

## 3 Das neue Berechnungskonzept

Um Konstruktionen zukünftiger Binnenschiffe optimal zu gestalten, ist ein wichtiger Punkt die Betrachtung der Festigkeit. Angestrebt wird eine dauerhafte Sicherheit gegen Versagen bei möglichst geringem Eigengewicht. Ziel ist es somit, die Auslegung der einzelnen Bauteile und Baugruppen zu optimieren. In den Berechnungen zur Dimensionierung sind

- ◆ fertigungsbedingte Imperfektionen (Vorverformungen, Eigenspannungen, sonstige Fertigungsfehler)
- ◆ betriebsbedingte Imperfektionen, (Beschädigungen, Verformungen, Abrostung)
- ◆ eine realistische Darstellung der Belastungen durch Eigengewicht, Beladung und Wasserdruck am verformten Körper
- ◆ die Änderung des hydrostatischen Auftriebs infolge der Schiffsverformung
- ◆ die Wechselwirkung zwischen lokalen Imperfektionen und globalem Strukturverhalten
- ◆ geometrische und physikalische Nichtlinearitäten

zu berücksichtigen. Um die genannten Punkte gemeinsam zu erfassen, können die Vereinfachungen der klassischen Berechnungsmethoden (lineare Ansätze) nicht angewendet werden.

Unter Nutzung der Finite-Element-Methode (FEM) wird im folgenden ein Berechnungskonzept vorgestellt, mit dem diese aufwendigen Analysen realisiert werden können.

In der bisherigen Vorgehensweise wird bei Anwendung der FEM die komplette Struktur in globale und lokale FE-Modelle unterteilt, welche dann getrennt voneinander berechnet werden. Globale Modelle liefern die Information, an welcher Stelle kritische Werte (z. B. Spannungsspitzen) auftreten. Diese Bereiche werden dann in einer nachfolgenden lokalen Analyse detaillierter modelliert und neu berechnet.

In dem hier vorgestellten neuen Berechnungskonzept soll nach Möglichkeit keine Modellunterteilung mehr vorgenommen werden. Es wird nur ein Modell verwendet, welches die Eigenschaften des globalen und die Möglichkeiten des lokalen Modells besitzt. Hierdurch können u.a. die realen Auftriebskräfte an der verformten Struktur berücksichtigt und das Ein- und Austauschen des (verformten) Schiffskörpers simuliert werden. Diese Vorgehensweise beinhaltet einige Vorteile. So wird es möglich, unter Berücksichtigung der betriebsbedingten Imperfektionen das nichtlineare Festigkeits- und Strukturstabilitätsverhalten des schwimmenden Schiffes bis hin zum Kollaps (Totalversagen) zu beschreiben. Eine zuverlässige Einschätzung des Strukturverhaltens kann aber nur bei einer realitätsnahen Gestaltung der Randbedingungen (hydrostatisches Gleichgewicht, Wasser- und Ladungsdruck) erreicht werden. Um diese Forderung erfüllen zu können, ist eine erweiterte Formulierung dieser Randbedingungen erforderlich.

Bei den anzusetzenden Belastungen sind neben dem klassischen Hogging- und Saggingfall auch typische Be- und Entladevorgänge zu berücksichtigen. Über entsprechende Programmroutinen erfolgt eine Beschreibung der Lastarten und Beladungsfolge (Erz, Kies, Container, schwere Stückgüter).

In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Lastfälle, die ausgewählten Schiffsstrukturen und die zu berücksichtigenden Imperfektionen beschrieben. Zuvor werden einige Überlegungen zu besonderen Techniken der FEM erläutert, mit denen u.U. die notwendige Rechnerkapazitäten gesenkt werden können.

### 3.1 Spezielle Techniken

Die Anwendung der FEM für Festigkeitsuntersuchungen im Schiffbau ist natürlich nicht neu. Trotzdem müssen einige Vorüberlegungen getroffen werden, um die Analysen möglichst ökonomisch zu gestalten. So ist zu berücksichtigen, daß das Berechnungsmodell sehr komplex ist und die zu lösenden Gleichungssysteme demzufolge

sehr umfangreich sind. Verschiedene Autoren nutzen besondere Techniken um die hierfür erforderlichen Computerkapazitäten zu senken. Hierunter sind die Substrukturtechnik, die Verwendung von Superelementen bzw. eigene Elemententwicklungen zu verstehen. Diese sollen in den folgenden Abschnitten erläutert werden.

### 3.1.1 Superelemente

Superelemente werden vom Anwender benutzt, um ein Strukturmodell in seine Hauptbestandteile zu zerlegen. Die wesentlichen Vorteile dieser Elemente sind die Reduzierung der Freiheitsgrade und die wiederholte Nutzung einer einmal aufgestellten Elementsteifigkeitsmatrix und des Lastvektors.

Ein Superelement steht für die Eigenschaften von mehreren Bauelementen, FE-Elementen oder anderen Superelementen. Die Knoten eines Superelementes sind verbunden mit Standardelementen oder anderen Superelementen. Superelemente, die andere Superelemente umfassen, werden als Hyperelemente bezeichnet.

Die äußeren Knoten eines Superelementes können wie Randknoten behandelt werden, da alle anderen Knoten im Inneren eliminiert werden. Nachdem ein solches Superelement festgelegt ist, wird die Steifigkeitsmatrix und der Lastvektor ausschließlich auf diese äußeren Knoten bezogen.

Bei Superelementen, die an mehreren Stellen der Struktur benutzt werden, braucht die Ermittlung der Steifigkeitsmatrix und des Lastvektors nur einmal durchgeführt werden. Diese können dann an entsprechender Stelle des Gleichungssystems eingesetzt werden. Damit dieses durchgeführt werden kann, müssen diese Superelemente einige Bedingungen erfüllen. So müssen diese identisch sein in

- a) der Vernetzung
- b) den Elementeigenschaften
- c) der Orientierung
- d) den Geometriedaten
- e) den Materialeigenschaften
- f) den Knotenfesselungen
- g) und den Belastungen

Nur dann können die Steifigkeitsmatrix und der Lastvektor mehrfach benutzt werden.

Gemäß dieser Definition sind in der Literatur zwei grundsätzlich unterschiedliche Handhabungen von Superelementen zu finden. Dies sind

- ◆ die Anwendung der Substrukturtechnik
- ◆ und die Verwendung von USER definierten Elementen

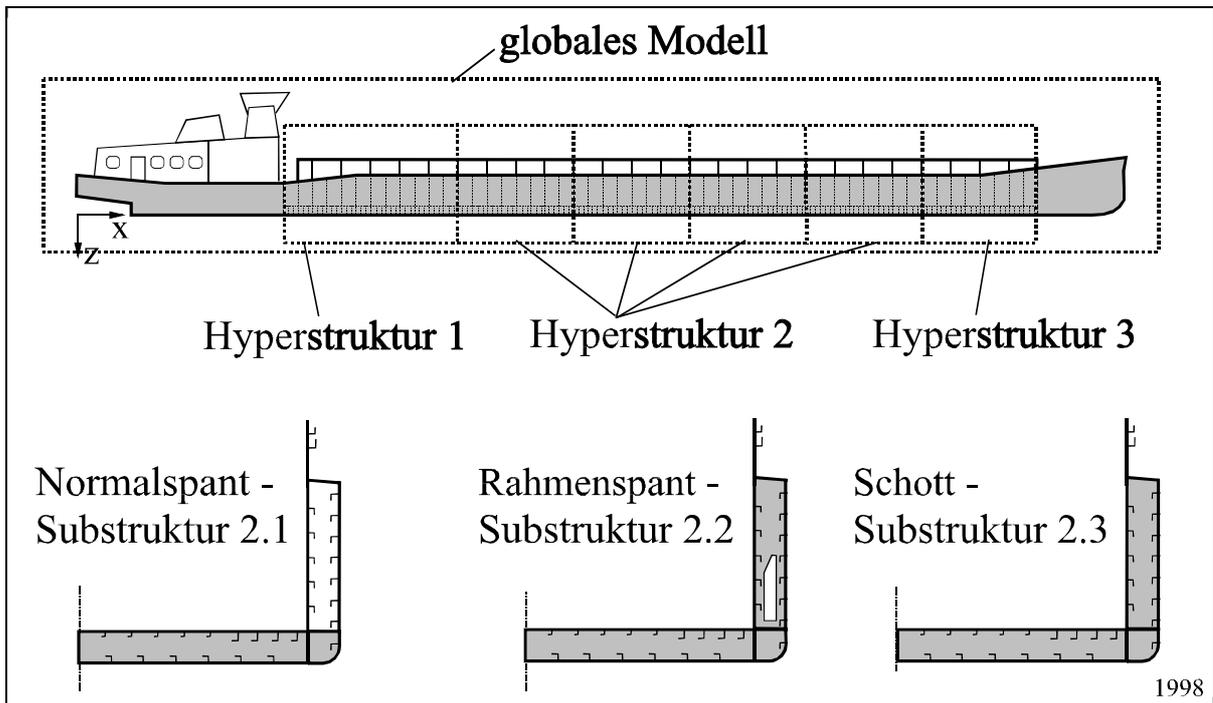
Auf diese beiden Punkte wird in den folgenden Abschnitten intensiver eingegangen.

#### 3.1.1.1 Substrukturtechnik

Die Verwendung der *Substrukturtechnik* in der FEM ist eine Möglichkeit zur Reduzierung der Berechnungszeit. Der Grundgedanke der Substrukturtechnik besteht in der wiederholten Nutzung einer einmal aufgestellten Steifigkeitsmatrix. In dem globalen Modell werden häufig wiederkehrende Bereiche zu sogenannten Substrukturen definiert. Ist die Substruktur aus untergeordneten Substrukturen aufgebaut, wird diese in der Fachliteratur auch als *Hyperstruktur* bezeichnet. In der Schiffsfestigkeit wäre z. B. das Laderaumsegment die Hyperstruktur, einzelne Rahmenspannten, Schotte o.ä. werden als Substrukturen definiert.

Die Überprüfung der Substrukturtechnik war Gegenstand einer Studienarbeit, die am **ISD** angefertigt wurde /B13/. In dieser Arbeit wurde anhand verschiedener Strukturen die Anwendbarkeit dieser Technik überprüft. Zur

Bewertung der Ergebnisse sind neben der Berechnungszeiten (*CPU-time*, *total time*) auch der zusätzliche Zeitaufwand für den USER herangezogen worden. Die dort ermittelten Ergebnisse werden im folgenden verkürzt wiedergegeben.



**Abb. 3-1: Substrukturtechnik am Beispiel eines Schiffskörpers**

**Fig. 3-1: Substructure for the example of a ship hull**

**Vorgehensweise und Berechnungsablauf**

Es ist notwendig, die Analyse mit der Substrukturtechnik in mind. 3 Schritten durchzuführen.

- 1) Nach der Modellierung der Substrukturen wird deren Steifigkeitsmatrix ermittelt und auf der Festplatte gespeichert. Dies erfolgt in einem **vorgeschobenen Berechnungslauf**.
- 2) In der anschließenden Berechnung der Hyperstruktur wird die Steifigkeitsmatrix der Substruktur in die Gesamtsteifigkeitsmatrix eingesetzt. Dies wird in der Literatur auch als statische Kondensation bezeichnet. Durch das mehrfache Nutzen der bereits ermittelten Steifigkeitsmatrix innerhalb des gleichen Modells kann Rechnerkapazität eingespart werden /B13/. Dieser Berechnungslauf wird die **Hauptberechnung** bezeichnet.
- 3) Die Spannungen und Verformungen im Inneren der Substrukturen erhält man durch eine anschließende **Reanalyse**.

**Vorteile der Substrukturtechnik**

Die Anwendung der Substrukturtechnik macht nur Sinn für besonders große Strukturen wie z. B. im Flugzeug- oder Schiffbau.

- a) Konstruktionsänderungen an einem Bauteil der Substruktur erfordern lediglich dessen erneute Berechnung und die der übergeordneten Strukturen. Die Matrizen benachbarter Substrukturen können weiter benutzt werden.
- b) Wenn sich Komponenten in der Struktur wiederholen, ist es sinnvoll, diese als Substrukturen zu definieren. Die Steifigkeitsmatrizen können dann mehrmals verwendet werden.
- c) Die Freiheitsgrade der inneren Knoten können eliminiert werden. Das Gleichungssystem wird kleiner, was kürzere CPU Zeiten zur Folge hat.

### **Nachteile der Substrukturtechnik**

Wegen der spezifischen Vorgehensweise sind mit der Anwendung der Substrukturtechnik auch Nachteile verbunden.

- a) Für die Speicherung der Steifigkeitsmatrix der Superelemente wird mindestens eine Datei (*Database*) benötigt, die bei der Analyse der Überstruktur aufgerufen wird. Sie kann bei komplexeren Modellen eine beachtliche Größe erreichen.
- b) Da die Steifigkeitsmatrix eines Superelementes auf der Festplatte gespeichert [aus Schritt a)] und bei Bedarf eingesetzt wird, ist eine Veränderung dieser Matrix nicht möglich. Dies bedeutet, daß die Lageänderung von Elementen oder die Änderung von Werkstoffeigenschaften nicht berücksichtigt werden kann. Somit sind keine nichtlinearen Berechnungen möglich.
- c) Die Eignung des verwendeten Preprocessors bezüglich der Substrukturtechnik besitzt einen wesentlichen Einfluß auf die benötigte Zeit zur Erstellung des Eingabefiles. Wegen der bereits aufgeführten Nachteile wird die Substrukturtechnik von den Vertreibern moderner Programmsystems als veraltet angesehen. Diesbezüglich erfolgt keine Weiterentwicklung der Software. Da kaum grafische Unterstützung durch den Preprocessor vorhanden ist, müssen die Eingabefiles manuell (d.h. mit dem Editor) vorbereitet werden.
- d) Wie in der Vorgehensweise erläutert wurde, erfolgt der Berechnungsablauf in mehreren Schritten. Dies hat auch zur Folge, daß die Ergebnisse für die Hyperstruktur und die Substrukturen auf entsprechend viele Dateien verteilt sind. Im Postprocessing kann somit keine Betrachtung des Spannungs- und Verformungsverlaufes am kompletten Schiffskörper erfolgen. Jede Datei muß einzeln für sich betrachtet und ausgewertet werden. Dieses erfordert somit einen hohen Bearbeitungsaufwand.

### **Bewertung der Substrukturtechnik**

Die Anwendung der Substrukturtechnik war in den frühen Jahren der FEM ein hilfreiches Mittel, mit kleinen Rechnern komplexe Strukturen zu analysieren. Die Methode beinhaltet aber einige beachtenswerte Punkte:

- a) Die Betrachtung des Verhaltens von Strukturen im überkritischen Bereich (nichtlineare Berechnungen) ist bei Anwendung der Substrukturtechnik nicht möglich.
- b) Die Berechnung der Elementsteifigkeitsmatrix benötigt nur einen relativ kleinen Anteil an der gesamten Berechnungszeit.

Wie erläutert wurde, müssen die Elementsteifigkeitsmatrizen der Substrukturen auf der Festplatte gespeichert werden. Die benötigten Festplattenkapazitäten des verwendeten Rechners steigen enorm an.

Bei größeren Strukturen reicht der Arbeitsspeicher der Rechner am **ISD** nicht aus, um die Gesamtsteifigkeitsmatrix im RAM zu behalten. Diese muß somit ebenfalls auf der Festplatte ausgelagert werden (*out-of-core*). Wenn die Gesamtsteifigkeitsmatrix und die Elementsteifigkeitsmatrizen auf der Festplatte gespeichert werden müssen, reichen die vorhanden Festplatten nicht aus. Dies bedeutet, daß am **ISD** die Berechnung eines komplexen Schiffsmodells ohne Substrukturtechnik möglich, mit Substrukturtechnik nicht möglich ist.

- a) Es ist festzustellen, daß durch die Substrukturtechnik die erforderliche CPU-Leistung und RAM reduziert wird. Beim Vergleich der Berechnungszeiten ist aber zu beachten, daß für jede Strukturanalyse mit der Substrukturtechnik mindestens drei Rechenläufe notwendig sind.
- b) Die CPU-Zeiten (*CPU time*) zur Berechnung der Elementsteifigkeitsmatrix und zur Lösung des Gleichungssystems können zwar gesenkt werden, die Substrukturtechnik kann aber nicht ohne Zugriff auf die Festplatte erfolgen. Der kritische Punkt bei einer Berechnung sind aber die Zugriffszeiten zur Festplatte. Da diese einige 10er Potenzen höher liegen als die des Arbeitsspeichers, ist leicht einzusehen, warum bei größeren Modellen sogar längere Berechnungszeiten (*total time*) benötigt werden /B13/.
- c) Bei Anwendung der Substrukturtechnik erhöht sich der Aufwand im Pre- und Postprocessing erheblich, so daß der zu betreibende Ingenieuraufwand beträchtlich ansteigt. Ein ver-

meintlich gewonnener Zeitvorteil bei der Berechnung wird durch den hohen manuellen Arbeitsaufwand relativiert.

- d) Es ist grundsätzlich zu beachten, daß die Kosten für die Hardware stark fallen und die Personalkosten steigen /B13/. Bei Anwendung der Substrukturtechnik würde man versuchen, an der falschen Stelle Ingenieurzeit zu sparen.

Nach Meinung des Autors ist die Anwendung der Substrukturtechnik nicht mehr zeitgemäß. Besonders für nichtlineare Berechnungen in der Schiffsfestigkeit ist sie ungeeignet. Denn gerade in den typischen Substrukturen (Laderaumsegmenten) treten die Nichtlinearitäten auf.

Die Anwendung der Substrukturtechnik wird zur Bearbeitung der weiteren Aufgabenstellung als völlig ungeeignet angesehen. Aus diesem Grund wird in den folgenden Kapiteln nicht weiter darauf eingegangen.

### 3.1.1.2 USER Elemente

Eine ganz andere Form der Superelemente sind diejenigen, in denen die Elementsteifigkeitsmatrix über besondere analytische Ansätze gebildet wird. Dies können z. B. Elemente sein, die über ein orthotropes Stoffgesetz das Verhalten einer versteiften Platte beschreiben /Kröplin77/, /Ueda84/, /Hinrich95/.

Dieser Ansatz läßt sich auch auf Elemente übertragen, die nichtlineares Verhalten beschreiben sollen. Hierzu wird die Elementsteifigkeitsmatrix in Abhängigkeit von den Randbedingungen an den Knoten ausgewählt. Dieses bildet die Grundidee der *idealized structural unit method (ISUM)* /Ueda84/, /Ueda86a/, /Paik90/, /Paik91/, /Ueda91/.

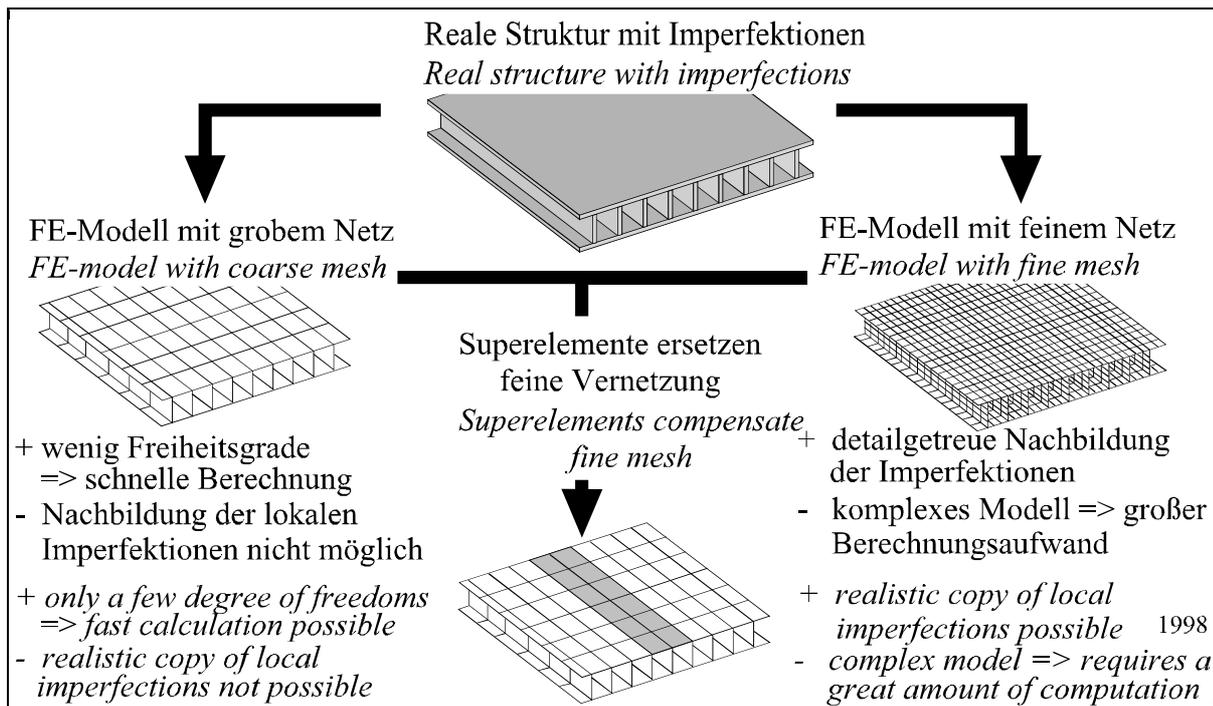
Im Rahmen des hier behandelten Forschungsvorhabens ist nun zu prüfen, ob nicht eine sinnvolle Kombination der Standard FE-Elemente mit USER definierten Superelementen erfolgen kann.

Bei der Berechnung eines Binnenschiffes kann davon ausgegangen werden, daß sich lediglich im mittleren Bereich des Schiffes ein relativ kleiner Bereich befindet, der sich stark nichtlinear verhält. Diese äußern sich z.B. im Versagen eines relativ schmalen Plattenstreifens zwischen zwei Bodenwrangen. Das Ausbeulen kann im Innenboden, Außenboden und Dennebaum geschehen.

Das Versagen eines Plattenstreifen wird von Imperfektionen begleitet, wie sie z. B. in Abschnitt 1.1 dargestellt sind. Um die geringere Steifigkeit solcher Bauteile mit Standard FE-Elementen erfassen zu können, muß der Bereich entsprechend fein vernetzt werden. Dies hat ein relativ großes Gleichungssystem und entsprechende Berechnungszeiten zur Folge. Um besagtes zu umgehen, besteht nun die Überlegung solche Bereiche durch ein Superelement zu ersetzen. Hierzu wurde am **ISD** eine Diplomarbeit /B15/ angefertigt, die diese Fragestellung untersucht.

Sinnvoll erscheint die Kombination der FEM und der ISUM. Wie die Abb. 3-2 zeigt, ist für die hier beschriebene Problematik der partielle Einsatz von Superelementen im Doppelboden denkbar.

Um die feine Vernetzung zu vermeiden, ist z. B. ein Element zu entwickeln, welches mit wenigen Knoten die Steifigkeit eines vorverformten Plattenfeldes besitzt. Dieses geschieht in Anlehnung an die Theorie der ISUM. Die Steifigkeitsmatrix besagten Elementes ist während des Berechnungslaufes auf den jeweiligen Beulzustand abzustimmen. Bei der Programmierung ist aber darauf zu achten, daß diese Elemente mit Hilfe der modernen Software für Pre- und Postprocessing behandelt werden können. Zur Lösung des Gleichungssystems ist auf vorhandene Programmroutinen zurückzugreifen.



**Abb. 3-2: Kombination von Standard-FE und Superelementen**

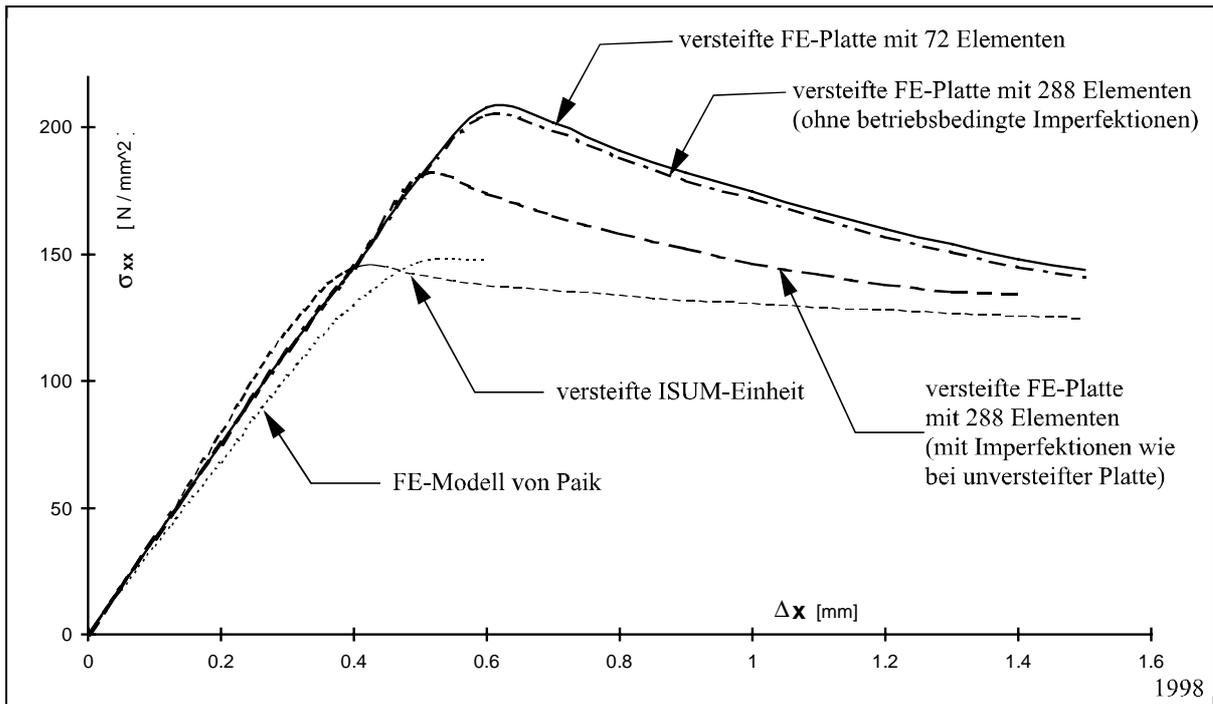
**Fig. 3-2: Combination of standard FE and superelements**

In der erwähnten Diplomarbeit /B15/ wurde untersucht, inwieweit sich die Theorien, die der ISUM-Methode zugrunde liegen, mit der FEM verbinden lassen, um die Nachteile beider Methoden möglichst zu eliminieren. Zusätzlich sollte geklärt werden, welcher Aufwand betrieben werden muß, um ein solches Superelement zu erstellen und dieses zu implementieren. Als Ergebnis ist ein finites Superelement angefertigt worden, das man zur Analyse des Kollapsverhaltens von Binnenschiffen verwenden kann.

Dazu wurde eine kritische Auswertung der Arbeiten von *Ueda* und *Paik* vorgenommen, die als Entwickler und Anwender der ISUM-Methode gelten. Die theoretischen Grundlagen sind in /B15/ dargelegt worden, um dem Leser zu verdeutlichen, wie mit einfachen Verfahren aus den einzelnen Versagensmechanismen das Steifigkeitsverhalten der jeweiligen ISUM-Einheiten gewonnen wird. Die wesentlichen Vereinfachungen und die damit zusammenhängenden Folgen (kurze Berechnungszeiten, Ungenauigkeiten in den Ergebnissen, sehr beschränkte Anwendbarkeit) wurden entsprechend der Aufgabenstellung herausgearbeitet.

In mehreren kritischen Vergleichsrechnungen sind dann die Unterschiede in den Ergebnissen der Analysen zwischen der ISUM und der FEM aufgezeigt worden. Während bei der unversteiften Platte nur geringe Abweichungen im Ergebnis auftraten, waren diese Unterschiede bei der versteiften ISUM-Platte nicht mehr zu übersehen (Abb. 3-3). Auch die Untersuchung eines Gesamtmodells (Kastenträger von *Ostapenko*) zeigte die Unterschiede beider Methoden. Eine ausführliche Beurteilung bezüglich dieser Ergebnisse ist im Kap. 3.3 der Diplomarbeit /B15/ zu finden.

Als nächstes wurde das ISD-Superelement (welches im Rahmen eines anderen Forschungsvorhabens am **ISD** entwickelt wird /Kohlhaupt98/ ) untersucht, um es als Alternative zu der herkömmlichen Analyse des Kollapsverhaltens von Binnenschiffen mit Standardelementen zu verwenden. Dabei sollte das ISD-Superelement mit der ISUM-Methode verglichen werden, um zu entscheiden, welcher Weg bei der Erstellung eines neuen Superelementes einzuschlagen ist. Es stellte sich heraus, daß das ISD-Element ein Superelement im herkömmlichen Sinne ist, welches auf der Grundlage hochgradiger Potenzansätze entstanden ist.



**Abb. 3-3: Spannungs-Verformungs-Diagramm der versteiften Platte /B15/**

**Fig. 3-3: Stress-deformation-diagram of a stiffened plate /B15/**

Da es zum einen für eine bestimmte Aufgabe entwickelt wurde (Verhalten von Strukturen im Stoßzentrum bei der Analyse von Kontaktproblemen), die nicht dem vorgegebenen Ziel entsprach (Verringerung der Analysezeiten durch große Superelemente) und zum anderen keine grobmaschigere Vernetzung als das **MARC**-Standardelement Typ 75 erlaubt, ist von einer Verwendung des **ISD**-Elementes Abstand genommen worden.

Schließlich wurde ein eigenes Superelement entwickelt. Dieses als **SFS** (*Superelement for shipstructures*) bezeichnete Superelement sollte die Grundgedanken der **ISUM** mit der allgemeinen Verwendbarkeit des finiten Elementes verbinden. Schließlich ist das **SFS** als ein vierknotiges ebenes Schalenelement realisiert worden, welches im linearen Bereich über die gleichen Ansatzfunktionen verfügt wie das **ISD**-Element. Der nichtlineare Teil ist dann gemäß der **ISUM**-Theorie entwickelt und auf das **SFS** übertragen worden. Durch die enge Anlehnung an das Standardschalenelement von **MARC** ist eine breite Anwendung gewährleistet.

Als letzter Schritt ist die Implementierung des **SFS** in das Programmsystem **MARC/ MENTAT** durchgeführt worden. Die zugehörigen Elementmatrizen wurden in den **FORTRAN** Code übersetzt und in die entsprechende Subroutine eingebunden. Es steht somit am **ISD** ein Superelement zur Untersuchung des Kollapsverhaltens von Binnenschiffen zur Verfügung, das aufgrund seiner Struktur zu wesentlich kürzeren Analysezeiten führt, als die herkömmlichen Elemente. Warum dieses Element trotzdem nicht verwendet wurde wird im folgenden begründet.

**Abschließend können folgende Schlußfolgerungen gezogen werden:**

Generell ist die Anwendung von Superelementen mit Nachteilen verbunden, so daß stets überprüft werden muß, ob sich der Mehraufwand zur Erstellung und Anwendung von Superelementen überhaupt lohnt. Diese sind meistens an die Erfüllung bestimmter Aufgaben gekoppelt, um beispielsweise die Analysezeiten zu reduzieren oder die Auslagerung von Berechnungsdateien auf die langsame Festplatte zu verhindern. Selbst wenn versucht wird, das Superelement für ein möglichst breites Anwendungsspektrum zu öffnen, indem man seine Eigenschaften relativ eng an ein bereits vorhandenes Standardelement (z.B. **MARC** Typ 75) anbindet, müssen in weiten Bereichen Kompromisse eingegangen werden.

Das **SFS** läßt sich demzufolge nur dann optimal einsetzen, wenn möglichst viele gleichartige Strukturen eines **FE**-Modells durch das Superelement diskretisiert werden können, wie z.B. der gesamte Innen- und / oder Außenboden eines Binnenschiffes. Zusätzlich sollte man die Materialstärke und die Abmessungen dieser Bleche bereits festgelegt haben und nicht nach jedem Berechnungsschritt verändern. Auf diese Weise würde der Aufwand zur

Bereitstellung des nichtlinearen Anteils enorm ansteigen, da die hierfür notwendigen Herleitungen erst erarbeitet werden müssen.

Zudem sind aufwendige Testreihen notwendig, um die Zuverlässigkeit des erstellten Superelementes nachzuweisen. Es müssen dazu ausreichend viele Testmodelle vergleichend berechnet werden, um die Fähigkeiten des SFS zu verifizieren. Letztendlich kann man beim späteren Einsatz des Superelementes in anspruchsvollen FE-Modellen nie ganz ausschließen, daß nicht doch unvorhergesehene Fehler auftreten, auf die der Anwender auch bei einer korrekten Implementierung keinen Einfluß hat. Zwar bieten FE-Programme wie **MARC** die Möglichkeit eigene Superelemente zu implementieren, doch niemand kann genau vorhersagen, wie stabil solche Analysen ablaufen<sup>1</sup>. Treten Konflikte zwischen dem Superelement und dem eigentlichen Programm während einer FE-Untersuchung auf, kann die Suche nach dem Fehler sehr zeitaufwendig werden. Die Verwendung von Standard-elementen mit einer entsprechend längeren Berechnungszeit kann in solchen Fällen für den Anwender günstiger sein.

Zudem ist die Anwendung von Superelementen nicht mehr zeitgemäß. Superelemente besaßen zu Beginn der Entwicklung der FEM sicherlich ihre Existenzberechtigung, um die damals gravierenden Nachteile (aufgrund der sehr beschränkten Möglichkeiten der Hardware) zu kompensieren. Heutzutage sind selbst PC's für den Heimgebrauch in der Lage, die Rechnerperformance einer Workstation aus der Mitte dieses Jahrzehntes zu übertreffen! Moderne Computeranlagen, die derzeit in der Forschung und High-Tech-Industrie genutzt werden, sind entweder bereits mit sehr viel Arbeitsspeicher ausgerüstet oder sie lassen sich für relativ geringe Kosten auf genügend RAM aufrüsten.

Führt man sich nun vor Augen, welchen Aufwand der Anwender betreiben muß, um Superelemente zu erstellen, sie zu implementieren und anschließend mit Referenzergebnissen zu verifizieren, läßt sich die hierfür aufgebrauchte Zeit und die damit verbundenen Kosten nicht mehr rechtfertigen.

Um diesen Sachverhalt zu verdeutlichen, kann auf die am **ISD** verwendete Hardware verwiesen werden. Die hier zur Nutzung von FE-Analysen zur Verfügung stehenden Workstations sind inzwischen im Bereich der Forschung bis an ihre Grenzen ausgereizt. Große FE-Modelle, die aus mehr als 100.000 Freiheitsgraden bestehen, lassen sich nur unter einem recht hohen Zeitaufwand analysieren. Inzwischen ist es aber möglich, die modernste Rechnergeneration am HRZ zu nutzen. Für zukünftige FE-Analysen steht eine Version des FE-Programms **MARC** zur Verfügung, die gleichzeitig 4 (oder auch mehr) Prozessoren des Parallelrechners HP-SPP 2000 nutzen kann. Entsprechend große Arbeitsspeicher können genutzt werden, um selbst sehr komplexe Modelle *in-core* zu verarbeiten. Auf die Anwendung von Superelementen und die damit verbundenen Kompromisse kann dann verzichtet werden.

Doch selbst die relativ kleinen Rechenanlagen am **ISD** (PC, HP 712/735 Workstation) können durch die Anwendung bestimmter Features der Software besser ausgenutzt werden. So läßt sich mit einigen Programmiertricks (siehe Abschnitt 3.8) die Menge der zu speichernden Daten von einigen hundert Megabyte auf wenige Kilobyte reduzieren. Beachtet man nun, daß das Schreiben auf die Festplatte der mit Abstand langsamste Teil einer Berechnung ist, so wirkt dies wie die Nutzung eines "Turbo am Motor". Andere Maßnahmen zur Verkürzung der Berechnungszeiten wirken dagegen unbedeutend.

Wird zum einen die neueste Computergeneration (z.B. Parallelrechner) genutzt und zum anderen besondere Software-Features und eine geschickte Programmierung angewandt, scheint die Nutzung von Superelementen nicht mehr zeitgemäß zu sein. Diese benötigen zur Anwendung einen relativ großen Zeitaufwand, der in Verbindung mit den relativ hohen Kosten für eine Ingenieurstunde nicht mehr wirtschaftlich vertretbar ist. Zudem kann davon ausgegangen werden, daß ohne die Anwendung von Superelementen und die damit zwangsläufig vorhandenen Kompromisse eine höhere Ergebnisgenauigkeit erzielt werden kann.

Zu ähnlichen Ergebnissen kommen die Untersuchungen in verschiedenen ISSC Berichten. So wird es in /ISSC91III.1 S.335/ als sinnvoller angesehen, die Ingenieurkapazitäten bei der Modellerstellung zu schonen als Berechnungszeiten einzusparen [ "...it is more important to save man time in data preparation than to save computer time" ].

---

<sup>1</sup> Entsprechend schlechte Erfahrungen sind mit der *Substrukturtechnik* in **MARC** gemacht worden. Aufgrund eines Programmfehlers in **MARC** ließ sich diese Technik ab einer bestimmten Modellgröße nicht mehr anwenden /B13/.

*"For the analysis of plate and shell structures a large number of simplified methods exist, often based on a beam-column approach, but the primary tool is the FE method /ISSC97III.1 S. 271/."*

*"However, the assumed rupture strain was 5 percent, which may be too small and unrealistic /ISSCIII.1 S.253/"*

*"Use of the Idealized Structure Unit Method for analysing double bottom grillages in ships is restricted by the need for further work to develop procedures for dealing with features such as openings in the webs of girders /ISSC94III.1 S. 368/."*

*"...to replace the previous rather complicated and time consuming plate element used in ISUM (/ISSC97III.1 S. 246/)"*

*"The finite element method still remains the primary tool for calculating elasto-plastic collapse of structural components although there has been progress in developing simplified methods for specific problems. /ISSC97III.1 S.270/"*

Da diese Elemente für die weitere Bearbeitung der Aufgabenstellung als ungeeignet angesehen werden, wird auf eine weitere ausführliche Beschreibung verzichtet. Angaben zur Entwicklung und Implementierung der Elemente und der Berechnungsergebnisse können /B15/ entnommen werden.

### 3.1.2 Submodelltechnik

Bei der Erstellung von Konstruktionen sind oft Bereiche zu modellieren, in denen hohe Spannungsgradienten auftreten. Dies sind z. B. große Querschnittsänderungen, woraus Steifigkeitssprünge (z. B. Kerben, Lukenecken) resultieren. Da innerhalb eines Elementes die Spannungsänderung nicht zu groß werden darf, weil sonst die Genauigkeit der Analyse leidet, muß an diesen kritischen Stellen die Vernetzung entsprechend fein genug sein.

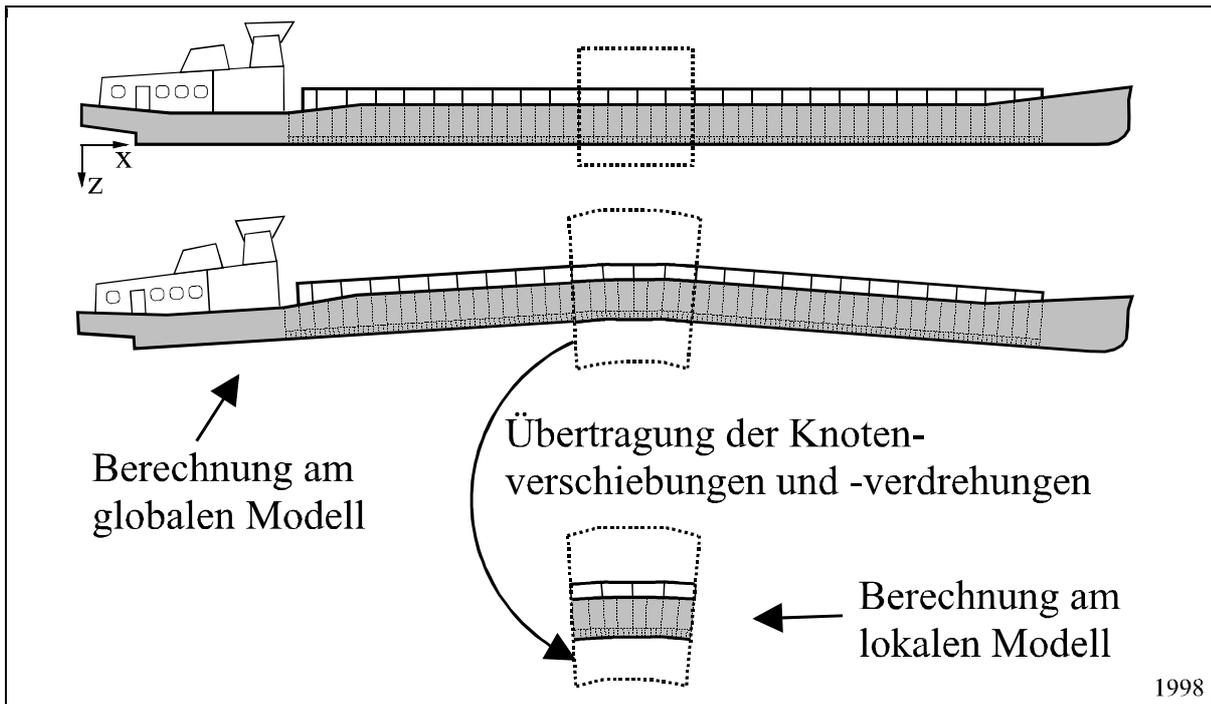
Das ganze Modell der feinsten Vernetzung anzupassen, ist nicht ökonomisch und wegen der begrenzten Rechnerkapazitäten auch meist nicht durchführbar. Mit der Submodelltechnik wird der als kritisch erkannte Bereich als völlig separates FE-Modell definiert, um hier eine feinere Vernetzung zu realisieren. Die entsprechenden Modelle werden als global bzw. lokal bezeichnet. Für das lokale Modell kann auch die Bezeichnung Submodell verwendet werden.

Wie sich später bei der Darstellung der Berechnungsergebnisse noch zeigen wird, liegt der kritische Bereich eines Binnenschiffes im mittleren Teil des Laderaums. Zunächst wird aber das globale Modell der Schiffstruktur untersucht (Abb. 3-4).

Dieses **globale Modell** ist relativ fein vernetzt, um die geometrischen Imperfektionen (z. B. Wellen und Falten im Innenboden) genau genug modellieren zu können. Auf diese Weise kann die Steifigkeit eines vorverformten Plattenfeldes erfaßt werden. Dies ist notwendig, um die Interaktionen zwischen lokalem Bauteilversagen (z. B. Ausbeulen eines Bleches) und globalem Strukturverhalten (z. B. Aufbiegung des Schiffskörpers) bestimmen zu können.

Um den Spannungsverlauf in den einzelnen Bauteilen erfassen zu können, kann optional eine Berechnung am **lokalen Modell** angehängt werden. Die Genauigkeit der Spannungswerte läßt sich noch steigern, indem an diesem Modell manuelle <sup>und/oder</sup> adaptive Netzverfeinerungen durchgeführt werden. Da hierdurch die Anzahl der Randknoten des Submodells zunehmen kann, werden die Verschiebungen an den neuen Knoten durch Interpolation bestimmt /B13/, /B19/.

In dem globalen Modell müssen schon im Preprocessing die Knoten der gemeinsamen Ränder definiert werden, um während der globalen Berechnung die entsprechenden Daten herauszuschreiben. In der anschließenden lokalen Berechnung werden als Randbedingungen des Submodells nicht nur die Lasten und Randbedingungen angetragen, sondern auch die aus der ersten Rechnung gewonnenen Verschiebungen der entsprechenden Randknoten.



**Abb. 3-4: Grundgedanke der Submodelltechnik**

**Fig. 3-4: Basic idea of the sub model technic**

Die beschriebene Vorgehensweise ist für lineare und nichtlineare Berechnungen eine sehr effiziente Möglichkeit, komplexe Modelle in einer angemessenen Berechnungszeit zu untersuchen. Bei Berechnungen mit großen geometrischen Nichtlinearitäten ist allerdings zu beachten, daß die Wechselwirkungen zwischen der lokalen und der globalen Struktur nicht zu groß werden dürfen.

Zu einem vergleichbaren Ergebnissen kommt das *Defence Research Establishment Atlantic* in Kanada /Pegg98/ welches diese Vorgehensweise als Top / Down Analysis bezeichnet. In Verbindung mit den Programmpaketen NASTRAN und ANSYS wird ein "automatisierter" Algorithmus beschrieben, welcher bei den lokalen Untersuchungen die Möglichkeiten der adaptiven Vernetzung nutzt.

Allerdings ist zu beachten, daß durch die globalen und lokalen Berechnungsschritte ein recht hoher Aufwand für den bearbeitenden Ingenieur entsteht. Wie sich später noch zeigen wird, ist es bei hochgradig nichtlinearen Analysen sinnvoller bzw. notwendig, das globale Modell an kritischen Stellen detailliert zu vernetzen. Nur so lassen sich die numerischen Probleme und somit die Berechnungszeiten klein halten, ohne Ergebnisse von zweifelhafter Qualität zu erlangen.

**Abschließend können folgende Schlußfolgerungen gezogen werden:**

Die Submodelltechnik ist ein probates Werkzeug um in linearen Berechnungen grob vernetzte globale Modelle mit fein vernetzten lokalen Untersuchungen zu verbinden.

Für nichtlineare Analysen hat sich gezeigt, daß durch eine feine Vernetzung der "kritischen" Stellen im globalen Modell die Berechnungszeiten sogar gesenkt werden konnten. Die Nachteile des größeren Gleichungssystem wurden durch weniger Iterationen aufgehoben. Das die Qualität der Spannungsergebnisse hierdurch verbessert wird ist ein zusätzliches "Geschenk". Wie die Berechnungsergebnisse in Kapitel 7 und 8 zeigen werden, ist es nicht notwendig, weitere Computerzeit und Ingenieurstunden in zusätzliche lokale Berechnungen zu investieren.

**3.1.3 Adaptive Vernetzung**

Um an kritischen Stellen eine Netzverfeinerung zu erreichen, wurde in den letzten Jahren die adaptive Vernetzung entwickelt. Bei dieser wird das FE-Netz bei Überschreitung eines festgelegten Kriteriums /Rehle96/ wäh-

rend des Berechnungslaufes feiner vernetzt. Auf den ersten Blick eignet sich diese Vorgehensweise sehr gut, um die Spannungsergebnisse zu verbessern. In /B19/ wird beschrieben, daß einige Nachteile zu beachten sind.

- ◆ Die Verwendung von sogenannten TYINGS (lineare Kopplung eines neuen Knoten mit den Freiheitsgraden der Nachbarknoten) vergrößert die numerischen Probleme.
- ◆ Rasanter Anstieg der Freiheitsgrade und somit der Berechnungszeiten.
- ◆ Im Laufe eines Beladungsvorganges ändern sich die Bereiche mit den hohen Spannungen. Dies hat zur Folge, daß die fein vernetzten Bereiche an der falschen Stelle liegen. Dies zeigt sich besonders für die Erzladung nach GL-Ladevorgang B (siehe Kapitel 7.6).

**Abschließend können folgende Schlußfolgerungen gezogen werden:**

In Analogie zu den vorangegangenen Abschnitten muß auch an dieser Stelle gesagt werden, daß die besten Ergebnisse und die kürzesten Berechnungszeiten durch eine gute Vernetzung (d.h. feine Vernetzung an den richtigen Stellen) des globalen Modells erreicht wird. Demnach sind die Erfahrungswerte des Anwenders durch keinen Algorithmus zu ersetzen.

## 3.2 Die untersuchten Modelle

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die ersten nichtlinearen Untersuchungen an einer versteiften Platte (Kapitel 5) und einem Kastenträger (Kapitel 6) durchgeführt, für die bereits numerische und experimentelle Ergebnisse vorlagen. Ziel war zum einen die Verifizierung der Software und dessen Handhabung. Weiterhin wurde der Einfluß verschiedener Imperpektionsformen (Schweißbeigenspannungen, Abrostung, Vorverformungen) und einer höheren Materialfestigkeit untersucht.

Nach diesen Vorstudien wurden die gewonnenen Erkenntnisse auf komplette Schiffe übertragen. Bei den untersuchten Schiffskörpern handelt es sich um einen Schubleichter (Typ Europa II a) und ein Containerbinnenschiffes. Eine detaillierte Beschreibung der Struktur und der FE-Modelle erfolgt in Kapitel 7 und 8.

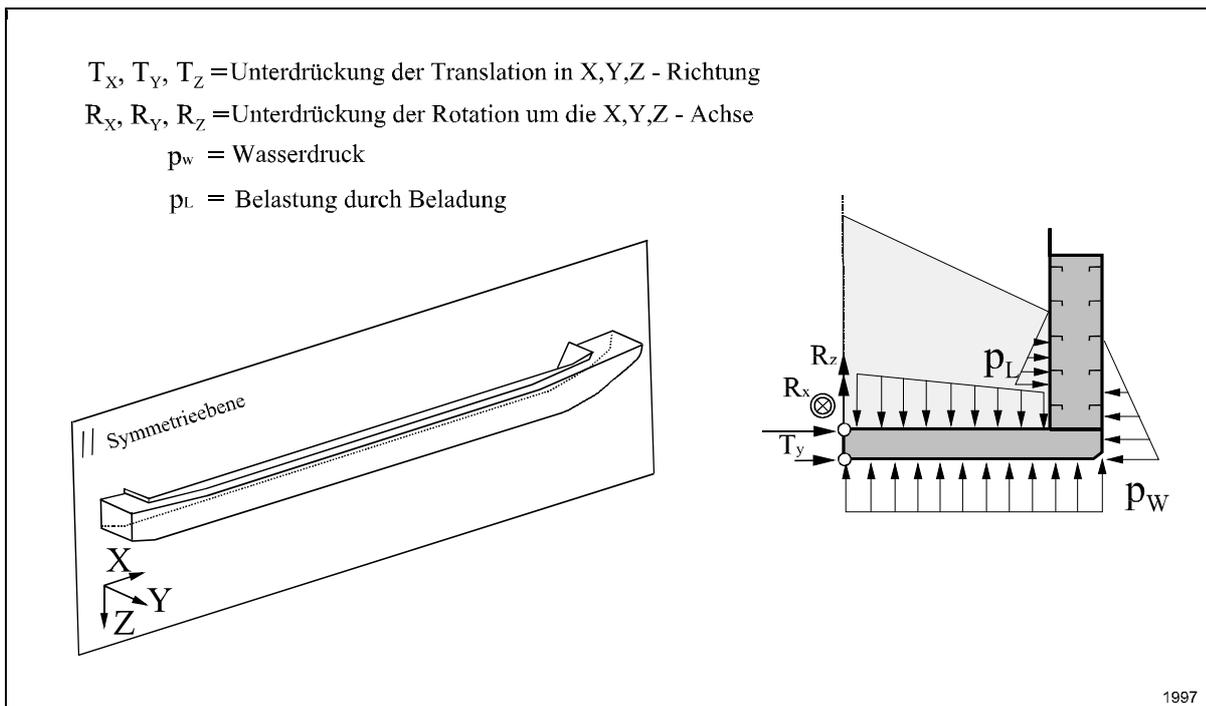
## 3.3 Die Knotenverschiebungen und Belastungen

Die Definition für Randbedingungen ist in der Fachliteratur der FEM unterschiedlich festgelegt. In dieser Arbeit werden jede Form von Lagerungen (Knotenfesselungen, -verschiebungen, Federn, Bettungen) sowie Einzelkräfte, Streckenlasten, Oberflächen- und Massenkkräfte dazugezählt. Da sie nicht nur an den Rändern der Struktur angreifen, sondern auch im Innern liegen können, unterscheidet sich der Begriff "Rand" etwas von der streng mathematischen Formulierung.

In der Abb. 3-5 sind für die Schiffe die anzusetzenden Knotenfesselungen erläutert. Demnach sind für die xz-Symmetrieebene die Bedingungen  $T_y$ ,  $R_x$  und  $R_z$  einzuführen.

Ferner ist bei schwimmenden und auch fliegenden Konstruktionen zu beachten, daß sich ein Gleichgewicht aus Auftriebskräften und Belastungen einstellt, da keine Fesselungen im Sinne eines Auflagers vorhanden sind. Für eine FE-Rechnung ergibt sich daraus, daß besondere Maßnahmen zu treffen sind, um mögliche Starrkörperbewegungen zu unterdrücken. Wird dies nicht beachtet, ergibt sich ein nicht-positiv definites Gleichungssystem.

Entsprechend der Abb. 3-5 fehlen noch Fesselungen für die Translation in x und z-Richtung und die Rotation um die y-Achse. Die Verschiebung in x-Richtung kann sehr unproblematisch durch Festhalten eines beliebigen Knotens erreicht werden. Da die exakte Schwimmlage des verformbaren Berechnungsmodells nicht bekannt ist, kann dies in z-Richtung nicht so einfach erfolgen, da "künstliche" Reaktionskräfte das Ergebnis nicht verfälschen dürfen.



**Abb. 3-5: Knotenfesselungen für das Halbmodell (symmetrisch)**

**Fig. 3-5: Fixed displacements of the half model (symmetrical)**

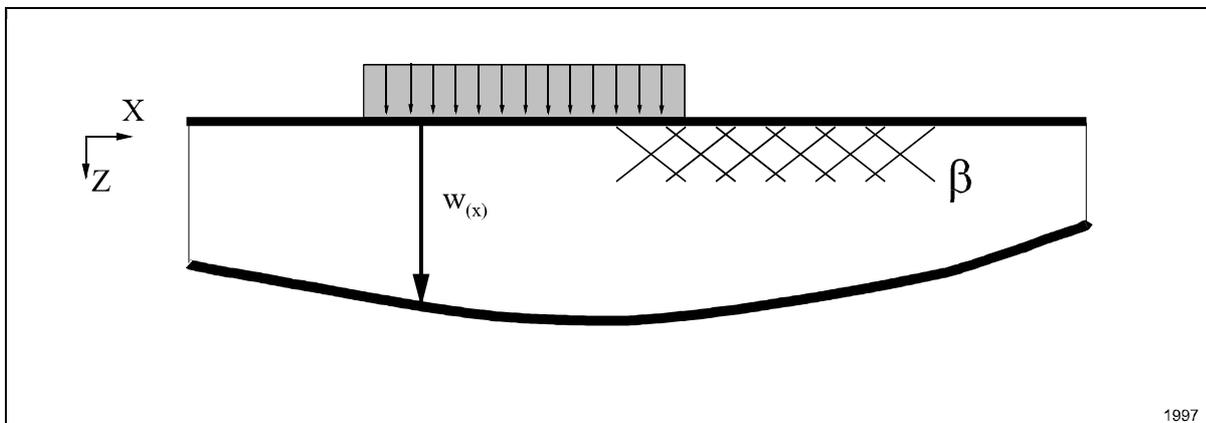
Als eine elegante Lösung bietet sich die Möglichkeit an, einen zusätzlichen Arbeitsterm für eine künstliche Bettung einzuführen. Hierzu ist in MARC K6 die Nutzung USER-definierter Elemente und deren Elementsteifigkeitsmatrix notwendig.

In der unten stehenden Grafik ist eine Bettung für einen Balken dargestellt, der durch eine beliebige Streckenlast  $q_{(x)}$  belastet wird. Dem sich verformenden Balken wirkt eine Reaktion der Bettung entgegen. Diese ist abhängig von der Größe der Durchbiegung  $w_{(x)}$  und einem Werkstoffwert - dem Bettungskoeffizienten  $\beta_{(x)}$ .

$$q_{w(x)} = \beta_{(x)} \cdot w_{(x)}$$

**Gleichung 3-1**

Die Streckenlast hängt dabei von den elastischen Eigenschaften des Untergrundes (in diesem Fall Wasser) und von der Form der Berührungsfläche ab.



**Abb. 3-6: Elastische Bettung**

**Fig. 3-6: Elastic foundation**

Aufgrund des hydrostatischen Grundgesetzes kann bei einem schwimmenden, prismatischen Körper angenommen werden, daß die Reaktion des Wasserdruckes proportional der Eintauchung ist. Vergleicht man die hydrostatische Grundgleichung (als Streckenlast!) mit der oben angeführten Gleichung, so ergibt sich die Formulierung  $\beta_{(x)}$  für einen prismatischen Balken.

$$\beta_{(x)} = \rho_w \cdot g \cdot B_{(x)}$$

Gleichung 3-2

Für zweidimensionale Elemente ist der Bezug auf die Breite B wegzulassen. Eine ausführliche Beschreibung der Entwicklung und Implementierung des genutzten Elementtyp ist /V08/, /V09/, /V11/, /V12/, /V13/ zu entnehmen.

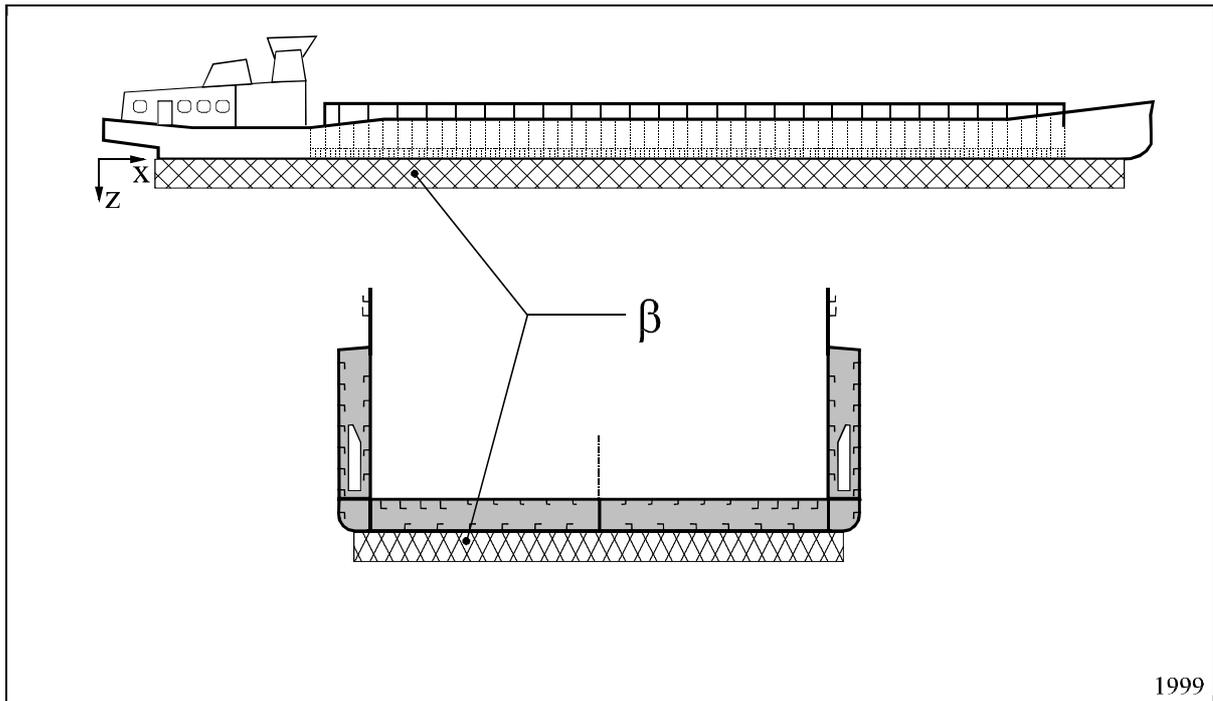


Abb. 3-7: Elastische Bettung am Hauptspant

Fig. 3-7: Elastic foundation at the main frame

Die folgende Auflistung beschreibt die Randbedingungen und die dafür verwendeten Sets bzw. Baugruppen.

xz Ebene:	Ty, Rx, Rz	Knoten des Sets <i>xz_ebene</i>
Wasserdruck	p <sub>w</sub>	Außenhaut
Eigengewicht	g*m	Alle Elemente
Flächenlast durch Ladung	p <sub>L</sub>	Innenboden und Trogwand

Bezüglich des Wasserdruckes wird in der **MARC** -Routine **FORCEM** mit **belongtoset** überprüft, ob das aktuelle Element zu einem entsprechenden Elementset (Außenwand, Außenboden, Kimm, Spiegel, Gangbord oder Deck) gehört. Wenn dies der Fall ist, wird die Subroutine **wasserdruck** aufgerufen, mit der die Druckbeaufschlagung erfolgt. Hierbei wird anhand der z Koordinaten (Variable X1<sub>(3)</sub>) überprüft, ob sich der jeweilige *integration point* des Elementes oberhalb oder unterhalb der Wasserlinie befindet. Die Punkte unterhalb der Wasserlinie werden mit einem Druck berücksichtigt. Dessen Wert errechnet sich aus der hydrostatischen Grundgleichung, die Richtung des Vektors ergibt sich normal zur Elementoberfläche. Der Term für den atmosphärische Umgebungsdruck wird hierbei nicht eingesetzt, da die Elementinnenseite ebenfalls diesem Druck ausgesetzt ist.

wenn	X1 <sub>(3)</sub> > 0	$p_w = \rho_w \cdot g \cdot X1_{(3)}$
wenn	X1 <sub>(3)</sub> < 0	p <sub>w</sub> = 0

### 3.4 Die betrachteten Ladefälle

Neben den Beanspruchungen aus Wasserdruck und Eigengewicht sollen an dem Schiffskörper natürlich auch die Auswirkungen von verschiedenen Ladefällen überprüft werden. Die folgenden Abschnitte behandeln nur die angetragenen Belastungen, die ermittelten Ergebnisse werden in den Kapiteln 7 und 8 vorgestellt.

Die Untersuchungen erfolgen an einem globalen Modell mit imperfekter Struktur. Dies ist erforderlich, um die geometrisch nichtlinearen Verhältnisse durch die imperfekten Strukturen zu berücksichtigen. Außerdem soll der Einfluß der Verformungen am Schiffskörper auf den Auftrieb berücksichtigt werden.

#### 3.4.1 Ladefall 1 - Eigengewicht, Bunkerung und Ballastwasser

Zusätzlich zu dem Stahlgewicht des Schiffskörpers sind die Massen der Hauptmaschine, des Getriebes und der sonstigen Ausrüstung zu berücksichtigen. Diese werden als Flächenlasten auf die entsprechenden Elemente verteilt. Der Ladefall 1 (ld1) berücksichtigt das Eigengewicht, Bunkerung und ggf. auch Ballastwasser. Die Abb. 3-8 gibt die Anordnung der Tanks für das Ballastwasser am Containerbinnenschiff wieder.

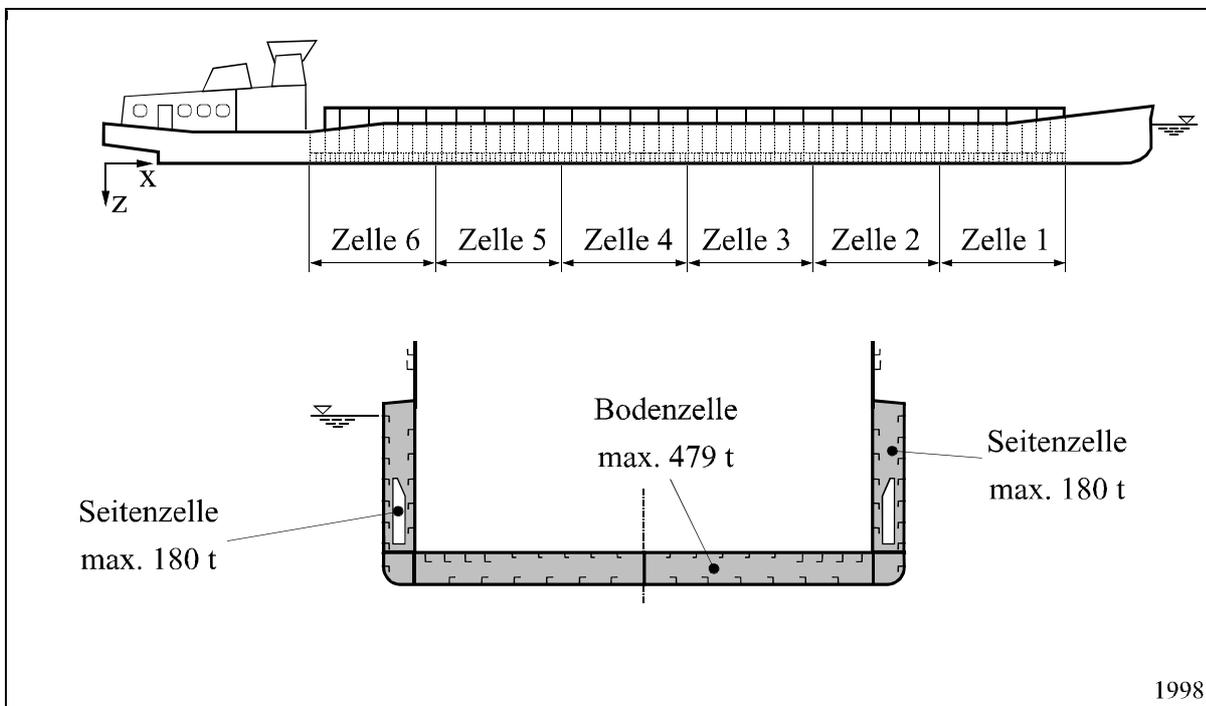


Abb. 3-8: Belastungen aus dem Ladefall 1

Fig. 3-8: Loads for the loadcase 1

Eine ausführliche Beschreibung der berücksichtigten Einzelmassen kann /V80/ und /V90/ entnommen werden.

#### 3.4.2 Ladefall 2 - gleichmäßig verteilte Ladung

Neben den Belastungen aus ld1 kommt im Ladefall 2 (ld2) auf die Elemente des Innenbodens eine gleichmäßig verteilte Flächenlast hinzu. Es ist zu erwarten, daß dies keine ernstzunehmende Beanspruchung des Schiffskörpers darstellt. Dieser Ladefall eignet sich aber sehr gut, um die Modelle zu überprüfen und die Programmierung zu verifizieren.

Im ld 2 verteilt sich die gesamte Ladung gleichmäßig im Laderaum. Somit ist auf allen Elementen des Innenbodens ein gleichmäßiger Flächendruck anzutragen. Dieser ergibt sich nach der folgenden Gleichung aus der einge-

brachten Ladungsmasse  $W_{Lad}$  und den geometrischen Abmessungen des Laderaums. Ladungsdruck auf die Trogwand wird hier nicht betrachtet, da in diesem Ladefall nicht von Schüttgütern sondern von Stückgütern ausgegangen wird.

Ladungsdruck auf dem Innenboden: 
$$p_L = \frac{W_{Lad} \cdot g}{B_C \cdot L_C}$$

Gleichung 3-3

- $p_L$  Ladungsdruck auf dem Innenboden
- $W_{Lad}$  Masse der Ladung (am Vollmodell!)
- $g$  Erdbeschleunigung
- $B_C$  Breite des Laderaums
- $L_C$  Länge des Laderaums

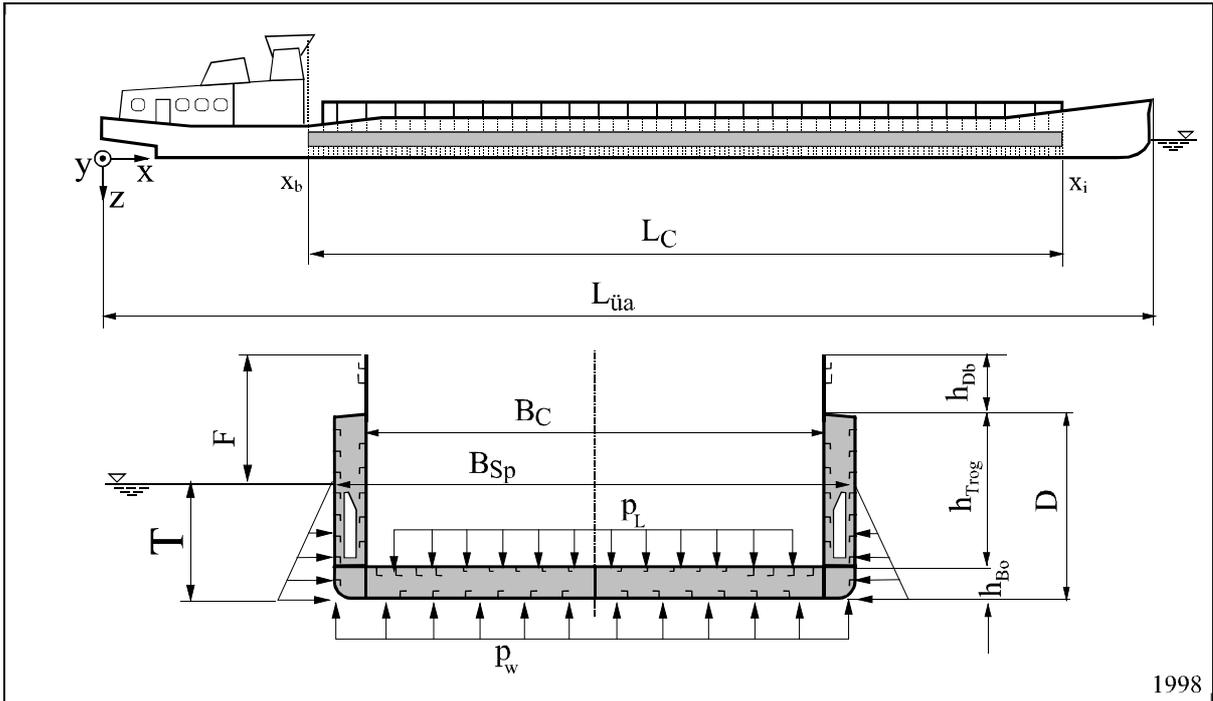


Abb. 3-9: Belastungen aus dem Ladefall 2

Fig. 3-9: Loads for the loadcase 2

### 3.4.3 Ladefall 3 - Aufbiegung (Hogging)

Eine Aufbiegung des Schiffskörpers stellt sich ein, wenn der Großteil der Ladung im vorderen und achteren Bereich des Laderaum verteilt wird. Im FE-Modell wird der Flächendruck auf dem Innenboden des Laderaums somit zwischen  $x_c$  und  $x_d$  (vorne) sowie zwischen  $x_g$  und  $x_h$  (achtern) aufgebracht (siehe Abb. 3-10). Die sich einstellenden Flächendrücke ergeben sich aus den Ladungsanteilen.

Verteilung der Ladungsmassen:

$$W_{Lad} = W_{Lad,v} + W_{Lad,a}$$

Ladungsdruck auf dem Innenboden vorne:

$$p_L = \frac{f_v \cdot W_{Lad} \cdot g}{B_C \cdot (x_d - x_c)}$$

Ladungsdruck auf dem Innenboden achtern:

$$p_L = \frac{f_a \cdot W_{Lad} \cdot g}{B_C \cdot (x_h - x_g)}$$

Gleichung 3-4

- $B_C$             Breite des Laderaums
- $f_a, f_v$         Faktor für die Ladungsverteilung (vorne und achtern)
- $g$                 Erdbeschleunigung
- $L_C$             Länge des Laderaums
- $p_L$             Ladungsdruck auf dem Innenboden
- $W_{Lad}$         Masse der Ladung (am Vollmodell!)

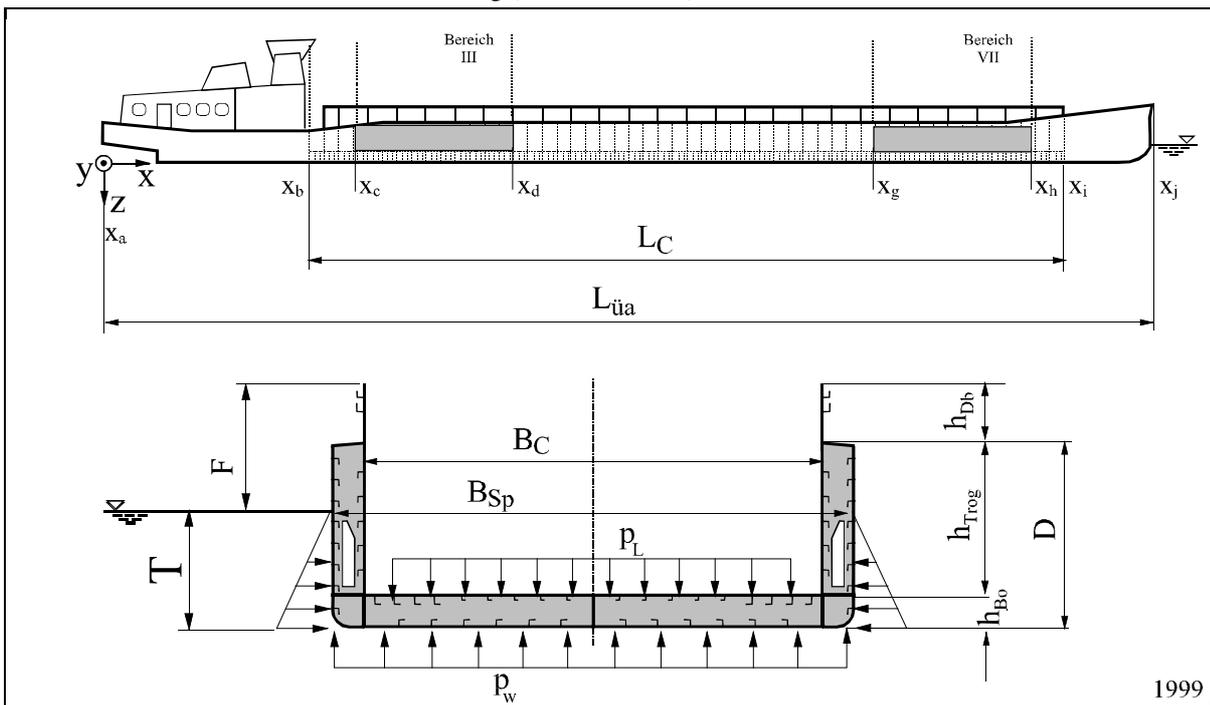


Abb. 3-10: Belastungen aus dem Ladefall 3

Fig. 3-10: Loads for the loadcase 3

### 3.4.4 Ladefall 4 - Durchbiegung (Sagging)

Wenn möglich, werden Schwertransporte auf Binnenwasserstraßen abgewickelt. Das folgende Foto in Abb. 3-11 zeigt einen solchen Beladungsfall für einen Schubleichter mit schwerem Stückgut.



**Abb. 3-11: Beladung eines Schubleichters mit schwerem Stückgut**

**Fig. 3-11: Loading of a pusher barge mit heavy cargo**

Der Saggingfall stellt sich bei einem Binnenschiff durch eine konzentrierte Beladung in Schiffsmitte ein. Um dies zu simulieren, wird im FE-Modell der Flächendruck auf dem Innenboden des Laderaums zwischen  $x_e$  und  $x_f$  verteilt (siehe Abb. 3-12). Der sich einstellenden Flächendruck ergibt sich somit wie folgt:

$$\text{Ladungsdruck auf dem Innenboden: } p_L = \frac{W_{\text{Lad}} \cdot g}{B_C \cdot (x_f - x_e)}$$

**Gleichung 3-5**

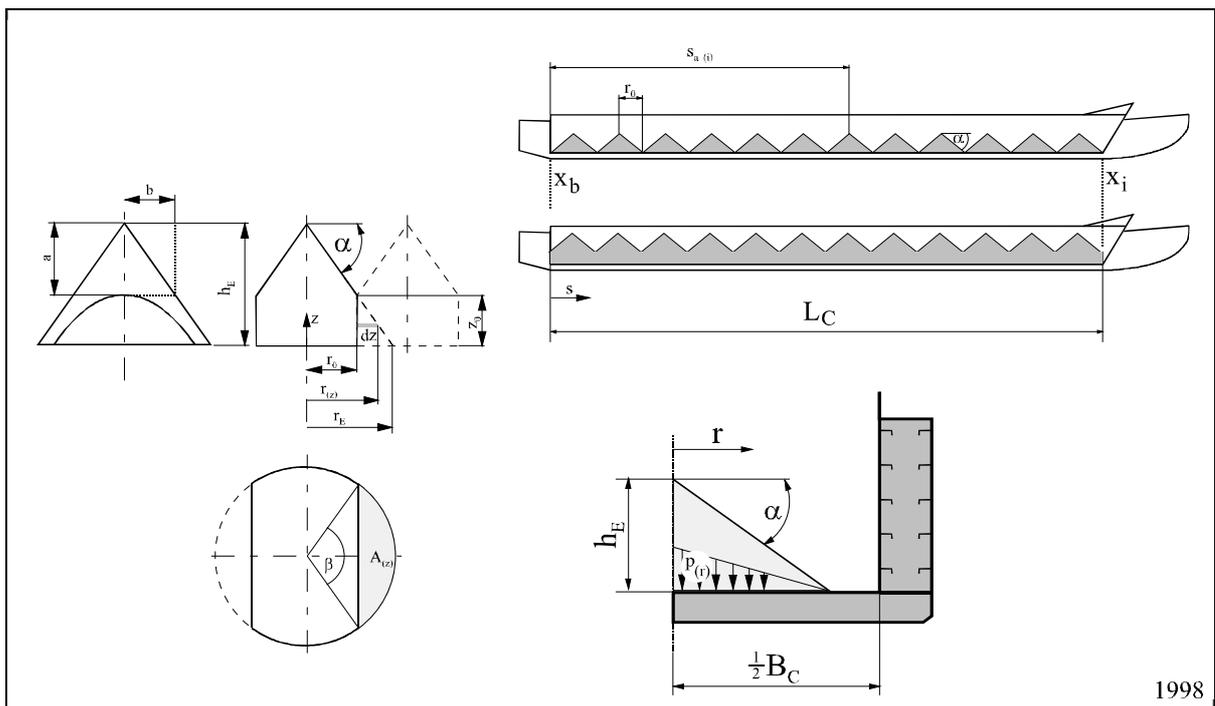
$p_L$	Ladungsdruck auf dem Innenboden
$W_{\text{Lad}}$	Masse der Ladung (am Vollmodell!)
$g$	Erdbeschleunigung
$B_C$	Breite des Laderaums
$L_C$	Länge des Laderaums





**Abb. 3-13:**  
Beladung eines Schubverbandes mit Erz

**Fig. 3-13:**  
Loading of a pusher train with ore



1998

**Abb. 3-14:** Belastungen aus dem Ladefall 5

**Fig. 3-14:** Loads for the loadcase 5

### 3.4.6 Ladefall 6 - Kiesladung

Bei geringer Dichte des Schüttgutes (z.B. Kies) wird der Laderaum entsprechend hoch gefüllt. Es stellt sich eine trapezförmige Lastverteilung über dem Innenboden ein. Dies hat den Nebeneffekt, daß die Trogwände des Laderaums abgestützt werden.

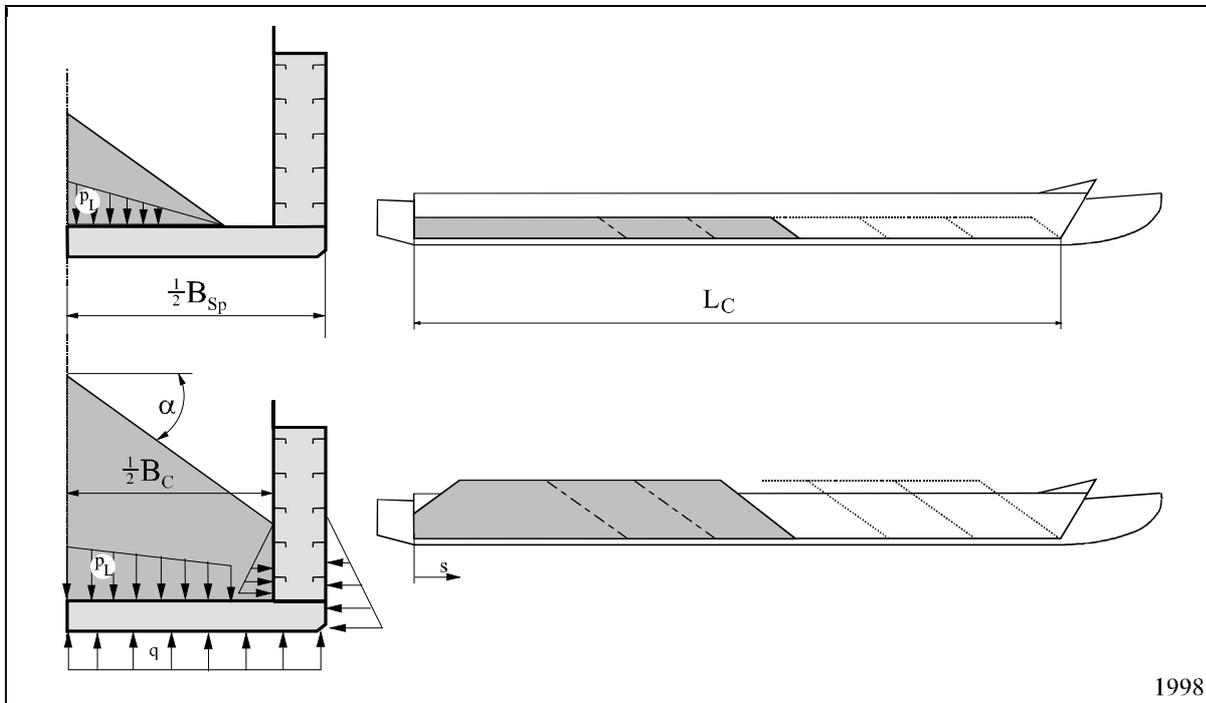


Abb. 3-15: Belastungen aus dem Ladefall 6

Fig. 3-15: Loads for the loadcase 6

In dem Ladefall 6 wird die Beanspruchung durch Beladung mit Kies ( $\rho_L = 1700 \text{ kg/m}^3$ ;  $\alpha = 30^\circ$  (Deg)) untersucht. Eine genaue Beschreibung der mathematischen Formulierung und der Programmierung ist in einem gesonderten Bericht enthalten /V86/.

### 3.4.7 Ladefall 7 - Containerladung

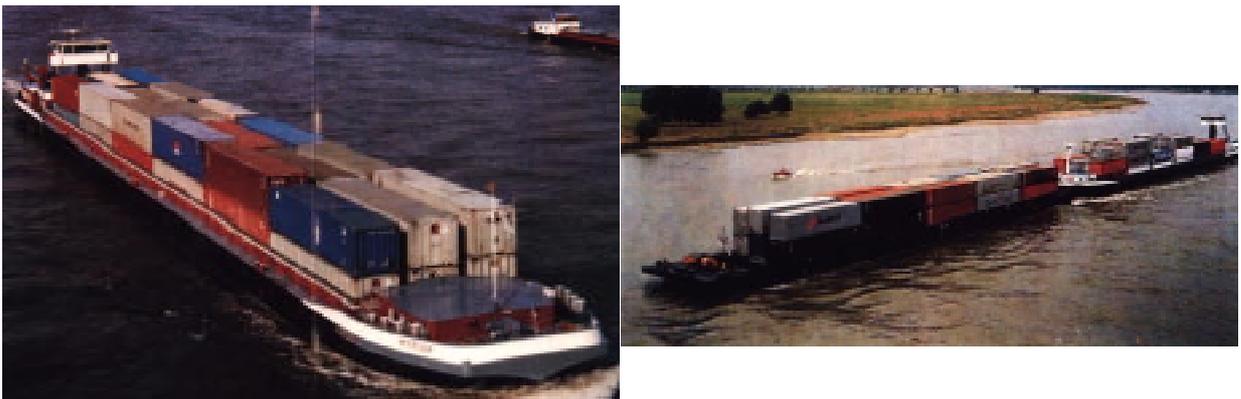
In zunehmenden Maße wird der Containerverkehr auf Binnenwasserstraßen abgewickelt. Um die Wirtschaftlichkeit der Containerbinnenschiffe zu erhöhen, ist es wünschenswert, die Ladekapazität zu erhöhen. Das Foto der Abb. 3-16 zeigt ein solches, von den Niederländern entwickeltes Schiff. Die großen Abmessungen dieses Schiffes beinhalten aber eine starke Einschränkung des Fahrtgebietes. So können z.B. aufgrund der großen Breite keine Binnenschleusen mehr passiert werden. Wünschenswert sind demnach Schiffe mit einer erhöhten Ladekapazität, bei denen die üblichen Abmessungen von 11,4 m Breite und 110 m Länge eingehalten werden.

In der bisherigen Bauweise können auf einem kanalgängigen Binnenschiff oder Leichter 3 Containerstapel nebeneinander fahren (Abb. 3-17). Um dennoch 4 Stapel zu ermöglichen, ist eine Modifizierung der bisherigen Bauweise notwendig. Diese wird in Kapitel 8 am Beispiel eines Containerbinnenschiffes bezüglich ihrer Festigkeit untersucht.



**Abb. 3-16: Beladung eines Containerbinnenschiffes mit Container**

**Fig. 3-16: Load of container inland vessel with container**



**Abb. 3-17: Containerladung in einem Binnenschiff und einem Schubleichter**

**Fig. 3-17: Container in an inland vessel and a pusher barge**

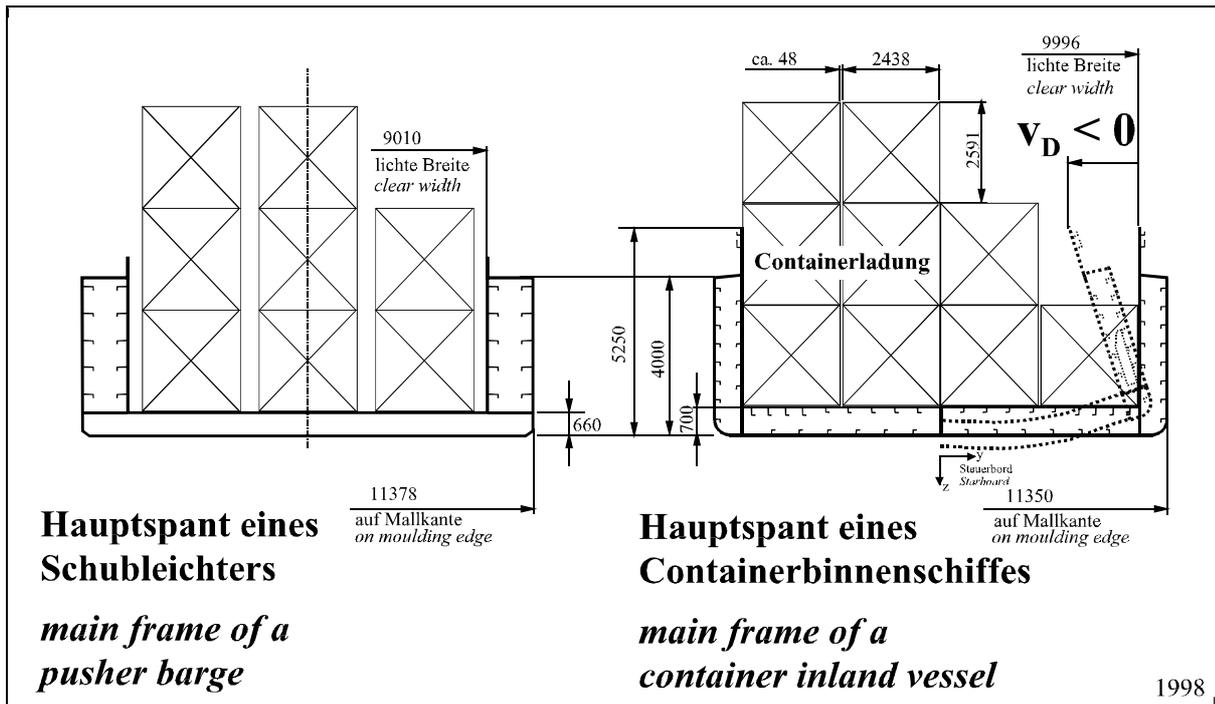


Abb. 3-18: 3 und 4 Containerstapel an typischen Hauptspanten

Fig. 3-18: 3 and 4 container stacks at typical main frames

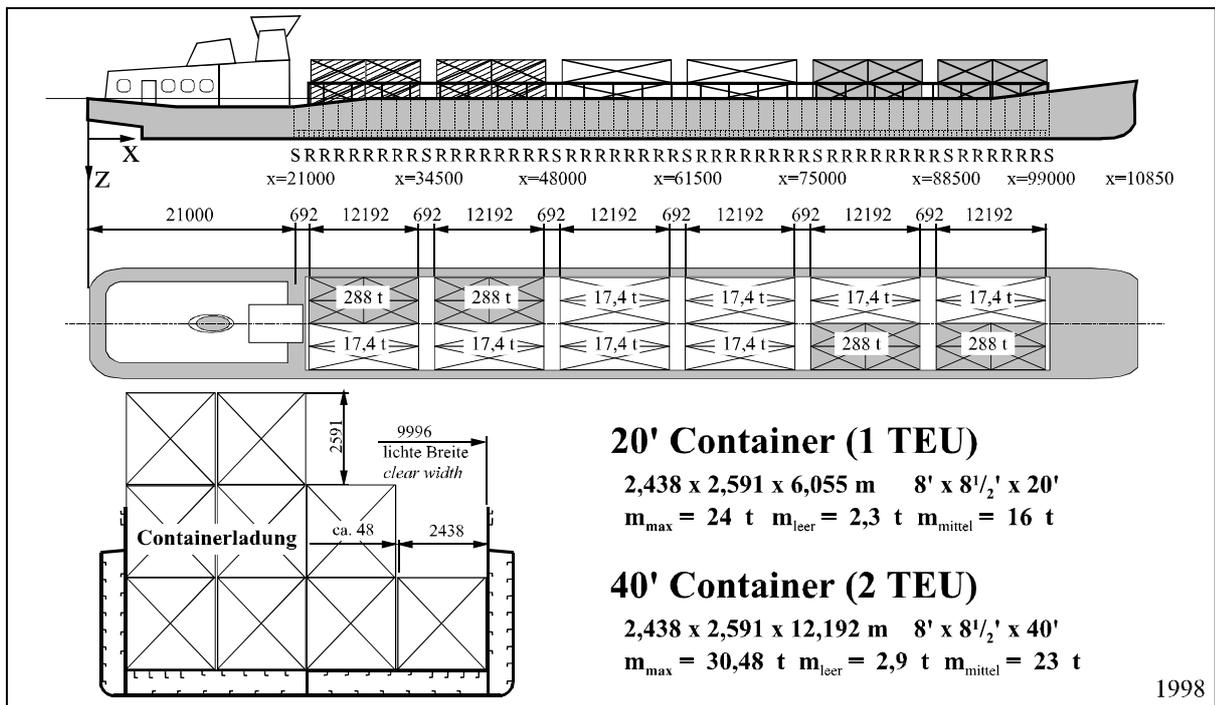


Abb. 3-19: Lage der Container im Laderaum

Fig. 3-19: Position of the container in the cargo hold

Da eine Verbreiterung der Schiffe wegen der maximalen Schleusenbreite nicht möglich ist, muß die seitliche Doppelhülle schmaler gebaut werden. Diese als Wallgang bezeichnete Komponente bestimmt maßgeblich die Querfestigkeit des Schiffes. Erschwerend kommt hinzu, daß auch die Schiffslänge von 110 m ausgenutzt wird. Aussteifungen innerhalb des Laderaums (sog. Rohrduchten, Schotte) sind bei den Reedern unerwünscht und nach

Möglichkeit zu vermeiden, da diese die Be- und Entladevorgänge behindern und nicht mehr jede Fracht gefahren werden kann (z. B. lange Halbzeuge, Eisenbahnschienen).

Wie leicht nachvollziehbar ist, verformt sich die gesamte Schiffsstruktur durch die Beladung nicht unerheblich (Abb. 3-18). Im beladenen Zustand neigt sich der Wallgang mit dem Dennebaum (oder auch Lukensüll) nach innen. Eine zu geringe Querfestigkeit des Schiffes kann zur Folge haben, daß die Verformungen im plastischen Bereich liegen oder auch die Lukendeckel nicht mehr richtig schließen. Bei Containerschiffen ergibt sich außerdem das Problem, daß der Dennebaum die Container einklemmt und diese dann nicht mehr entladen werden können.

Aus den Erfahrungen seegehender Containerschiffe ist bekannt, daß eine alleinige Betrachtung der Längs- und Querfestigkeit nicht ausreichend ist. So ist auch der Torsion des Schiffskörpers besondere Beachtung zu schenken. Diese kann z. B. durch eine ungünstige Verteilung der Container hervorgerufen werden. Um diesen Fall zu berechnen, wird angenommen, daß sich auf der Backbordseite der achteren Containerstapel 24 der 20' Container befinden, welche alle das zulässige Gesamtgewicht (24 t) erreichen. Diese 576 t werden ebenfalls für die vorderen Containerstapel auf der Steuerbordseite angenommen (Abb. 3-19). Der Rest des Laderaums ist mit leeren 40' Container gefüllt. Die dadurch erreichte Gesamtbelastung von 1291,2 t erreicht ca. 43% der max. Tragfähigkeit (3008 t) des Schiffes. Streng genommen kann die Berechnung mit asymmetrischen Randbedingungen durchgeführt werden, um aber eine Untersuchung mit willkürlicher Containerverteilung zu gewährleisten, ist die Programmierung auf ein Vollmodell ausgelegt.

Da es sich bei den ersten 6 Ladefällen um reine Längsbiegung handelt und somit neben der geometrischen Symmetrie auch eine Symmetrie der Randbedingungen vorliegt, genügt es, ein Halbmodell des Schiffes mit den entsprechenden Randbedingungen zu verwenden. Im Ladefall 7 gelten diese Voraussetzungen nicht mehr. Somit ist ein FE-Vollmodell zu verwenden.

### 3.5 Werkstoffdaten

Als Werkstoff wird in der Binnenschifffahrt Stahl verwendet. In den Berechnungen werden für den E-Modul  $2,1 \cdot 10^{11} \text{ N/mm}^2$  und die Querkontraktionszahl  $\nu = 0,3$  eingesetzt. Für die untersuchten Konstruktionen werden die Stähle St37-2, St52-3, StE460 und StE690 verwendet, da diese in der Praxis eine breite Verwendung haben. So ist z.B. auch die DIN18800 bzw. die DAST-Ri 012 auf diese ausgelegt.

Werkstoff	Streckgrenze $R_{eh} [\text{N/mm}^2]$	Mindestzugfestigkeit $R_m [\text{N/mm}^2]$	Quelle
<b>StE690</b>	640 <u>740</u>	790..940 <u>824</u>	DAST-Ri 011 /Stahl2/
<b>StE460</b>	430..460 <u>500</u>	560..730 <u>634</u>	DAST-Ri 011 /Stahl2/
<b>St52-3</b>	325..360 <u>388</u>	510 <u>530</u>	DIN 18800 /Stahl2/
<b>St37-2</b>	215..240 <u>291</u>	360..510 <u>450</u>	DIN 18800 /Stahl2/

**Tabelle 3-1: Festigkeitskennwerte der verwendeten Stähle**

**Table 3-1: Mechanical property of the steels used**

Gemäß der Definition aus der Literatur ist die Zugfestigkeit  $R_m$  die maximale mögliche Spannung, der die Probe widersteht. Die Spannung, ab der die Probe plastisch verformt wird ist die (obere) Streckgrenze  $R_{eh}$ .

Der jeweils angenommene Spannungs-Dehnungs-Verlauf der genannten Werkstoffe ist in der Abb. 3-20 wiedergegeben. Falls keine besondere Kennzeichnung erfolgt, wird für die versteifte Platte St52-3 und für den Leichter und das Containerbinnenschiff St37-2 verwendet. Der amerikanische Werkstoff ASTM A36 ( $R_{eh} = 250 \text{ N/mm}^2$ ,  $R_m = 430 \text{ N/mm}^2$ ) wird in Kapitel 6 für die Analyse eines Kastenträgers genutzt.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, daß für  $R_m$  und  $R_{eh}$  der vier Stähle in unterschiedlichen Literaturquellen häufig stark abweichende Angaben gemacht werden. In der Tabelle 3-1 sind die Festigkeitskennwerte der vier verwendeten Stähle wiedergegeben, wobei die unterschiedlichen Angaben verschiedener Quellen miteinander verglichen werden. Da lediglich im /Stahl2/ Angaben über den  $\sigma$ - $\epsilon$  Verlauf enthalten sind, wurden diese Angaben für die eigenen Berechnungen genutzt. Diese Werte sind in der Tabelle unterstrichen.

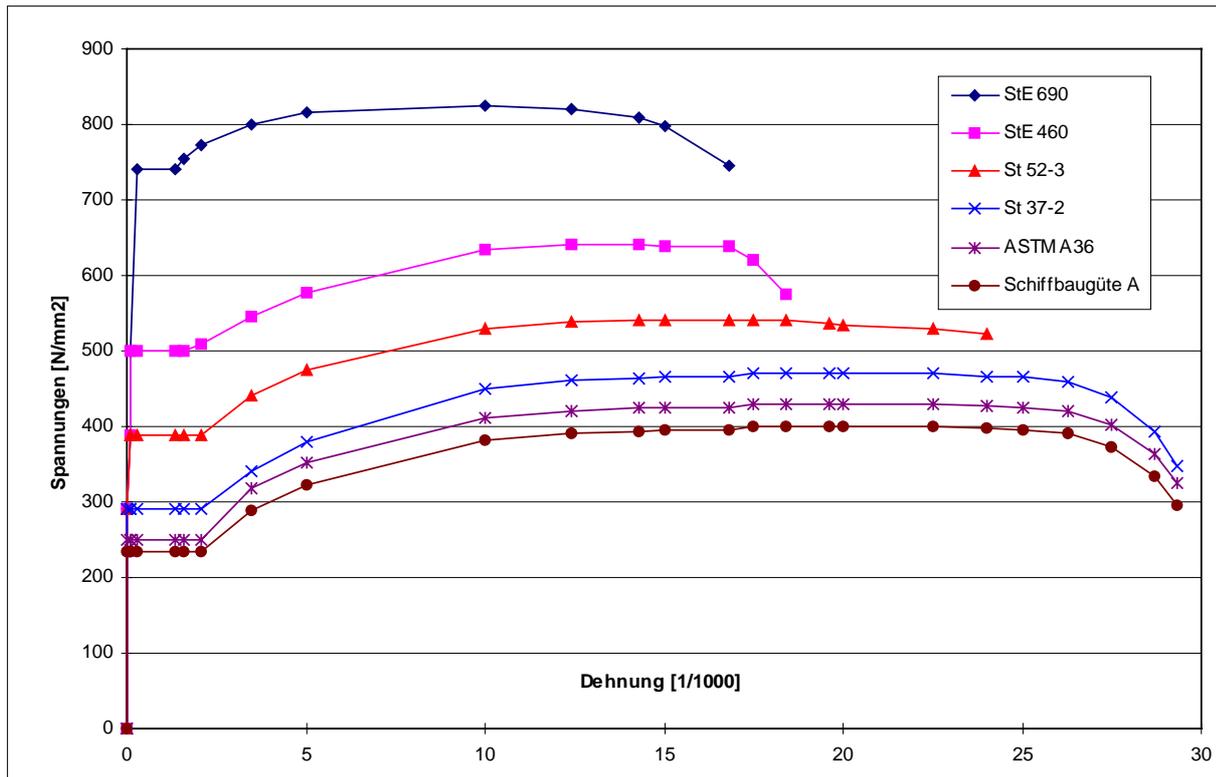


Abb. 3-20: Spannungs-Dehnungskurve der verwendeten Stähle

Fig. 3-20: Stress-strain diagram of the steels used

### 3.6 Erwünschte Ergebnisse

Bevor die Berechnungen durchgeführt werden, ist u.a. festzulegen, welche Ergebnisse ermittelt werden sollen. Es ist unbedingt zu beachten, daß nach erfolgter Berechnung keine Daten ausgewertet werden können, die nicht vorher festgelegt, berechnet und abgespeichert worden sind.

#### 3.6.1 Eigenwerte

Die Eigenwertuntersuchungen werden durchgeführt, um Fehler in der Vernetzung zu entdecken. Aus diesem Grund sollte diese Analyse am Anfang einer Berechnungsreihe stehen. Eine hohe Anzahl von Iterationen bei der Bestimmung des ersten Eigenwertes läßt darauf schließen, daß Fehler im Netz vorhanden sind. Im \*.out File wird dann sehr häufig eine Warnmeldung für einen bestimmten Knoten ausgegeben. Mit hoher Wahrscheinlichkeit ist dieser Knoten nicht sauber mit den umliegenden Knoten verknüpft. Dieser Tatbestand läßt sich auch im Post-processing mit MENTAT feststellen, wo für diesen Knoten übermäßig große Verformungen dargestellt werden.

#### 3.6.2 Verformungen

Im Zusammenhang mit der FEM ist es allgemein üblich, die Verformungen der Struktur am deformierten FE-Netz zu zeigen. Häufig sind dies Abbildungen, in der die verformte Struktur sowie die Umrisse der unverformten Struktur abgebildet werden (z.B. Abb. 6-5). In diesen Farbplots werden der Tiefgang und die globalen Verformungen des Schiffskörpers maßstabsgerecht dargestellt. Für die Schiffstechnik ist diese Darstellungsweise relativ ungeeignet, da die eigentlichen Verformungen hier nur schwer auszumachen sind. Selbst Verformungen von 0,5

m sind bei einem 100 m langen Schiff in einer globalen Darstellung ohne einen übermäßigen Maßstab kaum zu erkennen.

Zur Beurteilung der Längs- und Quersteifigkeit eines Schiffes ist es notwendig, charakteristische Größen zu bewerten. Aus diesem Grund werden die Deformationen am Dennebaum und am Außenboden in speziell entwickelten Diagramme betrachtet. In diesen stellt die erste Kurve den Zustand für das leere Schiff (Eigengewicht, Vorräte und ggf. Ballastwasser) dar. Alle weiteren Kurven stehen für eine zunehmende Beladung. Ein weiterer Vorteil gegenüber einer reinen Auswertung mit den üblichen Möglichkeiten des Postprocessing besteht darin, daß sich die Ergebnisse aus verschiedenen Berechnungen auf einfache Weise miteinander vergleichen lassen. Die Wirksamkeit von konstruktiven Veränderungen läßt sich somit sehr schnell beurteilen.

In den Diagrammen des Aussenbodens werden der Tiefgang, der Trimm und die globalen Verformungen des Schiffskörpers maßstabsgerecht wiedergegeben (z.B. Abb. 7-7). Diese lassen sich dann mit den Angaben der Werft vergleichen. Größere Abweichungen lassen auf Fehler am Modell schließen (z.B. Massenverteilung, Randbedingungen, etc.).

Als Kriterium zur Bewertung der Quersteifigkeit werden die Verformungen des Dennebaums genutzt (z.B. Abb. 7-6). Diese werden in y-Richtung über der Schiffslänge abgetragen. Ein positiver  $v_D$  Wert bedeutet eine Verschiebung der Knoten nach außen.

### 3.6.3 Spannungen

Die Auswertung der Spannungsergebnisse ist erheblich komplizierter als die der Verformungen. Insbesondere ist die Problematik der generalisierten Knotenkräfte zu beachten. Aus diesem Grund ist bei der Auswertung der Spannungsergebnisse mittels eines grafischen Postprocessors (in diesem Fall **MENTAT**) eine gewisse Vorsicht angebracht /V39/. Um den Unsicherheiten aus der Mittelwertbildung in den Knoten aus dem Weg zu gehen, ist es am sinnvollsten die ermittelten Spannungskomponenten an den Integrationspunkten zu nutzen. Aus den sechs Spannungskomponenten des verwendeten Schalenelementes wird die entsprechende Mises-Spannung berechnet. Für jede Baugruppe wird dann der jeweilige Maximalwert in eine gesonderte Datei geschrieben. Auf diese Weise läßt sich schnell und einfach ermitteln, in welcher Baugruppe die Gefahr besteht, daß die zulässigen Spannungen überschritten werden. Abschnitt 3.8.2.2 liefert den Schlüssel des Suffix zur Identifizierung der Daten.

Da die Übersichtlichkeit der angesprochenen Farbplots unbestreitbare Vorteile besitzt, werden diese auch in dieser Arbeit angewendet. Genutzt werden diese für den globalen Spannungsverlauf am kompletten Schiff oder auch für Ausschnitte des mittleren Laderaumsegmentes. Ergänzt werden diese durch Detailbilder wie z.B. des Dennebaum und der Lukenecken.

## 3.7 Imperfektionen

Bei der Dimensionierung eines Bauteils werden i.a. zunächst die zulässigen Spannungen und Verformungen überprüft. Bei druck-<sup>und/oder</sup> schubbeanspruchten Bauteilen ist aber auch noch eine Überprüfung der Strukturstabilität notwendig. Aus diesem Grund wird in dem folgenden Kapitel 4 kurz auf die Besonderheiten der **Stabilitätstheorie** eingegangen. Zuvor ist aber der Begriff der **Imperfektionen** zu erörtern, da diese einen entscheidenden Einfluß auf das Strukturverhalten haben.

Für Konstruktionen mit einer hohen Lebenserwartung und einem ständigem, mitunter rauen Einsatz können übermäßige Schäden drastische Folgen haben. Dies gilt z.B. für Fahrzeuge aus dem Schiff- und Flugzeugbau. Bei Flugzeugen und Seeschiffen werden aus naheliegenden Gründen durch eine regelmäßige Wartung und rechtzeitige Reparaturen Totalverluste (größtenteils) verhindert. Aus finanziellen Gründen ist dies aber auf die Binnenschifffahrt nicht ohne weiteres übertragbar. In diesem Abschnitt soll nun untersucht werden, inwieweit diese "einkalkulierten" Schäden mitverantwortlich sind für die Havarien und Totalverluste in der Binnenschifffahrt der letzten Jahre.

Um die Auswirkungen lokaler Beeinträchtigungen auf die globale Struktur in Zukunft zu senken, ist zunächst eine Registrierung und rechnerische Berücksichtigung der typischen Schäden notwendig. Anschließend sind

Konstruktionsvorschläge zu erarbeiten, in denen eine leichte, günstig zu fertigende Struktur mit einer größtmöglichen Sicherheit gegen globales Versagen verwirklicht wird. In einem ersten Schritt ist zu beurteilen, welche Imperfektionen die Gesamtstruktur wesentlich beeinflussen und welche vernachlässigt werden können. Hierzu ist zunächst eine Gliederung der Imperfektionen vorzunehmen.

Unter Imperfektionen werden Abweichungen der Struktur von idealen Verhältnissen verstanden, welche zu erheblichen Biegewirkungen und damit auch zu nichtlinearem Verhalten im unterkritischen Bereich führen können. Imperfektionen können ihre Ursachen in Geometrieabweichungen oder auch Materialeigenschaften haben. Diese haben in der Regel einen nachteiligen Einfluß auf das Verhalten des Bauteiles. Die Betrachtung der Imperfektionen kann sich auf den Neubauzustand einer Struktur (in diesem Fall ein Schiff) oder auch auf den Zustand nach einer gewissen Betriebszeit beziehen.

In der Literatur werden die Imperfektionen nach verschiedenen Gesichtspunkten unterteilt. So wird z.B. in der Dissertation von *Kröplin* /Kröplin77/ nach geometrischen Imperfektionen und Spannungs-Imperfektionen unterschieden. Andere Autoren bevorzugen die Bezeichnungen äußere Imperfektionen und innere Imperfektionen. Bei den inneren Imperfektionen handelt es sich zum Beispiel um Eigenspannungen durch Schweißen oder Wärmebehandlungen sowie um Alterungserscheinungen.

Für den Schiffbau ist aber eine Unterteilung nach den Entstehungsursachen am sinnvollsten, so daß im folgenden primär die Bezeichnungen fertigungsbedingte und betriebsbedingte Imperfektionen verwendet werden.

**Fertigungsbedingte äußere Imperfektionen** sind z.B. Abweichungen in der Geometrie, die durch das Walzen der Bleche oder Schweißvorgänge verursacht werden. **Fertigungsbedingte innere Imperfektionen** hingegen liegen in der Struktur. Dies sind Eigenspannungen, die durch Schweißen oder sonstige Wärmebehandlung entstehen. Diese sind auch unter Laborbedingungen nicht gänzlich zu vermeiden. Für den technischen Alltag bedeutet dies aber, daß selbst jeder Neubau bereits eine imperfekte Struktur besitzt. Sie stellen somit einen wichtigen Einfluß auf das Strukturverhalten dar. Zahlreiche Forschungsarbeiten (z.B. zum Thema Schweiß Eigenspannungen /Kmicik92/) beschäftigten sich bereits hiermit.

Die **betriebsbedingten Imperfektionen** wiederum werden erst im laufenden Betrieb verursacht. Diese bewirken eine "schleichende" Veränderung des Strukturverhaltens. Hierunter sind Verschleiß, Abrostung und Schäden (Beulen) in der Struktur zu verstehen. Erste FE-Analysen zu diesem Punkt wurden in /Payer77/ durchgeführt. Welche verheerenden Auswirkungen diese Form der Imperfektionen auf die Kollapsicherheit einer Konstruktion haben kann, wird z. B. in /Stein1/ am Beispiel von Kreiszyinderschalen ausführlich diskutiert.

### 3.7.1 Fertigungsbedingte Imperfektionen

In diesem Abschnitt werden die für den Schiffbau wichtigen technologischen Imperfektionen angesprochen. Hier sind die Fertigungstoleranzen, die Verformungen aus Wärmebehandlungen und die Schweiß eigenspannungen zu nennen.

#### 3.7.1.1 Vorverformungen der Platten und Schalen

In der Binnenschifffahrt sind mehrere geometrische Grundverformungen zu beobachten. Schon im Neubauzustand sind Verformungen aus dem Walzen der Bleche und dem Schweißen der Steifen vorhanden. Da sich mit keinem Herstellungsverfahren eine ideal ebene Platte erzeugen läßt, sind diesbezüglich in DIN Vorschriften Obergrenzen (z.B. DIN 1079, Abs.4.7, Tab.1) festgelegt worden.

Einige stark vereinfachende Annahmen werden in /Kröplin77/ vorgenommen. Dort werden in den Berechnungen die Vorverformungen affin zur ersten Eigenform vorausgesetzt. Die maximale Auslenkung entspricht dabei  $w_0 = 0,002 b_0$  ( $b_0$ = Beullänge).

Etwas ausführlicher wird dieses Thema in /Kmicik92/ behandelt. Die dort vorgestellten Ergebnisse basieren auf einer statistischen Untersuchung an polnischen Werften und behandeln die Verformungen nach Schweißvorgängen. Es wurden Diagramme entwickelt, welche in Abhängigkeit vom Seitenverhältnis  $a/b$  und dem Schlankheitsgrad  $b/t$  Werte für die anzunehmende Imperfektion  $w_0^{max}/t$  angeben. Die Werte liegen zwischen 0,05 und 0,5.

Festzustellen ist, daß die fertigungsbedingten Imperfektionen im Vergleich zu den betriebsbedingten Imperfektionen (mehrfaches der Blechdicke) als klein anzusehen sind. Auch ist deren Gestalt nur sehr schwer zu ermitteln und wird von vielen zufälligen Faktoren beeinflusst. Eine genaue Nachbildung dieser Verformungen ist somit sehr aufwendig und auch nicht notwendig. Diesbezüglich werden einige Vereinfachungen getroffen, indem die Annahmen von Kröplin übernommen werden.

### 3.7.1.2 Schweißspannungen

Wenn beim Erwärmen bzw. Abkühlen eines Werkstückes in einzelnen Bereichen größere Temperaturunterschiede auftreten, entstehen Wärmespannungen. Überschreiten diese die Fließgrenze des Materials, so bleiben nach Abkühlung auf Raumtemperatur plastische Verformungen zurück. Da sich die Werkstücke i.a. nicht frei verformen können, werden Eigenspannungen impliziert. Dieser Vorgang tritt z.B. beim Schweißen auf, wo in dem relativ kleinen Bereich der Schweißnaht die Struktur stark erwärmt wird. Bei Erwärmung und Abkühlung wird die Verformung durch das umliegende, kältere Material behindert. Nach Abkühlung entstehen so im engeren Nahtbereich Zugspannungen und in einiger Entfernung von der Naht Druckspannungen. Zur Bestimmung dieser Schweißeigenspannungen wurden bereits zahlreiche Untersuchungen angefertigt und ausgewertet /Kröplin77/, /Kmiciek92/, /Egge77/, /Miebach97/.

Streng genommen enthalten die Schweißeigenspannungen Membran- und Biegespannungsanteile. Die Biegespannungen wirken sich aber direkt in der "Schweißverformung" aus. Aus diesem Grund brauchen sie in numerischen Berechnungen (bei den Eigenspannungen) nicht berücksichtigt zu werden. Die Membranspannungen hingegen können unter Umständen einen recht hohen Einfluß auf das Tragverhalten einer Konstruktion haben. Sie werden in einen Quer- und Längsspannungsanteil unterteilt, wobei der Querspannungsanteil i.a. vernachlässigt wird. Der Verlauf der Längsspannungen hingegen ist aus Messungen recht gut bekannt /Kmiciek92/, /Egge77/. Die Abb. 3-21 gibt Auskunft über den experimentell ermittelten und den für die numerischen Rechnungen angenommenen Längsspannungsverlauf. Der mit I gekennzeichnete Verlauf gibt qualitativ das Ergebnis von Messungen wieder, wie sie in /Egge77/ dargelegt werden. Der quantitative Verlauf hängt dabei von den Plattendicken, der Feldbreite, den Werkstoffeigenschaften u.a. Parametern ab. In numerischen Berechnungen /Kröplin77/, /Kmiciek92/ wird der mit II bezifferte Verlauf genutzt.

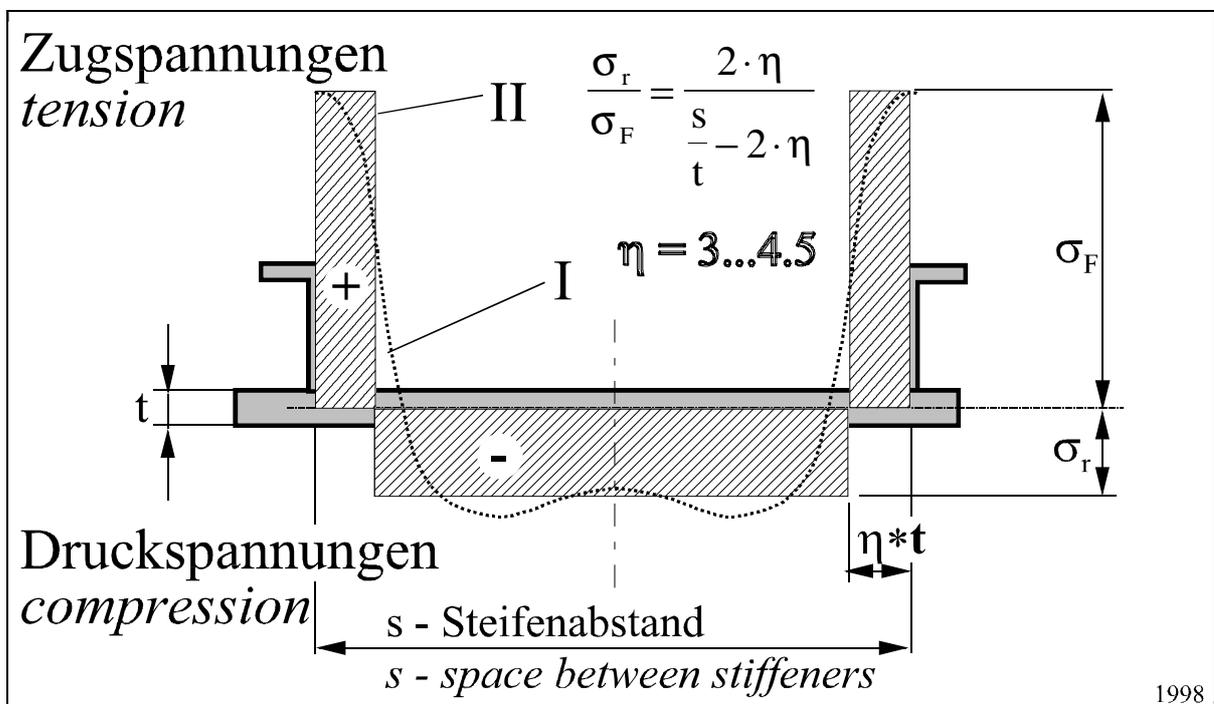


Abb. 3-21: Verwendete Annahmen zur Eigenspannung

Fig. 3-21: Applied initial stress due to welding

Die Längsspannungen sind durch den erwähnten schmalen Zugspannungsbereich entlang der Schweißnähte und dem dazwischen liegenden Druckspannungsbereich (Abb. 3-22) gekennzeichnet. Die Zugspannungen erreichen in der Nähe der Schweißnaht die Fließgrenze ( $\sigma_F$ ) des Materials. Andere Literaturstellen verwenden Eigenspannungsannahmen, die sich auf  $\sigma_B = 0,1 \sigma_F$  im Plattenmittelteil beschränken.

Es wird davon ausgegangen, daß die Platte unverspannt verschweißt wird. Dies bedeutet, daß sich ein Gleichgewicht zwischen den Zug- und Druckspannungen einstellen muß. Hieraus läßt sich die Gleichung 3-6 herleiten /Egge77/. Dabei gibt  $\eta t$  die Breite der Zugzone an. Für den "eingespielten Zustand" wird im Schiffbau ein  $\eta$ -Wert von 3 - 4,5 angegeben /Egge77/. Für die eigenen numerischen Rechnungen wird der ungünstigste Fall mit  $\eta = 4,5$  gewählt.

$$\frac{\sigma_r}{\sigma_F} = \frac{2 \cdot \eta}{\frac{s}{t} - 2 \cdot \eta}$$

Gleichung 3-6

- $\sigma_F$  Fließspannung des Materials
- $\sigma_r$  Druckspannung
- s Steifenabstand
- t Plattendicke
- $\eta t$  Breite der Zugzone

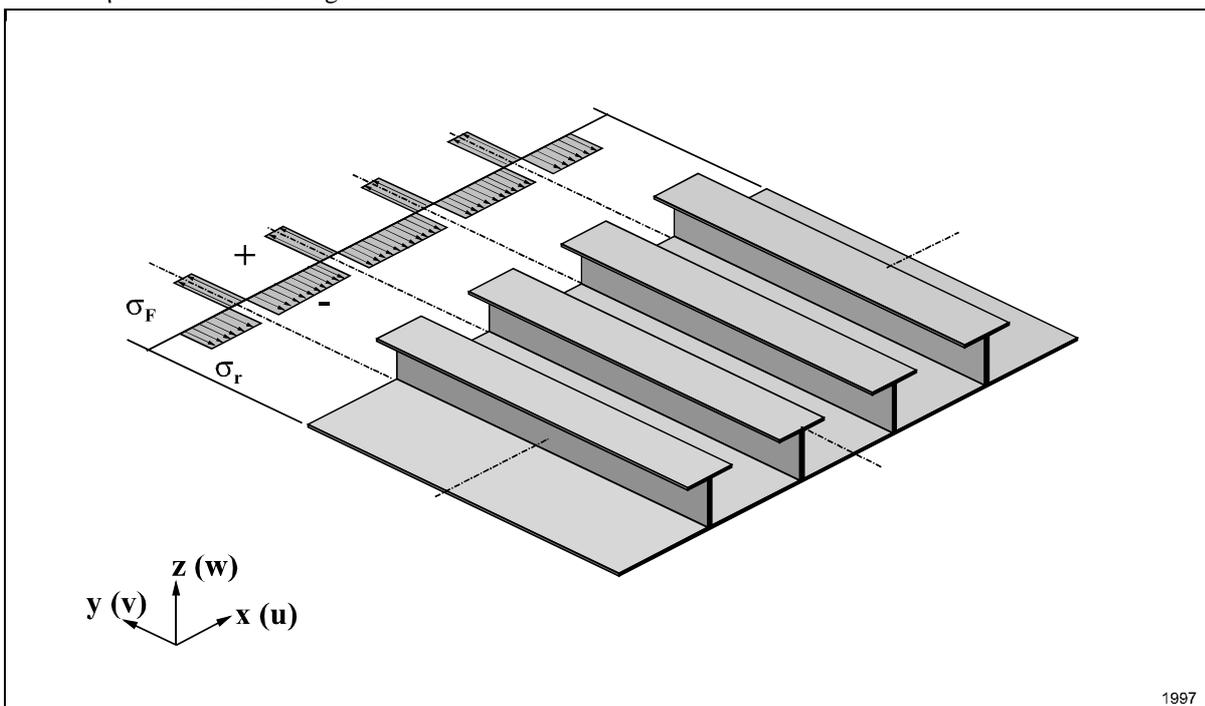


Abb. 3-22: Eigenspannungen der Platte

Fig. 3-22: Initial stress in the plate

Die Realisierung der Schweißeigenspannungen erfolgt im Programmsystem **MARC / MENTAT** mit Hilfe der Subroutine **UINSTR / V35/**. Ein Beispiel zeigt die Abb. 3-23.

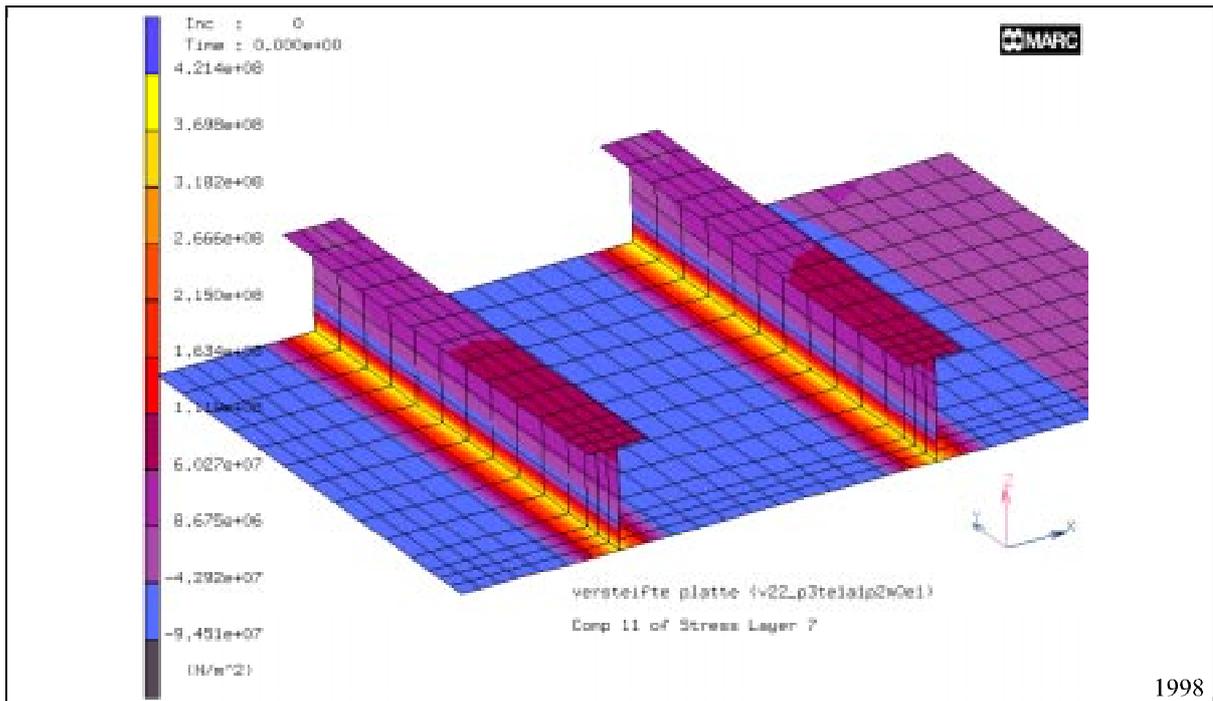


Abb. 3-23: Eigenspannungen im FE-Modell

Fig. 3-23: Initial stress in the FE-model

### 3.7.2 Betriebsbedingte Imperfektionen

Im Schiffbau spielen für Strukturstabilität und Festigkeit die betriebsbedingten Imperfektionen eine besondere Rolle. Die angesetzte hohe Lebenserwartung auf der einen und der rauhe tägliche Umgang auf der anderen Seite machen es erforderlich, daß diesem Abschnitt eine besondere Beachtung geschenkt wird.

Ein sehr bekanntes Beispiel für betriebsbedingte Schäden sind im Schiffbau die Wellen in Innen- und Außenboden sowie in der Kimm. Diese sind nicht selten mit dem bloßen Auge zu erkennen, und werden mit *hungry horse look* bezeichnet /Lehmann76/. Deren Ansätze entstehen durch die Schrumpfung der Kehlnähte in den Bodenwrangen. Durch Wasser- oder Ladungsdruck, axiale Überbelastung oder auch durch Stöße und Kollisionen werden daraus die sogenannten *Arbeitsfalten*. Diese stellen bei Schiffen in Querspantenbauweise ein besonderes Problem dar, wobei der Wasserdruck versucht, jedes Feld (mit Einspannung an den Bodenwrangen) nach innen durchzubiegen. In /Lehmann76/ wird dieses Problem bereits untersucht und einmal als Spannungs- und einmal als Verzweigungsproblem betrachtet.

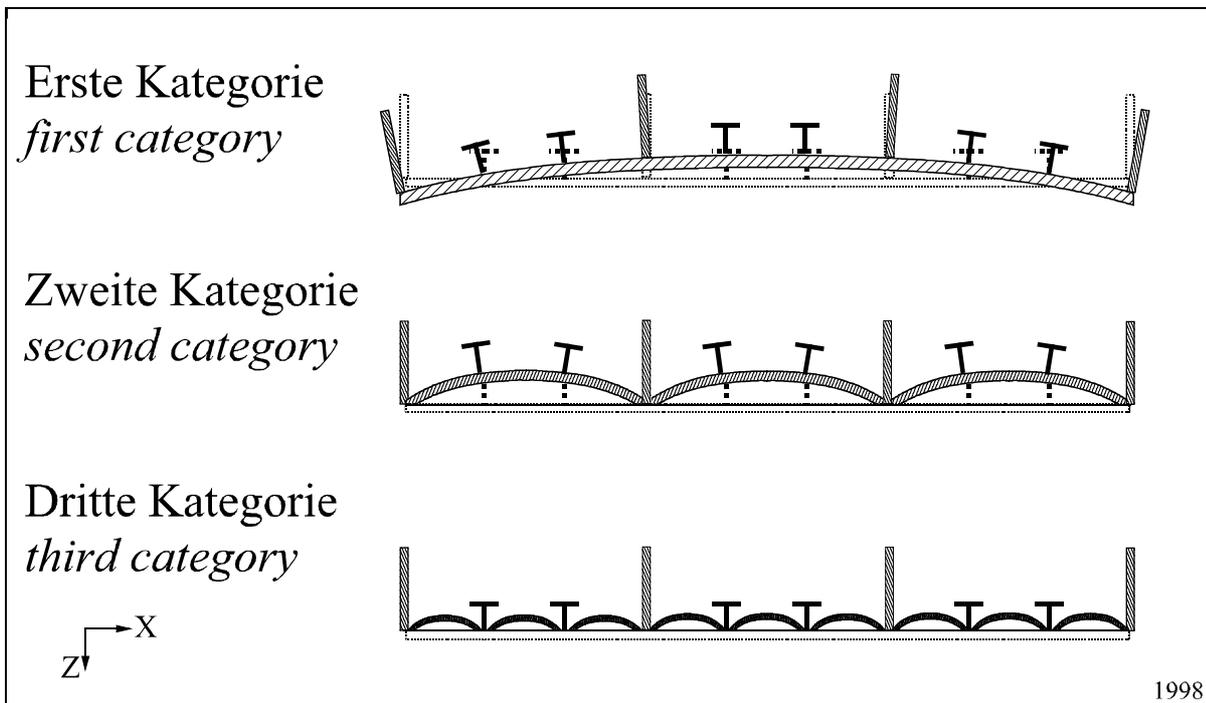
#### 3.7.2.1 Örtliche Vorverformungen

Die strukturellen Verformungen in ausgesteiften Plattenfeldern werden im Seeschiffbau /Taggart / in drei Kategorien eingeteilt. Diese Eingliederung läßt sich ebenso auf die Binnenschifffahrt übertragen.

**Erste Kategorie:** Hierunter werden die globalen Verformungen des kompletten Schiffskörpers verstanden, die z.B. durch eine entsprechend verteilte Last, den Schiffskörper wie einen Balken auf Biegung beanspruchen. Wie in der Abb. 3-24 dargestellt, ergeben sich die Verformungen ausschließlich in der xz-Ebene und nicht in y-Richtung. Sie verlaufen somit parallel zur neutralen Faser.

**Zweite Kategorie:** Diese enthält die Spannungen und Verformungen eines ausgesteiften Plattenfeldes, wie es sich z.B. zwischen zwei Schotten ergibt. Die Belastungen sind normal zur Plattenoberfläche und die Randbedingungen sind die Anschlüsse eines benachbarten Panels, eines Schottes oder eines Längsträgers. Die Verformungen der Steifen passen sich den Verformungen der Platte an. Allerdings verlaufen diese räumlich und nicht mehr in einer Ebene, d.h. es treten auch Verschiebungen in y-Richtung auf.

**Dritte Kategorie:** Hier werden die Verformungen und Spannungen einer einzelnen Platte beschrieben, wie sie sich zwischen den Steifen eines Panels ergeben. Auch hier steht die Belastung senkrecht auf der Oberfläche, die Begrenzungen werden aber durch die Steifen gebildet. Die Verformungen sind räumlich und verlaufen außerhalb der Ebenen, die durch die Steifen gebildet werden.



**Abb. 3-24: Strukturverformungen am Beispiel von Plattenfeldern**

**Fig. 3-24: Structure deformation at panels**

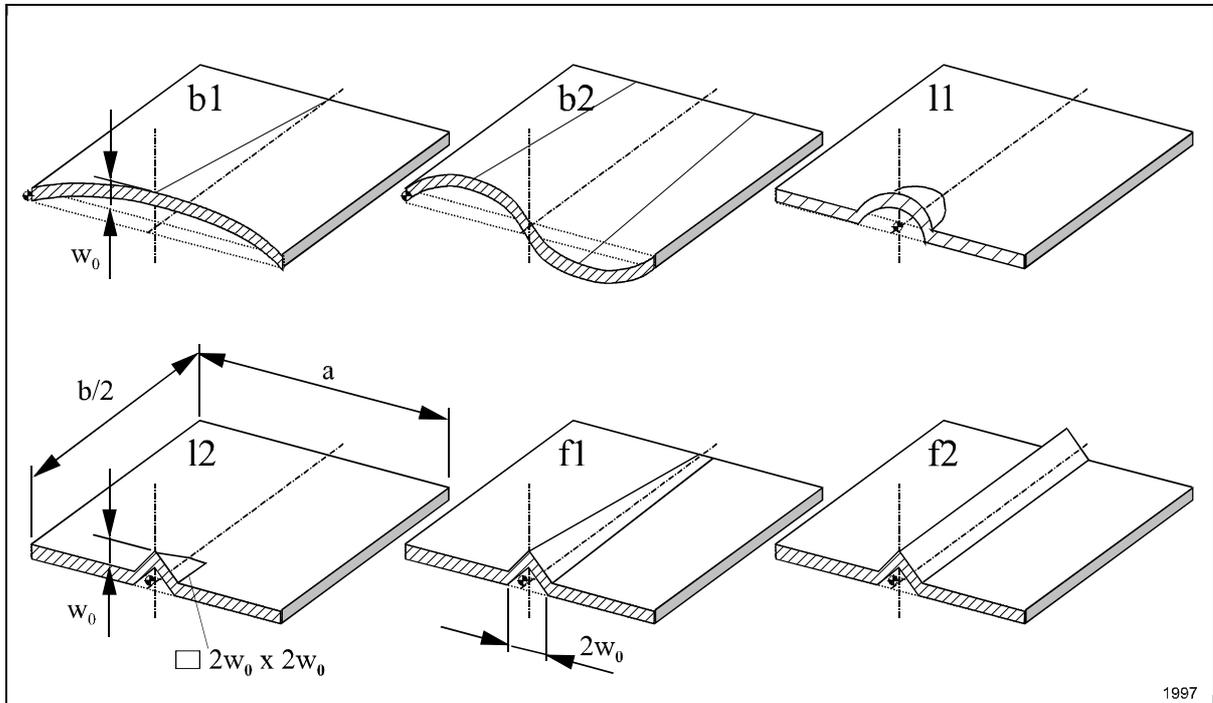
Die Spannungen in den Platten der ersten und zweiten Kategorie sind in erster Linie Membranspannungen und (näherungsweise) konstant über der Plattendicke. Die Spannungen in der Platte aus den Verformungen der dritten Kategorie resultieren aus einer lokalen Biegebeanspruchung. Sie enthalten aber auch nicht zu vernachlässigende Membranspannungen, wenn die Verformungen im Vergleich zur Plattendicke nicht unerheblich sind.

Die vorangegangenen Erläuterungen verdeutlichen, daß sich die Verformungen und Spannungen an einem beliebigen Punkt in einem Schiff (z.B. auf dem Innenboden) aus verschiedenen Komponenten zusammensetzen. Diese haben alle unterschiedliche Ursachen. In vielen Fällen ist keine oder nur eine kleine Wechselwirkung zwischen den drei Kategorien zu befürchten und jede kann einzeln betrachtet und für sich (i.a. linear) berechnet werden. Die Berechnungen basieren dann auf der Balken- und Plattentheorie und die Ergebnisse werden durch einfache Superposition angenähert. Spätestens bei großen Verformungen in der dritten Kategorie ist diese Vereinfachung nicht mehr zulässig. Diese haben dann einen entscheidenden Einfluß auf die Verformungen der ersten beiden und die Superposition kann dann nicht angewendet werden.

Die Verformungen der zweiten und dritten Kategorie werden i.a. durch die erwähnten betriebsbedingten Imperfektionen bestimmt. Die Untersuchung der Wechselwirkungen (Interaktionen) zwischen diesen und den Verformungen der ersten Kategorie sind Ziel der durchgeführten FE-Berechnungen.

Für die Gestalt der geometrischen Imperfektionen der Kategorie 3 sind verschiedene Formen denkbar. Typische **betriebsbedingte Schäden** an versteiften Platten im Binnenschiffbau sind sinusförmige Halbwellen zwischen den Steifen bzw. Bodenwrangen. Eine weitere Imperfektionsform sind Falten im Außenboden, im Innenboden oder der Trogwand und werden z.B. durch Anlegen oder leichte Kollisionen hervorgerufen. Die Werte für diese zum Teil recht scharfkantigen Falten betragen ein mehrfaches der Blechdicke. Treten diese Wellen oder Falten an den Außenplatten eines Doppelbodens auf, so werden sie als "Arbeitsfalten" betitelt. Diese haben ihre Ursache in örtlichen Überbelastungen. Desweiteren sind lokale Schäden zu beachten, die durch starke Stöße von Greifern, einer Grundberührung oder durch die Ladung verursacht werden. Diese können wie eine Kugelkalotte oder auch wie eine Pyramide geformt sein. Die Untersuchung dieser Imperfektionsformen ist Gegenstand von FEM Analysen in /V22/.

Die erwähnten geometrischen Imperfektionen der Kategorie 3 sind in der Abb. 3-25 wiedergegeben sind. Die Formen b1 und b2 sind wie Beulen ausgebildet und haben ihre Ursache in örtlichen Überbelastungen oder Flächendrücken. Die Formen l1 und l2 sind lokale Schäden, die durch starke Stöße von Greifern oder Ladung verursacht werden. Die Geometrie von lokalen Schäden wird bei l1 über eine Kugelkappe, bei l2 über eine Pyramide dargestellt. Imperfektionsformen wie f1 und f2 sind Falten im Blech und werden z.B. durch Anlegen oder leichte Kollisionen hervorgerufen. Neben den hier vorgestellten Imperfektionsformen werden in den Berechnungen noch die Formen e1 und e2 untersucht, die sich affin zu den beiden ersten Eigenformen ausbilden.



**Abb. 3-25: Gestalt der Vorverformungen**

**Fig. 3-25: Shape of the initial deformations**

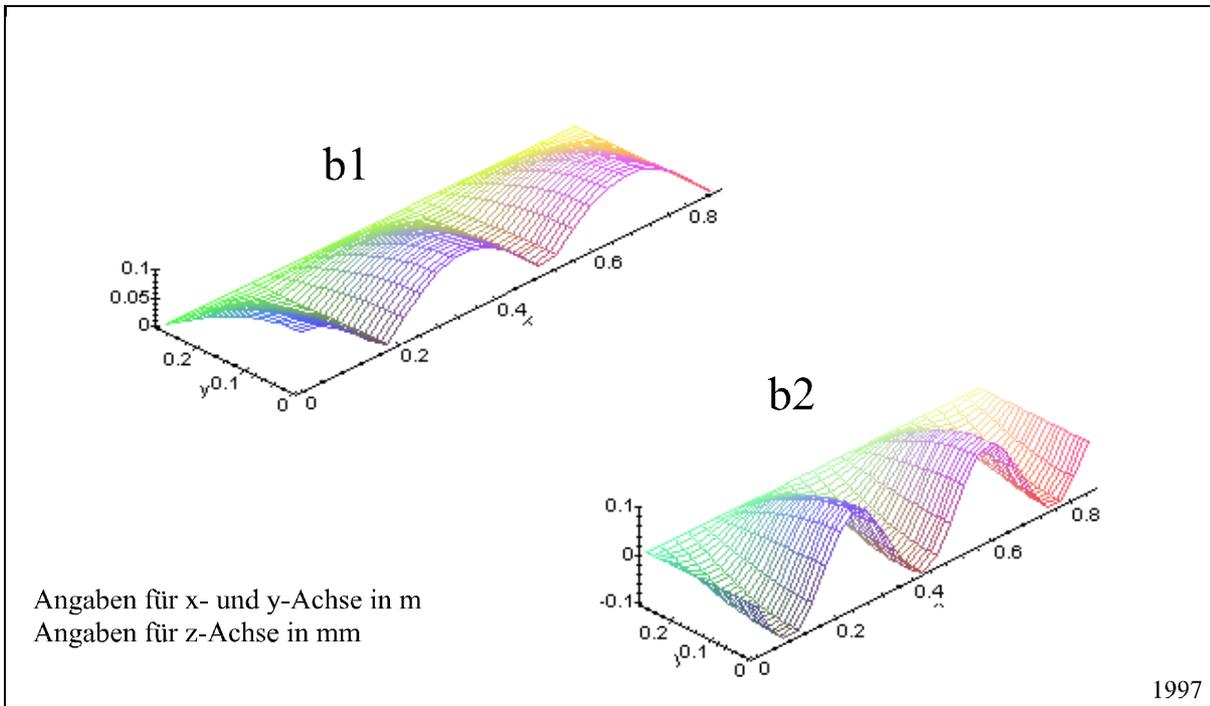
Um die Imperfektionen auf das Netz des FE-Modells zu übertragen, muß hierfür eine mathematische Formulierung gefunden werden. Diese kann dann im Programmsystem **MARC / MENTAT** in der Subroutine **UFWORD** programmiert werden. Die Formen l2, f1 und f2 können durch Kombinationen von Geradengleichungen ermittelt werden, l1 wird durch die Kugelgleichung bestimmt. Die mathematische Formulierung von b1 und b2 basiert auf einem Sinusansatz.

$$w = w_0 \cdot \sin \frac{m \cdot \pi \cdot (x - x_0)}{a} \cdot \sin \frac{n \cdot \pi \cdot (y - y_0)}{b}$$

**Gleichung 3-7**

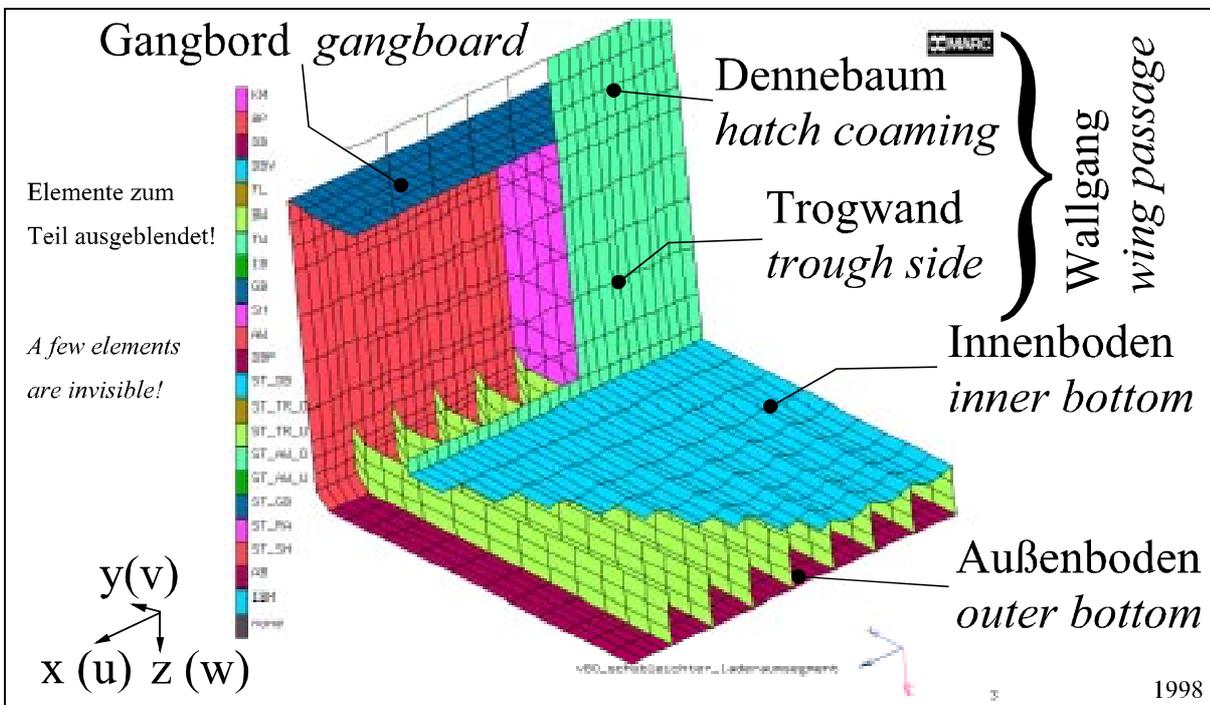
$w_0$	Maximalwert der Vorverformung (Amplitude)
$m$	Halbwellen in x-Richtung
$n$	Halbwellen in y-Richtung
$a$	Wellenlänge in x-Richtung (Abstand der Steifen)
$b$	Wellenlänge in y-Richtung (Abstand der Steifen)
$x_0, y_0, z_0$	lokaler Koordinatenursprung

Die Abb. 3-26 zeigt die Vorverformungen einer Platte für b1 und b2. Die Einheiten für x und y-Achse sind m, für die z-Achse mm. Die Abmessungen beziehen sich dabei auf das Berechnungsbeispiel einer untersuchten, versteiften Platte. Die Übertragung dieser Imperfektionsformen auf Innenboden und Trogwand eines typischen Hauptspantes (eines Binnenschiffes) stellt die Abb. 3-27 dar.



**Abb. 3-26: Sinusförmige Wellen in den (versteiften) Platten**

**Fig. 3-26: Sinusoidal corrugations in the (stiffened) plates**



**Abb. 3-27: Laderaumsegment mit Vorverformungen**

**Fig. 3-27: Sector of the cargo hold with pre-deformations**

Praxisbeispiele zu den erwähnten Erscheinungsformen von betriebsbedingten Imperfektionen können dem Kapitel 1 oder der Internetseite des Autors entnommen werden (<http://www.uni-duisburg.de/FB7/ISD/mitarbeiter/meinken>).

* - im Leerzustand	Außenboden		Kimm		Außenwand		Deck	
	w <sub>0</sub> [mm]	w <sub>0</sub> / t	w <sub>0</sub> [mm]	w <sub>0</sub> / t	w <sub>0</sub> [mm]	w <sub>0</sub> / t	w <sub>0</sub> [mm]	w <sub>0</sub> / t
Tankschiff I	10	1,5			16	2,3	2 *	0,4
Tankschiff II	4	0,6	25	2,6	32	4,3	2 *	0,4
Motorgüterschiff I	5	0,8	10	1,1	30	4,5		
Motorgüterschiff II	6	1,0	19	2,1	45	6,4		
Motorgüterschiff III	6	0,8	16	1,7	20	3,0		
Motorgüterschiff IV	3	0,5	10	1,1	25	3,2		

**Tabelle 3-2: Gemessene Plattenverformungen /Payer79/**

**Table 3-2: Measured plate deformations /Payer79/**

Für die Berechnungen ist es notwendig, Zahlenwerte für die Vorverformungen festzulegen. Es sind aber nur wenige Untersuchungen bekannt, die auf die betriebsbedingten Imperfektionen eingehen. So wurden in einer Arbeit von *Payer* /Payer79/ 6 Binnenschiffe (2 Tankschiffe, 4 Motorgüterschiffe) untersucht. Die Schiffe waren zum Zeitpunkt der Untersuchung zwischen 20 und 37 Jahre alt. An diesen Schiffen wurden u.a. Messungen an den Hauptverbänden, dem Außenboden, der Kimm, der Außenwand und dem Deck zur Bestimmung der örtlichen Verformungen durchgeführt. Diese Verformungen sind in der Tabelle 3-2 wiedergegeben.

	Anlegen	Grundberührungen	leichte Kollisionen	Greiferschäden	örtliche Überbelastungen	Einwirkungen der Ladung
Arbeitsfalten im Außenboden		X			X	
Hungerfalten in der Kimm	X	X	X		X	
Außenwand	X		X			
Bergplatte	X		X	X		
Gangbord				X	X	
Dennebaum				X	X	X
Trogwand				X	X	X
Innenboden				X	X	X
Heck	X		X			
Bug	X		X			

**Tabelle 3-3: Geschädigte Bauteile und deren Ursachen**

**Table 3-3: Damaged components and the causes**

Solche örtlichen (Vor-) Verformungen der Bauteile können sehr kleine lokale Schäden (Dritte Kategorie) sein oder sich auch über mehrere Plattenfelder (Zweite Kategorie) erstrecken. Je nach Bauteil können hierfür die unterschiedlichsten Ursachen verantwortlich sein. Die Tabelle 3-3 nennt die Ursachen an den geschädigten Bauteilen. Sofern vorhanden, werden auch die umgangssprachlichen Bezeichnungen genannt, die zum Teil auch in der Literatur verwendet werden.

### 3.7.2.2 Verschleiß und Abrostung

Verschleiß und Abrostung betreffen Platten und Profile in allen Teilen des Schiffes. Als gängiger Durchschnittswert wird ein Materialverlust von  $0,1 \text{ mm/Jahr}$  angesetzt, wobei für Außenboden, Innenboden, Trogwand und Kimm je nach Fahrgebiet und Ladung u.U. ein höherer Wert einzusetzen ist. Nicht ohne Grund sind in regelmäßigen Abständen die Plattenstärken der wichtigsten Baugruppen in sogenannten "Bodenuntersuchungen" zu kontrollieren. In den folgenden Analysen ist der Einfluß der Dickenreduzierung eine der untersuchten Größen.

### 3.7.2.3 Alterung des Materials

Neben den bereits beschriebenen Einflüssen spielt auch die Alterung des Materials eine wichtige Rolle. So ist denkbar, daß sich der E-Modul oder auch der  $\sigma$ - $\epsilon$  Verlauf im plastizierenden Bereich ändert. Leider sind dem Autor diesbezüglich keinerlei Untersuchungen bekannt. Aus diesem Grund kann hierauf in den folgenden Berechnungen nicht eingegangen werden. Die Untersuchung dieses Punktes wird Teil eines anschließenden Forschungsvorhabens sein.

## 3.7.3 Annahmen für folgende Analysen

Aus den vorangegangenen Kapiteln werden nun Schlußfolgerungen gezogen, welche die Grundlage für weitere FE-Analysen (lokal <sup>und</sup>/oder global) an Binnenschiffen bilden.

Festzuhalten ist, daß die **fertigungsbedingten Imperfektionen** im Vergleich zu den betriebsbedingten Imperfektionen (mehrfaches der Blechdicke) als sehr klein anzusehen sind. Für die folgenden Analysen sind diese nur für den Neubauzustand relevant, wobei deren Gestalt auf den jeweiligen Anwendungsfall abgestimmt wird. So werden diese für die versteifte Platte (Kapitel 5) affin zur ersten Eigenform gewählt. An den Schiffsmodellen (Kapitel 7 und 8) werden diese entsprechend ihrer realen Gestaltung ausgelegt (z. B. Wellen zwischen den Bodenwrangen).

Bezüglich der **betriebsbedingten Schäden** wird zwischen mehreren Modellen unterschieden. Das Modell A gibt die perfekte Struktur des Binnenschiffes wieder. Dieses Modell wird zur Bestimmung der Eigenwerte und Eigenformen genutzt, mit denen sich Fehler im Netz und bei den Randbedingungen feststellen lassen.

Im Modell B sind die Imperfektionen enthalten, die den Neubauzustand des Schiffes wiedergeben. Dies entspricht den getroffenen Festlegungen für die fertigungsbedingten Imperfektionen.

In den folgenden Modellen wird das Alter des Schiffes berücksichtigt. So werden im Modell C die Annahmen von Modell B übernommen und zusätzlich eine Minderung der Materialdicke von 1 mm angesetzt. Dies stellt den Zustand des Schiffes nach 10 Jahren dar. Die Festlegungen bezüglich der betriebsbedingten, geometrischen Imperfektionen (Beulen) sind in der Tabelle 3-4 enthalten. Modell D basiert auf Modell C, nur daß die Materialminderung nun 2 mm beträgt. Abschließende Berechnungen werden am Modell E durchgeführt, in dem außergeröhlich schwere Schäden am Dennebaum <sup>und</sup>/oder am Doppelboden berücksichtigt werden.

In Ladefällen, in denen der Dennebaum unter Druckbelastung steht werden die Schäden am Dennebaum werden durch eine sinusförmige Halbwellen abgebildet. Steht der Doppelboden unter einer solchen Belastung wird an der höchst belasteten Stelle eine Arbeitsfalte vorgegeben (z.B. Abb. 7-11).

	Blechdicke t [mm]		Plattenbreite b [m]		$w_0 / t$	Modell B $w_{0B} = 0,002b$ [mm]		Modell C - D $w_{0C} = w_{0B} + w_0$ [mm]	
	Schub- leichter	Container schiff	Schub- leichter	Container schiff		Schub- leichter	Container schiff	Schub- leichter	Container schiff
	* nach /Payer79/ ** eigene Annah- men								
Außenboden	9,0	9,0	0,6	0,5	1,0 *	1,2	1,0	10,2	10,0
Kimm	11,0	13,0	0,6	0,5	1,5 *	1,2	1,0	17,7	20,5
Außenwand	9,0	9,0	0,6	0,5	3,5 *	1,2	1,0	32,7	32,5
Bergplatte	25,0	25,0	0,6	0,5	2,0 *	1,2	1,0	51,2	51,0
Gangbord	12,0	20,0	0,6	0,5	0,8 *	1,2	1,0	10,8	17,0
Dennebaum	9,0-11,0	22,0	0,6	0,5	3,5 **	1,2	1,0	39,7	78,0
Trogwand	9,0	11,0	0,6	0,5	4,0 **	1,2	1,0	37,2	45,0
Innenboden	12,5	13,0	0,6	0,5	4,0 **	1,2	1,0	51,2	53,0
Heck	7,0 -9,0	8,0 -12,0			1,0 **	1,2	1,0	8,2	10,0
Bug	7,0 -9,0	8,0 -12,0			1,0 **	1,2	1,0	8,2	10,0

**Tabelle 3-4: Zahlenwerte für die Verformungen an den Bauteilen**

**Table 3-4: Values for the deformations at the components**

### 3.8 Angaben zur Implementierung

Bei der Bearbeitung der Aufgabenstellung nahm die Programmierung, Implementierung und die Erprobung der Software den Großteil der verwendeten Zeit in Anspruch. Um bei der Bearbeitung von anschließenden Fortsetzungsarbeiten den Einarbeitungsaufwand möglichst gering zu halten, erfolgt in diesem Abschnitt eine kurze Darstellung der Zusammenhänge. Ausführlichere Angaben sind den *institutsinternen Berichten* zu entnehmen.

Die Realisierung des Konzeptes erfolgt unter Anwendung des kommerziellen FE- Programmsystems **MARC / MENTAT**. Diese Software bietet zum einen die notwendigen Algorithmen zur Durchführung der hochgradig nichtlinearen Berechnungen. Zum anderen besteht die Möglichkeit über Schnittstellen die notwendigen Eigenentwicklungen zu implementieren.

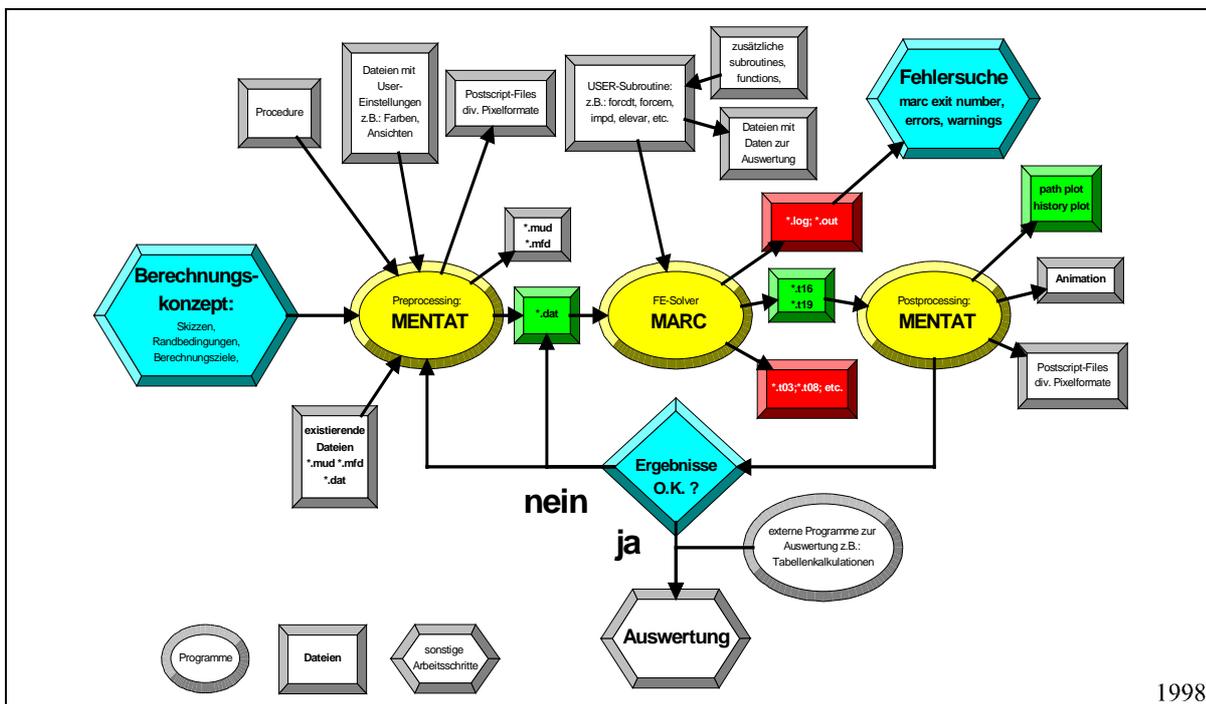


Abb. 3-28: Das Programmsystem MARC / MENTAT

Fig. 3-28: The software system MARC / MENTAT

Ein FEM Programmsystem besteht, wie der Begriff System schon andeutet, nicht aus einem Programm sondern aus mehreren. Wie komplex der gesamte Aufbau sein kann, zeigt die folgende Darstellung der Abb. 3-28. Dieses Programmsystem besteht im wesentlichen aus dem Analyseprogramm **MARC**, mit dem die eigentliche FE-Berechnung durchgeführt wird und dem Pre- und Postprocessor **MENTAT**. Das Programmpaket **MARC** ist ein allgemeines Finite Elemente Programm für lineare und nichtlineare Anwendungen, insbesondere aus der Strukturmechanik. **MENTAT** ist ein interaktiver, menügesteuerter Pre-/Postprocessor für **MARC**, welcher gute grafische Unterstützung zur Erstellung der Eingabedatei und zur späteren Auswertung der Ergebnisse bietet. Die am **ISD** verfügbaren **MARC / MENTAT** Softwaremodule sind in einem Praktikumsript /V98a-d/ ausführlich beschrieben.

### 3.8.1 Schnittstellen in MARC

Die besondere Stärke von **MARC** liegt darin, daß es dem **USER** möglich ist, über definierte Schnittstellen auf den Quellcode des Programms zuzugreifen. Dies erlaubt die Implementierung von Eigenentwicklungen, welche für eine wissenschaftliche Arbeit notwendig sind.

Das Übersicht in Abb. 3-29 zeigt schematisch die Programmierung der erstellten Software und die wichtigsten Schnittstellen zum Quellcode. Weitergehende Informationen sind dem entsprechenden Handbuch /MARC/ zu entnehmen.

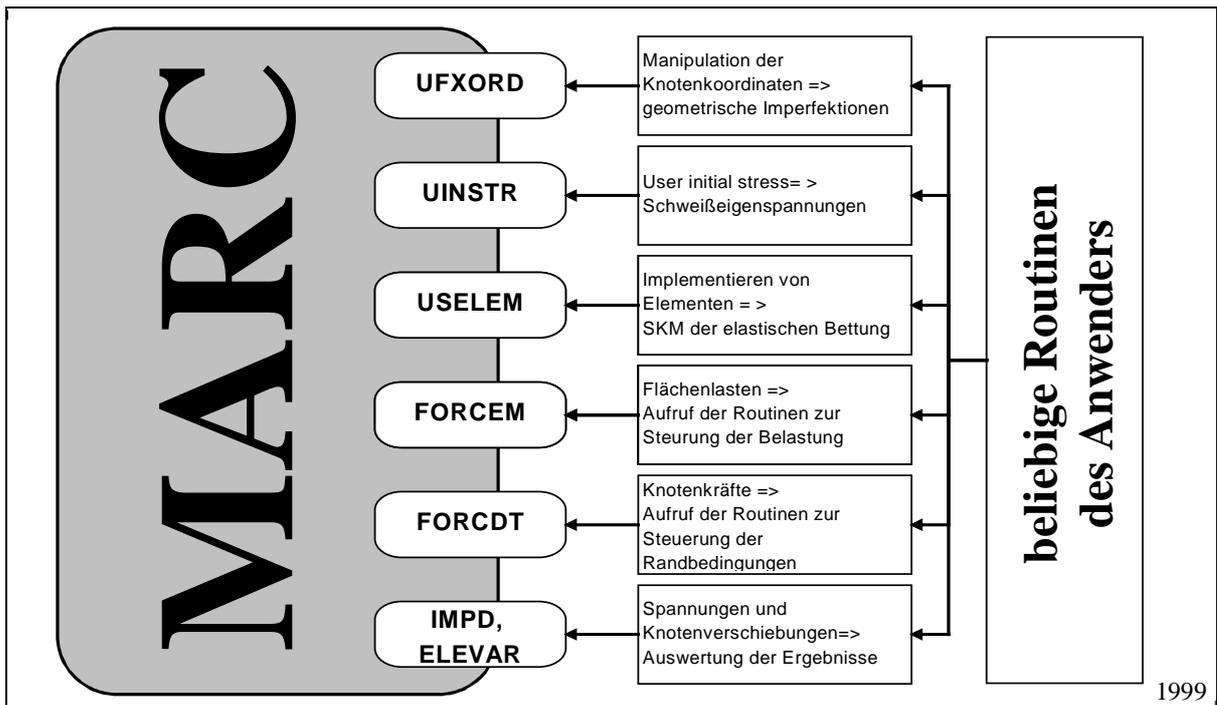


Abb. 3-29: MARC und die Schnittstellen

Fig. 3-29: MARC and the interfaces

### 3.8.2 Steuerung der Berechnung und Dateibenennung

In der üblichen Vorgehensweise werden durch Parameteruntersuchung mit der FEM mehrere Dateien mit unterschiedlichen Eingabedaten erforderlich. Hierdurch entsteht ein entsprechend hoher Arbeitsaufwand. Da vom Anwender sehr viele Daten miteinander verknüpft werden müssen, ist dieser Vorgang sehr fehleranfällig. Es bietet sich somit an, einige Überlegungen durchzuführen, um diesen Vorgang zu automatisieren. Hierzu wird das Prefix des Dateinamens in eine **Project-id** und eine **Parameter-id** unterteilt. Über den common Block *jname* in **MARC** lassen sich die Berechnungsparameter anhand der Parameter-id steuern. Eine entsprechende Abfrage kann z.B. über die Subroutine **UFXORD** die Gestalt der Imperfektionen und deren Auslenkung steuern. Analog lassen sich der Beladungsfall über **FORCEM** und/oder die Schweißzugspannungen über **UINSTR** beeinflussen.

In der beschriebenen Vorgehensweise werden die Aufwendungen zur Erstellung der Eingabedaten erheblich reduziert und Verwechslungen sind nahezu ausgeschlossen. Es wird auch nur ein Eingabefile (\*.dat) notwendig, so daß der Arbeitsaufwand im Preprocessing erheblich reduziert wird. Diese Project-id und Parameter-id lassen sich zusätzlich nutzen, um Berechnungsergebnisse in ergänzenden externen Dateien abzulegen (z.B. die Daten für die Diagramme). Ein angenehmer Nebeneffekt ergibt sich dadurch, daß alle Dateien mit den unterschiedlichsten Berechnungsergebnissen eindeutig zugeordnet sind. Es wird so möglich, die ermittelten Ergebnisse einfach und

schnell auszuwerten. Das hier beschriebene Vorgehen erscheint auf den ersten Blick vielleicht kompliziert, bietet aber enorme Vorteile bei der Dateiverwaltung. In den folgenden Abschnitten erfolgt eine Aufschlüsselung der Parameter-id, wie sie für die hier beschriebenen Untersuchungen an den Schiffmodellen verwendet wurde. Der Schlüssel für die versteifte Platte (Kapitel 5) ist /V22/ zu entnehmen.

### 3.8.2.1 Prefix

Da durch die Parameteruntersuchung mehrere Dateien mit unterschiedlichen Eingabedaten erforderlich werden, ist es sinnvoll in die Dateinamen eine Parameter-id einzubeziehen um die einzelnen Modelle voneinander unterscheiden zu können. Diese Bezeichnung ist notwendig um die ermittelten Ergebnisse einfach und schnell auswerten zu können. Sie wird im **Prefix** des Dateinamens nach der Project-id in der folgenden Reihenfolge angegeben.

Festlegung des verwendeten Modells

- v7 einfaches Kastenmodell
- v8 Schubleichter
- v9 Containerbinnenschiff

Festlegung des Ladefalls

- 1 nur Eigengewicht
- 2 gleichmäßige Belastung auf dem Innenboden
- 3 Aufbiegung (Hogging)
- 4 Durchbiegung (Sagging)
- 5 Erz
- 6 Kies
- 7 Container

Genutztes Modell

- g globales Modell
- l lokales Modell
- d Detailmodell
- t Testmodell

Art der Berechnung

- e Bestimmung der Eigenwerte
- s als starrer Körper
- l lineare Analyse
- n geometrisch und physikalisch nichtlinear

Imperfektionen :

- a Modell A: perfekte Struktur (zur Überprüfung der Netzqualität)
- b Modell B: Neubauzustand (Vorverformungen aus Walzen und Schweißen)
- c Modell C: nach 10 Jahren (Abrostung 1 mm, globale und lokale Schäden an der Struktur)
- d Modell D: nach 20 Jahren (Abrostung 2 mm, globale und lokale Schäden an der Struktur)
- e Modell E: außergewöhnlich starke Schäden im Außenboden oder Dennebaum

Das Prefix für eine Berechnungsdatei sieht somit z.B. wie folgt aus:

$$\underbrace{v8}_{\text{project\_id}} \underbrace{3gnc}_{\text{parameter\_id}}$$

### 3.8.2.2 Suffix

Anhand der Dateiendung (Suffix) werden zwei Arten von Files unterschieden. Dies sind die vom System (MARC und MENTAT) erzeugten und zusätzliche, vom USER erwünschte Dateien.

Wie in der Abb. 3-28 zu ersehen ist, werden während des Programmlaufes von **MARC** mehrere Dateien erstellt. Einige dieser Dateien sind temporär<sup>2</sup>, andere wiederum enthalten die Berechnungsergebnisse oder wichtige

<sup>2</sup> vorübergehend - nur während des Berechnungslaufes vorhanden

Informationen (z.B. bei Programmabbrüchen). Diese Dateien lassen sich durch die Dateierendungen unterscheiden. Die Endungen der wichtigsten Dateien werden im folgenden erläutert, weitere Informationen sind dem Anhang des Volume C /MarcC/ zu entnehmen.

*.mud	unformatierte <b>MENTAT</b> Datei (binär)
*.mfd	formatierte <b>MENTAT</b> Datei (ASCII)
*.f	Subroutine
*.dat	<b>MARC</b> Eingabedatei
*.t08	Restart File
*.t16	unformatierter Ergebnisfile
*.t19	formatierter Ergebnisfile
*.out	ausführliches Berechnungsprotokoll
*.log	kurzes Berechnungsprotokoll (nur bei Hintergrundprozessen)

Die erwähnten, zusätzlichen Dateien können vom Anwender (fast) beliebig festgelegt werden. Die entsprechende Programmierung ist den Routinen **UBGINC** und **datei\_oeffnen** zu entnehmen. Für die Analyse der Schiffe ist folgende Festlegung getroffen worden:

*.i01	.....	Ausgabe der Spannungen im Dennebaumprofil
*.i02	.....	Ausgabe der Spannungen in den Bodenwrangen
*.i03	.....	Ausgabe der Spannungen in den Längsträgern
*.i04	.....	Ausgabe der Spannungen im Innenboden
*.i05	.....	Ausgabe der Spannungen in der Trogwand
*.i06	.....	Ausgabe der Spannungen in der Außenwand
*.i07	.....	Ausgabe der Spannungen im Außenboden
*.i08	.....	Ausgabe der Spannungen im Deck
*.i09	.....	Ausgabe der Spannungen im Gangbord
*.i10	.....	Ausgabe der Spannungen im Dennebaum
*.i11	.....	Ausgabe der Spannungen im verstärkten Dennebaum
*.i51	*.d51	..... Ausgabe der Verformungen im Dennebaum ( <i>kn_db</i> )
*.i52	*.d52	..... Ausgabe der Verformungen der Kiellinie ( <i>kn_ab</i> )
*.i53	*.d53	..... Ausgabe der Verformungen im Innenboden ( <i>kn_ib</i> )
*.i54	*.d54	..... Ausgabe der Verformungen im Deck ( <i>kn_de</i> )
*.i55	*.d55	..... Ausgabe der Verformungen im Gangbord ( <i>kn_gb</i> )
*.i56	.....	Einbiegung der Trogwand und des Dennebaums
*.fehler	.....	Fehlermeldungen

Zusätzlich werden optional über entsprechende Cards (**PRINT NODE**, **PRINT ELEMENT**, **SUMMARY** etc.) im \*.dat weitere Files erstellt, in den folgende Informationen enthalten sind.

ftn61	Die Spannungen aller Elemente pro inc
ftn62	Verformungen von <i>pruefknotten</i> pro inc
ftn63	Massen und Volumen aller Elemente
ftn64	Elemente und Knoten mit den jeweils höchsten Werten für Spannungen und Verformungen pro inc
ftn65	5 Elemente mit den jeweils höchsten Werten für die Mises Spannung pro inc
ftn66	Knoten mit der maximal z-Verschiebung
ftn67	Äquivalenten Knotenkräfte (Summe aus distributed loads und point loads) - LOAD Feld der PRINT NODE Card

