

Numerische Berechnung von Magnetfeldlinien

Benutzungsanleitung zum Programm;
Rechenbeispiele

R. Pöhlchen

IPP 4/86

Mai 1971

MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK

GARCHING BEI MÜNCHEN

MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK

GARCHING BEI MÜNCHEN

Numerische Berechnung von Magnetfeldlinien

Benutzungsanleitung zum Programm;
Rechenbeispiele

R. Pöhlchen

IPP 4/86

Mai 1971

Fuer die Programmierung in Fortran IV (IBM 360/91)
danke ich Fr. Christiane Ludescher.

*Die nachstehende Arbeit wurde im Rahmen des Vertrages zwischen dem
Max-Planck-Institut für Plasmaphysik und der Europäischen Atomgemeinschaft über die
Zusammenarbeit auf dem Gebiete der Plasmaphysik durchgeführt.*

R. Pöhlchen

Numerical calculation of
magnetic field lines.
Users manual with examples.

IPP 4/86

May 1971

Abstract

A computer code (FORTRAN, IBM 360/91) was developed for the calculation of magnetic field lines. The field generating system may consist of straight filament currents with finite length and arbitrary orientation in space, circular loops (thin wire rings) or thick solenoids. A combination of the three above named field generating elements is also permissible, with the restriction (at the present stage of the program) that all loops and solenoids must be coaxial to another. A brief mathematical representation is followed by detailed instructions for use of the program and a number of examples with field line plots.

<u>Inhalt</u>	<u>Seite</u>
Einführung	2
Mathematische Formulierung	3
Literaturangaben	8
Eingabedaten (Erläuterung derselben, Eingabeformalitäten)	9
Rechenbeispiele mit	
Hinweisen zur Rechenpraxis	15
Demonstration der Eingabe über das IBM 2741 Communi- cation Terminal	17
Ausdruck durch den Schnell- drucker	
automatisch gezeichneten Feldbildern (6 Stück)	22 und ab 27

Einführung

" L I N F O R " (lines of force) ist ein FORTRAN IV-Programm (IBM 360/91) zur Berechnung und automatischen Zeichnung von Feldlinien. Räumliche Feldlinien können berechnet, aber nicht gezeichnet werden.

In der derzeitigen Fassung des Programms darf das Magnetfeld von stromführenden Elementen der folgenden Art herrühren:

1. linienförmigen, geraden Leiterstücken, die zu beliebigen, auch räumlichen Polygonzügen zusammengesetzt werden dürfen (Subroutine LIEGEL);
2. linienförmigen Kreisströmen, die zueinander coaxial liegen müssen (Subroutine MAKOLI);
3. dicken, kreiszylindrischen Spulen (mit rechteckigem oder kreisförmigem Wicklungsquerschnitt), die coaxial oder toroidal zueinander angeordnet sind (Subroutinen KOSPHO und TORUSM). Toroidal angeordnet heißt hier, daß die Spulenmittelpunkte gleichmäßig verteilt auf einem Kreis liegen und die Rotationsachsen der Zylinderspulen Tangenten an diesen Kreis sind.

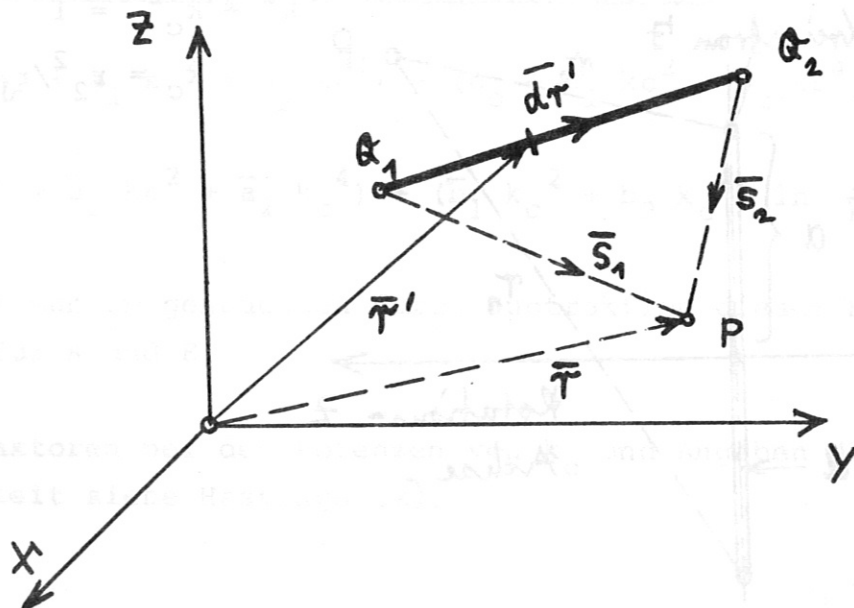
Bei gleichzeitiger Existenz der genannten felderzeugenden Elemente müssen alle Kreisströme und Zylinderspulen coaxial zueinander liegen. Die geraden Leiterstücke dürfen eine beliebige Lage im Raum haben.

Die mathematische Darstellung und numerische Berechnung der von den genannten linienförmigen Strömen erzeugten Felder ist problemlos und erfordert keine nennenswerte Rechenzeit. Erst

bei Berücksichtigung der flächenhaften oder volumenhaften Ausdehnung von Strömen wird die mathematische Darstellung schwieriger und erfordert in der Regel eine zeitraubende numerische Integration in mindestens einer Koordinatenrichtung über das stromerfüllte Gebiet. Der simple Ersatz von Flächen- oder Volumenströmen durch eine Anzahl von Linienströmen ist jedoch kein Ausweg. Diese Primitivform der numerischen Integration ist bezüglich der Rechenzeit mit Sicherheit stets die aufwendigste Methode.

Mathematische Formulierung

1. Magnetfeld eines geraden, linienförmigen Stromes endlicher Länge bei beliebiger Lage im Koordinatensystem (Subroutine LIEGEL).



Für den Linienstrom gilt nach Biot-Savart:

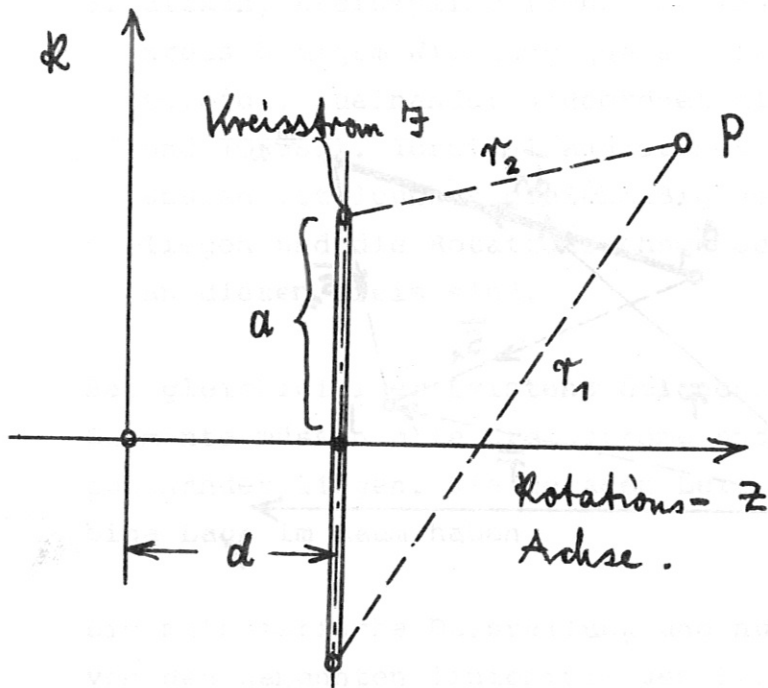
$$\vec{B} = \mu_0 \frac{I}{4\pi} \int_{r_1}^{r_2} \left[d\vec{r}' \times (\vec{r} - \vec{r}') \right] / |\vec{r} - \vec{r}'|^3$$

Die Integration von Q_1 bis Q_2 ergibt für den "Feldstärke"-Vektor:

$$\vec{B} = \frac{I}{10} \frac{\vec{s}_1 \times \vec{s}_2}{s_1 s_2} \cdot \frac{s_1 + s_2}{s_1 s_2 + s_1 \cdot s_2} \quad \text{in (Gauß)}$$

für I in (A) und s_1, s_2 in (cm).

2. Magnetfeld eines linienförmigen Kreisstromes (Subroutine MAKOLI).



Parameter-Definition:

$$k^2 = 4 aR/r_1^2$$

$$k^2 + k_c^2 = 1$$

$$k_c = r_2^2/r_1^2$$

$$\begin{aligned} \text{Vektorpotential } |\bar{A}| = A_{\varphi} &= \frac{\mu_0 J}{4} \oint ds_{\varphi} / r \\ &= \frac{\mu_0 J}{2} \int_0^{\pi} \frac{a \cos \varphi d\varphi}{(a^2 + R^2 + (z-d)^2 - 2aR \cos \varphi)^{1/2}} \\ A &= \frac{4J}{10^9} \frac{r_1}{R} \left[(K-E) - 1/2 k^2 K \right] \text{ in Vs/cm} \end{aligned}$$

$$\text{Feldstärkekomponenten: } B_z = \frac{2}{10} \frac{J}{r_1} \left[(K-E) + (a-R) \frac{2a}{r_2^2} E \right] \text{ in (Gau\ss)}$$

$$B_R = \frac{1}{10} J \frac{d-z}{R r_1 k_c^2} \left[(2-k^2) (K-E) - k^2 K \right] \text{ in (Gau\ss)}$$

$$\text{Magnet. Flu\ss: } \phi = 2\pi R A = \frac{4\pi}{10^9} \cdot J r_1 \left[2 (K-E) - k^2 K \right] \text{ in (Vs)}$$

für J in (A), Längen in (cm).

Numerische Berechnung der vollständigen elliptischen Integrale

1. und 2. Gattung K und E (siehe Lit. Angabe (2)):

$$K(k) \approx (a_0 + a_1 k_c^2 + a_2 k_c^4) + (b_0 + b_1 k_c^2 + b_2 k_c^4) \ln \frac{1}{k_c}$$

$$E(k) \approx (1 + \bar{a}_1 k_c^2 + \bar{a}_2 k_c^4) + (\bar{b}_1 k_c^2 + b_2 k_c^4) \ln \frac{1}{k_c}$$

K - E erhält man am genauesten durch Subtraktion dieser beiden Näherungen für K und E.

Werte der Faktoren bei den Potenzen von k_c und Angaben über die Genauigkeit siehe Hastings (2).

3. Magnetfeld einer dickwandigen (mehrlagigen) Spule.

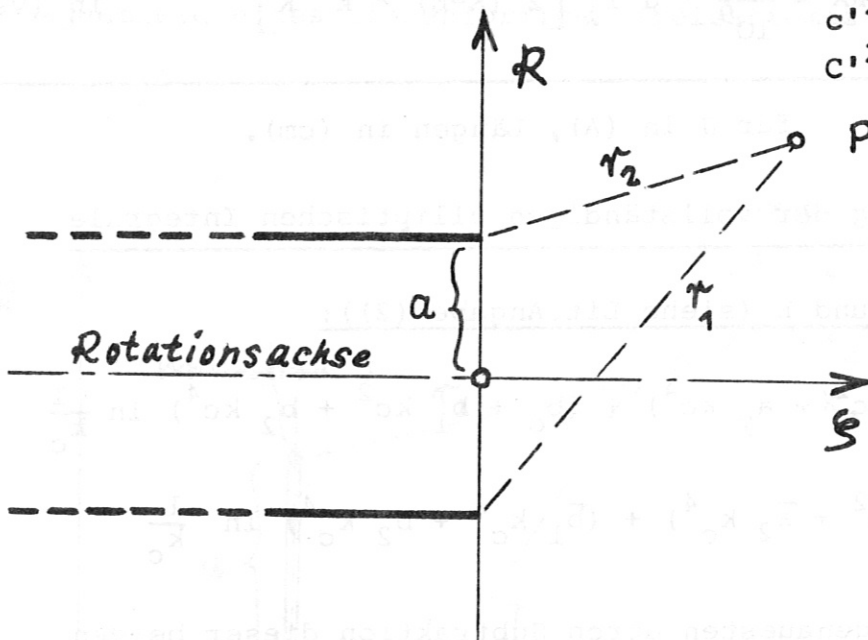
(Subroutine KOSPHO und TORUSM)

Basierend auf den Ausdrücken für die Feldstärkekomponenten und den magnetischen Fluß eines semi-infiniten kreiszylindrischen Flächenstromes, werden Feld und Fluß der dicken Spule durch numerische Integration über die radiale Spulendicke berechnet.

Feldstärkekomponenten und magnetischer Fluß des semi-infiniten kreiszylindrischen Flächenstromes

(siehe Lit.Angabe (1)):

$$\begin{aligned} \text{Parameter } k^2 &= 4 a R / r_1^2 \\ k^2 + kc^2 &= 1 \\ c'^2 &= 4 a R / (a + R)^2 \\ c'^2 + c^2 &= 1 \end{aligned}$$



$$B_R(S) = 0,4 g_s \frac{a}{r_1} \left[2 \operatorname{cel}(k_c, 1, 0, 1) - \operatorname{cel}(kc, 1, 1, 1) \right]$$

$$B_z(S) = g_s (0,2\pi + b_z) \quad \text{für } R < a$$

$$B_z(S) = g_s b_z \quad \text{für } R > a$$

$$b_z = -0,4 \frac{a}{(a+R) r_1} \left[\operatorname{cel}(kc, 1, 1, 1) + 2 R \frac{a - R}{(a+R)^2} \operatorname{cel}(kc, c'^2, 0, 1) \right]$$

Magnetischer Fluß

$$\phi(s) = \frac{2\pi}{10^9} \cdot g_s \cdot (\pi a^2 + \varphi(s)) \quad \text{für } R > a$$

$$\phi(s) = \frac{2\pi}{10^9} \cdot g_s \cdot (\pi R^2 + \varphi(s)) \quad \text{für } R < a$$

$$\text{mit } \varphi(s) = 4 \frac{a R s}{r_1} \left[c'^2 \text{cel}(kc, c'^2, 0, 1) - \text{cel}(kc, 1, 0, 1) \right]$$

B_R, B_z in Gauß, ϕ in (Vs) für g_s in (A/cm), Längen in (cm).

Die Berechnung aller in den Ausdrücken für B_R, B_z und ϕ auftretenden speziellen Formen des "allgemeinen, vollständigen elliptischen Integrals":

$$\text{cel}(k_c, p, a, b) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{a \cos^2 \varphi + b \sin^2 \varphi}{\cos^2 \varphi + p \sin^2 \varphi} \frac{d\varphi}{\sqrt{\cos^2 \varphi + k_c^2 \sin^2 \varphi}}$$

erfolgt hier mit Hilfe der Bartky-Transformation (Integrale dieses Typs sind mit klassischen Quadraturformeln praktisch nicht auswertbar.)

Rekursionsformeln und ALGOL-Programm siehe Lit.Angabe (3), S. 421-2.

Man erhält z.B. aus obigem Integralausdruck für spezielle Parameterwerte p, a, b :

$$\text{cel}(k_c, 1, 1, 1) = K$$

$$\text{cel}(k_c, 1, 0, 1) = (K-E) / k^2$$

$$\text{cel}(k_c, c'^2, 0, 1) = (\pi - K) / (1 - c'^2)$$

4. Berechnung der Feldlinien

Das Differentialgleichungssystem für die Feldlinien lautet per Definition:

$$dx : dy : dz = B_x : B_y : B_z$$

Die Komponenten des resultierenden Feldstärkevektors in Richtung der kartesischen Koordinaten werden von den vorher genannten Subroutinen geliefert. Das Differentialgleichungssystem wird numerisch mit dem Runge-Kutta-Verfahren 4. Ordnung gelöst.

Man erhält eine bestimmte Feldlinie durch Vorgabe eines Startpunktes. Außer in trivialen Fällen ist jedoch nicht vorhersehbar, wie die Feldlinie eines vorgegebenen Startpunktes verläuft, so daß stets erst mehrere Versuche zu einem brauchbaren Feldbild führen. Von Versuch zu Versuch kann erforderlichenfalls die Schrittweite DS für die numerische Integration korrigiert werden (aus physikalischen Gründen geschlossene Feldlinien müssen sich hinreichend genau schließen).

L i t e r a t u r

- (1) Prof. J. V. Jones: "On the calculation of the coefficient of mutual induction of a circle and a coaxial helix, and of the electromagnetic force between a helical current and a uniform coaxial circular cylindrical current sheet". Proceed. of the Roy. Soc. of London, 1898, Vol. LXIII.
- (2) C. Hastings: "Approximations for Digital Computer", Princeton/New Jersey, 1955, S. 170.
- (3) Sauer / Szabo: "Mathematische Hilfsmittel des Ingenieurs", Teil III, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1968.

E i n g a b e d a t e n

Erläuterung der Eingabedaten und Form der Eingabe.

Größen, die nur ganze Zahlen sein können, sind ohne Dezimalpunkt zu schreiben. Die letzte Ziffer dieser ganzen Zahlen gehört jeweils in die 12., 24., 36., 72. Spalte. Alle anderen Eingabedaten sind stets mit Dezimalpunkt zu schreiben und je innerhalb 12 Spalten zu placieren. Die Eingabe ist in der Reihenfolge vorzunehmen, in der die Eingabedaten hier aufgeführt sind.

Eingabe aller Längen in (cm), aller Ströme in (A).

Bei Eingabe mit dem IBM 2741 Communication Terminal muß man sich im folgenden das Wort "Karte" jeweils durch das Wort "Zeile" ersetzt denken.

Karte 1 enthält die 3 Steuerzahlen KONTR, ISTEU, ISTEU 1.

KONTR = 1: die Feldlinien werden vom Startpunkt fortschreitend in positiver und negativer Z-Richtung berechnet.

KONTR = 0: die Feldlinien werden vom Startpunkt fortschreitend nur in positiver Z-Richtung berechnet.

ISTEU = 1: nur kreiszyl. dickwandige Spulen vorhanden.

ISTEU = 2: nur linienförmige gerade Leiterstücke vorhanden.

ISTEU = 3: nur linienförmige koaxiale Kreisströme vorhanden.

ISTEU = 4: kreiszylindrische dickwandige Spulen und linienförmige gerade Leiter vorhanden.

ISTEU = 5: kreiszylindrische dickwandige Spulen und linienförmige koaxiale Kreisströme vorhanden.

ISTEU = 6: linienförmige gerade Leiterstücke und linienförmige koaxiale Kreisströme vorhanden.

ISTEU = 7: linienförmige gerade Leiterstücke und linienförmige koaxiale Kreisströme und kreiszylindrisch dickwandige Spulen vorhanden.

ISTEU 1 = 1: nur toroidales System dickwandiger kreiszylindrischer Spulen vorhanden; sonst immer Null (= blank).

Karte 2 enthält die 3 ganzzahligen Zahlen für NPB, NBDS, Achse.

- NPB: Anzahl der gewünschten Feldlinien.
- NBDS: Zahl der maximal je Feldlinie zu berechnenden Punkte.
- ACHSE = 0: Koordinatenursprung in der linken unteren Ecke des Blattes.
- ACHSE = 2: Koordinatenursprung in der Mitte des unteren Blatt- randes.
- ACHSE = 4: Koordinatenursprung in der Blattmitte.
- ACHSE = 5: Vertauschung von R- und Z-Achse; Koordinatenur- sprung beliebig placierbar durch Angabe von vier Zahlen auf der nächsten Karte.

Karte 2a ist nur erforderlich, falls ACHSE = 5 gesetzt wurde; enthält die 4 Zahlenangaben für RMIN, ZMIN, RMAX, ZMAX.

Karte 3 enthält die 2 Steuerzahlen IPLOT und IPRINT.

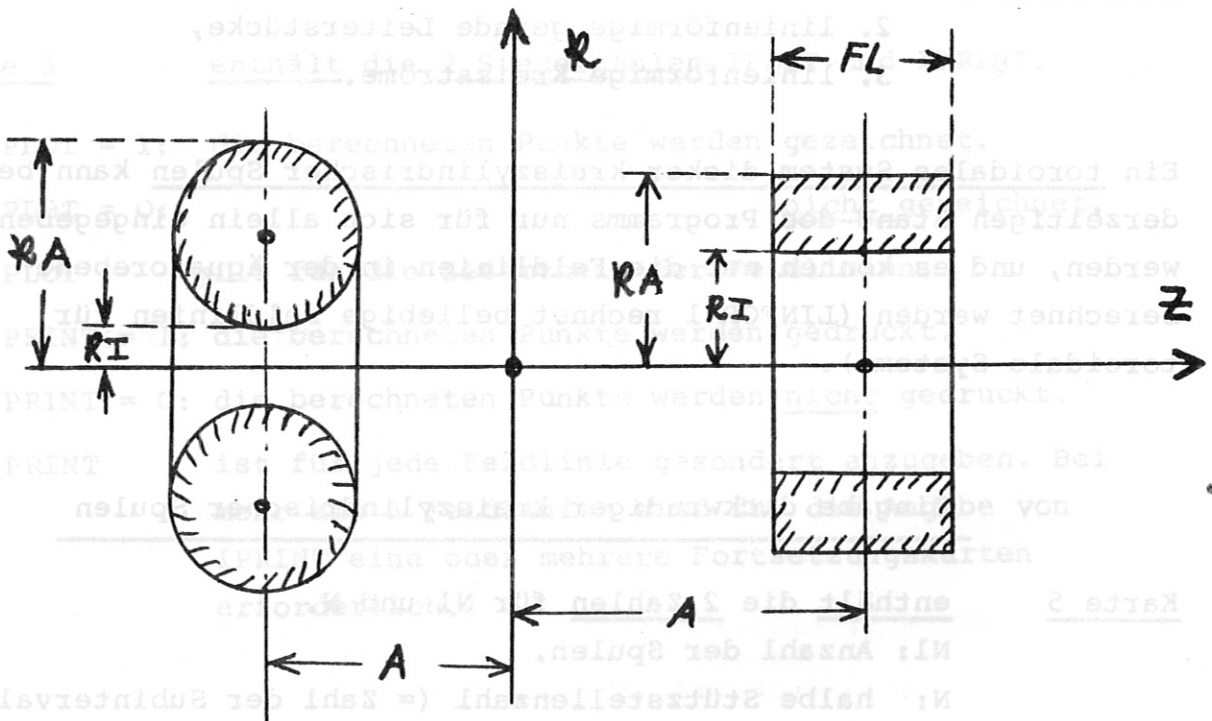
- IPLOT = 1: die berechneten Punkte werden gezeichnet.
- IPLOT = 0: nicht gezeichnet.
- IPLOT gilt für die Gesamtheit der Feldlinien.
- IPRINT = 1: die berechneten Punkte werden gedruckt.
- IPRINT = 0: die berechneten Punkte werden nicht gedruckt.
- IPRINT ist für jede Feldlinie gesondert anzugeben. Bei mehr als 5 Feldlinien sind für die Angabe von IPRINT eine oder mehrere Fortsetzungskarten erforderlich.

dicke. N sollte mindestens **10** gesetzt werden, wenn eine Feldlinie durch die Wicklung läuft; sonst $N \geq 1$, je nach gewünschter Genauigkeit.

Karte 6 enthält die 6 Zahlenwerte für

$RA(1)$, $RI(1)$, $FL(1)$, $A(1)$, $G(1)$, $NQUER(1)$. (siehe Skizze). Das sind: Außenradius, Innenradius, Länge (gesamte), Abstand des Spulenmittelpunktes vom Punkt ($Z = 0$; $R = 0$) und die Stromdichte für die 1. Spule, sowie bei kreisförmigem Wicklungsquerschnitt in der 72. Spalte die Steuerzahl $NQUER = 1$. Die Angabe der Spulenlänge FL bei kreisförmigem Querschnitt ist bedeutungslos, da in diesem Fall $FL = (RA - RI)$ gesetzt wird.

Es folgen analog beschriebene Karten, falls weitere Spulen vorhanden; die Daten je einer Spule auf einer Karte.



Eingabe linienförmiger Leiterstücke.

Karte 5' enthält die Zahl N_2 ; das ist die Anzahl der linienförmigen Leiterstücke.

Die folgenden Karten enthalten je Karte Anfangspunkt und Endpunkt eines Leiterstückes in kartesischen Koordinaten; Stromrichtung vom Anfangs- zum Endpunkt. In gleicher Reihenfolge sind die zugehörigen Stromstärken einzugeben, maximal 6 Werte je Karte.

Eingabe linienförmiger Kreisströme.

Karte 5'' enthält N_3 ; das ist die Anzahl der linienförmigen Kreisströme. Die folgenden Karten enthalten hier:

alle A (I) aufeinanderfolgend; das sind die Radien der Kreisströme; dann mit neuer Karte beginnend;

alle D (I) aufeinanderfolgend; das sind die Distanzen Kreismittelpunkt - Koordinatennullpunkt; dann mit neuer Karte beginnend;

alle AI(I) aufeinanderfolgend; das sind die Stromstärken.

Eingabe eines toroidalen Systems dicker kreiszylindrischer Spulen.

Karte 5''' enthält B, RA, RI, XL, G, BETA.

Es bedeuten

B : großer Torus-Radius (Radius, auf dessen Kreis die Spulenmittelpunkte liegen)

RA: Außenradius der Einzelspule)

RI: Innenradius " ") für alle

XL: Länge " ") Spulen gleich

G : Stromdichte " ")

BETA: in Grad; die Spulen dürfen alternierend um den \pm BETA gegen die Tangentenrichtung gekippt sein.

Karte 6''' enthält N und NT

N : Anzahl der Spulen

NT: halbe Stützstellenzahl für die numerische Integration

Angabe der gewünschten Feldlinien

Die weiteren Datenkarten enthalten die SCHRITTWEITE (Bogenlänge) DS für die numerische Integration des Diff.-Gleichungssystems der Feldlinien und in kartesischen Koordinaten die STARTPUNKTE DER FELDLINIEN:

DS (KPB), XPB (KPB), YPB (KPB), ZPB (KPB) mit KPB = 1, 2, 3, ... NPB. (NPB: Anzahl der gewünschten Feldlinien) Die Angaben für eine Feldlinie stehen auf einer Karte.

Im Programm ist eine Abfrage eingebaut, die im Fall einer geschlossenen Feldlinie die Berechnung nach einem Umlauf stoppt; funktioniert nur, falls die Z-Koordinate des Startpunktes keinen Extremwert für diese Feldlinie darstellt; sonst Abbruch durch NBDS.

Rechenbeispiele

Mit den Beispielen sollen demonstriert werden:

- a) Form und Umfang der Eingabedaten und Ergebnisse,
- b) Leistungsfähigkeit des Programms,
- c) erforderliche Rechenzeit.

Zu a): Die den ersten beiden Beispielen beigefügten Ausdrücke der Eingabedaten und Ergebnisse sprechen im wesentlichen für sich selbst. Speziell hingewiesen sei auf folgendes: Für rotationssymmetrische Felder wird zu jedem berechneten Feldlinienpunkt zur Kontrolle außer der Feldstärke auch der magnetische Fluß berechnet und ausgedruckt. Der Fluß muß konstant sein längs der Feldlinie (Flußröhre). Bei Abweichungen DS kleiner wählen. - Im Fall geschlossener Feldlinien werden zugleich einige Integral-Charakteristika ^{*)} des Feldes ausgedruckt:

$$Q = \oint \underbrace{ds/B}_q \quad L = \oint ds \quad RL = \oint R ds \quad RQ = \oint R \cdot q$$

$$R2L = \oint R^2 ds \quad R2Q = \oint R^2 q$$

Zu b und c): Das Feldlinienbild zum Beispiel 1 soll hauptsächlich zeigen, daß auch Feldlinien, die durch Wicklungsquerschnitte laufen, mit diesem Programm berechnet werden können. Jedoch benötigt man für solche Feldlinien eine hohe Stützstellenzahl für die numerische Integration

*) Die Berechnung der Integral-Charakteristika wurde auf Anregung von Dr. F. Rau für Rechnungen zum toroidalen Multipol W VI in das Programm aufgenommen.

über die Spulendicke (siehe Seite 12 oben) und damit eine relativ hohe Rechenzeit (siehe die Angabe auf dem Feldlinienbild). Sind die gesuchten Feldlinien überall weit von den Strömen entfernt oder will man sich mit einer geringen Genauigkeit begnügen, so sinkt die Rechenzeit etwa linear mit der Stützstellenzahl $2N$. Für $N = 1$ (zwei Flächenströme je Spulenquerschnitt) ist die Rechenzeit nur noch $1/10$ der auf Feldbild 1 angegebenen.

Die Separatrix kann bei der derzeitigen Fassung des Programms nicht direkt berechnet werden, wohl aber kann man sich nahe an die Separatrix herantasten: man erhält Feldlinien, die weitgehend mit der Separatrix zusammenfallen (siehe die Feldbilder 2, 3, 4), außer in der Nähe der "Schnittpunkte".

Beispiel 1: Eingabedaten:

Bei der Eingabe mittels IBM 2741 Communications Terminal werden die Daten in der folgenden Form vom Terminal geschrieben (die ersten vier Zeilen sind vom Betriebssystem der IBM 360/91 bedingte Steuer"karten"):

```
// class=a,prty=10
// exec fog,lib=chs,name=linfor2,xtime=1,xlines=3000
//g.ft08f001 dd sysout=p,dch=(recfm=fh,blksize=2400,lrecl=80)
//g.sysin dd *
```

13.5	18.	0	0	0	0	0	0	0	0
8.	7.	1	0	0	0	0	0	0	0
8.	7.	1	0	0	0	0	0	0	0
5.8	4.2	0	0	0	0	0	0	0	0
9.5	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0.	2000.	0	0	0	0	0	0	0	0
2.	2.	0	0	0	0	0	0	0	0
2.	2.	0	0	0	0	0	0	0	0
1.	1.	0	0	0	0	0	0	0	0
1.	1.	0	0	0	0	0	0	0	0
0.2	0.4	0	0	0	0	0	0	0	0
0.4	0.4	0	0	0	0	0	0	0	0
0.4	0.4	0	0	0	0	0	0	0	0
0.7	0.7	0	0	0	0	0	0	0	0
0.3	0.3	0	0	0	0	0	0	0	0

Kreisstrom

2.	2.	0	0	0	0	0	0	0	0
2.	2.	0	0	0	0	0	0	0	0
1.	1.	0	0	0	0	0	0	0	0
1.	1.	0	0	0	0	0	0	0	0
0.2	0.4	0	0	0	0	0	0	0	0
0.4	0.4	0	0	0	0	0	0	0	0
0.4	0.4	0	0	0	0	0	0	0	0
0.7	0.7	0	0	0	0	0	0	0	0
0.3	0.3	0	0	0	0	0	0	0	0

Startpunkte

-1.75

Spulendaten
1

Beispiel 1: Vom Schnelldrucker zur Kontrolle ausgedruckte Eingabedaten:

L I N F O R PROGRAMM ZUR BERECHNUNG VON FELDLINIEN

PROGRAMM FUER R. POEHLCHEN
PROGRAMMIERT VON CH. SCHMID

EINGABEDATEN :

ACHSE = 2
HALBE LAENGE ZTX = 0.1350E 02
MAXIMAL RADIUS RI = 0.1800E 02

IPLOT = 1
IPRINT = 1, 1,

3 KOAXIALE SPULEN

RA	RI	L	A	G
0.8000E 01	0.7000E 01	0.2000E 01	-0.6000E 01	0.1000E 04
0.8000E 01	0.7000E 01	0.2000E 01	0.6000E 01	0.1000E 04
0.5800E 01	0.4200E 01	0.2000E 01	0.0	0.1000E 04

1 KREISSTROEME

0.9500E 01 0.0 0.2000E 04

COR(1) = -0.1350E 02 COR(2) = 0.0 COR(3) = 0.1350E 02 COR(4) = 0.1800E 02

Beispiel 1: Vom Schnelldrucker zur Kontrolle ausgedruckte Eingabedaten:

 STARTPUNKTE DER FELDLINIEN

XPB-WERTE	YPB-WERTE	ZPB-WERTE
0.1000E 01	0.0	0.0
0.2000E 01	0.0	0.0
0.3000E 01	0.0	0.0
0.4000E 01	0.0	0.0
0.5000E 01	0.0	0.0
0.7000E 01	0.0	0.0
0.7000E 01	0.0	-0.1750E 01
0.8000E 01	0.0	0.0
0.9000E 01	0.0	0.0

BEFDTIME.MV* : J 02 = 13:00
 BEFDTIME.MV* : J 02 = 13:00
 BEFDTIME.MV* : J 02 = 13:00

Beispiel 1: Vom Schnelldrucker ausgedruckte Feldlinie, die sich im berechneten Bereich nicht schließt.

FELDLINIE NR. : 1 DS = -2.00

BERECHNETE FELDLINIENPUNKTE

X	Y	Z	R	THETA	B IN GAUSS	FLUSS IN VS
1.0000	0.0	0.0	1.0000	0.0	0.5533E 03	
1.0517	0.0	-1.9991	1.0517	0.0	0.4982E 03	0.1726E-04
1.1567	0.0	-3.9963	1.1567	0.0	0.4106E 03	0.1726E-04
1.2741	0.0	-5.9927	1.2741	0.0	0.3394E 03	0.1726E-04
1.4378	0.0	-7.9858	1.4378	0.0	0.2672E 03	0.1726E-04
1.6840	0.0	-9.9704	1.6840	0.0	0.1945E 03	0.1726E-04
2.0173	0.0	-11.9421	2.0173	0.0	0.1351E 03	0.1726E-04

FELDLINIE NR. : 1 DS = 2.00

BERECHNETE FELDLINIENPUNKTE

X	Y	Z	R	THETA	B IN GAUSS	FLUSS IN VS
1.0000	0.0	0.0	1.0000	0.0	0.5533E 03	
1.0517	0.0	1.9991	1.0517	0.0	0.4982E 03	0.1726E-04
1.1567	0.0	3.9963	1.1567	0.0	0.4106E 03	0.1726E-04
1.2741	0.0	5.9927	1.2741	0.0	0.3394E 03	0.1726E-04
1.4378	0.0	7.9858	1.4378	0.0	0.2672E 03	0.1726E-04
1.6840	0.0	9.9704	1.6840	0.0	0.1945E 03	0.1726E-04
2.0173	0.0	11.9421	2.0173	0.0	0.1351E 03	0.1726E-04

Beispiel 1: geschlossene Feldlinie

FELDLINIE NR. : 2 DS = -0.70

BERECHNETE FELDLINIENPUNKTE

X	Y	Z	R	THETA	B IN GAUSS	FLUSS IN VS
8.0000	0.0	0.0	8.0000	0.0	0.3599E 03	0.7740E-03
8.1279	0.0	-0.6798	8.1279	0.0	0.3446E 03	0.7740E-03
8.4769	0.0	-1.2778	8.4769	0.0	0.3058E 03	0.7740E-03
8.5648	0.0	-1.7208	8.5648	0.0	0.2584E 03	0.7740E-03
9.5200	0.0	-1.9748	9.5200	0.0	0.2166E 03	0.7740E-03
10.1037	0.0	-2.0320	10.1037	0.0	0.1836E 03	0.7740E-03
10.6852	0.0	-1.8920	10.6852	0.0	0.1577E 03	0.7740E-03
11.2188	0.0	-1.5583	11.2188	0.0	0.1379E 03	0.7740E-03
11.6413	0.0	-1.0484	11.6413	0.0	0.1239E 03	0.7740E-03
11.8861	0.0	-0.4073	11.8861	0.0	0.1164E 03	0.7740E-03
11.9064	0.0	0.2882	11.9064	0.0	0.1158E 03	0.7740E-03
11.6981	0.0	0.9450	11.6981	0.0	0.1221E 03	0.7740E-03
11.3018	0.0	1.4818	11.3018	0.0	0.1350E 03	0.7740E-03
10.7825	0.0	1.8478	10.7825	0.0	0.1539E 03	0.7740E-03
10.2055	0.0	2.0218	10.2055	0.0	0.1786E 03	0.7740E-03
9.6197	0.0	1.9987	9.6197	0.0	0.2103E 03	0.7740E-03
9.0575	0.0	1.7787	9.0575	0.0	0.2506E 03	0.7740E-03
8.5538	0.0	1.3670	8.5538	0.0	0.2977E 03	0.7740E-03
8.1745	0.0	0.7914	8.1745	0.0	0.3393E 03	0.7740E-03
8.0040	0.0	0.1195	8.0040	0.0	0.3594E 03	0.7740E-03
8.0883	0.0	-0.5657	8.0883	0.0	0.3493E 03	0.7740E-03

LINIENINTEGRALE

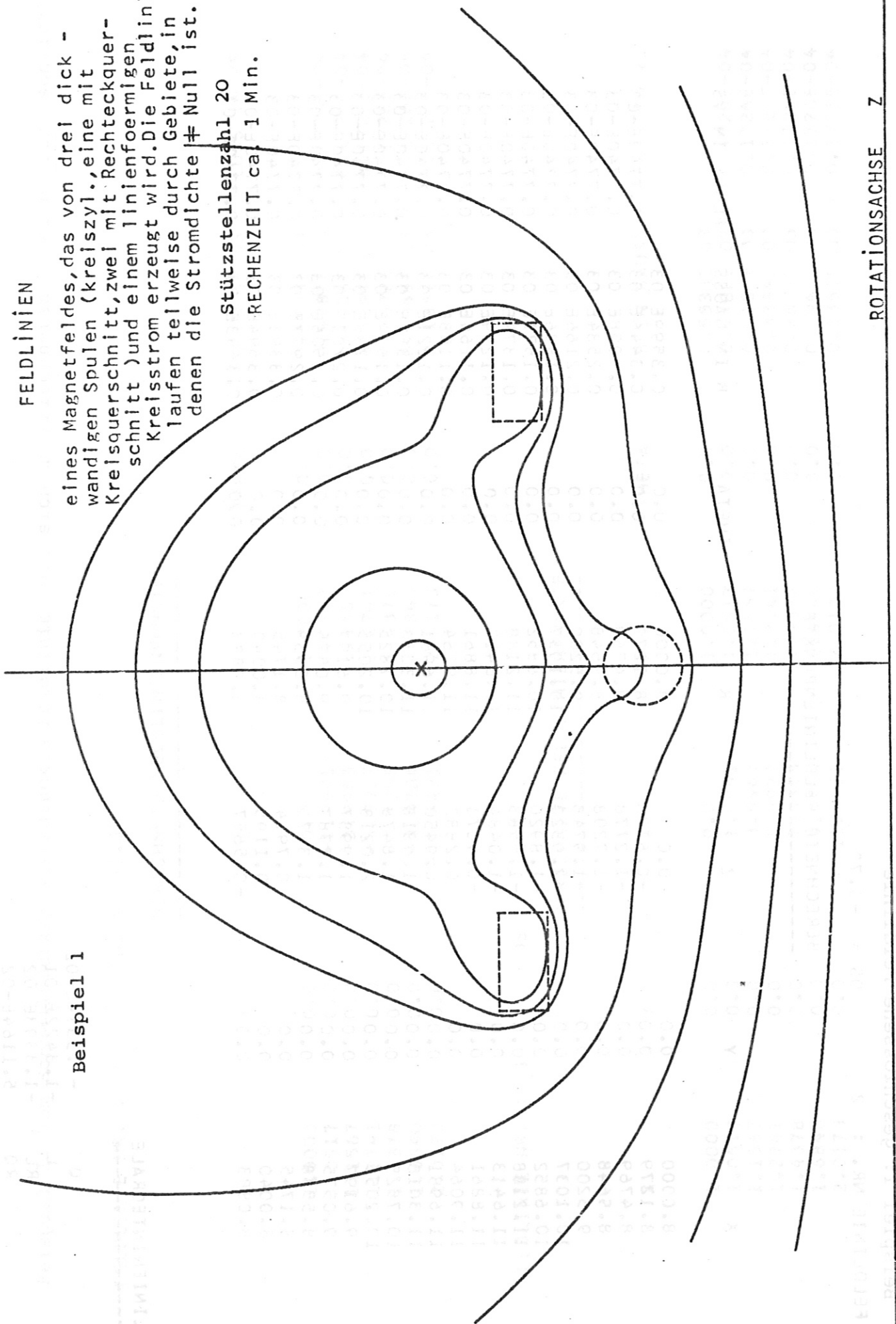
Q	-7.3374E-02
L	-1.3422E 01
RL	-1.3393E 02
RQ	5.1164E-02
R2L	-1.3612E 03
R2Q	-8.1659E 00

FELDLINIEN

eines Magnetfeldes, das von drei dickwandigen Spulen (Kreiszahl., eine mit Kreisquerschnitt, zwei mit Rechteckquerschnitt) und einem linienförmigen Kreisstrom erzeugt wird. Die Feldlinien laufen teilweise durch Gebiete, in denen die Stromdichte \neq Null ist.

Stützstellenzahl 20
RECHENZEIT ca. 1 Min.

Beispiel 1



ROTATIONSACHSE Z

Beisp. 2: Eingabedaten

Bei der Eingabe mittels IBM 2741 Communication Terminal werden die Daten in der folgenden Form von Terminal geschrieben:

400	1	3					
500	26	300			2		
600	1	1			1		1
700	1	1			1		1
720	1	1			1		1
740	1	10K(S)			1		1
760	1	1			1		1

800	13.5	18.					
900	14	14					
1000	8.775	8.775	6.703		6.703		
1100	2.44	-2.44	7.42		-7.42		
1200	1000.	1000.	1000.		1000.		
1300	0.6	9.					
1400	0.6	7.					
1500	0.2	9.9					
1600	0.3	7.2					
1700	0.2	6.5			7.42		
1800	0.2	8.5			2.44		
1900	1.	2.					
2000	1.	4.					
2100	1.0	6.					
2200	0.6	8.					
2300	1.4	1.					
2400	1.0	3.					
2500	1.0	5.					
2600	0.2	6.5					
2700	0.2	8.5	0.0				

Kreisströme

Startpunkte

2800	0.3	8.1							
2900	0.3	8.1							
3000	0.25	6.25							
3100	0.25	6.25							
3200	0.3	7.95							
3300	0.3	7.95							
3400	0.2	7.9							
3500	0.2	7.9							
3600	0.2	9.9							
3700	0.2	9.9							
3800	0.4	8.2							
	%end								

Beisp. 2: Vom Schnelldrucker zur Kontrolle ausgedruckte Eingabedaten:

L I N F O R PROGRAMM ZUR BERECHNUNG VON FELDLINIEN

PROGRAMM FUER R. POEHLCHEN
PROGRAMMIERT VON CH. SCHMID

EINGABEDATEN :

ACHSE = 2
HALBE LAENGE ZTX = 0.1350E 02
MAXIMAL RADIUS RI = C.1800E 02

IPLOT = 1
IPRINT = 1, 1, 1, 1,

4 KREISSTROEME

	R	D	I
1	0.8775E 01	0.2440E 01	0.1000E 04
2	0.8775E 01	-0.2440E 01	0.1000E 04
3	0.6703E 01	0.7420E 01	0.1000E 04
4	0.6703E 01	-0.7420E 01	0.1000E 04

COR(1) = -0.1350E 02 COR(2) = 0.0

COR(3) = 0.1350E 02

COR(4) = 0.1800E 02

Faint background text and markings, including a large circular diagram or watermark.

Beispiel 2: Vom Schnelldrucker ausgedruckte Feldlinie.

FELDLINIE NR. : 8 DS = -1.00

BERECHNETE FELDLINIENPUNKTE

X	Y	Z	R	THETA	B IN GAUSS	FLUSS IN VS
4.0000	0.0	0.0	4.0000	0.0	0.1844E 03	0.9275E-04
3.9994	0.0	-1.0000	3.9994	0.0	0.1846E 03	0.9275E-04
3.9996	0.0	-2.0000	3.9996	0.0	0.1847E 03	0.9275E-04
4.0018	0.0	-3.0000	4.0018	0.0	0.1838E 03	0.9275E-04
3.9993	0.0	-4.0000	3.9993	0.0	0.1834E 03	0.9275E-04
3.9825	0.0	-4.9998	3.9825	0.0	0.1872E 03	0.9275E-04
3.9618	0.0	-5.9996	3.9618	0.0	0.1965E 03	0.9275E-04
3.9852	0.0	-6.9991	3.9852	0.0	0.2035E 03	0.9274E-04
4.1175	0.0	-7.9895	4.1175	0.0	0.1959E 03	0.9274E-04
4.3986	0.0	-8.9480	4.3986	0.0	0.1707E 03	0.9274E-04
4.8271	0.0	-9.8505	4.8271	0.0	0.1373E 03	0.9275E-04
5.3753	0.0	-10.6861	5.3753	0.0	0.1061E 03	0.9275E-04
6.0107	0.0	-11.4578	6.0107	0.0	0.8125E 02	0.9275E-04
6.7077	0.0	-12.1746	6.7077	0.0	0.6277E 02	0.9275E-04
7.4486	0.0	-12.8460	7.4486	0.0	0.4930E 02	0.9275E-04
8.2223	0.0	-13.4794	8.2223	0.0	0.3942E 02	0.9275E-04

Beispiel 3: Vom Schnelldrucker ausgedruckte Feldlinie. (deschlossene Kurve)

Beispiel 2: Vom Schnelldrucker ausgedruckte Feldlinie. (geschlossene Kurve)

FELDLINIE NR. : 6

DS = -0.20

 BERECHNETE FELDLINIENPUNKTE

X	Y	Z	R	THETA	B IN GAUSS	FLUSS IN VS
8.5000	0.0	2.4400	8.5000	0.0	0.8242E 03	0.5510E-03
8.5581	0.0	2.2523	8.5581	0.0	0.7591E 03	0.5513E-03
8.7163	0.0	2.1356	8.7163	0.0	0.6440E 03	0.5512E-03
8.9127	0.0	2.1348	8.9127	0.0	0.5418E 03	0.5514E-03
9.0703	0.0	2.2519	9.0703	0.0	0.4890E 03	0.5513E-03
9.1250	0.0	2.4405	9.1250	0.0	0.4902E 03	0.5512E-03
9.0555	0.0	2.6244	9.0555	0.0	0.5380E 03	0.5512E-03
8.8906	0.0	2.7313	8.8906	0.0	0.6233E 03	0.5514E-03
8.6944	0.0	2.7194	8.6944	0.0	0.7286E 03	0.5512E-03
8.5447	0.0	2.5924	8.5447	0.0	0.8122E 03	0.5515E-03
8.5023	0.0	2.4006	8.5023	0.0	0.8198E 03	0.5515E-03

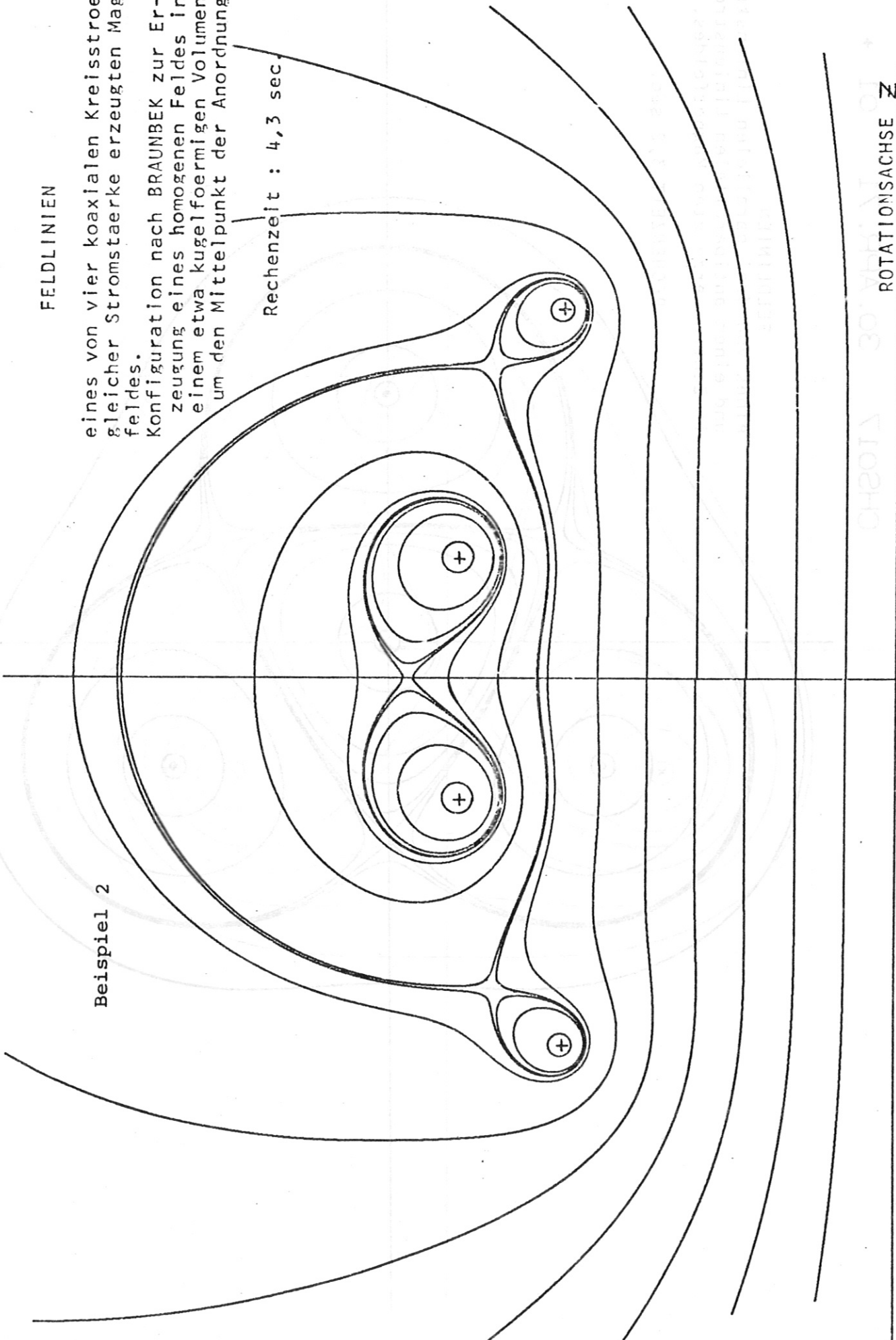
 LINIENINTEGRALE

Q	-3.1559E-03
L	-1.9558E 00
RL	-1.7238E C1
RQ	6.2282E-04
R2L	-1.5203E 02
R2Q	-2.4755E-C1

FELDLINIEN

eines von vier koaxialen Kreisstromen gleicher Stromstaerke erzeugten Magnetfeldes.
Konfiguration nach BRAUNBEK zur Erzeugung eines homogenen Feldes in einem etwa kugelfoermigen Volumen um den Mittelpunkt der Anordnung.

Rechenzeit : 4,3 sec.

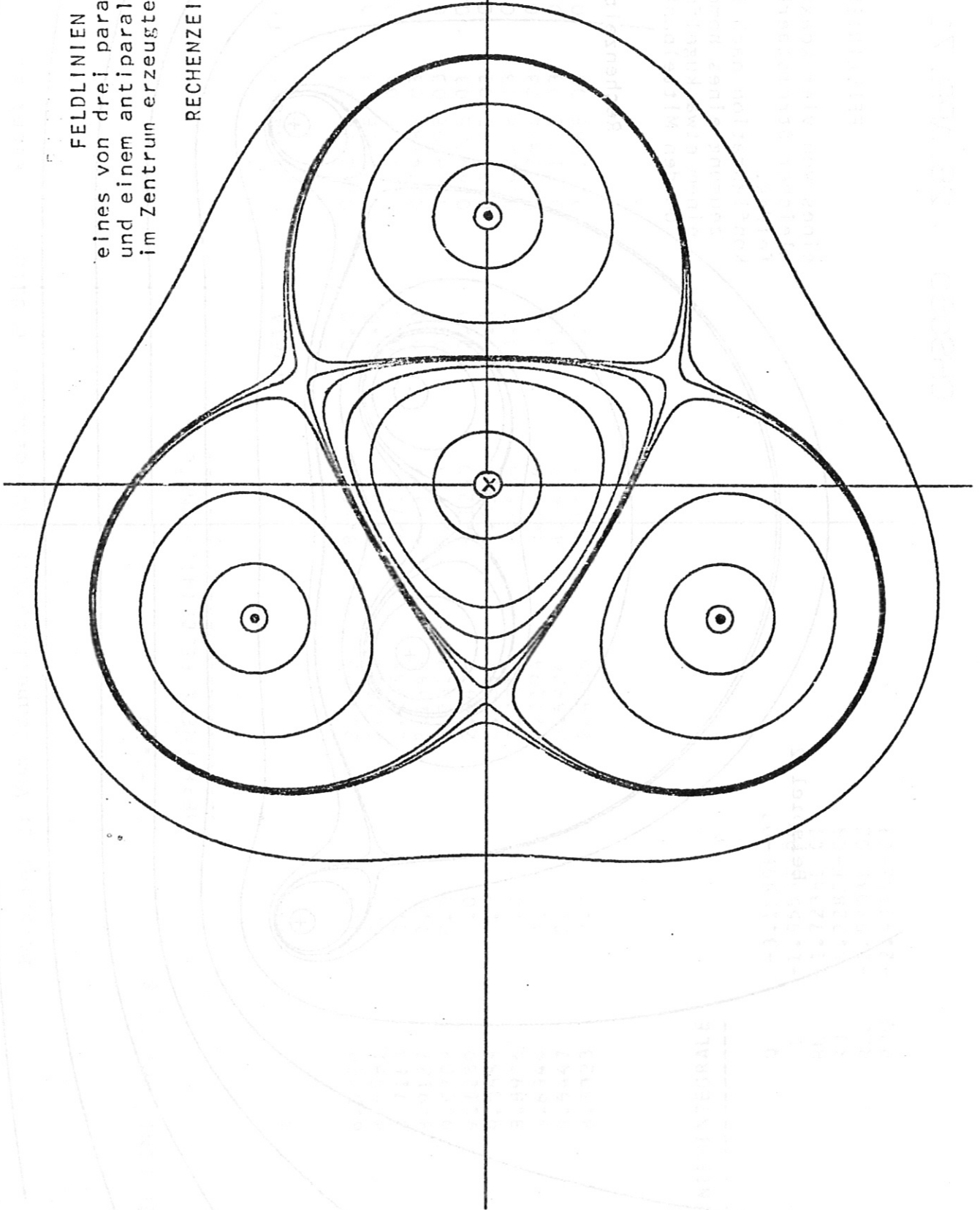


Beispiel 2

FELDLINIEN

eines von drei parallelen Linienströmen
und einem antiparallelen Linienstrom
im Zentrum erzeugten Magnetfeldes.

RECHENZEIT 3,2 sec.



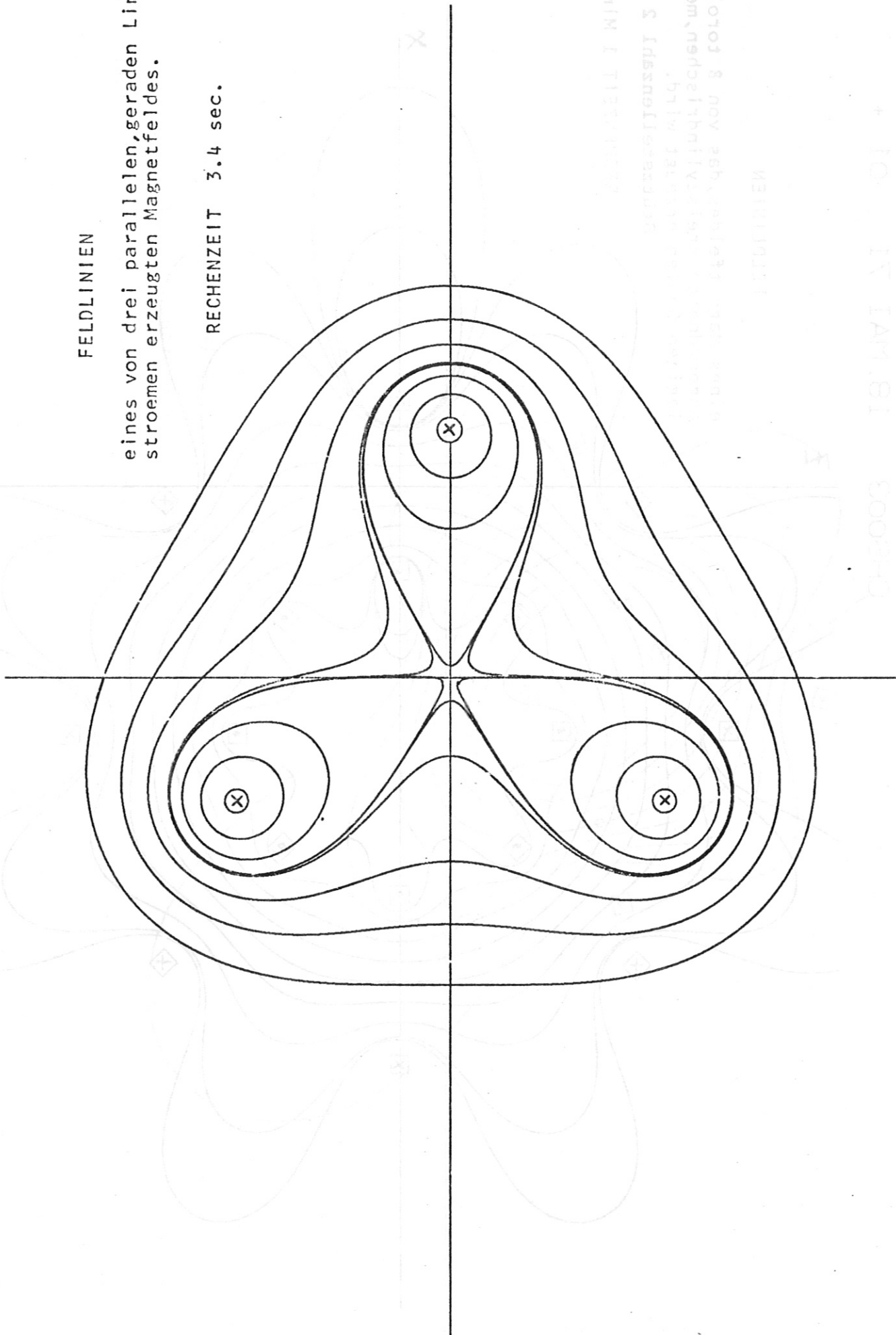
CHS002

6. MAI 71 01 +

FELDLINIEN

eines von drei parallelen, geraden Linien-
stroemen erzeugten Magnetfeldes.

RECHENZEIT 3.4 sec.

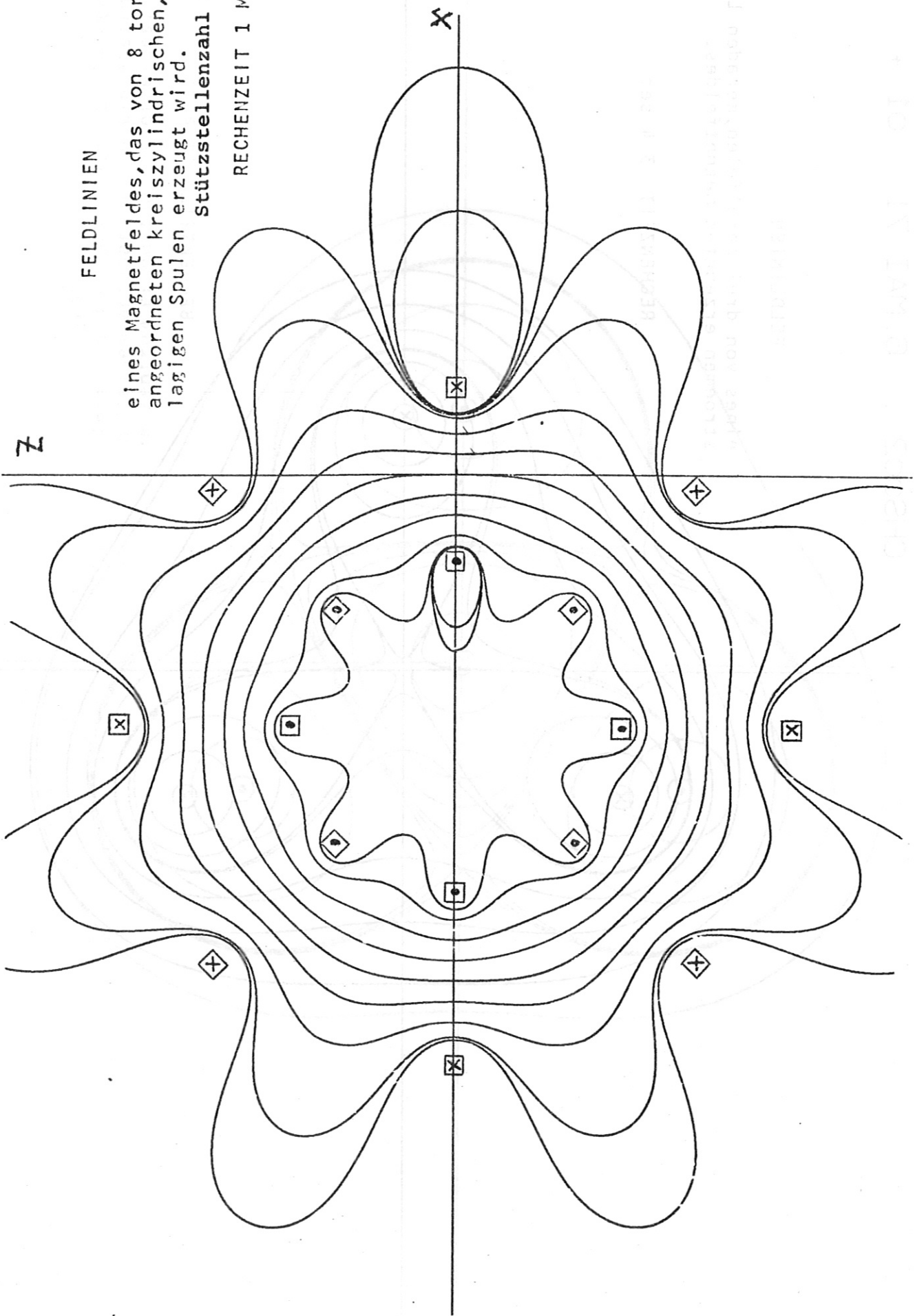


FELDLINIEN

eines Magnetfeldes, das von 8 toroidal angeordneten kreiszylindrischen, mehrlagigen Spulen erzeugt wird.

Stützstellenzahl 2

RECHENZEIT 1 Min.



CHS222 22. JUL. 70 01 +

4 kreiszyl. Spulen, toroidal angeordnet,
jedoch alternierend um $\pm 15^\circ$ gekippt.
FELDLINIENBILD in der Aequatorebene.

