

Programmbeschreibung und Benutzer-
anleitung zum Magnetfeld-Computer-
Programm HEDO 2

(Program Description and Users'
Manual for the HEDO 2 Magnetic
Field Computer Program)

P.Martin, H.Preis

IPP III/34

April 1977



MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK

8046 GARCHING BEI MÜNCHEN

MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK
GARCHING BEI MÜNCHEN

Programmbeschreibung und Benutzer-
anleitung zum Magnetfeld-Computer-
Programm HEDO 2

(Program Description and Users'
Manual for the HEDO 2 Magnetic
Field Computer Program)

P.Martin, H.Preis

IPP III/34

April 1977

*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.*

Programmbeschreibung und Benutzeranleitung zum Magnetfeld-Computerprogramm HEDO 2

(Program Description and Users' Manual for the HEDO 2 Magnetic Field Computer Program)

P. Martin, H. Preis

April 1977

Abstract

This report presents a description of the HEDO 2 computer program, including a detailed users' manual. The program allows calculation of the magnetic fields, the magnetic forces, and the self and mutual inductance coefficients of arbitrary air-core coil systems. With HEDO 2 it is also possible to calculate and simultaneously plot magnetic field and contour lines for such coil systems.

Programmbeschreibung und Benutzeranleitung zum
Magnetfeld-Computerprogramm HEDO 2

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung	4
2. Berechnungsmethode	5
2.1 Mathematische Darstellung der Spulen	5
2.2 Die Filament-Methode	7
2.21 Das magnetische Feld	9
2.22 Die magnetischen Kräfte	11
2.23 Die Induktivitäten	13
3. Programmbeschreibung	15
3.1 Überblick über das Programm	15
3.2 Beschreibung der einzelnen Rechengänge	22
3.21 Feldberechnung	22
3.22 Feldlinien	23
3.23 Berechnung der Induktivitäten	23
3.24 Berechnung der magnetischen Kräfte	24
3.25 Weiterverarbeitung bandgespeicher- ter Daten	24
4. Datenein- und -ausgabe	28
4.1 Eingabebeschreibung	28
4.2 Ausgabebeschreibung	39
4.3 Beschränkungen	40
4.4 Fehlerdiagnostik	41
5. Benutzerhinweise	43
6. Anwendungsbeispiel	46
7. Literaturverzeichnis	55

1. Einleitung

In diesem Report wird neben einer ausführlichen Programmbeschreibung eine detaillierte Benutzeranleitung zum Magnetfeldprogramm HEDO 2 dargelegt. Der Computer-Code HEDO 2 dient zur numerischen Auslegung von Magnetsystemen aus eisenlosen Spulen. Das Programm fußt auf der theoretischen Grundlage von [1] und den dort abgehandelten numerischen Verfahren.

Die Konzeption des Programms orientiert sich insbesondere an den großen Spulensystemen heutiger Fusionsexperimente. Demzufolge werden hier Magnetsysteme bis zu $N=200$ Spulen weitestgehend beliebiger Form, in beliebiger Lage zueinander betrachtet. Numerische Überlegungen in Verbindung mit fertigungstechnischen Aspekten haben dazu geführt, gewisse Voraussetzungen hinsichtlich der Spulenform vorzuschreiben:

- a) Die Spulenkörper müssen symmetrisch zu der lokalen Koordinatenachse x_q sein (s. Abb. 2).
- b) Die Spulenkontur beschreibende Funktion und ihre Ableitung müssen stetig sein.
- c) Rechteckiger Wicklungsquerschnitt.

Für solche Spulenanordnungen können mit Hilfe des Programms HEDO 2 folgende Berechnungen durchgeführt werden:

- a) Berechnung des dreidimensionalen magnetischen Feldes der räumlichen Spulenströme in beliebigen Aufpunkten oder Aufpunktegittern.
- b) Berechnung und graphische Darstellung von Feldlinien.
- c) Berechnung und graphische Darstellung von Niveaulinien (Linien konstanter Flußdichte $|B|$).
- d) Berechnung der Kraftdichteverteilung in den Wicklungskörpern und der resultierenden Kräfte auf die Spulen.
- e) Berechnung der Selbst- und Gegeninduktivitätskoeffizienten der Spulen.

2. Berechnungsmethode

2.1 Mathematische Darstellung der Spulen

Unter Berücksichtigung der getroffenen Voraussetzungen bekommt jede der N Spulen ein lokales Koordinatensystem x_q, y_q, z_q , $q=1(1)N$ zugeordnet derart, daß die x_q -Achse Symmetrieachse des Spulenkörpers ist und $y_q=0$ in der Mittelebene der Spule liegt (s. Abb. 2). In diesen Koordinatensystemen lassen sich dann die Spulen jeweils durch ihre Querschnittsabmessungen d_q, b_q und durch eine Linie S_q , die in der Mitte des Wicklungskörpers parallel zu seiner Kontur verläuft, eindeutig beschreiben. Die mathematische Beschreibung von S_q erfolgt stückweise durch n_{qa} Kurvenelemente, die entweder Kreisbogen verschiedener Radien R_{qn} und Mittelpunktskoordinaten x_{qn}, y_{qn}, z_{qn} oder Geraden sein können. Da auch Kreisbogen mit gegen Null strebender Bogenlänge zugelassen sind, können nach dieser Methode beliebige Kurven S_q nachgebildet werden. Wegen der auf die x_q -Achse bezogenen Achsensymmetrie kann die Vorgabe von S_q auf $z_q \geq 0$ beschränkt werden.

Die beliebige räumliche Lage der Spulen findet Berücksichtigung, indem zusätzlich ein übergeordnetes Koordinatensystem xyz definiert wird. Gegenüber dem xyz -System sind die lokalen Koordinatensysteme x_q, y_q, z_q , $q=1(1)N$ um x_{q0}, y_{q0}, z_{q0} in den Richtungen x, y, z , verschoben und um $\varphi_{qx}, \varphi_{qy}, \varphi_{qz}$ verdreht. Dabei bedeutet $\varphi_{qx}, \varphi_{qy}, \varphi_{qz}$ jeweils eine Koordinatendrehung um die x_q -, y_q - bzw. z_q -Achse im math. positiven Sinne. Die Drehungen müssen aus der Normallage in der Reihenfolge $\varphi_{qz}, \varphi_{qy}, \varphi_{qx}$ vorgenommen werden (s. Abb. 1).

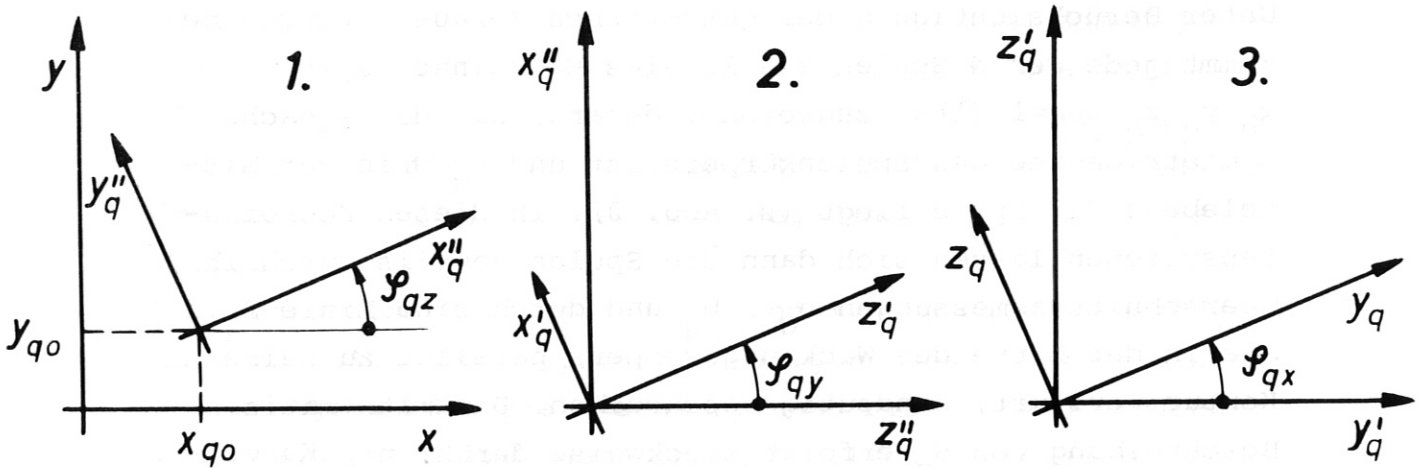


Abb. 1. Reihenfolge der Koordinatendrehungen.

1. Drehung um z''_q ,
2. Drehung um y''_q ,
3. Drehung um x_q

Das $x_q y_q z_q$ -System befindet sich in Normallage, wenn seine Achsen parallel zu denen des $x y z$ -Systems verlaufen. Unter diesen Voraussetzungen gelten folgende Transformationsgleichungen:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{q0} \\ y_{q0} \\ z_{q0} \end{bmatrix} + (T_z) \cdot (T_y) \cdot (T_x) \cdot \begin{bmatrix} x_q \\ y_q \\ z_q \end{bmatrix} \quad (1)$$

mit

$$(T_x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi_{qx} & -\sin \varphi_{qx} \\ 0 & \sin \varphi_{qx} & \cos \varphi_{qx} \end{bmatrix}$$

$$(T_y) = \begin{bmatrix} \cos \varphi_{qy} & 0 & \sin \varphi_{qy} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi_{qy} & 0 & \cos \varphi_{qy} \end{bmatrix}$$

$$(T_z) = \begin{bmatrix} \cos \varphi_{qz} & -\sin \varphi_{qz} & 0 \\ \sin \varphi_{qz} & \cos \varphi_{qz} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2.2 Die Filament-Methode

Zur Lösung der unter 1. beschriebenen Aufgaben wird der aus w_q Windungen bestehende Wicklungskörper jeder Spule als jeweils ein in sich geschlossener räumlicher Leiter mit konstanter Stromdichte G_q aufgefaßt. Die räumlich verteilten Ströme werden dann durch eine bestimmte Anzahl von Linienströme

$$I_{ql} = G_q \cdot dA_q, \quad q=1 \dots N \quad (2)$$

approximiert (Filament-Methode). Dabei kann die Zahl der geschlossenen Linienströme je Spule über die variabel eingeführten Teilungen n_{qr} in radialer Richtung (x_q -Richtung) und n_{qy} in axialer Richtung (y_q -Richtung) beliebig groß gewählt werden (s. Abb. 2).

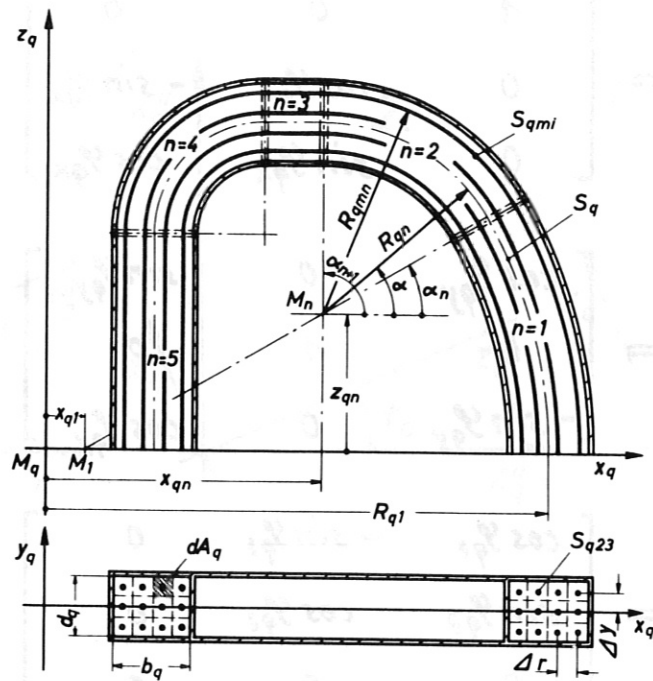


Abb. 2. Placierung der Linienleiter im Spulenkörper.

Durch diese Approximation wird die Querschnittsfläche A_q des Wicklungskörpers in $n_{qr} \cdot n_{qy}$ Teilflächen dA_q unterteilt. Die größte Rechengenauigkeit wird erreicht, wenn die Teilflächen dA_q möglichst quadratisch gewählt werden.

Entsprechend der vorgegebenen Bezugslinie S_q jeder Spule (s. Kapitel 1.) können die parallel zu S_q verlaufenden Linienleiter S_{qmi} in einfacher Weise aus S_q berechnet werden. Weiterhin werden alle in sich geschlossenen Linienleiter S_{qmi} durch Polygone mit n_{qmi} Geraden, deren Eckpunkte auf S_{qmi} liegen ersetzt. Die verschiedenen Kurvenelemente $n=1(1)n_{qa}$ einer Leiterschleife S_{qmi} können dabei unterschiedliche Teilungen n_{qmi} bekommen. Jedes zur q -ten Spule gehörende Polygon hat somit

$$n_{q\alpha} = \sum_{n=1}^{n_{qa}} n_{q\alpha n} \quad (3)$$

Geraden, deren Anzahl von Spule zu Spule frei gewählt werden kann. Darin wird $n_{q\alpha n} = 1$ gesetzt, wenn das n -te Teilstück von S_{qmi} ohnehin eine Gerade ist. Es ist also \vec{s}_{qmik} der k -te gerade Linienleiter der i -ten axialen und m -ten radialen Leiterschleife in der q -ten Spule, welcher den Strom

$$J_{ql} = \frac{I_q \cdot G_q}{n_{qt} \cdot n_{qy}} \quad (4)$$

trägt.

Durch diese Approximation ist die Felddarstellung von räumlich verteilten Strömen auf die Felddarstellung von geraden Linienströmen mit anschließender Superposition zurückgeführt worden.

2.21 Das magnetische Feld

Für einen geraden Linienstrom kann das Biot-Savartsche Gesetz analytisch geschlossen integriert werden. Gemäß [1] sei \vec{B}_{qmik} die magnetische Flußdichte des Linienstromes I_{ql} im Leiter \vec{s}_{qmik} . Durch Superposition erhält man die resultierende Flußdichte in einem beliebigen Aufpunkt P aus:

$$\vec{B}_r(p) = \sum_{q=1}^N \sum_{m=1}^{n_{qr}} \sum_{i=1}^{n_{qi}} \sum_{k=1}^{n_{ki}} \vec{B}_{qmik} \quad (5)$$

Zur Wahl der Aufpunkte muß einschränkend angemerkt werden, daß diese nicht auf einem Linienleiter liegen dürfen (singulärer Fall). Soll also die magnetische Flußdichte im Wicklungskörper einer Spule berechnet werden, ist es zweckmäßig, die Aufpunkte in der Mitte zweier benachbarter Linienleiter anzuordnen.

Magnetische Feldlinien

Nachdem $\vec{B}_r(p)$ in jedem Punkt des Raumes bekannt ist, läßt sich daraus eine Feldlinien-Darstellung gewinnen. Berechnungsgrundlage ist die Feldlinien-Differentialgleichung, die in ihrer Parameterform - mit der Bogenlänge s als Parameter - in [1] gegeben wird. Außerdem sind dort ihre Lösbarkeitskriterien diskutiert. Für vorzugebende Anfangswerte s_0 erfolgt die numerische Lösung des Dgl.-Systems mit dem von Adams-Bashford [2] angegebenen Integrationsverfahren.

Niveaulinien

Niveaulinien bieten die Möglichkeit die Ortsabhängigkeit des Feldes $|B_{r(x,y,z)}|$ in Form diskreter Niveauewerte B_h wiederzugeben. Es sei E eine Ebene die parallel zu einer der drei Koordinatenebenen x (bzw. R) oder y (bzw. \mathcal{Y}) oder $z=\text{const.}$ verläuft. In dieser Ebene können Niveaulinien konstanter

Flußdichte

$$|\vec{B}_r(x, y, z)| = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad (6)$$

berechnet werden. Dazu wird der interessierende Bereich von E mit einem Netz (äquidistantes oder nicht äquidistantes Netz) von Gitterpunkten überdeckt, in denen die Feldkomponenten bestimmt werden. Aus diesen Werten lassen sich zeilen- und spaltenweise Interpolationspolynome bilden deren Schnittpunkte mit dem gesuchten Niveau B_h Kurvenpunkte der gesuchten Niveaulinie sind [1].

Der Ripple

In toroidalen Spulenanordnungen ist der Ripple ϵ ein Maß für die Feldkonstanz in Umfangsrichtung des Torus. Seine Definition lautet:

$$\epsilon(R) = \frac{B_{y_{\max}} - B_{y_{\min}}}{B_{y_{\max}}} \cdot 100 \% \quad (7)$$

Darin ist $B_{y_{\max}}$ der maximale und $B_{y_{\min}}$ der minimale Wert der magnetischen Induktion entlang eines Kreises mit dem Radius R.

2.22 Die magnetischen Kräfte

Zur Berechnung der magnetischen Kräfte denkt man sich den Wicklungskörper entsprechend der eingeführten Teilungen in

$l = n_{qr} \cdot n_{qy} \cdot n_{qz}$ finite Leiterelemente unterteilt, so daß der gerade Linienleiter \vec{s}_{qmik} im Zentrum des Leiterelements ΔV_{qmik} liegt (s. Abb. 3). Ist ΔV_{qmik} hinreichend klein

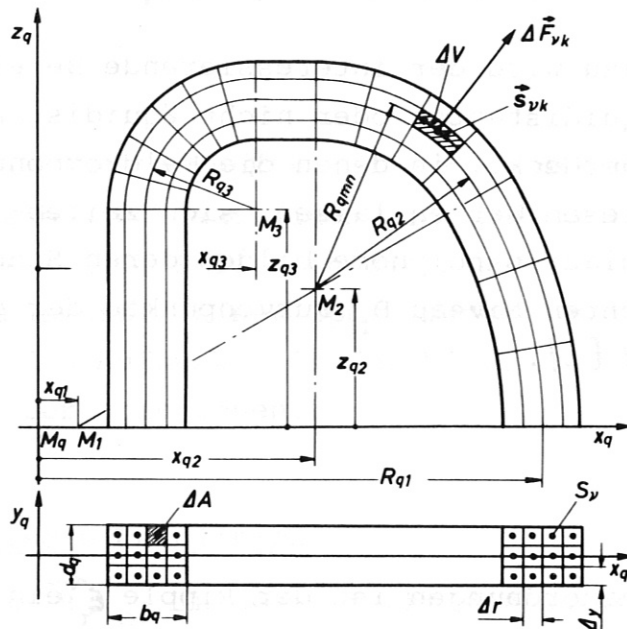


Abb. 3 Aufteilung des Spulenkörpers in finite Leiterelemente.

gewählt worden, so ist in diesem Volumenelement die magnetische Flußdichte \vec{B}_r als konstant anzusehen. Damit ist innerhalb ΔV_{qmik} auch die Kraftdichte

$$\vec{f}_{qmik} = \frac{\Delta \vec{F}_{qmik}}{\Delta V_{qmik}} = \frac{1}{\Delta A_q} \cdot (\vec{J}_{qe} \times \vec{B}_r) \quad (8)$$

konstant, und es kann die im Schwerpunkt von ΔV_{qmik} angreifende Kraft je Volumenelement nach

$$\Delta \vec{F}_{qmik} = J_{ql} \cdot (\vec{s}_{qmik} \times \vec{B}_r) \quad (9)$$

berechnet werden [1]. Die resultierende Kraft auf die q-te Spule, $q=1 \dots N$ ist dann:

$$\vec{F}_q = \sum_{m=1}^{n_{qr}} \sum_{i=1}^{n_{qy}} \sum_{k=1}^{n_{qd}} \Delta \vec{F}_{qmik} \quad (10)$$

2.23 Die Induktivitäten

Gegeben sei die Spule p die durch $j=1 \dots n_{py}$ Pancakes mit jeweils $n=1 \dots n_{pr}$ Linienleiter und die Spule q die durch $i=1 \dots n_{qy}$ Pancakes mit jeweils $m=1 \dots n_{qr}$ Linienleiter approximiert worden ist (s. Abb. 4). Zwischen zwei in sich geschlossenen Leiterschleifen S_{pjn} und S_{qim} herrscht dann die Induktivität:

$$L_{imjn} = \frac{\phi_{imjn}}{I_{qim}} = \frac{1}{I_{qim}} \cdot \int_{S_{pjn}} \vec{B}_{im} \cdot d\vec{\sigma}_{pjn} \quad (11)$$

Darin ist ϕ_{imjn} der magnetische Fluß der vom Strom I_{qim} in S_{qim} erzeugt wird und der die von S_{pjn} aufgespannte Fläche

σ_{pjn} durchsetzt.

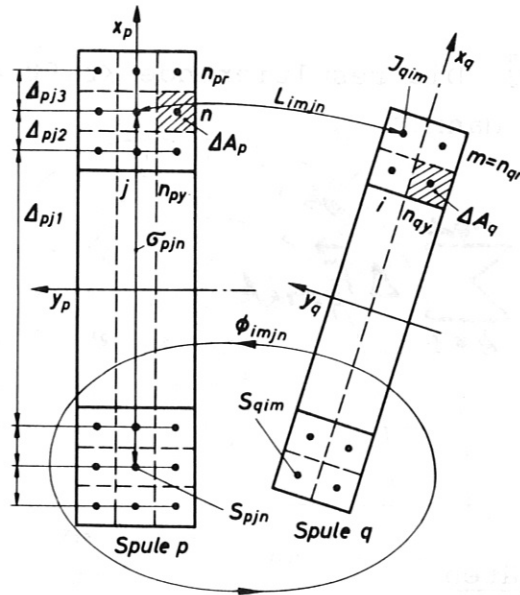


Abb. 4. Zur Berechnung der Induktivitäten

Die Gegeninduktivität zwischen der q-ten und p-ten Spule ist somit:

$$L_{pq} = \sum_{i=1}^{n_{qy}} \sum_{m=1}^{n_{qr}} \sum_{j=1}^{n_{py}} \sum_{n=1}^{n_{pr}} L_{imjn} \quad (12)$$

Für $p=q$, wenn also sowohl S_{pjn} wie auch S_{qim} in der q-ten Spule liegen, erhält man daraus die Selbstinduktivität der q-ten Spule. Weitere Einzelheiten dazu können aus [1] entnommen werden.

3. Programmbeschreibung

3.1. Überblick über das Programm

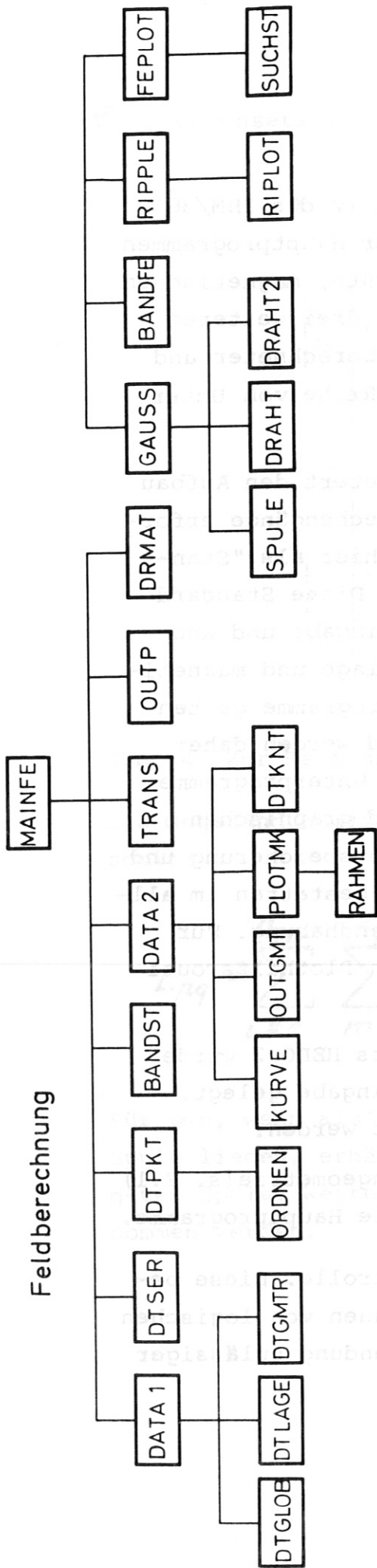
Das Programmpaket HEDO 2 ist in Fortran IV des IBM/360-Systems geschrieben. Es besteht aus vier Hauptprogrammen zur Berechnung von magnetischer Flußdichte, magnetischen Kräften, Induktivitäten und Feldlinien, drei weiteren Hauptprogrammen zur Weiterverarbeitung berechneter und bandgespeicherter Daten, sowie einer Reihe von Unterprogrammen.

Der Strukturbaum (s. Abb. 5 und 6) erläutert den Aufbau des Programmpakets. Die verschiedenen Rechengänge erfordern z. T. gleiche Unterprogramme, die hier als "Standardroutinen" bezeichnet werden sollen. Diese Standardroutinen betreffen insbesondere Dateneingabe und Kontrolle, sowie die Berechnung von Spulenlage und magnetischer Flußdichte. Die restlichen Unterprogramme gelten nur für ein bestimmtes Hauptprogramm und werden daher als "Sonderrountinen" bezeichnet. Einige Unterprogramme dienen der Dokumentation, Auswertung und graphischen Darstellung berechneter Daten (z.B. Bandspeicherung und Plot von Niveaulinien). Diese Routinen gestatten im allgemeinen eine vielseitige und bequeme Handhabung. Für Plotdarstellungen wurden die hauseigenen Plothilfsroutinen verwendet.

Bei der Programmierung des Programmpakets HEDO 2 wurde besonderen Wert auf eine bequeme Dateneingabe gelegt. Diese konnte über folgenden Weg erreicht werden:

1. einfache Darstellung der Spulengeometrie (s. 2.1)
2. einheitliche Datensätze für alle Hauptprogramme.

HEDO 2 besitzt eine aufwendige Datenkontrolle. Diese bezieht sich auf Speicherschutz, das Erkennen von logischen Fehlern, insbesondere aber auf die Verwendung zulässiger



Induktivitätsberechnung

Kraftberechnung

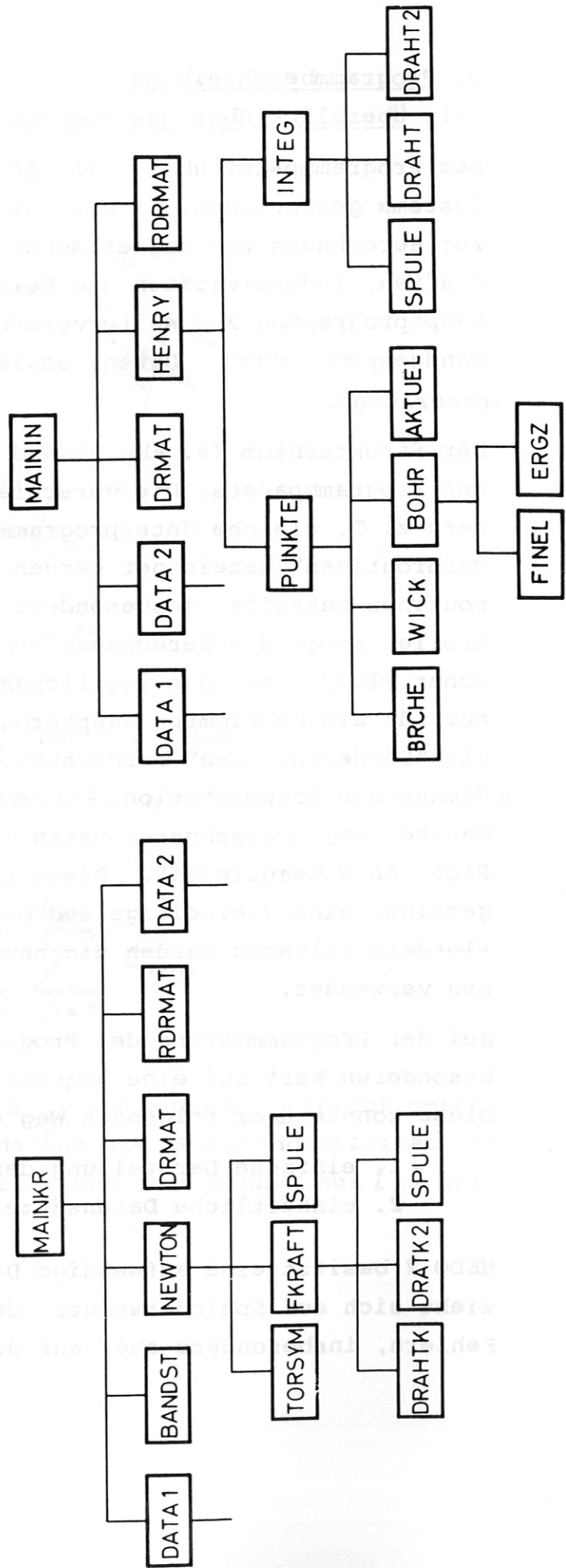


Abb. 5: Strukturbaum des Programms HEDO 2
(dazu gehört Abb. 6)

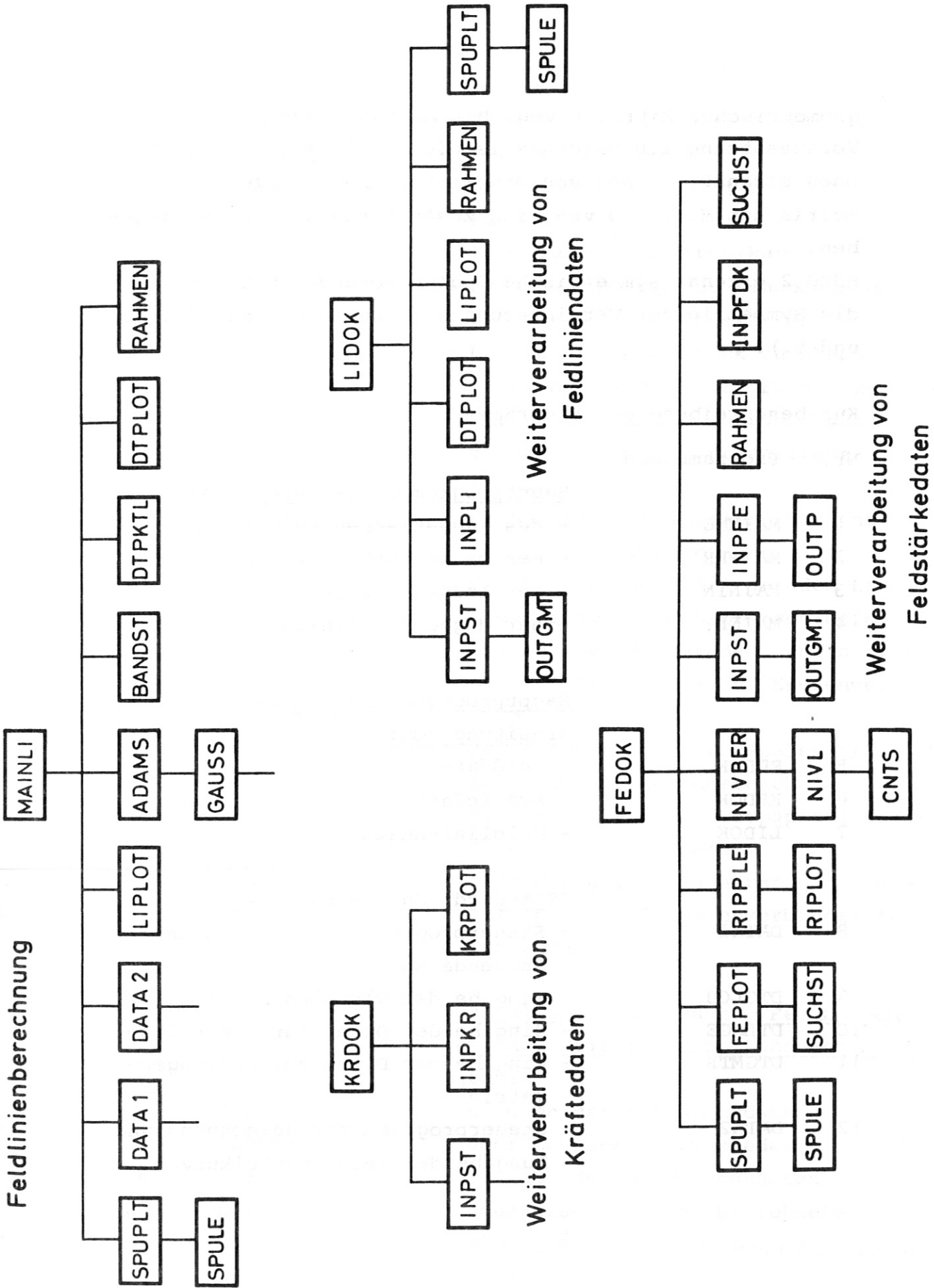


Abb.6: Strukturbaum des Programms HEDO 2
(dazu gehört Abb.5)

geometrischer Mittelkurven. Mit Ausnahme der Voraussetzung 1.b werden alle nicht zulässigen Definitionen erkannt. Anhand von Druckerausgabe und Plot der geometrischen Mittelkurven sind zusätzliche Kontrollen gegeben.

HEDO 2 erkennt symmetrische Spulenordnungen und nutzt die Symmetrie zur Verringerung der Rechenzeit aus (s. 4.1 und 5.).

Kurzbeschreibung des Programms:

Nr. Programmname

Hauptprogramme zur Berechnung:

- | | | |
|---|--------|---------------------------|
| 1 | MAINFE | - des magnetischen Feldes |
| 2 | MAINKR | - der magnetischen Kräfte |
| 3 | MAININ | - der Induktivitäten |
| 4 | MAINLI | - der Magnetfeldlinien |

Hauptprogramme zur Weiterverarbeitung von:

- | | | |
|---|-------|-------------------|
| 5 | FEDOK | - Felddaten |
| 6 | KRDOK | - Kräftedaten |
| 7 | LIDOK | - Feldliniendaten |

"Standard"-Unterprogramme:

- | | | |
|----|--------|--|
| 8 | DATA1 | - Steuerprogramm zur Eingabe der Spulendaten |
| 9 | DTGLOB | - Eingabe der globalen Daten |
| 10 | DTLAGE | - Eingabe der Daten zur Spulenlage |
| 11 | DTGMTR | - Eingabe der Daten zur Spulengeometrie |
| 12 | DATA2 | - Steuerprogramm zur Berechnung und Ausgabe der geom. Mittelkurven |

Nr.	Programmname	
13	KURVE	- Berechnung der geom. Mittelkurven S_q , $q=1$ (1)N
14	OUTGMT	- Druckerausgabe der geom. Mittelkurven
15	PLOTMK	- Plot der geom. Mittelkurven
16	BANDST	- Bandspeicherung der Eingabedaten und der geom. Mittelkurven
17	INPST	- Bandabruf: Gegenstück zu BANDST
18	DRMAT	- Berechnung der Transformationsmatrizen
19	RDRMAT	- Berechnung der inversen Transformationsmatrizen
20	SPULE	- Transformation lokaler Koordinaten in übergeordnete
21	DRAHT	- Feldberechnung aller geraden Linienströme einer Leiterschleife
22	DRAHT2	- Feldber. aller geraden Linienströme in einem "planaren" Spulenverband
23	GAUSS	- Feldberechnung aller Spulenströme in einem Aufpunktebereich
24	RAHMEN	- Bereitstellen des Plotpapiers und Zeichnen des Rahmens
25	SPUPLT	- Plot der Wicklungsquerschnitte eines "planaren" Spulenverbandes in der $z=0$ -Ebene

Zusätzliche Routinen zur Feldberechnung und Weiterverarbeitung von Felddaten:

26	DTPKT	- Eingabe der Aufpunktedaten
27	ORDNEN	- Umordnen der Aufpunktedaten
28	DTSER	- Eingabe der Steuerungsdaten
29	OUTP	- Druckerausgabe der berechneten Flußdichten im gegebenen Aufpunktebereich

Nr.	Programmname	
30	BANDFE	- Bandspeicherung der Aufpunkte und Flußdichten
31	INPFE	- Bandabruf: Gegenstück zu BANDFE
32	RIPPLE	- Berechnung des Ripples $\epsilon_{(R)}$
33	RIPLOT	- Plot von $\epsilon_{(R)}$
34	FEPLLOT	- Plot der Feldkomponenten als Funktion der Ortskoordinaten
35	TRANS	- Transformation der Aufpunkte vom zylindrischen ins kartesische Koordinatensystem, Rücktransformation des Feldes vom kartesischen ins zylindrische Koordinatensystem
36	INPFDK	- Eingabe der Steuerungsdaten für Niveaulinienberechnung
37	SUCHST	- Eingrenzung des Aufpunktebereiches
38	NIVBER	- Berechnung und Druckerausgabe der Flußdichte /B/.
39	NIVL	- Steuerprogramm der Niveaulinienroutine CNTS
40	CNTS	- Berechnung und Plot von Niveaulinien

Zusätzliche Routinen zur Kraftberechnung und zur Weiterverarbeitung von Kräftedaten:

41	NEWTON	- Berechnung von Kraftdichteverteilung und resultierender Kraft, Drucker- und Bandausgabe
42	FKRAFT	- Feldberechnung aller Spulenströme im Wicklungskörper der betrachteten Spule (in lokalen Koordinaten)
43	DRAHTK	- Feldberechnung aller geraden Linienströme einer Leiterschleife

Nr.	Programmname	
44	DRATK2	- Feldberechnung aller ger. Linienströme einer Leiterschleife in einem "planaren" Spulenverband
45	INPKR	- Bandabruf aller gespeicherten Kräfte- daten
46	KRPLOT	- Plot der Kräfteverteilung im Wicklungskörper
47	TORSYM	- Prüfen, ob Torussymmetrie vorliegt

Zusätzliche Routinen zur Induktivitätsberechnung:

48	HENRY	- Berechnung der Induktivitäten
49	PUNKTE	- Steuerprogramm zur Aufpunkteberechnung
50	BOHR	- Berechnung der Aufpunkte in der Spulenöffnung
51	WICK	- Berechnung der Aufpunkte im Wicklungskörper
52	FINEL	- Transformation von Aufpunkten für die Gauss-Integration
53	INTEG	- Integration
54	BRCHE	- Bestimmung der Integrationsbereiche in der Spulenöffnung
55	ERGZ	- Interpolation
56	AKTUEL	- Zusammenstellen einiger Daten zur Aufpunkteberechnung

Zusätzliche Routinen zur Feldlinienberechnung und zur Weiterverarbeitung von Feldliniendaten:

57	DTPKTL	- Eingabe der Anfangswerte
58	ADAMS	- Adams-Bashford-Verfahren zur Lösung der Feldliniendifferentialgleichung
59	DTPLOT	- Steuerungsdaten
60	LIPILOT	- Plot der Feldlinien

Die Routinen DTKNT und INPLI entfallen.

3.2 Beschreibung der einzelnen Rechengänge

3.21 Feldberechnung

Die Berechnung der magnetischen Flußdichte kann in IBR Aufpunktebereichen mit beliebigen Aufpunktegittern und/oder mit einer willkürlichen Folge von Aufpunkten erfolgen. Die Routine zur Feldberechnung verlangt stets Aufpunkte im übergeordneten kartesischen Koordinatensystem. Bei Eingabe von Aufpunkten in Zylinderkoordinaten führt das Programm eine Transformation und zur Vermeidung der Rücktransformation eine Zwischenspeicherung der ursprünglichen Aufpunkte auf einem externen Datenträger durch. Nach Berechnung der Flußdichte müssen somit nur noch die Feldkomponenten ins ursprüngliche Koordinatensystem zurücktransformiert werden.

Die Koordinaten der Anfangs- und Endpunkte der geraden Linienströme einer Leiterschleife S_{qmi} werden ins übergeordnete Koordinatensystem transformiert. Danach wird die Feldberechnung in allen NP Aufpunkten eines Aufpunktebereichs durchgeführt. Dieser Ablauf wird für alle Leiterschleifen aller Spulen wiederholt.

Liegt ein "planarer" Spulenverband vor (s. 4.1), so werden die Punkte einer Leiterschleife nur für $z_q \geq 0$ definiert. Mit der Feldberechnung eines geraden Linienstroms für $z_q \geq 0$ kann auch das Feld des entsprechenden Linienstroms für $z_q \leq 0$ nach wenigen Umformungen bestimmt werden. Damit wird eine Verringerung der Rechenzeit erreicht.

Zur Veranschaulichung der berechneten Daten kann der Plot der Feldkomponenten als Funktion der Ortskoordinaten gewählt werden; zur Dokumentation eignet sich die Ausgabe der Felddaten auf Band. Für toroidale Spulenanordnungen sind zusätzlich die Berechnung und graphische Darstellung des Ripples $\mathcal{E}_{(R)}$ möglich (s. Abb. 7 und 11).

3.22 Feldlinienberechnung

Die Feldlinien werden in kartesischen Koordinaten in einem beliebig vorgebbaren Bereich berechnet. Dabei erfolgt die Feldberechnung je Feldlinienpunkt nach der in 3.21 beschriebenen Methode.

Das Extrapolationsverfahren von Adams-Bashford [2] zur Integration der Feldliniendifferentialgleichung erfordert die Berechnung eines Anlaufstückes von 4 Punkten nach Runge-Kutta. Eine Feldlinie kann für positive und/oder negative Schrittweite DS verfolgt werden. Über die Bandausgabe ist neben der Dokumentation nachträglich ein Abruf mit Plot der Feldlinien möglich (s. Abb. 10).

3.23 Berechnung der Induktivitäten

Programmintern wird die Integration (s. Gl. (11) in 2.23) in mehrere Integrationsbereiche aufgespaltet. Die Bereiche der Wicklung liegen zwischen den n_{qr} radialen Leiterschleifen der betreffenden Spule. Die Spulenöffnung (Bohrung) wird in IB Bereiche gegliedert, wobei die Zahl IB mit der Öffnungsgröße wächst. Die Daten zur Beschreibung der Aufpunkte und Flächenstücke der verschiedenen Integrationsbereiche werden auf einem externen Datenträger zwischengespeichert, um Platz im Kernspeicher einzusparen.

In der Bohrung erfolgt eine Integration nach dem 3x3-Punkte-Verfahren von Gauß.

Da zur Integration die lokale Komponente B_y benötigt wird, müssen die Feldkomponenten in lokale Koordinaten transformiert werden. Aus Symmetriegründen wird die Integration zur Berechnung der Selbstinduktivität auf eine axiale Ebene beschränkt. Für die Berechnung der Selbstinduktivität oder für die Berechnung der Gegeninduktivität in einem "planaren" Spulenverband genügen wegen der auf x_q bezogenen Symmetrie Aufpunkte mit lokaler Koordinate $z_q \geq 0$. Damit verringert sich die Rechenzeit erheblich. Ablauf des Rechengangs siehe Flußdiagramm nach Abb.8.

3.24 Berechnung der magnetischen Kräfte

Zur Berechnung der in der q-ten Spule wirkenden Kräfte werden die Aufpunkte P programmintern entsprechend dem in 2.22 gegebenen Schema festgelegt (s. Abb.9). Liegt in "planarer" Spulenverband vor, so genügt wegen der auf x_q bezogenen Symmetrie die Berechnung in Aufpunkten mit $z_q \geq 0$. Im koaxialen Fall (s.4.1) kann die Berechnung auf einen Aufpunkt je Leiterschleife beschränkt werden. Für den symmetrischen toroidalen Spulenverband (s.4.1) reduziert sich die Kraftberechnung auf Aufpunkte in Leiterschleifen mit $y_q \leq 0$ (s. 4.1). Mit den logischen Variablen LOG 1, LOG2 und LOG3 wird der Feldanteil desjenigen geraden Leiters ausgeschlossen, auf dem der Aufpunkt liegt, da dieser Feldanteil ohne Einfluß auf die magn. Kraft bleibt [1]. Feld und Kraft werden nach der Berechnung in lokalen Koordinaten ausgedruckt.

Die berechneten Daten können auf Band gespeichert werden, so daß sie ohne manuellen Eingriff etwa für Festigkeitsberechnungen verwendet werden können.

3.25 Weiterverarbeitung von bandgespeicherten Daten

Mit Hilfe zusätzlicher Routinen können die bandgespeicherten Daten einerseits tabellarisch ausgedruckt und zum anderen zu anderen Darstellungsformen weiterverarbeitet werden (s. Abb.6). Im einzelnen bestehen folgende Darstellungsmöglichkeiten:

a) Felddaten

- Plot der Feldkomponenten als Funktion der Ortskoordinaten
- Berechnung und Plot des Ripples
- Berechnung und Plot von Niveaulinien in kartesischen oder zylindrischen Aufpunktegittern

b) Feldliniendaten

- Ausgabe der magn.Flußdichte nach Größe und Richtung entlang der einzelnen Feldlinien

c) Kräftedaten

- Graphische Darstellung der Kraftverteilung im Wicklungskörper

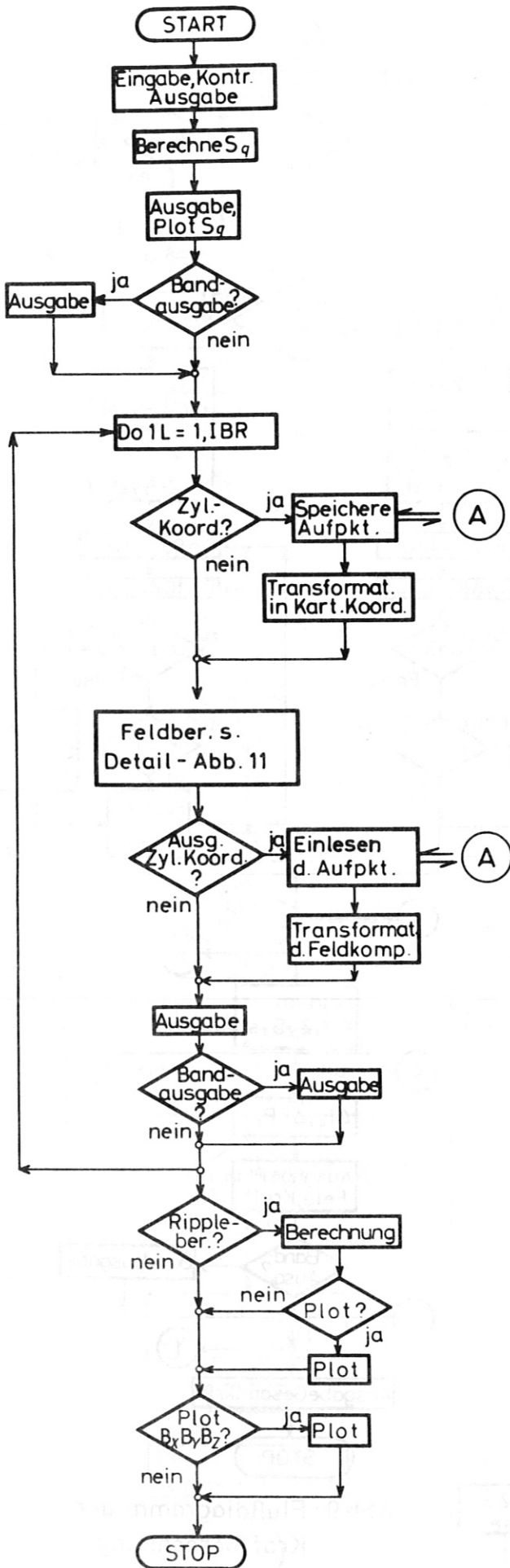


Abb. 7: Flußdiagramm der Feldberechnung

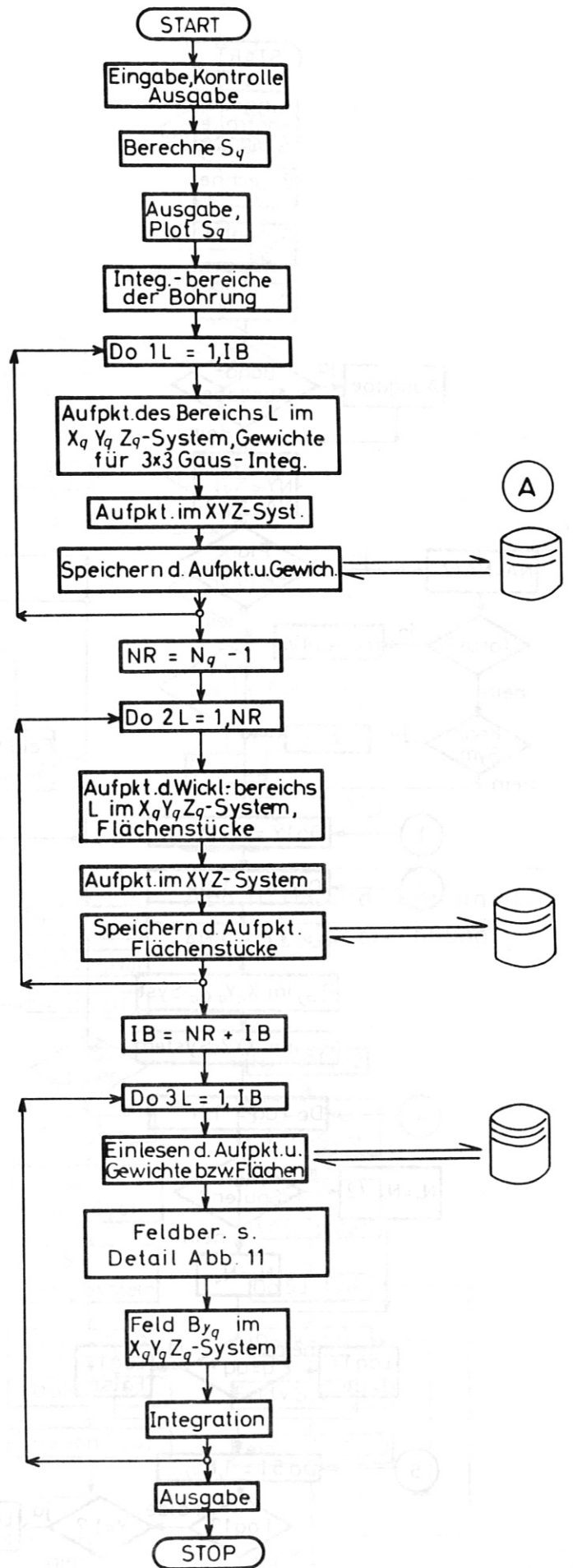


Abb. 8: Flußdiagramm der Induktivitätsberechnung

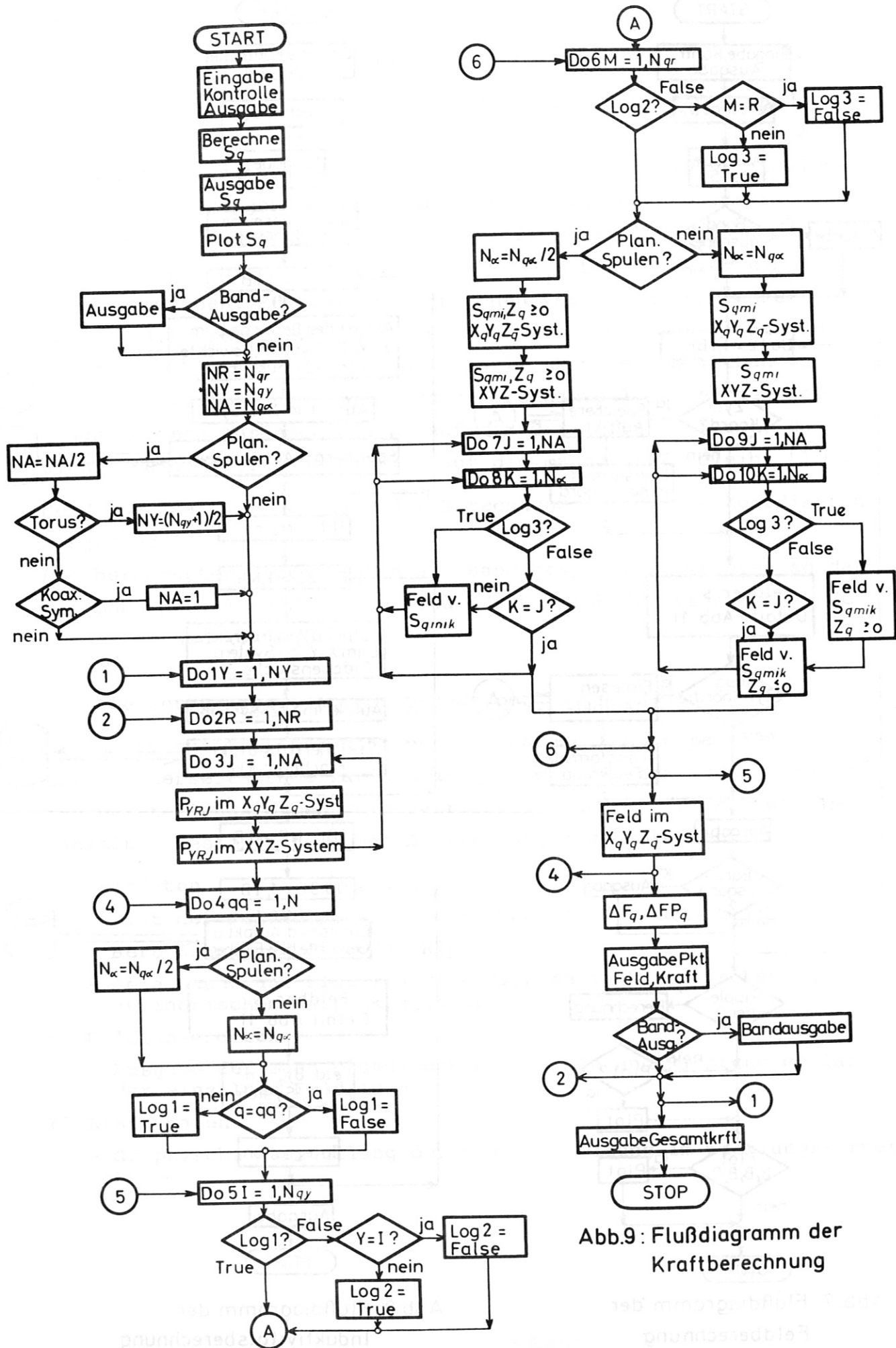


Abb.9: Flußdiagramm der Kraftberechnung

Abb.10: Flußdiagramm der Feldlinienberechnung

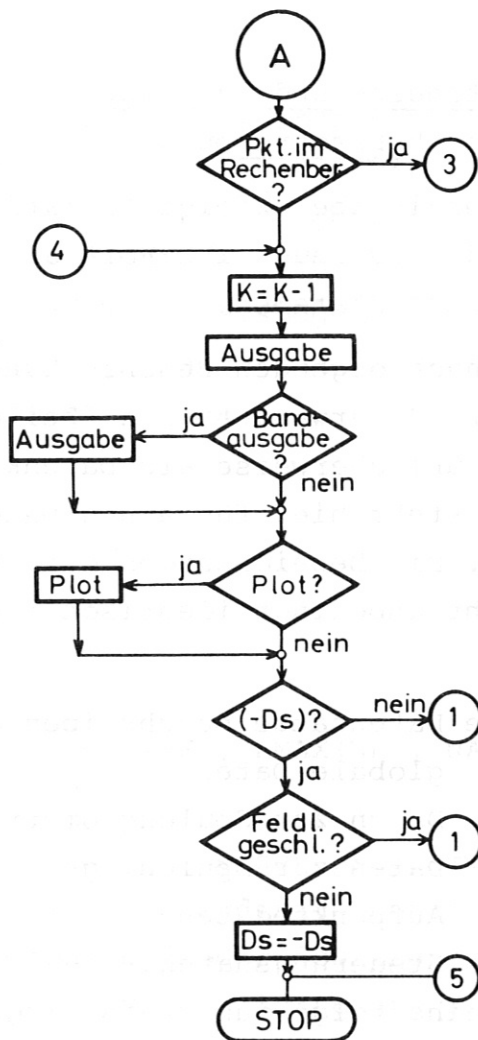
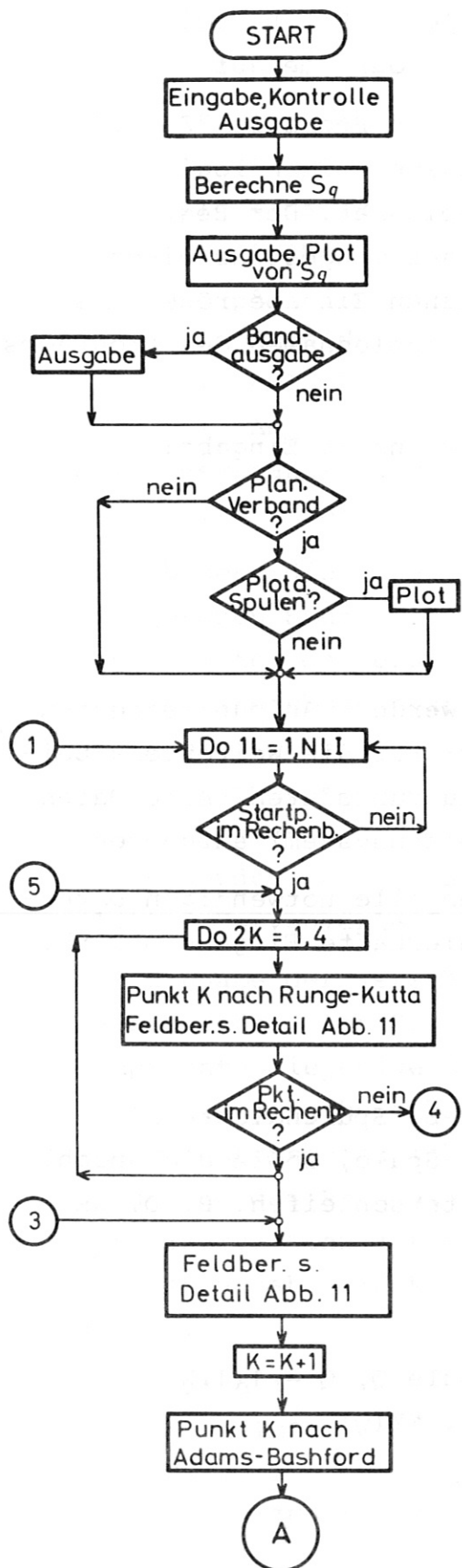
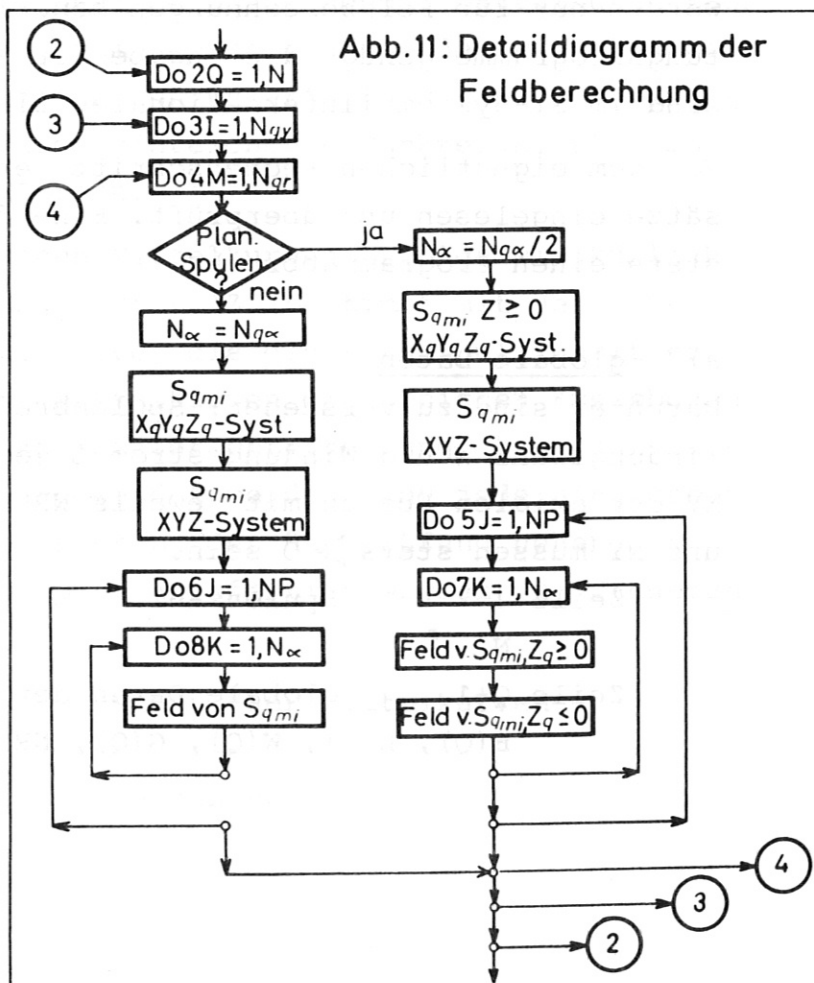


Abb.11: Detaildiagramm der Feldberechnung



4. Datenein- und -ausgabe

4.1 Eingabebeschreibung

Die Dateneingabe erfolgt formatfrei mit der sogenannten "list-directed" des neuen IBM-Fortran IV Compilers. Die Leseinheit IRD ist im Data-Statement der einzelnen Hauptprogramme auf 5 gesetzt.

In der nachfolgenden Beschreibung werden die Begriffe "Zeile" und "Karte" verwendet. Die "Zeile" beinhaltet einen logischen Rekord, üblicherweise als Datenkarte bezeichnet. Der Begriff "Karte" steht hier für einen Datenblock aus mindestens einer "Zeile". Die Bezeichnungen der verschiedenen Eingabegrößen müssen nicht unbedingt identisch mit den Variablennamen des Programms sein.

Folgende Datensätze beschreiben die vollständige Eingabe:

- a) globale Daten
- b) Daten zur Spulengeometrie
- c) Daten zur Spulenlage
- d) Aufpunktedaten
- e) Steuerungsdaten.

Diese Reihenfolge muß stets eingehalten werden. Aufpunkteangaben werden nur für Feldberechnungen benötigt. Für die Weiterverarbeitungsprogramme genügt die Angabe der Steuerungsdaten. Alle Daten sind im SI-System (internationales Einheitensystem) anzugeben.

Vor dem eigentlichen Rechenschritt werden alle notwendigen Datensätze eingelesen und überprüft. Eine fehlerhafte Eingabe bewirkt stets einen Programmabbruch.

a) globale Daten

Darunter sind zu verstehen: Spulenbreite B, Spulendichte D, Windungszahl W und Windungsstrom G jeder Spule, sowie die Anzahl N_Y der axialen Ebenen mit jeweils N_R Leiterschleifen. B, D, N_R und N_Y müssen stets > 0 sein.

Zeile 1 Spulenzahl

N

Zeile Q+1 globale Daten der Spule Q, $Q = 1(1)N$

B(Q), D(Q), W(Q), G(Q), $N_R(Q)$, $N_Y(Q)$

b) Daten zur Spulengeometrie

Die Beschreibung einer geometrischen Mittelkurve erfolgt entsprechend Kapitel 2.1. Die Variablen $X(NK)$ und $Z(NK)$ bestimmen die Mittelpunktskoordinaten des NK -ten Kreisbogens, $R(NK)$ den Radius, $AMIN(NK)$ und $AMAX(NK)$ den Winkelbereich. $NALF(NK)$ legt die Anzahl der gleichlangen Sehnen des Kreisbogens fest. Die Mittelkurve besitzt NA Kreisbogen. Wegen der in Kapitel 1.) festgelegten Voraussetzungen müssen gelten:

- 1.) $Z(NK) \geq 0$
- 2.) $AMIN(NK) \leq AMAX(NK)$
- 3.) $AMIN(NK) \geq AMAX(NK-1)$
- 4.) $AMIN(NK) > AMAX(NK-2)$
- 5.) $AMIN(1) = 0$
- 6.) $AMAX(NA) = 180$

Selbstverständlich müssen $R(NK)$, $AMIN(NK)$, $AMAX(NK)$, NA und $NALF(NK) > 0$ sein.

Kreisbogen, die nicht aneinanderstoßen, werden programmintern mit geraden Stücken verbunden. Sind die Ordinatenwerte des Anfangspunktes des ersten Kreisbogens und/oder des Endpunktes des letzten Kreisbogens größer Null, so werden lotrechte Stücke programmintern eingefügt. Die Definition der geom. Mittelkurve kann auch punktweise erfolgen, indem Kreisbogen mit dem Winkelbereich $(AMAX-AMIN) = 0$ und der azimuthalen Unterteilung $NALF = 1$ vorgegeben werden. Dabei ist durch hinreichende Punktezahl für einen glatten Kurvenverlauf zu sorgen.

Die Eingabe der verschiedenen Mittelkurven erfolgt willkürlich nacheinander. Der Zuordnungsvektor IZU bestimmt mit der K -ten Komponente diejenige Mittelkurve, die die K -te Spule besitzen soll. Die Eingabe mehrerer Mittelkurven mit gleichen Kreisbogen, jedoch unterschiedlicher azimuthaler Unterteilung, kann zur Verringerung der Rechenzeit angewendet werden. Für jede eingegebene Mittelkurve kann zur Erleichterung der Überprüfung neben der Druckerausgabe ein Kontrollplot angefertigt werden (s. Steuerungsdaten).

Karte 1	Anzahl der Mittelkurven
IMIT	
Karte 2	Zuordnung
IZU(1), IZU(2), ... IZU(N)	

Karte 3

Mittelkurve K, $K = 1(1) \text{ IMIT}$

Definition der K-ten Mittelkurve:

Zeile 1 Anzahl der Kreisbogen
 NA
Zeile NK+1 Kreisbogen NK, $NK = 1(1)NA$
 X(NK), Z(NK), R(NK), AMIN(NK), AMAX(NK), NALF(NK)

c) Daten zur Spulenlage

Die Variablen FIX, FIY und FIZ kennzeichnen die Drehungen um die x-, y- und z-Achse. VX, VY und VZ bestimmen die Verschiebungen in Richtung der x-, y- bzw. z-Achse (s. 2.1).

Zeile Q Lage der Spule Q, $Q = 1(1)N$
 FIX(Q), FIY(Q), FIZ(Q), VX(Q), VY(Q), VZ(Q)

Das Programm erkennt einen Spulensatz als "planaren" Verband, wenn folgende Bedingungen gelten:

$$\text{FIX}(Q) = \text{FIY}(Q) = \text{VZ}(Q) = 0, \quad Q = 1(1)N$$

D.h., alle Ebenen x_q, y_q der lokalen Koordinationssysteme liegen in der XY Ebene des übergeordneten Systems.

Für den "Torus" als Sonderfall des "planaren" Verbandes gilt zusätzlich:

$$\text{FIZ}(Q) = (Q-1) \cdot 360/N, \quad Q = 1(1)N$$

Für den "axialsymmetrischen" Verband kreisförmiger Spulen als Sonderfall des "planaren" Verbandes gilt:

$$\text{FIX}(Q) = \text{FIY}(Q) = \text{FIZ}(Q) = \text{VX}(Q) = \text{VZ}(Q) = 0, \quad Q = 1(1)N.$$

d) Aufpunktedaten

Diese Daten beziehen sich stets auf den Ursprung des übergeordneten Koordinatensystems.

Feldberechnung

Die in IBR Bereichen liegenden Aufpunkte dürfen je Bereich als ein äquidistantes (Option INC=0) oder nicht äquidistantes ($\text{INC} < 0$) Gitter sowie als beliebige Punktefolge ($\text{INC} > 0$) eingegeben werden. Das Programm gestattet für jeden Aufpunktbereich die Wahl eines kartesischen (Option ICYL=0) oder zylindrischen ($\text{ICYL} \neq 0$) Koordinatensystems. Die berechneten Flußdichtekomponenten werden in den entsprechenden Koordinaten dargestellt.

Anfangs- und Endpunkt sowie Punkteanzahl je Achse legen ein äquidistantes Gitter fest. Für ein nicht äquidistantes Gitter müssen fortlaufend je Achse alle Stützwerte eingelesen werden, wobei sie in beliebiger Reihenfolge stehen können. Das Programm ordnet die Achsenwerte nach ihrer Größe, beginnend mit dem kleinsten Wert. Bei Eingabe eines Aufpunktegitters wird jeder Achsenwert mit den Stützwerten der anderen Koordinatenachsen kombiniert. Die Punkteanzahl beträgt somit $N_1 \cdot N_2 \cdot N_3$, wobei N_1 , N_2 und N_3 die Anzahl der Achsenwerte eines Bereichs in xyz bzw. $R\varphi z$ angeben. Für eine beliebige Punktefolge von N_1 Aufpunkten müssen je Aufpunkt alle drei Koordinaten eingelesen werden.

Die Aufpunktebereiche dürfen sich überlappen.

Aufpunktedaten:

Karte 1 Anzahl der Bereiche
 IBR

Karte $K + 1$ Daten des Bereichs K , $K = 1(1)IBR$

Daten eines Aufpunktebereichs:

Zeile 1 Optionen
 ICYL, INC

Für $INC \leq 0$: Zeile 2 Anzahl der Stützwerte je Achse
 N_1, N_2, N_3

Zeile 3 Stützwerte der x - bzw. R -Achse
 $P_1(1), P_1(2), \dots P_1(N_1)$ für $INC < 0$
 $P_1(1), P_1(N_1)$ für $INC = 0$

Zeile 4 Stützwerte der y - bzw. φ -Achse
 $P_2(1), P_2(2), \dots P_2(N_2)$ für $INC < 0$
 $P_2(1), P_2(N_2)$ für $INC = 0$

Zeile 5 Stützwerte der z -Achse
 $P_3(1), P_3(2), \dots P_3(N_3)$ für $INC < 0$
 $P_3(1), P_3(N_3)$ für $INC = 0$

Für $INC > 0$: Zeile 2 Punkteanzahl
 N_1

Zeile $J + 2$ Koordinaten des Aufpunktes $J, J=1(1)N_1$
 $P_1(J), P_2(J), P_3(J)$

Feldlinienberechnung

Die Anfangswerte zur Lösung der Feldliniendifferentialgleichung werden als Startpunkte PSX, PSY und PSZ in kartesischen Koordinaten vorgegeben. Weiterhin legt DS die Schrittweite, d.h. den Abstand zweier Feldlinienpunkte fest. Soll eine sich nicht schließende Feldlinie für positive und negative Schrittweite berechnet werden, so ist IDS ungleich Null zu setzen. Eine Feldlinie gilt als geschlossen, wenn der Abstand eines berechneten Punktes zum Startpunkt $< DS/2$ wird.

Der Vektor BSR kennzeichnet mit den Indizes 1,2,3 die Maxima, der Vektor BSL die Minima der x-, y-, z-Koordinaten des Rechenbereichs.

Zeile 1 Anzahl der Feldlinien
 NLI
Zeile K + 1 Daten zur Feldlinie K, $K = 1(1)NLI$
 PSX(K), PSY(K), PSZ(K), DS(K), IDS(K)
Zeile NLI+2 Rechenbereich
 (BSR(I), $I = 1,3$), BSL(I), $I = 1,3$)

e) Steuerungsdaten

Unter Steuerungsdaten sind zu verstehen:

1. Daten für die Kontrollplots der geometrischen Mittelkurven.
2. Option zur Bandspeicherung
3. Nähere Angaben zur Induktivitätsberechnung
4. Nähere Angaben zur Kraftberechnung
5. Daten für Rippleberechnung und Plot des Ripples
6. Daten für den Plot von Feldkomponenten als Funktion der Ortskoordinaten
7. Daten zu Berechnung und Plot von Niveaulinien
8. Daten für den Plot von Feldlinien
9. Daten für den Plot der Kräfteverteilung im Wicklungskörper

Das Programm unterscheidet bei graphischen Darstellungen zwischen dem Papierformat und dem Plot- und Aufpunktebereich, wobei Papierformat \geq Plotbereich \geq Aufpunktebereich sein muß.

Das Papierformat ist mit den Koordinaten der linken unteren und rechten oberen Ecke des 0,27m x 0,18 m großen Plotpapiers festgelegt. Der Plotbereich ist ein Ausschnitt des Papierformats, während der Aufpunktebereich den Plotbereich ganz oder teilweise einnimmt.

zu 1.) Daten für die Kontrollplots der geom. Mittelkurven

Werden die Kontrollplots gewünscht, so ist IKRV ungleich Null zu setzen. Zusätzlich müssen PXMIN und PXMAX als Minimal- und Maximalwerte der Abzisse eingelesen werden. Das Ordinatenmaximum wird wegen maßstabsgetreuer Wiedergabe programmintern auf $(PXMAX - PXMIN) \cdot 2/3$ gesetzt. Das Ordinatenminimum ist stets 0. Somit sind Papierformat und Plotbereich eingegrenzt. PXMIN und PXMAX gelten für alle zu plottenden Mittelkurven. Die Punkte einer Mittelkurve werden zur Veranschaulichung der azimuthalen Unterteilung linear miteinander verbunden. In den Punkten sind die Normalenrichtungen angezeichnet.

Zeile 1 Option

IKRV

Zeile 2 Abzissenbereich

PXMIN, PXMAX

Zeile 2 entfällt, wenn $IKRV = 0$.

zu 2.) Option zur Bandspeicherung

Bei Angabe von IBAND $\neq 0$ werden eingelesene und berechnete Werte auf Band geschrieben.

Zeile 1 Option

IBAND

zu 3.) Nähere Angaben zur Induktivitätsberechnung

Die drei Indizes I1, I2, I3 kennzeichnen die zu berechnenden Induktivitäten $L(I1, I2)$ $L(I1, I2+1), \dots, L(I1, I3)$

I3 muß $\geq I2$ sein.

Zeile 1 Indizes

I1, I2, I3

zu 4.) Nähere Angaben zur Kraftberechnung

IKR ist diejenige Spule, von der die auf sie wirkenden Kräfte berechnet werden sollen. Mit der Option ISY = 0 kann die Kraftberechnung auf Aufpunkte in Leiterschleifen der axialen Ebenen $y_q \leq 0$ beschränkt werden. Diese Angabe ist nützlich, wenn in einem Spulenverband Symmetrie zur x_q -Achse vorliegt.

Zeile 1	Index, Option
IKR, ISY	

zu 5.) Daten für Rippleberechnung und Plot des Ripples

Option IRIP $\neq 0$ bewirkt die Berechnung des Ripples (s. Def. 2.21). Die Rippleberechnung erfolgt als Funktion des Torusradius R, so daß die zugrunde liegende Feldberechnung in Zylinderkoordinaten vorgenommen werden muß. Der Ripple wird nur im ersten Aufpunktebereich für $z = z_{\text{MIN}}$ berechnet. Eine zweite Option IPLOT $\neq 0$ bewirkt die graphische Darstellung des Ripples über dem Radius. Dazu müssen die gewünschten Bereichsgrenzen sowie der zu erwartende Maximalwert des Ripples in % angegeben werden. RMIN, RMAX und RIPMAX bestimmen einen $0,23 \text{ m} \cdot 0,15 \text{ m}$ großen Ausschnitt des Papierformats.

Zeile 1	Option
IRIP	
Zeile 2	Aufpunktebereich
RMIN, RMAX	
Zeile 3	Option
IPLOT	
Zeile 4	Ergänzung des Plotbereichs
RIPMAX	

Die Zeilen 2 bis 4 entfallen, wenn IRIP = 0. Karte 4 wird nur benötigt, wenn IPLOT $\neq 0$.

zu 6.) Daten für den Plot von Feldkomponenten als Funktion der Ortskoordinaten

Sowohl die darzustellende Feldkomponente als auch die Laufvariable sind über die Indizes IFELD und IACHSE frei wählbar. Dafür gilt folgende Regelung:

IFELD	= 1	dargestellt wird die Feldkomponente	B_X	bzw.	B_R
IFELD	= 2	" " " "	B_Y	bzw.	B_φ
IFELD	= 3	" " " "	B_Z		
IACHSE	= 1	über	x	bzw.	R
IACHSE	= 2	"	y	bzw.	φ
IACHSE	= 3	"	z		

Für IFELD < 1 oder IFELD > 3 sowie IACHSE < 1 oder IACHSE > 3 wird kein Plot angefertigt. Das gültige Koordinatensystem ist vom Koordinatensystem der Aufpunkte festgelegt. Die Variable IPL bestimmt die Anzahl der zu plottenden Kurven. UGR und OGR legen untere und obere Grenze der Laufvariablen, BMIN und BMAX untere und obere Grenze der Feldkomponente für einen 0,23 m · 0,15 m großen Ausschnitt des Papierformats fest. Der Startpunkt PAS und der Endpunkt PES grenzen den Aufpunktbereich ein. Start- und Endpunkt müssen nicht mit Achsenwerten des Aufpunktegitters zusammenfallen jedoch einen konkreten Laufbereich eingrenzen. Erstreckt sich der Laufbereich über mehrere Aufpunktebereiche, so muß eine gemeinsame Laufachse im gleichen Koordinatensystem vorliegen. Da der Graph für jeden Aufpunktebereich getrennt gezeichnet wird, sollten End- und Anfangspunkt zweier benachbarter Aufpunktebereiche zusammenfallen. Für eine beliebige Aufpunktefolge können keine Plots der Feldkomponenten als Funktion der Ortskoordinaten angefertigt werden.

Zeile 1	Indizes
IFELD, IACHSE	
Zeile 2	Plotbereich
UGR, OGR, BMIN, BMAX	
Zeile 3	Anzahl der zu plottenden Kurven
IPL	
Zeile K+3	Start- und Endpunkt der Kurve K, K=1(1)IPL
(PAS(J,K), J=1,3), (PES(J,K), J=1,3)	

Die Zeilen 2 bis IPL+3 sind nur notwendig, wenn $1 \leq \text{IFELD} \leq 3$ und $1 \leq \text{IACHSE} \leq 3$.

zu 7.) Daten zu Berechnung und Plot von Niveaulinien

Die Auswahl der Schnittebene E, in der Niveaulinien gezeichnet werden sollen, erfolgt über den Index IFALL.

Es gilt:

- IFALL = 1 x-y-bzw. R- φ -Ebene
- IFALL = 2 x-y-bzw. R-z-Ebene
- IFALL = 3 x-y-bzw. φ -z-Ebene.

Für IFALL < 1 oder IFALL > 3 werden keine Niveaulinien berechnet. NH gibt die Anzahl zu berechnender und zu plottender Niveaulinien mit den Niveauwerten des Vektors HOH an. Die Vektoren BTR und BTL grenzen den Aufpunktebereich ein. BTR bestimmt mit den Indizes 1,2,3 die x-, y-, z- bzw. R-, φ -, z-Koordinaten des Endpunktes. Ähnlich legt BTL den Startpunkt fest.

Die Variable IPKT gibt die Mindestanzahl der Punkte für Print und Plot einer Niveaulinie an. Damit lassen sich Linien unterdrücken, die aufgrund zu geringer Punktezahl keine genaue Wiedergabe erwarten lassen. Option ISPU \neq 0 bewirkt im Falle eines planaren Spulenverbands das Zeichnen der Spulenquerschnitte in der Ebene $z = 0$. Soll das Gitternetz gezeichnet werden, so ist IGIT ungleich Null zu setzen.

Die Vektoren TTAX und TTIN kennzeichnen das Papierformat, die Vektoren TAX und TIN den Plotbereich, wobei TTIN und TIN jeweils die Koordinaten der linken unteren und TTAX und TAX der rechten oberen Ecke angeben. Die Indizes 1 und 2 kennzeichnen dabei die Komponenten der gewählten Schnittebene. Erstreckt sich der Laufbereich über verschiedene Aufpunktebereiche, so muß eine gemeinsame Lafebene vorliegen.

- | | |
|------------------------------------|-------------------------------------|
| Zeile 1 | Index |
| IFALL | |
| Zeile 2 | Anzahl zu berechnender Niveaulinien |
| NH | |
| Zeile 3 | Niveauwerte |
| (HOH(I), I=1, NH) | |
| Zeile 4 | Aufpunktebereich |
| (BTR(I), I=1, 3), (BTL(I), I=1, 3) | |

Zeile 5 Optionen, Wert

ISPU, IGIT, IPKT

Zeile 6 Papierformat

(TTAX(I), I=1,2), (TTIN(I), I=1,2)

Zeile 7 Plotbereich

(TAX(I), I=1,2), (TIN(I), I=1,2)

Die Zeilen 2 bis 7 werden nur für $1 \leq \text{IFALL} \leq 3$ benötigt. Für $\text{NH} < 1$ entfallen die Zeilen 3 bis 7.

zu 8.) Daten für den Plot von Feldlinien

Feldlinien können nur für einen planaren Spulenverband in der Ebene $z=0$ gezeichnet werden. NPL gibt die Anzahl zu plottender Feldlinien an. Die x-, y-, z-Koordinaten der Startpunkte zu plottender Feldlinien sind in den Vektoren PLX, PLY und PLZ enthalten. Sie müssen mit den Koordinaten der Startpunkte vorher berechneter Feldlinien übereinstimmen.

Zeile 1 Anzahl zu plottender Feldlinien, Option

NPL, ISPU

Zeile K+1 Startpunkt der Feldlinie K, $K=1(1)\text{NPL}$

PSX(K), PSY(K), PSZ(K)

Zeile NPL+2 Aufpunktebereich

(BTR(I), I=1,3), (BTL(I), I=1,3)

Zeile NPL+3 Papierformat

(TTAX(I), I=1,2), (TTIN(I), I=1,2)

Zeile NPL+4 Plotbereich

(TAX(I), I=1,2), (TIN(I), I=1,2)

zu 9.) Daten für den Plot der Kräfteverteilung im Wicklungskörper

Das Programm zeichnet für jede radiale Leiterschleife der axialen Ebene IEB Spulenkantur und Leiterschleife in lokalen Koordinaten. In den Aufpunkten entlang des Linienleiters werden die dort angreifenden Kräfte nach Größe und Richtung durch Pfeile dargestellt. Die Nummerierung der axialen Ebenen beginnt mit der Ebene, die die kleinste y-Koordinate hat. Für $\text{IEB} < 1$ oder $\text{IEB} > \text{NY}$ erfolgt kein Plot.

Die Variablen UGR und OGR kennzeichnen Minimal- und Maximalwerte der Abszisse. Der Ordinatenbereich wird wegen maßstabsgetreuer

Wiedergabe auf $BR = (OGR - UGR) \cdot 2/3$ festgesetzt, wobei das Ordinatenmaximum $BR/2$ und das Minimum $-BR/2$ annimmt. Die Größe FGM steuert die Länge der Kraftpfeile. 1 cm Pfeillänge bedeutet FGM N/m. Das Papierformat muß so gewählt werden, daß nicht nur der Spulenquerschnitt vollständig dargestellt werden kann, sondern auch genügend Platz für die Kraftpfeile übrig bleibt.

Zeile 1	Nummer der axialen Ebene
IEB	
Zeile 2	Papierformat und Maßstabsgröße
UGR, OGR, FGM	

Zeile 2 entfällt für $IEB < 1$ oder $IEB > NY$.

Reihenfolge der anzugebenden Steuerungsdaten:

A) Feldberechnung:

- Daten für die Kontrollplots der geom. Mittelkurven
- Option zur Bandspeicherung
- Daten zu Rippleberechnung und Plot des Ripples
- Daten für den Plot von Feldkomponenten als Funktion der Ortskoordinaten

B) Kraftberechnung:

- Daten für die Kontrollplots der geom. Mittelkurven
- Option zur Bandspeicherung
- Nähere Angaben zur Kraftberechnung

C) Induktivitätsberechnung:

- Daten für die Kontrollplots der geom. Mittelkurven
- Nähere Angaben zur Induktivitätsberechnung

D) Feldlinienberechnung:

- Daten für die Kontrollplots der geom. Mittelkurven
- Option zur Bandspeicherung
- Daten für den Plot von Feldlinien

E) Weiterverarbeitung von Felddaten:

- Daten zu Rippleberechnung und Plot des Ripple
- Daten für den Plot von Feldkomponenten als Funktion der Ortskoordinaten
- Daten zu Berechnung und Plot von Niveaulinien

F) Weiterverarbeitung von Kräftedaten:

- Daten für den Plot der Kräfteverteilung im Wicklungskörper

G) Weiterverarbeitung von Feldliniendaten:

- Daten für den Plot von Feldlinien

4.2 Ausgabebeschreibung

Folgende Ausgaben sind möglich:

- a) Druckerausgabe
- b) Bandausgabe
- c) Plotausgabe

Die Standardausgabe erfolgt über den Drucker; Band- und Plotausgabe müssen durch Optionsangaben aktiviert werden. Die Plotausgabe wurde bereits mit der Eingabebeschreibung in 4.1 ausführlich beschrieben.

a) Druckerausgabe

Die Druckereinheit IWT ist im Data-Statement der einzelnen Hauptprogramme auf 6 gesetzt. Die verschiedenen Datensätze: Globale Daten, Daten zu Spulenlage und Spulengeometrie, Aufpunkte- und Steuerungsdaten sowie die berechneten Werte werden getrennt voneinander ausgedruckt. Zu den berechneten Werten gehören die Endpunkte der Sehnen auf den Mittelkurven mit ihren Normalenrichtungen.

Feldberechnung

Aufpunkte- und Flußdichtekomponenten werden bereichsweise als Tabelle im angegebenen Koordinatensystem ausgedruckt. Bei Niveaulinienberechnungen erfolgt zusätzlich eine bereichsweise Ausgabe des Flußdichtebetrages in Matrixform.

Kraftberechnung

Bei Kraftberechnungen werden die magn. Kräfte je Volumenelement $\Delta V = \Delta A \cdot \Delta S$ und die magn. Kräfte pro Längeneinheit ΔS jeweils im

Mittelpunkt aller Volumenelemente in lokalen Koordinaten tabellarisch ausgedruckt. Gleichfalls werden dort, gewissermaßen zur Kontrolle, die Flußdichtekomponenten angegeben und zwar ohne denjenigen Anteil, der durch das betreffende stromführende Element selbst hervorgerufen wird.

Sonderfall: Planarer Spulenverband

Flußdichte- und Kraftkomponenten werden nur in Aufpunkten mit lokaler Koordinate $z_q \geq 0$ berechnet und ausgedruckt. Liegt ein symmetrischer Torus als Sonderfall des planaren Spulenverbandes vor, so ist aus Symmetriegründen die Kraftberechnung nur in Aufpunkten auf Linienleiter mit lokalen Koordinaten $y_q \leq 0$ notwendig.

Feldlinienberechnung

Das Programm druckt je Feldlinie die berechneten Punktkoordinaten und die Flußdichtekomponenten als Tabelle aus.

Induktivitätsberechnung

Die berechneten Selbst- und Gegeninduktivitäten der Spulenordnung werden in Form einer Tabelle ausgedruckt.

b) Bandausgabe

Die Bändeinheit IBN ist im Data-Statement der einzelnen Hauptprogramme auf 9 gesetzt. Die Ausgabe erfolgt ähnlich der Druckerausgabe, d.h. alle eingegebenen und berechneten Werte werden formatfrei auf Band gespeichert. Für den Abruf der gespeicherten Daten stehen Einleseroutinen zur Verfügung, in denen die wichtigsten Variablen beschrieben sind (siehe Kapitel 3.1).

4.3 Beschränkungen

- a) Maximale Anzahl von Spulen sowie geom. Mittelkurven NMAX=200
- b) Maximale Anzahl aller Leiterschleifen einer Spule NRYMAX=200
- c) Maximale Anzahl von Kreisbögen für alle geom. Mittelkurven für $z_q \geq 0$ NAMAX=400
- d) Maximale Anzahl der Sehnen einschließlich programmintern eingefügter aller Mittelkurven für $z_q \geq 0$ LMAX=2999
- e) Maximale Anzahl der Sehnen einschließlich programmintern eingefügter für eine Mittelkurve für $z_q \geq 0$ LKMAX=99

- f) Maximale Aufpunkteanzahl für Feld- und Feldlinienberechnung
MAXYZ=2000
- g) Maximale Anzahl von Aufpunktebereichen IBRMAX=20
- h) Maximale Anzahl berechenbarer Feldlinien NLIMAX=100
- i) Maximale Anzahl berechenbarer Niveaulinien NHMAX=100
- j) Maximale Anzahl der Achsenwerte bei Rippleberechnung und
Plot von Feldkomponenten als Funktion der Ortskoordinaten
NPLOTR=200
- k) Maximale Anzahl der zu plottenden Feldkomponenten als
Funktion der Ortskoordinaten IPLMAX=10

4.4 Fehlerdiagnostik

a) Fehlermeldungen zu globalen Daten

- IER = 1 Spulenzahl $N < 1$ oder $N > NMAX$
- IER = 2 Spulenbreite B und/oder Spulendicke $D=0$
- IER = 3 Anzahl NR der radialen Leiterschleifen < 1
oder Anzahl NY der axialen Ebenen < 1
oder $NR \cdot NY > NRYMAX$

b) Fehlermeldungen zu Daten der Spulengeometrie

- IER = 11 Anzahl der Mittelkurven $IMIT < 1$, $IMIT > NMAX$
- IER = 12 Mehr als LKMAX Sehnen für die Beschreibung
einer Mittelkurve für $z_q \geq 0$ oder mehr als
LMAX Sehnen für die Beschreibung aller geom.
Mittelkurven für $z_q \geq 0$
- IER = 13 Mehr als NMAX Kreisbögen zur Beschreibung
aller Mittelkurven für $z_q \geq 0$
- IER = 14 Radius R eines Kreisbogens ist kleiner Null
- IER = 15 Winkel AMIN < 0 oder
Winkel AMAX < 0
- IER = 16 $AMAX(NK) < AMIN(NK)$
- IER = 17 $AMIN(NK) < AMAX(NK-1)$ oder
 $AMIN(NK) < AMAX(NK-2)$
- IER = 18 Mindestens einer Spule wurde keine Mittel-
kurve zugewiesen.
- IER = 19 z-Koordinate eines Anfangs- und/oder Endpunktes
der Sehnenstücke der geom. Mittelkurven ist
kleiner Null

- IER = 20 AMIN(1) \neq 0 und/oder AMAX(NA) \neq 180
IER = 21 (AMAX-AMIN) = 0 und NALF > 1
IER = 22 Anfangs- und Endpunkte der Sehnenstücke der
 geom. Mittelkurven fallen zusammen

c) Fehlermeldungen zu Aufpunktedaten:

- IER = 31 Anzahl der Aufpunkte (bei Feldlinienberechnung
 Anzahl der berechneten Punkte) > MAXYZ
IER = 32 Anzahl der Aufpunkte eines Bereichs < 1
IER = 33 mehr als IBRMAX Aufpunktebereiche

d) Fehlermeldungen zu Steuerungsdaten:

- IER = 41 Es soll die Kraft berechnet werden, die in
 einer nicht definierten Spule wirkt
IER = 42 Es sollen Selbst-Gegeninduktivitäten von nicht-
 definierten Spulen berechnet werden
IER = 43 Es ist keine Induktivitätsberechnung möglich,
 da Polnähe bei der Feldberechnung auftreten
 kann.
IER = 61 Rippleberechnung oder Höhenlinienberechnung
 oder Plot von Feldkomponenten nicht möglich,
 da beliebige Aufpunktefolge vorliegt
IER = 62 Mehr als NHMAX Niveauewerte
IER = 63 Mehr als NPLOTR Achsenwerte bei Rippleberech-
 nung oder Plot von Feldkomponenten
IER = 64 Anzahl zu plottender Feldkomponenten als
 Funktion der Ortskoordinaten > IPLMAX oder < 1
IER = 65 Rippleberechnung nicht möglich, da das Aufpunkte-
 gitter in kartesischen Koordinaten vorliegt,
 oder da die Anzahl der Achsenwerte für
 \mathcal{J} kleiner 2 ist
IER = 71 Mehr als NLIMAX Feldlinien
IER = 72 Es sollen Feldlinien geplottet werden, die nicht
 berechnet oder auf Band abgespeichert wurden
IER = 81 Plotbereich > Papierformat
IER = 82 Aufpunktebereich > Plotbereich
IER = 83 Aufpunktebereich ist leer.
IER = 84 $PXMAX \leq PXMIN$ oder $OGR \leq UGR$ oder
 $BMAX \leq BMIN$
IER = 85 die zu plottenden Feldlinien liegen nicht
 in der z = 0-Ebene.

5. Benutzerhinweise

Speicherbedarf

Bei Anwendung der in Abb. 12 dargestellten Overlaystruktur kann der Kernspeicherbedarf der einzelnen Rechenprogramme nachfolgender Tabelle entnommen werden:

Feldberechnung	:	183 K bytes
Feldlinienberechnung	:	199 K "
Kraftberechnung	:	156 K "
Induktivitätsberechnung	:	153 K
Weiterverarbeitung von		
Kräfte­daten	:	138 K bytes
Feld­daten	:	240 K "
Feld­linien­daten	:	191 K "

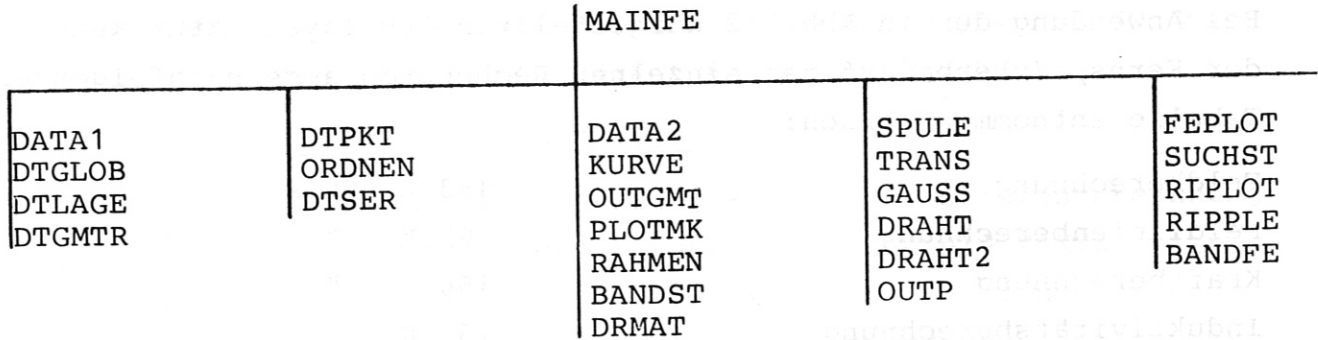
Der Benutzer muß zu diesen Werten noch die Puffer- und Blockungsgrößen der Systeminput-/Outputroutinen addieren. Zur Feld- und Induktivitätsberechnung sowie zur Weiterverarbeitung von Kräfte­daten werden externe Datenträger benötigt. Die Datasetreference­number ist im Data-Statement der entsprechenden Hauptprogramme auf 4 gesetzt. Im Einzelnen ist folgender Speicherbedarf anzugeben:

Feldberechnung	:	$8 \cdot NT_B$ bytes
Induktivitätsberechnung	:	$A \cdot 280 + (NR-1) \cdot 150$ bytes
Weiterverarbeitung von Kräfte­daten	:	$24 \cdot NA \cdot NR$ bytes

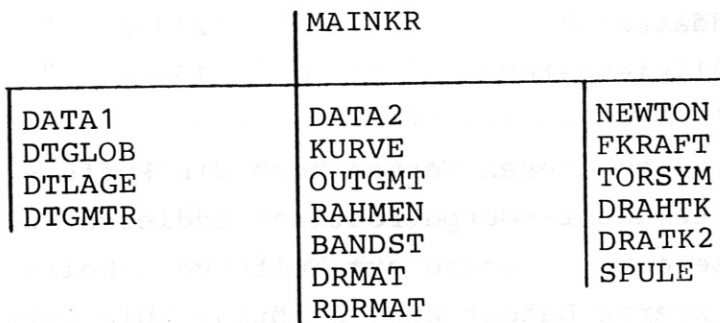
Es bedeuten:

- NT_B - die Anzahl der Aufpunkte in Zylinderkoordinaten des größten Aufpunktebereiches
- NR - die Anzahl der in einer axialen Ebene liegenden Leiterschleifen der betreffenden Spule
- NY - die Anzahl der axialen Ebenen mit jeweils NR Leiterschleifen
- A - die Öffnungsbreite der betreffenden Spule
- NA - die zur Kraftberechnung notwendige Anzahl von Aufpunkten auf einer Leiterschleife
- NA2 - die Anzahl der geraden Leiterstücke einer Leiterschleife einschließlich der programmintern eingefügten

Feldberechnung



Kraftberechnung



Induktivitätsberechnung

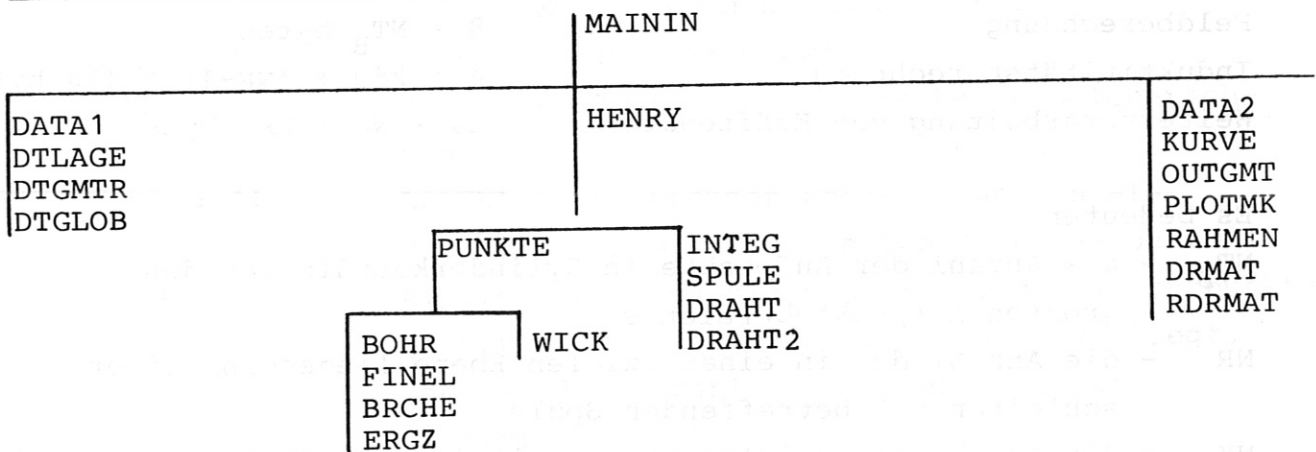


Abb. 12 OVERLAYSTRUKTUR (dazu gehört S.45)

Feldlinienberechnung

	MAINLI SPULE	
DATA1 DTGLOB DTLAGE DTGMTR DTPLOT DTPKTL	DATA2 KURVE OUTGMT PLOTMK RAHMEN BANDST SPUPLT	DRMAT ADAMS GAUSS DRAHT DRAHT2 LIPLLOT

Weiterverarbeitung von Felddaten

	FEDOK SUCHST		
INPST OUTHMT DTSER	FEPLLOT RIPPLE RIPLLOT RAHMEN SPUPLT SPULE	NIVBER NIVL CNTS	INPFE OUTP INPFDK

Weiterverarbeitung von Kräftedaten

	KRDOK	
INPST OUTGMT	INPKR	KRPLLOT

Weiterverarbeitung von Feldliniendaten

	LIDOK
INPST OUTGMT	DTPLOT SPUPLT SPULE RAHMEN LIPLLOT

Abb. 12 OVERLAYSTRUKTUR (dazu gehört S.44)

Rechenzeit

Zur Berechnung des Feldes eines geraden Linienleiters werden $1.1 \cdot 10^{-4}$ sec je Aufpunkt benötigt. Diese Zeitangabe gilt für einen rechenintensiven Job auf der IBM-360/91 Rechanlage.

Da die Berechnung der magn. Kräfte und der Selbst- und Gegeninduktivitäten auf die Berechnung des Feldes eines geraden Linienstroms zurückgeführt wird, kann obenstehende Angabe zur Abschätzung der Rechenzeit für alle Programme eingesetzt werden. Dabei sind die in 3.2 dargestellten Vereinfachungen für symmetrische Spulenanordnungen zu berücksichtigen.

Die Anzahl der zur Kraftberechnung eines beliebigen Spulenverbandes benötigten Aufpunkte beträgt $NR \cdot NY \cdot NA^2$. Die Anzahl der zur Induktivitätsberechnung benötigten Aufpunkte einer axialen Ebene beträgt $NA^2 \cdot NR + 45 \cdot A$ (siehe Symbolerklärung).

6. Anwendungsbeispiel

Die Arbeitsweise von HEDO 2 soll nun an der in Abb. 13 gegebenen willkürlich gewählten Spulenanordnung demonstriert werden. Aus Abb. 13 gehen alle zur numerischen Beschreibung des Spulenverbandes notwendigen Eingabedaten hervor. Zur Kontrolle werden die eingegebenen Daten maschinell ausgedruckt (s. Tab. 1). Bei der Dateneingabe ist anzustreben, daß die Wicklungskörper jeweils durch möglichst gleich lange, gerade Linienleiter approximiert werden (größte Rechengenauigkeit). Dies wird einmal über die Wahl der azimuthalen Teilungen je Bogenelement und zum anderen durch Einfügen von Zwischenpunkten (Kreise mit der Bogenlänge Null) auf den geraden Stücken der Wicklungskörper erreicht. Für diese, aus drei Spulen bestehende Anordnung werden folgende Berechnungen mit Hilfe des vorliegenden Computerprogramms durchgeführt:

1. Berechnung und graphische Darstellung der magn. Flußdichte in der Ebene $z = 0$ entlang der Geraden $\varphi = 12,5$ Grad und $\varphi = 25$ Grad (s. Abb. 14).
2. Berechnung und graphische Darstellung des Ripples als Funktion vom Radius (s. Abb. 15).
3. Berechnung und graphische Darstellung magnetischer Feldlinien in der Ebene $z = 0$ (s. Abb. 16).

4. Berechnung und graphische Darstellung von Niveaulinien
($|B| = \text{const}$ - Linien):

a) in der Ebene $z = 0$ im Bereich:

$$\left. \begin{array}{l} 1,4 \text{ m} \leq R \leq 3,6 \text{ m} \\ 0 \leq \varphi \leq 25 \text{ Grad} \end{array} \right\} \text{ (s. Abb. 17).}$$

b) in der Ebene $\varphi = 12,5$ Grad im Bereich:

$$\left. \begin{array}{l} 0 \leq R \leq 4 \text{ m} \\ 0 \leq z \leq 2 \text{ m} \end{array} \right\} \text{ (s. Abb. 18).}$$

5. Berechnung der magn. Kräfte in den Wicklungskörpern der
Spulen 1 und 2:

a) Resultierende Kräfte (eingetragen in Abb. 13):

$$\begin{array}{l} \text{Spule 1 und 3: } |F_{x1}| = |F_{x3}| = 0,631 \cdot 10^6 \text{ N} \\ |F_{y1}| = |F_{y3}| = 8,41 \cdot 10^6 \text{ N} \\ |F_{z1}| = 0 \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \text{Spule 2: } |F_{x2}| = 5,96 \cdot 10^6 \text{ N} \\ |F_{y2}| = 0 \\ |F_{z2}| = 0 \end{array}$$

b) Graphische Darstellung der radialen Kräfte pro Längeneinheit auf das Leiterelement S_{qmi} für:

$i=1, m=1$ der Spule $q=1$ (s. Abb. 19),

$i=1, m=1$ der Spule $q=2$ (s. Abb. 20).

6. Berechnung der Induktivitätskoeffizienten:

a) Selbstinduktivitäten

$$L_{11} = L_{33} = 4.954 \text{ mH} , L_{22} = 3.792 \text{ mH}$$

b) Gegeninduktivitäten

$$L_{12} = L_{32} = 1.625 \text{ mH} , L_{13} = L_{31} = 1.052 \text{ mH}$$

$$L_{21} = L_{23} = 1.624 \text{ mH}$$

Tab.1.
Computerausdruck
der Eingabedaten

SPULE	RAD.-BREITE		AX.-DICKE		UNTERTEILUNGEN		WINDUNGSZAHL		STROM	
	B (M)	D (M)	D (M)	D (M)	RADIAL NR	AXIAL NY	W	G (A)	W	G (A)
1	3.80000E-01	1.60000E-01	1.60000E-01	1.60000E-01	7	3	3.20000E+01	4.50000E+04	3.20000E+01	4.50000E+04
2	4.00000E-01	2.00000E-01	2.00000E-01	2.00000E-01	8	4	3.00000E+01	6.00000E+04	3.00000E+01	6.00000E+04
3	3.80000E-01	1.60000E-01	1.60000E-01	1.60000E-01	7	3	3.20000E+01	4.50000E+04	3.20000E+01	4.50000E+04

DATEN ZUR SPULengeOMETRIE:

AUFTEILUNG DER 1-TEN GEOMETRISCHEN MITTELKURVE IN KREISBOGEN FUER DIE FOLGENDEN SPULEN:

1	3	MITTELPUNKTSKOORDINATEN		RADIUS R (M)	WINKELBEREICH		AZ. UNTERTEILUNG NALF
		X (M)	Y (M)		A MIN (GRAD)	A MAX (GRAD)	
1	8.05600E-01	0.	0.0	2.03080E+00	0.0	3.00000E+01	10
2	1.10950E+00	0.	1.75400E-01	1.68000E+00	3.00000E+01	5.20000E+01	6
3	1.30030E+00	0.	4.19700E-01	1.37000E+00	5.20000E+01	7.40000E+01	5
4	1.39350E+00	0.	7.44600E-01	1.03200E+00	7.40000E+01	1.07000E+02	6
5	1.30460E+00	0.	1.03530E+00	7.28000E-01	1.07000E+02	1.35000E+02	3
6	1.20000E+00	0.	1.14000E+00	5.80000E-01	1.35000E+02	1.80000E+02	4
7	1.20000E+00	0.	1.03600E+00	5.80000E-01	1.80000E+02	1.80000E+02	1
8	1.20000E+00	0.	9.32000E-01	5.80000E-01	1.80000E+02	1.80000E+02	1
9	1.20000E+00	0.	8.29000E-01	5.80000E-01	1.80000E+02	1.80000E+02	1
10	1.20000E+00	0.	7.25000E-01	5.80000E-01	1.80000E+02	1.80000E+02	1
11	1.20000E+00	0.	6.22000E-01	5.80000E-01	1.80000E+02	1.80000E+02	1
12	1.20000E+00	0.	5.18000E-01	5.80000E-01	1.80000E+02	1.80000E+02	1
13	1.20000E+00	0.	4.15000E-01	5.80000E-01	1.80000E+02	1.80000E+02	1
14	1.20000E+00	0.	3.11000E-01	5.80000E-01	1.80000E+02	1.80000E+02	1
15	1.20000E+00	0.	2.07000E-01	5.80000E-01	1.80000E+02	1.80000E+02	1
16	1.20000E+00	0.	1.04000E-01	5.80000E-01	1.80000E+02	1.80000E+02	1

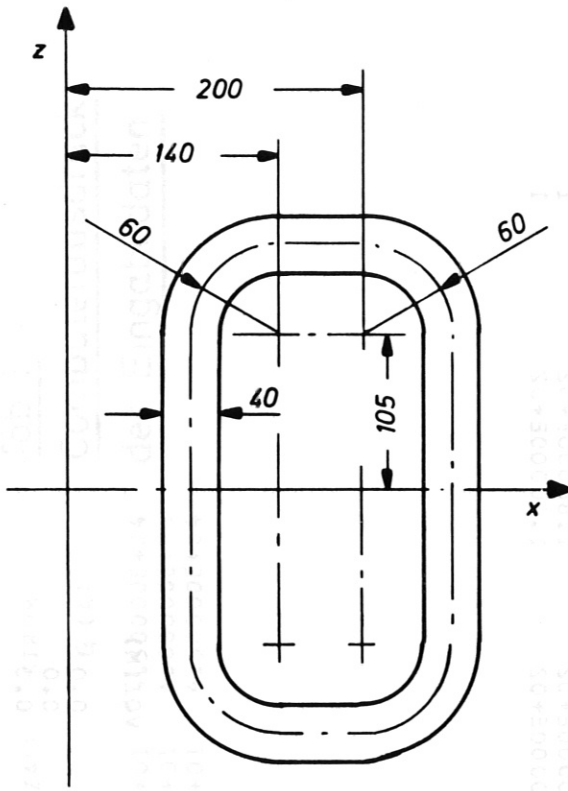
AUFTEILUNG DER 2-TEN GEOMETRISCHEN MITTELKURVE IN KREISBOGEN FUER DIE FOLGENDEN SPULEN:

2	MITTELPUNKTSKOORDINATEN			RADIUS R (M)	WINKELBEREICH		AZ. UNTERTEILUNG NA
	MX (M)	MY (M)	MZ (M)		α MIN (GRAD)	α MAX (GRAD)	
1	2.00000E+00	0.0	1.05000E-01	6.00000E-01	0.0	0.0	1
2	2.00000E+00	0.0	2.10000E-01	6.00000E-01	0.0	0.0	1
3	2.00000E+00	0.0	3.15000E-01	6.00000E-01	0.0	0.0	1
4	2.00000E+00	0.0	4.20000E-01	6.00000E-01	0.0	0.0	1
5	2.00000E+00	0.0	5.25000E-01	6.00000E-01	0.0	0.0	1
6	2.00000E+00	0.0	6.30000E-01	6.00000E-01	0.0	0.0	1
7	2.00000E+00	0.0	7.35000E-01	6.00000E-01	0.0	0.0	1
8	2.00000E+00	0.0	8.40000E-01	6.00000E-01	0.0	0.0	1
9	2.00000E+00	0.0	9.45000E-01	6.00000E-01	0.0	0.0	1
10	2.00000E+00	0.0	1.05000E+00	6.00000E-01	0.0	9.00000E+01	9
11	1.90000E+00	0.0	1.05000E+00	6.00000E-01	9.00000E+01	9.00000E+01	1
12	1.80000E+00	0.0	1.05000E+00	6.00000E-01	9.00000E+01	9.00000E+01	1
13	1.70000E+00	0.0	1.05000E+00	6.00000E-01	9.00000E+01	9.00000E+01	1
14	1.60000E+00	0.0	1.05000E+00	6.00000E-01	9.00000E+01	9.00000E+01	1
15	1.50000E+00	0.0	1.05000E+00	6.00000E-01	9.00000E+01	9.00000E+01	1
16	1.40000E+00	0.0	1.05000E+00	6.00000E-01	9.00000E+01	1.80000E+02	9
17	1.40000E+00	0.0	9.45000E-01	6.00000E-01	1.80000E+02	1.80000E+02	1
18	1.40000E+00	0.0	8.40000E-01	6.00000E-01	1.80000E+02	1.80000E+02	1
19	1.40000E+00	0.0	7.35000E-01	6.00000E-01	1.80000E+02	1.80000E+02	1
20	1.40000E+00	0.0	6.30000E-01	6.00000E-01	1.80000E+02	1.80000E+02	1
21	1.40000E+00	0.0	5.25000E-01	6.00000E-01	1.80000E+02	1.80000E+02	1
22	1.40000E+00	0.0	4.20000E-01	6.00000E-01	1.80000E+02	1.80000E+02	1
23	1.40000E+00	0.0	3.15000E-01	6.00000E-01	1.80000E+02	1.80000E+02	1
24	1.40000E+00	0.0	2.10000E-01	6.00000E-01	1.80000E+02	1.80000E+02	1
25	1.40000E+00	0.0	1.05000E-01	6.00000E-01	1.80000E+02	1.80000E+02	1

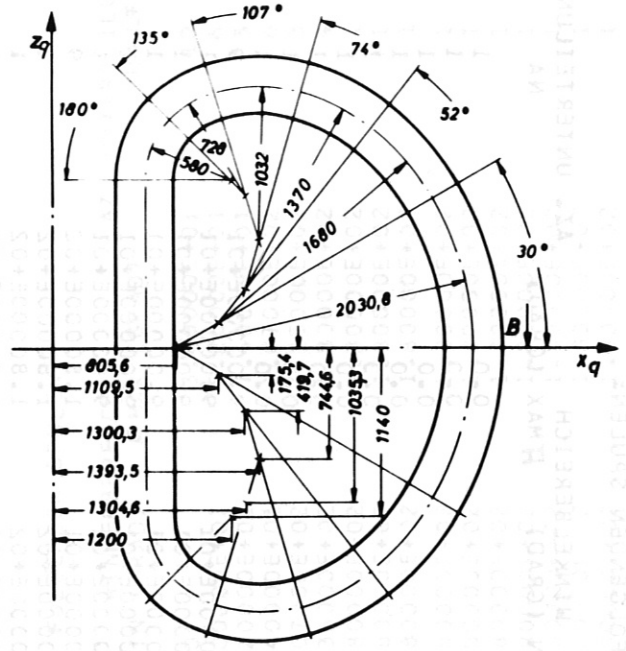
SPULENLAGE:

SPULE	FIX(GRAD)	FIY(GRAD)	FIZ(GRAD)	VQX(M)	VQY(M)	VQZ(M)
1	0.0	0.0	-2.50000E+01	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	2.50000E+01	0.0	0.0	0.0

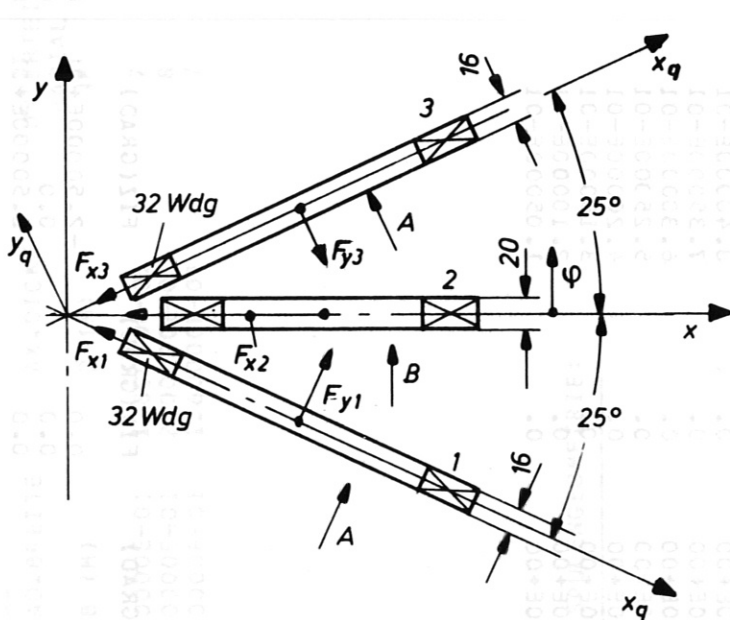
Fortsetzung Tab. 1.



Ansicht B



Ansicht A



Spule 1+3: $J = 40 \text{ KA}$
 Spule 2: $J = 60 \text{ KA}$

Abb. 13. Testbeispiel

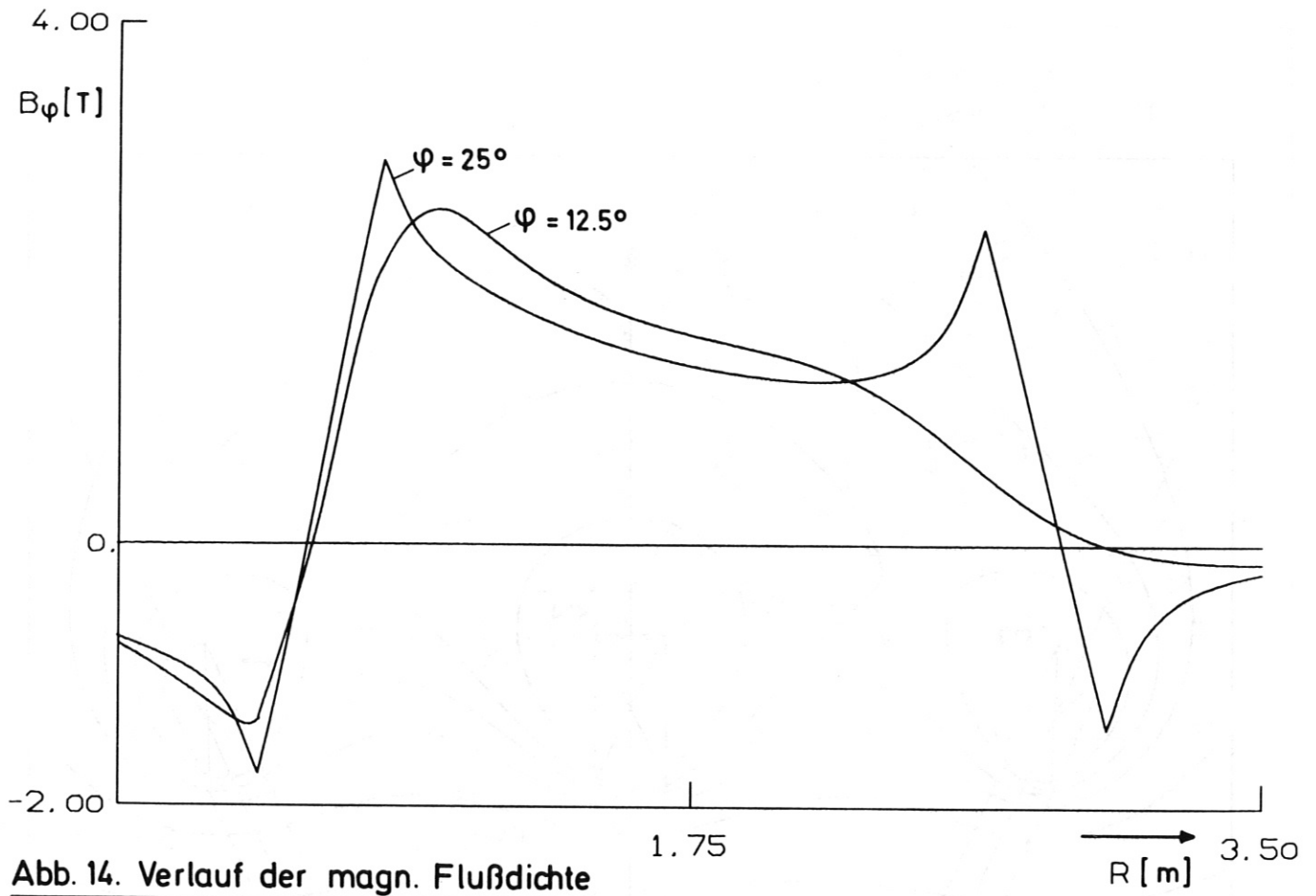


Abb. 14. Verlauf der magn. Flußdichte

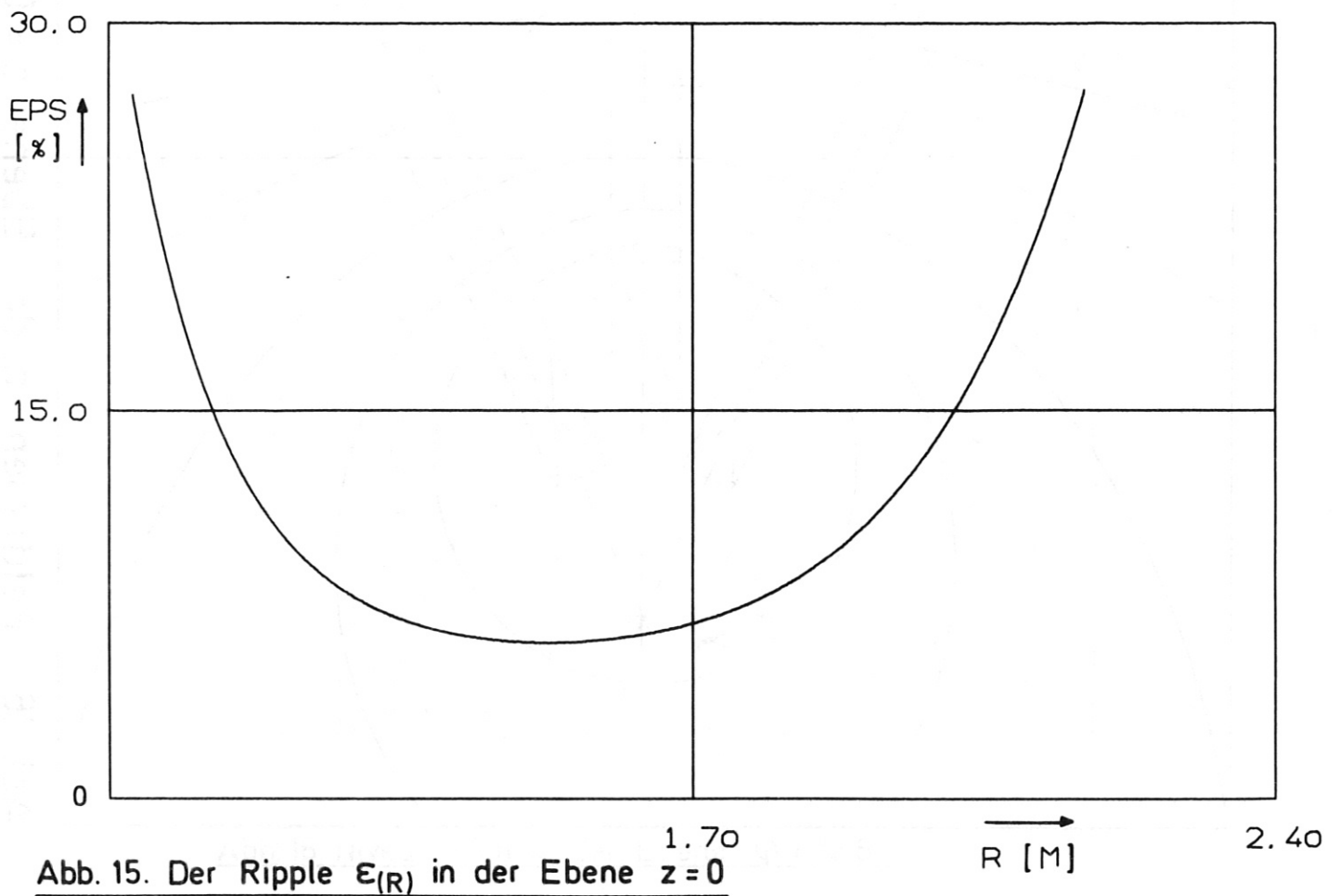


Abb. 15. Der Ripple $\epsilon_{(R)}$ in der Ebene $z = 0$

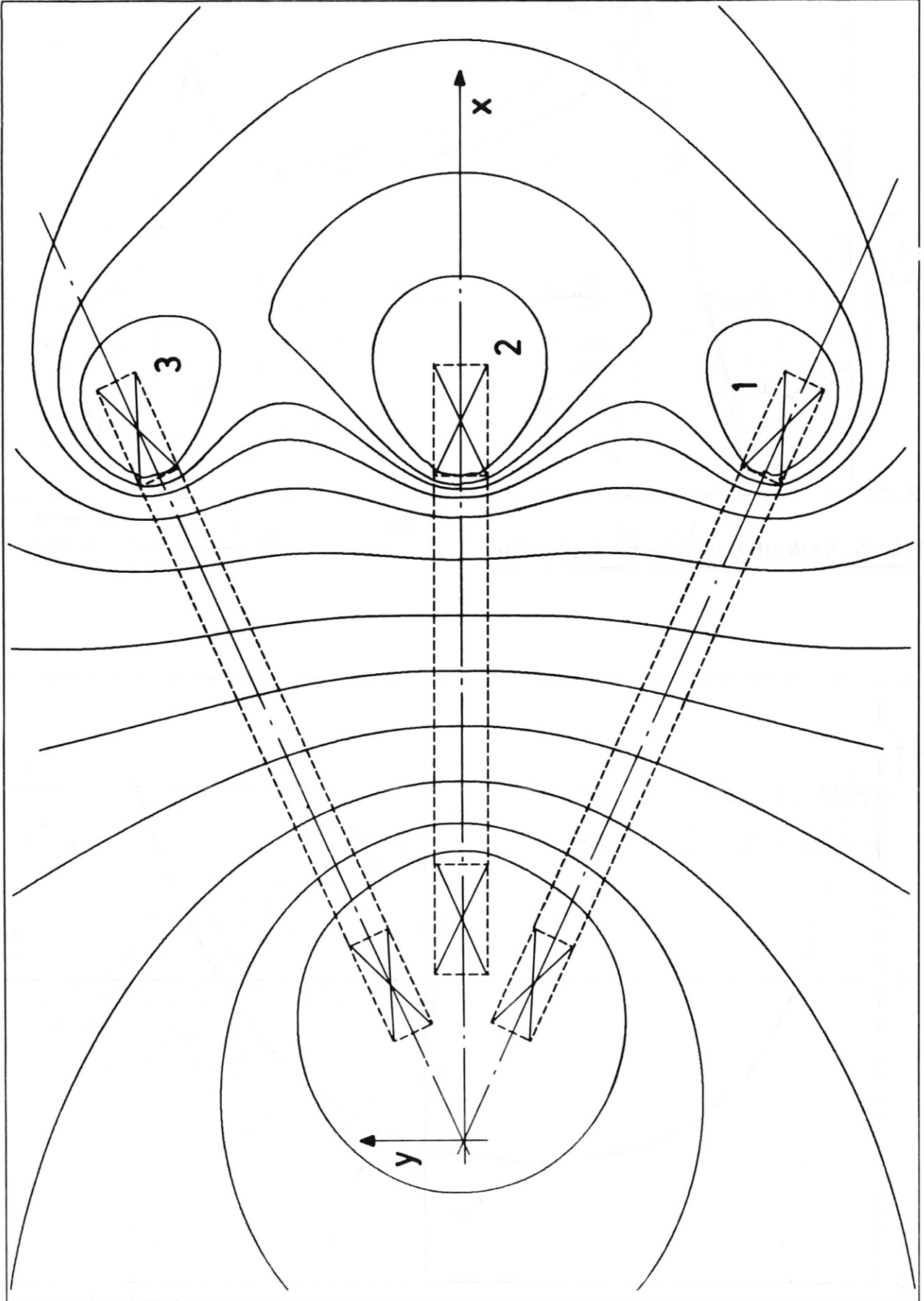


Abb. 16. Feldlinien in der Ebene $z = 0$

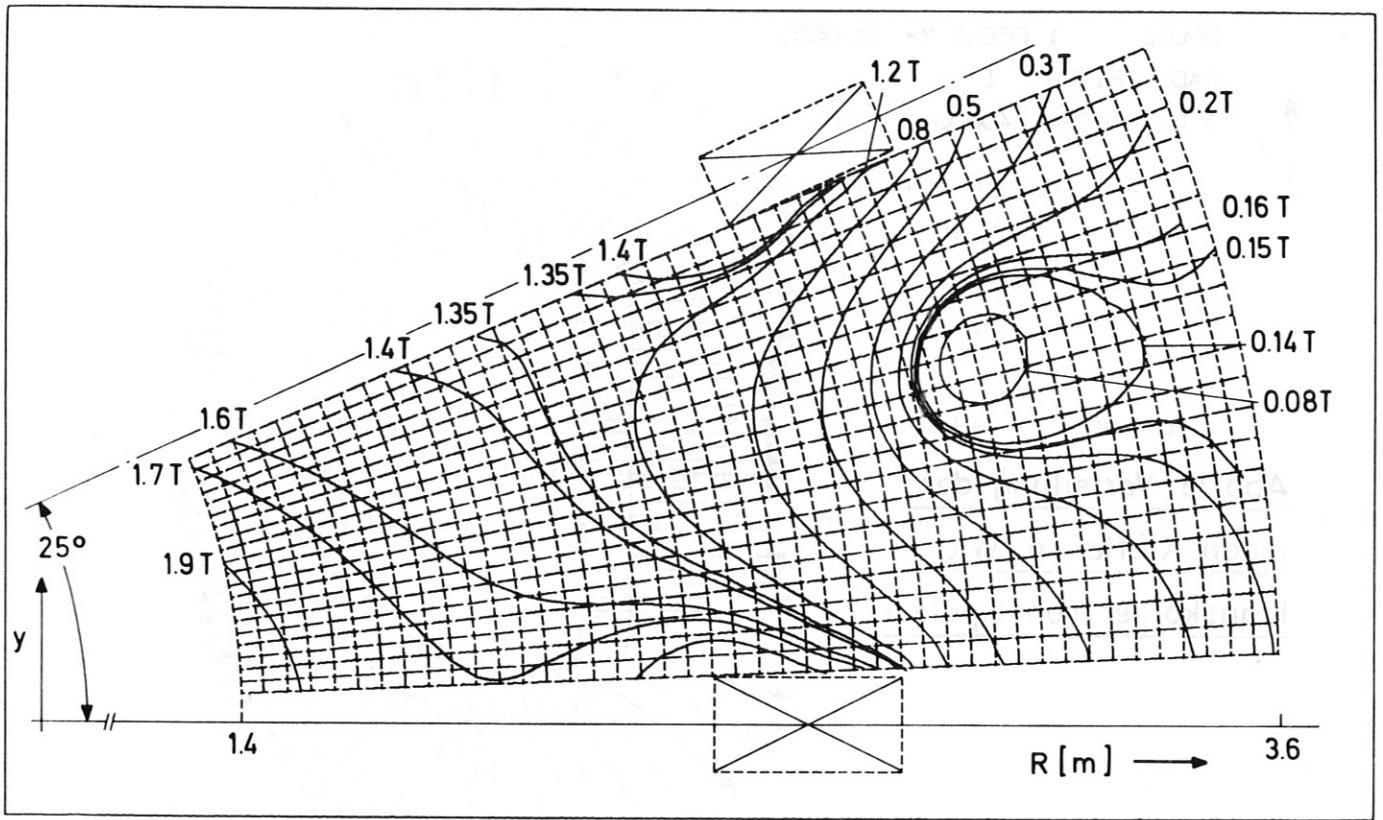


Abb. 17. Niveaulinien in der Ebene $z=0$

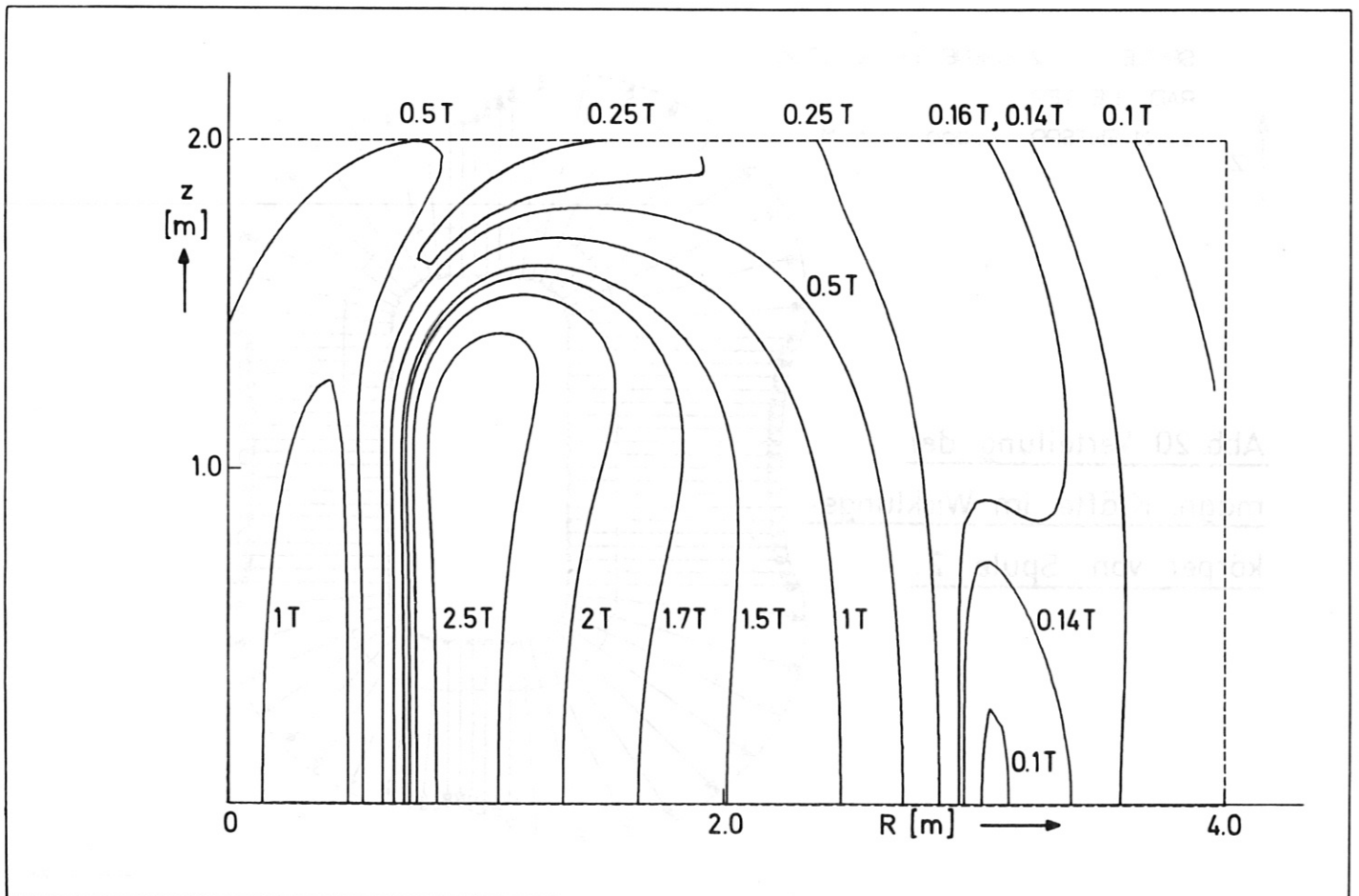


Abb. 18. Niveaulinien in der Ebene $\varphi = 12.5^\circ$

SPULE 1 EBENE Y= -0.0533

RAD. LEITER 1

1 CM ENTSPR 40000.0 N/M

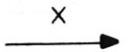
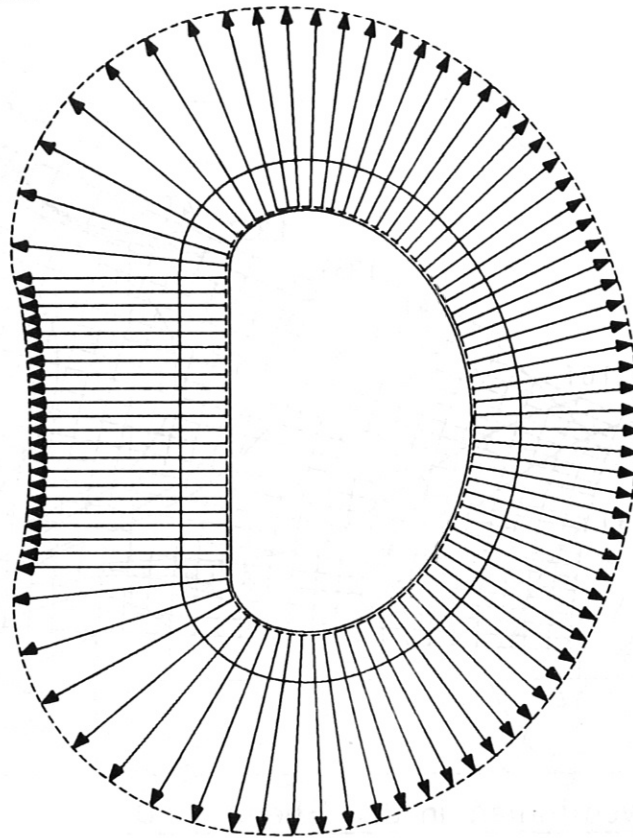
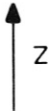


Abb. 19. Verteilung der magn. Kräfte im Wicklungskörper von Spule 1.

SPULE 2 EBENE Y= -0.0750

RAD. LEITER 1

1 CM ENTSPR 40000.0 N/M

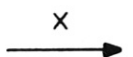
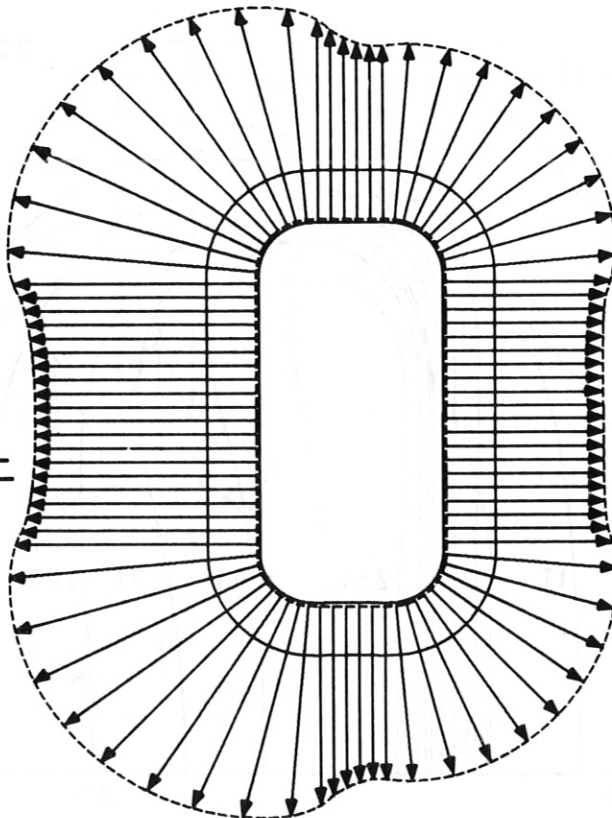
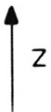


Abb. 20. Verteilung der magn. Kräfte im Wicklungskörper von Spule 2.

7. Literaturverzeichnis

- [1] Preis, H.: Berechnung des magnetischen Feldes, der magnetischen Kräfte und des Betriebsverhaltens großer Spulensysteme für Fusionsexperimente. Dissertation TU München 1976 und IPP-Report III/24, April 1976.
- [2] Jordan-Engeln, G.; Reutter, F.: Numerische Mathematik für Ingenieure. Hochschultaschenbuch Bd. 104. Bibliographisches Institut AG, Mannheim.