

### Thema

MicroFe, das FE-System für die Tragwerksplanung, verfügt über einen modernen, leistungsfähigen Rechenkern. Durch die Substrukturtechnik sind die Rechenzeiten extrem reduziert, und so erschließt sich dem Anwender die Möglichkeit immer komplexere Systeme zu berechnen. Mit der Zunahme der Komplexität wird auch die Anforderung an die Modellierung immer anspruchsvoller. Dabei kann es vorkommen, dass man in der Eingabe ein kinematisch bewegliches FE-Modell definiert, das der Rechenkern nicht lösen kann. Fehlende Lagerungen, unkorrekte Anschlussbedingungen und ähnliches führen meistens zu beweglichen oder teilbeweglichen Systemen und damit zum Programmabbruch. In großen FE-Modellen ist es aufwendig und zeitintensiv die Ursachen zu finden. Hier setzt eine Funktion des MicroFe-Rechenkerns an, die allgemein bei FEM-Berechnungen von Tragwerken sehr selten verfügbar ist: die Untersuchung auf kinematische Beweglichkeit. Sie erfolgt durch die Lösung eines Eigenwertproblems und liefert als Ergebnis die ersten  $n$  Eigenwerte der Systemsteifigkeitsmatrix. Die den Nulleigenwerten entsprechenden Eigenformen stellen die Starrkörperbewegungen des Systems oder deren Teile dar. Die Animation dieser Eigenformen, geben dem Statiker konkrete Hinweise auf die möglichen Ursachen für die kinematische Beweglichkeiten seines FE-Modells.

Im hier aufgezeigten Beispiel handelt es sich um die Gelenkdefinitionen am Stützenkopf und Stützenfuß.

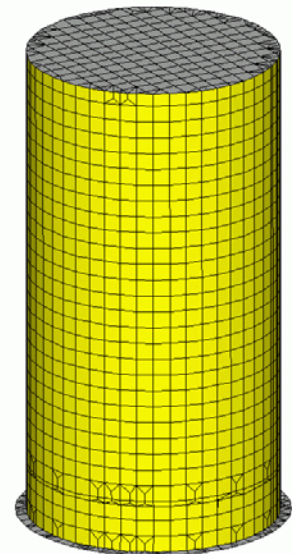


Bild 1: System

### System

Das FE-Modell wurde mit GEN\_FALT erstellt [Bild1] und besteht aus Schalen- und Stabelementen. Die Stützen im unteren, inneren Teil der Struktur sollten als Pendelstützen ausgeführt werden [Bild 2]. Dazu wurden am oberen und unteren Ende der Stützen Gelenke definiert.

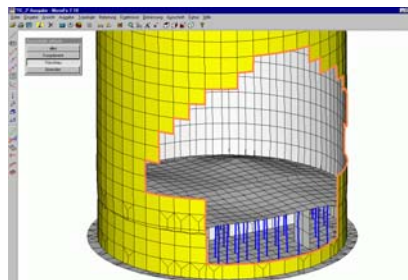


Bild 2: Blick ins Innere

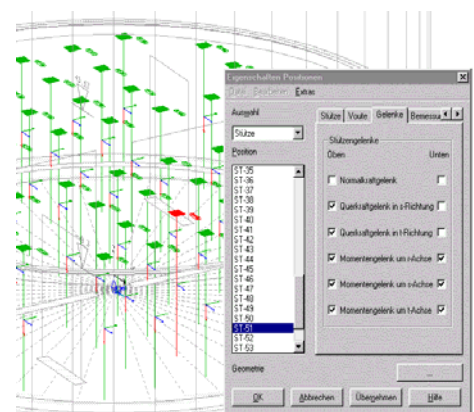


Bild 3: Gelenkdefinition Stützen

### Problem

Durch überzählige Gelenke wurde das System kinematisch beweglich und damit unlösbar. Die statische Berechnung weist im Protokoll eine entsprechende Fehlermeldung aus, in der eine Überprüfung der kinematischen Beweglichkeit empfohlen wird. [Bild 4]

```
--Lösung der statischen Aufgabe
*** Achtung
Knoten  7g  Gleichung  14  Diagonalelement gleich Null
3209    6

**** Programmabbruch ****
Null-Diagonalelement
Empfehlungen für die Korrektur des Berechnungsmodells:
-Rand- und Gelenkbedingungen überprüfen
-kinematische Beweglichkeit überprüfen
-Elementkoordinatensysteme kontrollieren
-Kontrolle des FE-Netztes
-Materialeigenschaften kontrollieren
-bei Theorie II. Ordnung - Systemstabilität beachten
```

Bild 4: aus dem Protokoll der Berechnung

Ein erneuter Rechenlauf unter der Option „kinematische Beweglichkeit“ im Berechnungsdialog [Bild 5] löst nun eine spezielle Eigenwertaufgabe und liefert als Resultat Eigenformen, die, als Grafik dargestellt, die Starrkörperbewegungen des untersuchten FE-Modells veranschaulichen.

### Interpretation der Eigenform aus einer Untersuchung auf kinematische Beweglichkeit

Die den Nulleigenwerten entsprechenden Eigenformen der kinematischen Untersuchung zeigen die Starrkörperbewegungen im FE-Modell an. In dem hier vorgestellten FE-Modell müssen die Ergebnisse aber korrekt interpretiert werden. Zunächst vermutet man, dass ein falsch angeordnetes Gelenk *innerhalb* der Stütze für die kinematische Beweglichkeit zuständig wäre und die Stützen ausknicken [Bild 6]. Dieses Gelenk ist scheinbar im vorletzten Knoten der Stütze angeordnet [Bild 9]. Eine Analyse der Eingabe-Datensätze aber zeigt, dass die Definition korrekt ist.

Für die Darstellung der kinematischen Beweglichkeit sind prinzipiell zwei Alternativen denkbar. Darstellung der Beweglichkeit im Knoten oder im Element. MicroFe stellt die Beweglichkeit am Knoten dar und zeichnet die Elemente - analog zu einer

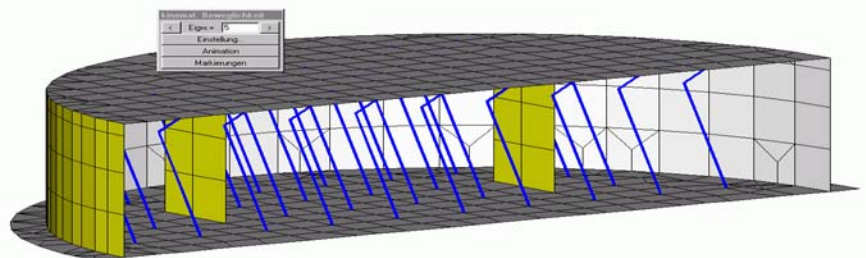


Bild 6: Darstellung der Beweglichkeit

Verformungsdarstellung - als Verbindungen zwischen den Knoten ein. Die kinematische Beweglichkeiten werden bei Rotationen durch Kreise und bei Translationen durch kurze Striche angedeutet. In dem Beispiel sind die Knoten am Stützenkopf und Stützenfuß nicht frei beweglich, weil sie durch die Schalenelemente der Zwischendecke gehalten werden. Das oberste Stabelement der Stütze ist aber gelenkig angeschlossen und kann sich horizontal verschieben, zusätzlich ist die Rotation des Stütze um ihre eigene Achse durch entsprechende Gelenke ebenfalls ermöglicht. Die

Darstellung zeigt zwei Starrkörperbewegungen. Eine Rotation um die Stützenachse (zu erkennen an den Kreisen um die Knoten in der Stütze) und eine Starrkörperbewegung der gesamten Stütze. Der „Knick“ am vorletzten Knoten der Stütze kommt nur durch die geradlinige Verbindung der einzelnen Knoten zustande. Eine korrekte Interpretation der Eigenform würde die Stütze mit einer Verschiebung des obersten Knoten zeigen [Bild 10].

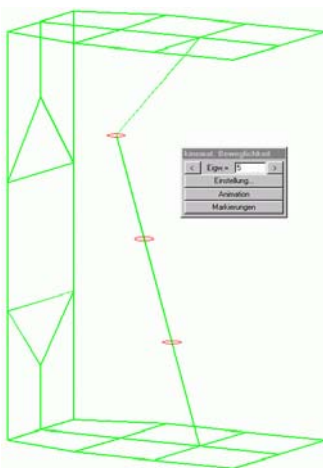


Bild 9, Detail der Kinematikdarstellung

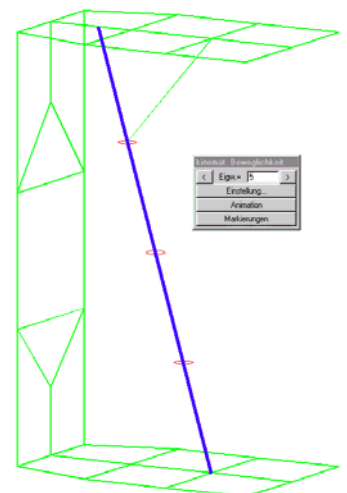


Bild 10, Interpretation der Grafik

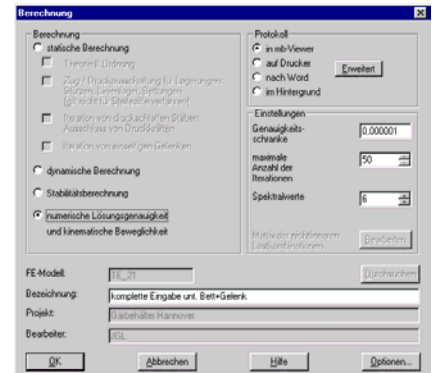


Bild 5: Berechnungsdialog