine PFW auf den unteren und oberen Polen montiert wird, ergeben sich für den D- und den F-Typ je zwei Untertypen, die zueinander spiegelsymmetrisch sind, was sich in den Kopfstücken auswirkt. Die Typen erhalten die Bezeichnung DR; DL; FR; FL.
(R = rechts, L = links)

4.5 Mit einer besonderen Spezifikation werden das Herstellungsverfahren und die Abnahmebedingungen vorgeschrieben.

5. Literatur: DESY-Bericht A 1.5 - Dr. Ha/Schw. vom 8.6.59
DESY-Notiz A 2.77 - M 1 - Dr. Ri/VM vom 3.7.61



W. Hardt