

**Die Supraleiter-Testspule für W7-X
in der Anordnung STAR von KfK**

Ewald Harmeyer, Ingo Schoenewolf
W7-X-Team, KfK-Team

IPP 2/315

Januar 1992



MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK

8046 GARCHING BEI MÜNCHEN

MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK
Garching bei München

**Die Supraleiter-Testspule für W7-X
in der Anordnung STAR von KfK**

Ewald Harmeyer, Ingo Schoenewolf
W7-X-Team, KfK-Team

IPP 2/315

Januar 1992

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

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung - Abstract	1
1. Einleitung	2
2. Die STAR Testanordnung	3
3. Die Berechnung von magnetischen Feldern und Kräften	4
4. Die mechanische Spannungsanalyse	5
5. Schlußfolgerungen	9

Zusammenfassung

Die supraleitende Testanordnung STAR von KfK wird dafür eingesetzt, eine zu einer kreisrunden Testspule aufgewickelte Leiterlänge von 200 m für das W7-X-Spulensystem elektrisch und hydraulisch zu testen. Bei diesen Untersuchungen soll die Testspule mechanisch nicht gefährdet werden. Aus diesem Grunde ist sie mit Strukturmaterial umgeben, das im wesentlichen aus stählernen Seitenplatten und Distanzbolzen besteht. Unter diesen Randbedingungen werden die magnetischen Felder und Kräfte, sowie die mechanischen Spannungen für 3 Belastungsfälle berechnet.

Abstract

The superconducting test arrangement STAR at KfK is employed for electrical and hydraulic testing of a superconductor length of about 200 m. This conductor, as provided for the W 7-X coil system, is wound to a circular test coil. During the conductor tests the coil system must not be subjected to a dangerous mechanical load. For this reason the test coil is reinforced by structure material which is composed mainly of steel side plates and distance bolts. Under these boundary conditions the magnetic fields and forces as well as the mechanical stresses are calculated for three different load cases.

1. Einleitung

In der Testanordnung STAR (Superconducting Test Arrangement) von KfK soll der zu einer kreisrunden Testspule aufgewickelte Leiter, wie er für das Spulensystem des W7-X-Experiments ¹⁾ vorgesehen ist, elektrisch und hydraulisch getestet werden, ohne ihn dabei mechanisch zu gefährden. Dieser Leiter hat die Außenabmessungen von etwa $16 \times 16 \text{ mm}^2$ und einen Nennstrom von 16 kA. Er ist als "cable-in-conduit"-Leiter mit einem Mantel aus einer extrudierten Aluminiumlegierung ausgebildet; das Kabel besteht aus verseilten, kupferstabilisierten NbTi-Strands. Die Kühlung geschieht im Druckumlauf mit überkritischem Helium bei etwa 4 K (forced-flow-cooling). Die geometrischen und elektrischen Daten des supraleitenden Kabels und des Leiters können den Tabellen II im Teil 4, Abschnitt 3. des Proposals für W7-X ²⁾ entnommen werden.

Der Leiter soll mit einem Strom bis zu 30 kA getestet werden können (Garantiestrom für eine Kurzprobe $\approx 29 \text{ kA}$). Für diesen Strom sind die Stromversorgung im KfK und die Stromdurchführungen ausgelegt. In der Testanordnung STAR ³⁾ wird das Hintergrundfeld von 4 supraleitenden Spulen – im folgenden STAR-Spulen genannt – geliefert.

Bei der Abwicklung des Prüfprogramms unterliegt die Testspule in STAR mechanischen Beanspruchungen. Um diese beurteilen zu können, werden 3 Belastungsfälle definiert:

- (A) Testspule im Eigenfeld mit maximalem Strom von 30 kA,
- (B) Testspule mit Nennstrom von 16 kA, mit dem vollen STAR-Feld, d.h. einem Nennstrom von 7 kA in den 4 STAR-Spulen,
- (C) Testspule mit Nennstrom von 16 kA und einem asymmetrischen STAR-Feld, d.h. einem Strom von 5.88 kA in den beiden STAR-Spulen auf einer Seite der Testspule, während die anderen beiden keinen Strom führen (Störfallauslegung).

In diesen Belastungsfällen (und allen übrigen, die während der Testphase auftreten werden), soll die Testspule mechanisch sicher betrieben werden können. Aus diesem Grunde wird es notwendig sein, die Testspule mit einem Gehäuse auszustatten und sie in der Anordnung fest zu verankern. Die von den 4 STAR-Spulen hervorgerufenen Seitenkräfte (bis zu 5 MN) müssen ebenfalls mechanisch sicher über die Stützstruktur am Wickelpaket der Testspule vorbeigeleitet werden.

Die Belastungsfälle (A) und (B) gehen von Strömen jenseits der zulässigen Supraleiterdaten aus. Der Belastungsfall (C) ist wegen der Serienschaltung der 4 STAR-Spulen äußerst

1) Beidler, C., et al., Physics and Engineering Design for WENDELSTEIN VII-X, Fusion Technology, Vol.17, No.1, (1990), 148ff.

2) WENDELSTEIN VII-X, Application for Preferential Support, WENDELSTEIN Project Group, August 1990 (unpublished).

3) Heller R., et.al., Primärbericht KfK 03.01.02P38A, December 1990.

unwahrscheinlich. Aus diesen Gründen stellen die 3 definierten Belastungsfälle extreme Forderungen an die Testspule dar. Wenn die Testanordnung in ihrer Auslegung diesen Anforderungen genügt, so kann man sicher sein, daß alle im Betrieb auftretenden Belastungsfälle sicher beherrscht und in der Testanordnung überprüft werden können.

2. Die STAR Testanordnung

Die STAR Testanordnung besteht aus der Supraleiter-Testspule und 4 STAR-Spulen, die das Hintergrundfeld liefern. Die Testspule ist kreisförmig und hat einen mittleren Radius von 0.29 m. Sie ist mit einem Gehäuse versehen, das aus Seitenplatten und Distanzbolzen besteht. Zur mechanischen Versteifung ist sie radial außen mit einer GFK-Bandage umwickelt, siehe Abb. 1. Die STAR-Spulen haben eine aufrechtstehende D-Form und ihr mittlerer Radius ist etwas größer als der der Testspule. Die Abb. 2 zeigt einen Schnitt der gesamten Anordnung in der Ebene $z = 0$. Die Testspule ist in dieser linearen Anordnung in der Mitte zwischen jeweils 2 STAR-Spulen plaziert. Dabei ist die Testspule so positioniert, daß die magnetischen Kräfte in x -Richtung minimiert werden. Der Spulenmitten-Abstand zwischen 2 äußeren STAR-Spulen beträgt bei den Berechnungen $a_1 = 0.25$ m, zwischen der Testspule und der benachbarten STAR-Spule $a_2 = 0.268$ m.

Die Daten der Testspule sind in der folgenden Tabelle I aufgelistet.

Tabelle I: Daten der Testspule

Mittlerer Spulenradius	r	m	0.285
Radiale Spulenhöhe	h	m	0.167
Axiale Spulenbreite	d	m	0.160
Windungszahl	w		100
Leiter-Nennstrom	i_{TL}	kA	16.
Mittlere Stromdichte	j_T	MA/m ²	59.88
Spulenmittelpunkt	(x_o, y_o, z_o)	m	0.596, 0., 0.

Der Nennstrom der STAR-Spulen beträgt $i_{SL} = 7$ kA bei einer mittleren Stromdichte von $j_S = 74.3$ MA/m². Das Designfeld dieser Spulen ist maximal 7 T; dieses wird bei den Tests voraussichtlich nicht wesentlich überschritten. Für diese Spulen ist ein badgekühlter NbTi-Supraleiter verwendet worden.

Für den Testbetrieb in STAR ist eine gleichsinnige Stromrichtung in allen Spulen vorgesehen, da die Anordnung mechanisch nur für sich gegenseitig anziehende magnetische Kräfte ausgelegt ist. Diese seitlichen Druckkräfte werden durch die Spulengehäuse aufgefangen.

In der Testanordnung STAR werden der Kryostat, die Heliumversorgung und die Meßwert- und Datenerfassung einer früheren Torusanordnung benutzt.

3. Die Berechnung von magnetischen Feldern und Kräften

Für die Bestimmung der magnetischen Felder und Kräfte, sowie der Induktivitäten, wird das EFFI-Programmsystem ⁴⁾ verwendet.

In der Anordnung STAR ist die Testspule unterschiedlichen magnetischen Feldstärken im Spulenbereich ausgesetzt. Im ersten Belastungsfall (A) mit 30 kA Leiterstrom und abgeschalteten STAR-Spulen beträgt das Maximalfeld 10.1 T. Vor Erreichen dieser Feldstärke wird die Spule quenchen, wie aus der Belastungskennlinie für den Supraleiter zu entnehmen ist, siehe Abb. 3. Der Belastungsfall (B) mit Nennstrom in der Testspule und in den STAR-Spulen würde zu einem Maximalfeld von 9 T an der Testspule und zu etwa 7.5 T an den beiden inneren STAR-Spulen führen; jedoch ist gemäß Abb. 3 auch hier vorher ein Quench zu erwarten. Der Belastungsfall (C) mit Nennstrom in der Testspule und einer asymmetrischen Belastung durch 2 STAR-Spulen ergibt 7 T an der Testspule; die STAR-Spulen sehen ein geringeres Maximalfeld.

Die Abb. 4 bis Abb. 6 zeigen die magnetische Feldverteilung in der Ebene $z = 0$ für die Testanordnung. In den beiden letzteren Abbildungen ist deutlich die Verschiebung der Testspule von etwa 13 mm in negative x -Richtung zu erkennen, um Rückstellkräfte zu verhindern. Das maximale magnetische Feld der Testspule ergibt sich in allen 3 Belastungsfällen an der Spulennenseite. Bei eingeschaltetem Hintergrundfeld der STAR-Spulen variiert es ein wenig entlang des Spulenumfangs. In Abb. 7 ist dieser Sachverhalt für den Belastungsfall (C) in Abhängigkeit von der Längskoordinate (GCE-Nummer) der Testspule dargestellt.

Die Berechnung der Induktivitäten des Spulensystems erfolgt mit Hilfe von EFFI unter Benutzung des Vektorpotentials. Die Induktivitätsmatrix lautet,

$$L_{ij} = \begin{pmatrix} 0.53 & 0.07 & 0.19 & 0.19 & 0.07 \\ 0.07 & 0.78 & 0.29 & 0.04 & 0.02 \\ 0.19 & 0.29 & 0.78 & 0.09 & 0.04 \\ 0.19 & 0.04 & 0.09 & 0.78 & 0.29 \\ 0.07 & 0.02 & 0.04 & 0.29 & 0.78 \end{pmatrix} \mu\text{H},$$

wobei L_{11} der Selbstinduktionskoeffizient der Testspule ist und L_{22} bis L_{55} der der STAR-Spulen 2 bis 5, gemäß Abb. 2. Diese Werte beziehen sich auf einwindige Spulen.

Die gespeicherte magnetische Energie beträgt im Belastungsfall (B), d.h. bei Nennstrom in allen Spulen

$$E_{mag} = 8.6 \text{ MJ.}$$

In den anderen Belastungsfällen ist die gespeicherte magnetische Energie im Spulensystem geringer.

⁴⁾ Sackett S.J., Report UCRL-52402, March 1978.

Für die Berechnung der magnetischen Kräfte wird die Testspule in $3 \times 3 \times 40 = 360$ Elemente eingeteilt. Je nach Belastungsfall ergibt sich eine unterschiedliche Kraftdichteverteilung in der Testspule. Im Belastungsfall (A) ist diese konstant über dem Spulenumfang, wegen der Kreisform der Spule und des fehlenden Hintergrundfeldes der STAR-Spulen. Im Belastungsfall (B) sind die STAR-Spulen eingeschaltet; deshalb erhält man wegen deren D-Förmigkeit längs des Spulenumfanges der Testspule eine Variation der magnetischen Kraftdichteverteilung. Das gleiche ergibt sich im Belastungsfall (C). Zusätzlich wirkt im letzteren Fall wegen der asymmetrischen Belastung auf die Testspule eine Seitenkraft von etwa 2.7 MN. Die Berechnung der magnetischen Kraftdichteverteilung erfolgt in einem natürlichen Koordinatensystem mit den Komponenten R, S, T, wobei diese die radiale, die laterale und die tangentielle Richtung bezeichnen. Aus diesem Grunde erhält man für die Kraftdichte nur die radiale Komponente R und die laterale Komponente S, da der Strom in T-Richtung fließt.

Die Abb. 8 bis Abb. 10 zeigen die magnetische Kraftdichteverteilung in Abhängigkeit von der Längskoordinate (GCE-Nummer) der Testspule für die 3 Belastungsfälle. Die 9 Kurven gelten jeweils für die 9 Elemente, in die der Querschnitt der Spule unterteilt ist.

4. Die mechanische Spannungsanalyse

Die mechanische Spannungsanalyse wird mit dem SAPV(2)-Code durchgeführt. Dieses Programmsystem berechnet mit Hilfe der Methode der finiten Elemente unter Zugrundelegung linear elastischer Materialdaten den Verschiebungsvektor der Knoten der Elemente und den mechanischen Spannungstensor für die Elemente. Die Berechnung ist linear, d.h. alle finiten Elemente der Anordnung sind zusammenhängend. Eine Klaffung oder eine Lückenbildung in dem Modell ist nicht möglich. Für die Berechnung dient als Eingangsgröße die zuvor ermittelte magnetische Kraftdichteverteilung, die mit Hilfe der "shape functions" ⁵⁾ in die Knotenkräfte der finiten Elemente transformiert wird.

Für die Berechnungen werden die orthotropen, elastischen Materialdaten ⁶⁾ des ABB-Leiters benutzt. Diese wurden aus den isotropen Materialdaten unter Zugrundelegung der Materialanteile berechnet. Da der W7-X-Leiter mit dem seinerzeit vorgeschlagenen ABB-Leiter relativ gut übereinstimmt, wie die folgende Tabelle II zeigt, scheint es gerechtfertigt, diese Werte zu verwenden.

⁵⁾ Gorenflo H., Jandl, O., Report IPP 4/167, March 1978.

⁶⁾ Maix, R.K., et al., Machbarkeitsstudie über einen Supraleiter für W VII-X, Sept.1989, S.5-9.

Tabelle II: Materialanteile bei den Supraleitern

	ABB-Leiter	W7-X-Leiter
Epoxy	19.5 %	13.8 %
Aluminiumleg.	45.0 %	50.7 %
Kabelquerschnitt	35.5 %	35.5 %

In der Tabelle III sind die elastischen Daten des Supraleiters der ABB-Studie aufgelistet.

Tabelle III: Elastische Daten des ABB-Leiters

Elastizitätsmodul	$E_R = E_S = 21.3 \text{ GPa}, E_T = 37.0 \text{ GPa}$
Schubmodul	$G_{RS} = 2.0 \text{ GPa}, G_{ST} = G_{RT} = 8.6 \text{ GPa}$
Querdehnungszahl	$\nu_{RS} = 0.1, \nu_{TR} = \nu_{TS} = 0.317$

Die elastische Daten der GFK-Ringbandage um den Spulenkörper lauten:

$$E = 30.0 \text{ GPa}, \nu = 0.2.$$

Die elastische Daten der Stahlgehäuses sind:

$$E = 210.0 \text{ GPa}, \nu = 0.3.$$

Der thermische Ausdehnungskoeffizient der Wicklung ist im wesentlichen durch die Aluminiumlegierung bestimmt; deshalb wird er für den Temperaturbereich von 293 K auf 4 K wie beim ABB-Leiter mit 0.415 % angesetzt. Folglich ergibt sich eine Schrumpfung des äußeren Radius von etwa 1.5 mm und eine des inneren Radius von etwa 0.7 mm bei der Abkühlung der Testspule. In Abb. 11 ist die Verschiebung der Elemente infolge der Abkühlung dargestellt.

Damit die GFK-Bandage ihre stützende Wirkung für die Testspule übernehmen kann, ist es wichtig, daß die thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Wicklung und Bandage in etwa übereinstimmen. Dann ist gewährleistet, daß sich bei der Abkühlung kein Spalt zwischen Wicklung und Bandage bildet, so daß bei der magnetischen Auferregung die tragende Wirkung der Bandage sofort einsetzen kann. (Würde z.B. der thermische Ausdehnungskoeffizient der Bandage nur den halben Wert der Spulenumwicklung besitzen, so ergäbe sich bei der Abkühlung ein Spalt von etwa 0.7 mm.) Die Herstellung der geforderten Eigenschaften der Bandage erscheint möglich durch eine geeignete Auswahl der Materialzusammensetzung und durch die passende Wahl der Glasfaserrichtung in dem Verbundwerkstoff. Bei den Berechnungen ist die Spaltfreiheit zwischen Wicklung und Bandage vorgegesetzt; anderenfalls würde die Wicklung höher beansprucht, weil die Bandage erst nach einer gewissen Vordehnung zum Tragen käme.

Die mechanische Spannungsanalyse ergibt je nach Belastungsfall eine unterschiedliche Beanspruchung der Wicklung der Testspule.

Im Belastungsfall (A) ist diese wegen der Kreisform der Spule und des fehlenden Hintergrundfeldes der STAR-Spulen konstant über dem Spulenumfang. Es treten im wesentlichen die Normalspannungskomponenten auf, wobei eindeutig die Zugspannung in tangentialer Richtung mit etwa $|\sigma_T|_{\max} = 92$ MPa überwiegt. Dabei beträgt die maximale radiale Druckspannungskomponente etwa $|\sigma_R|_{\max} = 26$ MPa. In der GFK-Bandage ergibt sich in diesem Fall eine maximale von Mises-Spannung von etwa $\sigma_{VM\max} = 66$ MPa, wobei wiederum die tangentielle Zugspannung überwiegt.

Im Belastungsfall (B) erhält man wegen der eingeschalteten STAR-Spulen eine Biege- und Scherbeanspruchung der Testspule. Sie wird etwas D-förmig verformt, und es ergeben sich Maxima der tangentialen Normalspannungskomponente von $|\sigma_T|_{\max} = 84$ MPa. Das Maximum der Schubspannungskomponente beträgt dabei $|\sigma_{TR}|_{\max} = 4$ MPa. Die GFK-Bandage sieht in diesem Fall die maximale von Mises-Spannung von etwa $\sigma_{VM\max} = 60$ MPa.

Der Belastungsfall (C) ist gekennzeichnet durch die starke Seitenkraft, die wegen der asymmetrischen Belastung auf die Testspule wirkt. Diese muß durch das Gehäuse aufgefangen werden. Das Maximum der von Mises-Spannung in der Spule beträgt hier etwa $\sigma_{VM\max} = 54$ MPa bei einer maximalen lateralen Druckspannungskomponente von etwa $|\sigma_S|_{\max} = 10$ MPa und einer maximalen Schubspannungskomponente von etwa $|\sigma_{RS}|_{\max} = 6$ MPa. Die GFK-Bandage wird dabei mit einer maximalen von Mises-Spannung von etwa $\sigma_{VM\max} = 39$ MPa und die seitlichen Stahlplatten mit einer maximalen von Mises-Spannung von etwa $\sigma_{VM\max} = 225$ MPa beansprucht. Den letzteren Berechnungen liegt ein vereinfachtes Modell ohne die Bolzenverbindungen zwischen den Seitenplatten zugrunde, so daß man hier in realiter noch geringere Spannungswerte erwarten kann.

Die Ergebnisse der Berechnungen der maximalen magnetischen Felder, der magnetischen Kräfte und der mechanischen Spannungen für die 3 Belastungsfälle sind in der Tabelle IV zusammengefaßt. Dabei sind die angezeigten "Maximalwerte" Maxima in den Rechenpunkten, die im Zentrum der finiten Elemente liegen. Die absoluten Maximalwerte der Spannungskomponenten treten im allgemeinen auf dem Rande auf. Dies gilt insbesondere für die Normalspannungskomponente σ_T . In Abb. 20 wurde von den berechneten Werten $|\sigma_T|_{\max}$ des Belastungsfalls (C) auf die Randwerte extrapoliert, für die sich in dem betrachteten Falle eine Erhöhung von bis zu 20 % ergibt.

Belastungsfall	$ \sigma_T _{\max}$ [MPa]	$ \sigma_R _{\max}$ [MPa]	$ \sigma_S _{\max}$ [MPa]	$ \sigma_{TR} _{\max}$ [MPa]	$ \sigma_{RS} _{\max}$ [MPa]	$\sigma_{VM\max}$ [MPa]
(A)	92	26	0	0	0	66
(B)	84	0	0	4	0	60
(C)	54	0	10	0	6	54

Tabelle IV: Vergleich der Daten der 3 Belastungsfälle für die Testspule in der Anordnung STAR von KfK.

Für die Spannungsberechnungen wird die Spule in $3 \times 3 \times 40$ Elemente unterteilt und die elastischen Daten des ABB-Leiters verwendet. Die errechneten Spannungswerte gelten für diesen Compound. Die Testspule ist in einem seitlichen Gehäuse mit der lateralen Dicke von 1.3 cm eingebettet.

Belastungsfälle			Testspule im Eigenfeld bei etwa Garantiestrom	Testspule im kombinierten Feld bei Nennstrom	Testspule im asymmetr. Feld bei Nennstrom
Label			A	B	C
STAR-Spulen					
Leiterstrom	i_{SL}	kA	0.	7.	5.88
Spulengesamtstrom	i_S	MA	0.	1.68	1.41
Spulenzahl			–	4	2
Testspule					
Leiterstrom	i_{TL}	kA	30.	16.	16.
Spulengesamtstrom	i_T	MA	3.0	1.6	1.6
Mittl. Stromdichte	j_T	MA/m ²	112.3	59.88	59.88
Max. Magnetfeld	B_{max}	T	10.1	8.96	6.98
Mittl. Kraftdichte	$\langle f \rangle$	MN/m ³	350.	260.	170.
Res. Seitenkraft	F_y	MN	0.	0.	2.65
Max. v. Mises-Spg.	σ_{VMmax}	MPa	105.	87.	54.
Max. Normalspgn.	$ \sigma_R _{max}$	MPa	26.	9.	8.
	$ \sigma_S _{max}$	MPa	23.	5.	10.
	$ \sigma_T _{max}$	MPa	92.	84.	51.
Max. Schubspgn.	$ \sigma_{RS} _{max}$	MPa	1.	1.	6.
	$ \sigma_{ST} _{max}$	MPa	0.	0.	0.
	$ \sigma_{TR} _{max}$	MPa	0.	4.	2.
Spulengehäuse					
Max. v. Mises-Spg.	σ_{VMmax}	MPa	~0.		~225.
GFK-Bandage					
Max. v. Mises-Spg.	σ_{VMmax}	MPa	66.	60.	~39.

Bemerkung: Die angezeigten Maximalwerte sind Maxima in den Rechenpunkten, aber nicht unbedingt die absoluten Maximalwerte. Siehe auch Abb. 20: Extrapolation auf den Rand.

In den folgenden Abbildungen sind als Beispiel für den Belastungsfall (C) der asymmetrischen Belastung die Spannungsverteilung und die Deformation der Testspule in STAR dargestellt. Die Abb. 12 bis Abb. 14 zeigen die Normalspannungskomponenten σ_R (radial), σ_S (lateral) und σ_T (tangential) für die Wicklung in Abhängigkeit von der Längskoordinate der Testspule. Die 9 Kurven gelten wiederum für die 9 Elemente, in die der Querschnitt der Spule unterteilt ist. σ_R und σ_S sind über den gesamten Querschnitt negativ, d.h. es herrscht in diesen Richtungen reine Druckbeanspruchung vor. Die tangentielle Komponente σ_T ist positiv und variiert längs der Spule, d.h. in dieser Richtung liegt Zug und Biegung vor. Die Abb. 15 bis Abb. 17 zeigen die 3 Schubspannungskomponenten σ_{RS} , σ_{ST} und σ_{TR} für die Wicklung in Abhängigkeit von der Längskoordinate der Testspule. Die Komponenten σ_{RS} und σ_{TR} zeigen aufgrund der Biegebeanspruchung endliche Werte bis zu 6 MPa, während die Komponente σ_{ST} aus Symmetriegründen verschwindet. In den Abb. 18 und Abb. 19 sind die von Mises-Spannungen in der GFK-Bandage und in den Stahl-Seitenplatten dargestellt. Die Abb. 20 zeigt die Extrapolation der tangentialen Zugspannung σ_T auf den Rand.

Die Abb. 21 und Abb. 22 zeigen die Deformation der Testspule für den Belastungsfall (C). In Abb. 21 ist ein Schnitt der xz -Ebene, in Abb. 22 ein Schnitt der xy -Ebene durch die Testspule dargestellt. Die maximale Verschiebung beträgt hier weniger als 1 mm. Deutlich ist die radiale Dehnung der Testspule und die Verschiebung in y -Richtung aufgrund der asymmetrischen Belastung zu erkennen.

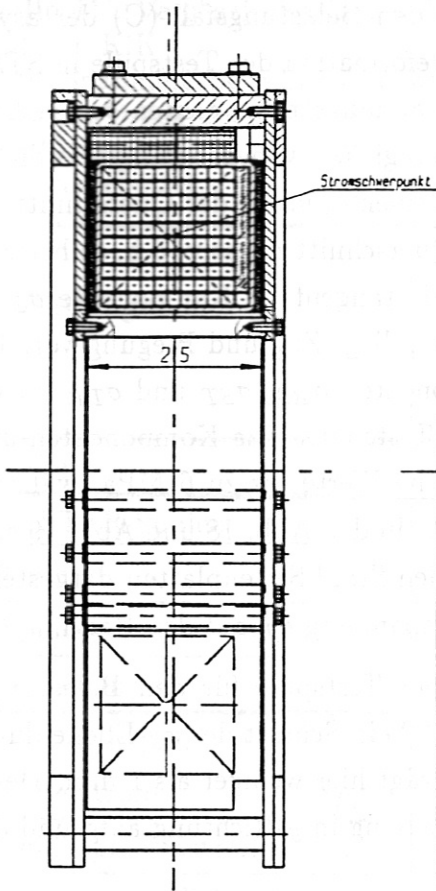
Die berechneten Spannungen der Testspule gelten für den Compound gemäß Tabelle III. Um zu den Spannungswerten der Aluminiumlegierung, das im wesentlichen die Belastung trägt, zu kommen, muß sein prozentualer Anteil, der nach Tabelle II 50.7% beträgt, betrachtet werden, so daß sich für die tangentielle Richtung ein Überhöhungsfaktor von 1.98 ergibt. Berücksichtigt man noch Randüberhöhung gemäß Abb. 20, so erhält man für die maximale Zugspannung in tangentialer Richtung in der Aluminiumlegierung etwa $\sigma_{T \max} = 215$ MPa. Dieses Resultat liegt mit einem Sicherheitsfaktor von etwa 1.6 vom Wert $\sigma_{0.2} = 350$ MPa für gehärtetes AlMgSi1 (4K), siehe Abb. 23, entfernt.

5. Schlußfolgerungen

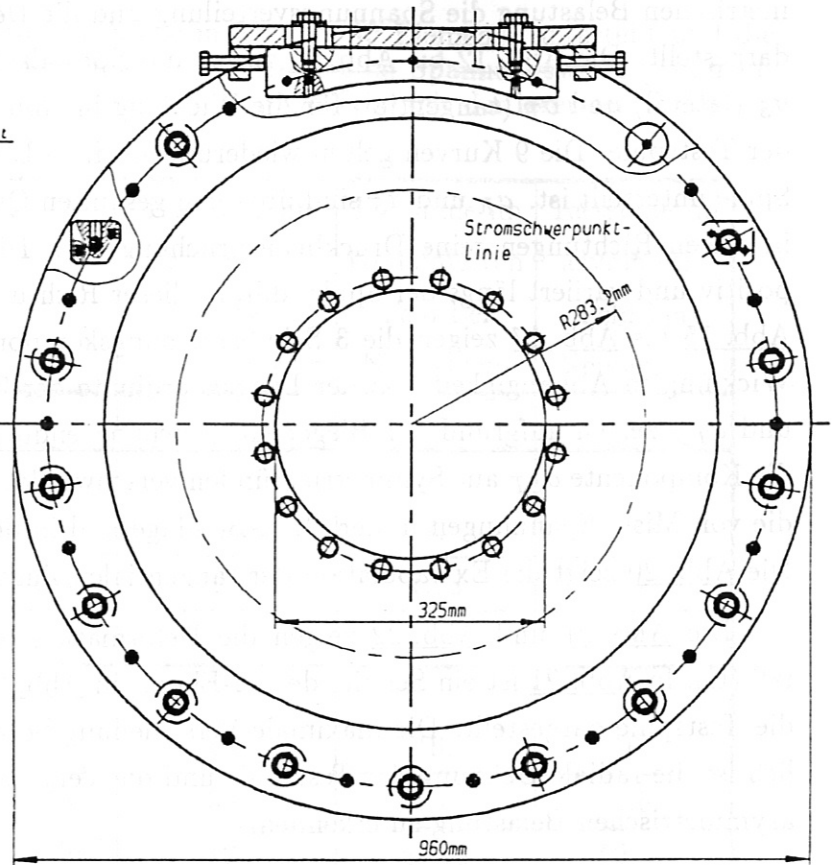
In der Testanordnung STAR von KfK soll der zu einer kreisrunden Testspule aufgewickelte W7-X-Supraleiter elektrisch und hydraulisch getestet werden. Dabei darf die Testspule mechanisch nicht gefährdet werden. Das gilt sowohl für die Überlasttests als auch für den Fall, daß eine Störung in der Testanordnung auftritt. Aus diesem Grunde ist die Testspule mit Hilfe von Strukturmaterial verstärkt worden.

Die Berechnungen der elektromagnetischen Kräfte und mechanischen Spannungen von STAR zeigen, daß die Testspule für die Betriebs- und für die Überlasttests, sowie für den Störfall einer asymmetrischen Last sicher betrieben werden kann.

Querschnitt Gehäuse



Seitenansicht Gehäuse



Seitenansicht Wickelpaket

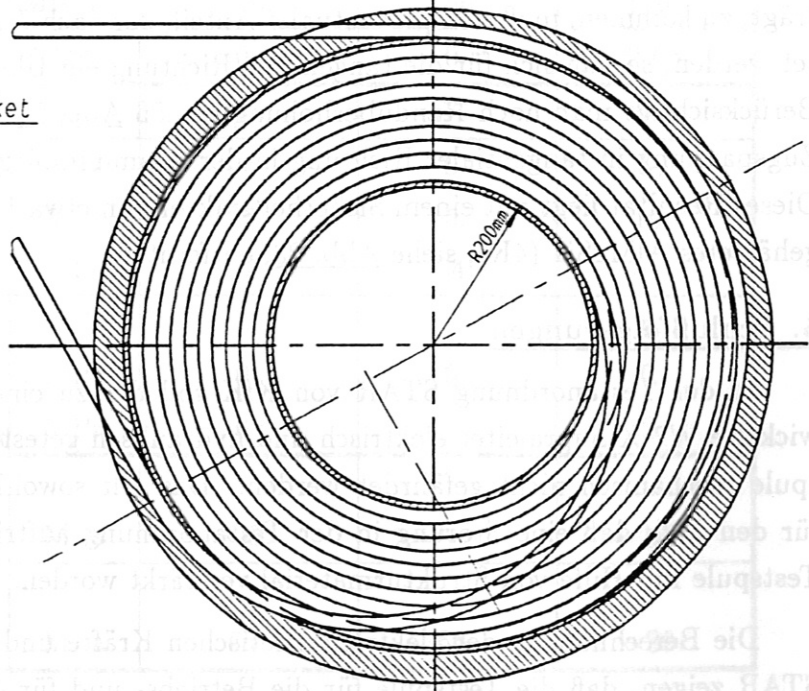


Abb. 1: Wicklung und Gehäuse der Testspule.

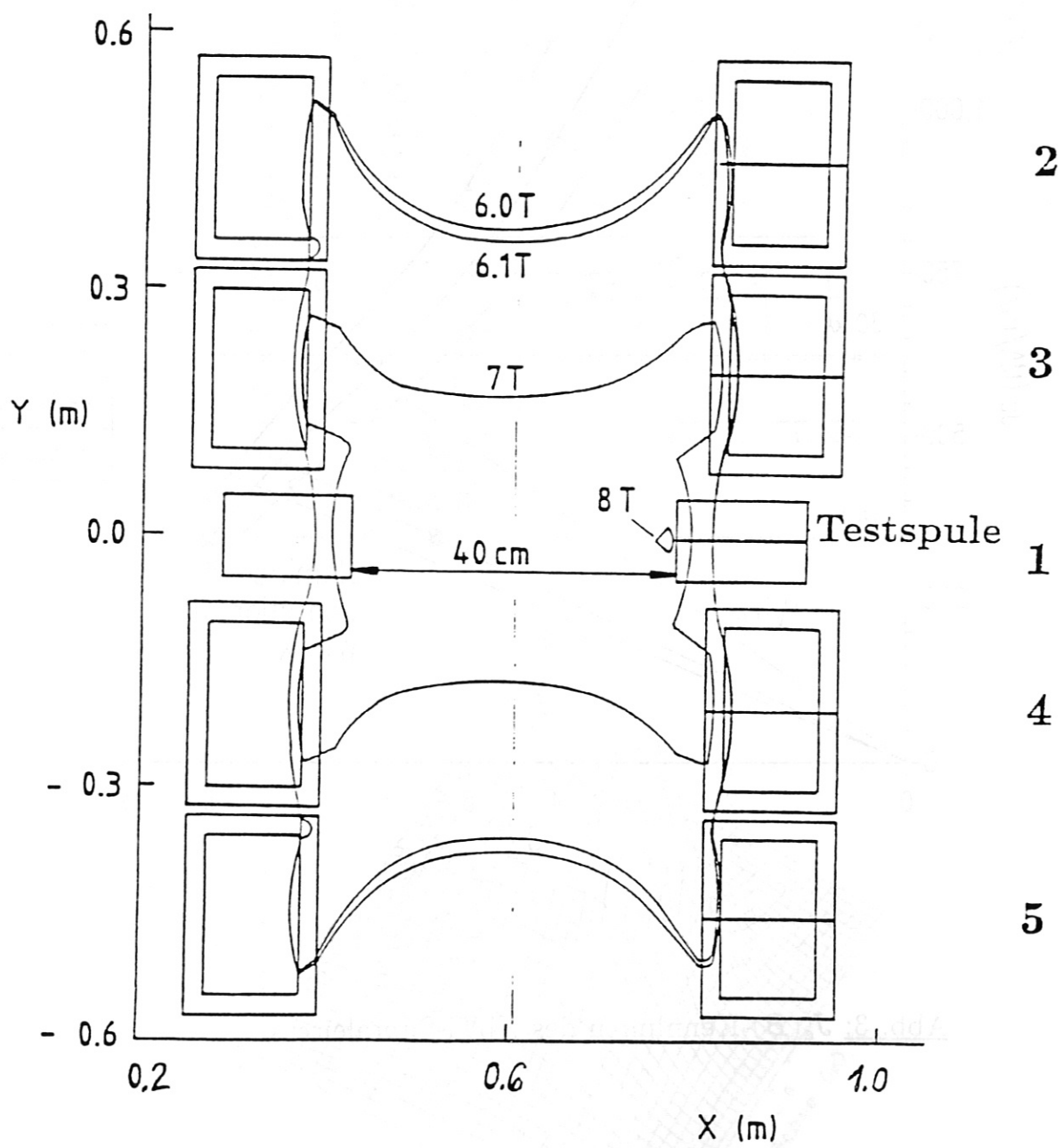


Abb. 2: STAR-Testanordnung

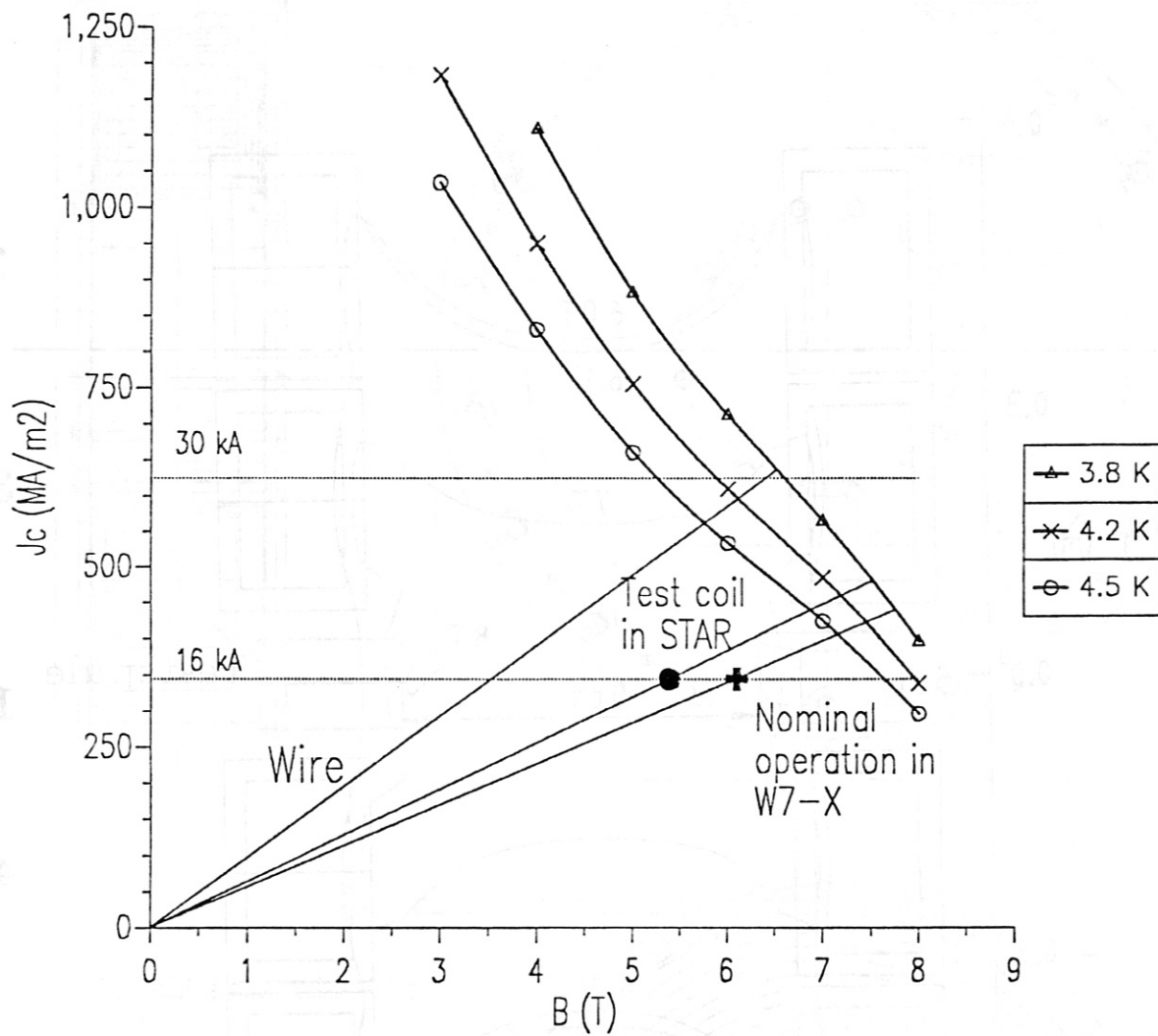


Abb. 3: $J_c(B)$ -Kennlinien des NbTi-Supraleiters .

Abb. 4: Wirkung und Gehalt der Testspule.

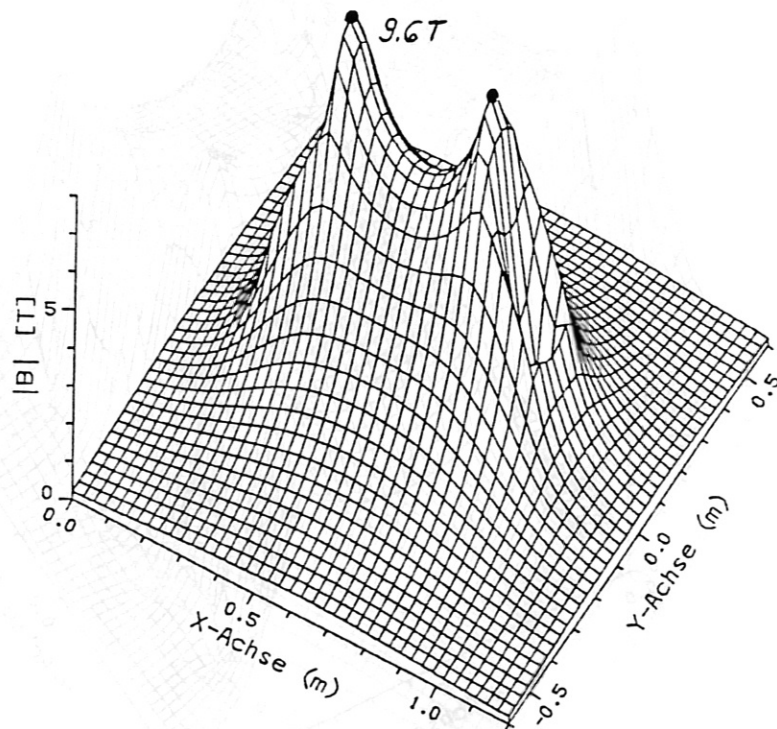
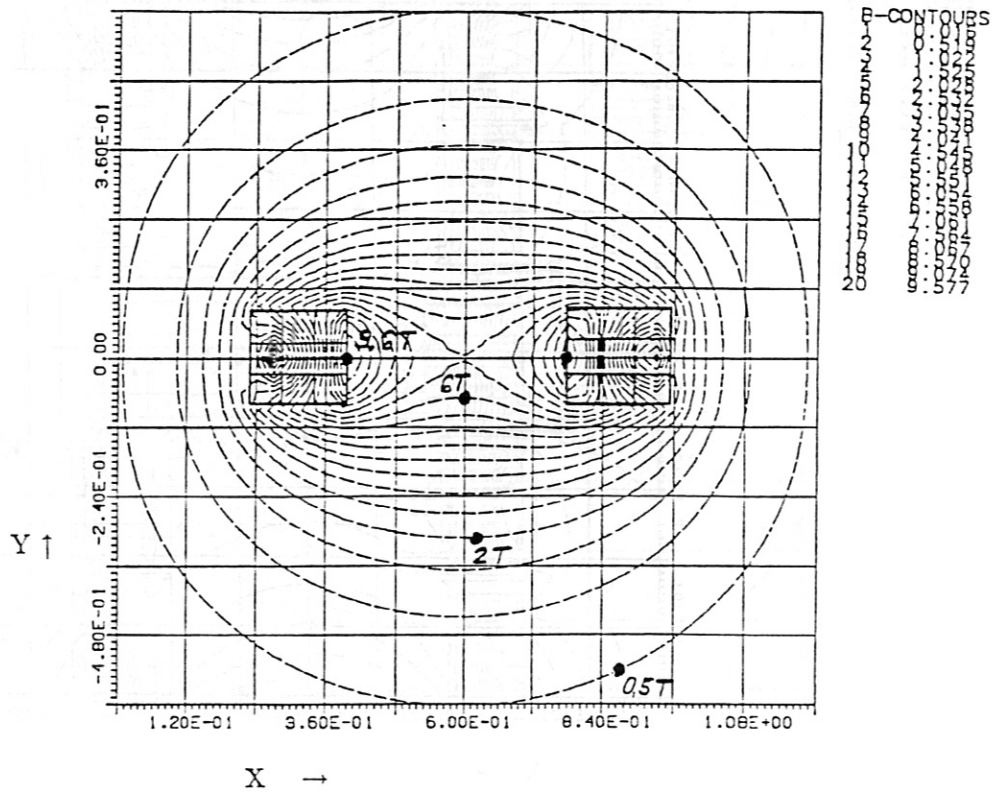


Abb. 4: Magnetische Feldverteilung in der Ebene $z = 0$, Belastungsfall (A).

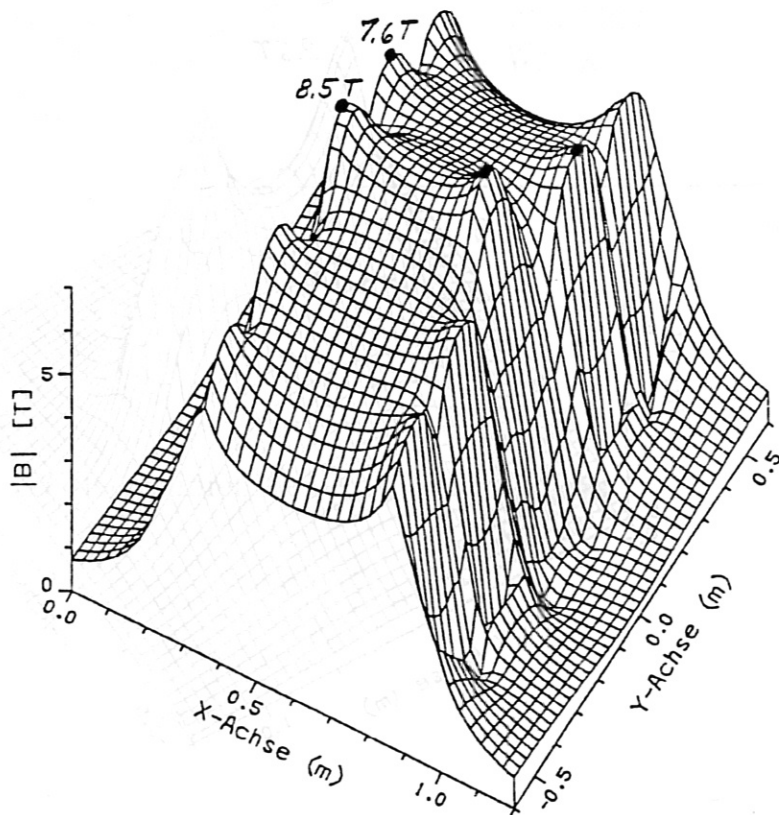
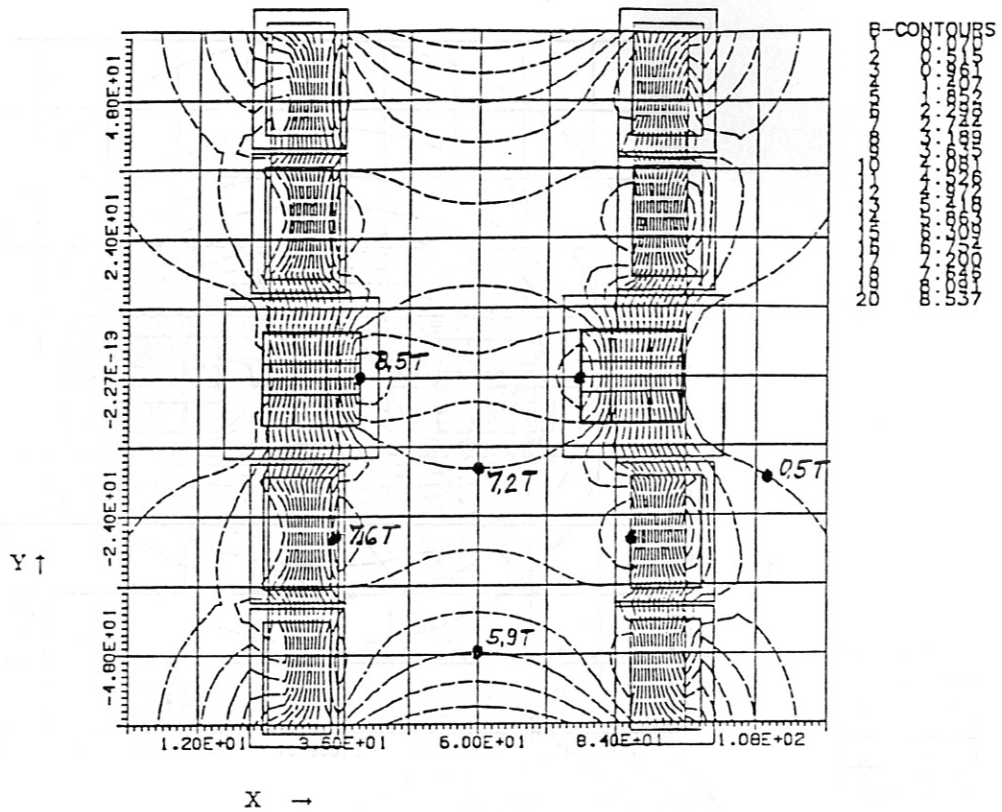


Abb. 5: Magnetische Feldverteilung in der Ebene $z = 0$, Belastungsfall (B).

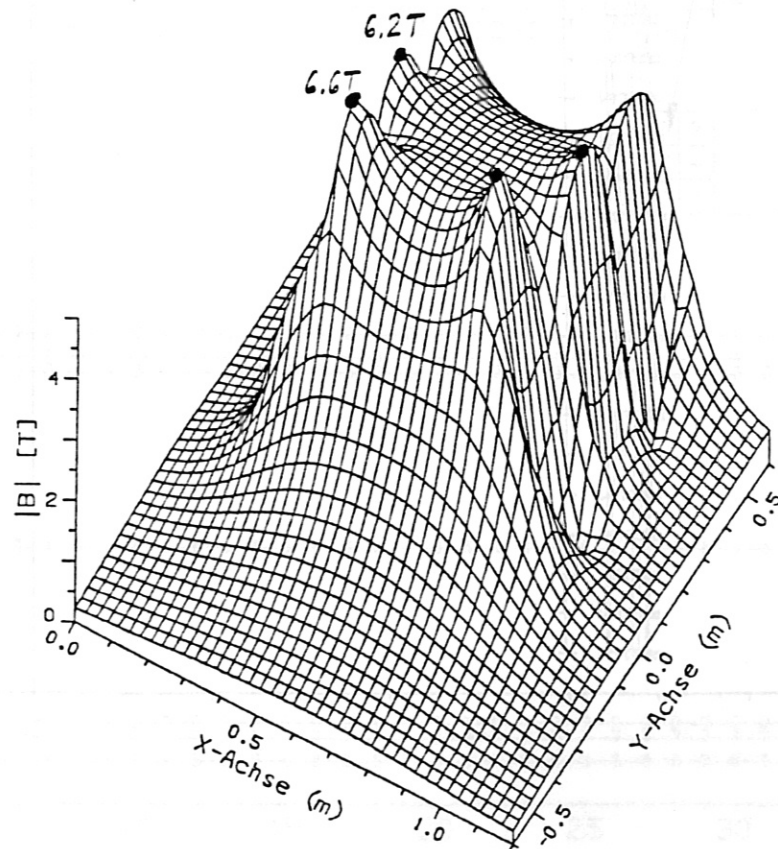
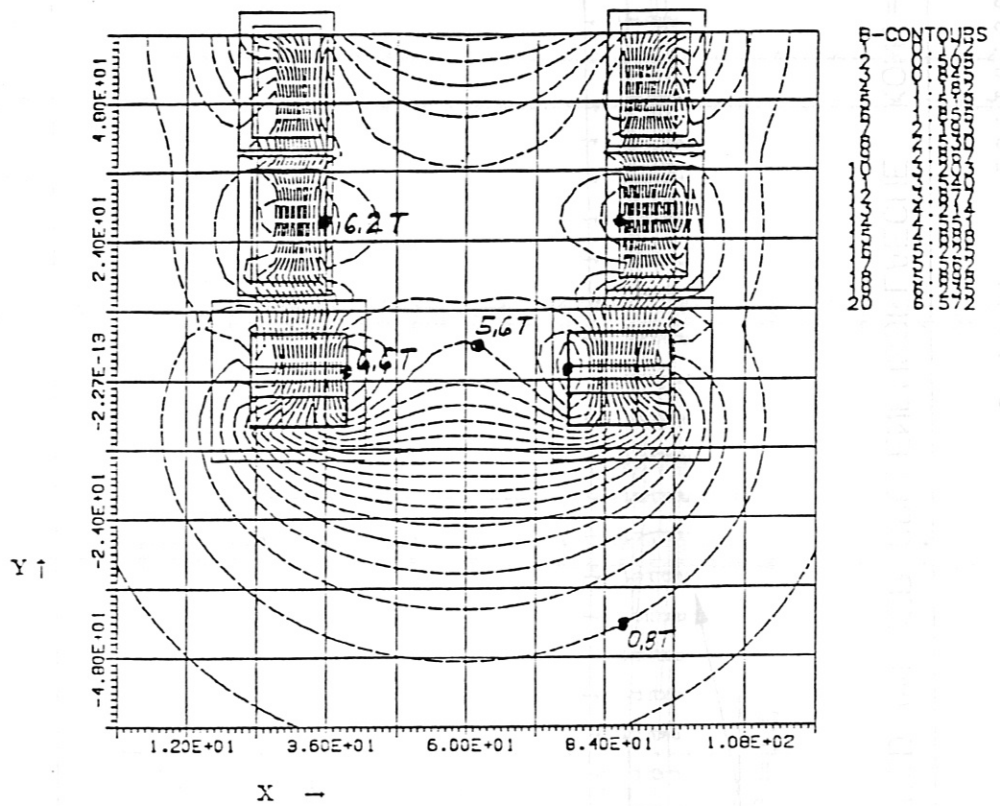


Abb. 6: Magnetische Feldverteilung in der Ebene $z = 0$, Belastungsfall (C).

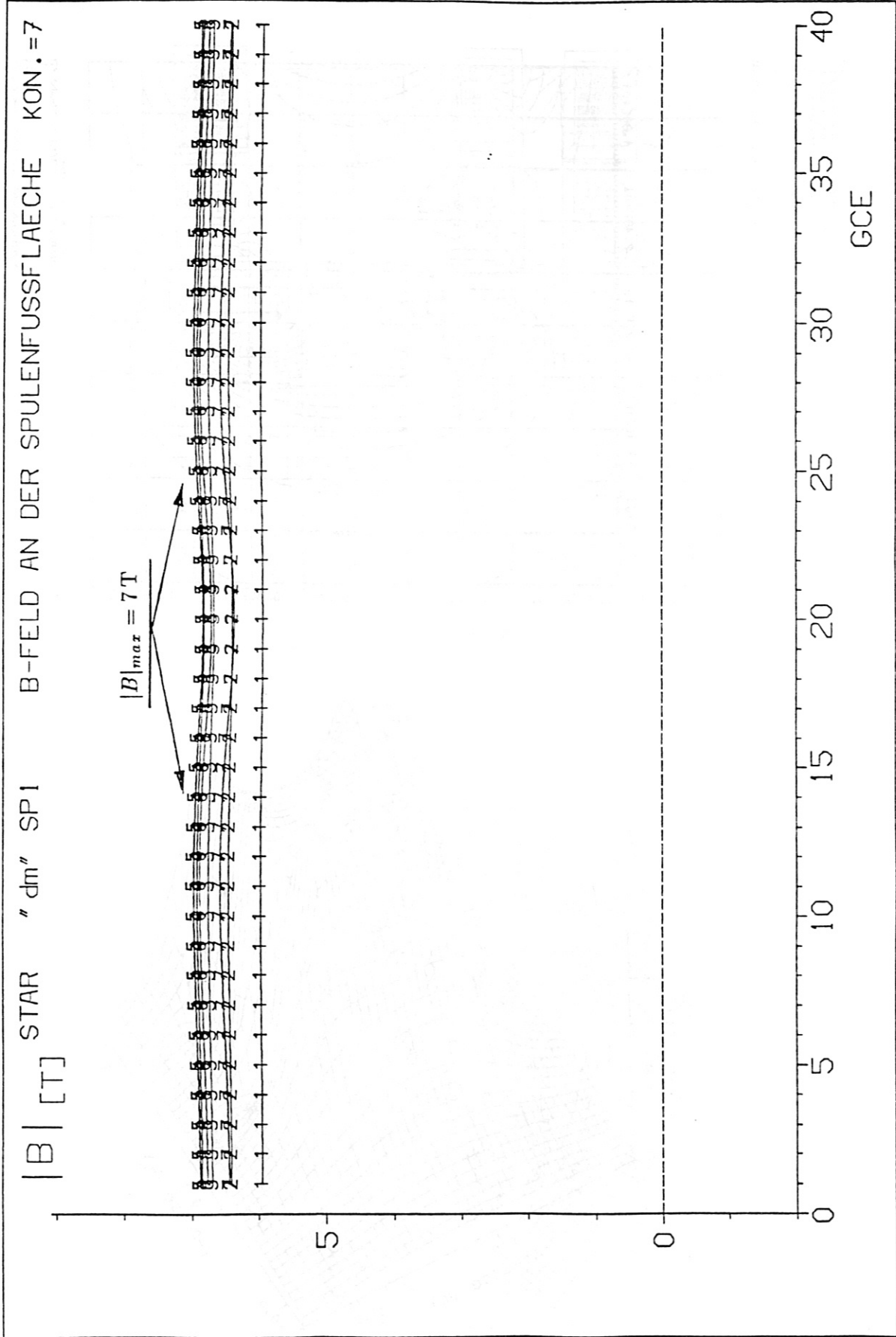


Abb. 7: Feldverlauf entlang von 7 Konturen an der Spulenfußfläche der Testspule, Belastungsfall (C).

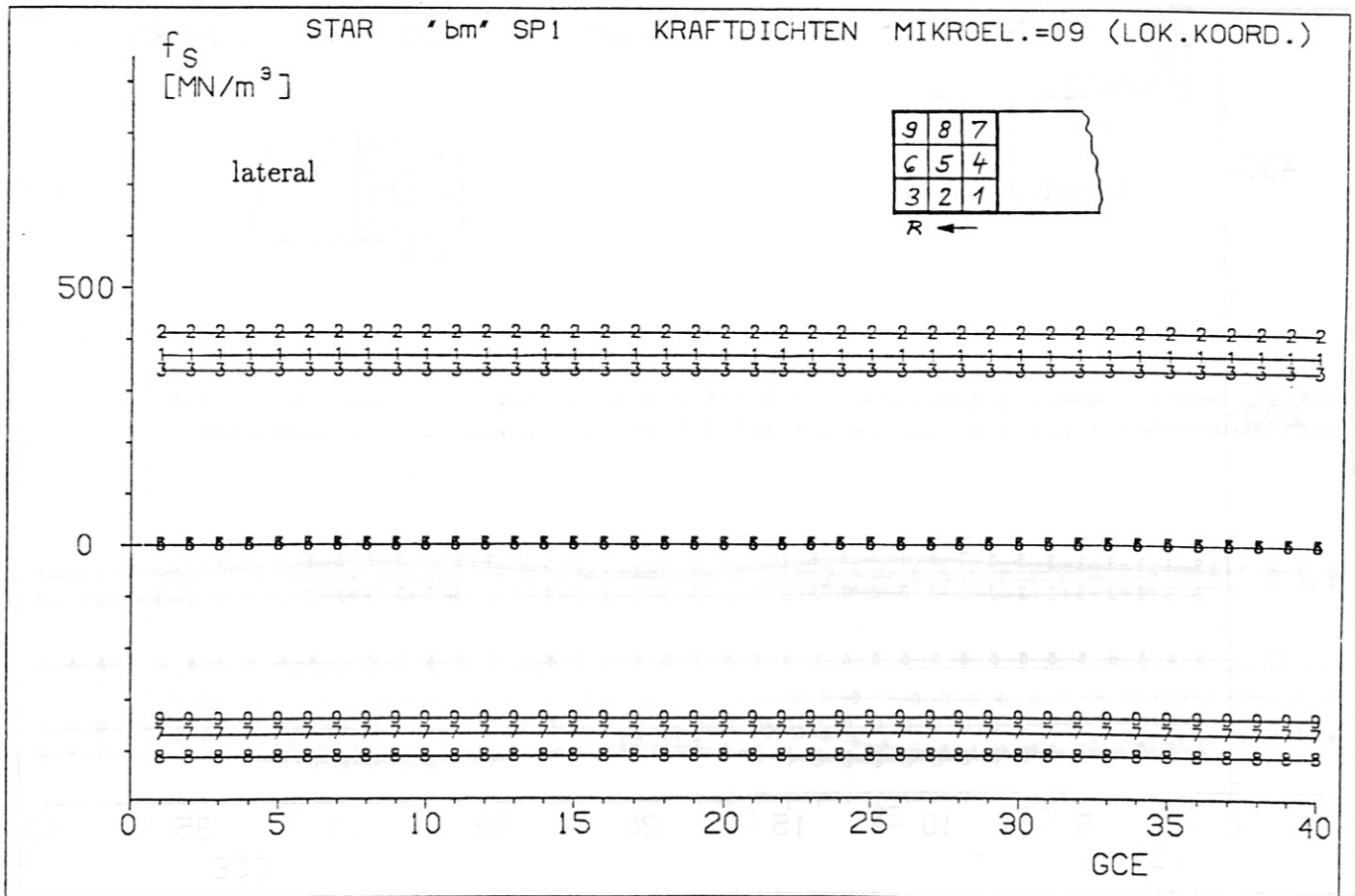
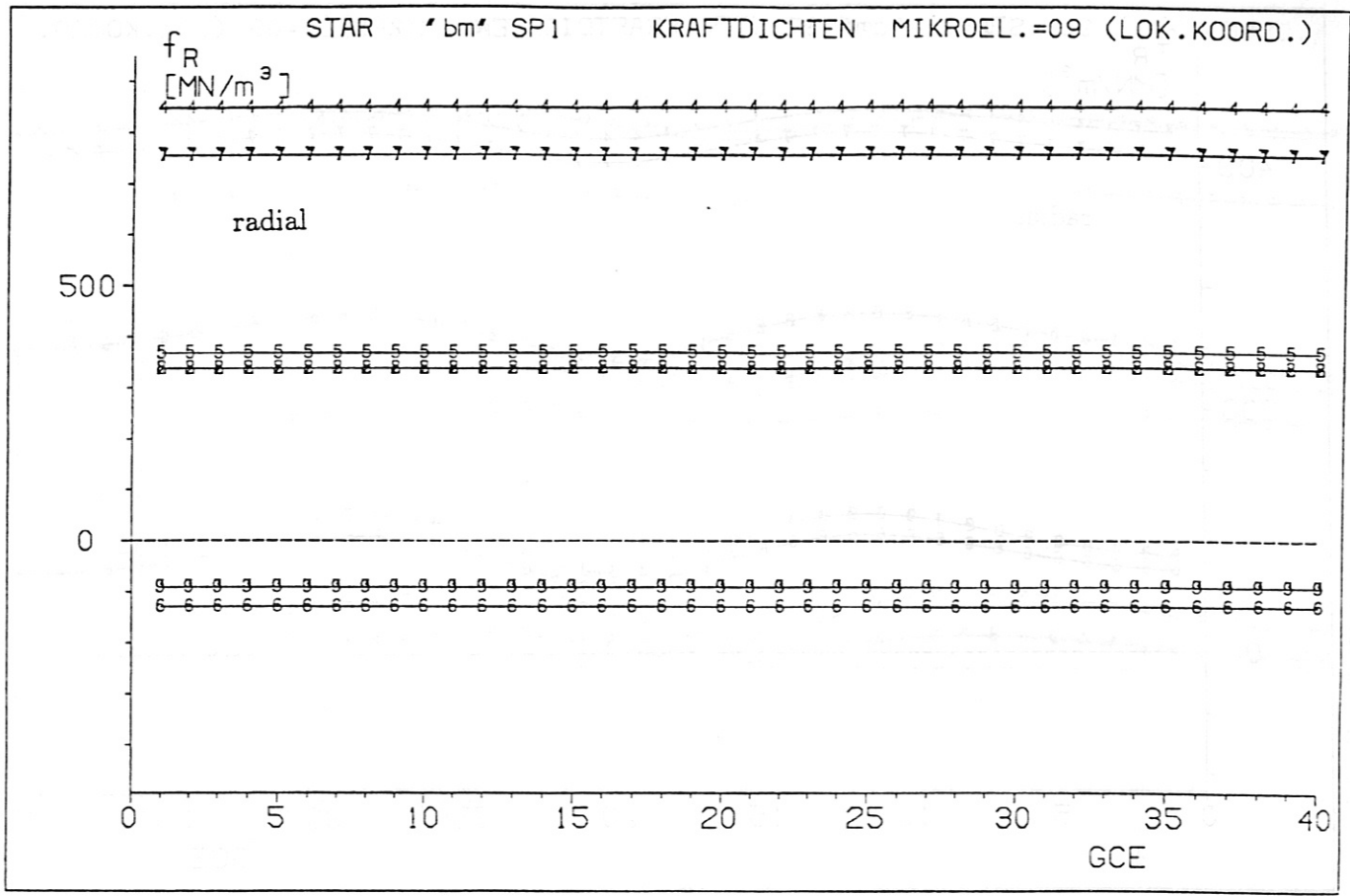


Abb. 8: Magnetische Kraftdichte in radialer und lateraler Richtung in der Testspule, Belastungsfall (A).

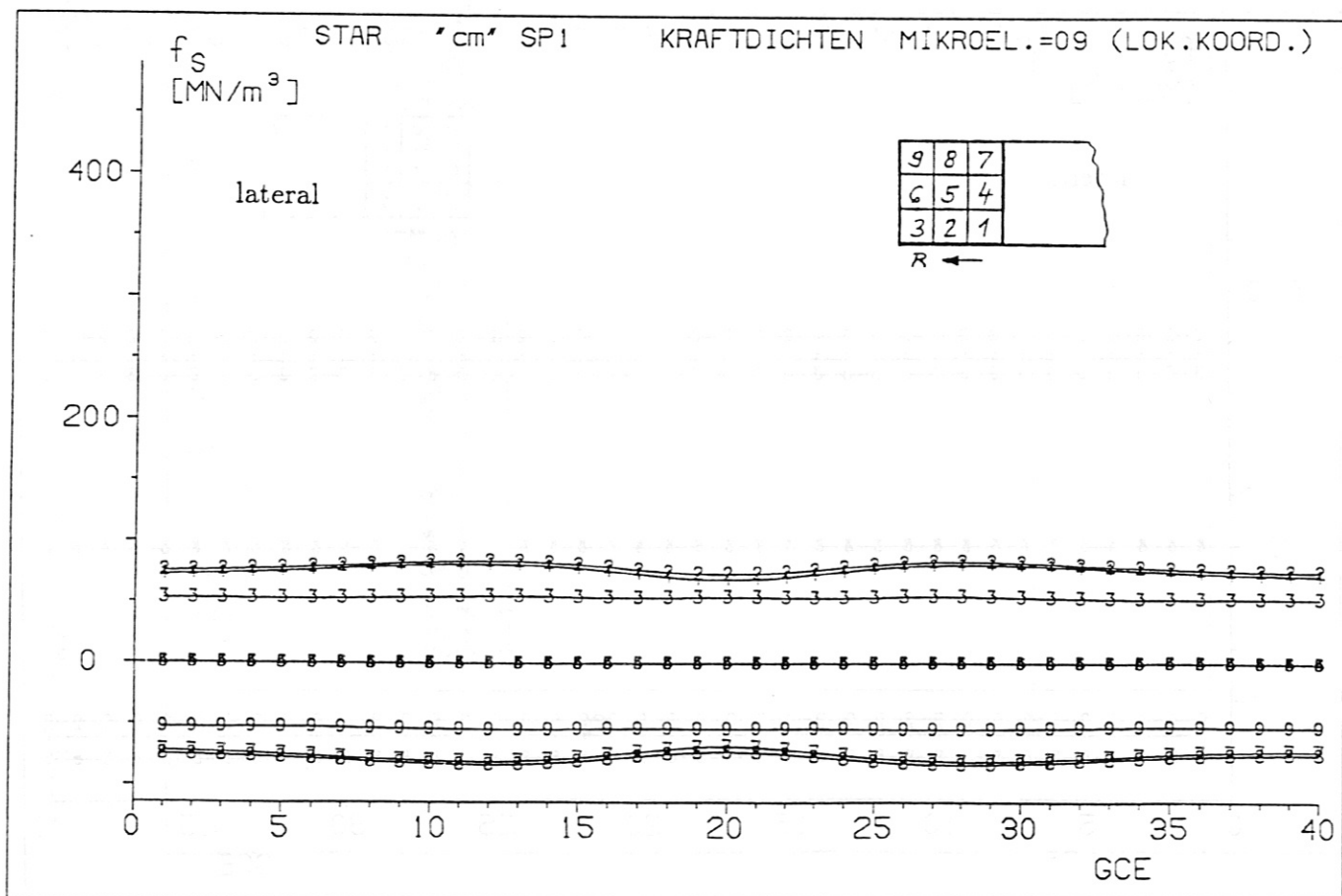
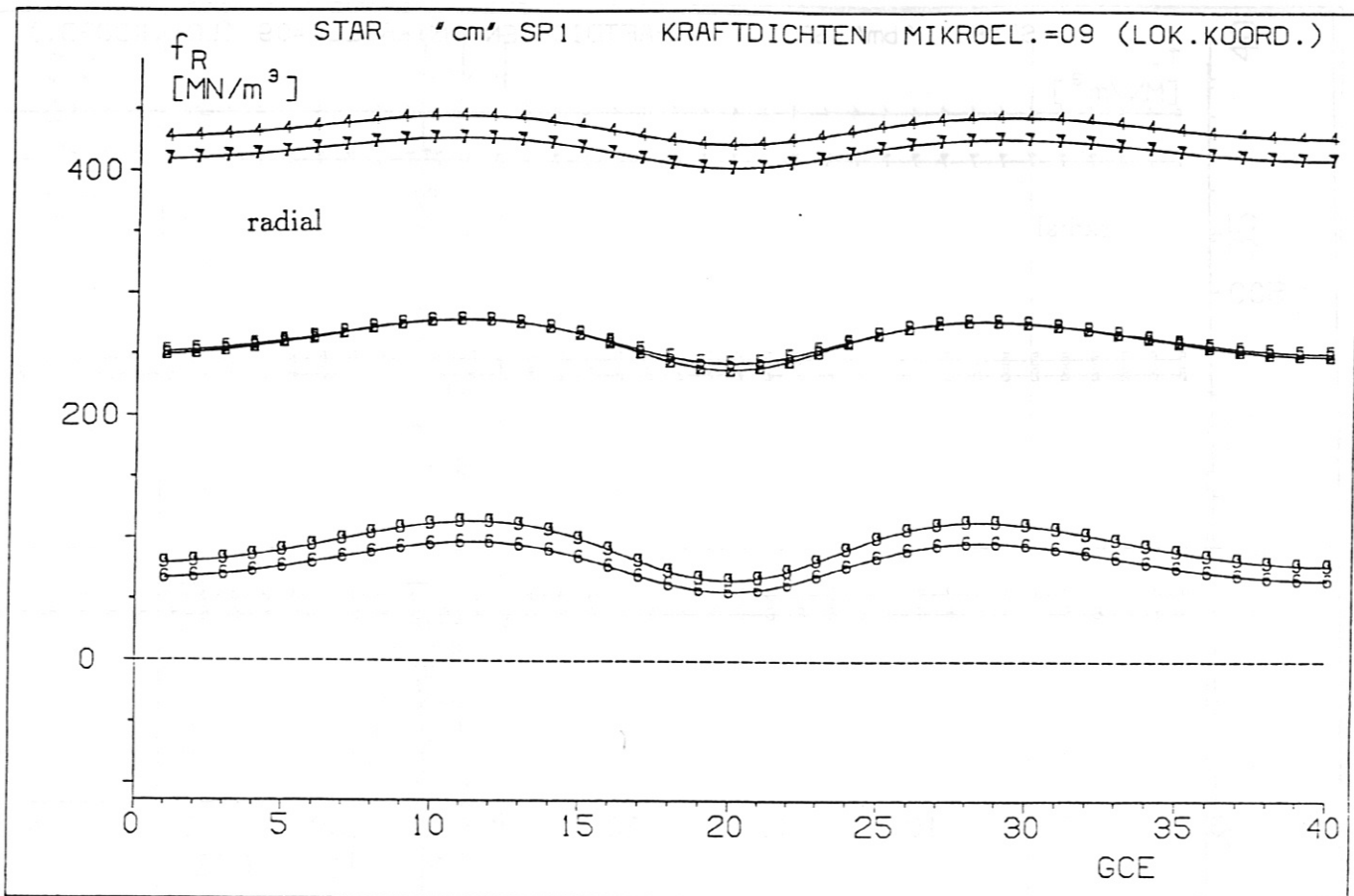


Abb. 9: Magnetische Kraftdichte in radialer und lateraler Richtung in der Testspule, Belastungsfall (B).

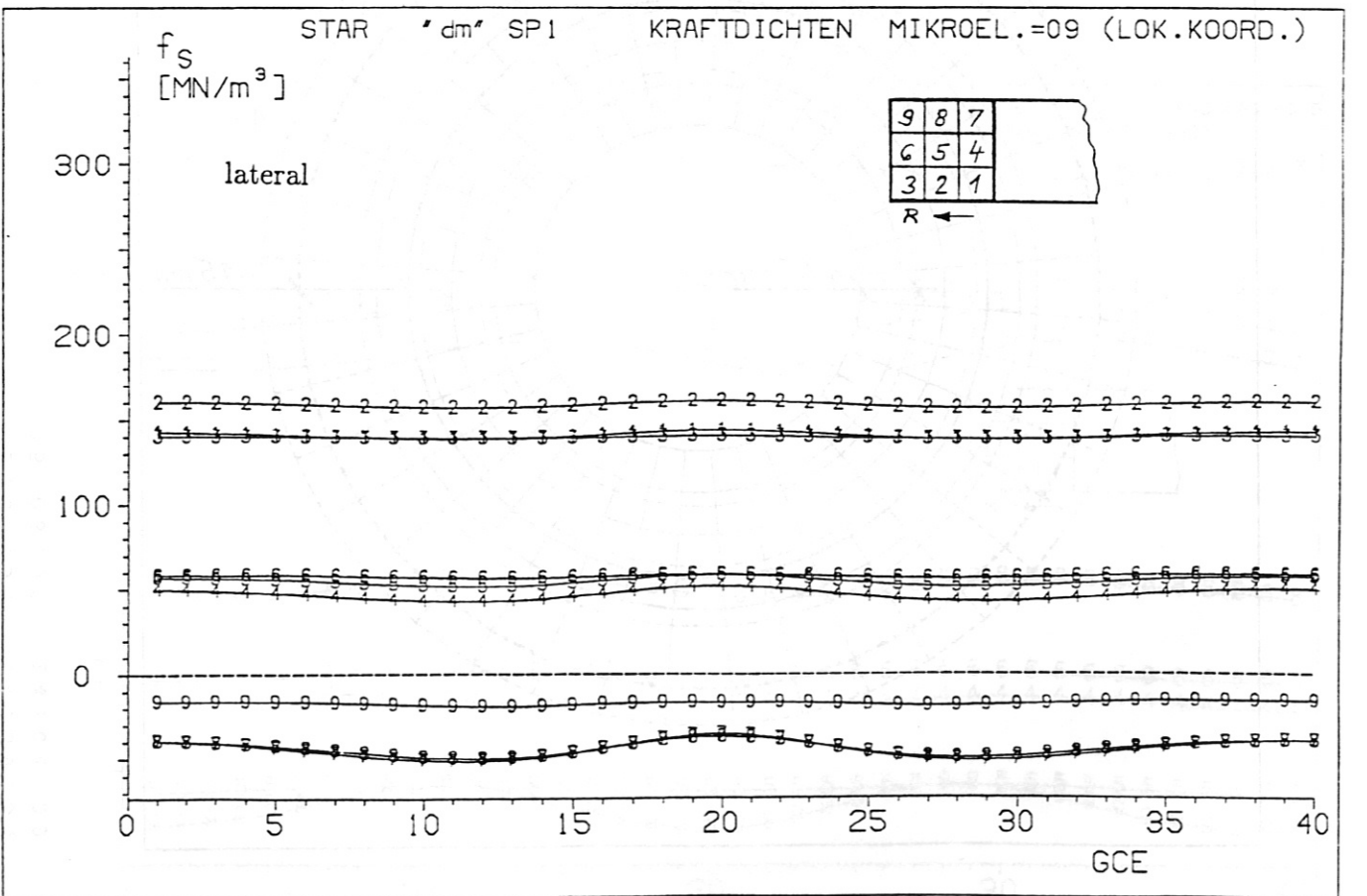
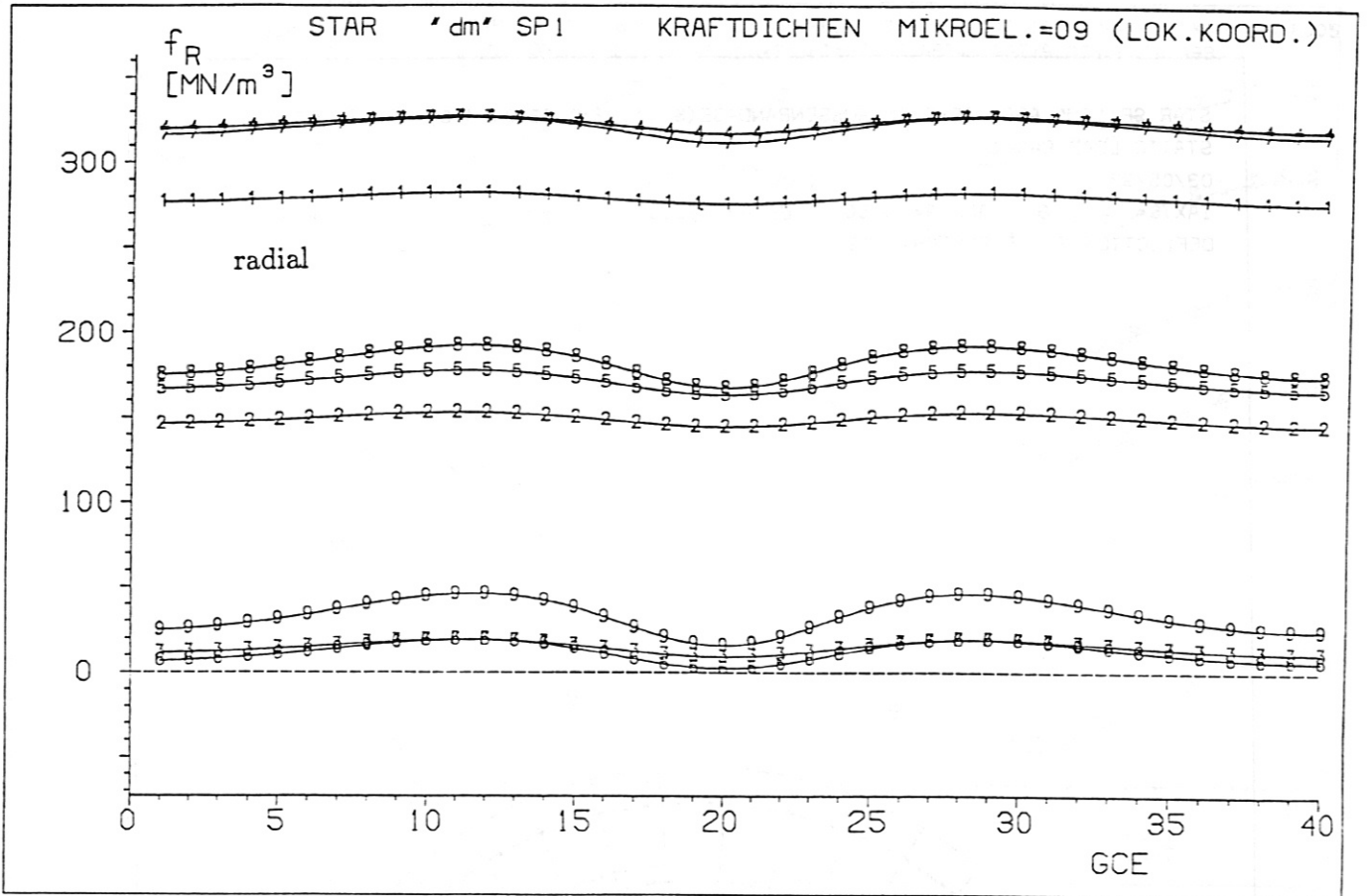
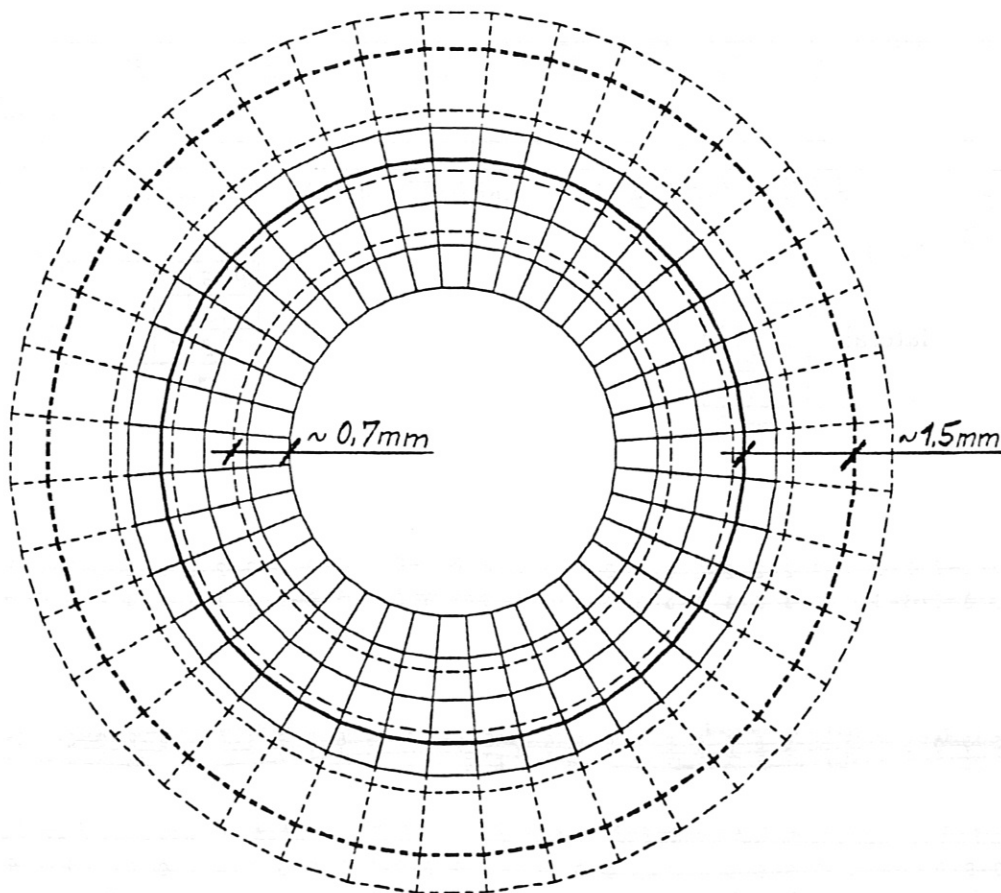


Abb. 10: Magnetische Kraftdichte in radialer und lateraler Richtung in der Testspule, Belastungsfall (C).

STAR SP1'CM' ABST.3D-ELEM AUSSEN BANDAGE (S1:1,S2:0,S3:0,S4:0) ABKUEH F003
STATIC LOAD CASE 1
03/05/92
IAXIS= 3 ALPHA= 0.00 BETA= -90.00
DEFLECTION SCALE FACTOR= 1190.1



I P P - C R A Y s t a r _ c m

1 / 0 0 0 1 D 2 - 0 5

0 5 . 0 3 . 9 2 1 4 . 3 9 : 5 4
0 5 . 0 3 . 9 2 1 4 : 0 4 : 0 9

Abb. 11: Schrumpfung der Testspule durch die Abkühlung von 293 K auf 4 K.

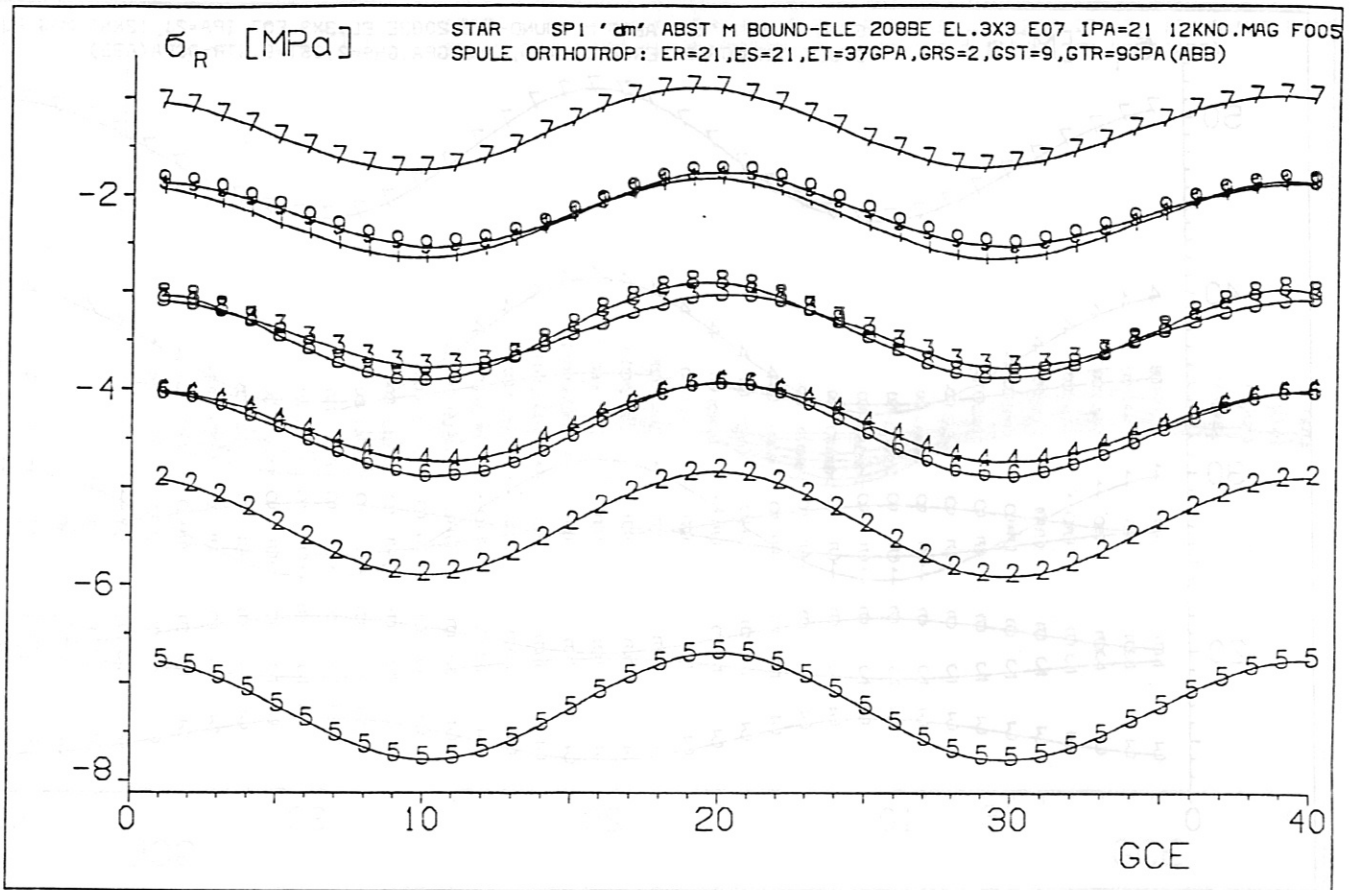


Abb. 12: Radiale Normalspannung σ_R in der Testspule, Belastungsfall (C).

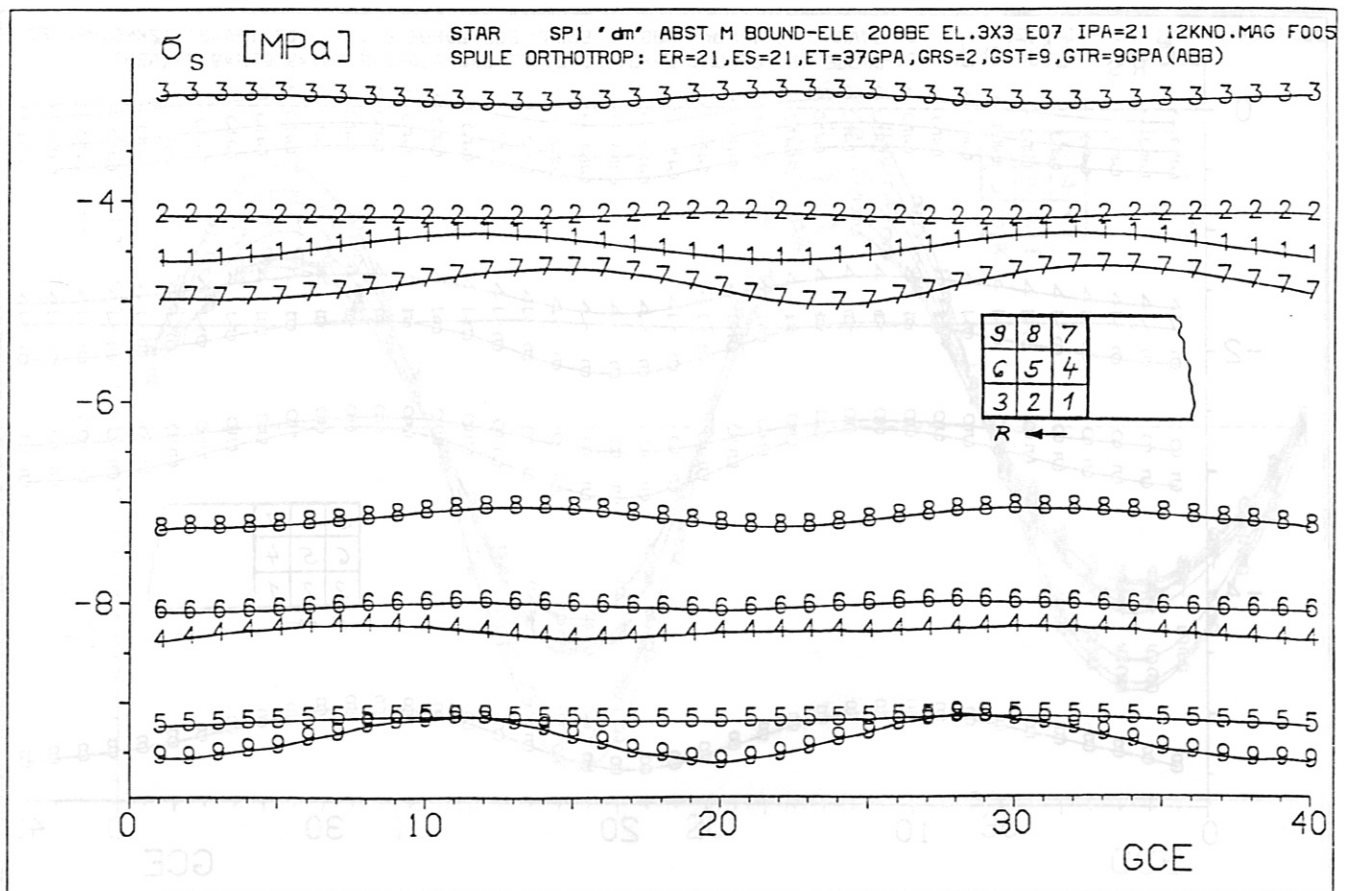


Abb. 13: Laterale Normalspannung σ_S in der Testspule, Belastungsfall (C).

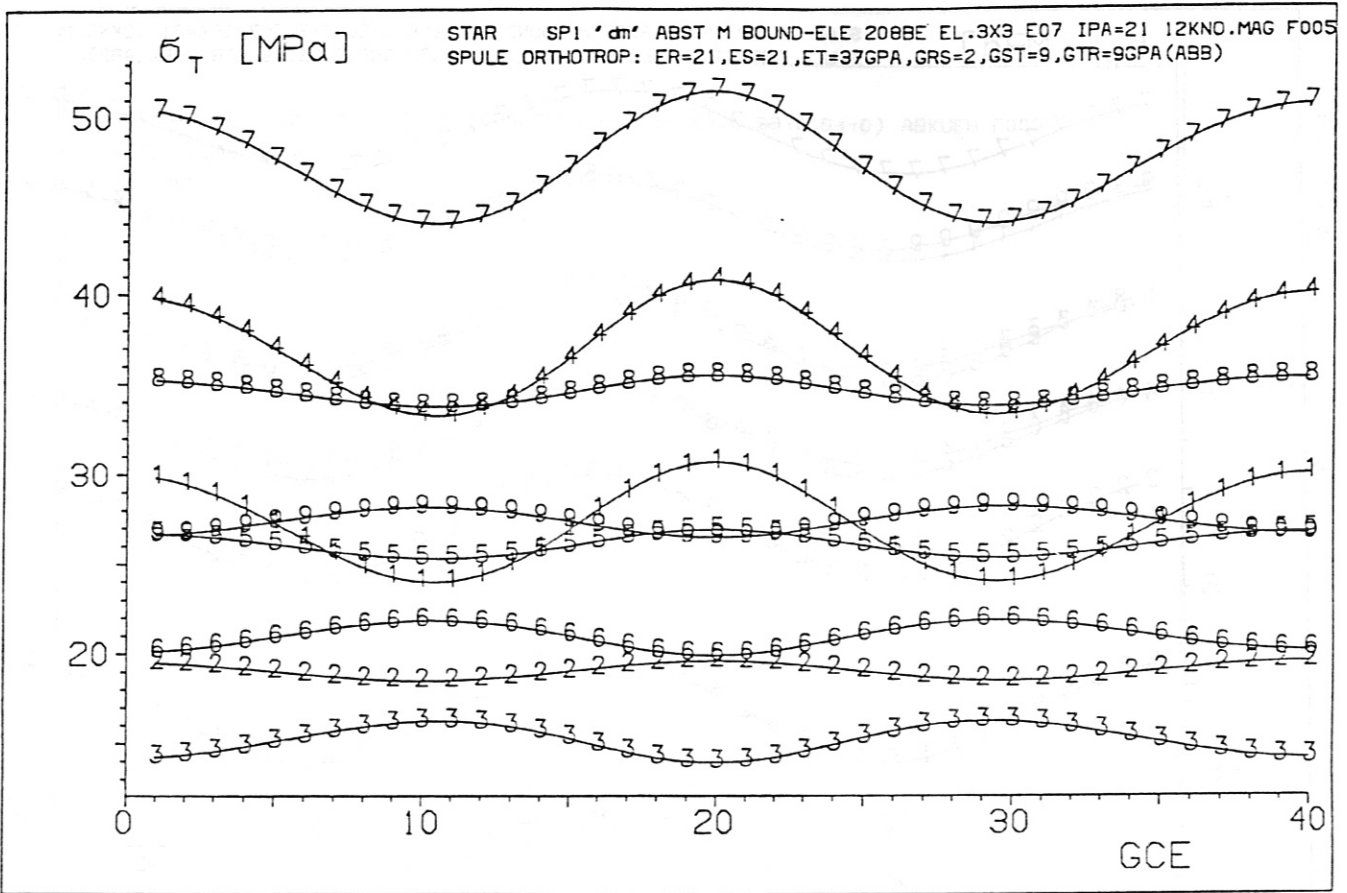


Abb. 14: Tangentiale Normalspannung σ_T in der Testspule, Belastungsfall (C).

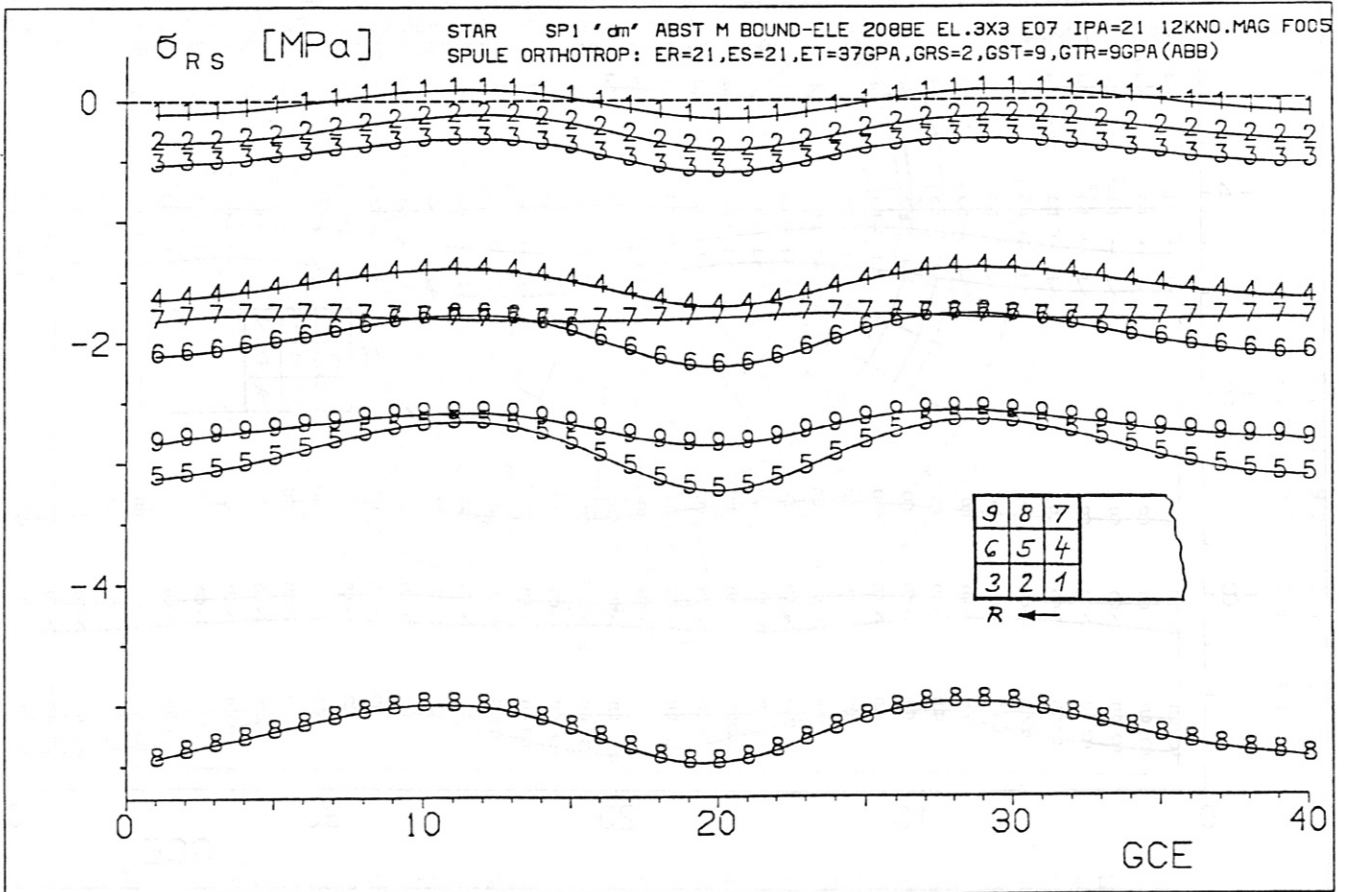


Abb. 15: Schubspannung σ_{RS} in der Testspule, Belastungsfall (C).

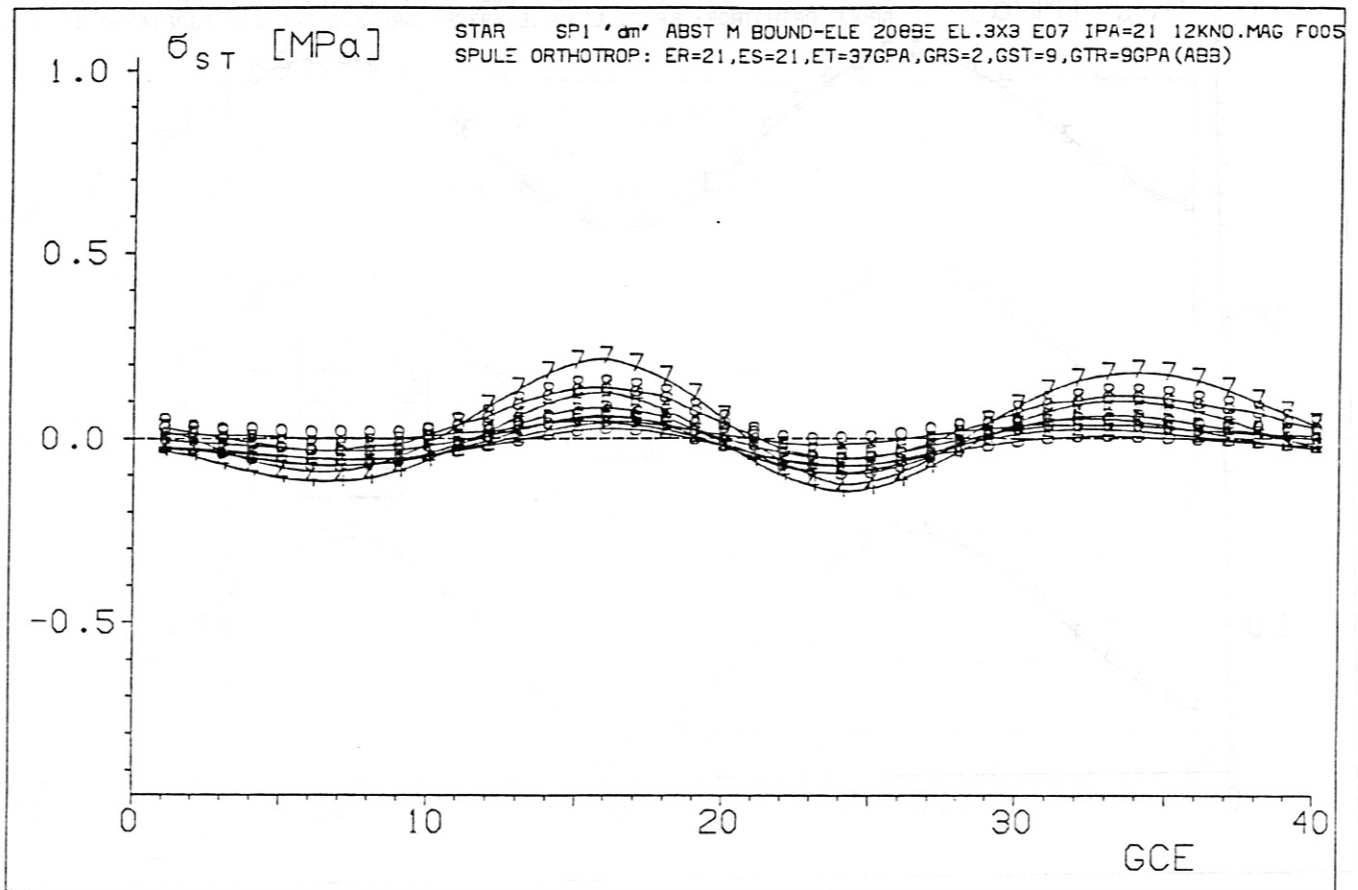


Abb. 16: Schubspannung σ_{ST} in der Testspule, Belastungsfall (C).

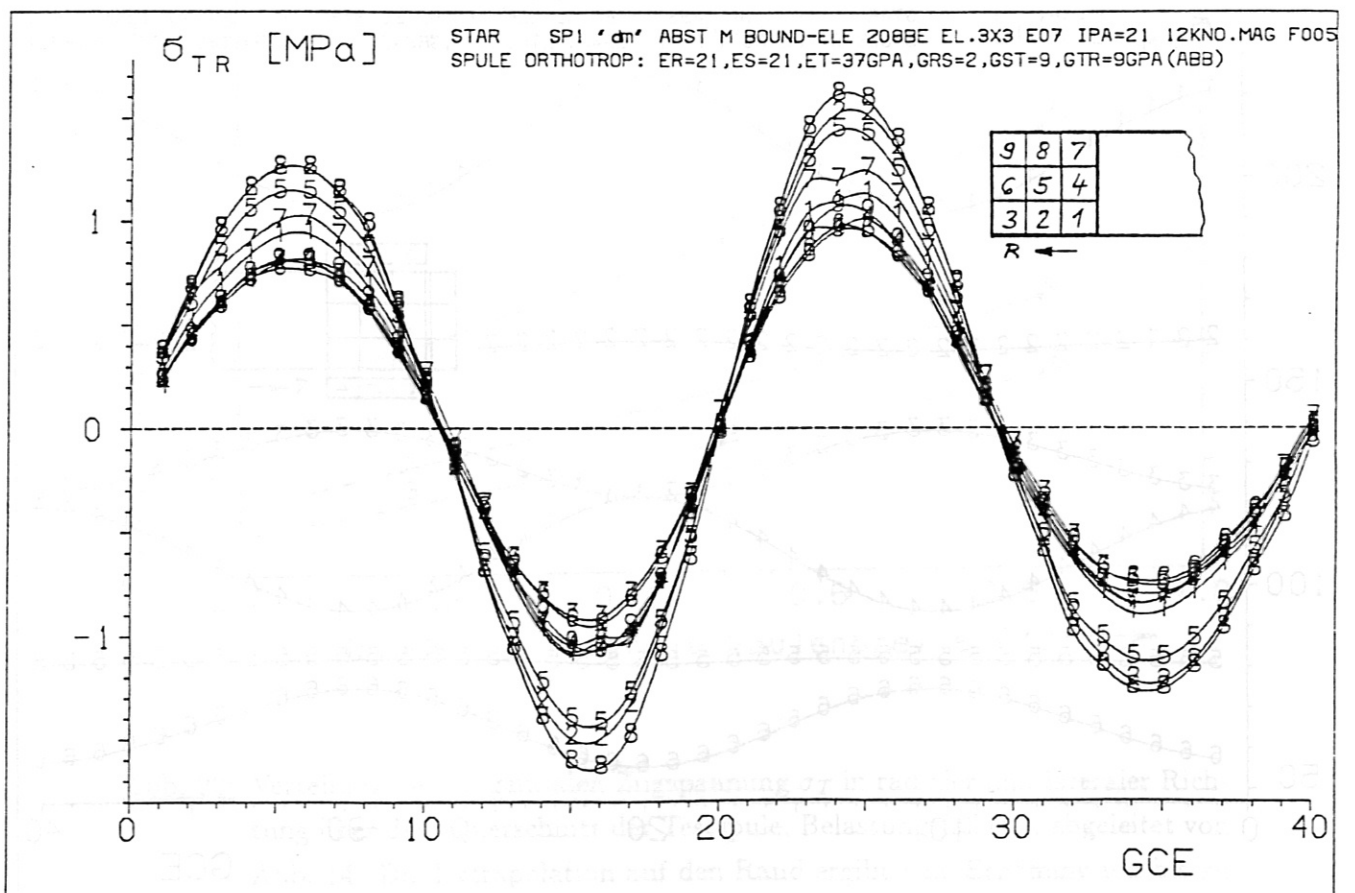


Abb. 17: Schubspannung σ_{TR} in der Testspule, Belastungsfall (C).

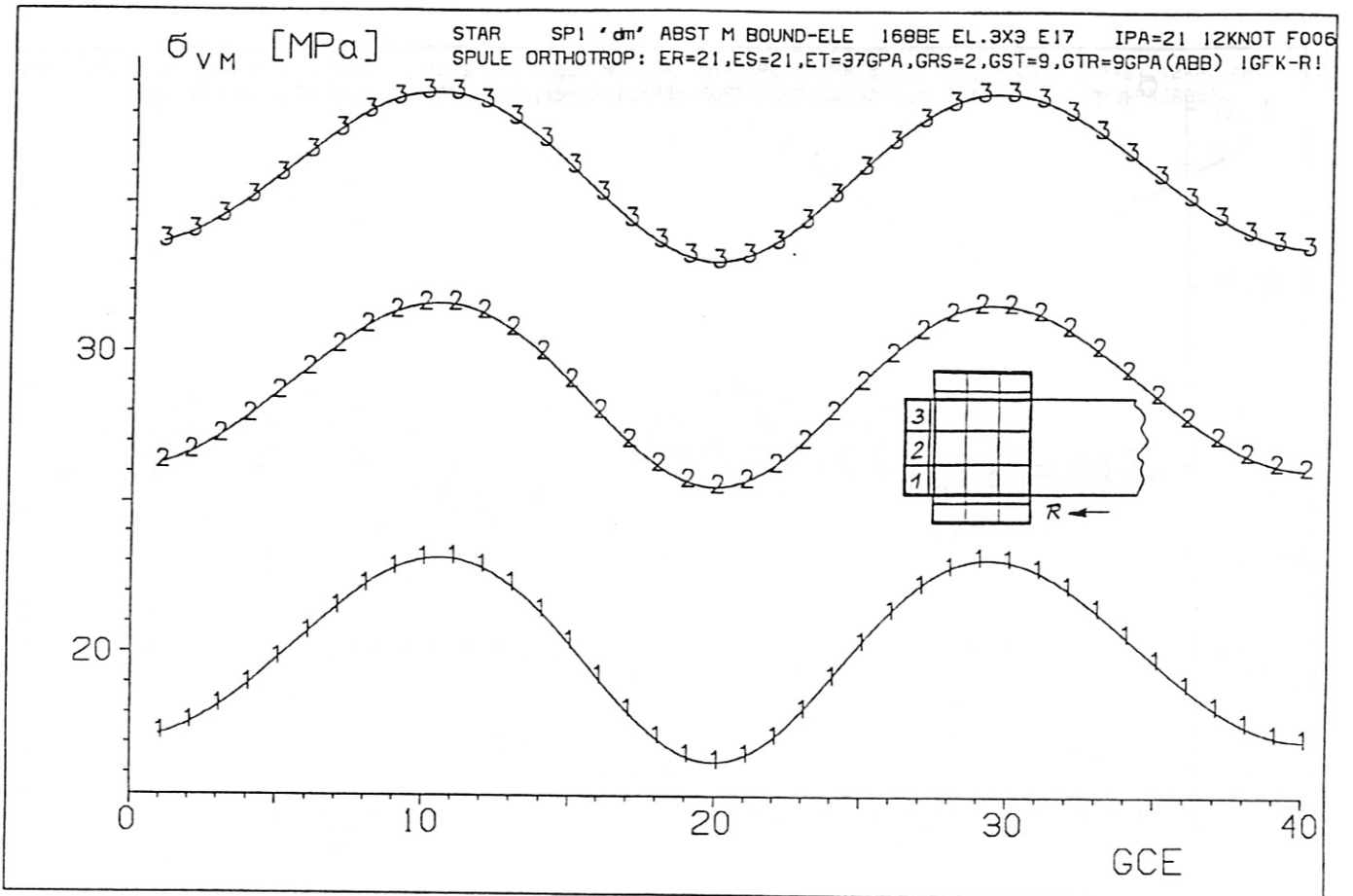


Abb. 18: Von-Mises-Spannung σ_{vM} in der GFK-Bandage, Belastungsfall (C).

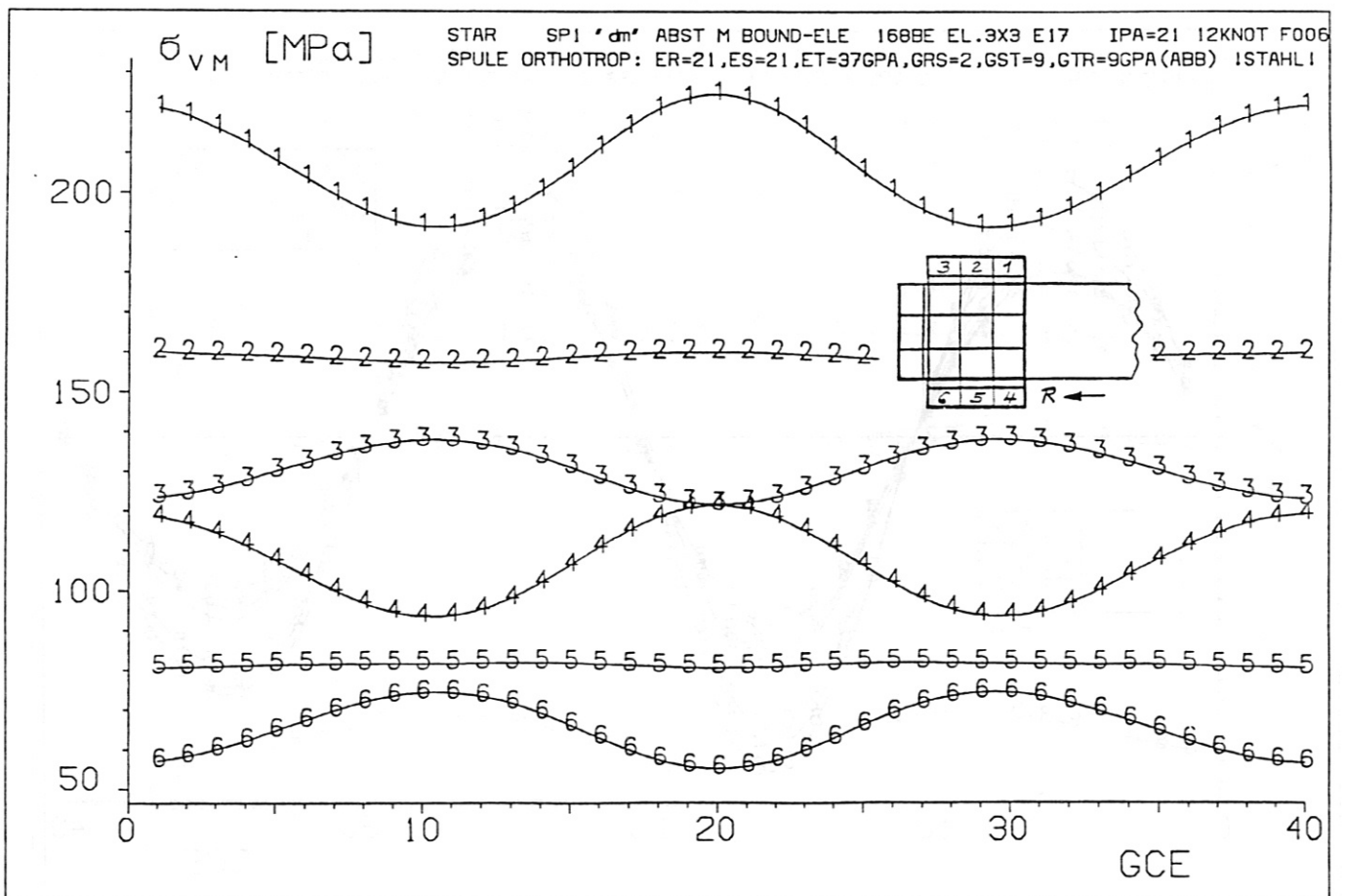


Abb. 19: Von-Mises-Spannung σ_{vM} in den Seitenplatten, Belastungsfall (C).

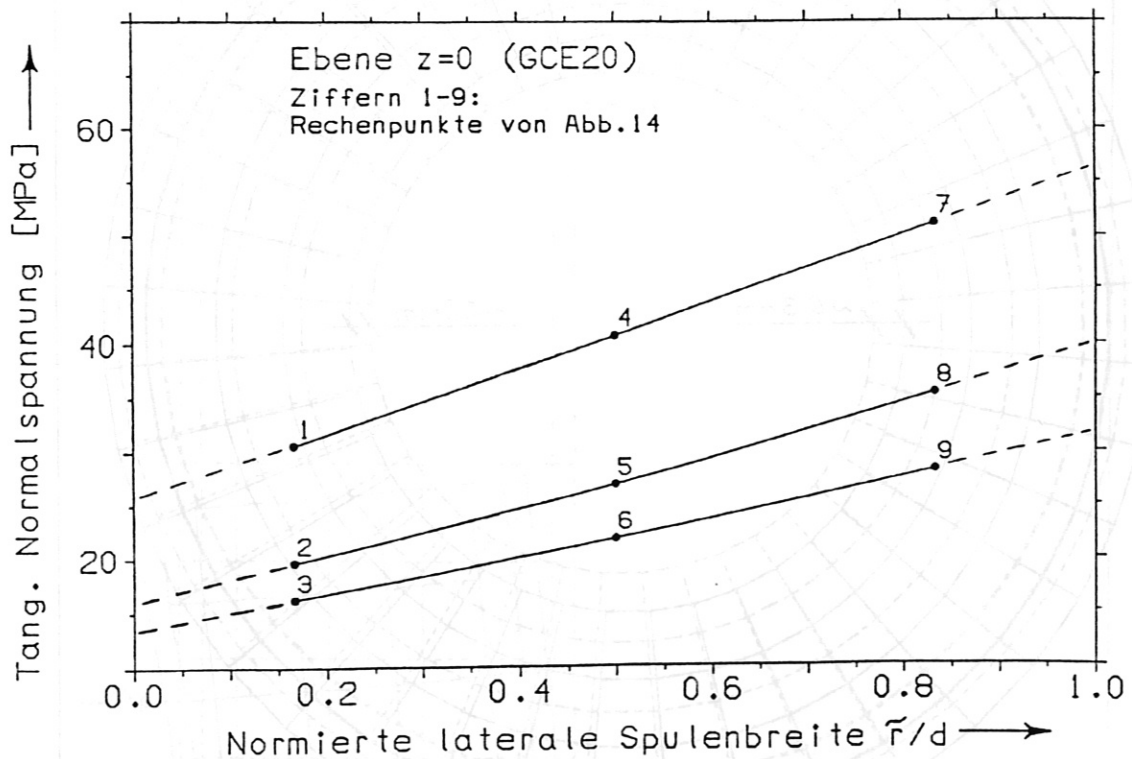
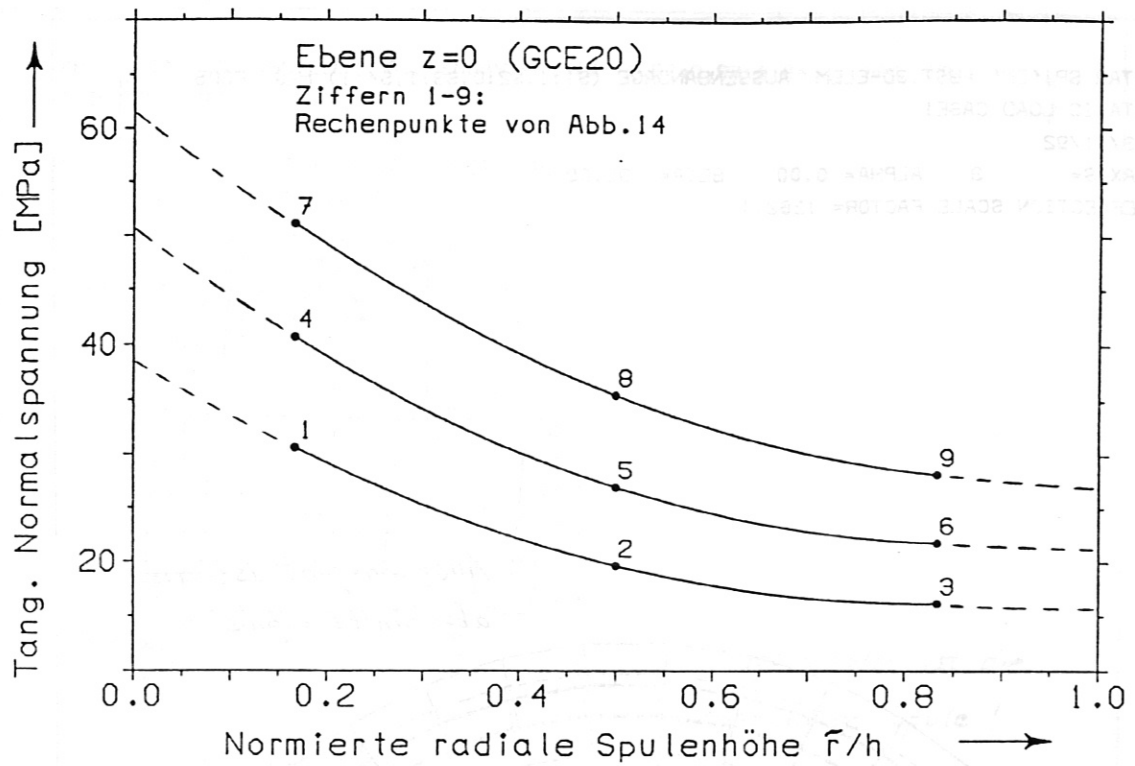
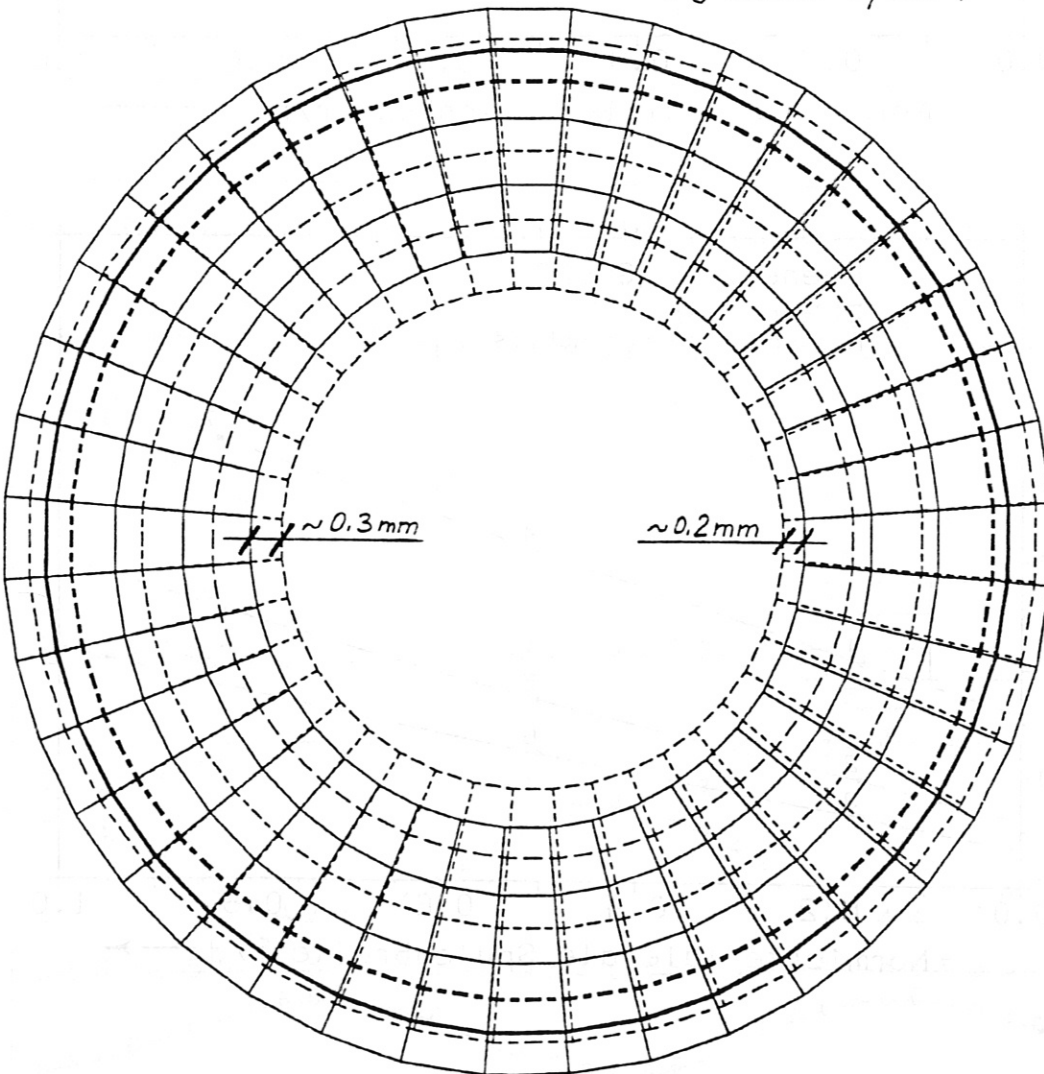


Abb. 20: Verteilung der tangentialen Zugspannung σ_T in radialer und lateraler Richtung über dem Querschnitt der Testspule, Belastungsfall (C), abgeleitet von Abb. 14. Die Extrapolation auf den Rand ergibt eine Erhöhung um bis zu 20 % gegenüber den berechneten maximalen Werten.

STAR SP1'DM' ABST.3D-ELEM AUSSEN BANDAGE (S1:1,S2:0,S3:1,S4:1) MAG F005
STATIC LOAD CASE1
03/11/92
IAXIS= 3 ALPHA= 0.00 BETA= -90.00
DEFLECTION SCALE FACTOR= 1282.1



*Ausgangsplot ist die
abgekühlte Spule !*



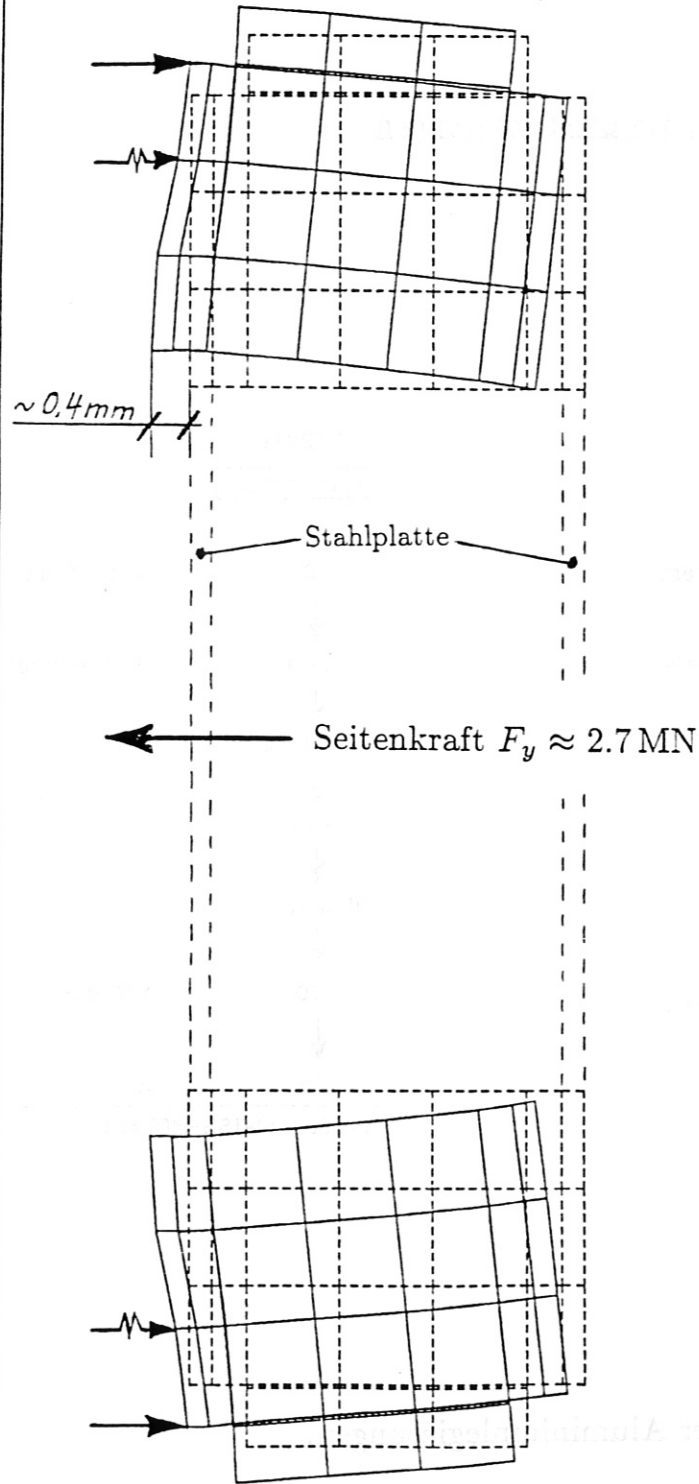
IPP-CRAY star_dm

1/0001 D2-05

11.03.92 16.05:40
11.03.92 10:21:18

Abb. 21: Deformation der Testspule in der Ebene $y = 0$, Belastungsfall (C).

STAR SP1'DM' ABST.3D-ELEM AUSSEN BANDAGE (S1:1,S2:0,S3:1,S4:1) MAG F005
 STATIC LOAD CASE1
 03/11/92
 IAXIS= 1 ALPHA= 0.00 BETA= 90.00
 DEFLECTION SCALE FACTOR= 1179.0



Ausgangsplot ist die abgekühlte Spule!

Abb. 22: Deformation der Testspule in der Ebene $z = 0$, Belastungsfall (C).

Aluminium-Legierungen

Typ Legierung	6060T6 Al Mg Si 1	7020T6 Al Zn4.5 Mg1
Streckgr., Rp0,2 [Mpa]	100 Extrudiert ↓ <120 Stabilisiert ↓ Wickeln ↓ 270 Härten/RT ↓ 350 4 K <hr style="width: 80%; margin: 0 auto;"/> (EMI-LMI)	80 Extrudiert ↓ <240 Kaltauslagern ↓ Stoßglühen ↓ ~130 ↓ Wickeln ↓ 300 Härten/RT ↓ 350 4 K <hr style="width: 80%; margin: 0 auto;"/> (NOELL/SWISS-METAL)

Abb. 23: Technische Daten der Aluminiumlegierungen.