

## 10 Zusammenfassung



Wie in der Einführung erläutert, sind moderne Binnengüterschiffe sehr biege- und torsionsweich. Durch den täglichen rauen Umgang, durch leichte Kollisionen, Grundberührungen in flachen Gewässern, Abrostung, Abrieb und Ermüdung stellen sich im Laufe der Zeit erhebliche Veränderungen der Schiffsstruktur ein. Diese Imperfektionen haben eine Reduzierung der Festigkeit, der Strukturstabilität und der Kollapssicherheit des Schiffes zur Folge. Ein sehr spektakuläres Beispiel ist das Auseinanderbrechen der “Carabella” auf dem Rhein bei Wesel<sup>1</sup>. Es verdeutlicht, daß u. U. eine erhebliche Gefährdung für Schiff, Ladung und Personal besteht.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde erstmalig das reale, geometrisch und physikalisch nichtlineare Strukturverhalten von offenen Doppelhüllenbinnenschiffen betrachtet. **Ziele** waren:

- ◆ Die Ermittlung von “Schwachstellen” an bisherigen Schiffskonstruktionen sowie Angaben zur optimalen Bemessung der Hauptverbände.
- ◆ Erarbeitung von Konstruktionsvorschlägen für den Laderaumbereich zukünftiger Binnenschiffe.
- ◆ Schiffe mit einer erhöhten Kapazität (4 statt bisher 3 Containerstapel nebeneinander).
- ◆ Größtmögliche Sicherheit gegen Kollaps auch am geschädigten Schiff.

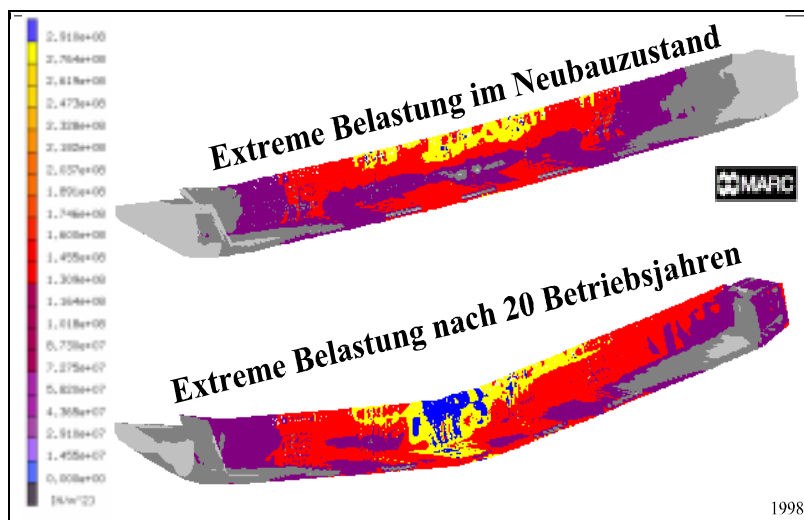
Da experimentelle Studien am realen Schiff sehr aufwendig und teuer sind, wurde in dieser Arbeit ein **Konzept** entwickelt, welches die modernen Möglichkeiten der Computersimulationen verwendet. Hiermit lassen sich zuverlässige rechnerische Analysen realisieren. Dieses Berechnungskonzept beschreibt das Verhalten des Schiffes unter Berücksichtigung von betriebsbedingten Imperfektionen bis hin zum Kollaps (Totalversagen). Unbedingt notwendig sind eine realitätsnahe Gestaltung der Randbedingungen sowie die Beachtung der Nichtlinearitäten. Kern der Untersuchungen ist das Strukturverhalten der Schiffe im Neubauzustand, nach 10 und 20 Betriebsjahren sowie für außergewöhnlich starke Schäden. Analysiert wurden die wichtigsten Ladefälle.

Zur Durchführung der notwendigen Berechnungen wurde die Finite Elemente Methode (FEM) als **Werkzeug** gewählt. Um eine möglichst effektive Bearbeitung der Aufgabenstellung zu ermöglichen, wurde soweit wie möglich auf kommerzielle Software zurückgegriffen. Die Algorithmen, welche zur Beschreibung der Imperfektionen, der Randbedingungen, der Ladevorgänge etc. notwendig sind, wurden entwickelt, programmiert und mit dem

<sup>1</sup> nähere Informationen bitte der Website entnehmen (<http://www.uni-duisburg.de/FB7/ISD/mitarbeiter/meinken>).

Hauptprogramm verknüpft. Dieses Programmpaket bildet die Basis für die Festigkeitsuntersuchung an Binnenschiffen.

Die **Realisierung** erfolgte 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. Die Untersuchungen umfassen Berechnungen an schiffbautypischen Teilkonstruktionen, an einem Schubleichter und einem Containerbinnenschiff. Die Verifizierung der erstellten Software erfolgte anhand



bekannter experimenteller Untersuchungen von schiffbautypischen Teilkonstruktionen. Bei der Auswertung der Analysen wurde besonders der Vergleich der Berechnungsergebnisse mit Schadensfällen der Praxis hervorgehoben. Anschließend wurden die verschiedenen Parameter untersucht, welche die Festigkeit von Schiffskonstruktionen beeinflussen. Aus der Auswertung der Ergebnisse ergaben sich dann die Schwachpunkte und die gewünschten Konstruktionsvorschläge.

Der Schwerpunkt dieser Arbeit lag in der Entwicklung des Konzeptes, der Programmierung und der Verifizierung der erstellten Software. Letzteres erfolgte anhand von Berechnungen an einer versteiften Platte, einem Kastenträger, einem Schubleichter und einem Containerbinnenschiff.

Die Ausführungen in Kapitel 2, 3 und 4 zeigen, daß die Finite Elemente Methode (FEM) ein sehr gutes Mittel ist, um die notwendigen Festigkeitsberechnungen an Binnenschiffen durchzuführen. Unter Nutzung des entwickelten Berechnungskonzeptes lassen sich lineare und nichtlineare Berechnungen an globalen Schiffsmodellen sowie lokalen Laderaumsegmenten durchführen. Wie auch in /ISSC91III.1 S. 379/ gefordert, ist dabei ein besonderes Anliegen die Erfassung der typischen Imperfektionen an Binnenschiffen sowie deren rechnerische Berücksichtigung. Wie einführend in Kapitel 1 an einigen Praxisbeispielen gezeigt wird, haben diese einen erheblichen Einfluß auf das Kollapsverhalten der Binnenschiffe.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist eine realistische Darstellung der Belastungen durch Eigengewicht, Beladung und Wasserdruck am verformten Körper. Über die Berücksichtigung der geometrischen und physikalischen Nichtlinearitäten in den globalen FE-Modellen kann die Wechselwirkung zwischen lokalen Imperfektionen und globalem Strukturverhalten erfaßt werden. Mittels Einführung einer elastischen Bettung wird dabei die Problematik der Starrkörperverschiebung behoben, wodurch der Gleichgewichtszustand zwischen den Auftriebskräften und den Belastungen erreicht wird. Da die Analysen an deformierbaren Modellen durchgeführt werden, wird in den Berechnungen die Änderung des hydrostatischen Auftriebs infolge der Schiffsverformung berücksichtigt. An dieser Stelle ist auf die "offene" Gestaltung des verwendeten Programmsystem **MARC / MENTAT** hinzuweisen. Nur durch die Möglichkeit der Einbindung von FORTAN Routinen konnten die eigenen Entwicklungen (Elemente, Randbedingungen, Imperfektionen, etc.) in entsprechender Weise implementiert werden.

Insgesamt läßt sich festhalten, daß unter Anwendung zuverlässiger Software die Ingenieurzeit für Pre- und Postprocessing sowie für die Auswertung der Ergebnisse in akzeptablen Bereichen liegen. Hilfreich wären allerdings Vernetzungswerkzeuge, die speziell auf die Anforderungen des Schiffbaus zugeschnitten sind.

Bezüglich der Berechnungszeiten läßt sich feststellen, daß diese in den nichtlinearen Analysen naturgemäß sehr hoch aber vertretbar sind. Dieses hängt natürlich sehr stark vom verwendeten Computer (PC, HP712, HP735, oder Convex SPP2000) und der Belastung des Rechners durch andere USER ab. Um die erforderlichen Berechnungszeiten zu senken, werden in Kapitel 3 verschiedene spezielle Techniken untersucht. Hierbei zeigt sich, daß die Substrukturtechnik als völlig ungeeignet anzusehen ist. Auch von einer Einbindung USER-eigener Elemententwicklungen, die auf der Grundidee der *idealized structural unit method (ISUM)* beruhen, ist abzusehen. Es stellt sich heraus, daß der zu betreibende Ingenieuraufwand für die Entwicklung und Implementierung in keinem gesunden Verhältnis zu den eingesparten Berechnungszeiten stehen. Auch liegen in der vereinfachenden Theorie einige "Schwächen", wodurch die Qualität der Ergebnisse den heutigen Anforderungen nicht mehr genügen kann. Insgesamt läßt sich diese Vorgehensweise als nicht mehr zeitgemäß ansehen.

Für weitere Forschungsarbeiten ist lediglich die als Submodelltechnik beschriebene Vorgehensweise zu empfehlen. Daß auch andere namhafte Einrichtungen Untersuchungen auf diesem Gebiet betreiben, spricht ebenfalls für eine Weiterentwicklung dieser Technik. Allerdings ist zu beachten, daß dessen Handhabung bei der Berücksichtigung der Interaktionen zwischen lokalen Bauteilversagen und globalem Kollaps Grenzen gesetzt sind. Sie eignet sich demnach nur für lineare und schwach nichtlineare Berechnungen.

Vor der Durchführung der nichtlinearen Festigkeitsberechnungen muß sich der Anwender allerdings über einige Besonderheiten Klarheit verschaffen. Diese liegen in der angewendeten Numerik, der Stabilitätstheorie und der Anwendung der FEM für die Strukturstabilität. Bei Nichtbeachtung führt dies sonst unweigerlich zu einem Berechnungsabbruch oder unbrauchbaren Ergebnissen. Im Kapitel 4 dieser Arbeit wird auf solche Besonderheiten hingewiesen.

Anhand einer versteiften Platte (Kapitel 5) und eines Kastenträgers (Kapitel 6) werden Voruntersuchungen durchgeführt, welche u.a. das Steifenversagen berücksichtigen (gefordert in /ISSC94III.1 S.369/) sowie das Materialverhalten von hochfesten Stählen im Nachbeulbereich (gefordert in /ISSC94III.1 S.368/) beschreiben. Desweiteren wird der Einfluß von Vorverformungen, Eigenspannungen und der Korrosion (gefordert in /ISSC94III.1 S.368/) betrachtet.

Das Kapitel 7 behandelt die numerische Betrachtung eines Schubleichters. Dieser wird in den Analysen alltäglichen und extremen Belastungen ausgesetzt. Bei der Berücksichtigung von Imperfektionen zeigt sich sehr deutlich eine empfindliche Reduzierung der Längsbiegesteifigkeit, welche auf der Konstruktionsweise des Doppelbodens beruht. Die Ergebnisse des Schubleichters zeigen, daß es möglich ist, das Verhalten dieser globalen Modelle bis hin zum Kollaps zu beschreiben. In diesem Zusammenhang ist auf die notwendige detaillierte Modellierung (z.B. des Dennebaums) hinzuweisen, wodurch die Berücksichtigung des Steifenversagens in diesen Bereichen möglich wird.

Ähnliche Betrachtungen erfolgen in Kapitel 8 für ein modernes Containerbinnenschiff. Diese Konstruktion zeigt ein deutlich ausgewogeneres Verhältnis von Querbiege- und Längsbiegesteifigkeit. Trotzdem bieten sich aber Ansatzpunkte für eine Verbesserung der Konstruktionsweise.

Nachdem in den ersten 4 Kapiteln die Rahmenbedingungen für die Durchführung der Berechnungen (in Kapitel 5, 6, 7 und 8) geschaffen sind, werden in Kapitel 9 einige Konstruktionsänderungen angeregt. Aus den abgeleiteten "Schwachpunkten" werden Konstruktionsvorschläge für zukünftige Binnenschiffe erarbeitet. Diese behandeln einige konstruktive Details aber auch einen neuen Hauptspantquerschnitt.

### **Fazit:**

Zusammenfassend ist festzustellen, daß unter Anwendung der erstellten Software die FE-Analyse von Binnenschiffen bis hin zum Kollaps möglich ist. Die auftretenden geometrischen und physikalischen Nichtlinearitäten können ausreichend genau berücksichtigt werden. Um am verformbaren Schiff einen Gleichgewichtszustand zwischen Eigengewicht, Ladung und Auftriebskräften zu erreichen wird der Gestaltung der Randbedingungen eine

besondere Beachtung geschenkt. Die Verifizierung der Berechnungen an dem Leichter beruht auf einen Vergleich der FE-Ergebnisse und Angaben der Werft bzw. Sachverständigen. Insgesamt ist festzustellen, daß sowohl für das globale Strukturverhalten als auch für lokales Bauteilversagen eine gute Übereinstimmung zwischen numerischen Ergebnissen und tatsächlichen Ereignissen erzielt wird.

Die Software ist geeignet, zukünftige Schiffskonstruktionen schon vor dem Bau auf mögliche Schwachstellen zu untersuchen. Berücksichtigt werden kann der Zustand des Schiffes nach unterschiedlichen Betriebsjahren mit und ohne lokale Strukturschäden. Die Belastung kann für verschiedene Beladungsvorgänge untersucht werden.

Die vorgestellten Analysen geben erstmals detaillierte Aussagen über die tatsächlichen Belastungen der Schiffstruktur. Neben den verwendeten Elementtypen (Schalen statt Platten oder Scheiben) sind hierfür die detailgetreue Modellierung und die realitätsnahe Gestaltung der Randbedingungen zu nennen. Zu erwähnen ist auch, daß erstmalig nichtlineare Analysen an einem kompletten Schiff durchgeführt wurden. Diese sind noch vor 2 Jahren in einem ISSC Bericht als nicht durchführbar angesehen worden (*..., that the ship's hull is too large for this type of analysis /ISSC97III.1 S.252/.*)