

MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK

GARCHING BEI MÜNCHEN

FE-UNTERSUCHUNGEN FÜR DEN MODULSPULENSATZ VON W7-AS

O. Jandl, J. Sapper, J. Simon-Weidner

IPP Z/1

Januar 1994

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.

Erratum

Die zu den Bildunterschriften 42 - 57 eingefügten Bilder wurden zyklisch vertauscht.
Die richtige Zuordnung ist:

Bild	57	42	43	...	54	55	56
Bildunterschrift	42	43	44	...	55	56	57

The figures belonging to the text strings of figure 42 to 57 have been misplaced in a cyclic way.
The wright position would be:

figure	57	42	43	...	54	55	56
figure text	42	43	44	...	55	56	57

Inhalts-Verzeichnis

0. Einleitung
1. Entwurfsmodell
2. IABG-Berechnung
3. Spule MF3
4. Gemessene Verformungen
5. Zusätzliche Abstützung
6. Übernahme des IABG-Modells, erstellt für die Berechnung mit dem Programm MSC/NASTRAN, für eine Simulation mit dem Programm ANSYS.
- 7.1 Simulation des Gleitens mittels Gap-Element (ANSYS STIF40)
- 7.2 Simulation des Gleitens durch Gap-Element (ANSYS STIF52)
 - 7.2.1 Darstellung der Beanspruchung der Spule MF3 bei Verwendung des Gap-Elements Typ 52 während der Iterationen
 - 7.2.2 Ablastungsverhalten der Spule MF3 bei Anwendung des Gap-Elements Typ 52 während der Iterationen
- 7.3 Simulation des Gleitens durch Truss-Elemente (Ansys-Element Stif8)
- 7.4 Resumee
8. Gesamtmodell
9. Geometrisch angepaßtes Modell - Orthotropie
 - 9.1 Bicubische Splinefunktionen
 - 9.2 Vergleich - isotropes und orthotropes Material
 - 9.3 Radiale Kissenabstützung (Spule 3 Elemente 39-47 Bild 5,6)
 - 9.4 Bettung des geometrisch angepaßten Modelles
 - 9.5 Bettung bei orthotropem Material
 - 9.6 Untersuchung detaillierter lokaler Verschiebungs- und Spannungsverhältnisse:
10. Vergleichsrechnung mit dem FEM-Code ADINA
11. Zusammenfassung
12. References

Abstract

The structural design of the W 7-AS confinement system was made in the years 1983/84. Using the symmetry of mechanical loads within each of the five modules, a finite element model for one half module was generated. Structure shell, supporting elements and coils were simulated by a relatively coarse model consisting of 1095 FE's, 6948 nodes and 25956 degrees of freedom. The FE-modelling and simulation of magnetic and thermal loads had been done by IABG, Ottobrunn, Munich, using the program MSC/NASTRAN. A refined analysis with the cut out of the individual coils taking into account the actual embedding of the coils with sliding surfaces had the aim to get more detailed calculations of internal stress and strain components of the winding pack. The critically stressed circumferential portion of MF-coil No. 3 together with a possible slippage of that coil within the structure was recognized. A solution for the embedding of the coil was worked out based on the calculated results. Following the FE-results at that time, no radial embedding of coil No. 3 seemed to be necessary along the outward coil circumference.

During the commissioning of W 7-AS with full field some local problems appeared in the coil system of the experiment with the effect of some slipping of coil No. 3 together with unallowed stress and strain levels in the compound material of the winding pack. The tangential stresses at the region of minimum coil curvature and the shear stress in the mid-plane of the pancake reached values of twice compared to the allowed ones.

With the aim to get a better understanding of the local strain and stress behaviour of the coil No. 3 the original IABG model of the coil system had been reactivated using another FE-programm ANSYS and comparisons had been made with models based on a new slipping capability between coils and surrounding structure. Results of these calculations show a good correspondence to the measured values. Additionally a radial embedding of coil No. 3 had been introduced with the effect of a reduction of stresses of the overloaded coil by a factor of 2.

Kurzfassung

Das Konzept der Machbarkeit des W 7-AS Experiments wurde in den Jahren 1983/84 untersucht. Da die mechanischen Lasten symmetrisch in jedem der fünf Module angeordnet sind, wurde ein Modell eines Moduls für Finite Element Berechnungen aufgebaut. Strukturschale, Abstützanordnungen und Spulen wurden durch 1095 Elemente, 6948 Knoten und 25956 Freiheitsgrade wiedergegeben. Die FE-Modellierung und die Simulation der magnetischen und thermischen Belastungen wurden von der IABG, Ottobrunn, München, durchgeführt unter Verwendung des Programms MSC/NASTRAN. Eine verfeinerte Analyse als Ausschnitt der individuellen Spulen unter Berücksichtigung der wirklichkeitsnahen Einbettung der Spulen mit Gleitmöglichkeit hatte das Ziel, genauere Aussagen zu den internen Spannungs- und Dehnungskomponenten im Windungsmaterial zu erhalten. Eine kritische Beanspruchung im Umfangsbereich der MF-Spule Nr. 3 mit der Neigung zu einer eventuellen Gleitung dieser Spule gegenüber der Struktur war erkannt worden. Eine Lösung für die Einbettung der Spule wurde ausgearbeitet unter Zugrundelegung der vorliegenden Ergebnisse. Demnach war es, basierend auf den FE-Berechnungen zu der damaligen Zeit, nicht notwendig, eine radiale Abstützung der Spule 3 entlang dem Umfang dieser Spule vorzunehmen.

Während der Beaufschlagung von W 7-AS mit vollem Feld wurden einige lokale Beanspruchungen im Spulensystem des Experiments sichtbar, die auf eine Gleitung der Spule Nr. 3 zugleich mit der Erscheinung unerlaubter Spannungs- und Dehnungszustände im geschichteten Material des Windungsbereiches schließen ließ. Die tangentialen Spannungskomponenten am Ort der größten Krümmung der Spule und die Schubbeanspruchung in der Mittel-Ebene der Sandwich-Konstruktion erreichten Werte, die um ein zweifaches über den zulässigen Werten lagen.

Um ein besseres Verständnis über die lokalen Dehnungs- und Spannungsverhältnisse der Spule 3 zu erhalten, wurde das ursprüngliche IABG-Modell des Spulensystems für Berechnungen mit einem anderen FE-Programm ANSYS vorbereitet und es wurden Vergleichsrechnungen basierend auf verbesserten Gleiteigenschaften zwischen Spule und Umgebung durchgeführt. Ergebnisse dieser Rechnungen zeigen eine bessere Übereinstimmung mit gemessenen Werten. Ergänzend wurde eine zusätzliche radiale Kissenabstützung der Spule 3 modelliert und damit eine Reduzierung der Spannungen um den Faktor 2 bei der überlasteten Spule errechnet.

0. Einleitung

Das Stellaratorexperiment W7-AS ist mit einem modularen Spulensatz, bestehend aus 45 nichtebenen Einzelspulen, ausgerüstet. Diese sind in einer Strukturschale gelagert (Bild 1-4). Die durch den Lorentz-Effekt hervorgerufenen Kräfte pro Volumeneinheit führen infolge der komplexen Geometrie der Wickelkörper zu einer unregelmäßigen Verteilung der mechanischen Spannungen. Unter Ausnutzung der modularen Symmetrie und der Innenrandbedingung eines sehr steifen zentralen Stützrohres kann das Problem der Spannungermittlung auf eine Strukturhalbschale mit 4 Spulen zurückgeführt werden. Beim Bau des Experimentes wurden zur Ermittlung der Auslegungsdaten entsprechend dem damaligen Stand verfügbarer FE-Systeme (1983/84) folgende Rechnungen durchgeführt:

1. Entwurfsmodell

Ein FE-Modell für die Strukturhalbschale mit Spulenabstützelementen und den Spulen wurde erstellt. Die Spulen sind fest an die Struktur gekoppelt, benutzt werden "rigid body connections" RBC. Alle Elemente sind isotrop bezüglich der Ingenieurkonstanten, für die Spulen wird ein Mischelastizitätsmodul benutzt, der wesentlich niedriger als der von Stahl ist. Die Kraftverteilung wird mit dem Programm EFFI /1/ bestimmt und die ermittelten Kraftdichten mit dem Programm SHAPE /2/ zu Kräften umgerechnet, die an den Knoten der Spulen angreifen. Dieses Verfahren wird allgemein im IPP verwendet, so z.B. in /3/, /7/ und /8/. Die Ergebnisse dieser Analyse ergeben ein erstes Bild für die Strukturbelastung, jedoch nicht für die Spulen /3/.

2. IABG-Berechnung

Bei der Auswertung des Modells nach 1) fällt auf, daß die Spulen Zugkräfte senkrecht zu den Fügeflächen in die Struktur übertragen. Dies ist praktisch wegen einer angeordneten Trenn/Gleitschicht nicht möglich. Für einen zweiten Lauf wurden deshalb die RBC an allen Stellen mit Zugkräften gelöst.

Die erneute Rechnung ergab eine Druckablastung bis auf eine geringe Knotenzahl mit vernachlässigbar kleinen Zugkräften senkrecht zu den Fügeflächen. Das Ergebnis dieser Rechnung wurde zur Strukturoptimierung benutzt. Die Spulenbeanspruchung kann insoweit ausgewertet werden, daß hochbeanspruchte Bereiche bzw. Spulen erkannt werden /3/.

3. Spule MF3

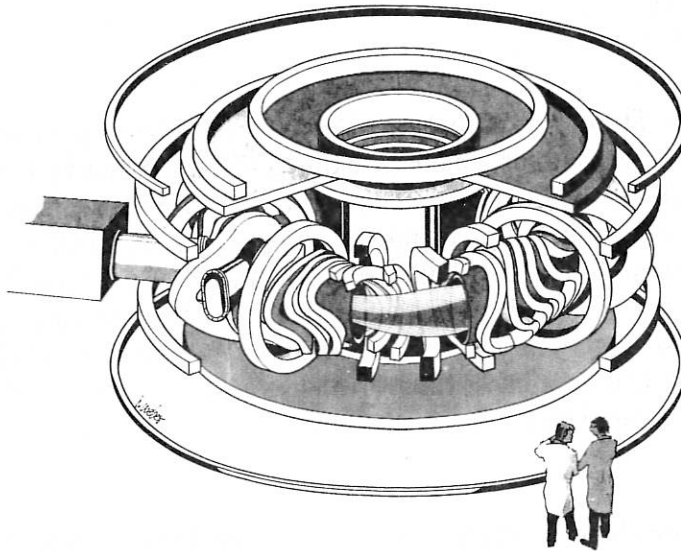
Aufgrund der Ergebnisse nach 2) wurde die Spule MF3 für eine weitere verfeinerte Betrachtung ausgewählt. Das real mögliche Gleiten der Spule wurde durch Lagerung der Spule mit "Multipointconstraints" gegen die angrenzenden Strukturelemente modelliert. Die Rechenergebnisse ergaben ein Gleiten der Spule entsprechend den Erwartungen und erschienen - mangels Vergleichsmöglichkeiten und Meßergebnissen - plausibel. Mit den Randbedingungen der Gesamtspulenverformung wurde für einen hochbelasteten Abschnitt eine noch weiter verfeinerte Berechnung der Spannungen durchgeführt /3/.

4. Gemessene Verformungen

Bei Inbetriebsetzung des Experimentes ergab sich bei der Überprüfung der gemessenen Verformungen ein nicht erwarteter hoher Anteil der Verformungen bei der Spule 3 in Umfangsrichtung, der um einen Faktor von ca. 8 von den ursprünglichen Berechnungen abweicht. Die Höhe der Verformungen läßt auf eine unzulässige mechanische Belastung einzelner Spulenbereiche in Umfangsrichtung schließen. Da zu diesem Zeitpunkt verbesserte Programme und Rechenmöglichkeiten mit speziellen Elementen zur Untersuchung des Gleitverhaltens (Truss-, Gapelemente) verfügbar waren, wurde eine

erneute Betrachtung des Problems vorgenommen, nachdem die Spule zur Sicherheit mit einer zusätzlichen radialen Abstützung versehen wurde.

5. **Zusätzliche Abstützung**
 Durch die Einfügung zusätzlicher Abstützungen zum Schutz der Spule (siehe Kap. 9.4) war es erforderlich, das Rechenmodell entsprechend zu modifizieren, um die Auswirkung dieser nachträglichen Abstützmaßnahmen auf die mechanische Beanspruchung des Wickelkörpers erfassen zu können /4/.



Wendelstein VII-AS

Bild 1a: Das W 7-AS Stellarator Experiment

Anmerkung

Alle in diesem Bericht berechneten Verformungen und Spannungen gelten für den sog. Auslegungslastfall, mit dem als Referenzbelastung 1983 gerechnet wurde. Die sich beim aktuellen Betrieb des Experimentes mit den inzwischen gemessenen optimierten Betriebsparametern und den entstandenen Störfallparametern ergebenden Belastungen sind im "Kurzbericht/Übersicht" vom Juli 1992 und dessen Ergänzungen dargestellt.

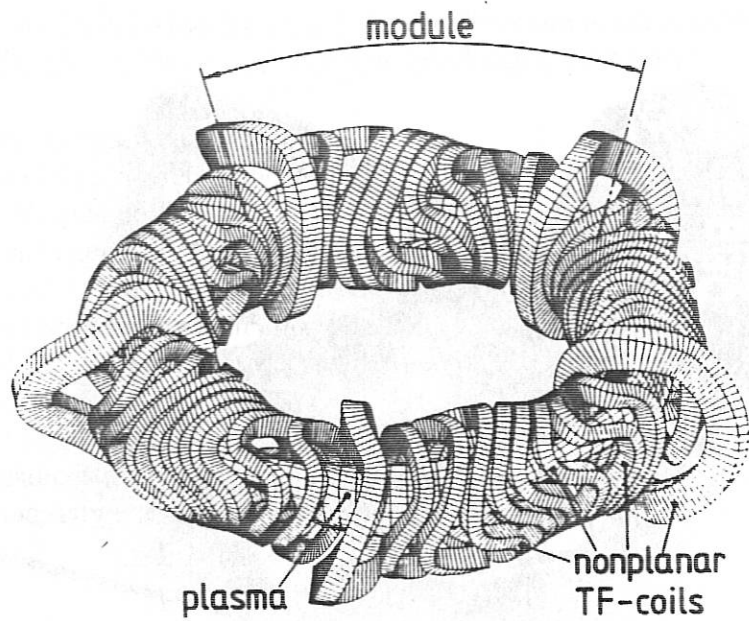


Bild 1b: Das W 7-AS Stellarator Experiment
Modularer Spulensatz

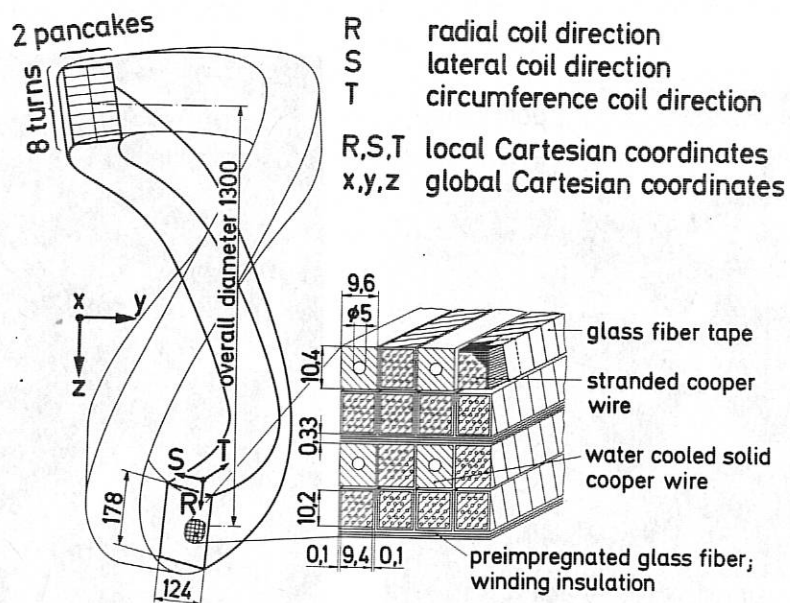


Bild 2a: Nicht-planare MF-Spulen für W 7-AS
Spulensatz bestehend aus 2 Pancakes und 16 Kupferwindungen getrennt durch
imprägnierte Glasfaser-Matten

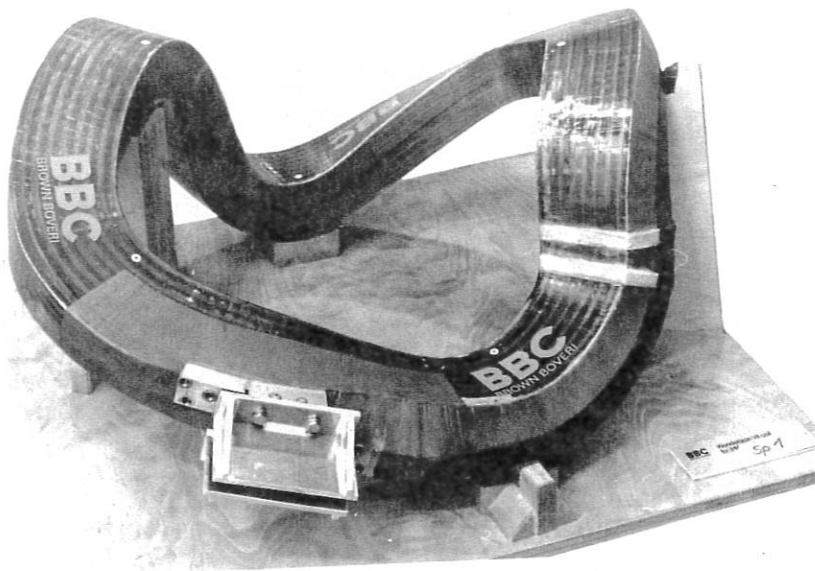
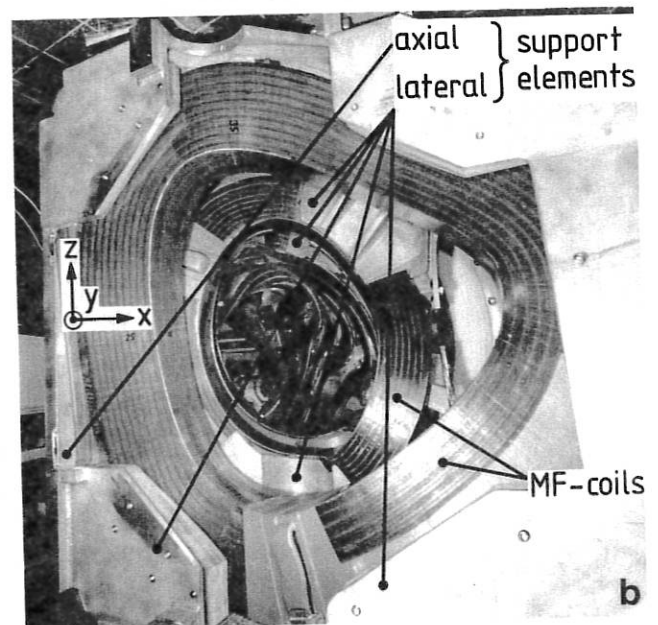
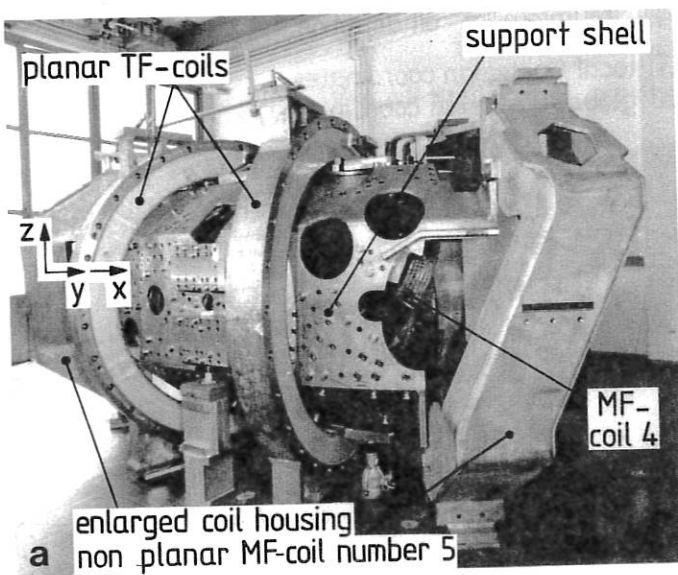


Bild 2b: Nicht-planare MF-Spulen für W 7-AS
Feldspule (Nummer 1) vor dem Einbau in die Struktur



Ein montiertes Modul des magnetischen Einschluß-Systems
(nur magnetisches Einschluß-System, Vakuum Gefäß nicht installiert)

Bild 3: von außen gesehen

Bild 4: Blick in ein Modul

6. Übernahme des IABG-Modells, erstellt für die Berechnung mit dem Programm MSC/NASTRAN, für eine Simulation mit dem Programm ANSYS.

Das IABG Rechenmodell besteht aus:

- vier nicht planaren Spulen, die mit je 48 Volumen Hexahedron Elementen (20 Knoten pro Element) vernetzt sind (6912 DOF - Freiheitsgrade)
- einer tragenden Schalenstruktur mit 653 achtknotigen Schalelementen und 62 sechsknotigen Schalelementen (11975 DOF)
- einer Stützstruktur mit 298 Volumen Hexahedron Elementen (20 Knoten) und 22 Volumen Pentahedron Elementen (10 Knoten pro Element) - (6858 DOF)

Der Analyse liegt die Annahme eines homogenen linear elastisch-isotropen Materialverhaltens für die Spule zugrunde.

Folgende Materialwerte wurden eingesetzt:

Stützstruktur $E = 210 \text{ GPa}$ $\nu = 0,3$

Spulen $E = 60 \text{ GPa}$ $\nu = 0,3$

Das Rechenmodell sollte das Gleiten zwischen Abstützelementen und Spule erlauben.

Weiter sollte das Rechenmodell senkrecht zu der Trennebene nur Druckspannungen und keine Zugspannungen übertragen. Aus 1) geht hervor, daß um dieses Verhalten zu modellieren die RBC (rigid-body-connections) benutzt wurden.

Aus den 512 im ersten Rechenlauf ursprünglich benutzten RBC wurden für den zweiten Rechenlauf 132 außer Kraft gesetzt. Bild 5 zeigt das Verhalten der Spule MF3 nach dem 2. Rechenlauf. Dieses Verfahren wurde mit dem Code ANSYS simuliert und zwar so, daß die RBC durch TRUSS-Elemente ersetzt wurden. Dieses Verfahren ist unter 7.3 ausführlich beschrieben. Dabei zeigte sich, daß die 1. Iteration mit ANSYS ein ähnliches Verhalten der Spule MF3 wie die 2. Iteration des IABG Modells mit dem Code NASTRAN aufweist. Im Gegensatz dazu zeigen die im Bild 6 wiedergegebenen Meßwerte der Spule 3 einen beträchtlich höheren Anteil der Verformungen in tangentialer Richtung. Diese Meßwerte stehen im Widerspruch zu den ursprünglichen rechnerischen Abschätzungen. Bei der nachträglichen Interpretation der IABG-Ergebnisse liegt der Verdacht nahe, daß die Verformbarkeit der Spule 3 in der tangentialen Richtung blockiert war.

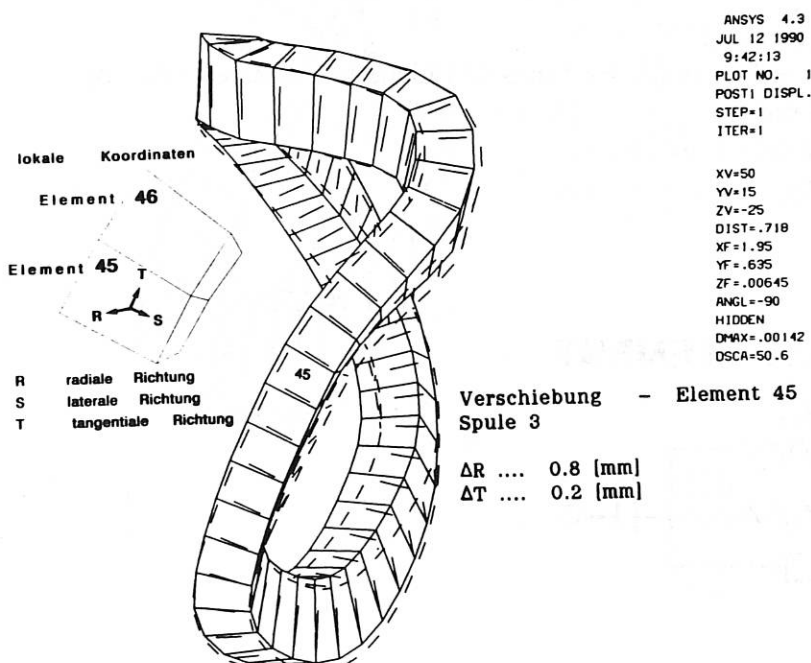


Bild 5: Berechnung IABG (1984) Verformung Spule 3

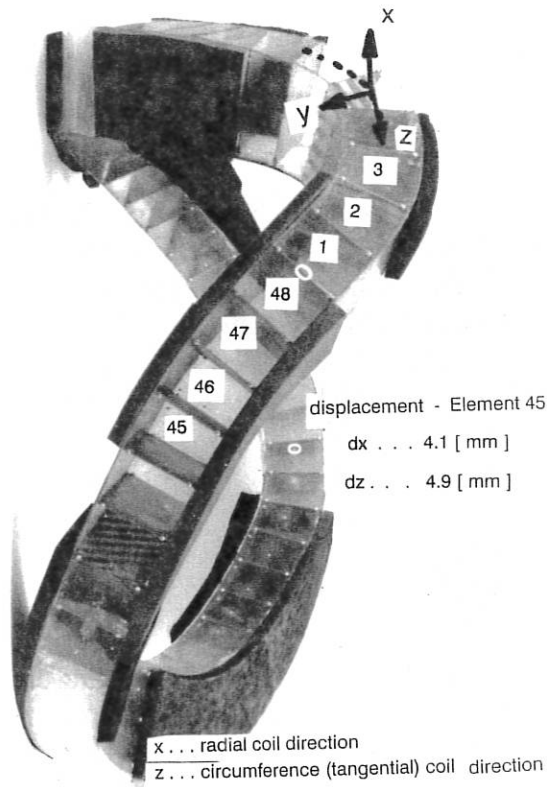


Bild 6: gemessene Verformungen der Spule 3

Bild 6: gemessene Verformungen SPULE 3

7.1 Simulation des Gleitens mittels Gap-Element (ANSYS STIF40)

Die HEXA20-Elemente des ursprünglichen MSC/NASTRAN Modells wurden hierbei in entsprechende Volumenelemente für die ANSYS-Berechnung umgewandelt, wobei diese Volumenelemente mit quadratischem isoparametrischen Ansatz auf die Anwendung isotroper Materialeigenschaften beschränkt sind. Anstelle der RBC wurde das für die Gleitung geeignete STIF40 (Gapelement) in ANSYS verwendet. Das hierbei erzielte Ergebnis (Bild 7) ist in Folgendem zusammengefaßt:

max Verschiebung 7,118 mm (Bild 7)

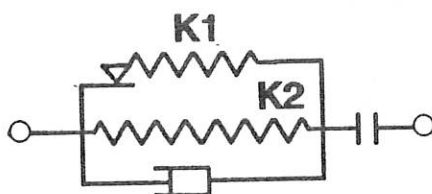
Verschiebung in lokalen Koordinaten des Elements 45 (lokale Koordinaten - Bild 5)

$d_R = 4,03 \text{ mm}$ $d_S = 0,003 \text{ mm}$ $d_T = 4,03 \text{ mm}$

Spannungen v.Mises gefährdeter Bereich

Element-Nr.4 $\sigma_E = 392 \text{ MPa}$

COMBINATION ELEMENT



Charakteristika STIF40 (Combination Element):

Doppelknoten dürfen aufeinander liegen.

Gleitsteifigkeit K1

Anfangsöffnung

Haftkraft

Dämpfer

Bilineare Steifigkeit (Drucksteifigkeit) K2

Richtung in 1 von 6 DOF vorgebar

sehr viele Parameter - für unsere Zwecke relativ kompliziert, wenn auch komfortabel

Die Drucksteifigkeit-Richtung ist konservativ

Steifigkeiten K1 und K2 richtig einzusetzen (im Verhältnis zur Struktursteifigkeit)

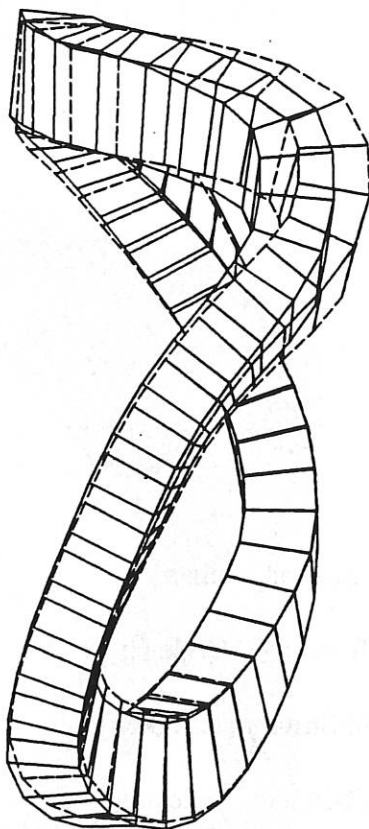
erfordert sehr viel Erfahrung (zeitaufwendig)

K2 groß -> Kontakt sehr gut erfüllt -> numerisch problematisch

K2 klein -> Kontakt nur näherungsweise erfüllt -> numerisch gut

Bewertung: erhöhte tangentielle Verformung (wie bei Messung) kann mit STIF40 erhalten werden

Bei der Anwendung ist mit einem erhöhten programmtechnischen Aufwand gegenüber STIF52 zu rechnen (CPU Zeitaufwand).



```

ANSYS  4.4A
MAR 18 1993
10:13:54
PLOT NO.  1
POST1  DISPL.
STEP=1
ITER=200
DMX =0.007118

```

```

DSCA=12.125
XV  =50
YV  =15
ZV  =-25
DIST=0.8631
XF  =1.917
YF  =0.6755
ZF  =-0.0025
ANGZ=-90
PRECISE HIDDEN

```

Bild 7: Verformung - Spule 3
ANSYS Element Type 40

7.2 Simulation des Gleitens durch Gap-Element (ANSYS STIF52)

Die Schwierigkeiten bei der Handhabung des Interface-Elements STIF40 führten dazu, für die Untersuchung des Gleitverhaltens der Einzelspule MF3 ein anderes Gap-Element mit der Bezeichnung STIF52 anzuwenden. Dieses Interface-Element setzt im Unterschied zu STIF40 voraus, daß die bei der Gleitung gegenüberliegenden Punkte zwischen der Abstützstruktur und der Einzelspule nicht zusammenfallen dürfen. Aus diesem Grund war eine Erstellung eines neuen Modells erforderlich, um die geometrische Modellierung des Spaltes zu verwirklichen. Um den Arbeitsaufwand für Untersuchungen mit unterschiedlichen Anfangsspaltweiten gering zu halten, wurde der Spaltabstand zwischen Abstützstruktur und Einzelspule mit 1.0 mm generiert. Dadurch konnte in den anschließenden Untersuchungen der Einfluß einer veränderten Anfangsplattenweite von 0,0 bis 1,0 mm auf das Ablastungsverhalten der Spule MF3 erhalten werden. Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigen eine völlige Übereinstimmung des tangentialen Gleitverhaltens der Spule MF3 mit den unter 7.1 gewonnenen Ergebnissen:

Verschiebungen: (Bild 8)

max Verschiebung = 7,11 mm

Verschiebung in lokalen Koordinaten im Element 45

(lokale Koordinaten - Bild 5)

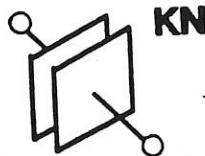
$d_R = 4,031 \text{ mm}$ $d_S = 0,0029 \text{ mm}$ $d_T = 4,031 \text{ mm}$

Spannungen v.Mises gefährdeter Bereich (Bild 9)

Element-Nr. 4 $\sigma_E = 392 \text{ MPa}$

Charakteristika STIF52 (Interface Element)

INTERFACE ELEMENT



2 Knoten mit Abstand (dürfen nicht zusammenliegen)

Reibungskoeffizient > 0 .

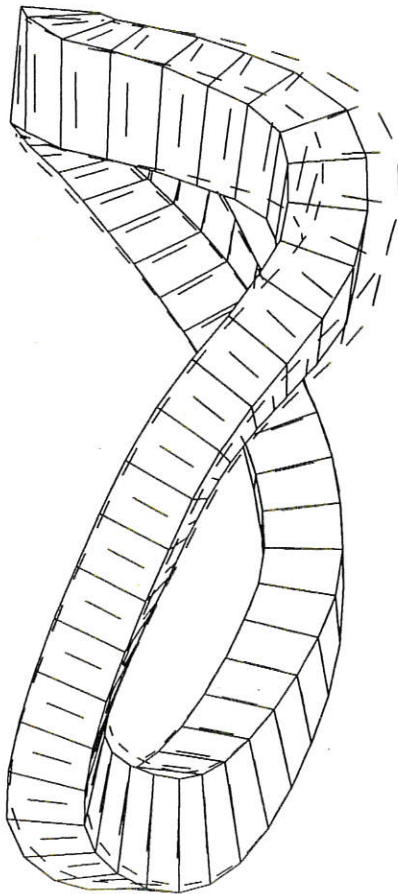
Gleitsteifigkeit

Bilineare Steifigkeit (Drucksteifigkeit)

Die Drucksteifigkeits-Richtung kann man als nonkonservativ annehmen

Bewertung: übereinstimmende hohe tangentiale Verformung (Vergleich
Messung, Rechnung STIF40)
Drucksteifigkeit KN ist im Verhältnis zur Struktursteifigkeit
sorgfältig zu wählen - empfohlen:
KN wird mit Faktor 10^6 gegenüber E-Modul der Spule angesetzt.

Bei weiteren Berechnungen wurde bevorzugt mit STIF52 gearbeitet.



ANSYS 4.3
 JUL 9 1990
 14:17:22
 PLOT NO. 1
 POST1 DISPL.
 STEP=1
 ITER=200

XV=50
 YV=15
 ZV=-25
 DIST=.718
 XF=1.95
 YF=.635
 ZF=.00645
 ANGL=-90
 HIDDEN
 DMAX=.00711
 DSCA=10.1

Bild 8: Verformung - Spule 3
 ANSYS Element Type 52



ANSYS 4.4A
 JAN 13 1993
 16:04:17
 PLOT NO. 1
 POST1 STRESS
 STEP=1
 ITER=7
 SIGE (AVG)
 DMX =0.006967
 SMN =0.119E+08
 SMX =0.392E+09
 SMXB=0.415E+09

XV =50
 YV =15
 ZV =-25
 DIST=0.8631
 XF =1.917
 YF =0.6755
 ZF =-0.0025
 ANGZ=-90
 CENTROID HIDDEN

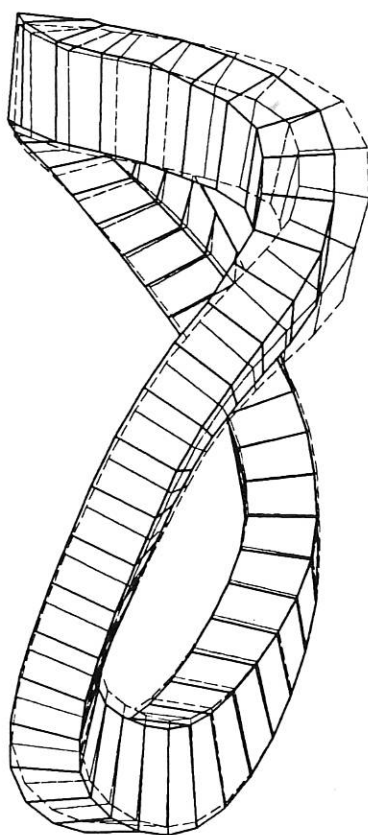
█	0.119E+08
█	0.541E+08
█	0.963E+08
█	0.139E+09
█	0.181E+09
█	0.223E+09
█	0.265E+09
█	0.307E+09
█	0.350E+09
█	0.392E+09

Bild 9: Vergleichsspannung nach der
 Hypothese "von Mises"
 Spule 3 -
 ANSYS Element Type 52

7.2.1 Darstellung der Beanspruchung der Spule MF3 bei Verwendung des Gap-Elements Typ 52 während der Iterationen

Die geringfügigen Unterschiede der Verformungen (22 %) bei der Spule MF3 (Bild 8 und Bild 10) lassen sich dadurch erklären, daß die Spule MF3 im Säulenbereich einmal im globalen (Bild 8) und später (Bild 10) im lokalen Koordinatensystem gelagert wurde (beide Systeme sind in dem Säulenbereich - Bild 5 - nahezu identisch).

Das Verhalten der Verformungen während einiger herausgegriffener Iterationen zeigen die Bilder 10 bis 13, die dazu gehörenden Vergleichsspannungen sind in den Bildern 14 bis 17 dargestellt.



```

ANSYS  4.4A
JAN 19 1993
14:09:44
PLOT NO.  1
POST1 DISPL.
STEP=1
ITER=10
DMX =0.005834
ERPC=52.185

DSCA=14.79
XV  =50
YV  =15
ZV  =-25
DIST=0.862915
XF  =1.916
YF  =0.675533
ZF  =-0.002466
ANGZ=-90
PRECISE HIDDEN
  
```

Bild 10: Verformung - Spule 3
ANSYS Element Typ 52
Lagerung im lokalen Koordinatensystem
10. Iteration

Verschiebungen:

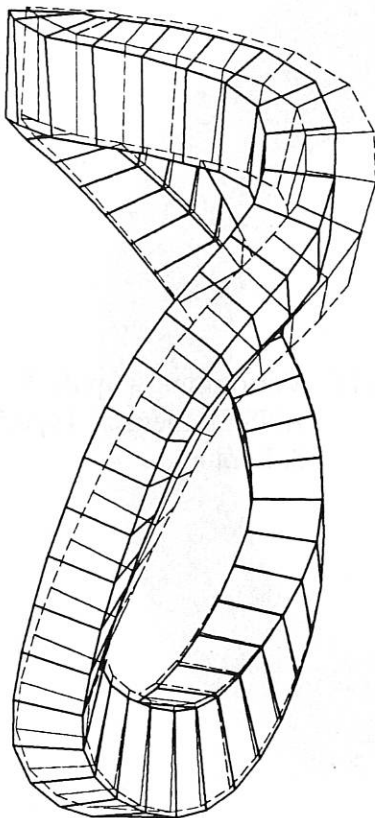
max Verschiebung = 5,834 mm

Verschiebung in lokalen Koordinaten im Element 45
(lokale Koordinaten - Bild 5)

$d_R = 3,36 \text{ mm}$ $d_S = 0,0024 \text{ mm}$ $d_T = 3,15 \text{ mm}$

Spannungen v. Mises gefährdeter Bereich

Element-Nr. 4 $\sigma_{E_{\max}} = 395 \text{ MPa}$

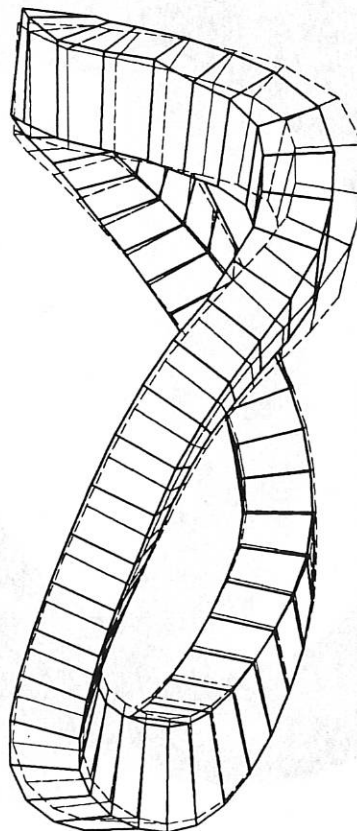


ANSYS 4.4A
 JAN 19 1993
 17:13:14
 PLOT NO. 1
 POST1 DISPL.
 STEP=1
 ITER=1
 DMX =0.054601
 ERPC=30.124

DSCA=1.58
 XV =50
 YV =15
 ZV =-25
 DIST=0.862915
 XF =1.916
 YF =0.675533
 ZF =-0.002466
 ANGZ=-90
 PRECISE HIDDEN

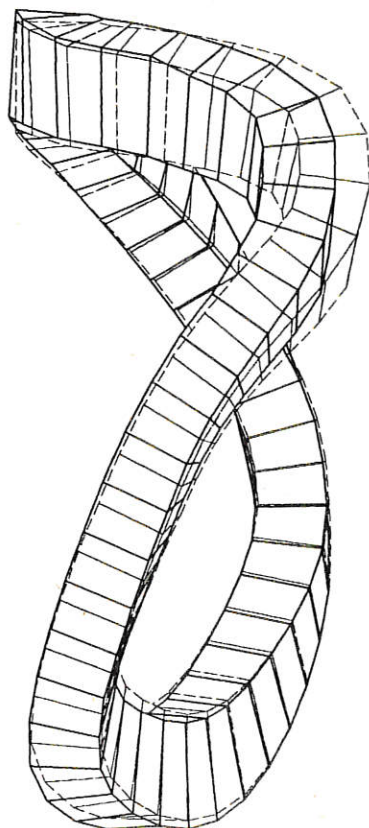
Bild 11: Verformung - Spule 3
 ANSYS Element Type 52
 1. Iteration

Bild 12: Verformung - Spule 3
 ANSYS Element Type 52
 2. Iteration



ANSYS 4.4A
 JAN 19 1993
 17:20:13
 PLOT NO. 1
 POST1 DISPL.
 STEP=1
 ITER=2
 DMX =0.005889
 ERPC=53.336

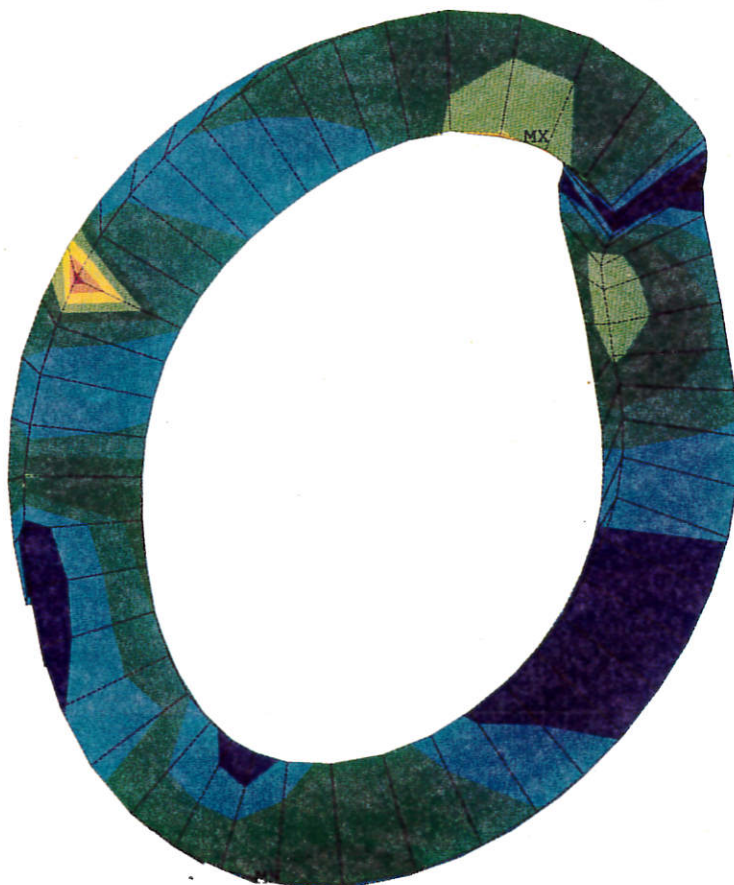
DSCA=14.652
 XV =50
 YV =15
 ZV =-25
 DIST=0.862915
 XF =1.916
 YF =0.675533
 ZF =-0.002466
 ANGZ=-90
 PRECISE HIDDEN



ANSYS 4.4A
 JAN 19 1993
 17:25:01
 PLOT NO. 1
 POST1 DISPL.
 STEP=1
 ITER=3
 DMX =0.005836
 ERPC=52.535

DSCA=14.786
 XV =50
 YV =15
 ZV =-25
 DIST=0.862915
 XF =1.916
 YF =0.675533
 ZF =-0.002466
 ANGZ=-90
 PRECISE HIDDEN

Bild 13: Verformung - Spule 3
 ANSYS Element Type 52
 3. Iteration



ANSYS 4.4A
 JAN 19 1993
 17:16:27
 PLOT NO. 1
 POST1 STRESS
 STEP=1
 ITER=1
 SIGE (AVG)
 DMX =0.054601
 SMN =0.309E+08
 SMX =0.578E+09
 SMXB=0.701E+09

YV =-1
 DIST=0.683588
 XF =1.916
 YF =0.675533
 ZF =-0.002466
 CENTROID HIDDEN

0.309E+08
0.917E+08
0.152E+09
0.213E+09
0.274E+09
0.335E+09
0.396E+09
0.456E+09
0.517E+09
0.578E+09

Bild 14: Vergleichsspannung nach der Hypothese "Von Mises"
 Spule 3 - ANSYS Element Type 52 1. Iteration



ANSYS 4.4A
 JAN 19 1993
 17:22:03
 PLOT NO. 1
 POST1 STRESS
 STEP=1
 ITER=2
 SIGE (AVG)
 DMX =0.005889
 SMN =0.626E+07
 SMX =0.448E+09
 SMXB=0.588E+09

YV =-1
 DIST=0.683588
 XF =1.916
 YF =0.675533
 ZF =-0.002466
 CENTROID HIDDEN

█	0.626E+07
█	0.553E+08
█	0.104E+09
█	0.153E+09
█	0.202E+09
█	0.251E+09
█	0.301E+09
█	0.350E+09
█	0.399E+09
█	0.448E+09

Bild 15: Vergleichsspannung nach der Hypothese "Von Mises"
 Spule 3 - ANSYS Element Type 52 2. Iteration



ANSYS 4.4A
 JAN 20 1993
 10:29:05
 PLOT NO. 1
 POST1 STRESS
 STEP=1
 ITER=3
 SIGE (AVG)
 DMX =0.005836
 SMN =0.814E+07
 SMX =0.395E+09
 SMXB=0.516E+09

YV =-1
 DIST=0.683588
 XF =1.916
 YF =0.675533
 ZF =-0.002466
 CENTROID HIDDEN

█	0.814E+07
█	0.511E+08
█	0.940E+08
█	0.137E+09
█	0.180E+09
█	0.223E+09
█	0.266E+09
█	0.309E+09
█	0.352E+09
█	0.395E+09

Bild 16: Vergleichsspannung nach der Hypothese "Von Mises"
 Spule 3 - ANSYS Element Type 52 3. Iteration

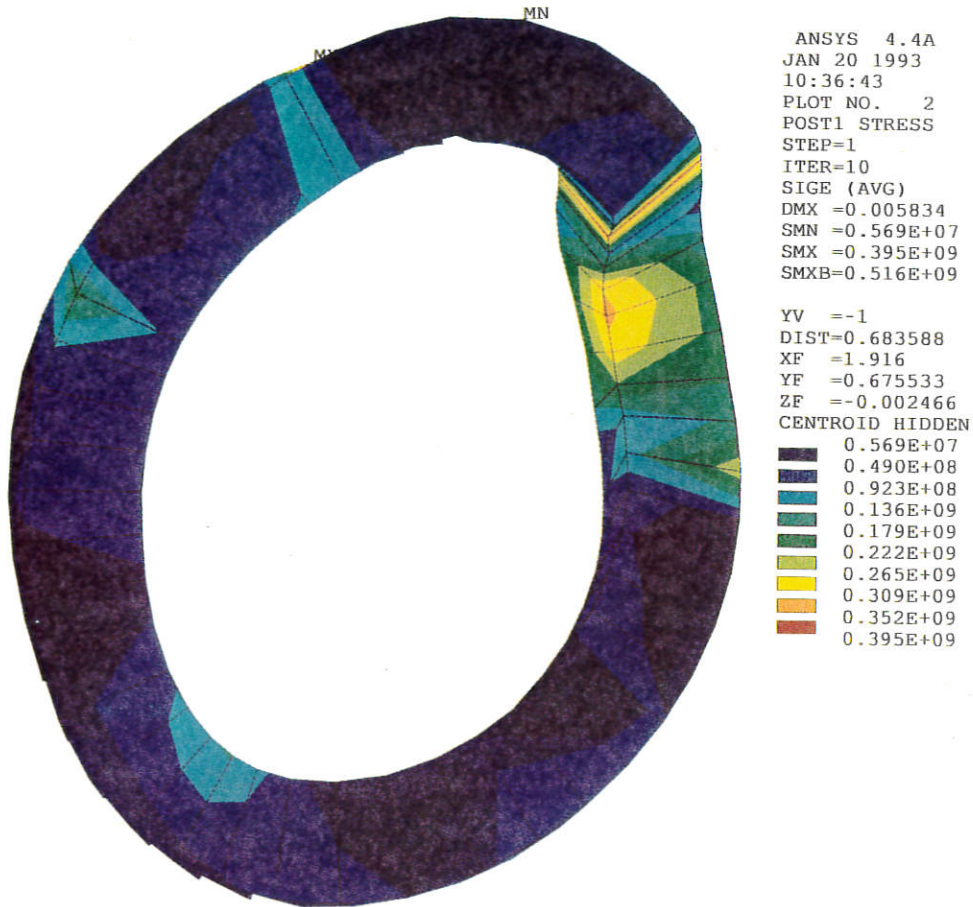


Bild 17: Vergleichsspannung nach der Hypothese "Von Mises"
 Spule 3 - ANSYS Element Type 52 10. Iteration

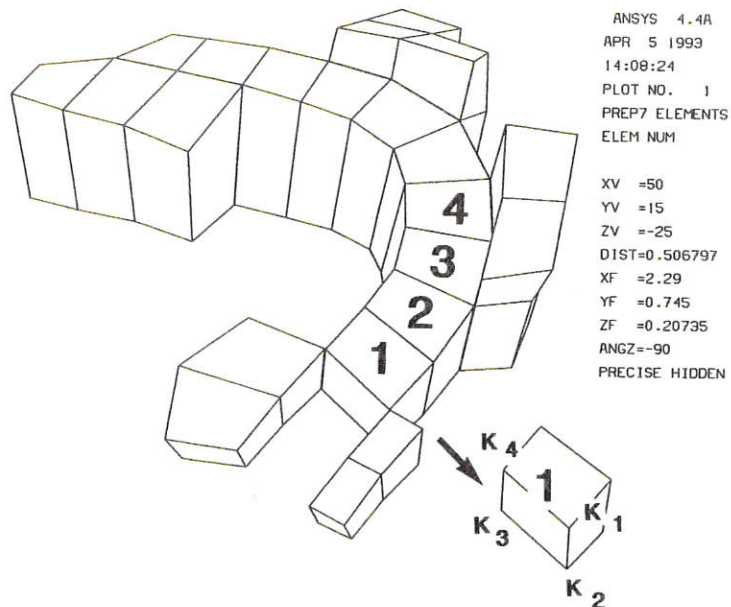


Bild 18: Topologie für die Ablastungsdiagramme
 K1, K2, K3, K4 - Kanten

7.2.2 Ablastungsverhalten der Spule MF3 bei Anwendung des Gap-Elements Typ 52 während der Iterationen:

Hier werden die Kräfte entlang der Spulenkanten im Verlauf der Iterationen gezeigt. Die Definition der Spulenkanten K1 bis K4 ist im Bild 18 veranschaulicht. Die Kräfte an den vier Kanten während der 1. Iteration sind in den Bildern 19 bis 22 wiedergegeben, entsprechende Ablastungen während der 2., 3. und 10. Iteration sind den Bildern 23 bis 26, 27 bis 30 und 31 bis 34 entnehmbar.

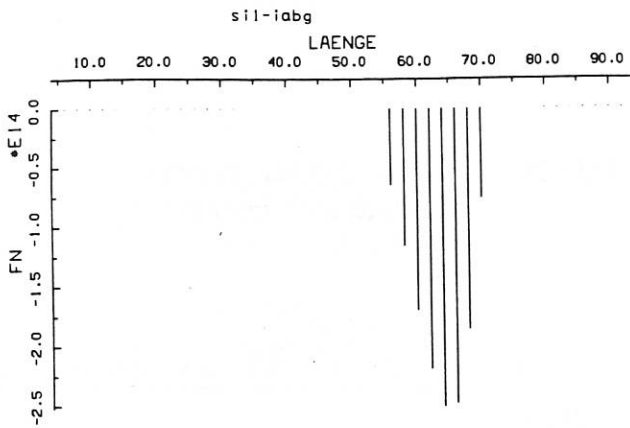


Bild 19: Ablastungsdiagramm - Kante 1 - 1. Iteration

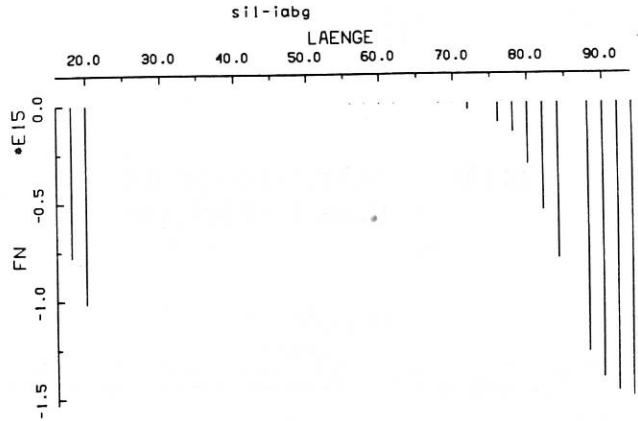


Bild 20: Ablastungsdiagramm - Kante 2 - 1. Iteration

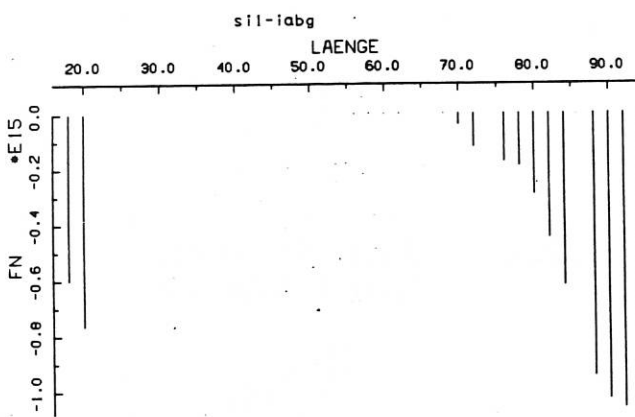


Bild 21: Ablastungsdiagramm - Kante 3 - 1. Iteration

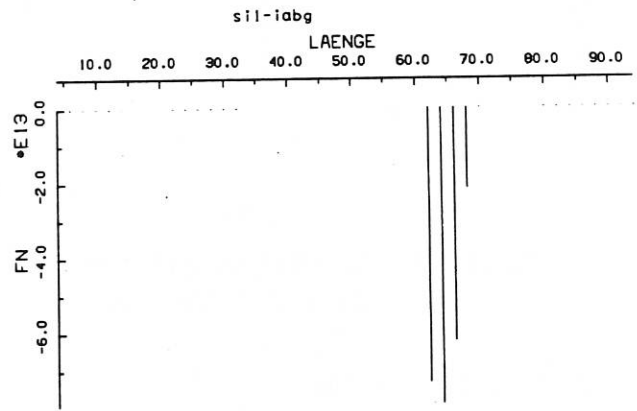


Bild 22: Ablastungsdiagramm - Kante 4 - 1. Iteration

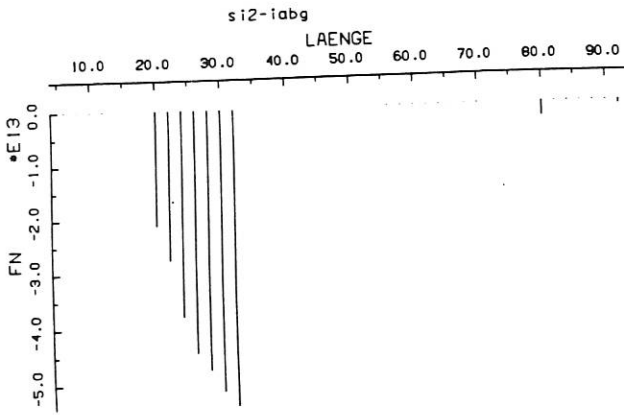


Bild 23: Ablastungsdiagramm - Kante 1 - 2. Iteration

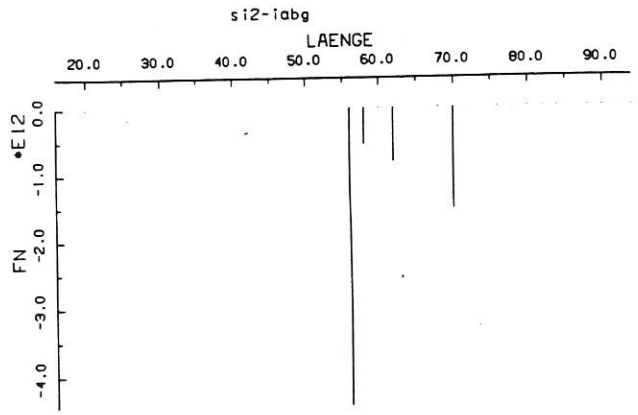


Bild 24: Ablastungsdiagramm - Kante 2 - 2. Iteration

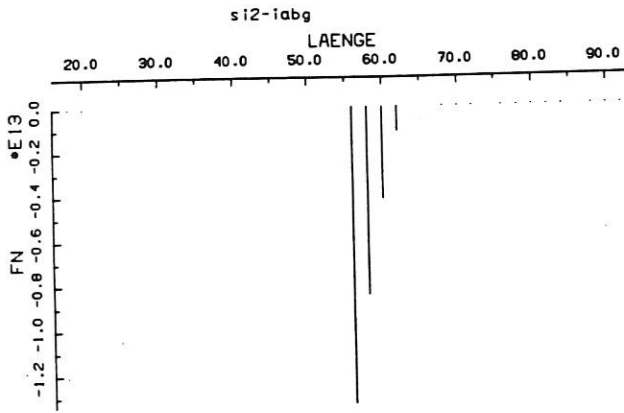


Bild 25: Ablastungsdiagramm - Kante 3 - 2. Iteration

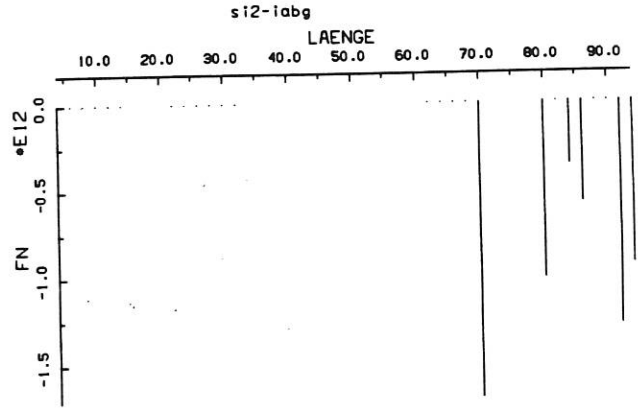


Bild 26: Ablastungsdiagramm - Kante 4 - 2. Iteration

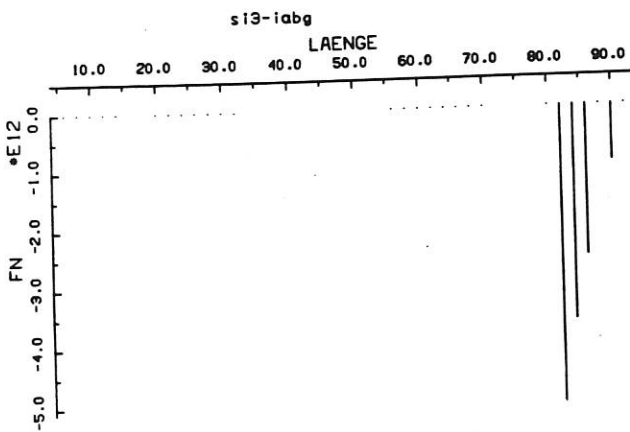


Bild 27: Ablastungsdiagramm - Kante 1 - 3. Iteration

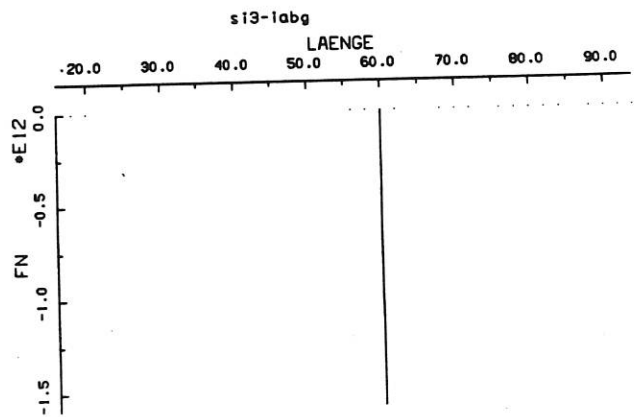


Bild 28: Ablastungsdiagramm - Kante 2 - 3. Iteration

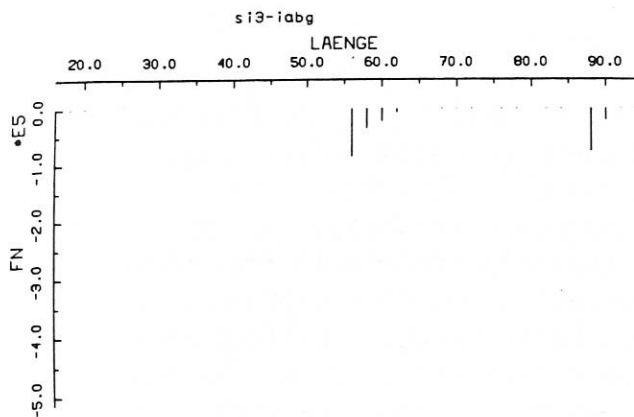


Bild 29: Ablastungsdiagramm - Kante 3 - 3. Iteration

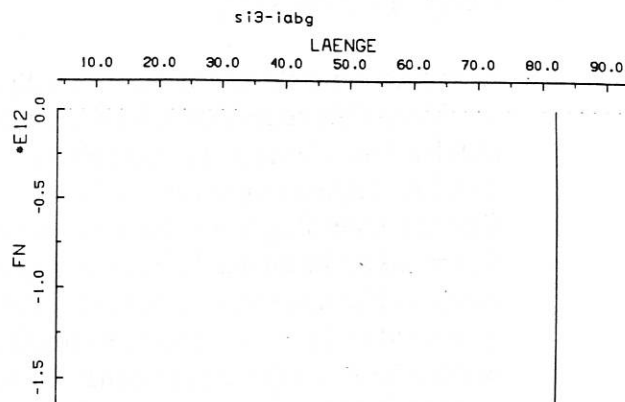


Bild 30: Ablastungsdiagramm - Kante 4 - 3. Iteration

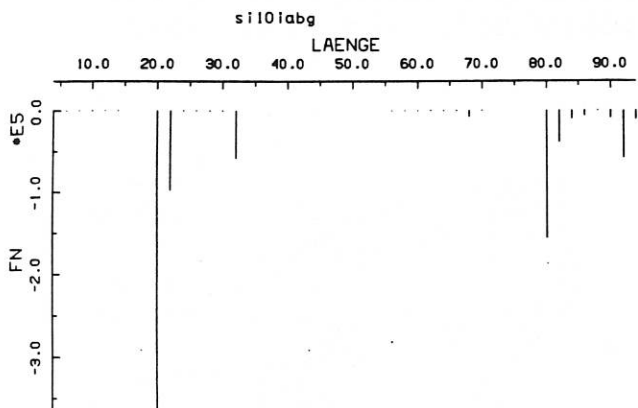


Bild 31: Ablastungsdiagramm - Kante 1 - 10. Iteration

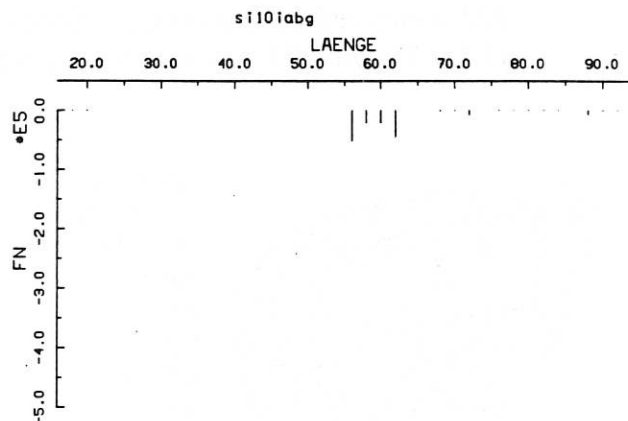


Bild 32: Ablastungsdiagramm - Kante 2 - 10. Iteration

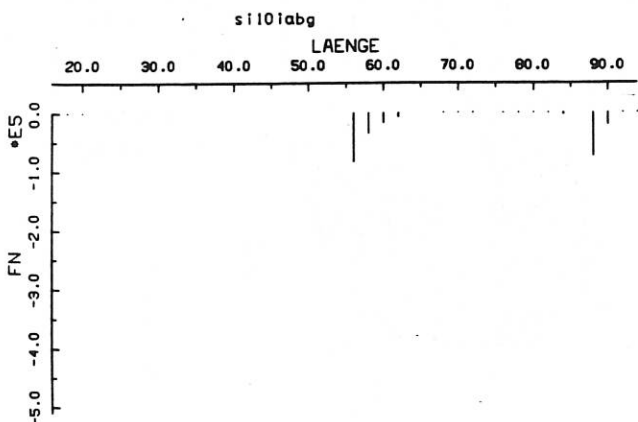


Bild 33: Ablastungsdiagramm - Kante 3 - 10. Iteration

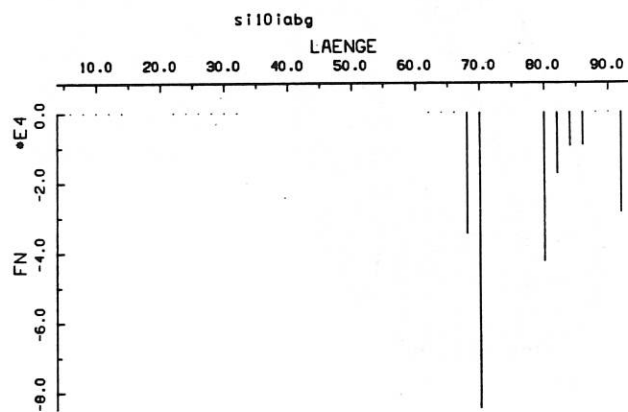
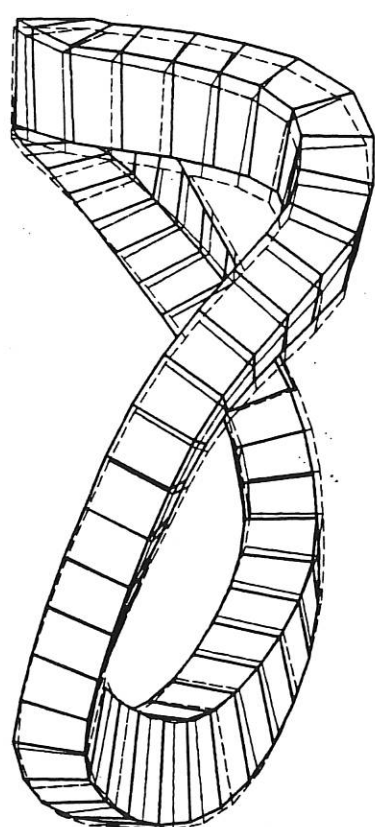


Bild 34: Ablastungsdiagramm - Kante 4 - 10. Iteration

7.3 Simulation des Gleitens durch Truss-Elemente (Ansys-Element Stif8)

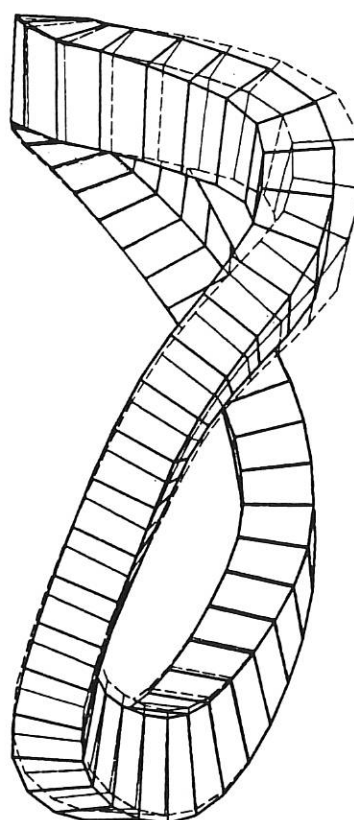
Zwischen den Stützelementen in der Spule wurde die Gleitschicht durch die Verwendung von Truss-Elementen modelliert, so daß die Spule MF3 nur über diese Truss-Elemente mit den Stützelementen gekoppelt ist. Aus den Ergebnissen eines Rechenlaufes kann durch den Spannungsausdruck bei den Truss-Elementen verfolgt werden, welches Element unter Zugspannung steht und an welchem Ort sich daher die Spule von der Stützstruktur lösen will. Durch die Vorgabe eines anderen Materialindex mit einem relativ weichen Elastizitätsmodul konnte damit ein Lösen der Spule von ihrer Umgebung simuliert werden. In einem folgenden Rechenlauf konnte dieser Lösungsprozess fortgeführt werden bzw., an Stellen, an denen nachträglich bei gelösten Truss-Elementen ein Druckzustand festzustellen war, durch Wiedereinsetzen des ursprünglichen Materialindex ein nachträgliches Kontaktieren bewerkstelligt werden. Eine wesentliche Beschleunigung bei der Bestimmung des Gleitverhaltens der Spule MF3 hat der Einsatz der Interface-Elemente (ANSYS Element Stif 52) ergeben (siehe Kapitel 7.2). Das Verformungsverhalten während einiger ausgewählter Iterationen zeigen die Bilder 35 bis 40, Bild 41 zeigt entsprechend dem Bild 40 den Endzustand der Verformung in einer anderen Ansicht. Das Ablastungsverhalten an den jeweiligen Kanten während der 1., 2., 4. und 7. Iteration ist in den Bildern 42 bis 57 zusammengestellt.



```

ANSYS  4.4A
JAN 19 1993
16:35:09
PLOT NO.  1
POST1 DISPL.
STEP=1
ITER=1
DMX =0.001187
ERPC=42.208

DSCA=72.677
XV  =50
YV  =15
ZV  =-25
DIST=0.062915
XF  =1.916
YF  =0.675533
ZF  =-0.002466
ANGZ=-90
PRECISE HIDDEN
  
```



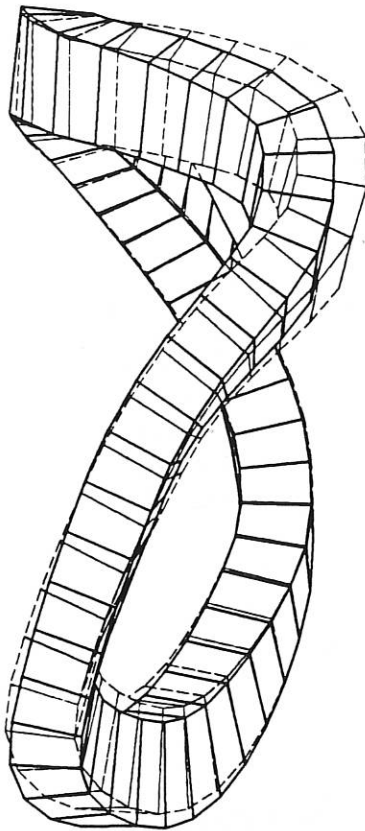
```

ANSYS  4.4A
JAN 20 1993
17:19:02
PLOT NO.  1
POST1 DISPL.
STEP=1
ITER=1
DMX =0.012954
ERPC=45.15

DSCA=6.661
XV  =50
YV  =15
ZV  =-25
DIST=0.062915
XF  =1.916
YF  =0.675533
ZF  =-0.002466
ANGZ=-90
PRECISE HIDDEN
  
```

Bild 35: Verformung Spule 3 -
ANSYS Element Typ 8
Truss-Element
Lagerung im lokalen Koordinatensystem
1. Iteration

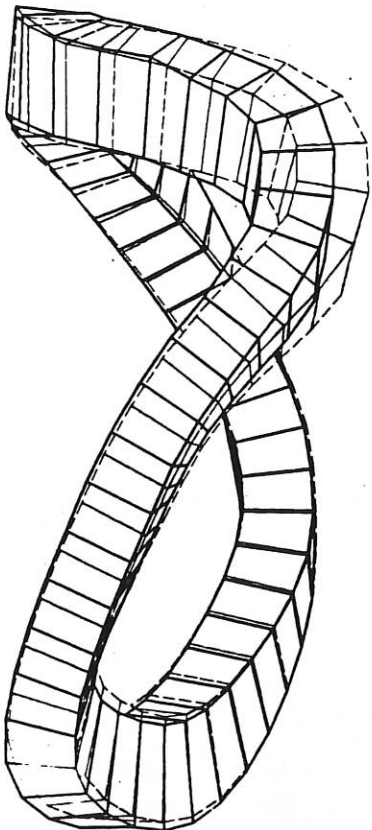
Bild 36: Verformung Spule 3 -
ANSYS Element Typ 8
2. Iteration



ANSYS 4.4A
 JAN 20 1993
 21:09:51
 PLOT NO. 1
 POST1 DISPL.
 STEP=1
 ITER=1
 DMX =0.014655
 ERPC=40.373

DSCA=5.888
 XV =50
 YV =15
 ZV =-25
 DIST=0.862915
 XF =1.916
 YF =0.675533
 ZF =-0.002466
 ANGZ=-90
 PRECISE HIDDEN

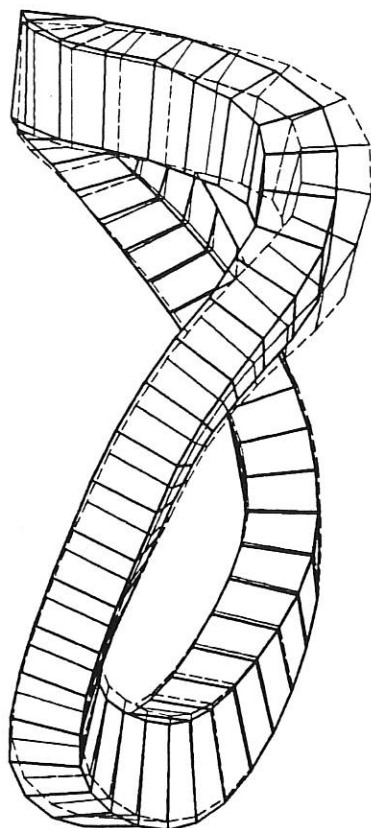
Bild 37: Verformung Spule 3 -
 ANSYS Element Typ 8
 3. Iteration



ANSYS 4.4A
 JAN 21 1993
 10:55:27
 PLOT NO. 1
 POST1 DISPL.
 STEP=1
 ITER=1
 DMX =0.005762
 ERPC=52.436

DSCA=14.976
 XV =50
 YV =15
 ZV =-25
 DIST=0.862915
 XF =1.916
 YF =0.675533
 ZF =-0.002466
 ANGZ=-90
 PRECISE HIDDEN

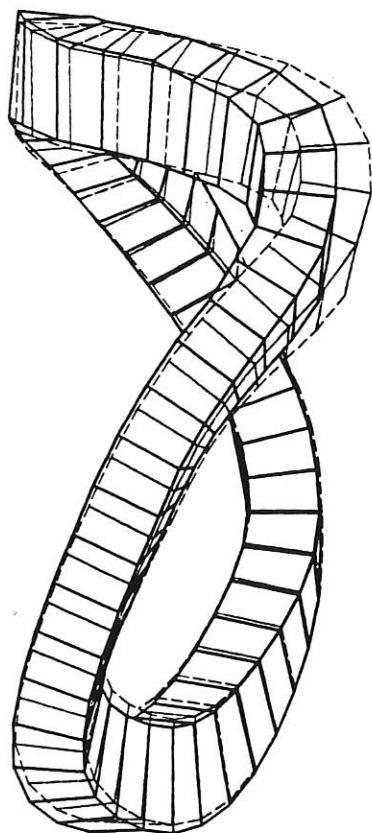
Bild 38: Verformung Spule 3 -
 ANSYS Element Typ 8
 4. Iteration



ANSYS 4.4A
 JAN 21 1993
 12:51:43
 PLOT NO. 1
 POST1 DISPL.
 STEP=1
 ITER=1
 DMX =0.005831
 ERPC=52.324

DSCA=14.799
 XV =50
 YV =15
 ZV =-25
 DIST=0.862915
 XF =1.916
 YF =0.675533
 ZF =-0.002466
 ANGZ=-90
 PRECISE HIDDEN

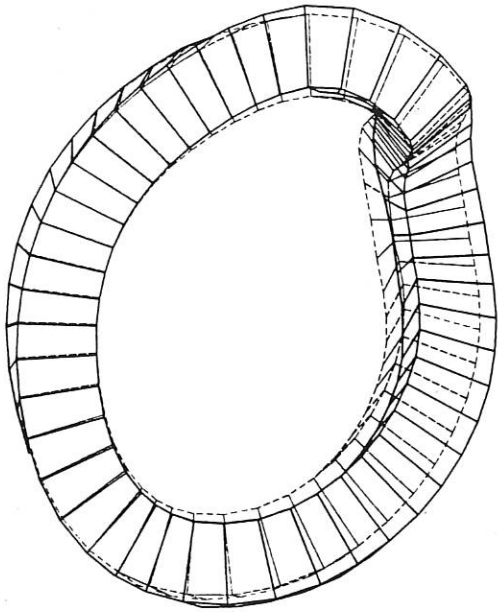
Bild 39: Verformung Spule 3 -
 ANSYS Element Typ 8
 5. Iteration



ANSYS 4.4A
 JAN 21 1993
 16:25:14
 PLOT NO. 1
 POST1 DISPL.
 STEP=1
 ITER=1
 DMX =0.005835
 ERPC=52.195

DSCA=14.789
 XV =50
 YV =15
 ZV =-25
 DIST=0.862915
 XF =1.916
 YF =0.675533
 ZF =-0.002466
 ANGZ=-90
 PRECISE HIDDEN

Bild 40: Verformung Spule 3 -
 ANSYS Element Typ 8
 7. Iteration



```

ANSYS 4.4A
JAN 21 1993
16:26:53
PLOT NO. 2
POST1 DISPL.
STEP=1
ITER=1
DMX =0.005835
ERPC=52.195

DSCA=11.716
YV =-1
DIST=0.689588
XF =1.916
YF =0.675533
ZF =-0.002466
PRECISE HIDDEN
    
```

Bild 41: Verformung Spule 3
ANSYS Element Typ 8
7. Iteration

Ablastung

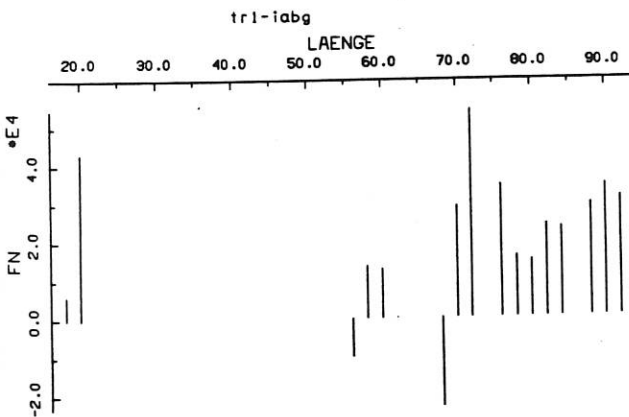


Bild 42: Ablastungsdiagramm -
Kante 1 - 1. Iteration

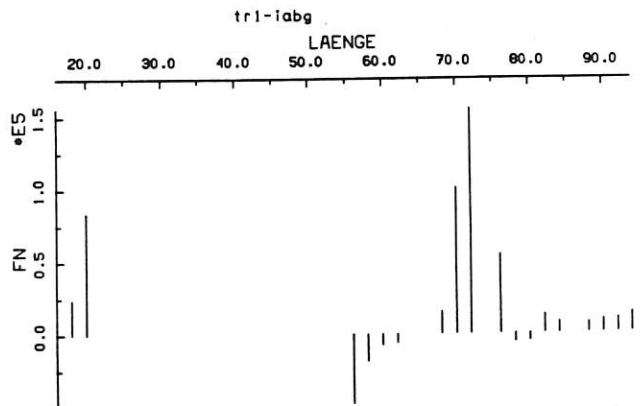


Bild 43: Ablastungsdiagramm -
Kante 2 - 1. Iteration

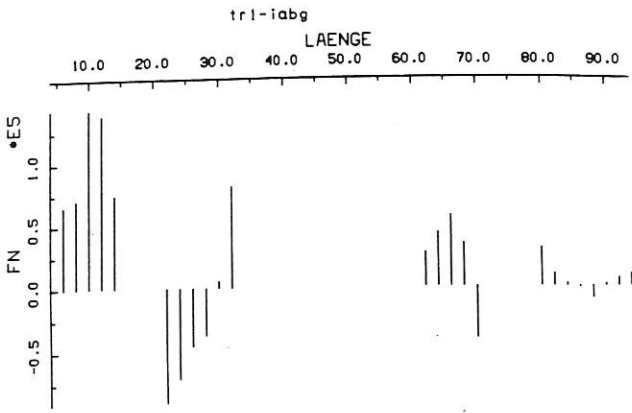


Bild 44: Ablastungsdiagramm - Kante 3 - 1. Iteration

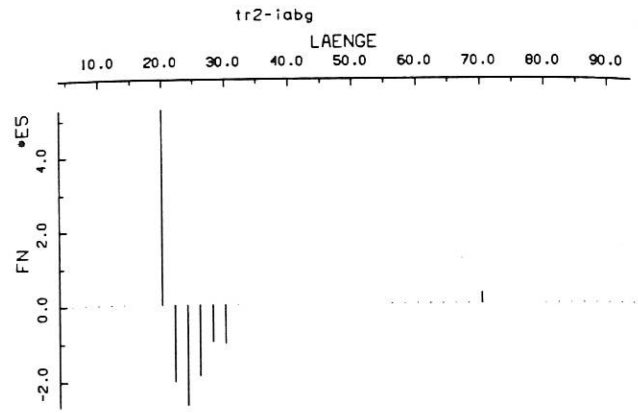


Bild 45: Ablastungsdiagramm - Kante 4 - 1. Iteration

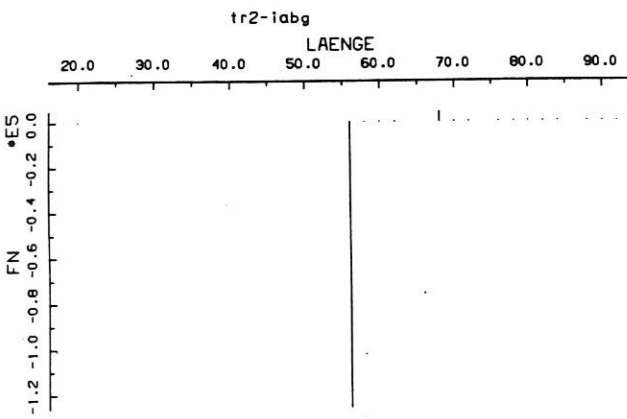


Bild 46: Ablastungsdiagramm - Kante 1 - 2. Iteration

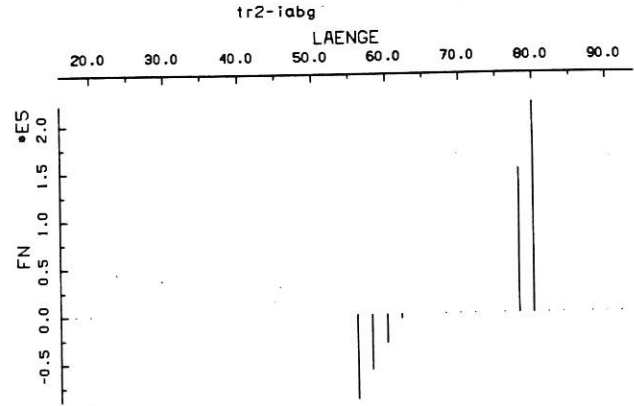


Bild 47: Ablastungsdiagramm - Kante 2 - 2. Iteration

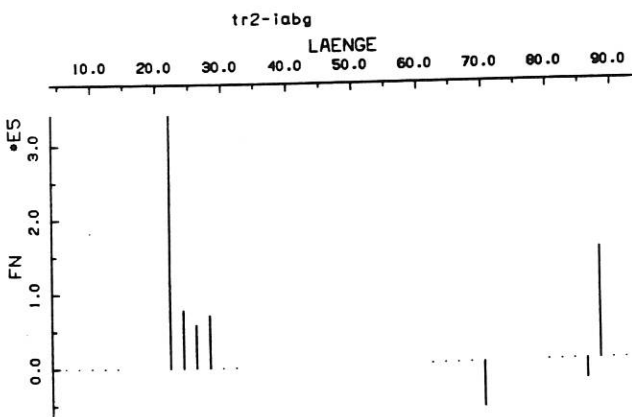


Bild 48: Ablastungsdiagramm - Kante 3 - 2. Iteration

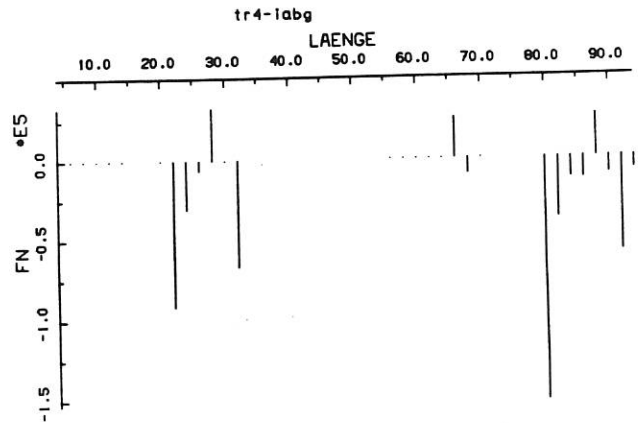


Bild 49: Ablastungsdiagramm - Kante 4 - 2. Iteration

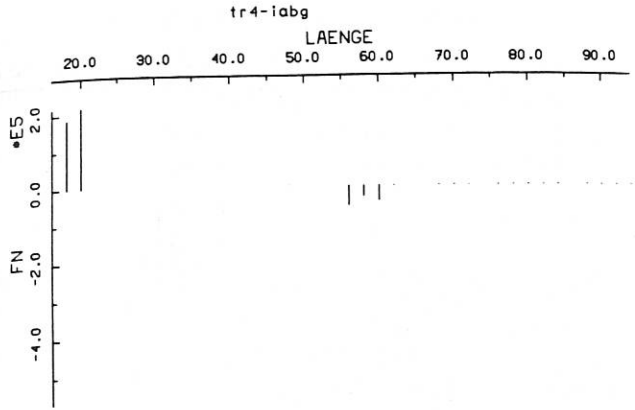


Bild 50: Ablastungsdiagramm - Kante 1 - 4. Iteration

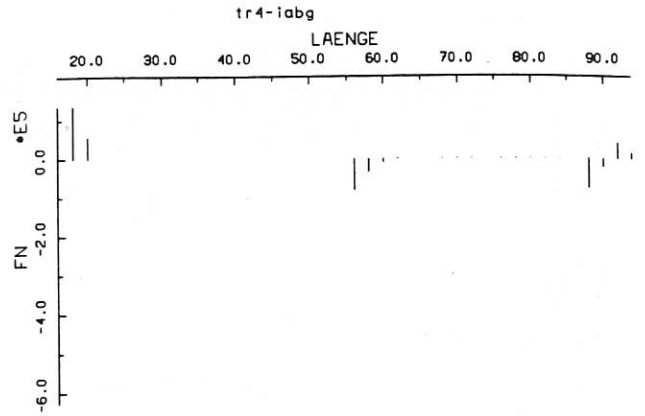


Bild 51: Ablastungsdiagramm - Kante 2 - 4. Iteration

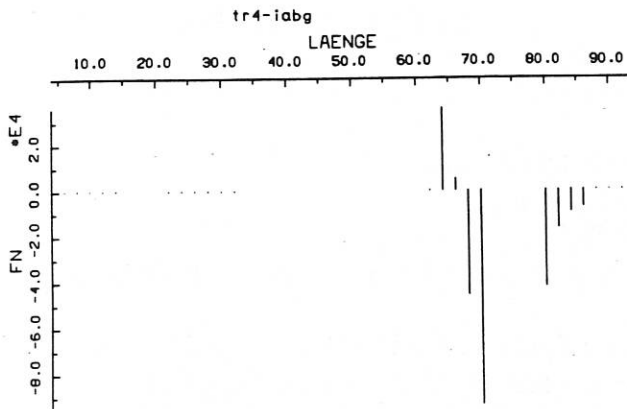


Bild 52: Ablastungsdiagramm - Kante 3 - 4. Iteration

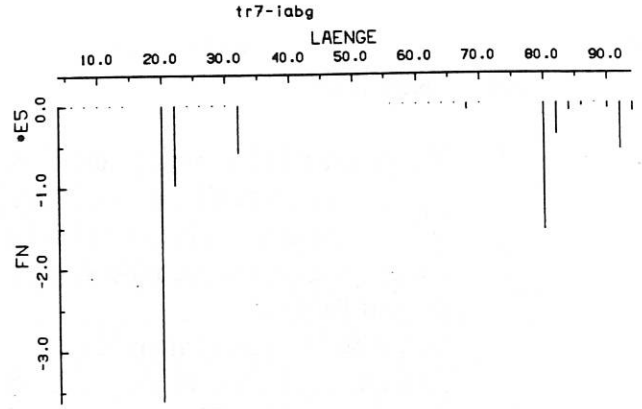


Bild 53: Ablastungsdiagramm - Kante 4 - 4. Iteration

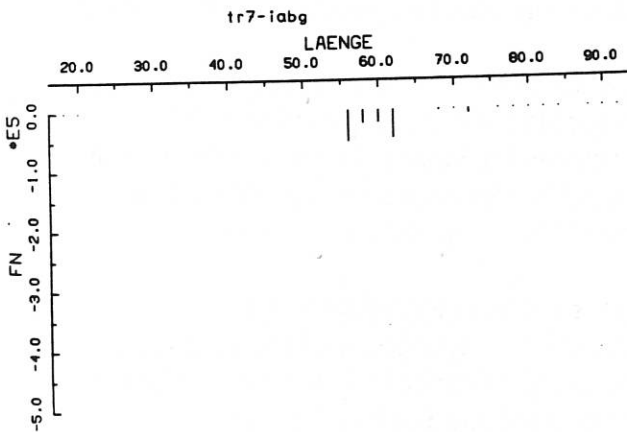


Bild 54: Ablastungsdiagramm - Kante 1 - 7. Iteration

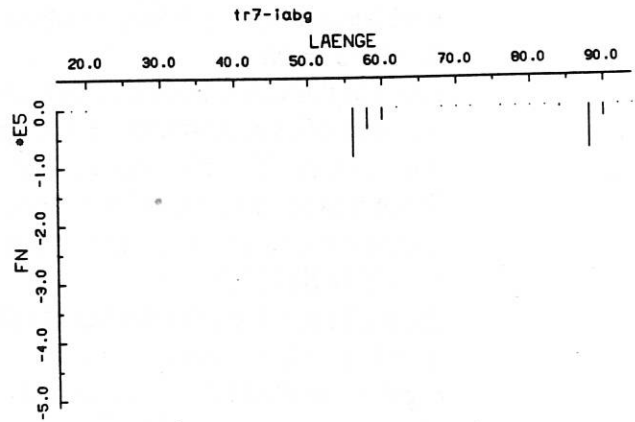


Bild 55: Ablastungsdiagramm - Kante 2 - 7. Iteration

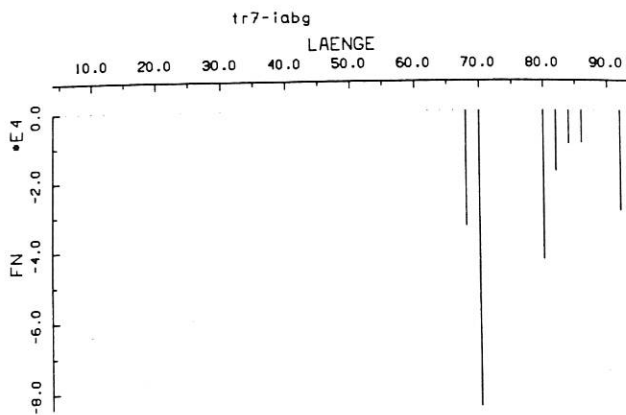


Bild 56: Ablastungsdiagramm -
Kante 3 - 7. Iteration

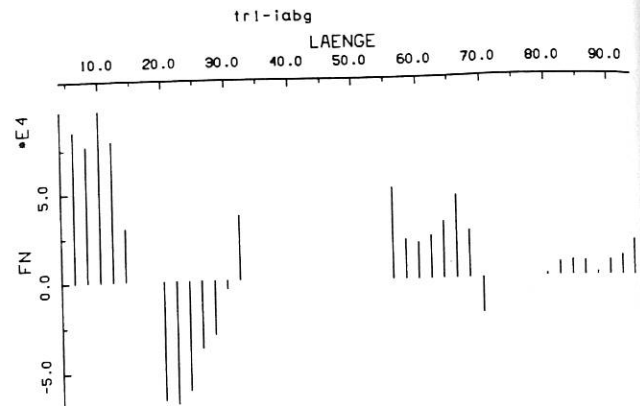


Bild 57: Ablastungsdiagramm -
Kante 4 - 7. Iteration

7.4 Resumee

Vergleichende Rechnung zum Gleitverhalten der Spule 3 mit

- a) Truss-Elementen (ANSYS Element Stif8)
- b) Gap-Elementen (ANSYS Element Stif52)

haben gezeigt, daß sich die Spule in den Anfangsiterationen unterschiedlich verhält. (Bild 19 und Bild 42)

Das Ablastungsverhalten längs der 4 Kanten der Spule 3 ist in den Bildern 19-34/42-57 gezeigt. Die Bilder 19/42 bis 22/45 zeigen die 1. Iteration bei der Verwendung von Truss- bzw. Gap-Elementen. Die Bilder 31/54 bis 34/57 zeigen übereinstimmend das Ablastverhalten bei der letzten Iteration (7. Iteration).

Der Grund für das unterschiedliche Ablastungsverhalten in den ersten Iterationen liegt darin, daß die Trusselemente zunächst Zug- und Druckkräfte übertragen, während die Gapelemente schon bei der 1. Iteration nur bei Druck reagieren. Durch Eingriff wurde nach jeder Iteration (siehe 7.3) dafür gesorgt, daß Trusselemente mit Zugkräften vorübergehend mit einer geänderten Materialkennung versehen wurden, um die Zugkräfte zu eliminieren.

Die Möglichkeit, Trusselemente so zu verwenden, wie es hier geschehen ist, hat es bei linearen FE-Programmen immer gegeben. Es konnte somit gezeigt werden, daß bei Anwendung dieser Technik Resultate gewonnen werden können, die identisch sind mit Ergebnissen, die sich bei Verwendung bilinearer Gapelemente einstellen. Diese Gap-Elemente sind erst in jüngerer Zeit verfügbar (ca 1985 in ADINA, ca 1986 in MSC/NASTRAN).

Eine Überprüfung der Gesamtstruktur (Spule 1 bis 4 mit Stützstruktur und Schalenstruktur) mit den entsprechenden Symmetriebedingungen am Periodenrand hat ergeben, daß das Ablastverhalten der Spule 3 nahezu unverändert bleibt, wenn bilineare Gapelemente verwendet werden. Durch die oben gemachte Beobachtung der Trusselemente wurde nachgewiesen, daß sich identische Ergebnisse auch mit diesen Elementen (in Gegenüberstellung zu den Gap-Elementen) einstellen.

8. Gesamtmodell:

Im Gesamtmodell wurden alle Spulen von der sie umgebenden Stützstruktur gelöst. Die Kopplung dazwischen wurde einheitlich mit dem Interface Element Stif52 geschaffen. Die Spulen wurden mit isotropen Materialeigenschaften ($E = 60 \text{ GPa}$) versehen. Die Ergebnisse dieser Rechnungen (Bild 58) zeigen, daß alle Spulen mit Ausnahme der Spule 3 nur kleine tangential Verformungen aufweisen, während die Spule 3 tangential beträchtlich höher verformt wird.

Werte:

Spule MF3:

(Siehe Bild 5 und Bild 59)

max. Verschiebung = 8,87 mm

lokale Verformungen Element Nr. 45

$$d_R = 4,62 \text{ mm} \quad d_S = 0,046 \text{ mm} \quad d_T = 4,05 \text{ mm}$$

Spannungen v.Mises gefährdeter Bereich:

Element Nr.4 $\sigma_E = 323 \text{ MPa}$

Spule MF4:

(Siehe Bild 5 und Bild 64b)

max. Verschiebung = 3,18 mm

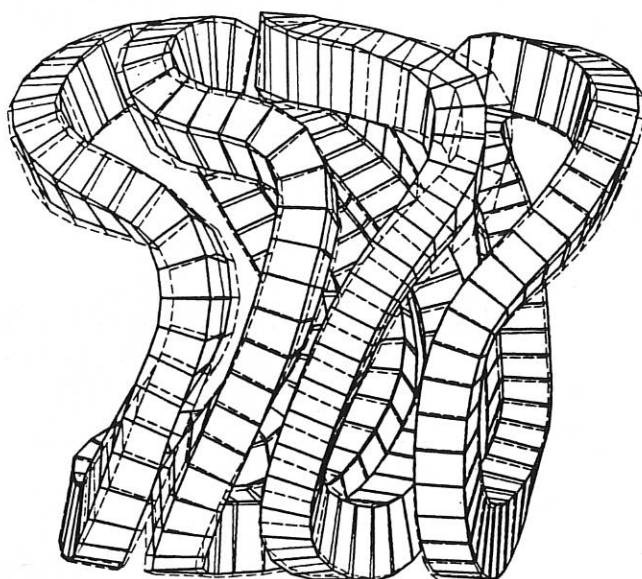
lokale Verformung Element Nr. 45

$$d_R = 1,86 \text{ mm} \quad d_S = 0,015 \text{ mm} \quad d_T = 1,99 \text{ mm}$$

Spannungen v.Mises gefährdeter Bereich:

Element Nr.4 $\sigma_E = 205 \text{ MPa}$

Infolge der isotropen Materialeigenschaften haben die lokalen Spannungen der Spulen Werte, die nicht der Wirklichkeit entsprechen (siehe Kapitel 9 - orthotrope Berechnung). Die Gesamtmodellberechnung (IABG gegenüber ANSYS Gap-Berechnung) zeigt bei der Schalenverformung vergleichbare Verschiebungen mit den entsprechenden Schalenspannungen (Bild 60, Bild 61, Bild 65 und Bild 66). Bild 67 zeigt ergänzend die Reaktionskräfte in der Schale. Das Ablastungsverhalten entlang der 4 Kanten der Spule 3 ist in den Bildern 70 bis 85 dargestellt.



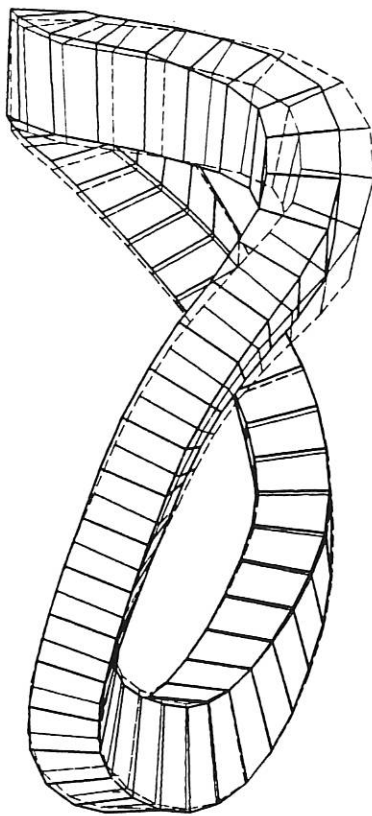
```

ANSYS 4.4A
JAN 25 1993
8:46:38
PLOT NO. 2
POST1 DISPL.
STEP=1
ITER=10
DMX =0.008871
ERPC=0

DSCA=11.412
XV =50
YV =15
ZV =-25
DIST=1.012
XF =1.93
YF =0.548544
ZF =-0.001015
ANGZ=-90
PRECISE HIDDEN

```

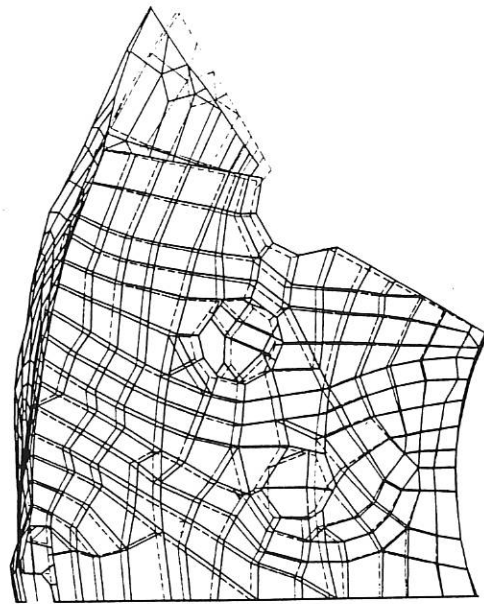
Bild 58: Spulenverformungen in Spule 3, max. 8,87 mm



ANSYS 4.4A
 JAN 25 1993
 8:45:59
 PLOT NO. 1
 POST1 DISPL.
 STEP=1
 ITER=10
 DMX =0.008871
 ERPC=0

 DSCA=9.727
 XV =50
 YV =15
 ZV =-25
 DIST=0.862915
 XF =1.916
 YF =0.675533
 ZF =-0.002466
 ANGZ=-90
 PRECISE HIDDEN

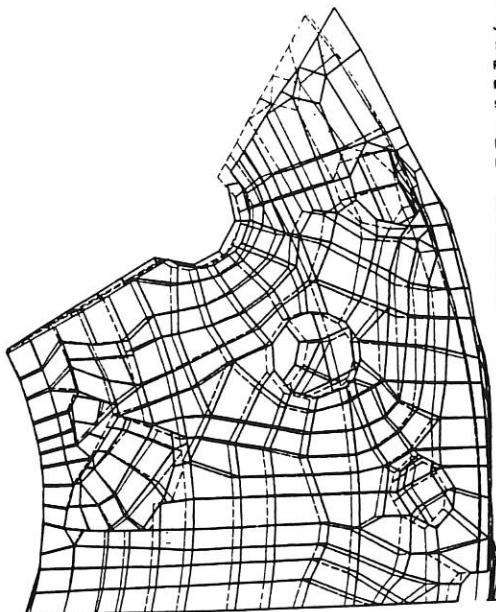
Bild 59: Verformung Spule 3
max. 8,87 mm



ANSYS 4.4A
 JAN 25 1993
 14:45:42
 PLOT NO. 2
 POST1 DISPL.
 STEP=1
 ITER=10
 DMX =0.002492
 ERPC=0

 DSCA=34.819
 ZV =-1
 DIST=0.867625
 XF =1.929
 YF =0.78575
 PRECISE HIDDEN

Bild 60: Strukturverformung von -Z
gesehen - max. 2,49 mm



ANSYS 4.4A
 JAN 25 1993
 14:43:53
 PLOT NO. 1
 POST1 DISPL.
 STEP=1
 ITER=10
 DMX =0.002492
 ERPC=0

 DSCA=34.819
 ZV =1
 DIST=0.867625
 XF =1.929
 YF =0.78575
 PRECISE HIDDEN

Bild 61: Strukturverformung von +Z
gesehen - max. 2,49 mm



```

ANSYS  4.4A
JAN 25 1993
9:17:15
PLOT NO.  2
POST1 STRESS
STEP=1
ITER=10
SIGE (AVG)
MIDDLE
DMX =0.008871
SMN =0.263E+07
SMX =0.323E+09

XV  =50
YV  =15
ZV  =-25
DIST=1.012
XF  =1.93
YF  =0.548544
ZF  =-0.001015
ANGZ=-90
CENTROID HIDDEN
0.263E+07
0.382E+08
0.739E+08
0.109E+09
0.145E+09
0.181E+09
0.216E+09
0.252E+09
0.288E+09
0.323E+09
    
```

Bild 62: Spulenspannungen SIGE (Vergleichspannung)
Das Maximum liegt in Spule MF3 - (323 MPa)



```

ANSYS  4.4A
JAN 25 1993
9:16:01
PLOT NO.  1
POST1 STRESS
STEP=1
ITER=10
SIGE (AVG)
MIDDLE
DMX =0.008871
SMN =0.739E+07
SMX =0.323E+09

XV  =50
YV  =15
ZV  =-25
DIST=0.862915
XF  =1.916
YF  =0.675533
ZF  =-0.002466
ANGZ=-90
CENTROID HIDDEN
0.739E+07
0.425E+08
0.776E+08
0.113E+09
0.148E+09
0.183E+09
0.218E+09
0.253E+09
0.288E+09
0.323E+09
    
```

Bild 63: Spulenspannungen SIGE (Vergleichspannung)
Spule MF3



ANSYS 4.4A
 JAN 25 1993
 9:18:01
 PLOT NO. 3
 POST1 STRESS
 STEP=1
 ITER=10
 SIGE (AVG)
 MIDDLE
 DMX =0.003186
 SMN =0.615E+07
 SMX =0.205E+09

XV =50
 YV =15
 ZV =-25
 DIST=0.881054
 XF =1.855
 YF =0.984536
 ZF =-0.001025
 ANGZ=-90

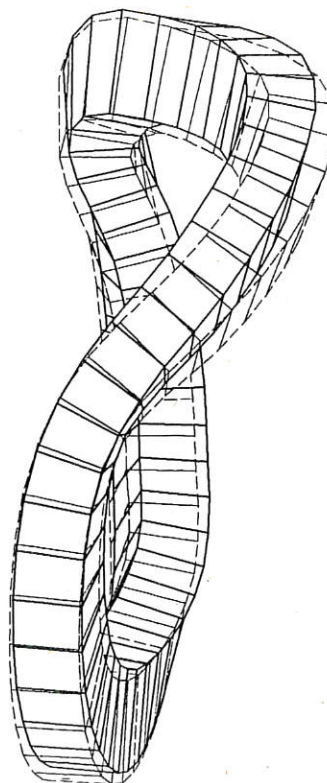
CENTROID HIDDEN

0.615E+07
0.282E+08
0.503E+08
0.723E+08
0.944E+08
0.116E+09
0.139E+09
0.161E+09
0.183E+09
0.205E+09

Bild 64a:

Spulenspannungen SIGE
 (Vergleichspannung)
 Spule MF4 - max. 205 MPa

Bild 64b: Verformung Spule 4
 - max. 3,18 mm



ANSYS 4.4A
 JAN 25 1993
 8:47:49
 PLOT NO. 3
 POST1 DISPL.
 STEP=1
 ITER=10
 DMX =0.003186
 ERPC=0

DSCA=27.655
 XV =50
 YV =15
 ZV =-25
 DIST=0.881054
 XF =1.855
 YF =0.984536
 ZF =-0.001025
 ANGZ=-90
 PRECISE HIDDEN

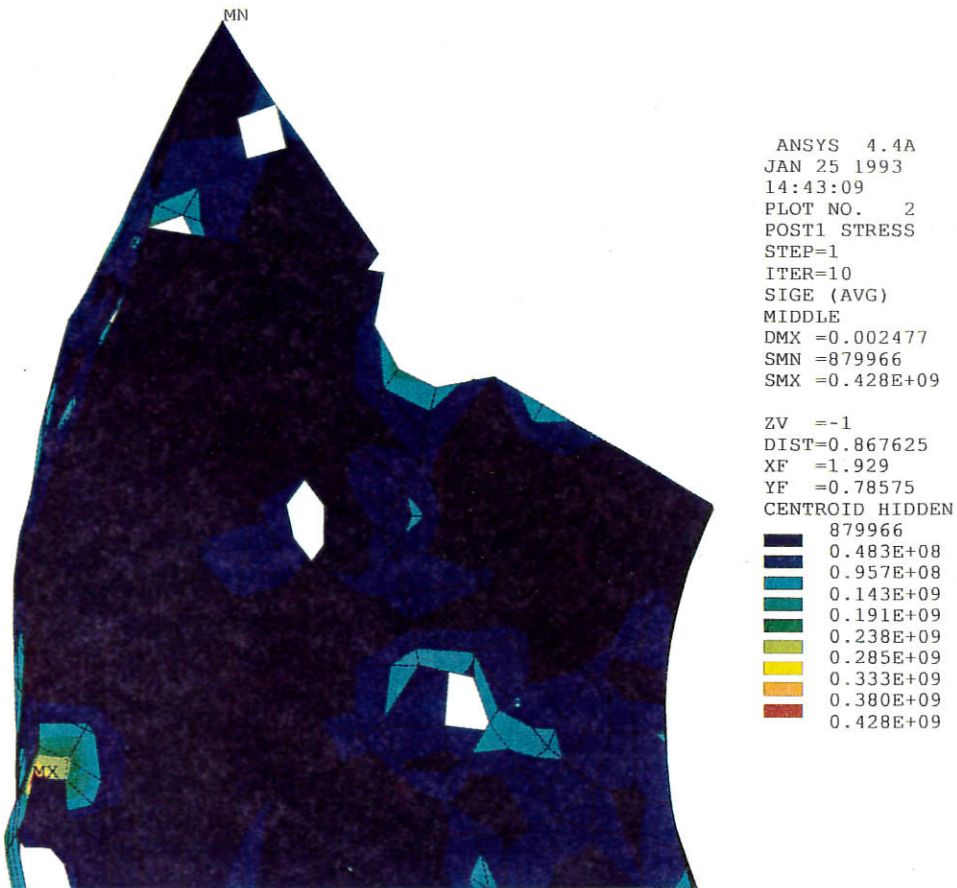


Bild 65: Strukturspannungen SIGE (Vergleichspannung) von -Z gesehen - max 428 MPa

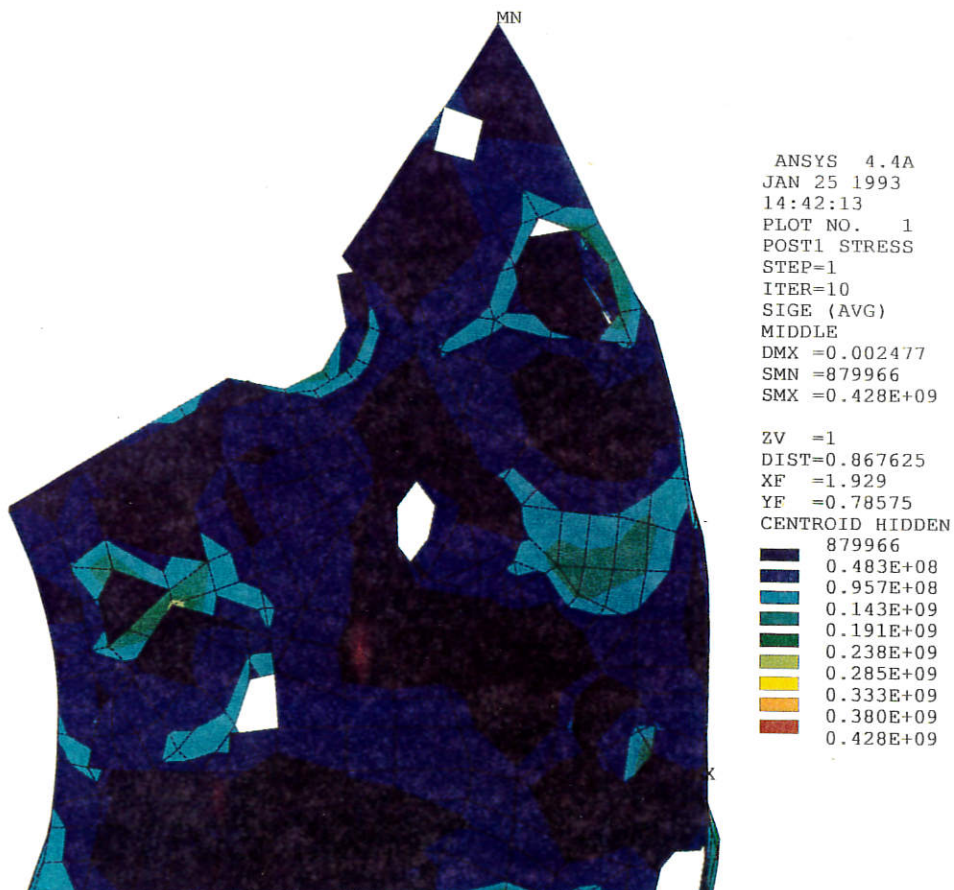


Bild 66: Strukturspannungen SIGE (Vergleichspannung) von +Z gesehen - max 428 MPa

Abstützkräfte für Strukturschale WVII-AS
 Lastfall: IABG
 Berechnung: Linear

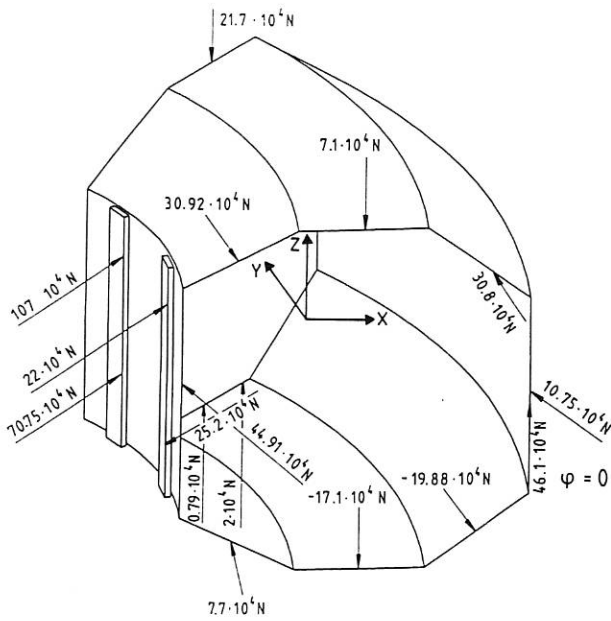
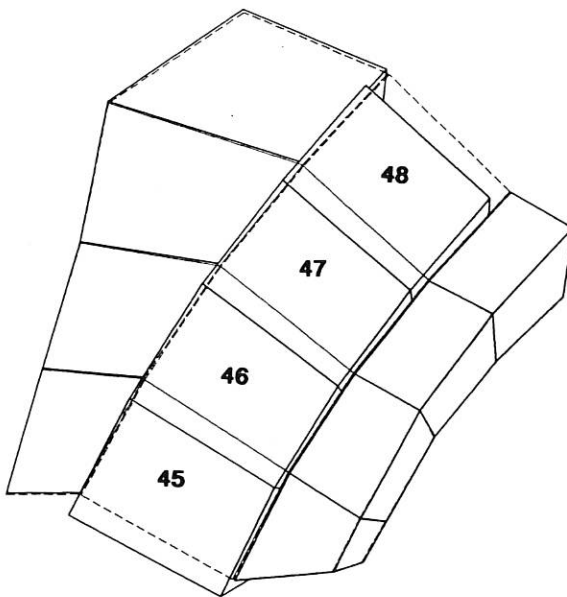


Bild 67: Abstützkräfte für Strukturschale



ANSYS 4.4A
 APR 5 1993
 9:31:55
 PLOT NO. 1
 POST1 DISPL.
 STEP=1
 ITER=10
 DMX =0.007804
 ERPC=0

DSCA=3.488
 XV =50
 YV =15
 ZV =-25
 DIST=0.27217
 XF =2.319
 YF =0.76025
 ZF =-0.11675
 ANGZ=-90
 PRECISE HIDDEN

Bild 68: Verformung - Spule MF3 - Detail

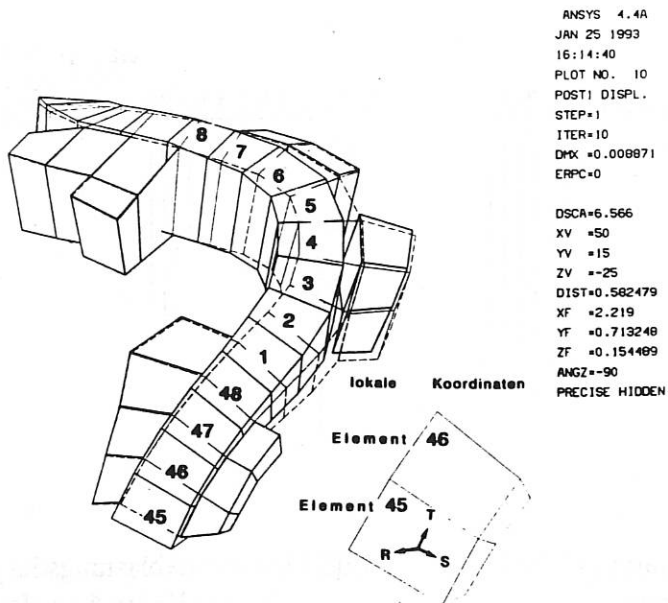


Bild 69: Verformung - Spule MF3 - Detail

Ablastung

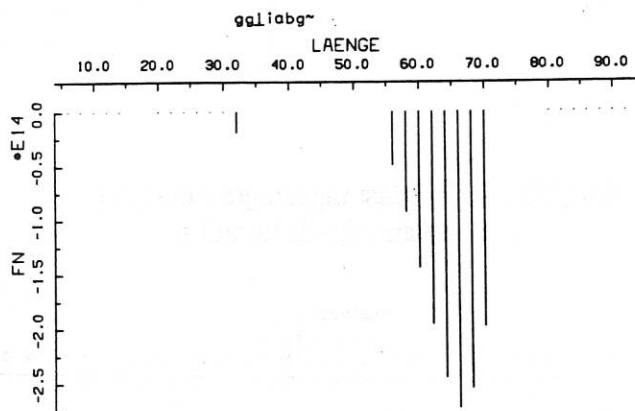


Bild 70: Ablastungsdiagramm - Kante 1 - 1. Iteration

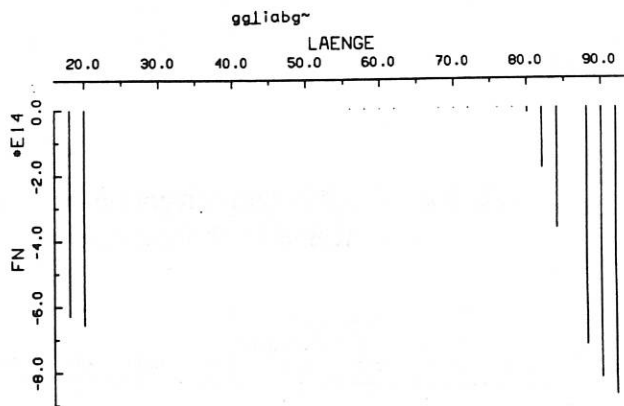


Bild 71: Ablastungsdiagramm - Kante 2 - 1. Iteration

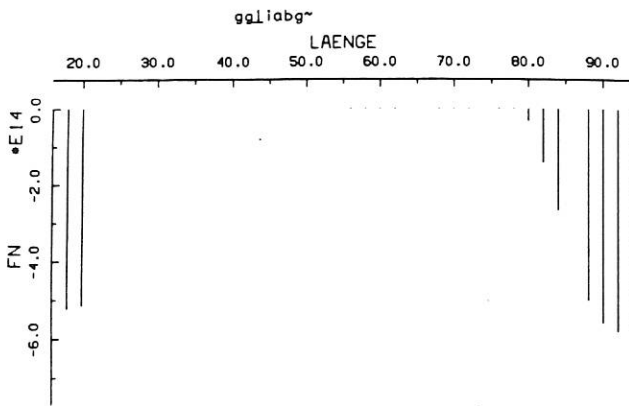


Bild 72: Ablastungsdiagramm -
Kante 3 - 1. Iteration

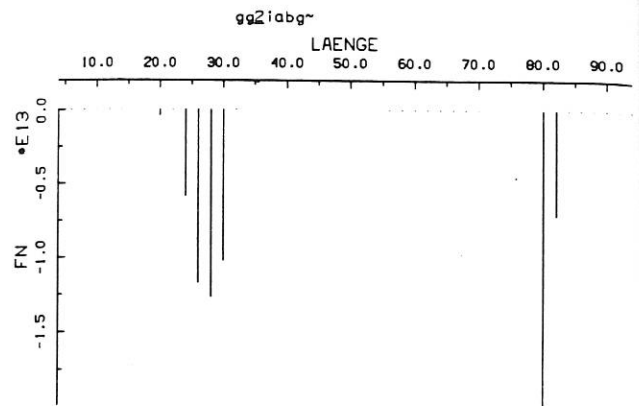


Bild 73: Ablastungsdiagramm -
Kante 4 - 1. Iteration

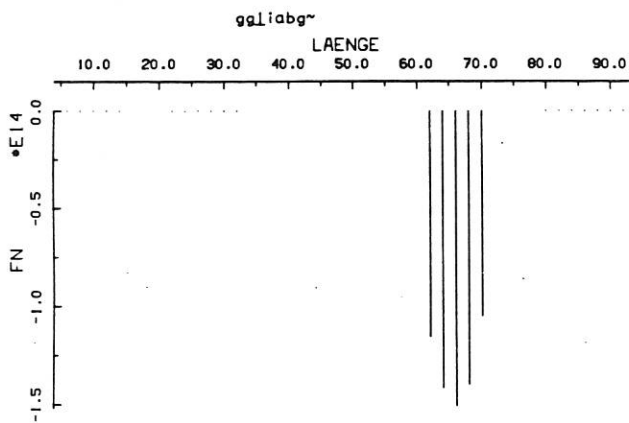


Bild 74: Ablastungsdiagramm -
Kante 1 - 2. Iteration

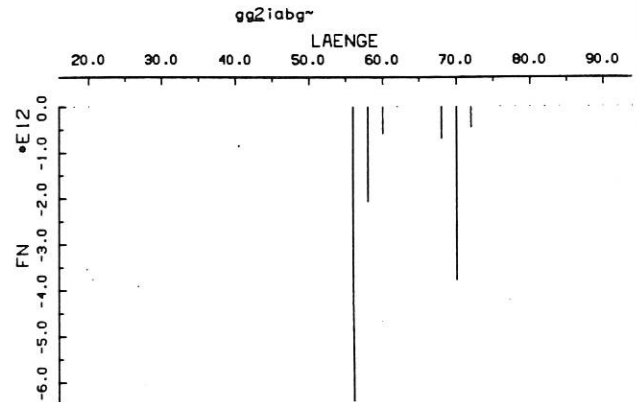


Bild 75: Ablastungsdiagramm -
Kante 2 - 2. Iteration

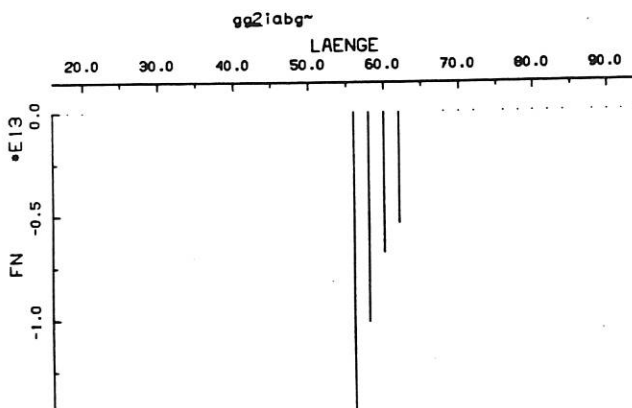


Bild 76: Ablastungsdiagramm -
Kante 3 - 2. Iteration

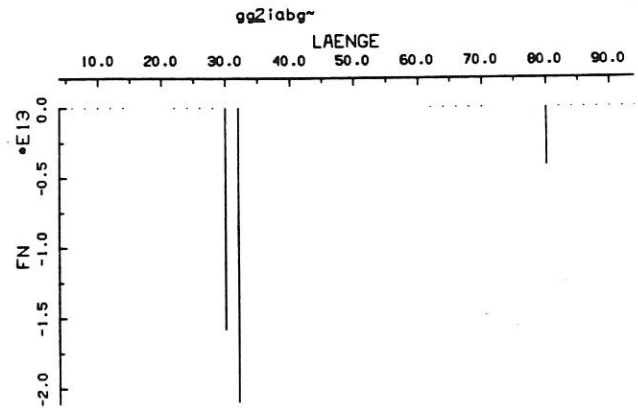


Bild 77: Ablastungsdiagramm -
Kante 4 - 2. Iteration

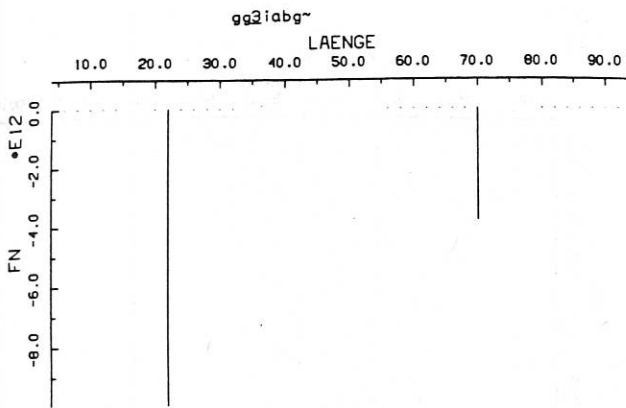


Bild 78: Ablastungsdiagramm -
Kante 1 - 3. Iteration

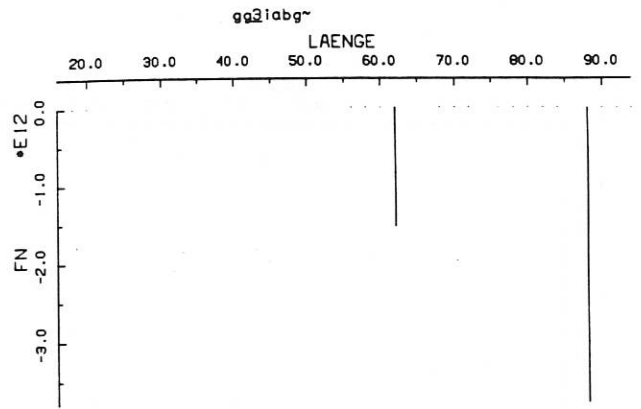


Bild 79: Ablastungsdiagramm -
Kante 2 - 3. Iteration

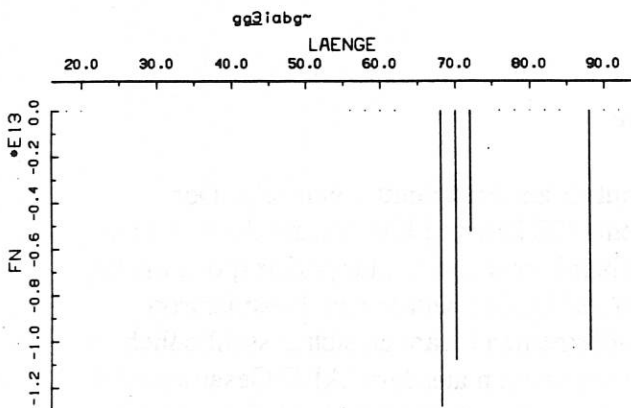


Bild 80: Ablastungsdiagramm -
Kante 3 - 3. Iteration

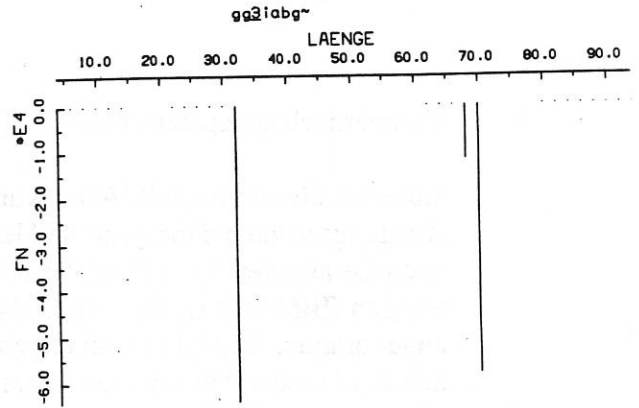


Bild 81: Ablastungsdiagramm -
Kante 4 - 3. Iteration

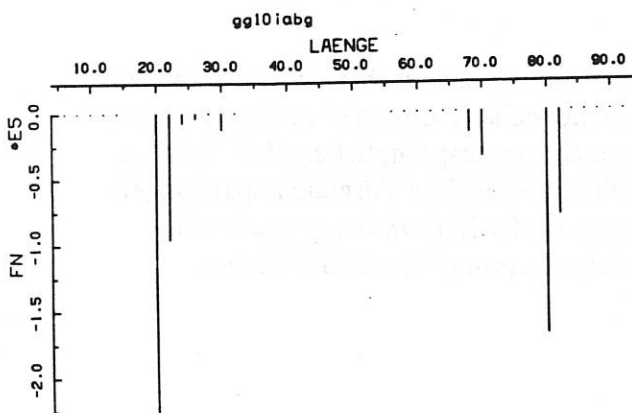


Bild 82: Ablastungsdiagramm -
Kante 1 - 7. Iteration

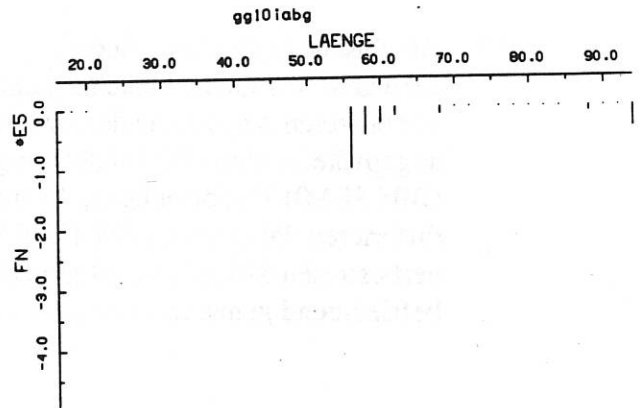


Bild 83: Ablastungsdiagramm -
Kante 2 - 7. Iteration

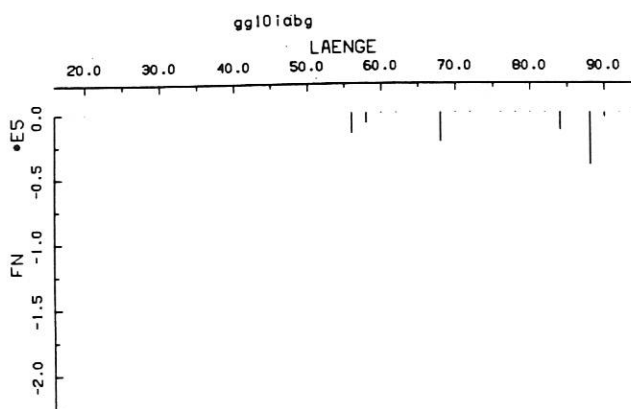


Bild 84: Ablastungsdiagramm -
Kante 3 - 7. Iteration

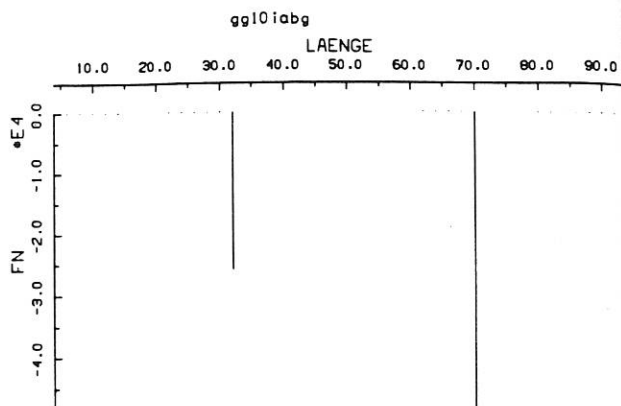


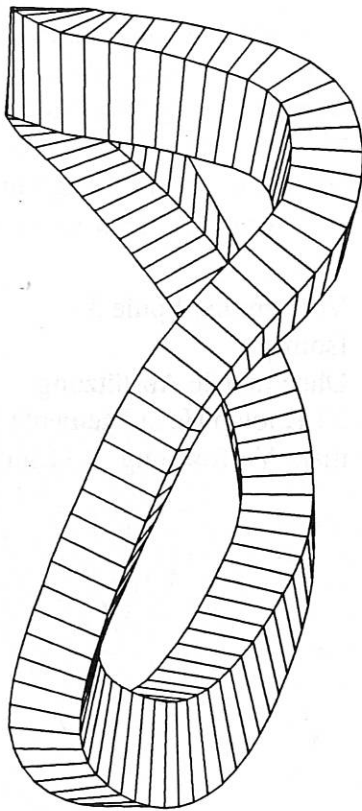
Bild 85: Ablastungsdiagramm -
Kante 4 - 7. Iteration

9. Geometrisch angepaßtes Modell - Orthotropie

Aus dem Gesamtmodell IABG wurde die Spule 3 als Ausschnitt untersucht. Der Ausgangszustand dabei war: 48 Hexa-Elemente (20 Knoten) bildeten die Spule 3 (wie auch die anderen Spulen), wobei die Seitenmittenknoten linear interpoliert (positioniert) wurden (Bild 86,87). Die Materialkonstanten der Spule 3 wurden zunächst isotrop angenommen. Die Gleitmöglichkeit mit Gap-Elementen befanden sich ausschließlich an den Eckknoten. Alle anderen Lagerbedingungen wurden aus dem IABG Gesamtmodell übernommen. Die Randknoten der Stützstruktur wurden unverschieblich festgehalten. Die Umwandlung der 20-Knoten Hexa-Elemente in 8-Knoten Solid-Elemente war notwendig, weil eine später durchgeführte orthotrope Berechnung mit ANSYS nur mit diesem Elementtyp möglich ist. In diesem Fall wurden alle Kantenknoten (auch Seitenmitten-Knoten) mit Gap-Elementen versehen. Das Modell wurde zur Kontrolle wie das ursprüngliche IABG-Modell zuerst mit isotropen Materialkonstanten gerechnet.

9.1. Bicubische Splinefunktionen

Es wurde untersucht, welchen Einfluß die Anwendung bicubischer Splinefunktionen /5/ zur besseren Anpassung der Knotenpunkte an die reelle Geometrie hat. Das geometrisch angepaßte Modell (Bild 86,87) zeigt im Vergleich zum ursprünglichen IABG Modell (Bild 88/90) Verformungen, die um ca. 3% höher liegen. Die Vergleichsspannungen differieren dabei um ca. 6% (Bild 89/91). Damit ist der Einfluß des geometrisch verbesserten Modells bestätigt und zeigt, daß das ursprüngliche IABG-Modell befriedigend genau zu beurteilen ist.



```

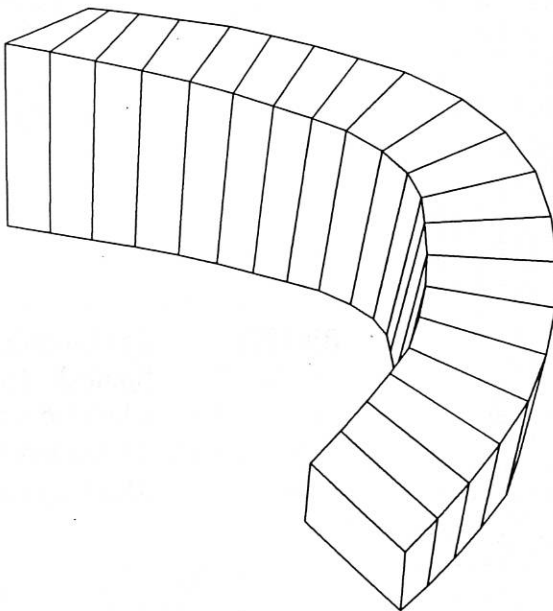
ANSYS  4.4A
JUL 24 1991
11:02:59
PLOT NO.  1
PREP7 ELEMENTS
TYPE NUM

XV  =50
YV  =15
ZV  =-25
DIST=0.8631
XF  =1.916
YF  =0.67515
ZF  =-0.0025
ANGZ=-90
PRECISE HIDDEN

```

Bild 86:

Mit Splinefunktion-Code
interpoliertes Modell
96 (8-Knoten) Solid-Elemente



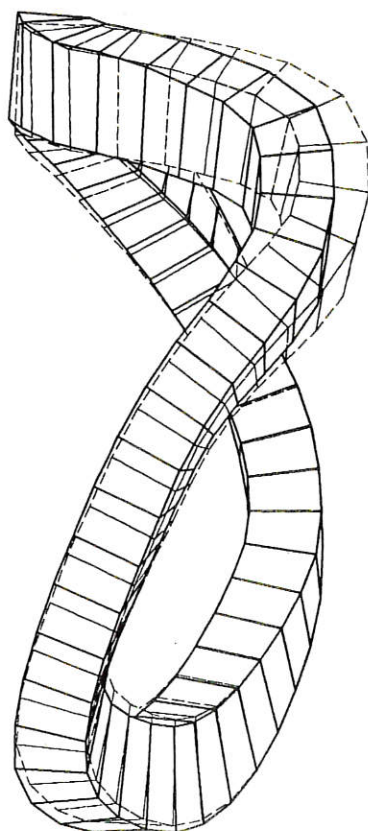
```

ANSYS  4.4A
JUL 24 1991
11:04:15
PLOT NO.  4
PREP7 ELEMENTS
TYPE NUM

XV  =50
YV  =15
ZV  =-25
DIST=0.361073
XF  =2.295
YF  =0.7465
ZF  =0.243
ANGZ=-90
PRECISE HIDDEN

```

Bild 87: Mit Splinefunktion-Code interpoliertes Modell
Detail



ANSYS 4.4A
 FEB 3 1993
 18:54:03
 PLOT NO. 1
 POST1 DISPL.
 STEP=1
 ITER=10
 DMX =0.007111
 ERPC=32.504

DSCA=12.137
 XV =50
 YV =15
 ZV =-25
 DIST=0.8631
 XF =1.917
 YF =0.6755
 ZF =-0.0025
 ANGZ=-90
 PRECISE HIDDEN

Bild 88: Verformung Spule 3 -
 Isotrop -
 Ohne radiale Abstützung
 20-Knoten Hexa-Elemente
 max. Verformung 7,11 mm



ANSYS 4.4A
 FEB 3 1993
 18:54:54
 PLOT NO. 1
 POST1 STRESS
 STEP=1
 ITER=10
 SIGE (AVG)
 DMX =0.007047
 SMN =0.120E+08
 SMX =0.396E+09
 SMXB=0.420E+09

XV =50
 YV =15
 ZV =-25
 DIST=0.8631
 XF =1.917
 YF =0.6755
 ZF =-0.0025
 ANGZ=-90
 CENTROID HIDDEN

0.120E+08
0.547E+08
0.974E+08
0.140E+09
0.183E+09
0.226E+09
0.268E+09
0.311E+09
0.354E+09
0.396E+09

Bild 89: Spulenspannungen SIGE -
 Spule 3 - Isotrop -
 Ohne radiale Abstützung
 20-Knoten Hexa-Elemente
 SIGE max.= 396 MPa

Bewertung:

(Siehe Bild 88 und Bild 5)

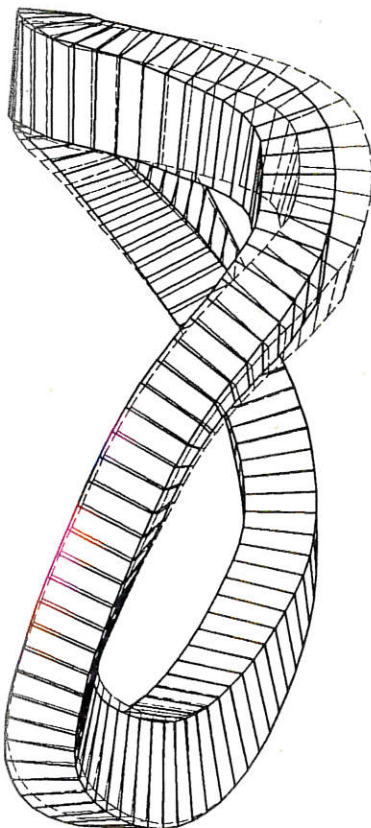
max. Verschiebung = 7,71 mm

lokale Verformungen Element Nr. 45

$d_R = 4,03 \text{ mm}$ $d_S = 0,005 \text{ mm}$ $d_T = 4,05 \text{ mm}$

Spannungen v.Mises - gefährdeter Bereich (Siehe Bild 89 und Bild 18)

Element Nr.4 $\sigma_E = 396 \text{ MPa}$



```

ANSYS  4.4A
FEB  3 1993
19:18:53
PLOT NO.  1
POST1 DISPL.
STEP=1
ITER=10
DMX =0.007359
ERPC=32.872

DSCA=11.728
XV  =50
YV  =15
ZV  =-25
DIST=0.8631
XF  =1.916
YF  =0.67515
ZF  =-0.0025
ANGZ=-90
PRECISE HIDDEN
  
```



```

ANSYS  4.4A
FEB  3 1993
19:19:28
PLOT NO.  1
POST1 STRESS
STEP=1
ITER=10
SIGE (AVG)
DMX =0.007359
SMN =-0.383E+07
SMX =0.373E+09
SMXB=0.401E+09

XV  =50
YV  =15
ZV  =-25
DIST=0.8631
XF  =1.916
YF  =0.67515
ZF  =-0.0025
ANGZ=-90
CENTROID HIDDEN
0.383E+07
0.448E+08
0.858E+08
0.127E+09
0.168E+09
0.209E+09
0.250E+09
0.291E+09
0.332E+09
0.373E+09
  
```

Bild 90: Verformung Spule 3 -
Isotrop -
Ohne radialen Abstützung
8-Knoten Solid-Elemente
max. Verformung 7,36 mm

Bild 91: Spulenspannungen SIGE -
Spule 3 - Isotrop -
Ohne radiale Abstützung
8-Knoten Solid-Elemente
SIGE max.= 373 MPa

Bewertung:

(Siehe Bild 90 und Bild 5)

max. Verschiebung = 7,36 mm

lokale Verformungen Element Nr. 45

$d_R = 4,24 \text{ mm}$ $d_S = 0,003 \text{ mm}$ $d_T = 4,0 \text{ mm}$

Spannungen v.Mises - gefährdeter Bereich (Siehe Bild 91 und Bild 18)

Element Nr.4 $\sigma_E = 373 \text{ MPa}$

9.2 Vergleich - isotropes und orthotropes Material

Aus der Bauart der Spule 3 (Bild 2) ist bekannt, daß infolge der unterschiedlichen Materialien der Spulenkörper nicht isotrop, sondern orthotrop mit den jeweiligen Werten für die E-Moduli, G-Moduli bzw. den Werten für die Querkontraktion zu berechnen ist. In unserem Fall wurden folgende Materialwerte eingesetzt:

Isotropes Material :

$$E = 60 \text{ GPa}, \nu = 0,3$$

Orthotropes Material :

$$E_{tt} = 70 \text{ GPa}$$

$$E_{rr} = 25 \text{ GPa}$$

$$E_{ss} = 25 \text{ GPa}$$

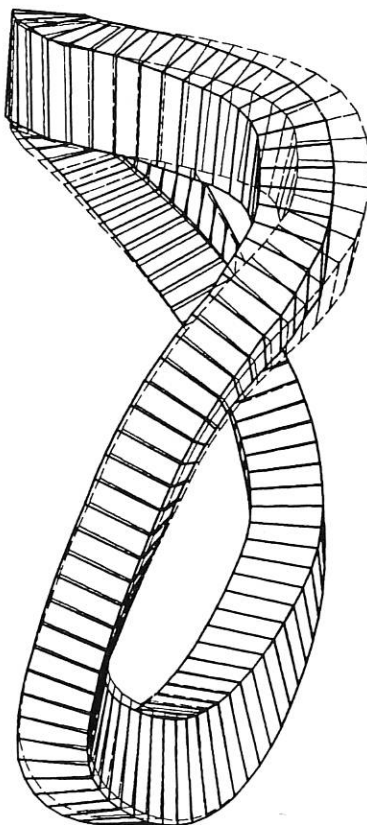
$$G_{rt} = G = G = 10,7 \text{ GPa}$$

$$\nu_{rt} = 0,302$$

$$\nu_{st} = 0,112$$

$$\nu_{rs} = 0,219$$

Die mit den orthotropen Werten erfolgten Untersuchungen zeigen (Bild 92) höhere Verschiebungen (+24%), wobei die Vergleichsspannungen um weniger als 4% (Bild 93) zunehmen. Rückblickend kann aus der nur unwesentlichen Veränderung in der Vergleichsspannung beobachtet werden, daß die Aussagen mit isotropen Materialwerten (IABG-Modell) hinreichen genau sind.



```

ANSYS 4.4A
FEB 3 1993
19:26:18
PLOT NO. 1
POST1 DISPL.
STEP=1
ITER=10
DMX =0.009194
ERPC=37.805

DSCA=9.387
XV =50
YV =15
ZV =-25
DIST=0.8631
XF =1.916
YF =0.67515
ZF =-0.0025
ANGZ=-90
PRECISE HIDDEN

```

Bild 92: Verformung - Spule 3 - Orthotrop - Ohne radiale Abstützung 8-Knoten Solid-Elemente max. Verformung 9,19 mm

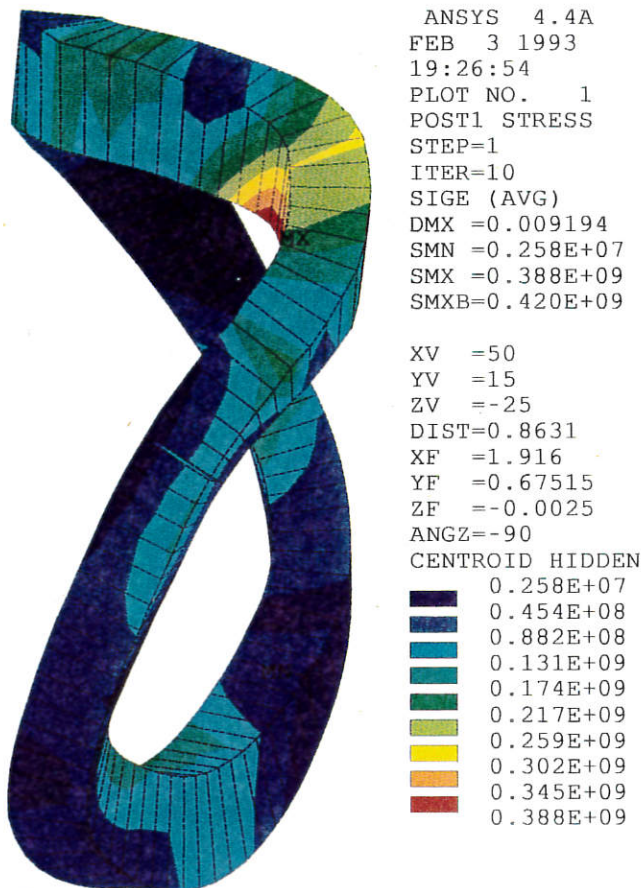


Bild 93: Spulenspannungen SIGE -
 Spule 3 - Orthotrop -
 Ohne radiale Abstützung
 8-Knoten Solid-Elemente
 SIGE max.= 388 MPa

9.3 Radiale Kissenabstützung (Spule 3 Elemente 39-47 Bild 5,6)

Nach der Feststellung der ersten Schädigung an der Spule 3 und der daraufhin erfolgten präventiven Bettungsmaßnahme sollte numerisch bestätigt werden, daß durch diese Art der radialen Bettung die Spule 3 im kritischen Bereich entlastet wird /4/. Zu diesem Zweck wurde ein neues Modell erstellt, das die Bettung zunächst bei isotropen Materialverhalten und Verwendung von 20-Knoten Hexa-Elementen berücksichtigt. Der Einfluß der Bettung /4/ (Bild 94) zeigt, daß die maximale Verformung mit 3,36 mm beträchtlich zurückgeht gegenüber 7,11 mm (Bild 88). Auch die Spannungen werden stark reduziert: $\sigma_E = 175$ MPa (Bild 95) gegenüber $\sigma_E = 396$ MPa (Bild 89).

Bewertung:

(Siehe Bild 94 und Bild 5)

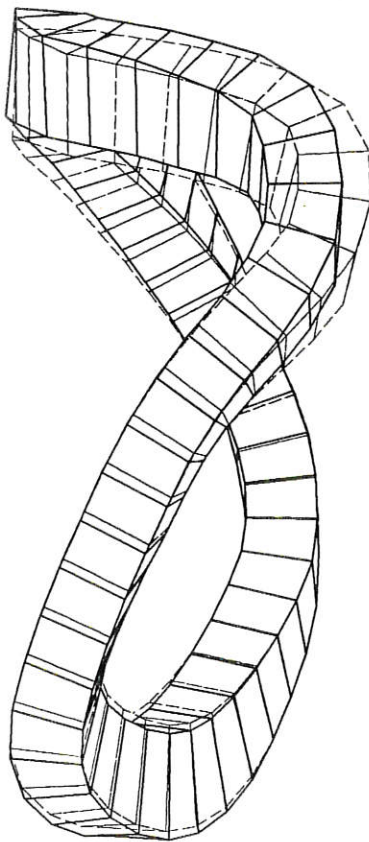
max. Verschiebung = 3,36 mm

lokale Verformungen Element Nr. 45

$d_R = 0,065$ mm $d_S = 0,0028$ mm $d_T = 0,691$ mm

Spannungen v.Mises - gefährdeter Bereich (Siehe Bild 95 und Bild 18):

Element Nr.4 $\sigma_E = 175$ MPa



```

ANSYS  4.4A
FEB  3 1993
9:17:32
PLOT NO.  1
POST1 DISPL.
STEP=1
ITER=10
DMX =0.00336
ERPC=36.961

DSCA=25.686
XV  =50
YV  =15
ZV  =-25
DIST=0.8631
XF  =1.917
YF  =0.6755
ZF  =-0.0025
ANGZ=-90
PRECISE HIDDEN
  
```

Bild 94: Verformung - Spule 3 -
Isotrop -
Mit radialer Abstützung
20-Knoten Hexa-Elemente
max. Verformung 3,36 mm



```

ANSYS  4.4A
FEB  3 1993
9:18:34
PLOT NO.  1
POST1 STRESS
STEP=1
ITER=10
SIGE (AVG)
DMX =0.003325
SMN =0.246E+07
SMX =0.175E+09
SMXB=0.225E+09

XV  =50
YV  =15
ZV  =-25
DIST=0.8631
XF  =1.917
YF  =0.6755
ZF  =-0.0025
ANGZ=-90
CENTROID HIDDEN
0.246E+07
0.216E+08
0.408E+08
0.599E+08
0.791E+08
0.982E+08
0.117E+09
0.137E+09
0.156E+09
0.175E+09
  
```

Bild 95: Spulenspannungen SIGE -
Spule 3 - Isotrop -
Mit radialer Abstützung
20-Knoten Hexa-Elemente
SIGE max.= 175 MPa

9.4 Bettung des geometrisch angepaßten Modelles

Die Bettung bei dem geometrisch besser angepaßten Modell und isotropen Material (Bild 96) führt zu leicht höheren maximalen Verformungen von 3,82 mm. Im Vergleich zu den im Kap. 9.3 gezeigten Resultaten ist die Vergleichsspannung mit 159 MPa im Schadenbereich unwesentlich kleiner (Bild 97).

Bewertung:

(Siehe Bild 96 und Bild 5)

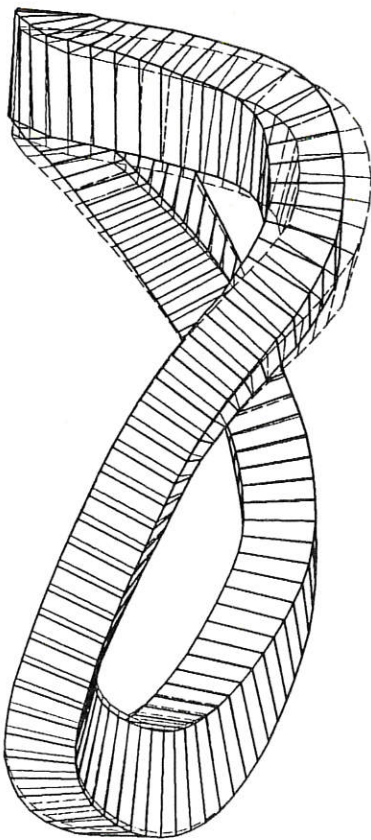
max. Verschiebung = 3,823 mm

lokale Verformungen Element Nr. 45

$$d_R = 0,363 \text{ mm} \quad d_S = 0,058 \text{ mm} \quad d_T = 0,665 \text{ mm}$$

Spannungen v.Mises - gefährdeter Bereich (Siehe Bild 97 und Bild 18)

Element Nr.4 $\sigma_E = 219 \text{ MPa}$



ANSYS 4.4A
 FEB 3 1993
 11:25:17
 PLOT NO. 1
 POST1 DISPL.
 STEP=1
 ITER=10
 DMX =0.003823
 ERPC=30.626

DSCA=22.575
 XV =50
 YV =15
 ZV =-25
 DIST=0.8631
 XF =1.916
 YF =0.67515
 ZF =-0.0025
 ANGZ=-90
 PRECISE HIDDEN

Bild 96:

Verformung - Spule 3 - Isotrop -
 Mit radialen Abstützung
 8-Knoten Solid-Elemente
 max. Verformung 3,82 mm



ANSYS 4.4A
 FEB 3 1993
 11:39:37
 PLOT NO. 1
 POST1 STRESS
 STEP=1
 ITER=10
 SIGE (AVG)
 DMX =0.003823
 SMN =0.315E+07
 SMX =0.219E+09
 SMXB=0.243E+09

XV =50
 YV =15
 ZV =-25
 DIST=0.8631
 XF =1.916
 YF =0.67515
 ZF =-0.0025
 ANGZ=-90
 CENTROID HIDDEN

0.315E+07
0.272E+08
0.512E+08
0.752E+08
0.993E+08
0.123E+09
0.147E+09
0.171E+09
0.195E+09
0.219E+09

Bild 97: Spulenspannungen SIGE -
 Spule 3 - Isotrop -
 Mit radialer Abstützung,
 8-Knoten Solid-Elemente
 SIGE max.= 219 MPa

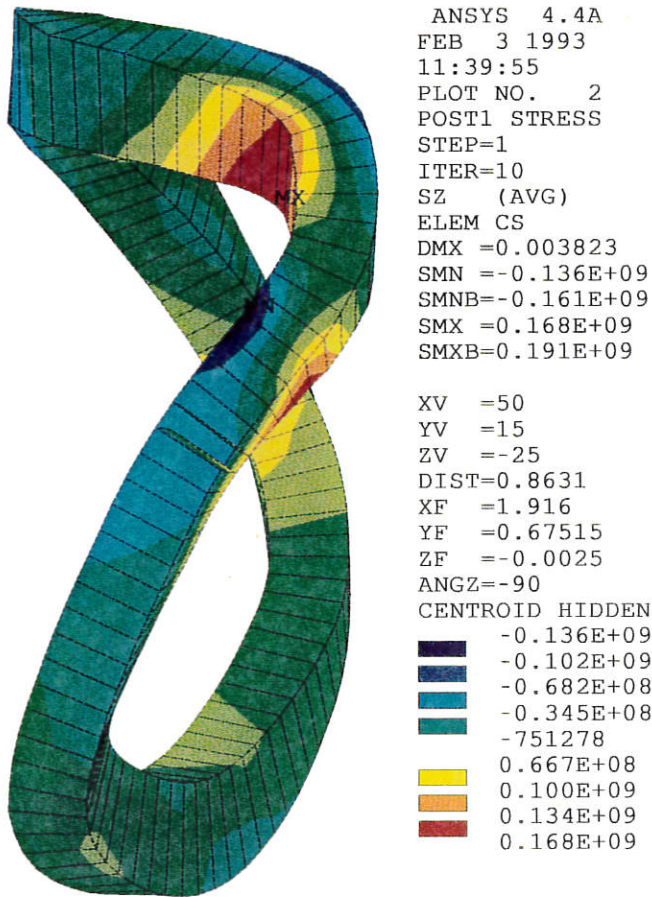


Bild 98: Spulenspannungen - Spule 3
 - Isotrop -
 Mit radialer Abstützung
 8-Knoten Solid-Elemente
 SZ (tangential - siehe Bild 5)
 max.= 168 MPa

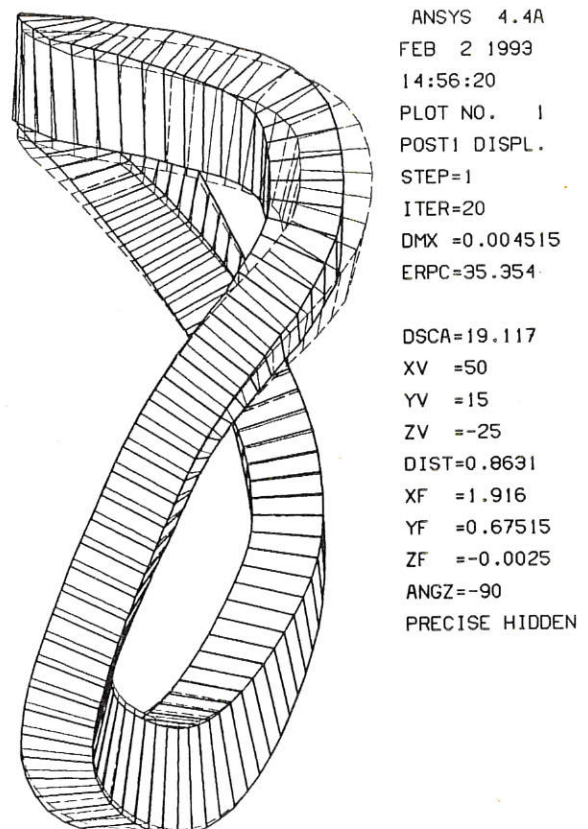
9.5 Bettung bei orthotropem Material

Wird bei der Bettung das orthotrope Materialverhalten berücksichtigt, so ergeben sich maximale Verformungen von 4,51 mm (Bild 99), die Vergleichsspannungen stellen sich zu

$\sigma_Z = 194,5 \text{ MPa}$ im Schadenbereich ein (Bild 100).

Auch der Vergleich der tangentialen Spannungen σ_E (Bild 101) mit maximal 175 MPa zeigt eine nur unwesentliche Erhöhung gegenüber dem Modell mit isotropen Material (Bild 98) wobei σ_Z maximal 168 MPa beträgt.

Bild 99: Verformung -
 Spule 3 - Orthotrop -
 Mit radialer Abstützung
 8-Knoten Solid-Elemente
 max. Verformung 4,51 mm





ANSYS 4.4A
 FEB 2 1993
 14:58:02
 PLOT NO. 1
 POST1 STRESS
 STEP=1
 ITER=20
 SIGE (AVG)
 DMX =0.004515
 SMN =-0.222E+07
 SMX =0.206E+09
 SMXB=0.225E+09

XV =50
 YV =15
 ZV =-25
 DIST=0.8631
 XF =1.916
 YF =0.67515
 ZF =-0.0025
 ANGZ=-90

CENTROID HIDDEN

0.222E+07
0.249E+08
0.475E+08
0.702E+08
0.928E+08
0.115E+09
0.138E+09
0.161E+09
0.183E+09
0.206E+09

Bild 100: Spulenspannungen SIGE -
 Spule 3 - Orthotrop -
 Mit radialer Abstützung
 8-Knoten Solid-Elemente
 SIGE max.= 206 MPa



ANSYS 4.4A
 FEB 3 1993
 11:39:55
 PLOT NO. 2
 POST1 STRESS
 STEP=1
 ITER=10
 SZ (AVG)
 ELEM CS
 DMX =0.003823
 SMN =-0.136E+09
 SMNB=-0.161E+09
 SMX =0.168E+09
 SMXB=0.191E+09

XV =50
 YV =15
 ZV =-25
 DIST=0.8631
 XF =1.916
 YF =0.67515
 ZF =-0.0025
 ANGZ=-90

CENTROID HIDDEN

-0.136E+09
-0.102E+09
-0.682E+08
-0.345E+08
-751278
0.667E+08
0.100E+09
0.134E+09
0.168E+09

Bild 101: Spulenspannungen -
 Spule 3 - Orthotrop -
 Mit radialer Abstützung
 8-Knoten Solid-Elemente
 SZ (tangential - siehe
 Bild 5)
 max.= 175 MPa

Bewertung: Die Untersuchungen haben gezeigt, daß die Übernahme des IABG-Modells und die Nachberechnung mit ANSYS (Kapitel 6) trotz nicht wirklichkeitsgetreuer Generierung der Seitenmittenknoten und unvollständiger Anwendung von Gap-Elementen relativ gut mit den Ergebnissen der später genauer ausgeführten Modelle übereinstimmt.

9.6 Untersuchung detaillierter lokaler Verschiebungs- und Spannungsverhältnisse:

Für die lokale Analyse der Resultate werden dann nutzbringend spezielle Rechenverfahren eingesetzt, wenn man nach der Berechnung eines Gesamtmodells davon ausgehen kann, daß die Verschiebungen bekannt sind und für eine detailliertere Untersuchung zur Verfügung stehen. Um diese Rechentechnik und ihre Merkmale zu verdeutlichen, soll die Art des Vorgehens bei dieser auch als Submodelling-Technik (Kap.14 in /6/) bekannten Methode erläutert werden: In einem ersten Schritt wird ein Modell mit ausreichend guter Elementunterteilung berechnet, wobei die Elementunterteilung die wesentlichen Verschiebungen an den Knoten aufweisen soll. Bild 100 zeigt die Auswertung dieses Modells mit Vergleichsspannungen, deren Maximum bei 206 MPa liegt.

In einem zweiten Schritt wird ein verfeinertes Modell einer Teilstruktur erzeugt, welches durch eine genügend gute Verfeinerung bei der Elementaufteilung eine entsprechend gute Aussage hinsichtlich lokaler Resultate erwarten läßt.

Anschließend werden die im ersten Schritt gewonnenen Verschiebungen auf die Schnitt-ränder des verfeinerten Modells übertragen und entsprechend der feineren Knotenaufteilung verteilt, so daß damit das verfeinerte Modell für eine anschließende Analyse verwendet werden kann. Die Ergebnisse der verfeinerten Analyse zeigen maximale Vergleichsspannungen in der Höhe von 234 MPa (Bild 102).

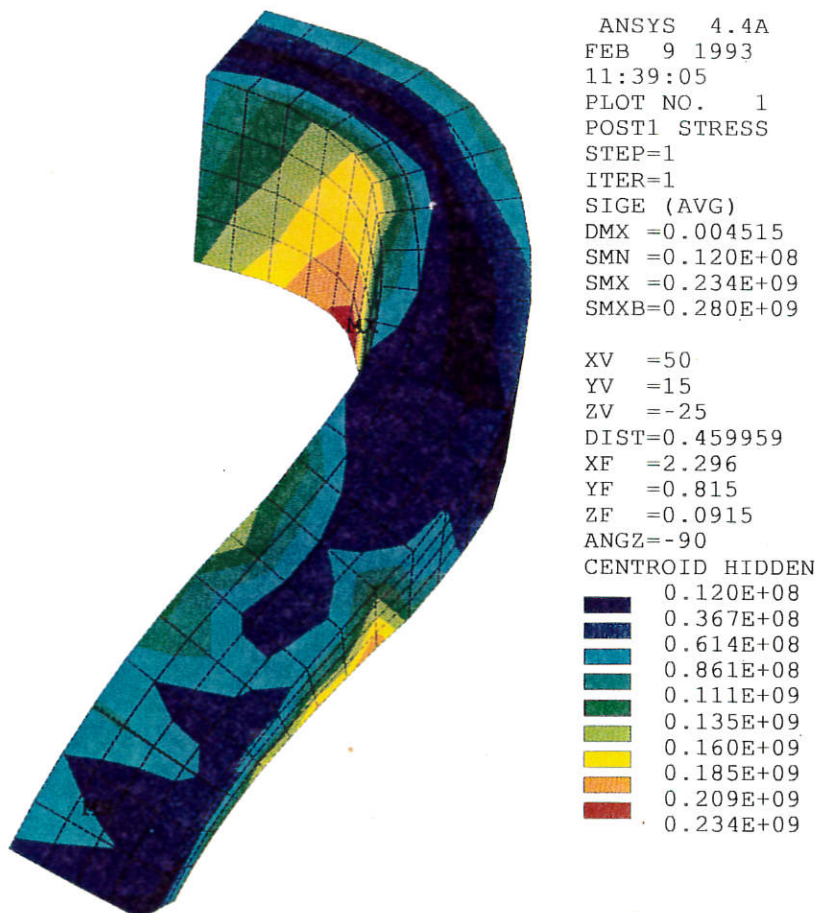


Bild 102: Spulenspannungen SIGE -
Spule 3 - Orthotrop -
Mit radialer Abstützung
8-Knoten Solid-Elemente
Verfeinertes Modell
(4x4 Elemente statt 1x1
in der Section)
SIGE_{max} = 234 MPa

Das Merkmal dieses Vorgehens ist eine genügend gute Aussage zu den lokalen Ergebnissen bei großen Modellen, die bei genügend feiner Aufteilung nur mit erheblichem Mehraufwand rechnerisch erhalten werden kann. Bei der ursprünglichen Berechnung durch die IABG (Bild 5) wurde an dieser Stelle die Analyse der Spule MF3 mit verfeinerter Elementunterteilung durch Volumenelemente mit Seitenmittenknoten durchgeführt (siehe Kap. 9.4), wobei die Seitenmittenknoten linear in der Mitte der Eckknoten lokalisiert waren (IABG-Berechnung). Es lag die Vermutung nahe, eine Verbesserung bei der Berechnung durch die Positionierung der Seitenmittenknoten an die gekrümmten Konturlinien der äußeren Geometrie zu erreichen.

10. Vergleichsrechnung mit dem FEM-Code ADINA

Um zu gewährleisten, daß die mit Hilfe des ANSYS-Programms gewonnenen Ergebnisse auch durch vergleichbare FE-Programme bestätigt werden, wurde ein Ausschnitt der Spule MF3 im Schadenbereich ausgesucht und ein entsprechendes ANSYS-Modell geschaffen. Dieses Modell wurde gleichzeitig für eine Berechnung mit dem Programm ADINA vorbereitet.

Den Ausschnitt der Spule MF3 (isotrop, 20 Knoten-Solid-Element) bilden 9 Elemente im Schadenbereich.

Das Element STIF-52 (ANSYS) wurde simuliert durch das TRUSS-Element und Vorgabe einer entsprechenden σ - ϵ -Kennlinie in dem Code ADINA (bilineares Element). Alle Knotenpunkte wurden mit Gleiteigenschaften versehen. Die Lagerung des Spulenausschnitts wurde beim Element 9 durch Federn mit einer Federkonstante $K=1.E+6$ (entsprechend der Spulensteifigkeit) tangential gelagert. Radial wurde eine nahezu starre Lagerung angewandt. Die tangentielle Verformung beim Element 1 wurde durch die Vorgabe entsprechender Kräfte simuliert.

Der Vergleich beider Ergebnisse (siehe Bild 103 und 104) zeigt ein übereinstimmendes Verhalten der Verschiebungen. Daraus kann geschlossen werden, daß auch bei Verwendung von alternativen FE-Programmen (in unserem Fall z.B. ADINA) Resultate gleicher Güte erhalten werden können (77, /8/).

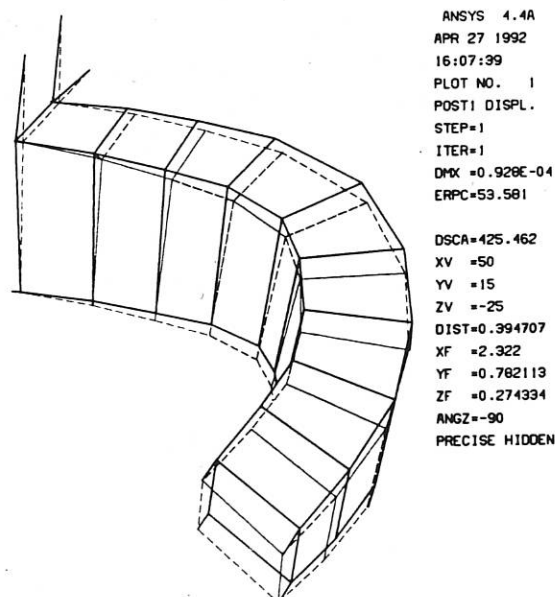


Bild 103: Berechnung mit dem Code ADINA - bilineare Elemente

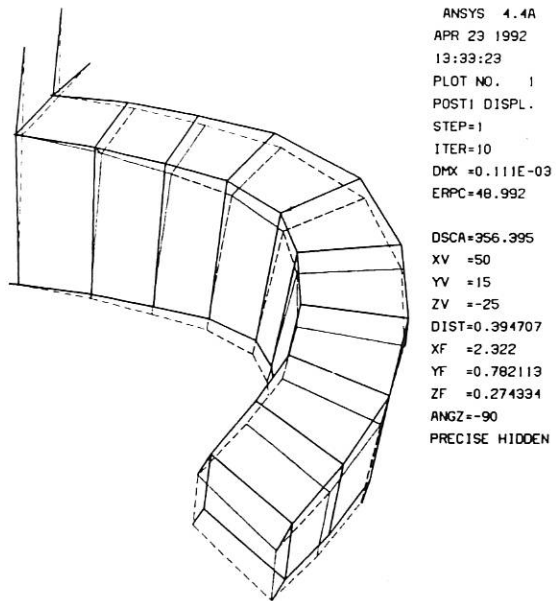


Bild 104: Berechnung mit dem Code ANSYS - Element Stif 52

11. Zusammenfassung

Die vorgelegte Arbeit hat sich im wesentlichen mit folgenden Themen beschäftigt:

- a) Übernahme des IABG-Modells (Code MSC/NASTRAN 1984). Umwandlung des Modells und anschließende Analyse mit dem Code ANSYS (Kap. 6)

Modellgröße: 1205 Elemente
6890 Knotenpunkte
- b) Untersuchungen mit unterschiedlichen Gap-Elementen (Code ANSYS) (Kap. 7.1-7.4)
Änderung im Modell: 290 Gap-Elemente (STIF-52)
- c) Optimierung des Modells im Schadenbereich /4/
Änderung im Modell: 96 neue Gap-Elemente
211 neue 3D-Elemente
- d) Erhöhung der Genauigkeit im mechanischen Spannungsbereich (Kap. 9.4,9.6).
Untersuchungen haben gezeigt, daß das IABG-Modell ausreichend genau modelliert war (Elementaufteilung).

Eine Zusammenstellung der ermittelten Vergleichsspannungen nach v. Mises im Schadenbereich der Spule 3 ist in der Tabelle 1 gegeben. Die vorliegenden Untersuchungen haben gezeigt, daß das Gap-Element STIF-52 für diese Berechnung gut geeignet ist. Bei der nachträglichen Interpretation der IABG-Ergebnisse liegt der Verdacht nahe, daß die Spule MF3 in der tangentialen Richtung blockiert war (Kap. 6.)

Rechenzeit:

Workstation VAX-3200

Die Rechenzeit beträgt typisch 73.5 Std. (244680 CPU sec.) für einen nichtlinearen Berechnungsfall.

ANSYS Modell: 1846 Elemente (53% mehr als IABG-Modell)
7127 Knotenpunkte
27620 DOF (Freiheitsgrade)

Bei diesem Modellumfang wurde die Rechenkapazität der VAX-3200 vollständig ausgenutzt. Aus diesem Grund ist es empfehlenswert, Berechnungen dieses Umfangs an einer schnelleren und leistungsfähigeren Workstation auszuführen.

Tabelle 1

Erzielte Ergebnisse der Vergleichsspannungen nach von Mises in der Spule 3
für den Auslegungsfall der IABG-Rechnung (1983)

Kapitel	Fallbeschreibung	σ_E [MPa] im Schadenbereich
6	IABG-Modell	58,6
7.1	Gleiten Stif 40	392
7.2	Gleiten Stif 52	392
7.3	Gleiten Stif 8	392
8	Gesamtmodel	323
9.1	Verfeinertes Modell, isotrop	373
9.2	Verfeinertes Modell, orthotrop	388
9.3	Radiale Kissenabstützung, isotrop	175
9.4	Verfeinertes Modell, radiale Kissenabstützung, isotrop	159
9.5	Verfeinertes Modell, radiale Kissenabstützung, orthotrop	194,5
9.6	Submodelling Technik, radiale Kissenabstützung, orthotrop	234

12. References

- /1/ Sacket S.J.
EFFI a code for Calculation the electromagneti field, force and inductance in coil systems for arbitrary geometry
Lawrence Livermore Laboratory, Report UCRL-52402 (1978)
- /2/ Gorenflo H., Jandl O.
Calculation of the nodal forces in the 20-node isoparametric three-dimensional solid element by the SHAPE computer program
Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching, Report IPP 4/167 (1978)
- /3/ Mathis R., Sapper J.
Design and Enginnering Aspects of the main Components for the Wendelstein VII-AS Stellarator Experiment
Fusion Engineering and Design 11 (1990) 399-422
North-Holland, Amsterdam
- /4/ Rapp H., Dorst D., Sapper J., Streibl B.
Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching
Bericht: Technischer Ausschuß "W7AS - Spulen" 1992
- /5/ Gorenflo H., Jandl O.
Mesh Generation for the 20-node Isoparametric Solid Element by the Computer Program MESHGEN
Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching, Report IPP 4/148(1977)
- /6/ ANSYS User's Manual for Revision 5.0 1992
Volume I - Procedure
- /7/ Mukherjee S.B.
Ring-Type Support Concept for Twisted Coils (Finite Element Simulation)
Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching, Report IPP 2/271 (1984)
- /8/ Jaksic, N., Simon-Weidner, J.
Einsatz von ADINA bei der Strukturanalyse des Spulensystems für ein großes Fusionsexperiment.
ADINA-Tagung Nürnberg April 1991
Bavaria GmbH Nürnberg
- /9/ Mahmoud F.F., Salamon N.J., Marks W.R.
A Direct Automated Procedure for Frictionless Contact Problem
Int. J.f. Num. Meth. in Engineering, Vol. 18 (1982) pp. 245-257
- /10/ Pittr J.
Kontaktproblem ohne Berücksichtigung von Reibung
Erfahrungsbuch für ICES-STRUDL 1983 S. 12.0-12.26
M.A.N. Nürnberg
- /11/ Schweizerhof K., Matzenmiller A.
Nichtlineare Berechnung mit ANSYS
Seminarunterlagen Januar 1988 Teil II - Kontakt
CAD-FEM GmbH, Ebersberg bei München
- /12/ Jandl O., Sapper J., Simon-Weidner J.
Finite element modelling with sliding effects compared with measurements obtained from the nonplanar coils in the WENDELSTEIN VII-AS Stellarator
Fusion Technology 1990 (Symposium) , London, 1506-1510
Elsevier Science Publishers B. V., 1991
- /13/ Söll M., Gorenflo H., Jandl O.
Mechanical Stress Calculations for toroidal Field Coils by the Finite Element Method
Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching, Report IPP 4/142(1976)

- /14/ Gorenflo H., Söll M.
STELLA - a computer program system for calculating magnetic fields, forces and
mechanical stresses for twisted stellarator coil systems
Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching,
Interner Bericht No. 27 (1981)
- /15/ ANSYS User's Manual for Revision 5.0 1992
Volume IV - Theory

- Bild 1a: Das W 7-AS Stellarator Experiment
- Bild 1b: Das W 7-AS Stellarator Experiment, Modularer Spulensatz
- Bild 2a: Nicht-planare MF-Spulen für W 7-AS
Spulensatz bestehend aus 2 Pancakes und 16 Kupferwindungen getrennt durch imprägnierte Glasfaser-Matten
- Bild 2b: Nicht-planare MF-Spulen für W 7-AS
Feldspule (Nummer 1) vor dem Einbau in die Struktur
- Bild 3: von außen gesehen:
Ein montiertes Modul des magnetischen Einschluß-Systems
(nur magnetisches Einschluß-System, Vakuum Gefäß nicht installiert)
- Bild 4: Blick in ein Modul:
Ein montiertes Modul des magnetischen Einschluß-Systems
(nur magnetisches Einschluß-System, Vakuum Gefäß nicht installiert)
- Bild 5: Berechnung IABG (1984) - Verformung - Spule 3
- Bild 6: gemessene Verformungen der Spule 3
- Bild 7: Verformung - Spule 3 - ANSYS Element Typ 40
- Bild 8: Verformung - Spule 3 - ANSYS Element Typ 52
- Bild 9: Vergleichspannung nach der Hypothese "von Mises"
Spule 3 - ANSYS Element Type 52
- Bild 10: Verformung - Spule 3 - ANSYS Element Typ 52
Lagerung im lokalen Koordinatensystem
10. Iteration
- Bild 11: Verformung - Spule 3 - ANSYS Element Typ 52
1. Iteration
- Bild 12: Verformung - Spule 3 - ANSYS Element Typ 52
2. Iteration
- Bild 13: Verformung - Spule 3 - ANSYS Element Typ 52
3. Iteration
- Bild 14: Vergleichspannung nach der Hypothese "von Mises"
Spule 3 - ANSYS Element Type 52
1. Iteration
- Bild 15: Vergleichspannung nach der Hypothese "von Mises"
Spule 3 - ANSYS Element Type 52
2. Iteration
- Bild 16: Vergleichspannung nach der Hypothese "von Mises"
Spule 3 - ANSYS Element Type 52
3. Iteration
- Bild 17: Vergleichspannung nach der Hypothese "von Mises"
Spule 3 - ANSYS Element Type 52
10. Iteration
- Bild 18: Topologie für die Ablastungsdiagramme
K1,K2,K3,K4 - Kanten
- Bild 19: Ablastungsdiagramm - Kante 1 - 1. Iteration
- Bild 20: Ablastungsdiagramm - Kante 2 - 1. Iteration
- Bild 21: Ablastungsdiagramm - Kante 3 - 1. Iteration
- Bild 22: Ablastungsdiagramm - Kante 4 - 1. Iteration
- Bild 23: Ablastungsdiagramm - Kante 1 - 2. Iteration
- Bild 24: Ablastungsdiagramm - Kante 2 - 2. Iteration
- Bild 25: Ablastungsdiagramm - Kante 3 - 2. Iteration
- Bild 26: Ablastungsdiagramm - Kante 4 - 2. Iteration
- Bild 27: Ablastungsdiagramm - Kante 1 - 3. Iteration

- Bild 28: Ablastungsdiagramm - Kante 2 - 3. Iteration
 Bild 29: Ablastungsdiagramm - Kante 3 - 3. Iteration
 Bild 30: Ablastungsdiagramm - Kante 4 - 3. Iteration
- Bild 31: Ablastungsdiagramm - Kante 1 - 10. Iteration
 Bild 32: Ablastungsdiagramm - Kante 2 - 10. Iteration
 Bild 33: Ablastungsdiagramm - Kante 3 - 10. Iteration
 Bild 34: Ablastungsdiagramm - Kante 4 - 10. Iteration
 Bild 35: Verformung - Spule 3 - ANSYS Element Typ 8
 Truss-Element
 Lagerung im lokalen Koordinatensystem
 1. Iteration
- Bild 36: Verformung - Spule 3 - ANSYS Element Typ 8
 2. Iteration
- Bild 37: Verformung - Spule 3 - ANSYS Element Typ 8
 3. Iteration
- Bild 38: Verformung - Spule 3 - ANSYS Element Typ 8
 4. Iteration
- Bild 39: Verformung - Spule 3 - ANSYS Element Typ 8
 5. Iteration
- Bild 40: Verformung - Spule 3 - ANSYS Element Typ 8
 7. Iteration
- Bild 41: Verformung - Spule 3 - ANSYS Element Typ 8
 7. Iteration
- Bild 42: Ablastungsdiagramm - Kante 1 - 1. Iteration
 Bild 43: Ablastungsdiagramm - Kante 2 - 1. Iteration
 Bild 44: Ablastungsdiagramm - Kante 3 - 1. Iteration
 Bild 45: Ablastungsdiagramm - Kante 4 - 1. Iteration
 Bild 46: Ablastungsdiagramm - Kante 1 - 2. Iteration
 Bild 47: Ablastungsdiagramm - Kante 2 - 2. Iteration
 Bild 48: Ablastungsdiagramm - Kante 3 - 2. Iteration
 Bild 49: Ablastungsdiagramm - Kante 4 - 2. Iteration
 Bild 50: Ablastungsdiagramm - Kante 1 - 4. Iteration
 Bild 51: Ablastungsdiagramm - Kante 2 - 4. Iteration
 Bild 52: Ablastungsdiagramm - Kante 3 - 4. Iteration
 Bild 53: Ablastungsdiagramm - Kante 4 - 4. Iteration
 Bild 54: Ablastungsdiagramm - Kante 1 - 7. Iteration
 Bild 55: Ablastungsdiagramm - Kante 2 - 7. Iteration
 Bild 56: Ablastungsdiagramm - Kante 3 - 7. Iteration
 Bild 57: Ablastungsdiagramm - Kante 4 - 7. Iteration
 Bild 58: Spulenverformungen, max. 8,87 mm
 Bild 59: Verformung - Spule 3 - max. 8,87 mm
 Bild 60: Strukturverformung von -Z gesehen - max. 2,49 mm
 Bild 61: Strukturverformung von +Z gesehen - max. 2,49 mm
 Bild 62: Spulenspannungen SIGE (Vergleichspannung)
 Das Maximum liegt in Spule MF3 - (323 MPa)
- Bild 63: Spulenspannungen SIGE (Vergleichspannung)
 Spule MF3
- Bild 64a: Spulenspannungen SIGE (Vergleichspannung)
 Spule MF4 - max. 205 MPa
- Bild 64b: Verformung - Spule 4 - max. 3,18 mm

- Bild 65: Strukturspannungen SIGE (Vergleichspannung)
 von -Z gesehen - max 428 MPa
- Bild 66: Strukturspannungen SIGE (Vergleichspannung)
 von +Z gesehen - max 428 MPa
- Bild 67: Abstützkräfte für Strukturschale
- Bild 68: Verformung - Spule MF3 - Detail
- Bild 69: Verformung - Spule MF3 - Detail
- Bild 70: Ablastungsdiagramm - Kante 1 - 1. Iteration
- Bild 71: Ablastungsdiagramm - Kante 2 - 1. Iteration
- Bild 72: Ablastungsdiagramm - Kante 3 - 1. Iteration
- Bild 73: Ablastungsdiagramm - Kante 4 - 1. Iteration
- Bild 74: Ablastungsdiagramm - Kante 1 - 2. Iteration
- Bild 75: Ablastungsdiagramm - Kante 2 - 2. Iteration
- Bild 76: Ablastungsdiagramm - Kante 3 - 2. Iteration
- Bild 77: Ablastungsdiagramm - Kante 4 - 2. Iteration
- Bild 78: Ablastungsdiagramm - Kante 1 - 3. Iteration
- Bild 79: Ablastungsdiagramm - Kante 2 - 3. Iteration
- Bild 80: Ablastungsdiagramm - Kante 3 - 3. Iteration
- Bild 81: Ablastungsdiagramm - Kante 4 - 3. Iteration
- Bild 82: Ablastungsdiagramm - Kante 1 - 7. Iteration
- Bild 83: Ablastungsdiagramm - Kante 2 - 7. Iteration
- Bild 84: Ablastungsdiagramm - Kante 3 - 7. Iteration
- Bild 85: Ablastungsdiagramm - Kante 4 - 7. Iteration
- Bild 86: Mit Splinefunktion-Code interpoliertes Modell
 96 (8-Knoten) Solid-Elemente
- Bild 87: Mit Splinefunktion-Code interpolierte Modell
 Detail
- Bild 88: Verformung - Spule 3 - Isotrop -
 Ohne radialen Abstützung
 20-Knoten Hexa-Elemente
 max. Verformung 7,11 mm
- Bild 89: Spulenspannungen SIGE - Spule 3 - Isotrop -
 Ohne radialen Abstützung
 20-Knoten Hexa-Elemente
 SIGE max.= 396 MPa
- Bild 90: Verformung - Spule 3 - Isotrop -
 Ohne radialen Abstützung
 8-Knoten Solid-Elemente
 max. Verformung 7,36 mm
- Bild 91: Spulenspannungen SIGE - Spule 3 - Isotrop -
 Ohne radialen Abstützung
 8-Knoten Solid-Elemente
 SIGE max.= 373 MPa
- Bild 92: Verformung - Spule 3 - Orthotrop -
 Ohne radiale Abstützung
 8-Knoten Solid-Elemente
 max. Verformung 9,19 mm
- Bild 93: Spulenspannungen SIGE - Spule 3 - Orthotrop -
 Ohne radiale Abstützung
 8-Knoten Solid-Elemente
 SIGE max.= 388 MPa

- Bild 94: Verformung - Spule 3 - Isotrop -
Mit radialen Abstützung
20-Knoten Hexa-Elemente
max. Verformung 3,36 mm
- Bild 95: Spulenspannungen SIGE - Spule 3 - Isotrop -
Mit radialen Abstützung
20-Knoten Hexa-Elemente
SIGE max.= 175 MPa
- Bild 96: Verformung - Spule 3 - Isotrop -
Mit radialen Abstützung
8-Knoten Solid-Elemente
max. Verformung 3,82 mm
- Bild 97: Spulenspannungen SIGE - Spule 3 - Isotrop -
Mit radialen Abstützung
8-Knoten Solid-Elemente
SIGE max.= 219 MPa
- Bild 98: Spulenspannungen - Spule 3 - Isotrop -
Mit radialen Abstützung
8-Knoten Solid-Elemente
SZ (Tangential - siehe Bild 5) max.= 168 MPa
- Bild 99: Verformung - Spule 3 - Orthotrop -
Mit radialen Abstützung
8-Knoten Solid-Elemente
max. Verformung 4,51 mm
- Bild 100: Spulenspannungen SIGE - Spule 3 - Orthotrop -
Mit radialen Abstützung
8-Knoten Solid-Elemente
SIGE max.= 206 MPa
- Bild 101: Spulenspannungen - Spule 3 - Orthotrop -
Mit radialen Abstützung
8-Knoten Solid-Elemente
SZ (tangential - siehe Bild 5) max.= 175 MPa
- Bild 102: Spulenspannungen SIGE - Spule 3 - Orthotrop -
Mit radialen Abstützung
8-Knoten Solid-Elemente
Verfeinertes Modell (4x4 Elemente statt 1x1 in der Section)
SIGE max.= 234 MPa
- Bild 103: Berechnung mit dem Code ADINA - bilineare Elemente
- Bild 104: Berechnung mit dem Code ANSYS - Element Stif 52