MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPYSIK
Garching bei München

DEFINITION DER RANDBEDINGUNGEN BEI EINER FE-STRUKTURANALYSE DURCH NUTZUNG DER SYMMETRIEBEDINGUNGEN EINER STELLARATORANORDNUNG

Nikola Jaksic

IPP Z/3 Februar 1997

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

Inhaltverzeichnis

Zusammenfassung - Abstract 1
1. Einleitung 2
2. Grundbegriffe der Bindungsgleichungen 3
3. Beschreibung der W7-X Geometrie 4
4. Symmetrieflächen und Bindungsgleichungen 5
5. Bedingungen und Einschränkungen 9
6. Vergleichsanalyse 9
7. Schlußfolgerungen 18
Danksagung 18
Literaturverzeichnis 18

Zusammenfassung

Das Großexperiment WENDELSTEIN 7-X (W 7-X) ist ein Stellarator, dessen Baukonzept modular ist. Die Anlage, bestehend aus 5 Modulen (Perioden), basiert auf dem modular konzipierten Spulensystem. Dieses besteht aus einer Anordnung von 50 Spulen, die durch Symmetriebedingungen geprägt ist. Diese Symmetrieeigenschaften, deren Ursprung in der Physik des Plasmaeinschlusses liegen, legen den Gedanken nahe, sie auch in der Strukturanalyse nutzbar zu machen.
Der vorliegende Bericht soll das Verständnis der bei diesem Stellaratortyp für die Strukturanalyse angewendeten unterschiedlichen Symmetriebedingungen erleichtern. Die Anwendung der Symmetrieeigenschaften, ergibt bei der Modellerstellung einen nicht zu unterschätzenden Vorteil: Die zu untersuchende Struktur kann auf eine halbe Periode beschränkt werden. Damit kann der Schwerpunkt der Analyse auf eine hohe Verfeinerung in der Elementunterteilung verlagert werden. Diese Verfeinerung ist gleichzusetzen mit einer entsprechend erhöhten Genauigkeit der Rechenergebnisse.

Abstract

The large plasma fusion experiment WENDELSTEIN 7-X (W 7-X) is a stellarator, whose design is modular. The equipment is based on 5 moduls (periods) with respect to the concept of the modular coil system. The coil system consists of an arrangement of 50 coils. This system is characterized by certain symmetry properties which are defined by the physics of the plasma confinement. Consideration of these properties could turn out to be particulary useful in the structure analysis.
The present report will contribute to the understanding of various symmetry conditions used in the structure analysis of this stellarator type. The application of this symmetry provides a great adventage in the context of the model construction. The analysed structure can be confined to a half period. In this way the main emphasis of the analysis is transfered to a high refinement of the element subdivision. This improvement is equivalent to an increased precision of the calculated results.

1. Einführung

Die periodisch modulare Bauweise des Stellarators, Abb. 1, bietet die Möglichkeit einer Reduktion der Größe der für die Strukturanalyse benötigten Finite Elemente-(FE) Modelle an. Hierfür müssen jedoch die Randbedingungen, die an den Schnittstellen zu definieren sind, sorgfältig formuliert werden.
Die Randbedingungen können mit wenigen Einschränkungen exakt aus den Symmetriebedingungen hergeleitet werden. Dies erfolgt durch Nutzung der in den Finite Element FE Programmen vorhandenen Optionen. Die Reduktion der Größe der Berechnungsmodelle bedeutet eine erhebliche Einsparung an Speicherplatz und Rechenzeit. Durch die Verfeinerung des Modells kann im Grenzfall sogar eine detaillierte Strukturanalyse trotz der Größe des Modells durchgeführt werden.
Ebenso lassen sich die Randbedingungen für alle Komponenten (Spulen, Vakuumgefäß, usw.) des Plasmafusionsexperimentes definieren, die denselben Symmetriebedingungen gehorchen. Die Geometrie der Stellaratoranlage ist teilweise achsensymmetrisch bzw. rotationsymmetrisch. Bei der Definition der Randbedingungen des reduzierten Modells wird nur die Achsensymmetrie benutzt, die im speziellen Fall auch Stellaratorsymmetrie benannt wird. Die bei der Definition der Randbedingungen benutzten Optionen werden in der Literatur und je nach FE Programm unterschiedlich benannt. Die meistverbreitete Benennung ist "Multi-Point Constraint" (MPC), neben anderen wie z.B. "Constraint Equations" oder "Servo Link" usw. Im allgemeinen werden die aus Symmetrieeigenschaften hergeleiteten Randbedingungen durch Bindungs- bzw. Zwangsgleichungen definiert.

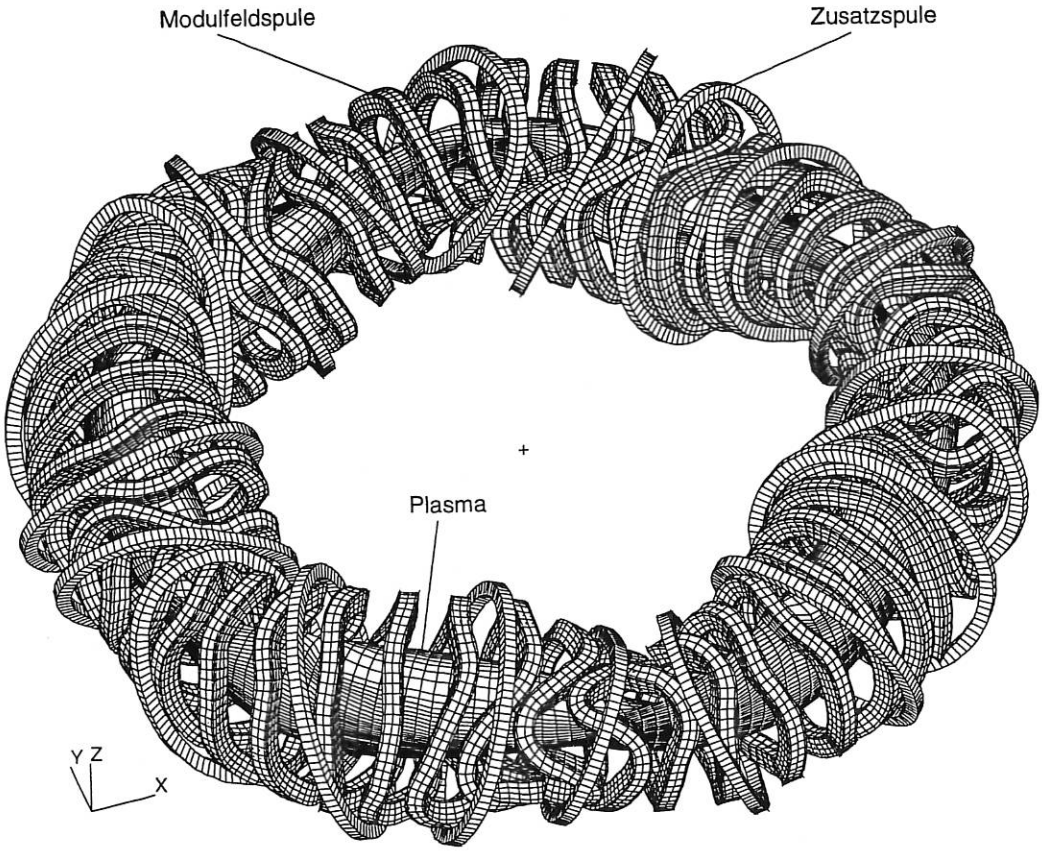

Abb. 1: WENDELSTEIN 7 - X (W7-X) Spulensystem

2. Grundbegriffe der Bindungsgleichungen

Die Bindungsgleichungen ermöglichen die Bildung von speziellen Zusammenhängen zwischen den Knotenfreiheitsgraden. Auf diese Weise kann man zwei oder mehrere Freiheitsgrade zwingen gleiche Werte anzunehmen. Diese Werte müssen zu dem Zeitpunkt der Gleichungsaufstellung nicht bekannt sein. Dieser Vorgang wird auch Koppelung von Freiheitsgraden genannt.
Die Bindungsgleichungen haben im Allgemeinen folgende Form:

$$U_o = C_1U_1 + C_2U_2 + ... + C_iU_i + ... + C_nU_n + C_o \tag{1}$$

wobei U_o ein abhängiger, U_i ein unabhängiger Freiheitsgrad, C_i ein Faktor und C_o eine spezielle Konstante ist.

Hierbei erlauben manche Programme die Bezugnahme auf bis zu 32 unabhängigen Freiheitsgraden innerhalb einer Gleichung.

Ein Beispiel einer expliziten Formulierung der Bindungsgleichung lautet:

$$UX_{Knoten3}=0.5*UX_{Knoten7} - 0.75*UY_{Knoten12} + 1.0 \tag{2}$$

Diese Gleichung definiert die X-Verschiebung von Knoten 3 als halbe X-Verschiebung von Knoten 7 minus drei Viertel der Y-Verschiebung von Knoten 12 plus die Konstante 1.0. Sie enthält einen abhängigen Term, zwei unabhängige Terme und eine Konstante.
Da die Modell-Größen unter Umständen teilweise lokalen Koordinatensystemen zugeordnet sind, ist bei der Aufstellung dieser Bindungsgleichungen darauf zu achten, daß sich alle in der Bindungsgleichung vorkommenden Terme einheitlich auf das selbe Koordinatensystem beziehen.
Durch die Aufstellung von Bindungsgleichungen werden in dem System der Matrizengleichung (3) alle abhängigen Freiheitsgrade eliminiert, so daß nur die unabhängigen Freiheitsgrade erhalten bleiben:

$$[K] * \{U\} = \{F\} \tag{3}$$

wobei $[K]$ die Gesamtsteifigkeitsmatrix des Systems, $\{U\}$ der Verschiebungsvektor und $\{F\}$ der Kraftvektor ist.

Die Elimination von abhängigen Freiheitsgraden bewirkt die Reduktion von Unbekannten in dem System der Matrizengleichungen. Dadurch wird die Zeit der Auflösung des Systems der Matrizengleichungen kürzer. Die Zeit zum Erstellen der Matrizen steigt aber nach [2] gleichzeitig etwas an.

Die Berechnungsmodelle können durch Bindungsgleichungen in folgenden Fällen reduziert werden:

- Berücksichtigung von Symmetrie und Teilsymmetrie
- Kopplung durch Gelenke
- Simulation von Linearführung
- Starrkörperbewegung.

Einige typische Beispiele der FE-Modellreduktion durch Definition der Randbedingungen mittels Ausnutzung der Symmetriebedingungen sind in Abb. 2 schematisch dargestellt. Hierbei wird das FE-Modell auf ein Viertel der Geometrie in der Abb. 2a bzw. auf nur ein Segment in der Abb. 2b reduziert. In der Abb. 2a wird angenommen, daß alle Rahmenteile gleiche Länge haben und daß die Lasten gleich groß sind.

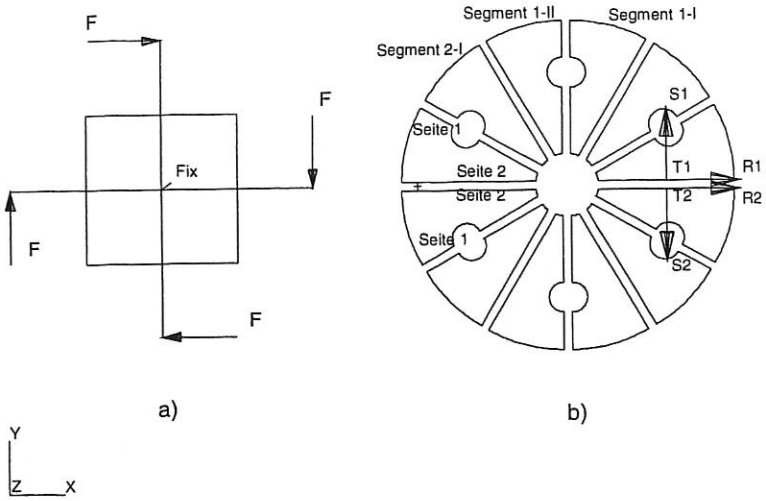

Abb. 2: Beispiele der Symmetriebedingungen

Die Symmetriebedingung, die bei der Reduktion des FE-Modells im Falle 2a benutzt wird, ist die Rotationsymmetrie. Im Beispiel 2b wird zusätzlich zur Rotationsymmetrie eine Untersymmetrie bezüglich der Achse R erkennbar und bei der Reduktion des FE-Modells benutzt. Diese Art der Untersymmetrie wird im speziellen Fall Abb. 2b auch "Dihedral-Symmetrie"[3] genannt.

3. Beschreibung der W7-X Geometrie

Am Beispiel des Plasmafusionsexperimentes Wendelstein 7-X Abb.1 wird die geometrische Gesetzmäßigkeit dieses Stellaratortyps erörtert. Die Anlage basiert auf 50- supraleitenden nichtplanaren Modulfeld- und 20 ebenfalls supraleitenden planaren Zusatzspulen. Die einzelnen Modulfeldspulen des mittleren Durchmessers 2.75 m sind in einer torusförmigen Anordnung des mittleren Durchmessers 11.0 m über Strukturteile verbunden. Das torusförmige Gebilde der Spulenanordnung ist durch seine Helizität gekennzeichnet, die auf die Form einzelner Spulen und deren Anordnung zurückzuführen ist. Die Spulenanordnung besteht aus 5 Perioden (Modulen) mit jeweils 10 Modulfeldspulen und 4 Zusatzspulen. Geometrisch gesehen unterscheiden sich tatsächlich nur 5 Modulfeld- und 2 Zusatzspulen voneinander, die gleichzeitig eine halbe Periode innerhalb der Spulengeometrie definieren. Der Rest der Geometrie kann durch entsprechende Transformationen erstellt werden, d.h. die zweite Hälfte der Periode 1 kann durch Drehen der Spulen 1-5 um Achse B1 um 180° erstellt werden, Abb. 3. Die Periode 2 kann auf zwei unterschiedlichen Wegen erstellt werden:

- Drehen der Spulen 1-10 um Torusachse um 72°
- Drehen der Spulen 1-10 um Achse A2 um 180°.

Aus dieser Betrachtung ergibt sich die Erkenntnis, daß es Symmetrieflächen in der Stellaratorgeometrie gibt, die zweierlei Symmetriebedingungen gehorchen. Einerseits der Achsensymmetrie und anderseits der Rotationsymmetrie, wenn eine halbe bzw. eine ganze Periode betrachtet wird.
Allgemein ist jeder Abschnitt der Spulengeometrie zwischen zwei Halbebenen bei 72°, deren Schnittlinie mit der Torusachse zusammenfällt, eine Periode. Weiterhin ist dieser Abschnitt bezüglich der Torusachse rotationsymmetrisch.

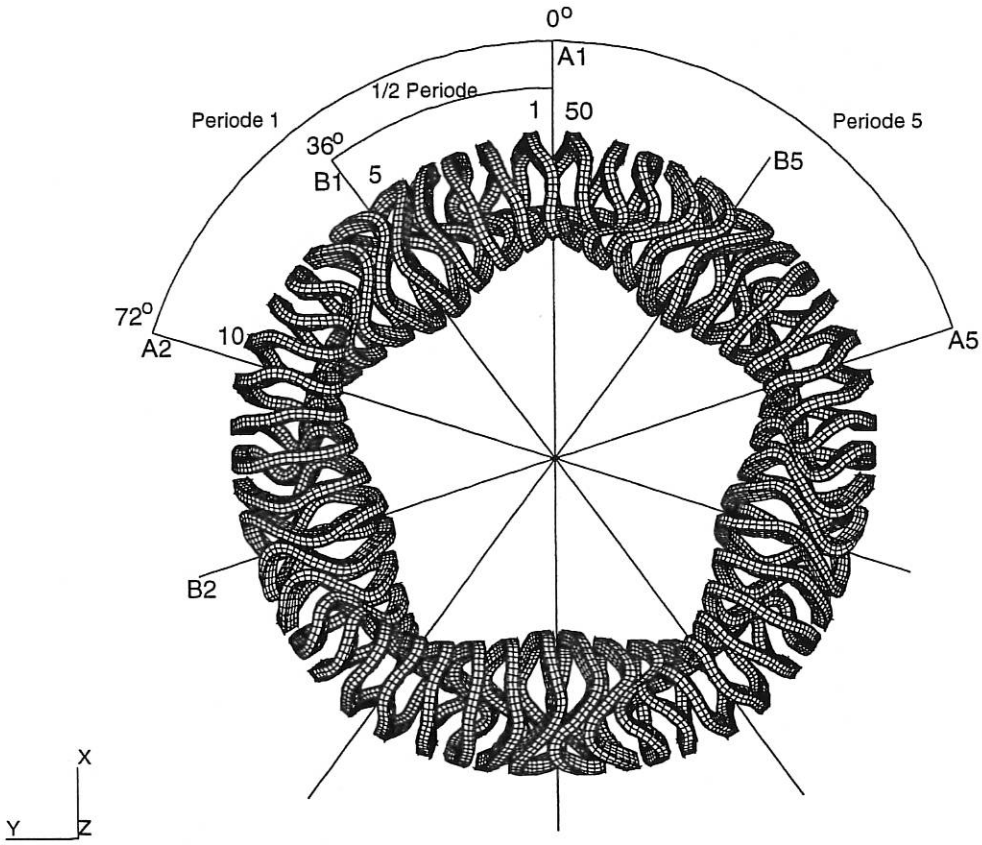

Abb. 3: Symmetrieachsen der W7-X Spulengeometrie

In ähnlicher Weise läßt sich eine Periode definieren, die entweder von zwei - bezogen auf die Torusachse schief gelegenen - Ebenen begrenzt ist oder die durch zwei in ihrer Gestalt identischen Freiformflächen eingeschlossen ist. In beiden Fällen ist es Bedingung, daß die Schnittlinie der Flächen, die eine Periode eingrenzen, den Urspung des Quasi-Torus durchlaufen. Von praktisch unendlich vielen Möglichkeiten werden bei der Definition der Randbedingungen bestimmte Stellen der Stellaratorgeometrie und eine bestimmte Form der Schnittflächen gewählt. Der bei dem Vorgang führende Gedanke ist, das Modell auf eine halbe Periode zu beschränken.

4. Symmetrieflächen und Bindungsgleichungen

Die Schnitte durch die Struktur werden so gelegt, daß der Spulenkörper unversehrt bleibt. Außerdem wird darauf geachtet, daß die einzelnen Strukturteile in ihrer Form nicht verletzt werden.
Die Symmetrieflächen, die diese Bedingungen erfüllen und gleichzeitig die Definition der Randbedingungen durch Bindungsgleichungen ermöglichen, liegen unter einem Winkelabstand von $\varphi = 36° * n$ (n=0,1,2,..) am Umfang des Quasi-Toruses, Abb. 3. Der Winkelabstand wird in der xy-Ebene gemessen, da es sich hier um zwei in der Form unterschiedliche Symmetrieflächen handelt. Diese Symmetrieflächen sind in sich achsensymmetrisch bezüglich der Mittelachsen A1 bzw. B1, die in der xy-Ebene liegen und sich im Torusmittelpunkt schneiden (Abb. 4). Die so definierten Flächen grenzen genau eine halbe Periode ein.
Ausgehend von den bereits beschriebenen Symmetrieflächen findet man unter einem Winkelabstand von $\varphi = 36° * 2n$ (n=0,1,2,..) in der Form identische Symmetrieflächen.

Dies bedeutet, daß sich die Geometrie mit diesem Winkelabstand wiederholt, und daß die so gewählten Flächen eine ganze Periode eingrenzen. Durch diese Betrachtung wird die im Kapitel 3 aufgestellte Behauptung nachgewiesen, daß die Geometrie rotationsymmetrisch ist.
Das erstrebte Ziel ist die maximale Reduktion des FE-Modells, deswegen wird im Weiteren nur noch eine halbe Periode mit deren Symmetriebedingungen behandelt. Der zweite Symmetriefall mit einer ganzen Periode ist der Vollständigkeit halber erwähnt und wird nur bei den Nachweisberechnungen für die Richtigkeit der Rechenergebnisse verwendet.
Abb. 4 zeigt schematisch die Symmetrieflächen mit ihren Symmetrieachsen. Dabei ist sichtbar, daß die Symmetrieachsen der Geometrie einer halben Periode mit den Symmetrieachsen der Symmetrieflächen zusammenfallen müssen.
Die in Abb. 4 dargestellte Struktur ist bei der Stellarator-Reaktor-Studie verwendet worden [6].

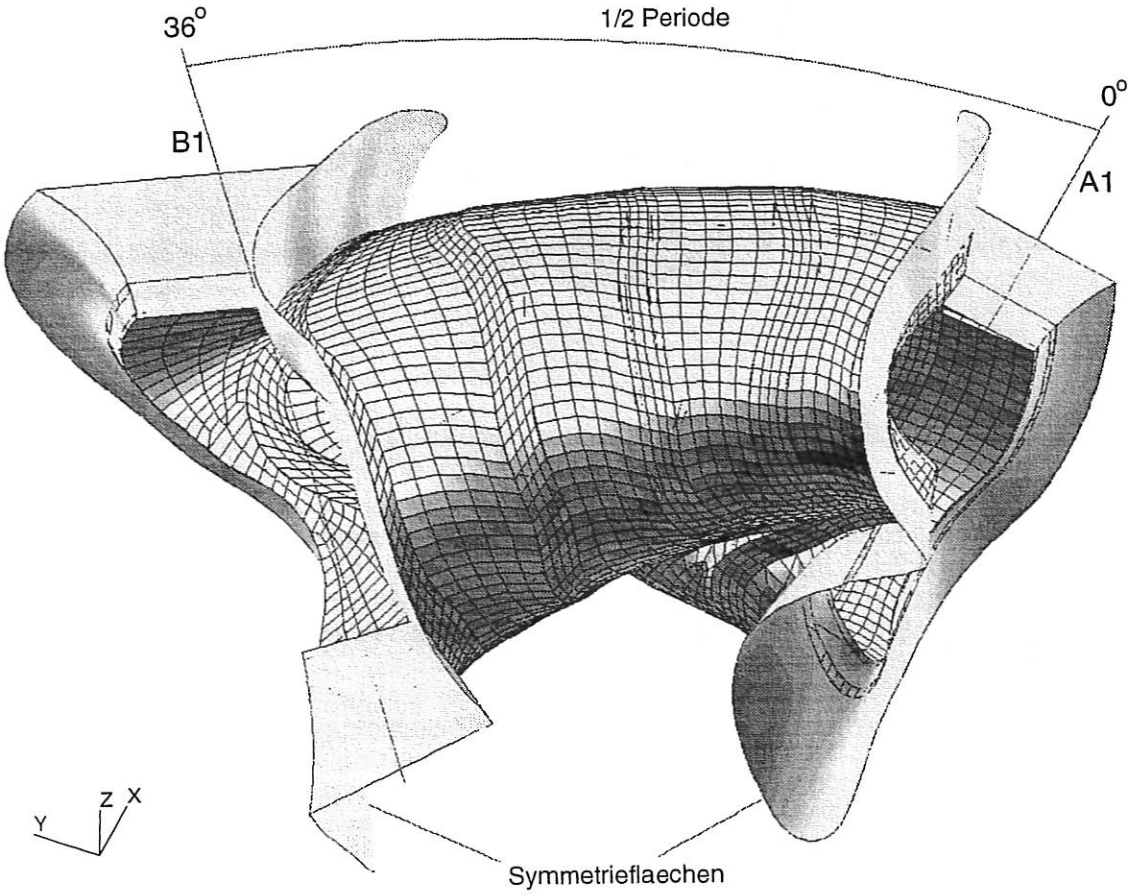

Abb. 4: Symmetrieflächen mit Symmetrieachsen

Hier wird illustriert, daß die Schnitt-Linien bzw. -Flächen entlang der Ränder der Strukturteile verlaufen.
Die Bindungsgleichungen verlangen noch, daß neben der Geometrie auch die Lasten denselben Symmetriebedingungen gehorchen. Diese Bedingung ist automatisch erfüllt, da die Lasten einzig durch elektromagnetische Kräfte definiert werden. Bekanntlich ist die Form der elektromagnetischen Kräfte durch die Geometrie des Leiters und damit der Geometrie der Spule definiert.
Bevor die Bindungsgleichungen geschrieben werden können, müssen in der Symmetriefläche die Punktepaare nach demselben Prinzip der Achsensymmetrie gebildet werden. Diese Punktepaare werden als diskrete Größen bei der Gleichungsaufstellung benutzt.

Die Abb. 5a zeigt die Symmetriefläche bei 36° einer Version der Stellarator-Reaktor Geometrie, wobei die Linien quer über die Spulengeometrie die symbolische Verbindung der Punktepaare kennzeichnen, an denen die Bindungsgleichungen definiert werden. Die Abb. 5b zeigt diese Punktepaare, die der Achsensymmetrie gehorchen, da die Verbindungslinien die Symmetrieachse B1 durchlaufen.

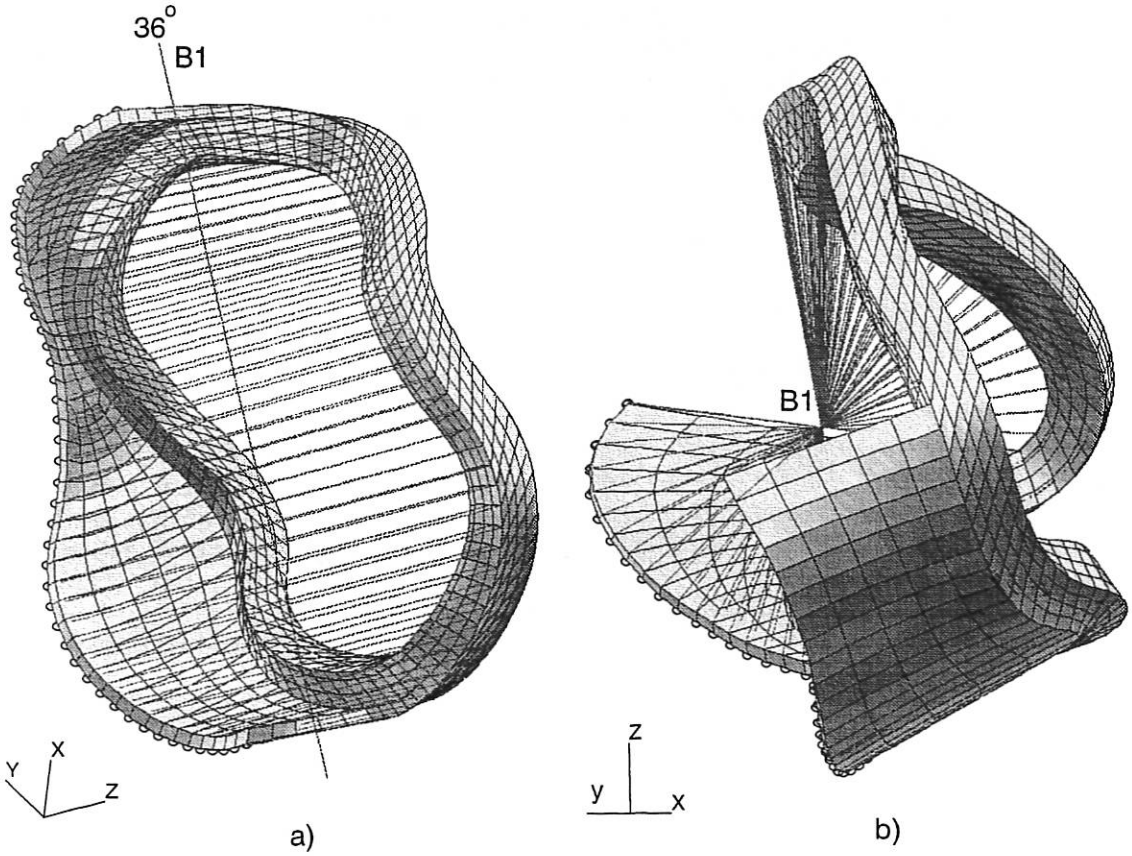

Abb. 5: Schematische Darstellung der Bindungsgleichungen

Sinngemäß müssen diese Punkte ein Teil der FE-Größen sein, die in der FE-Sprache gewöhnlich als Knoten benannt werden. Mit anderen Worten, die Knoten sind eigentlich Stützpunkte der Bindungsgleichungen. Dies bedeutet, daß nicht nur die Geometrieerstellung sondern auch die Aufteilung in Finite Elemente nach denselben Prinzipien der Achsensymmetrie durchzuführen ist.
Aufgrund der in diesem Kapitel und Kapitel 3 beschriebenen Symmetriebedingungen, bei Berücksichtigung des Kompatibilitätsgesetzes[8], können entsprechend (1) zwischen Freiheitsgraden eines Knotenpaares an der Symmetriefläche 0° Abb. 3 folgende Bindungsgleichungen definiert werden:

$$UX_{(ab)} = 1*UX_{(un)} \tag{4}$$
$$UY_{(ab)} = (-1)*UY_{(un)} \tag{5}$$
$$UZ_{(ab)} = (-1)*UZ_{(un)} \tag{6}$$

Index (ab) gilt für einen abhängigen, und Index (un) für einen unabhängigen Freiheitsgrad.

Die Wahl der unabhängigen, bzw. abhängigen Größen innerhalb eines Knotenpaares ist unabhängig davon, bei welchem individuellen Knoten es angewendet wird.

ei der Wahl der unabhängigen bzw. abhängigen Größen ist es sinnvoll, alle Knoten uf der einen Seite der Symmetrieachsen einheitlich zu abhängigen bzw. unabhängigen Knoten zu definieren, um dadurch eine bessere Übersicht zu bewahren. An ieser Stelle sei folgender Hinweis erlaubt: Das Problem globaler Festhaltung im aum ("Flying structure") ist bei einer derartigen Definition der Symmetrierandbeingungen durch Bindungsgleichungen (4) bis (6) von selbst gelöst.

bb. 6a - Sicht von der Anlagemitte und 6b - Draufsicht, zeigt das FE-Modell iner halben Periode. Dieses Modell wurde durch Nutzung der Symmetriebedingunen und Einsatz von Bindungsgleichungen erstellt. Zusätzlich enthält das Modell ie geometrischen Nichtlinearitäten, die der Spule 3 ermöglichen, in ihrem Gehäuse leiten zu können.

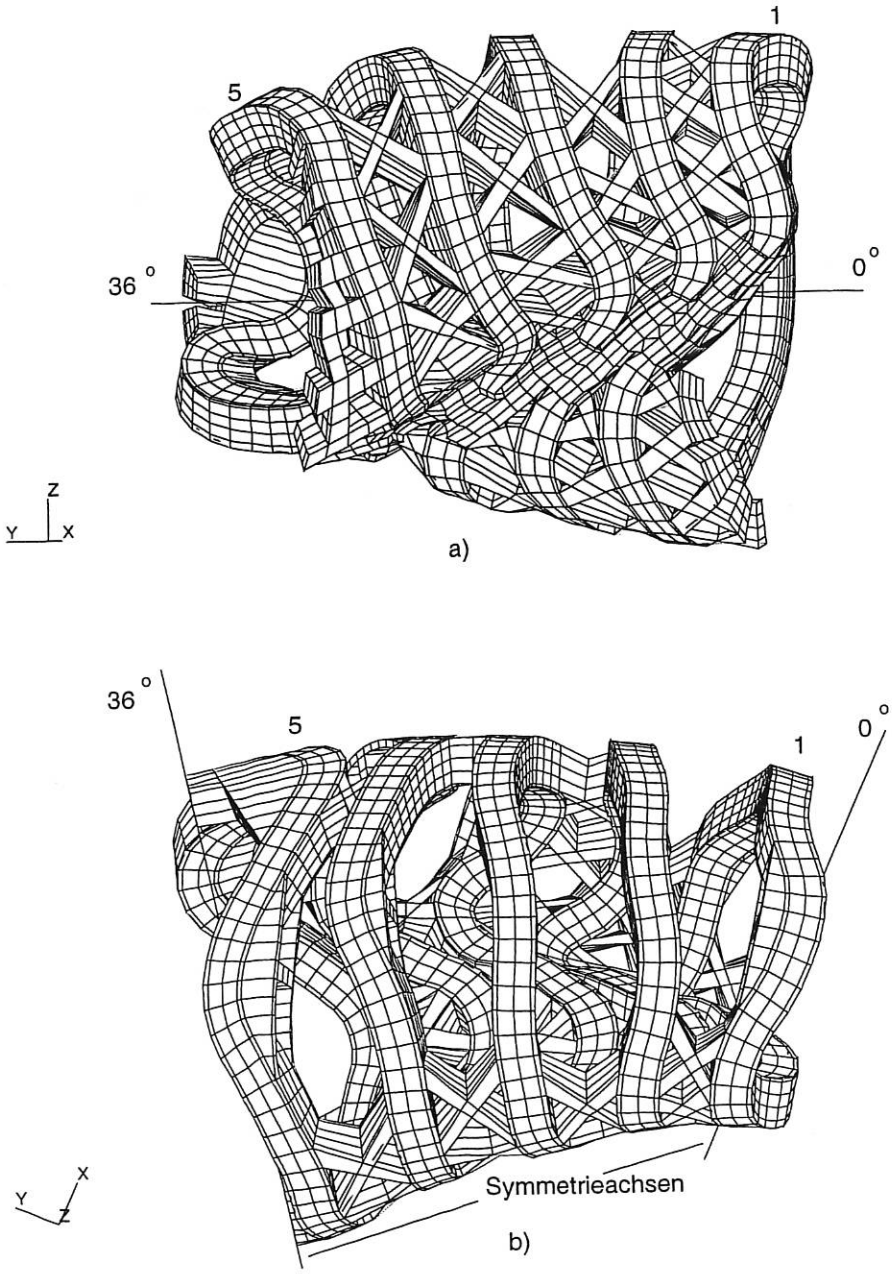

Abb. 6: FE-Modell einer Version der W7-X Geometrie

5. Bedingungen und Einschränkungen

Um die Bindungsgleichungen bei der Definition der Randbedingungen eines FE-Modells erfolgreich einsetzen zu können, sind folgende Bedingungen bzw. Einschränkungen zu beachten:

- Die Struktur, die im CAD-Modell definiert wird, muß den hier beschriebenen Symmetrieprinzipien gehorchen.
- Die Erdanziehungskraft darf in der Strukturanalyse nicht berücksichtigt werden.
- Störfälle in der Spulenstrukturanalyse können nur beschränkt untersucht werden. Es ist nur möglich solche Störfälle zu untersuchen, die gleichzeitig in allen Halbperioden vorkommen.
- Der Einsatz von Bindungsgleichungen ist nur für Analysen mit kleinen Verformungen geeignet. Dies ist bei linear-elastischen Untersuchungen immer der Fall.
- Diese Problemklasse kann nur mit den dafür vorgesehenen Gleichungslösern der FE-Programme behandelt werden.

6. Vergleichsanalyse

Die Güte der Methode zur Definition der Randbedingungen durch Bindungsgleichungen wurde anhand von drei, von der Geometrie her identischen Modellen analysiert. Diese drei Modelle unterscheiden sich einerseits in der Größe und anderseits in der Definition der Randbedingungen. Die Randbedingungen werden nach Art bzw. Position variiert, sind aber in allen drei Fällen exakt definierbar.
Für die Modellerstellung wurde eine Version der W7-X Spulengeometrie benutzt, wobei folgende Modelldefinitionen analysiert wurden:

- Fall 1 - eine halbe Periode (Winkellänge–36°) mit der Definition der Randbedingungen durch Bindungsgleichungen (Abb. 6)
- Fall 2 - eine ganze Periode (Winkellänge–72°) mit der Definition der Randbedingungen durch Bindungsgleichungen (Abb. 8).
- Fall 3 - eine ganze Periode (Winkellänge–72°) mit der Definition de Randbedingungen durch die FE-Programmoption "Zyklische Symmetrie". (Ein vorhandenes älteres FE-Modell identisch mit der Abb. 8).

Es sind noch weitere Kombinationen möglich, die aber hier nicht verfolgt wurden.

Die markante Größe der Ergebnisse, die für die Durchführung der Vergleichsanalyse gewählt wurde, ist die Verschiebung. Ausschlaggebend für die Wahl dieser Größe ist die Sensitivität bei der Ergebnisdarstellung. Die Verschiebungen, bestehend aus zwei Teilen, Starrkörpertranslation und Dehnung, reagieren sensitiver als die anderen Ergebnisgrößen (Spannungen, Schnittkräfte) auf eventuelle Änderungen bzw. Störungen in der Analyse. Die Stellen, an denen die Verschiebungen gemessen bzw. verglichen werden, ist eine Aussenecke des Spulenkörpers (Abb. 7) der Spulen, die am nächsten zu den Randbedingungen plaziert sind. Die Spulen, die diese Bedingung erfüllen, sind nach dem ersten Definitionsfall Spule 1 und 5. Diese zwei Spulen werden mit den entsprechenden Spulen der Definitionsfälle zwei und drei verglichen. Die Verschiebungen werden in lokalen Koordinatensystemen dargestellt und komponentenweise (R,S,T) verglichen. Die Abb. 12 - 29 zeigen den Verlauf der lokalen Verschiebungskomponenten von Spulen 1 und 5 für alle drei Fälle auf dem ganzen Umfang der Spulen, eingeteilt in GCE's. Dies ist eine spezielle Aufteilung der Spule entlang des Umfangs in sog. "General Current Elements". Die Abb. 9 - 11 zeigen die globale Verformung der Stuktur unter der Last der elektromagnetischen Kräfte für die drei Definitionsfälle.
Den Diagrammen kann entnommen werden, daß die zwei ersten Definitionsfälle identische Ergebnisse liefern. Diese Übereinstimmung ist bei beiden Spulen, auf dem

ganzen Umfang, in der Verlaufsform und einzelnen Beträgen der Verschiebungskurven aller Komponenten feststellbar.
Der dritte Definitionsfall war ein älterer Datensatz, der als Nachweismodell für die Güte der Methode zur Definition der Randbedingungen herangezogen wurde. Bei dem Modell müssen neben den exakten, zyklisch symmetrischen Randbedingungen weitere Randbedingungen zugefügt werden, um das Problem einer "Flying Structure" zu vermeiden. Diese Randbedingungen, im Zusammenhang mit durch numerische Abweichungen bedingte Symmetrieungenauigkeiten der elektromagnetischen Kräfte[7], wirken als kleine Störung. Infolgedessen zeigt der dritte Definitionsfall, neben einer sehr guten Übereinstimmung in der Verlaufsform, geringfügige Abweichungen in einzelnen Werten der Verschiebungskurven (siehe z.B. Abb. 24 und Abb. 25, GCE 30). Diese Abweichungen sind, abgesehen von der numerischen Genauigkeit der Ergebnisse, im wesentlichen auf die globale Translation der Struktur zurückzuführen. Durch Verbesserung der Kraftsymmetrie in einem neuen zyklisch symmetrischen Modell könnte diese Abweichung noch weiter verkleinert werden. Da aber durch die numerisch bedingten Abweichungen der unterschiedlichen Lösungsverfahren immer eine Abweichung entstecht, ist eine völlige Übereinstimmung der Ergebnisse nicht möglich. Anderseits sind geringe Abweichungen bei solchen Analysen durchaus erlaubt, wenn unterschiedliche Lösungsverfahren verwendet werden. Auf weitere Untersuchungen dieser Effekte wurde deshalb verzichtet.
Die Güte der Methode zur Definition der Randbedingungen durch Bindungsgleichungen ist damit ausreichend bestätigt.

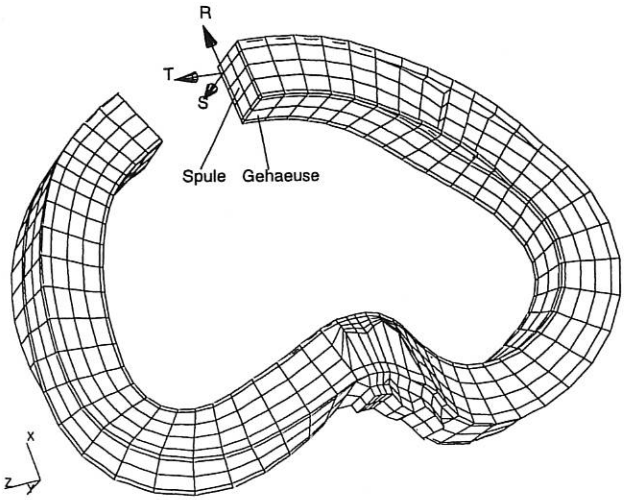

Abb. 7: Elementbezogenes lokales Koordinatensystem

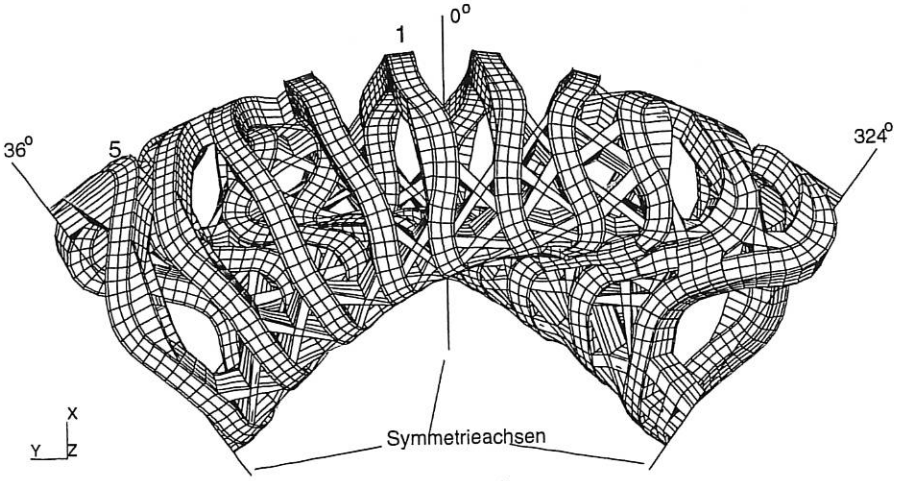

Abb. 8: FE - Modell einer ganzen Periode

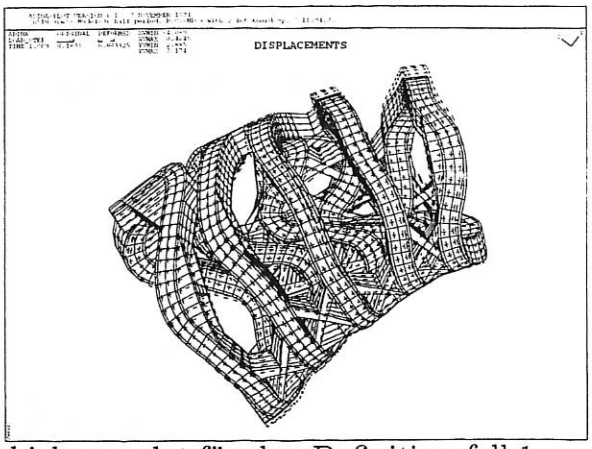

Abb. 9: Verschiebungsplot für den Definitionsfall 1

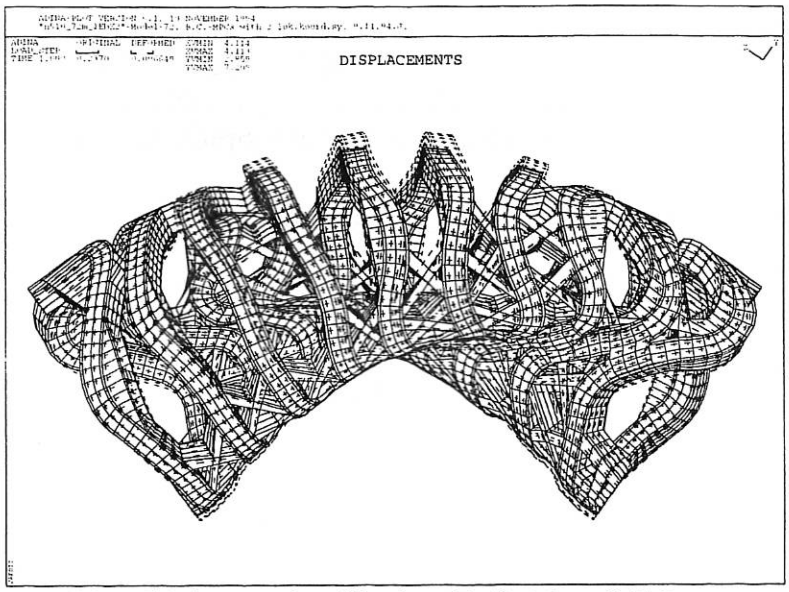

Abb. 10: Verschiebungsplot für den Definitionsfall 2

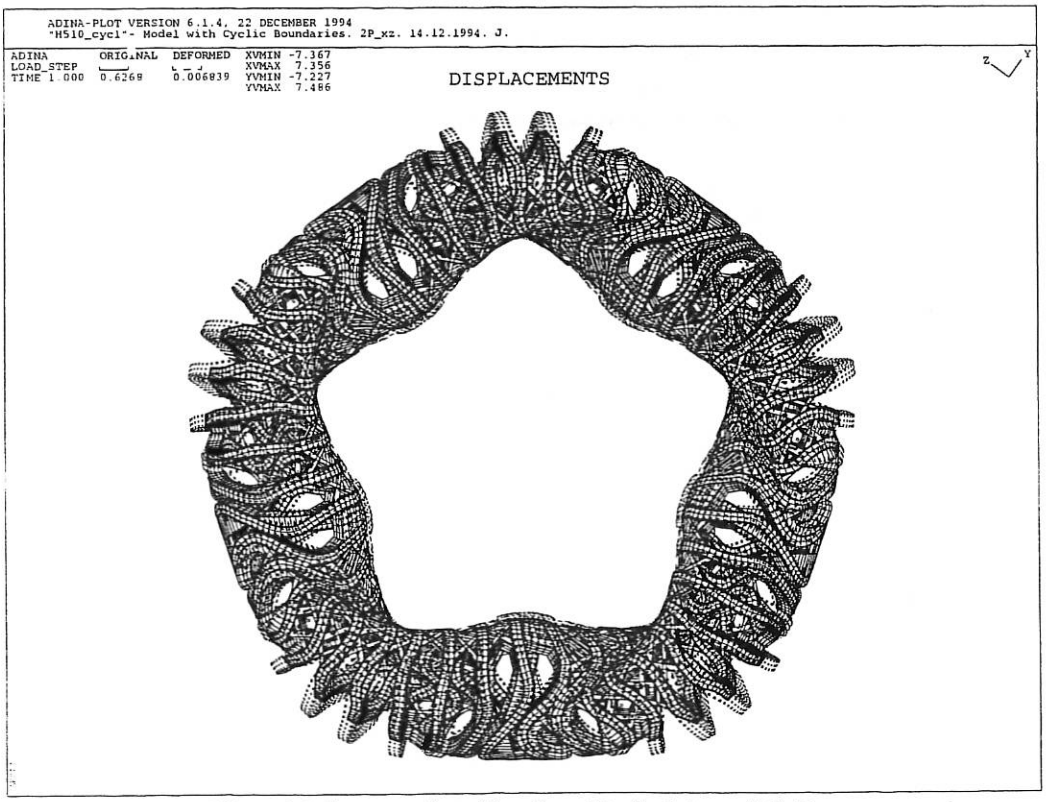

Abb. 11: Verschiebungsplot für den Definitionsfall 3

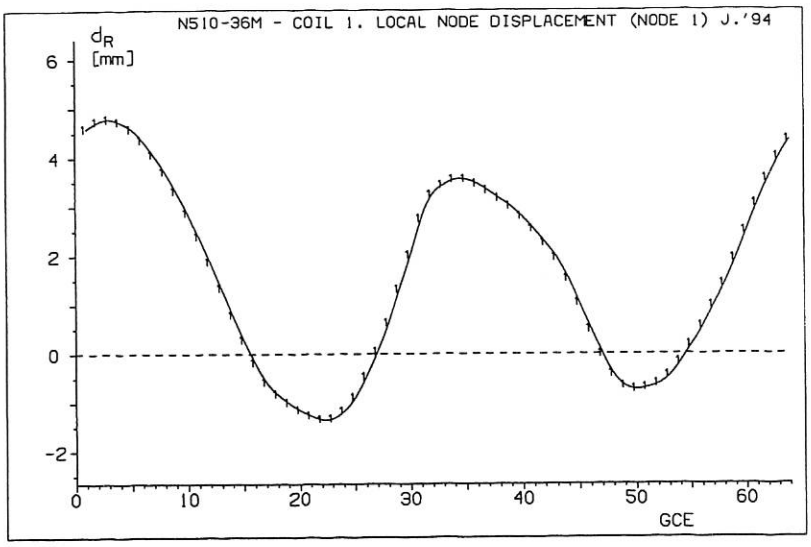

Abb. 12: Lokale radiale Verschiebungskomponente, Spule 1, Definitionsfall 1

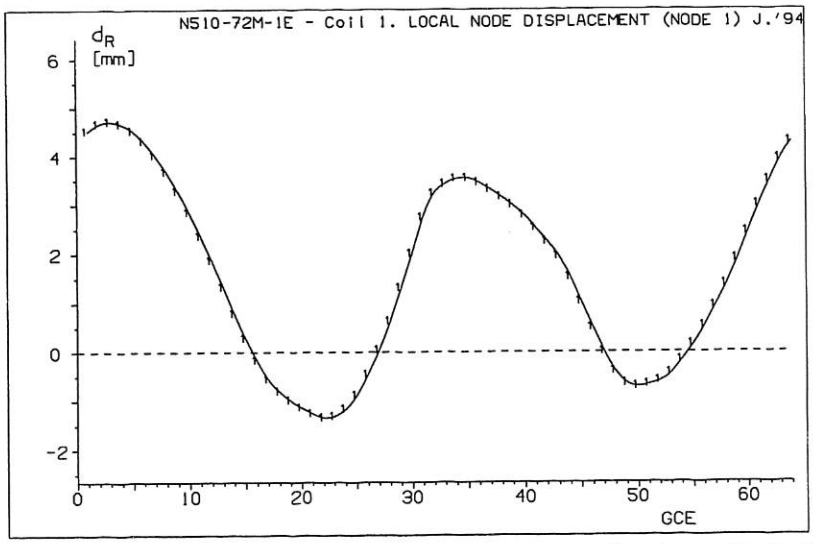

Abb. 13: Lokale radiale Verschiebungskomponente, Spule 1, Definitionsfall 2

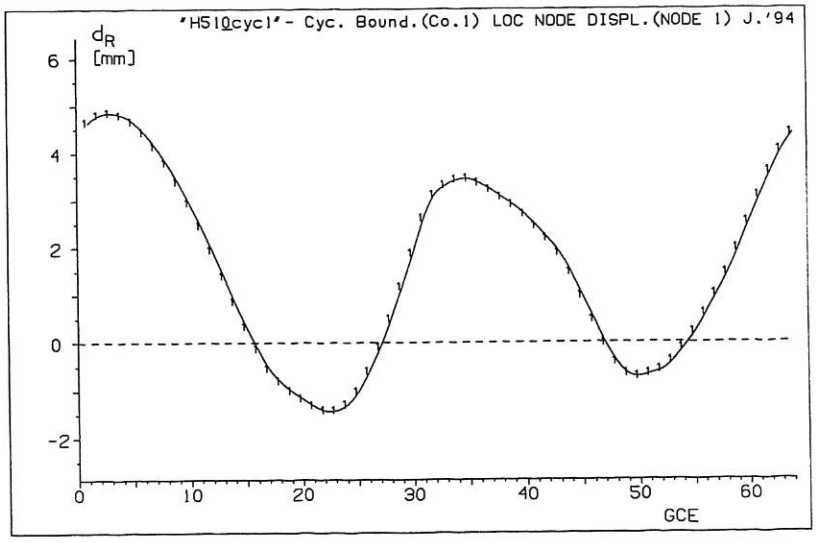

Abb. 14: Lokale radiale Verschiebungskomponente, Spule 1, Definitionsfall 3

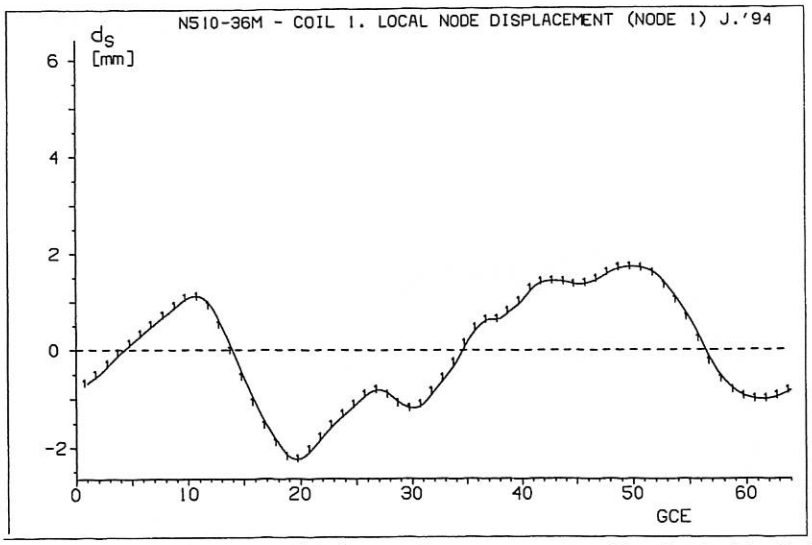

Abb. 15: Lokale laterale Verschiebungskomponente, Spule 1, Definitionsfall 1

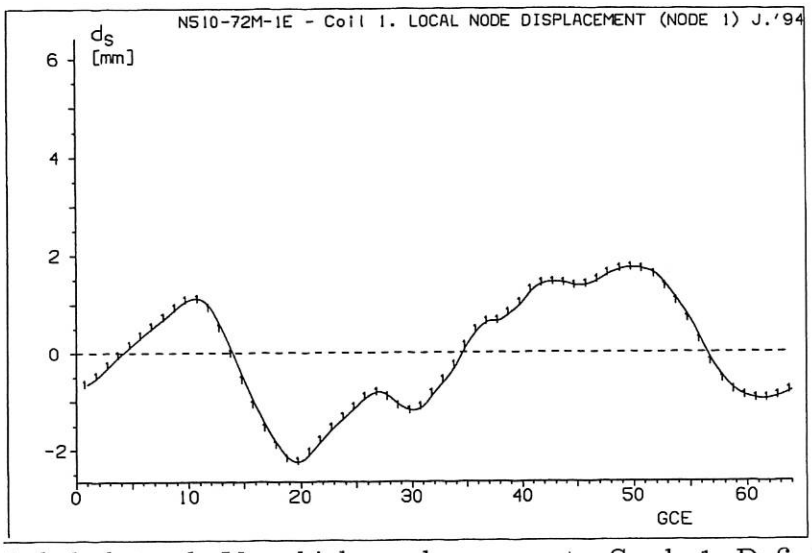

Abb. 16: Lokale laterale Verschiebungskomponente, Spule 1, Definitionsfall 2

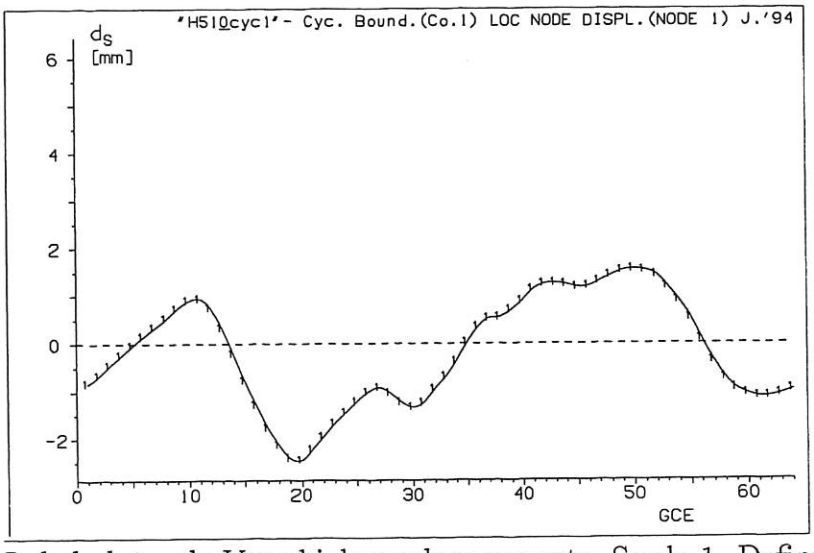

Abb. 17: Lokale laterale Verschiebungskomponente, Spule 1, Definitionsfall 3

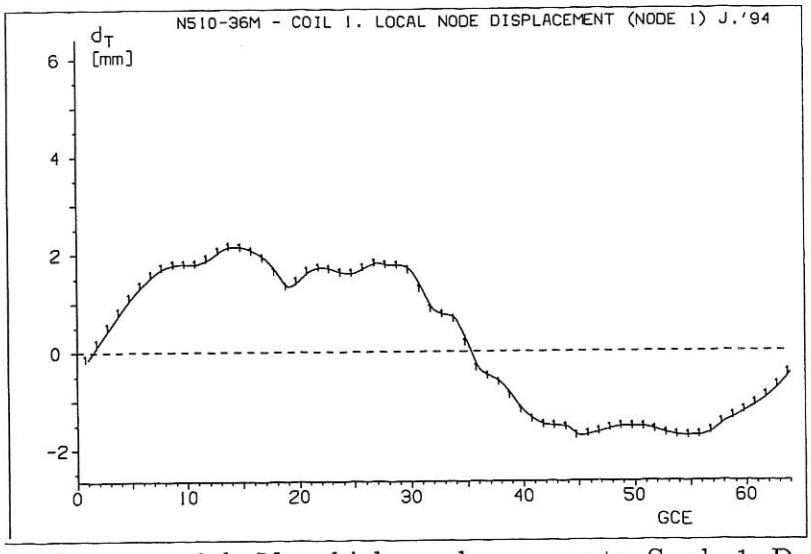

Abb. 18: Lokale tangentiale Verschiebungskomponente, Spule 1, Definitionsfall 1

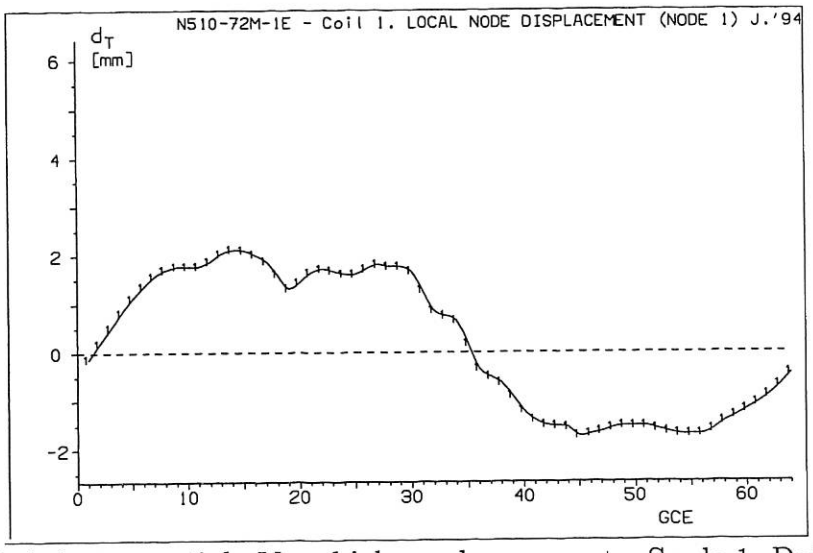

Abb. 19: Lokale tangentiale Verschiebungskomponente, Spule 1, Definitionsfall 2

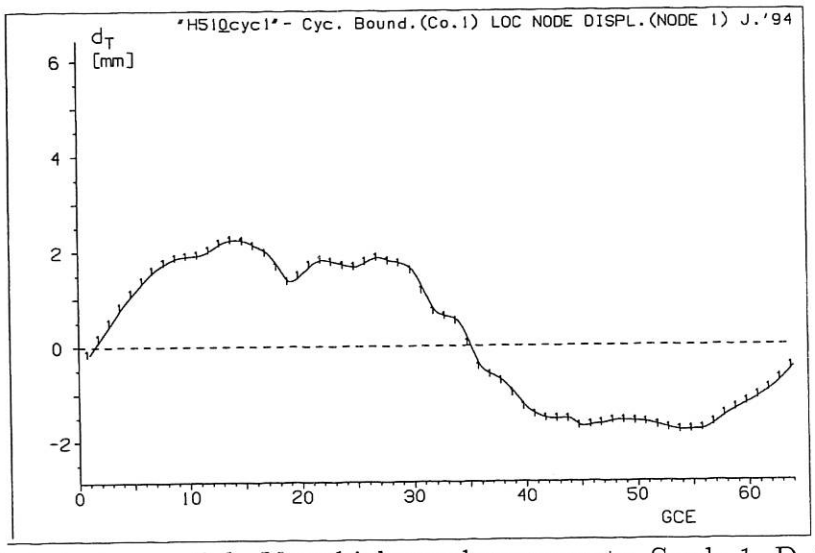

Abb. 20: Lokale tangentiale Verschiebungskomponente, Spule 1, Definitionsfall 3

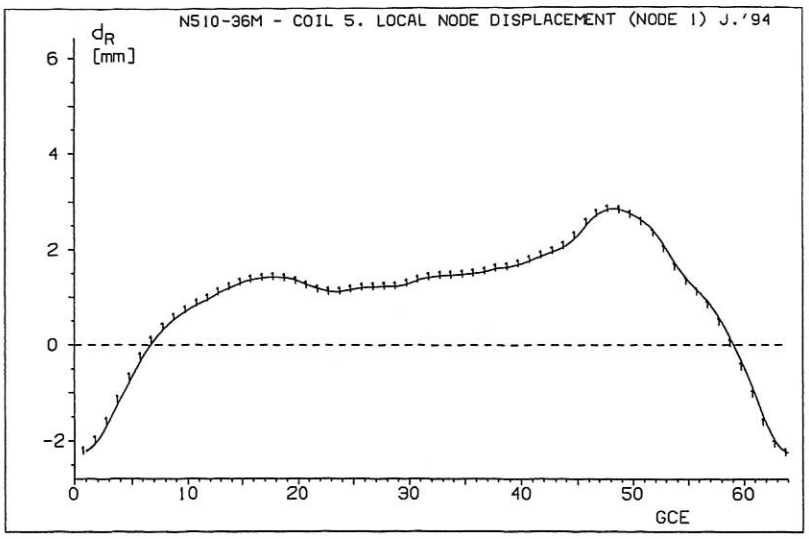

Abb. 21: Lokale radiale Verschiebungskomponente, Spule 5, Definitionsfall 1

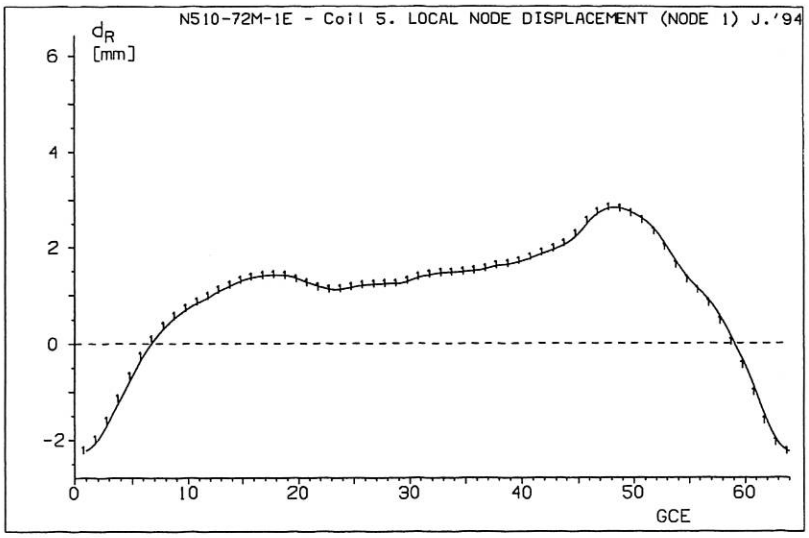

Abb. 22: Lokale radiale Verschiebungskomponente, Spule 5, Definitionsfall 2

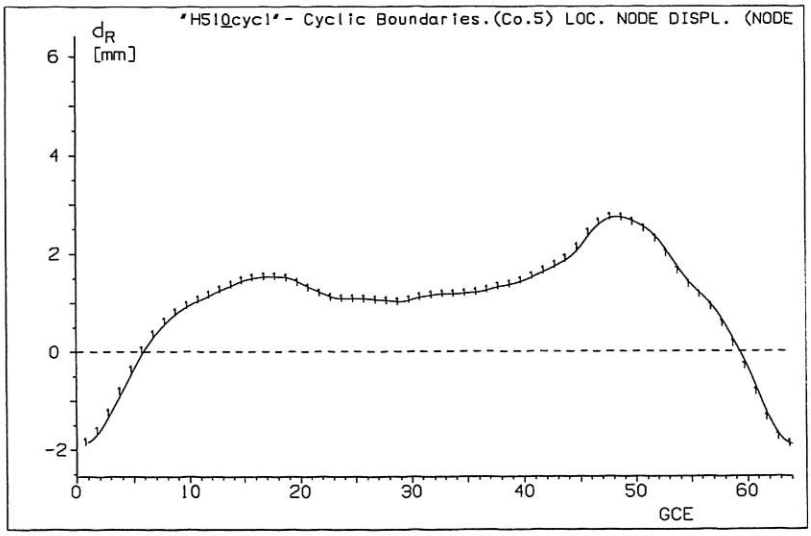

Abb. 23: Lokale radiale Verschiebungskomponente, Spule 5, Definitionsfall 3

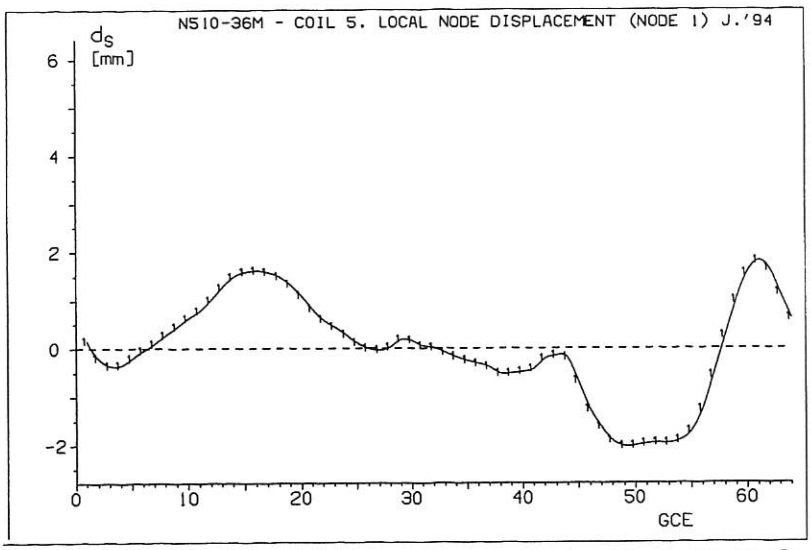

Abb. 24: Lokale laterale Verschiebungskomponente, Spule 5, Definitionsfall 1

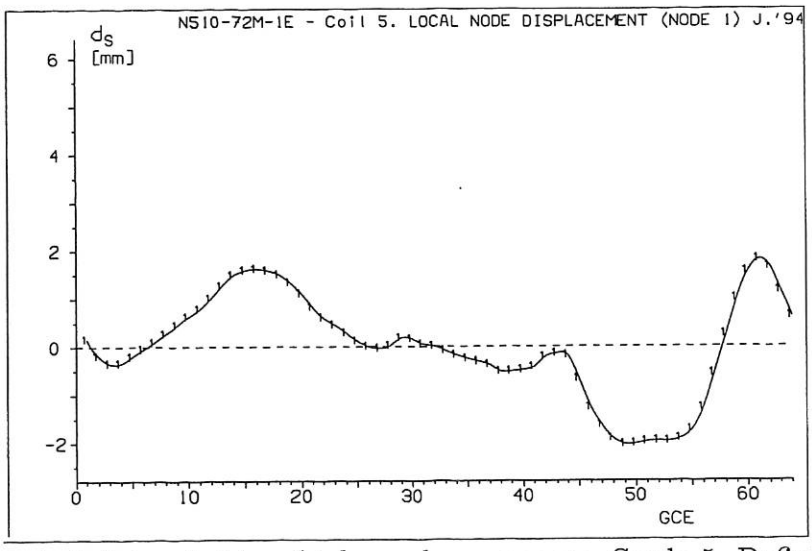

Abb. 25: Lokale laterale Verschiebungskomponente, Spule 5, Definitionsfall 2

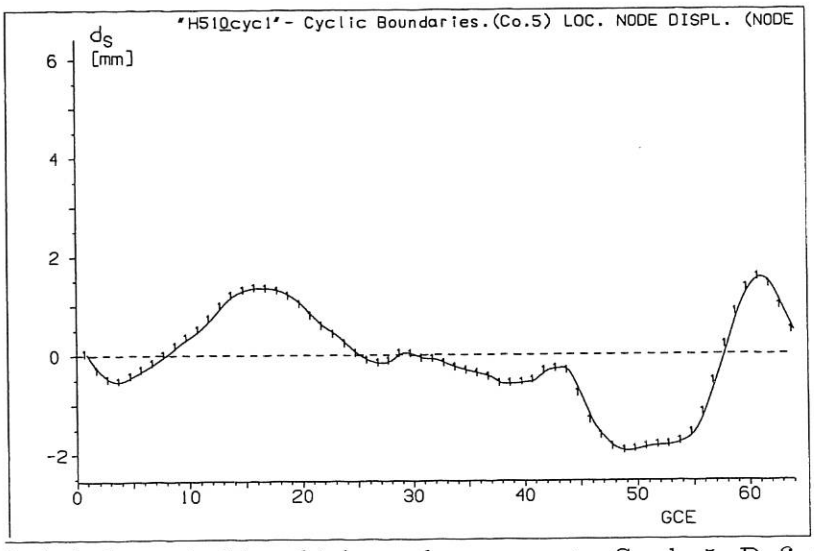

Abb. 26: Lokale laterale Verschiebungskomponente, Spule 5, Definitionsfall 3

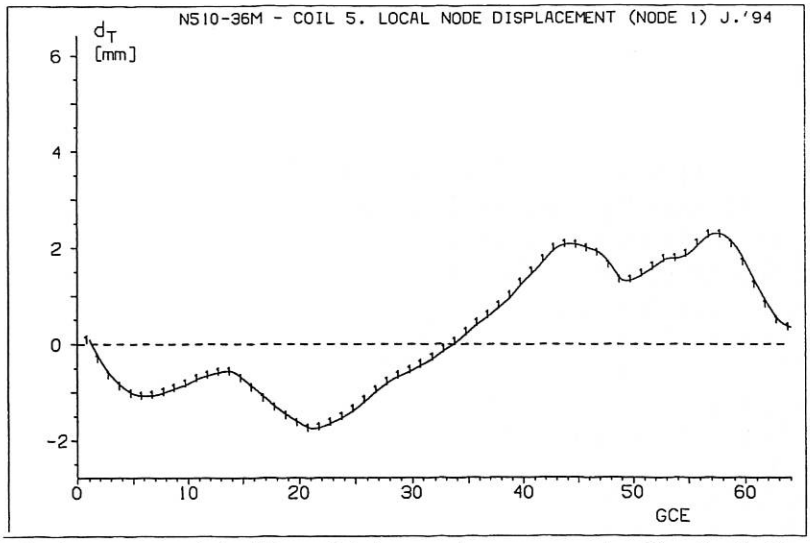

Abb. 27: Lokale tangentiale Verschiebungskomponente, Spule 5, Definitionsfall 1

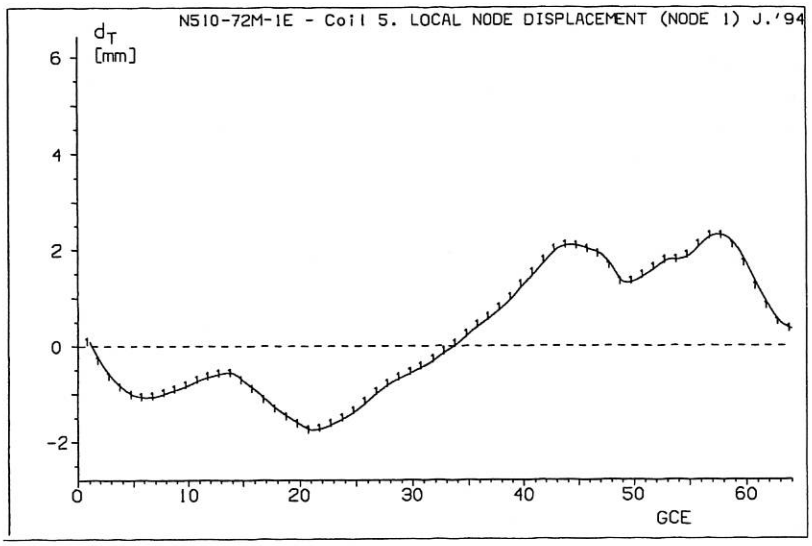

Abb. 28: Lokale tangentiale Verschiebungskomponente, Spule 5, Definitionsfall 2

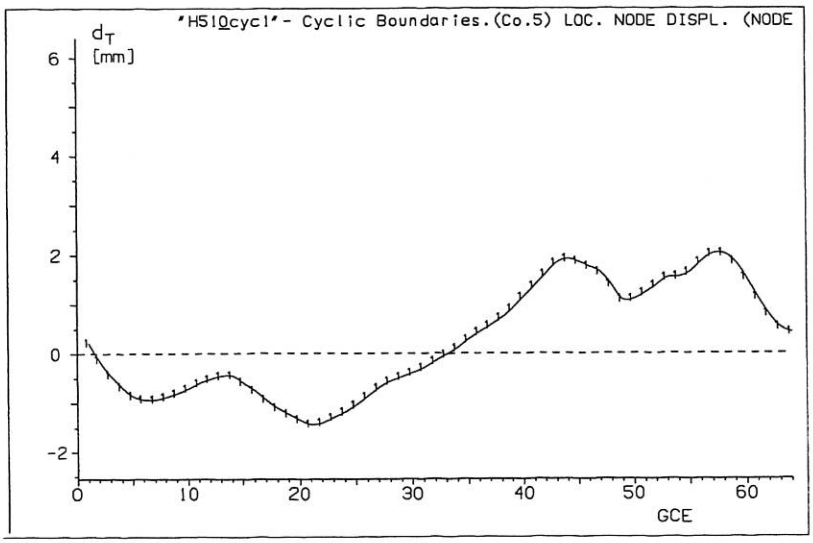

Abb. 29: Lokale tangentiale Verschiebungskomponente, Spule 5, Definitionsfall 3

7. Schlußfolgerungen

Die beschriebene Methode zur Definition der Randbedingungen ermöglicht bei Einhaltung der im Kapitel 5 genannten Bedingungen eine exakte Analyse von Strukturen, die den hier beschriebenen Symmetriebedingungen gehorchen, auf einem Modell das 1/10 der Gesamtgröße der Anlage widergibt.
Die rechentechnisch erzielbaren Einsparungen sind bedeutend. Ein besonderer Vorteil ergibt sich bei der Handhabung des Modells in der Phase des Preprocessing. Gerade hierbei ist der Einfluß der Größe des Modells stark spürbar.
Hinsichtlich der Einsparung von Rechenzeit (Kapitel 2) ist zu bemerken, daß man nicht von einer Verkürzung der Rechenzeit proportionel zur Verkleinerung des FE-Modells sprechen kann. Ein wesentlicher Bestandteil der Rechenzeit ist durch die Komplexität des Modells (Nichtlinearitäten) bedingt.
Das Pre- und Postprocessingprogramm PATRAN[4] hat sich als ein ausreichend gutes Werkzeug bewährt. Die hier beschriebenen Randbedingungen wurden ebenfalls mit diesem Programm definiert. Der in PATRAN enthaltene Komfort hat sich als notwendige Voraussetzung erwiesen, ohne den die Erstellung eines derart komplexen FE-Modells nur sehr schwer hätte bewältigt werden können.
Das FE-Programm ADINA[1] hat sich für die Analyse und einen Teil des Postprocessings ebenfalls als ausreichend effizient erwiesen. Für bestimmte Aufgabenstellungen im Pre- und Postprocessing wurden eigens für diese Zwecke entwickelte Programme verwendet. Dies ist notwendig, da es sich hierbei um eine spezifische, projektbezogene Entwicklung handelt, für die im Allgemeinen keine kommerziellen Programme angeboten werden.
Der wichtigste Aspekt der Anwendung dieser Methode zur Definition der Randbedingungen ist die dadurch erzielbare Erhöhung der Genauigkeit der Strukturanalyse. So kann die Erhöhung der Genauigkeit bei gleicher Größe des FE-Modells bis zum Faktor 10 betragen, gemessen an dem gesamten Modell der Anlage, da eine entsprechend feinere Unterteilung möglich wird.

Danksagung

Den Herren Dr. J. Simon-Weidner, B. Fleischer und B. Sombach, die mir bei der Entstehung dieser Arbeit geholfen haben, möchte ich ein herzliches Dankeschön aussprechen. Desgleichen danke ich Herrn J. Sapper, der mich angeregt hat, das Thema zu behandeln und durch seine regen Diskussionen der Arbeit förderlich war.

Literaturverzeichnis

[1] ADINA Engineering INC.: ADINA, a Finite Element Program for Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis, ADINA Engineering INC.: 71 Elton Avenue, Watertown, MA 02172, U.S.A.

[2] ANSYS User's Manual for Revision 5.0, Volume I, Procedures, Swanson Analysis Systems, Inc., P.O.Box 65, Jhonson Road, Houston.

[3] MSC/NASTRAN User's Manual, Version 66, November 1988, ISSN 0741-8019, The MacNeal-Schwendler Corporation, 815 Colorado Boulevard, Los Angeles, CA 90041 U.S.A.

[4] MSC/PATRAN User's Manual, Version 6.0, November 1996,Publication No.-903057, The MacNeal-Schwendler Corporation, 815 Colorado Boulevard, Los Angeles, CA 90041 U.S.A.

[5] Bathe, K.-J.: Finite Elemente Methoden, Springer Verlag, Berlin (1986).

[6] Harmeyer, E., Jaksic, N., Simon-Weidner, J.: On Modular Coils of a Helias Reactor, 19th Symposium on Fusion Tehnology, Lissabon, September 16-20, 1996, Elsavier Publishers B. V., Amsterdam, (1997).

[7] Sackett, S.J.: EFFI-A Code for Calculating The Electromagnetic Field, Force and Indictance in Coil Systems for Arbitrary Geometry, Lawrence Liwermore National Laboratory Report UCRL-52402 (1978).

[8] Timoshenko, S.P. and Goodier, J.N.: Theory of Elasticity, 3rd Edn. McGraw-Hill Book Company, New York (1970).