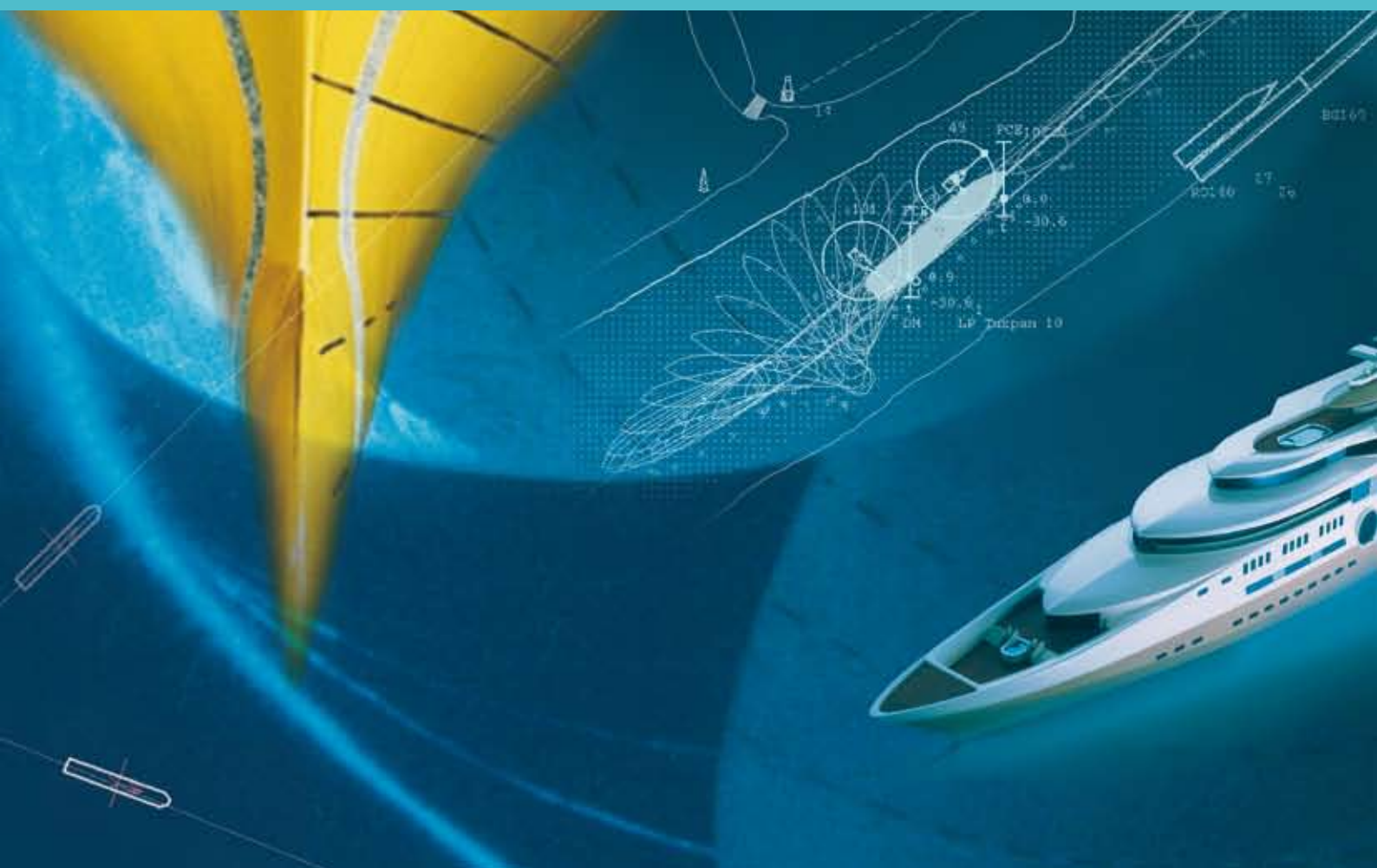


# *Erster Interdisziplinärer Workshop Maritime Systeme*

*Aktuelle Ergebnisse aus laufenden Promotionsprojekten an der TUHH*



**TUHH**

Technische Universität Hamburg-Harburg



# *Erster Interdisziplinärer Workshop Maritime Systeme*

*Aktuelle Ergebnisse aus laufenden Promotionsprojekten an der TUHH*

*Hamburg, 09. Februar 2010*

## *Impressum*

### *Herausgeber*

Forschungsschwerpunkt Maritime Systeme der TUHH

### *Redaktion*

Katja Woeckner, Jörg Brunswig, Manuel Manzke, Christian Ulrich

### *Gestaltung*

Formlabor, Hamburg

# Inhalt

<i>Hendrik Vorhölder</i>	
Vereinfachte Bestimmung des effektiven Nachstroms in Manövrierzuständen	5
<i>Gang Qiu</i>	
Numerische Untersuchungen zur Grundberührung von Schiffen	13
<i>Jürgen Reimers</i>	
Betriebsgrenzen von Ladeoperationen im Seegang	20
<i>Marc Kirchhoff</i>	
Innovative lasergestützte Schweißfertigung im Schiffbau	29
<i>Sonja Zacke</i>	
Festigkeit von mit großem Luftspalt verschweißten Stößen von Schiffssektionen	36
<i>Georg Sehlhorst</i>	
Multiscale computations with application to cellular materials	43
<i>Patric Drewes</i>	
Corporate Sustainability Management in der Containerschifffahrt	51
<i>Tobias Pilsak</i>	
EMV Probleme auf modernen Schiffen	61
<i>Axel Hackbarth</i>	
Source Localization and Tracking with a Swarm of Autonomous Underwater Vehicles	69

# Vereinfachte Bestimmung des effektiven Nachstroms in Manövrierzuständen

Hendrik Vorhölder\*

\*Institut für Entwerfen von Schiffen und Schiffssicherheit  
Technische Universität Hamburg-Harburg  
e-mail: hendrik.vorhoelder@tu-harburg.de

## 1 Einleitung

Die Entwicklung der Methoden der numerischen Strömungsmechanik (engl. Computational Fluid Dynamics, CFD) haben es in den letzten Jahren möglich gemacht die gesamte Propulsionsanlage eines Schiffes, bestehend aus dem Rumpf, dem Propeller und allen relevanten Anhängen, am Rechner zu untersuchen. Der Aufwand, der für diese Berechnungen nötig ist, erschwert aber den Einsatz im frühen Projektstadium, obwohl die Prozesszeit für eine CFD-Berechnung mittlerweile geringer ist als für einen Modellversuch. Deshalb müssen vereinfachende Techniken entwickelt werden. Insbesondere wenn nicht nur ein Entwurfszustand betrachtet werden soll, sondern wenn verschiedene Entwürfe in einer großen Zahl von Nicht-Entwurfszuständen, so genannten Off-Design-Zuständen, analysiert werden sollen. Nicht-Entwurfszustand meint dabei zum Beispiel Manövrierzustände, bei denen das Schiff dreht oder driftet. Die Betrachtung der Off-Design-Zustände ist im Schiffsentwurf in den letzten Jahren immer wichtiger geworden. Dies gilt besonders für die europäischen Werften, die nur mit auf ihre Kunden zugeschnittenen Prototypen mit besonderen Anforderungen werden überleben können.

Um die Analyse des Propellers, aber auch die Manövriersimulation, verbessern zu können, soll ein vereinfachtes Verfahren zur Bestimmung des effektiven Nachstroms sowie der effektiven Nachstromziffer entwickelt werden. Die vorgestellte Arbeit ist Teil eines Promotionprojekts am Institut für Entwerfen von Schiffen und Schiffssicherheit der Technischen Universität Hamburg-Harburg unter der Betreuung von Prof. Dr.-Ing. Stefan Krüger.

## 2 Hintergrund

Als Nachstrom werden die strömungsmechanischen Effekte oder genauer das Geschwindigkeitsfeld am hinteren Ende bzw. im Nachlauf eines Schiffes bezeichnet. Da Schiffe in der überwiegenden Zahl der Fälle von achtern angeordneten Propellern angetrieben werden, ist der Nachstrom von großer Bedeutung für den Propellerzustrom<sup>1</sup>. Der Nachstrom entsteht durch die Überlagerung verschiedener Effekte. So kann man einen Potentialanteil, einen Anteil aus Wellen sowie einen Reibungs- bzw. viskosen Anteil identifizieren. Es wird unterschieden zwischen dem nominellen und den effektiven Nachstrom. Der nominelle Nachstrom ist dabei das Strömungsfeld, das ohne die Anwesenheit des Propellers beobachtet werden kann, wohingegen der effektive Nachstrom durch die Wechselwirkung zwischen dem Propeller und seiner Zuströmung entsteht. Die Entstehung des effektiven Nachstroms soll im folgenden näher erläutert werden, bevor Verfahren zu seiner Bestimmung vorgestellt werden.

---

1 Die Begriffe Propellerzustrom und Nachstrom werden auch äquivalent verwendet.

## 2.1 Definition und Entstehung des effektiven Nachstroms

Die einfachste Betrachtung für die Wechselwirkung zwischen dem Propeller und dem Nachstrom kommt aus der Impulserhaltung. Zur Drehung des Propellers in ein Moment erforderlich, dafür erzeugt der Propeller eine gewissen Längskraft, den Schub. Das gleiche Moment und die gleiche Kraft müssen zwischen dem Propeller und dem Fluid wirken und werden so in das Fluid übertragen. Nach der Impulserhaltung wird das Fluid dadurch beschleunigt. Aus dieser einfachen Betrachtung lassen sich aber nur begrenzt Aussagen über das Strömungsfeld gewinnen. Detaillierte Erkenntnisse hingegen gewinnt man aus der Propellertheorie.

In der Propellertheorie wird jeder Propellerflügel als ein Tragflügel betrachtet, an dem durch einen gebundenen Wirbel ein Auftrieb entsteht, der wiederum den Schub erzeugt. Nach dem Helmholtz'schen Wirbelerhaltungssatz entsteht im Nachlauf des Flügels ein System von freien Wirbeln. Jeder Wirbel induziert nach dem Bio-Savart'schen Gesetz ein rotierendes Geschwindigkeitsfeld um seinen Wirbelkern. Diese induzierte Geschwindigkeiten erzeugen die Wechselwirkung des Propellers mit seiner Zuströmung. Mit einigen Vereinfachungen lässt sich daraus folgende anschauliche Erklärung für die Kontraktion des Propellerstrahls herleiten. Wenn angenommen wird, dass die freien Wirbel auf regelmäßigen Schraubenflächen angeordnet sind, heben sich die von zwei benachbarten Schraubengängen induzierten Geschwindigkeiten in radialer Richtung, das heißt von der Mitte des Propellerstrahls weg oder zur Mitte hin, genau auf. Übrig bleiben nur die Geschwindigkeiten in axialer Richtung, das heißt in oder gegen die Richtung des Propellerstrahls. Da die Kontinuität des Fluids gewahrt bleiben muss, führen die höheren Geschwindigkeiten im Propellerstrahl zu einer Kontraktion der Stromlinien aus dem Zustrom. Dieser Effekt ist in Abb. 1 skizziert, in der die Stromlinien des Propellerzustrom ohne und mit vorhandenem Propeller dargestellt sind.

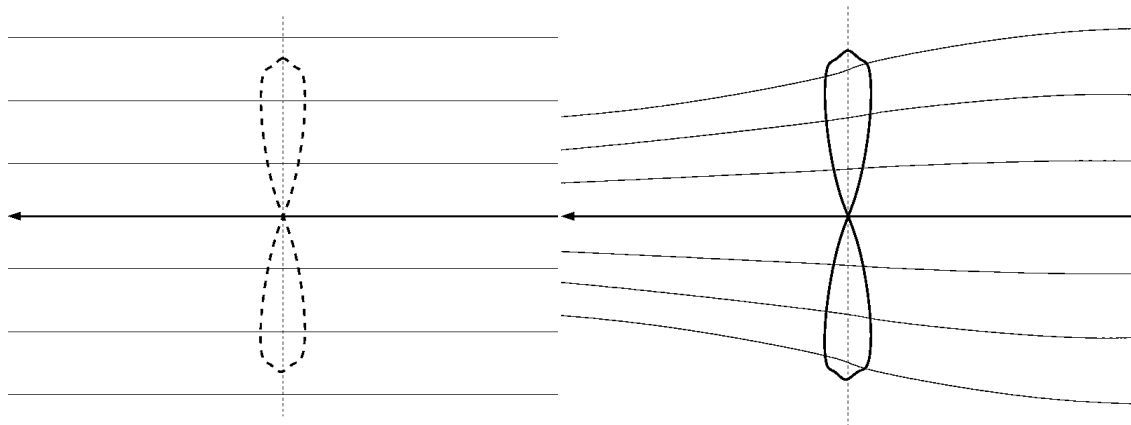


Abbildung 1: Stromlinien in der Propellerebene ohne (links) und mit vorhandenem Propeller (rechts), aus [1]

Wenn ein Propeller eine ungestörte Zuströmung hat, wie zum Beispiel im Freifahrtversuch, dann bleibt diese Kontraktion der Stromlinien ohne Folgen. Bei einer inhomogenen Zuströmung wie im Nachstrom eines Schiffes führt die Kontraktion zu einer Veränderung der Geschwindigkeitsverteilung, die im wesentlichen den effektiven Nachstrom darstellt. Dieser lässt sich in der Realität nicht direkt bestimmen, denn um einen arbeitenden Propeller kann man nur das totale Geschwindigkeitsfeld einschließlich der induzierten Geschwindigkeiten beobachten. Ohne den Propeller bleibt nur der nominelle Nachstrom.

Die Schwierigkeit den effektiven Nachstrom bestimmen zu können, ist der Grund dafür, dass in der Schiffstechnik in der Regel mit dem nominellen Nachstrom gearbeitet wird. Obwohl eine separate numerische Analyse des Propellers im effektiven Nachstrom erfolgen müsste, wird hierfür der nominellen Nachstrom verwendet. Der Propellerentwurf erfolgt ebenso auf der Basis des nominellen Nachstroms.

Für viele Anwendungen, so auch in der Propulsionsprognose, wird der effektive Nachstrom auf die sogenannte effektive Nachstromziffer  $w$  reduziert. Zur Bestimmung der effektiven Nachstromziffer wird das Verhältnis der Differenz der Schiffsgeschwindigkeit  $V_S$  zu einer Fortschrittsgeschwindigkeit  $V_A$  (engl. speed of advance) mit eben der Schiffsgeschwindigkeit gebildet:

$$w = \frac{V_S - V_A}{V_S} = 1 - \frac{V_A}{V_S} \quad (1)$$

Die Fortschrittsgeschwindigkeit entspricht dabei der Geschwindigkeit, bei der Propeller in der Freifahrt den selben Schub erzeugt wie hinter dem Schiff bzw. Modell. Die Fortschrittsgeschwindigkeit muss aber als theoretische Hilfsgröße gesehen werden. So lässt sie sich nicht durch Mittlung des effektiven Nachstroms bestimmen.

## 2.2 Bestimmung des effektiven Nachstroms

Wie im vorherigen Abschnitt erläutert wurde, kann der effektive Nachstrom nicht direkt bestimmt werden. Moderne Berührungsfreie Messmethoden ermöglichen es zwar das Strömungsfeld um einen arbeitenden Propeller zu ermitteln, dies beinhaltet aber noch die induzierten Geschwindigkeiten. Die Untersuchung in Modellversuchen beschränken sich deshalb in der Regel auf die Bestimmung der effektiven Nachstromziffer, bei der Propeller als Integrator für die effektive Zuströmung verwendet wird.

Bei der numerischen Untersuchung des Propellers wird ähnlich vorgegangen. Häufig wird das Strömungsfeld um das Schiff in einer RANSE-Berechnung bestimmt. Der Propeller wird in der gleichen Rechnung direkt mit betrachtet oder es werden andere Berechnungsverfahren für den Propeller an den RANSE-Löser gekoppelt. Damit wird die Wechselwirkung zwischen dem Propeller und seiner Zuströmung erfasst. Da diese Berechnungen relativ aufwendig sind, wird häufig nur der Propeller separat analysiert. Ein weiterer Nachteil der beiden beschriebenen Ansätze ist, dass für jeden neuen Propellerentwurf und für jeden anderen Betriebspunkt ein neuer Versuch bzw. eine neue Berechnung durchgeführt werden muss. Um den Einsatz insbesondere der numerischen Berechnung im Schiffsentwurf wäre es wünschenswert, wenn die Bestimmung des Nachstroms und der Wechselwirkung sowie die eigentliche Propelleranalyse von einander entkoppelt werden können.

## 3 Entwicklung eines vereinfachten Verfahrens

Zur Vereinfachung wird die Bestimmung in einzelne Schritte aufgeteilt. Im ersten Schritt wird der nominelle Nachstrom ermittelt. Dies kann sowohl im Versuch durch Messung als auch durch eine CFD-Berechnung erfolgen. Im zweiten Schritt wird der nominelle Nachstrom in einen angenäherten effektiven Nachstrom umgerechnet. Im dritten Schritt wird eine Propellerberechnung mit einem Wirbelgitterverfahren auf dem effektiven Nachstrom durchgeführt. Das Ergebnis der Propellerberechnung im Nachstrom wird mit der Freifahrt verglichen und aus dem Vergleich die effektive Nachstromziffer berechnet.

### 3.1 Bestimmung des nominellen Nachstroms

Der nominelle Nachstrom kann sowohl durch Messung an einem maßstäblichen Modell oder der Großausführung sowie durch Berechnung bestimmt werden. In der vorgestellten Arbeit werden beide Verfahren verwendet. Zur numerischen Berechnung wird der Finite-Volumen-Löser FreSCo für die reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen (engl. Reynolds averaged Navier-Stokes-Equations – RANSE) verwendet. FreSCo wurde deshalb gewählt, weil

der Fokus bei der Entwicklung des Lösers auf schiffstechnischen Anwendungen liegt. Dies sind insbesondere Strömungen mit freier Flüssigkeitsoberfläche und hohen Reynoldszahlen.<sup>2</sup>

### 3.2 Umrechnung des nominellen in einen effektiven Nachstrom

Zur Bestimmung des effektiven Nachstroms wird angenommen, dass die wesentliche Wechselwirkung die Kontraktion des nominellen Zustroms ist. Zur Berechnung der Kontraktion wird zunächst das vom Propeller induzierte Geschwindigkeitsfeld für einen definierten Schub mit Hilfe der Methode der tragenden Linie ermittelt. Da die Traglinientheorie auf der Potentialtheorie basiert, ist es dabei unerheblich welche Drehzahl und welche Zustromgeschwindigkeit dabei gewählt wird, solange die Schubidentität gewahrt bleibt. Durch die Wahrung der Schubidentität ist auch gewährleistet, dass die integrale Wirkung des Propellers auch in inhomogener Zuströmung richtig abgebildet wird.

Zur weiteren Vereinfachung wird nur die axiale Geschwindigkeitskomponente betrachtet. Somit ergibt sich aus der Traglinienbetrachtung eine Verteilung der induzierten Geschwindigkeiten über dem Propellerradius  $v_{x,ind}(r)$ . Das nominelle Nachstromfeld wird durch Mittlung über den Umfang an dieses Ergebnis angepasst, so dass sich eine mittlere, vom Radius abhängige axiale Geschwindigkeit  $v_{x,nom}(r)$  ergibt. Durch Integration dieser Geschwindigkeit von der Propellernabe  $r_0$  bis zu einem Radius  $r_1$  lässt sich der Volumenstrom in einen Kreisring um die Propellerwelle in der Propellerebene bestimmen.

$$\dot{V}_1 = 2 \pi \int_{r_0}^{r_1} v_{x,nom} \cdot r \, dr \quad (2)$$

Durch Normierung des Volumenstroms mit der Fläche des Kreisrings

$$A_1 = 2 \pi \int_{r_0}^{r_1} r \, dr \quad (3)$$

ergibt sich die mittlere Geschwindigkeit

$$v_1 = \frac{\dot{V}_1}{A_1} = \frac{2 \pi \int_{r_0}^{r_1} v_{x,nom} \cdot r \, dr}{2 \pi \int_{r_0}^{r_1} r \, dr} \quad (4)$$

Durch das induzierte Geschwindigkeitsfeld ergibt sich auf dem selben Kreisring eine größere mittlere Geschwindigkeit:

$$v'_1 = \frac{\dot{V}'_1}{A_1} = \frac{2 \pi \int_{r_0}^{r_1} (v_{x,nom} + v_{x,ind}) \cdot r \, dr}{2 \pi \int_{r_0}^{r_1} r \, dr} \quad (5)$$

Aus der Forderung nach der Kontinuität des Fluids

$$v_1 \cdot A_1 = v'_1 \cdot A'_1 \quad (6)$$

lässt sich ableiten, dass die Wirkfläche der überlagerten Volumenströme kleiner sein muss, als für den nominellen. Durch Einsetzen von (3) bis (5) in (6) und durch Umformung ergibt sich ein angepasster äußerer Radius für den Kreisring:

$$r'^2_1 = (r_1^2 + r_0^2) \cdot \frac{v_1}{v'_1} + r_0^2 \quad (7)$$

Durch die kontinuierliche Anwendung über den gesamten Nachstrom ergibt sich eine Annäherung des effektiven Nachstromfelds ohne die induzierten Geschwindigkeiten. Nur eine

<sup>2</sup> Näheres zu dem Verfahren, sowie zur Berechnung des nominellen Nachstrom findet sich unter [2] und [3].

Analyse des Propellers im effektiven Nachstrom erlaubt einen direkten Vergleich mit der Propellerfreifahrt.

### 3.3 Bestimmung der effektiven Nachstromziffer

Zur Bestimmung der effektiven Nachstromziffer wird der Propeller mit einem Wirbelgitterverfahren, in diesem Fall QCM (vgl. [4]) untersucht. Zunächst wird die Freifahrt betrachtet. Die Drehzahl wird dabei so eingestellt, dass sie dem Propulsionpunkt entspricht. Hierbei ist die richtige Größenordnung für die Drehzahl ausreichend, damit die reynoldszahlabhängigen Korrekturen im QCM richtige Werte liefern. Dann wird Zustromgeschwindigkeit solange variiert, bis der gewünschte Schub, der auch für die Berechnung des effektiven Nachstroms verwendet wurde, vom Propeller erzeugt wird. Das Ergebnis ist eine Fortschrittsgeschwindigkeit  $V_A$  für diesen Propulsionpunkt.

Im nächsten Schritt wird die Analyse mit dem nach dem im vorherigen Abschnitt beschriebenen Verfahren bestimmten effektive Nachstromfeld als Eingangsgröße durchgeführt. Dazu wird der Nachstrom mit der Schiffsgeschwindigkeit für die er bestimmt wurde normiert. Die Drehzahl wird aus der Berechnung der Freifahrt übernommen. Wie bei der Freifahrt auch wird nun die Geschwindigkeit  $V_S$  so lange variiert, bis der Propeller den definierten Schub erzeugt. Nach (1) lässt sich damit die effektive Nachstromziffer bestimmen. Durch den direkten Vergleich zwischen der numerischen Freifahrt und der numerischen Propulsion heben sich eventuelle Abweichungen in der numerischen Prognose des Propellers gegeneinander auf.

## 4 Beispiele

Im folgenden werden die Ergebnisse der Anwendung, des im vorherigen Kapitel beschriebenen Verfahrens, an zwei Beispielen erläutert. Das erste Beispiel ist ein Serie 60 Rumpf mit einem Blockkoeffizienten  $c_B = 0,6$  (vgl. [5]). Das zweite ist eine Zwei-Propeller-Fähre, die im Rahmen des ROLL-S Vorhabens untersucht wurde (vgl. [6]).

### 4.1 Serie 60 Rumpf mit $c_B = 0,6$

Bei dem ersten untersuchten Schiff handelt es sich um einen Rumpf aus der Serie 60 (vgl. [5]) mit einem Blockkoeffizienten von  $c_B = 0,6$ . Die Geometrie wurde ausgewählt, weil sie von Oltmann (vgl. [7] und [8]) sowohl in der Geradeausfahrt, als auch in Drift in der Propulsion detaillierter untersucht wurde.

Der Maßstab des Modells bei diesen Versuchen war  $\lambda = 26,667$ . Die Propellerbelastung bei Geradeausfahrt betrug  $c_{Th} = 2,18$ . Die Drehzahl wurde über die Versuche konstant gehalten. Alle Versuche wurden mit einer konstanten Bahngeschwindigkeit von  $v_M = 2,01 \text{ m/s}$  durchgeführt, was einer Froudezahl von  $Fn = 0,30$  entspricht. Das Modell wurde bei den Driftwinkeln von  $\beta = -12^\circ$  bis  $\beta = 12^\circ$  in Schritten von  $4^\circ$  untersucht.

#### 4.1.1 Ergebnisse der Nachstromberechnungen

In Abb. 2 sind der gemessene und der berechnete nominelle Nachstrom für die Geradeausfahrt, sowie die Umrechnung des Messergebnisses auf den effektiven Nachstrom abgebildet.

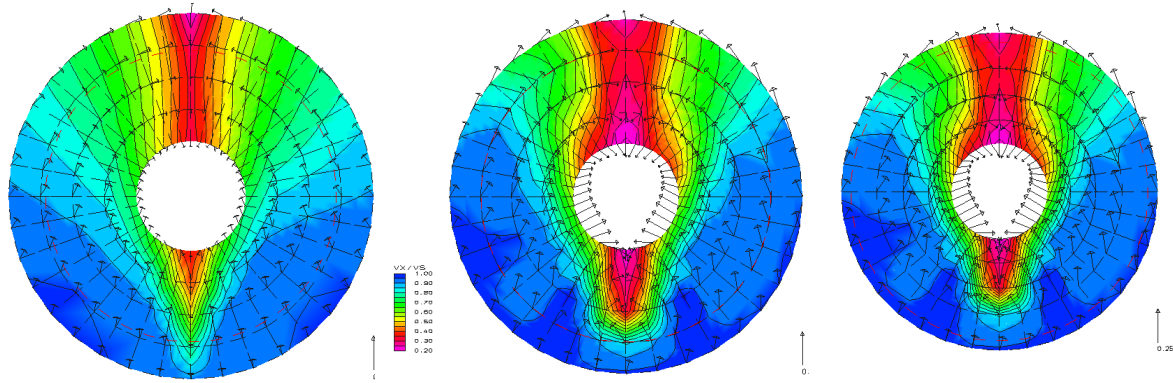


Abbildung 2: Berechneter (links) und gemessener (mitte) nomineller sowie effektiver Nachstrom (rechts) für den Serie 60 Rumpf,  $\beta=0^\circ$

Bei der Geradeausfahrt ist die Dicke der Grenzschicht in der Berechnung gegenüber dem Versuch überzeichnet. Für die Strömung in Drift ist die Übereinstimmung zwischen Modellversuchung und Berechnung besser (vgl. [3]). Der Vergleich zwischen dem nominellen und effektiven Nachstrom zeigt deutlich die Kontraktion. Die inneren Radien werden dabei stärker zusammengezogen als die äußeren, was durch die Abnahme der induzierten Geschwindigkeiten zur Propellerflügelspitze hin zu erklären ist.

#### 4.1.2 Ergebnisse der Berechnungen der effektiven Nachstromziffer

Mit Hilfe der aus den gemessenen Nachströmen berechneten effektiven Nachströme ist nach dem unter 3.3 beschriebenen Verfahren die effektive Nachstromziffer berechnet worden. In Abb. 3 ist die Verlauf der gemessenen und berechneten Nachstromziffern über dem Driftwinkel dargestellt.

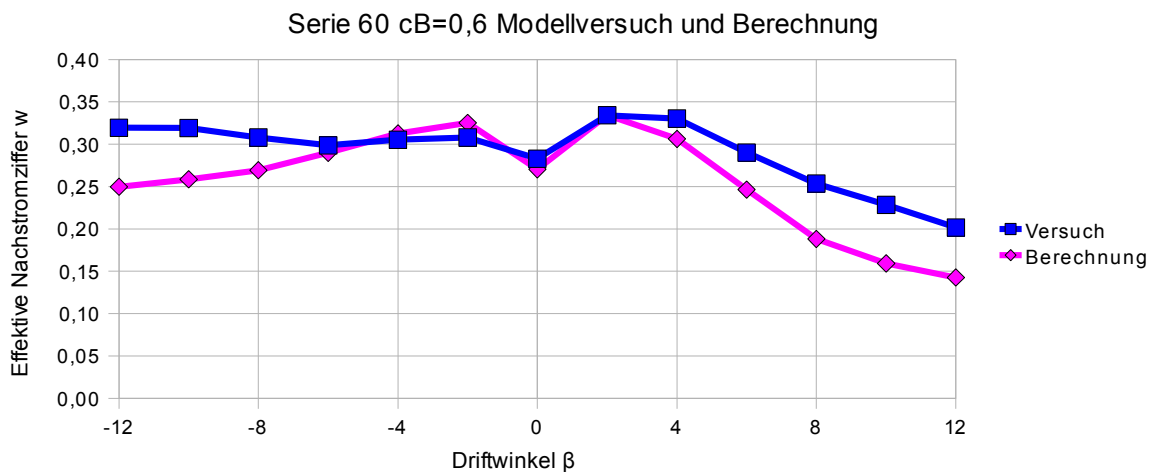


Abbildung 3: Gemessene und berechnete effektive Nachstromziffer für den Serie 60 Rumpf

Der Vergleich zwischen Messung und Berechnung zeigt, dass das vereinfachte Verfahren zur Bestimmung des effektiven Nachstroms für die Geradeausfahrt eine sehr gute Übereinstimmung liefert. Bei einem Driftwinkel von  $2^\circ$  kommt es zu einem Anstieg der effektiven Nachstromziffer, was im Versuch bestätigt wird. Die Entwicklung zu den beiden Seiten ist asymmetrisch, was dem Propellerdrehsinn geschuldet ist. Bei großen Driftwinkeln kommt es zu Abweichungen zwischen der Berechnung und der Messung. Als mögliche Ursachen für die Abweichungen sind der Einfluss des Ruders sowie die Tatsache zu nennen, dass die Richtung der abgehenden freien Wirbel in Wirbelgitterberechnung nicht für die Driftströmung korrigiert wird.

## 4.2 Zwei Propeller Schiff

Das zweite untersuchte Schiff ist eine RoRo-Fähre gebaut von der Flensburger Schiffbau Gesellschaft. Für dieses Schiff wurde im Rahmen des ROLL-S Vorhabens (vgl. [6]) ein umfangreiches Modellversuchsprogramm durchlaufen. So wurden in der Hamburgischen Schiffbau-Versuchsanstalt unter anderem Manövrierversuche mit Propeller und Ruder für unterschiedliche Driftwinkel durchgeführt.

### 4.2.1 Ergebnisse der Nachstromberechnungen

Zunächst wurde für die Modellkonfiguration für unterschiedliche Driftwinkel der nominelle Nachstrom berechnet. In Abb. 4 sind der nominelle Nachstrom für die Geradeausfahrt sowie für einen Driftwinkel von  $\beta=10^\circ$  für die Backbord- und die Steuerbord Seite dargestellt.

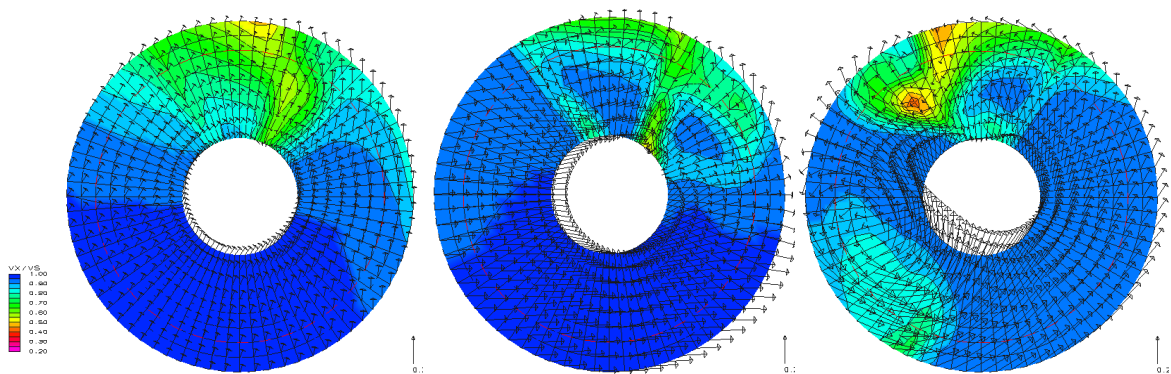


Abbildung 4: Nomineller berechneter Nachstrom für  $\beta=0^\circ$  sowie  $\beta=10^\circ$  (Backbord- und Steuerbordseite)

In diesem Fall kann der nominelle Nachstrom nur für die Geradeausfahrt verglichen werden. Die Übereinstimmung sowohl in qualitativer als auch quantitativer Sicht ist sehr gut. Wie den Nachströmen in Drift zu entnehmen ist, hat der außen liegende Propeller, in diesem Fall Backbord, eine nahezu ungestörte Zuströmung, wohingegen der Nachstrom auf der inneren Seite durch starke Wirbel vom Totholz sowie eine sehr geringe Querströmung geprägt ist. Durch Anwendung des oben beschriebenen Verfahrens wird aus den berechneten nominellen Nachströmen der effektive Nachstrom bestimmt.

### 4.2.2 Ergebnisse der Berechnungen der effektiven Nachstromziffer

In Abb. 5 ist der Verlauf der effektiven Nachstromziffer für die Backbord- (rot) und Steuerbordseite (grün) dargestellt. Es liegen lediglich Versuchswerte für die Steuerbordseite vor. Der Vergleich der Messergebnisse und der Berechnungsergebnisse zeigt qualitativ und quantitativ eine sehr gute Übereinstimmung. Untersuchungen von Propellern in homogener Schräganströmung bestätigen, dass die effektive Nachstromziffer für den Backbord Propeller, der in diesem Fall der äußere ist, nahezu konstant sein muss.

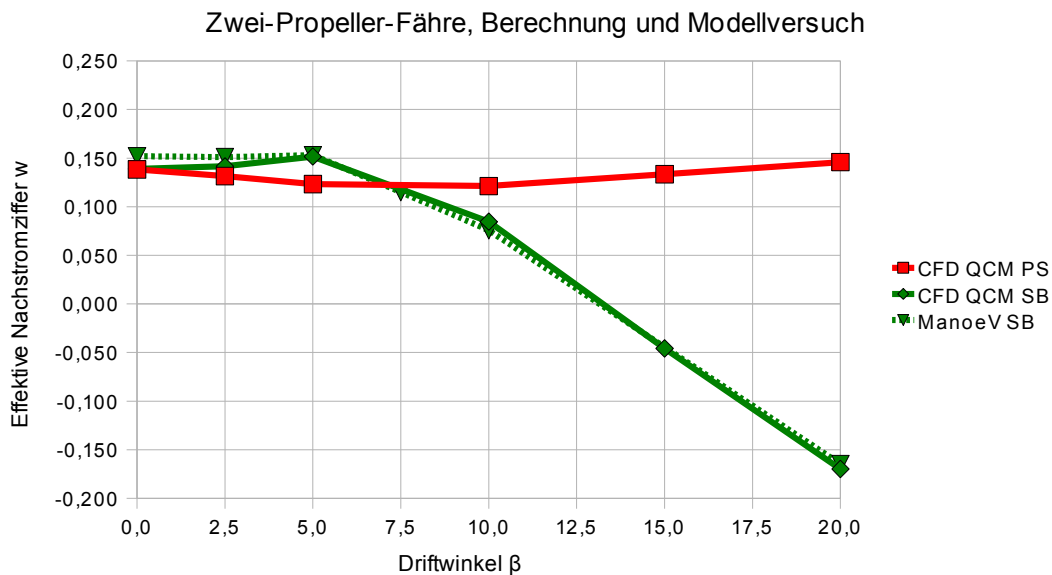


Abbildung 5: Vergleich der effektiven Nachstromziffern über dem Driftwinkel

## 5 Fazit und Ausblick

Es wurde ein vereinfachtes numerisches Verfahren zur Bestimmung des effektiven Nachstroms sowie der effektiven Nachstromziffer vorgestellt. Das Verfahren besitzt einen modularen Aufbau, so dass verschiedene Datenquellen sowie Methoden miteinander kombiniert werden können. Die Ergebnisse des Verfahrens wurden in zwei Fällen mit Modellversuchergebnissen verglichen. Die Übereinstimmung ist sehr zufriedenstellend. Ursächlich für die Abweichungen zwischen Messungen und Berechnungen sind zum einen die Vereinfachungen in dem vorgestellten Verfahren. Zum anderen müssen aber mögliche Fehler in den Modellversuchen mit als Ursache in Erwägung gezogen werden.

Im nächsten Schritt wird das Verfahren zur Überprüfung in weiteren Testfällen angewendet. Eine detaillierte Betrachtung der Strömungsverhältnisse soll hierbei eine Ursache für mögliche Abweichungen liefern. Für ausgesuchte Schiffe sollen Berechnungen für unterschiedliche Manövrierszustände, vor allem Drift- und Drehzustände sowie Überlagerungen der beiden, durchgeführt werden. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sollen zur Verbesserung einer Manövriersimulation eingesetzt werden.

## Literaturverzeichnis

- [1] Abels, W.: Zuverlässige Prognose propellererregter Druckschwankungen auf die Außenhaut mittels Korrelation direkter Berechnung. 2006
- [2] Krüger, S./ Manzke, M./ Rung, T./ Vorhölter, H.: Introduction of RANS-CFD into the Initial Design Process. 2009
- [3] Vorhölter, H./ Krüger, S.: Wake Field Analysis of a Drifting Ship with RANS-CFD-Methods. 2008
- [4] Streckwall, H.: Description of a Vortex Lattice Method for Propellers in Steady and Non Steady Flow. 1997
- [5] Todd, F.H.: Methodical experiments with models of single-screw merchant ships. 1963
- [6] Pereira, R.: Numerische Simulation von Kentervorgängen im Seegang. 2002
- [7] Oltmann, P.: Schrägschleppversuche mit einem Schiffsmodell der Serie 60. 1974
- [8] Oltmann, P.: Nachstrommessung mit einem Schiffsmodell der Serie 60. 1976

# Numerische Untersuchungen zur Grundberührung von Schiffen

G. Qiu\*, J. Grabe\*\*

\*Institut Geotechnik und Baubetrieb  
Harburger Schloßstraße 20  
e-mail: g.qiu@tuhh.de

\*\* Institut Geotechnik und Baubetrieb  
Harburger Schloßstraße 20  
e-mail: grabe@tuhh.de

## 1 Einleitung

Während des letzten Jahrhunderts gab es einen Anstieg in der Häufigkeit der Kollision von Schiffen mit den Böschungen der Wasserstraßen in Deutschland (Stede, 1997). Das ansteigende Auftreten von Schiffsunglücken bringt die Bauwerke, die in unmittelbarer Nähe des Ufers stehen, wie Tunnel und Brücken in Gefahr. Es ist notwendig eine Berechnungsmethode zu entwickeln, um den Bremsweg der Schiffe und die bei der Kollision auftretenden Kräfte rechnerisch ermitteln zu können.

Meier-Dörnberg (1984) führte theoretische und experimentelle Studien durch, um die Belastungen und den Bremsweg durch den Aufprall eines Schiffes zu ermitteln. Seine Studien basieren auf dem Prinzip der Impulserhaltung, sowie auf der Annahme einer starren Böschung.

Allerdings zeigen die Unfälle, dass die Schiffe in die Böschung eindringen (Kauther, 2007). Eine Vorhersage des Wegs des Eindringens ist unter Verwendung der Theorie von Meier-Dörnberg nicht möglich. Um das Verhalten des Bodens bei einer Schiffsanfahrung besser zu verstehen, hat die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) in den vergangenen Jahren Modell- und Naturversuche durchgeführt (Schuppener et al., 2005). In der vorliegenden Arbeit wird ein Naturversuch mit dem Testschiff „Gerda“ numerisch nachgerechnet. Hinsichtlich der im Boden auftretenden großen Verformungen wird die gekoppelte Euler-Lagrangesche-Methode verwendet. Die numerischen Ergebnisse werden mit den Ergebnissen aus dem Naturversuch verglichen.

## 2 Die gekoppelte Euler-Lagrangesche-Methode

Es gibt für die Beschreibung der Bewegung von Kontinua zwei unterschiedliche Arten der Betrachtungsweise, die als Formulierung nach Lagrange bzw. nach Euler bezeichnet werden.

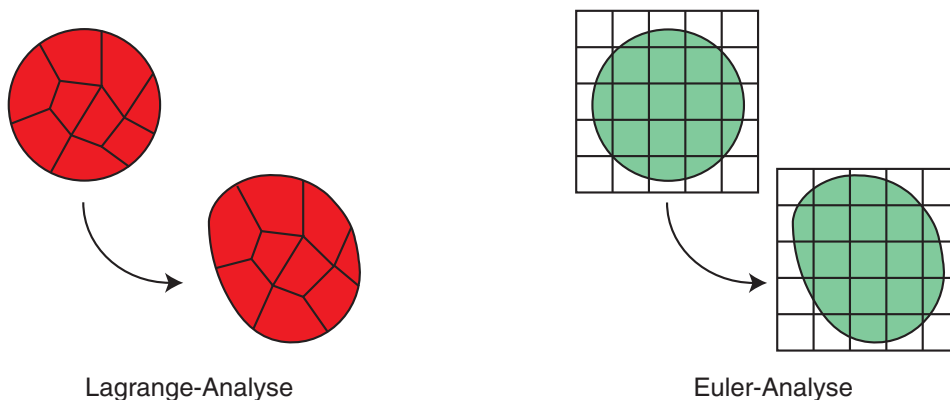


Abbildung 1 . Verformung von Kontinua in Lagrange-Analyse (links) und Euler-Analyse (rechts)

**Lagrange Formulierung:** Die Bewegung eines Teilchens wird als Funktion von den materiellen Koordinaten und der Zeit beschrieben, bzw. der Beobachter bewegt sich mit dem bewegten Körper mit. Die Lagrange Formulierung kommt häufig in der Festkörpermechanik zum Einsatz.

**Euler Formulierung:** Die Bewegung eines Teilchens wird als Funktion von den Ortskoordinaten und der Zeit beschrieben, bzw. der bewegte Körper wird in einem einzelnen, ortsfesten Punkt beobachtet, ohne sich dabei um die Wege einzelner Teilchen zu kümmern. Die Euler Formulierung wird häufig in der Strömungsmechanik eingesetzt.

Das FE-Programm Abaqus enthält als Version 6.8 das Tool CEL (Coupled Eulerian-Lagrangian), das die Kopplung von Eulerschen Elementen mit Lagrangen Elementen ermöglicht. Die Kopplung beider Arten erfolgt durch einen so genannten Allgemeinen Kontakt (General Contact). Reine Lagrange-Analysen zeigen häufig Netzverzerrungsprobleme in den Bereichen, wo große Verformungen auftreten. Diese CEL Methode hat die Vorteile der Euler- und Lagrange-Methode. Während das Schiff mit einem Lagrange-Netz diskretisiert wird, wird der Boden in einem Euler-Gebiet modelliert. In einer CEL-Analyse kann der Boden sich frei verformen. Die Reaktionskraft und die Bewegung des Schiffes kann wie mit konventionellen FE-Methoden durch ein Lagrange-Netz erfasst werden. Anhand von zwei Benchmarkproblemen zeigen Qiu et al. (2009), dass die CEL-Methode für die Lösung geotechnischer Randwertprobleme mit großen Verformungen sehr gut geeignet ist.

### 3 Numerische Simulation einer Schiffskollision

#### 3.1 Geometrie und Diskretisierung

Das Testschiff „Gerda“ hat eine Breite  $B$  von 8 m und eine Gesamtlänge  $L$  von 66,5 m. Mit einem Tiefgang  $h_0$  von 1,9 m hat es eine Masse  $m$  von 900 t. Um die Rechenzeit zu sparen wird lediglich die Hälfte des Buges simuliert.

Die Geometrie und das Netz des Buges sind in Abbildung 2 dargestellt. Das Schiff ist als ein Starrkörper modelliert. Der Schwerpunkt des Schiffes liegt in der Mitte des Schiffes und 0,5 m vom Schiffsboden entfernt. Das Schiff hat eine Anfangsgeschwindigkeit von 2,64 m/s und ist auf eine Kiessandböschung mit der Neigung 1:3 angefahren.

Die Böschung ist in einem Euler-Gebiet modelliert. Das Euler-Gebiet ist in zwei Teile aufgeteilt (siehe Abbildung 2): ein mit Boden-Material gefüllter Teil und ein materialfreier Teil (void). Der Freibord beträgt 1,0 m. Der Kiessand hat ein Wicht  $\gamma$  von 24,6 kN/m<sup>3</sup> und eine Auftriebswichte  $\gamma'$  von 14,6 kN/m<sup>3</sup>. Der Reibungswinkel des Kiessands  $\varphi_c$  beträgt 36°. Damit wird der Erdruchdruckbeiwert nach Jaky (1948) mit  $K_0 = 0,42$  angesetzt.

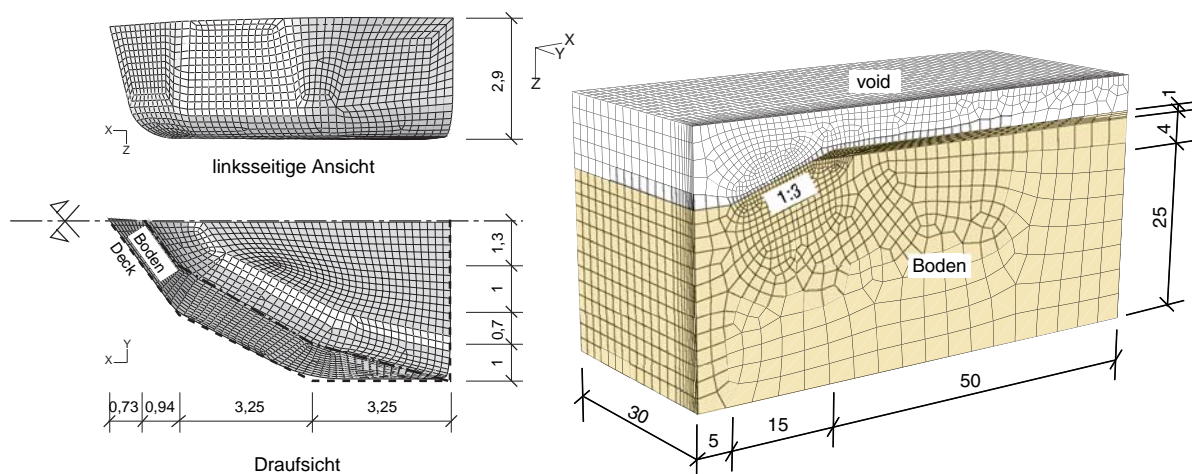


Abbildung 2. Geometrie und Netz des Schiffes „Gerda“ (links) und der Böschung (rechts); Einheit [m]

#### 3.2 Stoffgesetz

Der Boden selbst wird mit dem hypoplastischen Stoffgesetz nach von Wolffersdorff (1996) mit der

Erweiterung um die intergranularen Dehnungen nach Niemunis und Herle (1997) modelliert. Die Theorie von Hypoplastizität wurde an der Universität Karlsruhe insbesondere von Kolymbas (1991) und Gudehus (1996) entwickelt. Im Laufe der Zeit wurde das Stoffgesetz weiter von Wu (1992) und Bauer (1992) verbessert. Die hyperplastischen Parameter des Kiessandes sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1. Hyperplastische Parameter des Hochstetten Kieses nach Herle (1997)

Parameter	$\varphi_c$	$h_s$	$n$	$e_{d0}$	$e_{c0}$	$e_{i0}$	$\alpha$	$\beta$
	[°]	[MPa]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
Wert	36	32000	0.18	0.26	0.45	0.50	0.10	1.80
Parameter	$R$	$m_R$	$m_T$	$\beta_r$	$\chi$			
	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]			
Wert	$1 \cdot 10^{-4}$	5.0	2.0	0.50	6.0			

### 3.3 Kontaktformulierung

Die Formulierung der Interaktion zwischen der Böschung und dem Schiff erfolgt mit dem Allgemeinen Kontaktalgorithmus („general contact“). Dabei wird ein sogenannter „soft contact“ gemäß der Penalty-Methode verwendet. Hiermit ist die Simulation von großen Verformungen möglich. Das Reibungsverhalten zwischen Boden und Schiff wird mit dem linear elastischen, ideal plastischen Reibungsgesetz nach Coulomb beschrieben. Nach dem von der BAW durchgeführten Scherversuch beträgt der Reibungswinkel  $\delta$  dazwischen  $32^\circ$ . Der Reibungskoeffizient ist deshalb mit  $\tan \delta = 0,62$  vorgegeben.

### 3.4 Auftrieb

Kauther und Schuppener (2007) untersuchten das Auftriebsverhalten von verschiedenen Schiffstypen. Aus ihrer Arbeit kann erschlossen werden, dass es bei der Ermittlung des Auftriebs eines Schiffes möglich ist, die Geometrie eines Schiffes zu einem Quader zu vereinfachen. Solange das Schiff nicht zu weit aus dem Wasser reicht, kann die Beziehung zwischen dem Auftriebsmoment und dem Drehwinkel als lineare Funktion angenommen werden. Das Wasser wird nicht in der Simulation modelliert. Der Auftrieb wird mit einer linearen Feder in vertikaler Richtung und einer Drehfeder im Schwerpunkt des Schiffes berücksichtigt (siehe Abbildung 3).

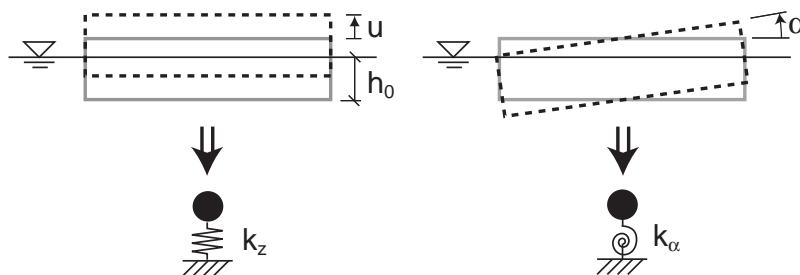


Abbildung 3. Berücksichtigen des Auftriebs mittels einer linearen Feder (links) und einer Drehfeder (rechts)

Die Bewegung eines starren Schiffes kann in Translation und Rotation aufgeteilt werden. Der translatorische Teil des Auftriebes  $A_z$  ergibt sich:

$$A_z = \frac{mg}{h_0} u, \quad (2)$$

wobei  $m$  die Masse von dem Schiff,  $h_0$  der Tiefgang und  $u$  die Bewegung vom Schiff in vertikaler Richtung ist. Damit kann die Federsteifigkeit in vertikaler Richtung mit:

$$k_z = \frac{mg}{h_0} \quad (3)$$

berechnet werden. Das Moment des Auftriebes  $M_\alpha$  ergibt sich:

$$M_\alpha = \gamma_w \alpha \frac{BL^3}{12}, \quad (4)$$

wobei  $\gamma_w$  die Wichte des Wassers,  $B$  die Breite,  $L$  die Länge und  $\alpha$  der Drehwinkel des Schiffes ist. Es ergibt sich deshalb:

$$M_\alpha = \frac{mgL^2}{12h_0} \alpha. \quad (5)$$

Solange sich der Bug des Schiffes nicht zu weit aus dem Wasser bewegt, kann die Steifigkeit der Drehfeder wie folgt berechnet werden:

$$k_\alpha = \frac{mgL^2}{12h_0}. \quad (6)$$

## 4 Ergebnisse

In dem Feldversuch wurden die Beschleunigungen in vertikaler und horizontaler Richtung mittels jeweils zwei Sensoren gemessen, welche am Bug und am Heck des Schiffes „Gerda“ befestigt wurden. Aus der gemessenen Beschleunigung ermittelten Schuppener et al. (2006) die Verschiebung des Kontaktpunktes und die Kontaktkraft.

In Abbildung 4 wird der Konturplot der vertikalen Spannungen nach der Kollision von etwa 2,5 s dargestellt. Ein Anstieg der vertikalen Spannungen unter dem Bug ist eindeutig sichtbar. Bei der Kollision dringt das Schiff in die Böschung ein. Als Folge davon verschiebt sich der Boden aufwärts und seitwärts.

In Abbildung 5 und 6 sind die Ergebnisse der numerischen Simulation mit den Ergebnissen aus dem Feldversuch gegenüber dargestellt. Die numerischen Ergebnisse stimmen gut mit der gemessenen Verschiebung des Kontaktpunktes überein. Nach der Kollision stoppt das Schiff innerhalb von 2,4 s. Aus dem Feldversuch werden die Endwerte der Verschiebung von 3,83 m in horizontaler Richtung und 0,85 m in vertikaler Richtung ermittelt. Die numerische Simulation zeigt einen Bremsweg von 3,96 m in horizontaler und 0,77 m in vertikaler Richtung. Mit Hilfe der analytischen Methode nach Meier-Dörnberg (1984) wird ein horizontaler Bremsweg von 3,1 m und ein vertikaler Bremsweg von 0,99 m berechnet. In diesem Fall ist die Prognose der numerischen Methode genauer als die analytische Lösung.

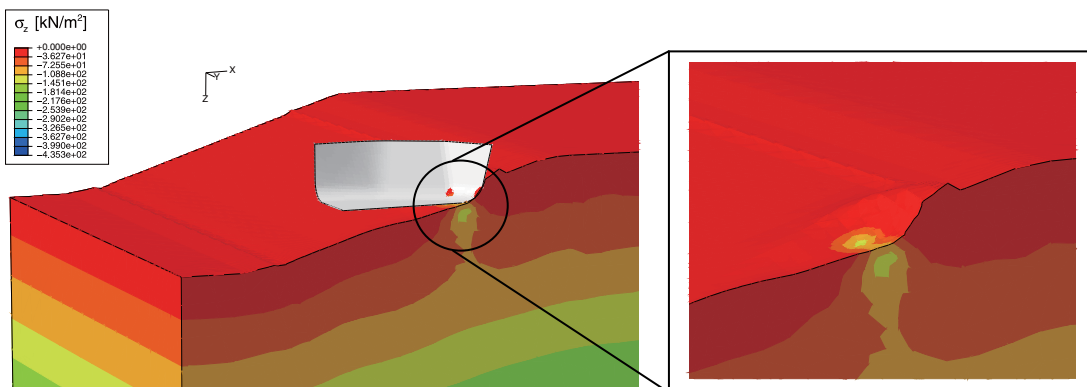


Abbildung 4. Konturdiagramm des vertikalen Spannungsverlaufes und Verformung der Böschung

Abbildung 5 zeigt, dass die vertikale Verschiebung in den ersten 0,5 s nahezu null bleibt. Dies

bedeutet, dass das Schiff nach dem Kontakt mit der Böschung in den Boden horizontal eindringt. Die Annahme einer starren Böschung nach Meier-Dörnberg (1984) ist ungeeignet.

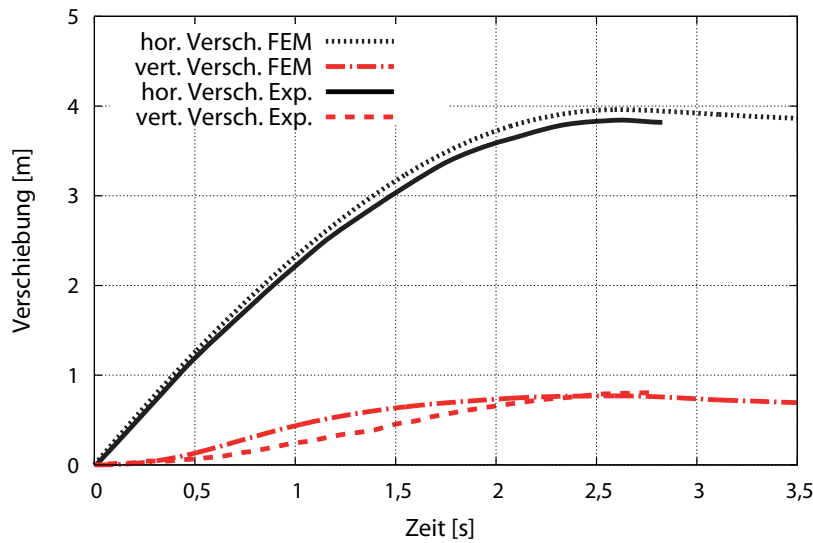


Abbildung 5. Vergleich der Verschiebungen des Angriffspunktes zwischen numerischer Analyse und der experimentellen Prüfdaten entsprechend BAW

In Abbildung 6 werden die Kontaktkräfte aus der eigenen numerischen Untersuchung mit der Lösung aus der experimentellen Untersuchung verglichen. Es kann aus den beiden Untersuchungen festgestellt werden, dass die maximalen Kontaktkräfte in vertikaler und horizontaler Richtung bei etwa 1200 kN liegen. Gute Übereinstimmung der vertikalen Kontaktkraft aus der numerischen Lösung und der experimentellen Lösung kann festgestellt werden. Einige Unterschiede können zwischen den Kurven der horizontalen Kontaktkräfte gefunden werden. Im Bezug auf die numerischen Ergebnisse können zwei verschiedene Phasen auseinandergehalten werden: die dynamische Phase (0 – 0,8 s) und die quasistatische Phase (nach 0,8 s). In der dynamischen Phase passiert der Stoß des Schiffes in den Boden. Je höher die Geschwindigkeit des Schiffes ist, desto höher ist die Stoßkraft. Neben der Geschwindigkeit des Schiffes hängt die Stoßkraft in dieser Phase noch von dem Typ und der Festigkeit des Buges ab. Ein Schiff mit Pontonbug wird einen stärkeren Stoß als ein Schiff mit Spitzbug zeigen.

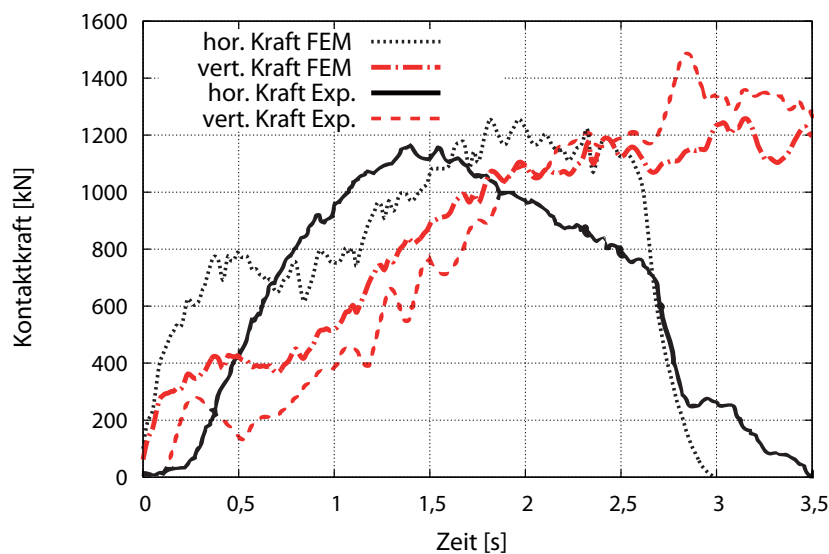


Abbildung 6. Vergleich der horizontalen und vertikalen Kontaktkraft zwischen der FEM Simulation und der experimentellen Daten der BAW

In dem numerischen Model ist das Schiff als ein Starrkörper diskretisiert. Daher ist die Reaktion der FE-Lösung viel kräftiger dargestellt gegenüber der aus dem Feldversuch. In der quasistatischen Phase besteht die Kontaktkraft aus dem passiven Erddruck der Böschung und der Reibung zwischen dem Schiff und dem Boden. Die kinetische Energie nimmt mit steigender Penetration ab, bis das Schiff stoppt.

## 5 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird der von der BAW durchgeführte Naturversuch mittels der gekoppelten Euler-Lagrange Methode nachgerechnet. Der Bremsweg und die Kontaktkraft werden durch die numerische Berechnung sehr gut wiedergegeben. Gegenüber der konventionellen analytischen Methode ist eine Vorhersage des Eindringwegs eines Schiffes in die Böschung mit Hilfe der FE-Methode möglich. Außerdem sind die FE-Lösungen viel genauer als die analytische Lösung nach Meier-Dörnberg (1984).

## 6 Danksagungen

Die vorliegenden Untersuchungen entstanden im Rahmen der Forschungen innerhalb des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Graduiertenkollegs GRK 1096 „Seehäfen für Containerschiffe zukünftiger Generationen“. Der DFG sei an dieser Stelle für die finanzielle Unterstützung gedankt.

## Literatur

- Bauer, E. (1992). "Zum mechanischen Verhalten granularer Stoffe unter vorwiegend ödometrischer Beanspruchung." *Dissertation, Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Karlsruhe*, Heft 130.
- Dassault Systèmes, (2008). "ABAQUS, Version 6.8EF Documentation".
- Feddersen, G. and Lehmann, E. (2007). "The Effects to a Container Ship due to Soft Grounding." *4<sup>th</sup> ICCGS, Hamburg, Germany*.
- Gudehus, G. (1996). "A comprehensive constitutive equation for granular materials." *Soils and Foundations*, 36(11): 1-12.
- Herle, I., 1997. "Hypoplastizität und Granulometrie einfacher Korngerüste." *Dissertation, Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Karlsruhe*, Heft 142.
- Jaky, J. (1948). "Pressure in silos." *Proc 2nd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rotterdam, Vol. 1: 103-107.
- Kauther, R. and Schuppener, B. (2007). "Physical modeling of ship collisions with waterway embankments." *4<sup>th</sup> ICCGS, Hamburg, Germany*.
- Kolymbas, D. (1991). "Computer-aided design of constitutive laws." *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 15: 593-604.
- Meier-Dörnberg, K.-E. (1984). "Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Ermittlung statischer Ersatzlasten für den Anprall von Schiffen an Bauwerken." *TU-Darmstadt*.
- Niemunis, A. und Herle, I. (1997). "Hypoplastic model for cohesionless soils with elastic strain range." *Mechanics of frictional and cohesive materials*, 2(4):279-299.
- Noh, W., 1964. "CEL: A time-dependent, two-spacedimensional, coupled Eulerian-lagrangian code." *Methods in Computational Physics*, Vol. 3 Fundamental Methods in Hydrodynamics, pp. 117–179.

- Qiu, G., Henke, S. and Grabe, J. (2009). "Applications of Coupled Eulerian-Lagrangian method to geotechnical problems with large deformations." *Proceeding of SIMULIA Customer Conference 2009, London, UK*: 420-435.
- Schuppener, B., Kauther, R., Kramer, H. and Vorbau, J. (2005). "Schiffsanfahrungen an Uferböschungen." *Veröffentlichungen des Grundbauinstitutes der TU Berlin*, Heft Nr. 38, Berlin 2005, 79-102.
- Schuppener, B., Kauther, R., Kramer, H. and Vorbau, J. (2006). "Ship collisions with sloped banks of waterways – an approach to determine the stopping distance." *Proceedings of the 31<sup>st</sup> PIANC-Congress, Estoril, Portugal*.
- Stede, J. (1997). "Binnenschifffahrtsunfälle 1991 bis 1996." *St.BA, Wirtschaft und Statistik* 12.
- von Wolffersdorff, P.-A. (1996). "A hypoplastic relation for granular material with a predefined limit state surface." *Mechanics of cohesive-fractional materials*, 1:251-271.
- Wu, W. (1992). "Hypoplastizität als mathematisches Modell zum mechanischen Verhalten granularer Stoffe." *Dissertation, Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Karlsruhe*, Heft 129.

# Betriebsgrenzen von Ladeoperationen im Seegang

Jürgen Reimers\*, Katrin Ellermann\*\*

Institut für Fluidodynamik und Schiffstheorie  
Schwarzenbergstraße 95 C  
21073 Hamburg  
e-mails: \*j.reimers@tu-harburg.de  
\*\*ellermann@tu-harburg.de

## 1 Einleitung

Auch wenn sich die Weltwirtschaft derzeit in einer Phase des konjunkturellen Abschwungs befindet, ist zu erwarten, dass der Trend zu insgesamt mehr Schiffs- und Offshoreoperationen langfristig anhalten wird. Zugleich nimmt hierbei auch die Zahl der erforderlichen Ladeoperationen aus Versorgungs- oder Wartungsgründen zu. Den Haupteinfluss auf die Bewegungen der meisten Strukturen auf See stellt die Wellenanregung dar. Deswegen sind viele Operationen auf relativ ruhige See beschränkt, um Unfälle zu vermeiden. Diese Arbeit legt einen besonderen Schwerpunkt auf die Seegangsanregung. Hierbei wird insbesondere auf die Bedeutung des Seegangs als stochastischer Anregung eingegangen, die es erschwert, konkrete Vorhersagen für das dynamische Verhalten eines Mehrkörpersystems während einer Operation zu machen. Die Erfordernis einer statistischen Herangehensweise wird herausgearbeitet. Als modelliertes System wird eine Ladeoperation mit Hilfe eines Mehrkörpermodells simuliert. Zur Modellierung wird ein Potentialverfahren eingesetzt, das durch eigene Methoden ergänzt wurde, um neben der hydrodynamischen Kopplung auch Pendelbewegungen, Reibungs- und Stoßeinflüsse berücksichtigen zu können.

Das Ziel der Arbeit ist eine Einschätzung für Grenzen des sicheren Betriebs von Ladeoperationen zu geben. Hierzu wird das untersuchte System zunächst mittels Monte Carlo Simulation statistisch untersucht. Abschließend wird am Beispiel der Ladeoperation das neue Verfahren der Prozessfähigkeit vorgestellt, mit dem die Wahrscheinlichkeit von Kollisionen bei Operationen im Seegang abgeschätzt wird. Dieses wird hierbei mit den aus der Qualitätssicherung gängigen Verfahren der Prozessfähigkeitsuntersuchung und Spannweitenkennwertuntersuchung verglichen.

## 2 Statistische Analyse

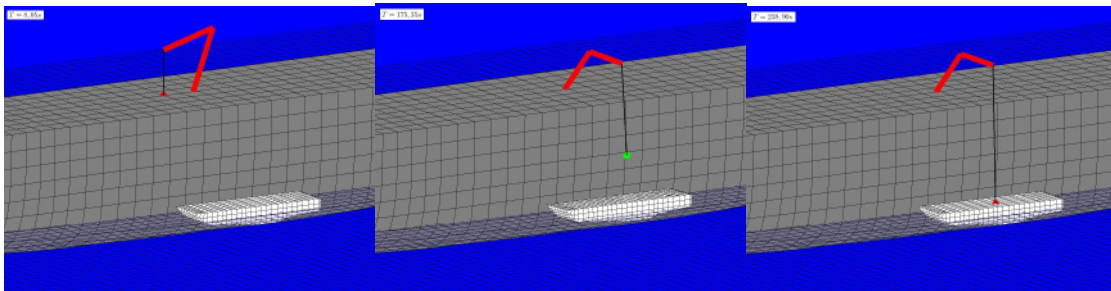


Bild 1: Ladeoperation (Soproni, 2009)

Wir simulieren eine Reihe von Ladeoperationen zwischen einem großen und einem kleinen Schiff über einen Bordkran des großen Schiffs (siehe Bild 1). Die hydrodynamische Simulation im Zeitbereich wird mit dem Programm Ansys AQWA durchgeführt. Diese basiert auf der Cummins-Gleichung [1] für Impulsantwortfunktionen, wie in Journé [4] oder Reimers und Ellermann [6] beschrieben. AQWA ermöglicht es, über eine Schnittstelle eigenen Programmcode in FORTRAN ausführen zu lassen. Diese Schnittstelle wurde verwendet, um die Kransteuerung und die Pendelsimulation umzusetzen. Es handelt sich um eine nichtlineare Mehrkörpersimulation. Die

genaue Simulation der Strukturen kann der Arbeit von Soproni [11], oder der Veröffentlichung von Reimers, Soproni und Ellermann entnommen werden [7]. Jede einzelne Simulation startet mit identischen Ausgangspositionen für die Schiffe, den Kran und die Ladung. Die Wellenanregung wird über ein JONSWAP-Spektrum realisiert [3], mit einer Wellenhöhe von 1.25 m, einer signifikanten Wellenperiode von  $T_0=7.5$  s, und einer Wellenrichtung von 160 Grad von achtern. Es werden 50 Einzelwellen superponiert. Die Phasenlage der Einzelwellen des Seegangs sind für jede Simulation zufällig variiert. Die Nullposition ist der Mittelspant des großen Schiffs. Bei der Operation wird eine Last auf dem kleinen Schiff abgesetzt, wobei der erwartete Abladepunkt befindet sich etwa 0.3 m in Bugrichtung und 16.2 m auf Backbord. Das Koordinatensystem ist gewählt wie in Bild 2 dargestellt.

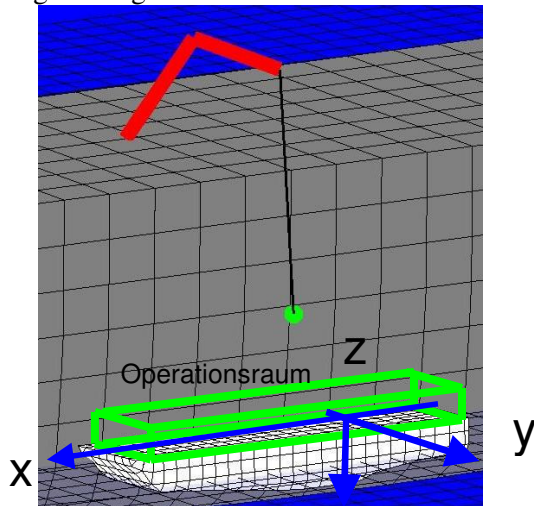


Bild 2: Koordinatensystem und betrachteter Operationsraum

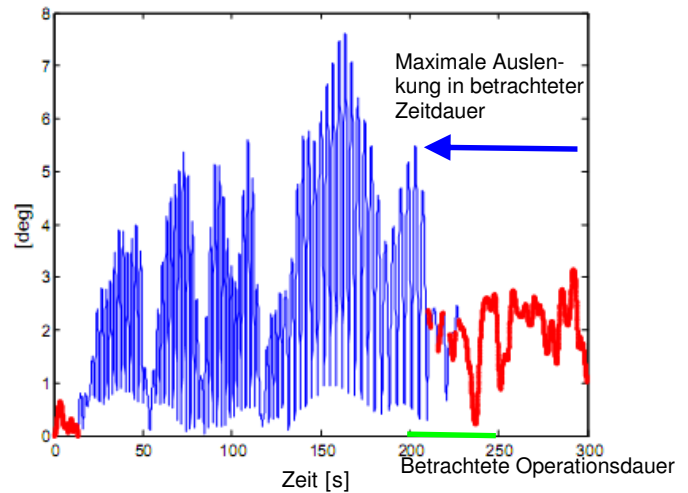


Bild 3: Bewegung des Pendels (Soproni 2009)

Bild 3 zeigt das Verhalten des Pendels während einer Simulation der Ladeoperation anhand des Mittelwertes der Pendelwinkel  $\phi$  und  $\psi$ . Die dicke rote Linie repräsentiert hierbei Kontakt mit einer Kontrollfläche, also zunächst dem Deck des großen Schiffs, später dem des kleineren Schiffes. Die blaue Linie steht für eine freie Pendelbewegung. Wir wählen als Datenbasis für die Untersuchung der Ladeoperation die maximalen Auslenkungen der Ladung zwischen 200 und 250 s. In diesem Zeitbereich befindet sich die Ladung in einer Höhe von weniger als 2,5 m über Deck des kleinen Schiffes. Während sich die Ladung im dem grün dargestellten Operationsraum befindet (siehe Bild 2), sind Kollisionen mit auf dem Deck befindlichen Hindernissen besonders wahrscheinlich. Die betrachtete Operationsdauer und der maximale Pendelwinkel sind in Bild 3 dargestellt. Wir betrachten im Folgenden die maximalen Auslenkungen in x- und y-Richtung. Es wurden 1600 Ladeoperationen von jeweils 300 s Zeitdauer durchgerechnet.

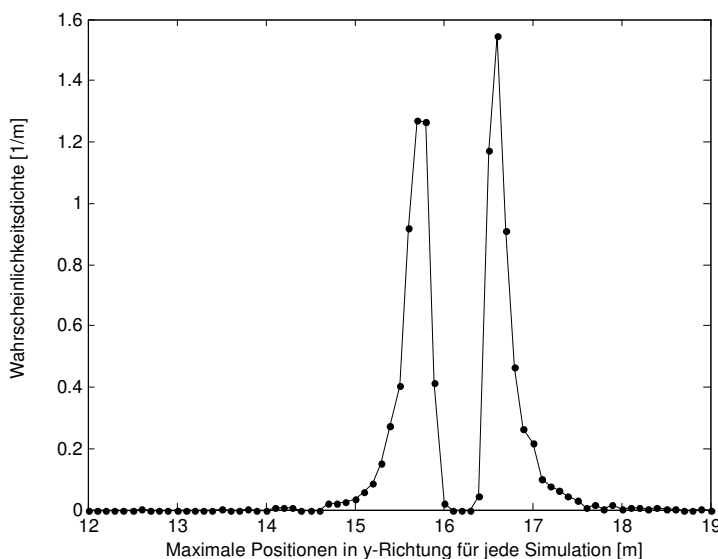


Bild 4: Approximierte Wahrscheinlichkeitsdichte der Auslenkung in y-Richtung

Die Wahrscheinlichkeitsdichte der maximalen Auslenkungen in Richtung Backbord und Steuerbord sind in Bild 4 dargestellt, es ergibt sich für jede Achsenrichtung eine doppelte Kurve. Deutlich wird die große Varianz der Maximalwerte der Ladungsauslenkung während der untersuchten Zeitperiode. Die Ergebnisse in Steuerbord und Backbord unterscheiden sich, weil sich die Pendellänge während der Operation ständig verändert. Die Ergebnisse in Bugrichtung, die im Folgenden genauer untersucht werden, sind in Bild 5 dargestellt

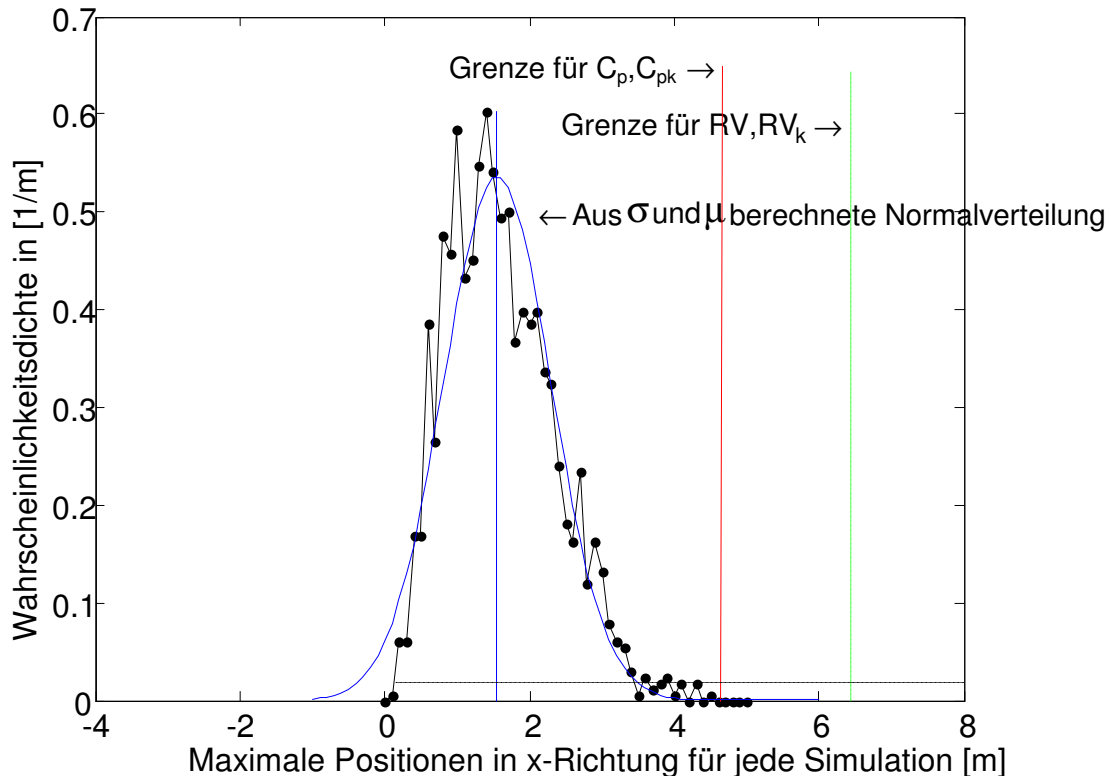


Bild 5: Wahrscheinlichkeitsdichte für die maximalen Auslenkungen in Bug-Richtung

Da wir keine Regelung benutzen, um die Pendelauslenkung zu kompensieren, ergibt sich eine sehr starke Streuung der möglichen maximalen Auslenkungen des Pendels. Dies verdeutlicht, wie sich ein stochastischer Seegang auf die Vorhersagbarkeit von Positionen und Ergebnissen bei Operationen auf See auswirken muss. In diesem Beispiel wurde eine statistische Seeganganregung ausgewählt. Hierbei wurde ein Parameter, die Phasenverschiebung, zufällig ausgewählt. Gegenüber diesem vereinfachten Modell weist ein realer Seegang sehr viel mehr zufällige Varianten auf: Selbst bei Betrachtung kurzer Zeiträume kann sich die spektrale Zusammensetzung deutlich ändern (siehe [5] und [8]). In einem Superpositionsmodell ließe sich dieses durch zufällige Variationen der Wellenfrequenzen, Phasenlagen, Laufrichtungen, aber auch des Spektrums realisieren. Es wird deutlich, dass in einem stochastischen Seegang einzelne Simulationen wichtiger Teiloperationen nicht ausreichend sind, um Risiken einer Operation einschätzen zu können.

Wie in Bild 5 an der gestrichelten schwarzen Linie abgelesen werden kann ist bei der dargestellten Operation z.B. eine maximale Auslenkung von 0,3 m ebenso wahrscheinlich wie 3,8 m. Natürlich müssen für beide Werte vollkommen unterschiedliche Maßnahmen ergriffen werden.

Hiermit stellt sich die Frage, wie sichere Operationsbedingungen sichergestellt, oder zumindest mit hoher Wahrscheinlichkeit erreicht werden können. Eine mögliche Wahl, die in dieser Arbeit diskutiert wird, könnte hierbei die Verwendung von Prozessfähigkeitsindizes sein. Diese Technik wird in der Qualitätssicherung weithin verwendet und vergleicht das Ergebnis eines Prozesses, der als stabil angenommen wird, mit den Prozessspezifikationen. Es wird ein Index als Verhältnis zwischen Prozessspezifikationen (Prozessgrenzen) und der Streuung des Prozesses (6 Prozessstandardabweichungen) gebildet, der ein Maß für die Erfüllung der Spezifikationen darstellt. Es wird angenommen, dass das untersuchte Prozessergebnis normalverteilt und zentriert ist:

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma}, \quad (1)$$

mit  $\sigma$  als der Prozessstandardabweichung, der oberen Grenze USL und der unteren Grenze LSL. Für fähige Prozesse fallen alle Messungen in die Spezifikationsgrenzen wie in Bild 6 gezeigt.

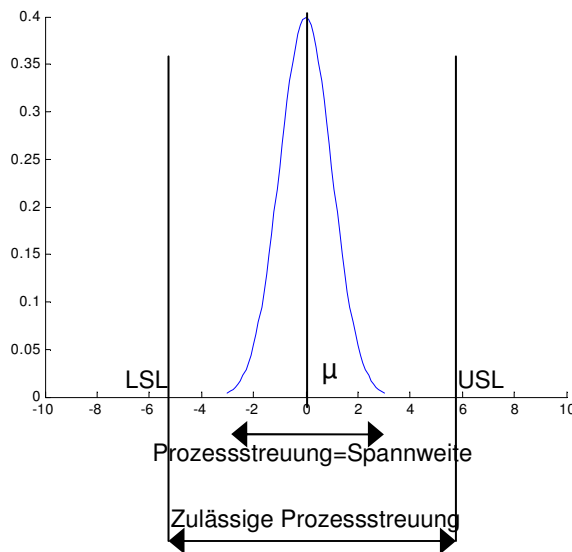


Bild 6: Prozessfähigkeitsindex, zulässige Prozessstreuung

Je größer der Abstand zwischen den Grenzen der Spezifikation und der Verteilung ist, um so größer wird der Prozessfähigkeitsindex. Für unseren Fall ist

$$C_{p,upper} = \frac{USL - \mu}{3\sigma}, \quad (2)$$

bezogen auf den Mittelwert  $\mu$  ausreichend, weil die Verteilungen für die maximale Auslenkung in Bug, Heck, Steuerbord- und Backbordrichtung jeweils nur eine obere, oder untere Grenze aufweisen. Der Fähigkeitsindex

$$C_{pk} = \min \left[ \frac{USL - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LSL}{3\sigma} \right] \quad (3)$$

wird verwendet, um zu messen, inwieweit der Mittelpunkt des Prozesses zentriert ist, da für einen Fall mangelnder Zentrierung des Prozesses  $C_p$  die Prozessfähigkeit überschätzen kann. Fällt der Prozessmittelpunkt außerhalb der Spezifikationsgrenzen, ist  $C_{pk} < 0$ . Ist die Verteilung normalverteilt, dann

bedeutet ein  $C_p$ -Wert von 1, dass

es mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,27%, zu einer Verletzung der spezifizierten Grenzen kommen wird. In diesem Fall beträgt der Abstand zwischen oberer und unterer Grenze  $6\sigma$ , oder in unserem Fall  $3\sigma$  Abstand von  $\mu$ . Für einen Wert von  $C_p = 1,33$  (Entfernung  $8\sigma$ ) ist diese Wahrscheinlichkeit bei  $63,3 \cdot 10^{-6}$ . Die farbigen Markierungen in Bild 5 zeigen jeweils die obere Grenze für  $C_p = 1,38$ .

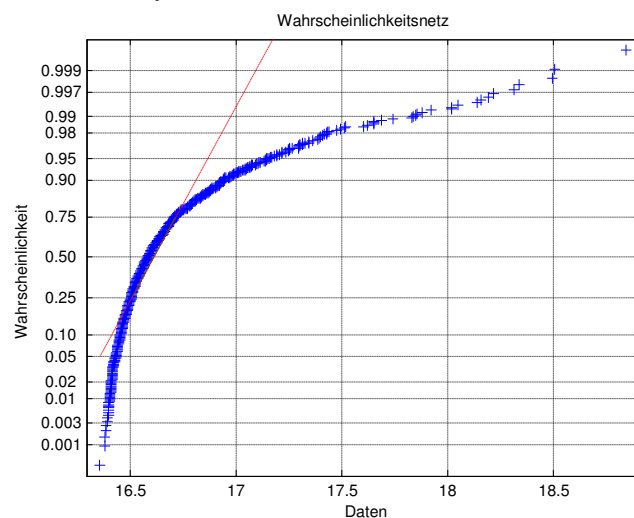


Bild 7: Wahrscheinlichkeitsnetz für maximale Bewegungen in Backbord-Richtung

Bild 7 zeigt das Wahrscheinlichkeitsnetz für die Bewegung in y-Richtung. Für einen normalverteilten Prozess würden sich die Werte der rot gestrichelten Linie annähern.

In diesem Fall handelt es sich nicht um eine Normalverteilung, da Extremwerte zu häufig auftauchen. Zusätzlich zu einer visuellen Prüfung wie in Bild 7 kann ein Test auf Normalverteilung erfolgen. Tests mit hoher Güte sind hierbei Shapiro-Wilks, Shapiro-Francia, Ryan-Joiner, Anderson-Darling und Cramér-von Mises (siehe [10]). Eine hohe Güte wie beim Anderson-Darling-Test [12] ist erforderlich, um ein geringes Risiko für die fehlerhafte Testentscheidung „Messreihe ist normalverteilt“ zu haben, obwohl die Messreihe nicht normalverteilt ist. Tests mit schlechterer Güte sollten nicht verwendet werden, da das Risiko einer falschen Testentscheidung zu groß ist. Ein Anderson-Darling-Test, ist in Bild 8 für die x-Bewegung abgebildet. Zusätzlich sind auch wesentliche Informationen über die Verteilung wie Schiefe und Kurtosis im Bild 8 enthalten.

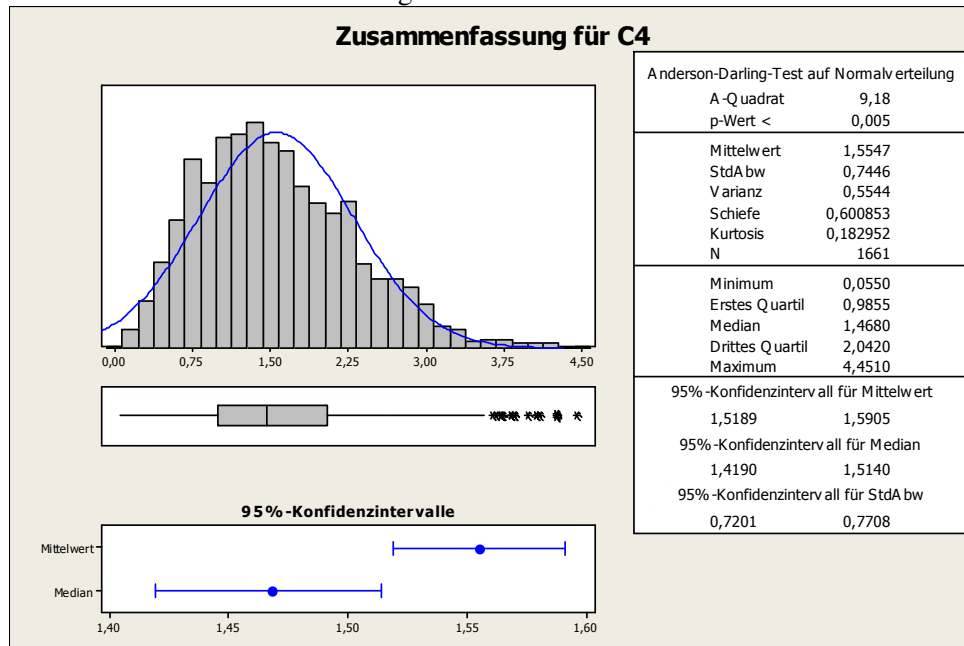


Bild 8: Anderson-Darling-Test auf Normalverteilung

Die Übereinstimmung der Verteilung mit der Normalverteilung ist umso besser, je kleiner der AD-Wert ist. Es muss festgelegt werden, für welchen AD-Wert eine Übereinstimmung als „gut“ angenommen werden kann. Für einen Wert von 1,029 entstammen die geprüften Werte mit 99% Wahrscheinlichkeit nicht aus einem normalverteilten Prozess. Bei dem hier vorgestellten Beispiel kann aufgrund des AD-Wertes von 9,18 daher nicht von einer Normalverteilung ausgegangen werden.

Die Verwendung von Prozessfähigkeitsindizes ist stark eingeschränkt, wenn die untersuchten Verteilung sich stark von einer Normalverteilung unterscheiden, bzw. sich nicht in eine Normalverteilung transformieren lassen. Die Ergebnisse, die das Verfahren liefert, sind dann nicht zuverlässig. Dies zeigt sich im Beispiel an der die obere Grenze markierenden roten Linie in Bild 5. Es tritt zwar keine Verletzung der Grenzen auf, aber die maximalen Werte für die untersuchte Stichprobe von 1661 Simulationen sind sehr nahe an der oberen Grenze. Eine sichere Aussage über die Überschreitungswahrscheinlichkeit dieser Grenze, die bei  $63,3 \cdot 10^{-6}$  liegen müsste, ist für diesen Fall nicht möglich. Auch ist im Bild 5 zu erkennen, dass die nahe der Grenze liegenden Werte der Stichprobe Normalverteilung zu häufig vorkommen. Hier sind Prozessfähigkeitsindizes offensichtlich nicht zuverlässig und konservativ genug. Das Verfahren ist ungeeignet.

Eine Möglichkeit, dennoch Prozessfähigkeitsindizes zu benutzen stellt die Johnson-Transformation [9] dar. Hierbei wird die Ursprungsverteilung so transformiert, dass sich die Daten mit einer Normalverteilung beschreiben lassen. Für die Transformation aller Daten wird eine Transformationsfunktion errechnet. Die Transformation wird auch auf die vorgegebenen Grenzwerte angewendet. Die Transformationsfunktion für das Beispiel ist in Bild 9 angegeben.

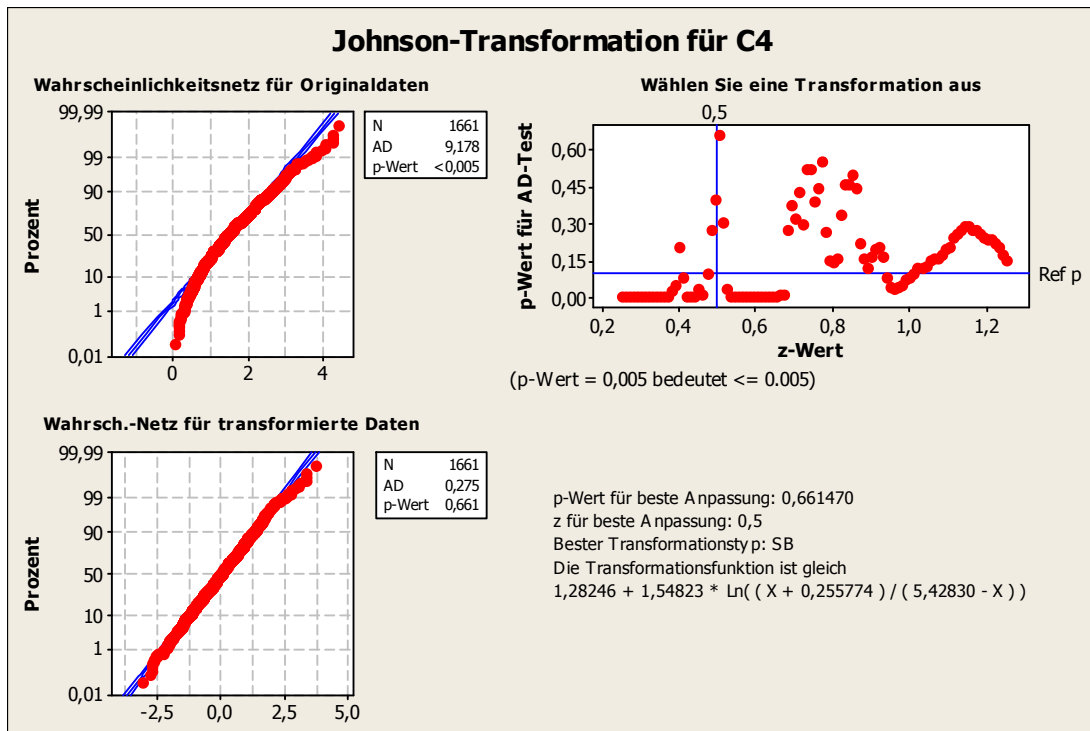


Bild 9: Johnson-Transformation

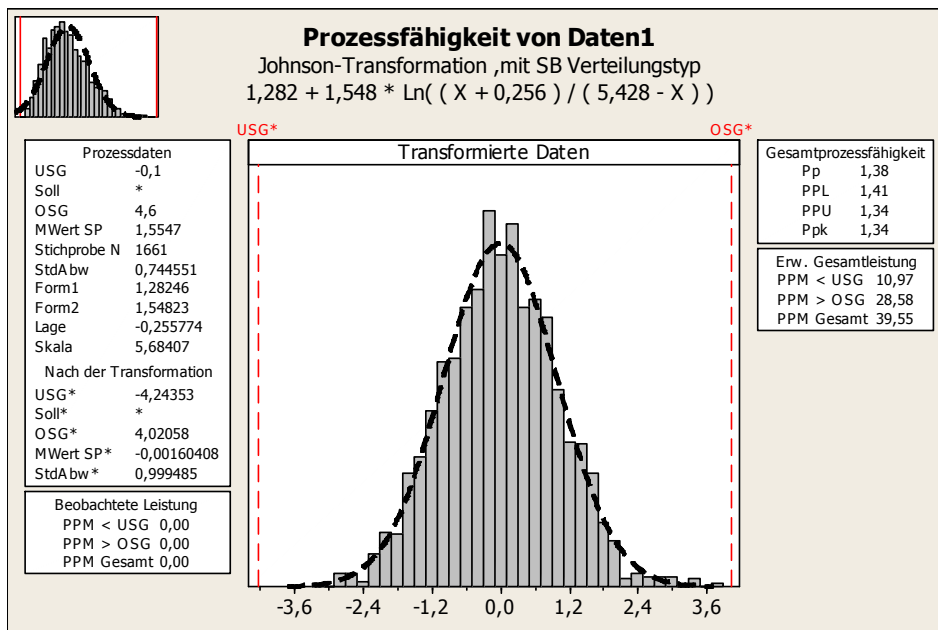


Bild 10: Transformierte Verteilung

Die resultierende Funktion ist in Bild 10 dargestellt. Die Prozessfähigkeitsuntersuchung ergibt dann für einen Grenzwert von 4,6 m in Bugrichtung einen  $C_{pJohnson}$  von 1,38 und ein  $C_{pkJohnson}$  von 1,34. Diese Werte liegen jedoch nahe an den zuvor direkt für  $C_p$  und  $C_{pk}$  ermittelten Werten, der Abstand zur Grenze ist noch geringer. Eine Johnson-Transformation ist somit ebensowenig geeignet, um überzeugend eine Grenze der Operation aufzuzeigen.

Hanrath [2] schlägt wegen der Defizite der Prozessfähigkeitskennzahlen die Verwendung eines weiteren Prozessindizepaars vor, die der Spannweitenkennwerte

$$RV = \frac{R}{USL - LSL} \quad (4)$$

und

$$RV_k = \text{Max} \left\{ \frac{x_{\max} - \tilde{x}}{USL - \tilde{x}}; \frac{\tilde{x} - x_{\min}}{\tilde{x} - LSL} \right\}. \quad (5)$$

Die Spannweite der Datenwerte wird mit  $R$  bezeichnet, dies entspricht der Differenz zwischen höchstem und niedrigsten Wert in der Stichprobe.  $RV$  hat hierbei eine ähnliche Bedeutung wie  $C_p$ ,  $RV_k$  ähnelt in der Aussage  $C_{pk}$ . Diese Indizes liefern verwendbare Informationen über den Prozess auch ohne die Notwendigkeit einer Normalverteilung. Anstelle der Verwendung des Mittelwertes  $\mu$  wird für  $RV_k$  der Median  $\tilde{x}$  verwendet. Dieser hat den Vorteil, nicht so sensibel auf Ausreißer zu reagieren wie der Mittelwert. Für größere Spannweitenkennwerte sinkt die Prozessfähigkeit. Zum Beispiel würde für eine Stichprobengröße von 100 Messwerten bei einer Normalverteilung ein Spannweitenkennwert von  $RV = 63\%$  einem  $C_p = 1.33$  entsprechen. Für nichtnormale Verteilungen zeigen sich  $RV$  und  $RV_k$  konservativer als  $C_p$  und  $C_{pk}$ , wie die grüne Linie in Bild 5 zeigt. Bei unserem Beispiel einer Ladeoperation entsprechen die eingezeichneten Linien einem  $RV = 0.45$  und einem  $RV_k = 0.6$ . Dies sind mehr als 2m weiter entfernte Grenzen als die für  $C_p$  und  $C_{pk}$  errechneten. Es ist plausibel, dass die für das Verfahren mit Wahrscheinlichkeiten angegebenen Grenzen eine zutreffende Abschätzung darstellen. Allerdings sind diese so weit entfernt, dass sie praktisch für eine Ladeoperation nicht anwendbar sind.

Es muss ein weiteres Verfahren entwickelt werden. Hierbei wird anstelle einer Transformation der Stichprobe  $g(x)$  eine passende Normalverteilung mit der Dichtefunktion

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right) \quad (6)$$

gesucht, für die gilt  $g(x) \leq f(x), \forall x \geq 2\sigma_{g(x)}$  mit  $\sigma_{g(x)}$  als Standardabweichung der ursprünglich untersuchten Stichprobe  $g(x)$ . Eine derartige Funktion ist in Bild 10 abgebildet.

Die Funktion stellt eine Teileinhüllende für die untersuchte Stichprobe dar. Für Werte größer als  $2\sigma$  hat eine derartige Normalverteilung eine höhere Wahrscheinlichkeit einer Kollision, es stellt eine Abschätzung nach oben dar. Dass im Bereich von kleiner  $2\sigma$  die Wahrscheinlichkeiten des Aufenthalts für die Normalverteilung geringer als bei der untersuchten Stichprobe ist, ist unerheblich, denn dieser Bereich ist für eine Kollision nicht relevant.

Wird für diese einhüllende Kurve ein  $C_{penv}$  und  $C_{pkenv}$  nach den Gleichungen (2) und (3) berechnet, kann eine Grenze gewählt werden, die nicht so konservativ ist wie die durch  $RV$  und  $RV_k$  vorgegebene, aber dennoch eine niedrige Wahrscheinlichkeit für Kollisionen aufweist.

Der Prozess lässt sich hiermit deutlich eingrenzen.

Alle in dieser Arbeit diskutierten Grenzwerte sind in Bild 10 abgebildet. Um eine universalere Ansicht der Daten zu gewährleisten wurden alle Werte um den Mittelwert zentriert und auf die Standardabweichung der ursprünglichen Stichprobe bezogen.

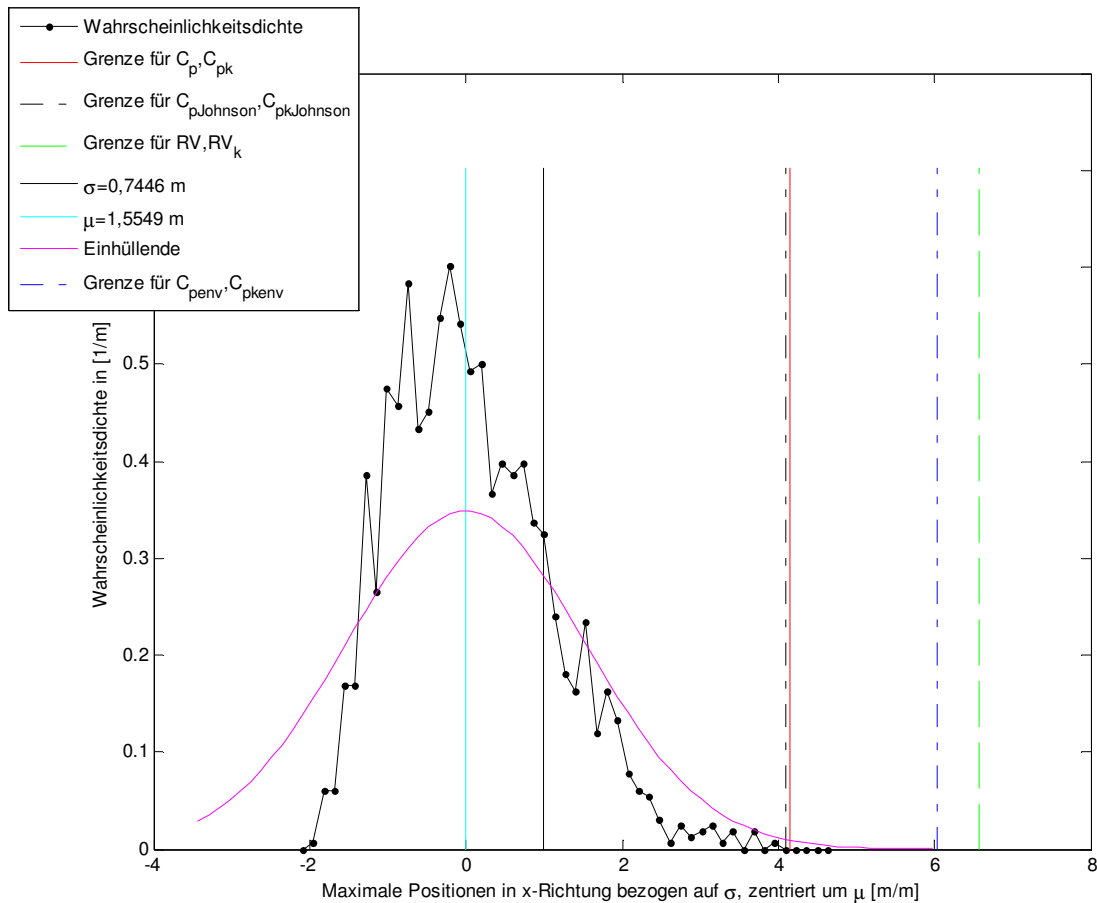


Bild 10: Wahrscheinlichkeitsdichte und Grenzen bezogen auf  $\sigma$ , zentriert um  $\mu$

### 3 FAZIT

In der Qualitätskontrolle ist die Verwendung von Prozessfähigkeitsmethoden weit verbreitet um sichere Prozesse zu gewährleisten.

In der Qualitätssicherung werden häufig Prozessfähigkeitswerte aus nur 50-300 Messungen z.B. für die Fertigung von Massenprodukten ermittelt. Der Nutzen liegt darin, in einer angemessenen Zeit eine Abschätzung für praktikable Einsatzgrenzen zu erhalten, im Bewusstsein, dass die Aussagekraft natürlich hinter einer Untersuchung mit vielen tausenden Messungen zurückbleibt.

Diese Arbeit zeigt, dass die vorhandenen Methoden ohne Modifikationen unter Verwendung von Monte-Carlo-Simulationen bei Offshore-Operationen wie dem gezeigten Beispiel zwar angewendet werden können, sich aber als untauglich erweisen können. Eine modifizierte Prozessfähigkeitsmethode mit Hilfe einer einhüllenden Normalverteilung zeigt für das Beispiel in dieser Arbeit jedoch vielversprechende Ergebnisse.

Untersucht wurde auch, welchen Einfluss auf das Systemverhalten ein statistischer Seegang auf das Systemverhalten eines schwach nichtlinearen Systems hat.

Der Einfluss zufälliger Schwankungen kann gegenüber einer genaueren Berechnung durch ein detaillierteres Simulationsverfahren weitaus überwiegen, wie in dem untersuchten Beispiel gezeigt wird.

### 4 Danksagung

Diese Arbeit wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft unterstützt.

## 5 Literatur

- [1] Cummins, W. E., The Impulse Response Function and Ship Motions, Schiffstechnik, 9(47), S. 101 -109, (1962)
- [2] Hanrath, G., Fähigkeitsuntersuchungen an spanenden Werkzeugmaschinen, Berichte aus der Produktionstechnik, Band 11/97, Shaker Verlag, (1997)
- [3] Hasselmann, K. et. al. , Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP), Ergänzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift, Reihe A(12), S. 8, (1973)
- [4] Journée, J. M. J. and Massie, W. W., Offshore Hydromechanics, Lecture Notes, Delft University of Technology, (2001)
- [5] Liu, P. and Mori N., Characterizing Freak Waves with Wavelet Transform Analysis, Proceedings of Rogue Waves 2000, Brest, (2000)
- [6] Reimers, J. and Ellermann, K., Statistical Investigation of the nonlinear behavior of structures operating offshore, Proceedings of OMAE2009, 28th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, (2009)
- [7] Reimers, J, Soproni, J. and Ellermann, K., Offshore Loading Operations in Heavy Seeway, Conference Proceeding of NAV 2009, 16<sup>th</sup> International Conference of Ship and Shipping Research, (2009)
- [8] Schlurmann, T., The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectra to Analyse Embedded Characteristic Oscillations of Extreme Waves, Proceedings of Rogue Waves 2000, Brest, (2000)
- [9] Schulze, A. und Dietrich, E. , Statistische Verfahren zur Maschinen- und Prozessqualifikation, Hanser Fachbuchverlag, S. 156-157, (2005)
- [10] Stephens, M. A., EDF Statistics for Goodness of Fit and Some Comparisons, Journal of the American Statistical Association 69, S. 730–737, (1974)
- [11] Soproni, J. P., Simulation von Mehrkörpersystemen im Seegang, Technische Universität Hamburg-Harburg, (2009)
- [12] Verril, S. and Johnson, R., Tables and Large-Sample Distribution Theory for Censored-Data Correlation Statistics for Testing Normality, American Statistical Association, (1988)

# Innovative lasergestützte Schweißfertigung im Schiffbau

**Prof. Dr.-Ing. C. Emmelmann<sup>\*</sup>, Dipl.-Ing. M. Kirchhoff<sup>\*\*</sup>**

<sup>\*</sup>Institut für Laser- und Anlagensystemtechnik (iLAS) - TUHH  
Denickestraße 17, 21073 Hamburg  
e-mail: C.Emmelmann@tuhh.de

<sup>\*\*</sup>Institut für Laser- und Anlagensystemtechnik (iLAS) - TUHH  
Denickestraße 17, 21073 Hamburg  
e-mail: Marc.Kirchhoff@tuhh.de

## 1 Einleitung

Der Einsatz der Lasertechnologie im Bereich des Fügens lässt, verglichen mit den bisher im Schiffbau angewandten Fügeverfahren, eine deutliche Steigerung der erreichbaren Schweißgeschwindigkeiten und -qualitäten erwarten. Zusätzlich können mit den heute zur Verfügung stehenden neuartigen Laserstrahlquellen in Verbindung mit innovativen Strahlführungs- und -formungssystemen belastungsgerechte Bauteilkonstruktionen geschweißt werden, deren Fertigung durch die Möglichkeiten der bisherigen Bauteilvorbereitung und Fügeverfahren nicht umsetzbar war. Damit wird es möglich, innovative, nach Leichtbauaspekten konstruierte Bauteile für den Schiffbau effizient zu fertigen.

Eine dieser neuartigen Technologien ist die aus anderen Branchen bekannte Laser-Remote-Technologie, die im Automobilbau, und damit den Bereich des Dünnblechschweißens, bereits Einzug gehalten hat. Der innovative Ansatz hinter dieser Technologie, die für das Schweißen von Heftnähten entwickelt wurde, ist es, die Strahlpositionierung über hochdynamische und leichte optische Elemente durchzuführen. Dies erlaubt zum einen sehr hohe Positioniergeschwindigkeiten, wie sie mit bisherigen Systemen nicht erreicht werden können. Zum anderen wird es möglich, den Strahl sehr schnell und präzise zu positionieren und Nähte mit beliebiger Geometrie zu schweißen.

Für lange lineare T- oder Stumpfstoße, wie sie derzeit bereits im Schiffbau mit der Lasertechnologie gefertigt werden, bringt diese Technologie keine signifikanten Vorteile. Für die Fertigung von Sektionen oder Sektionsteilen, die typischerweise kastenförmige Elemente besitzen, können solche Systeme sinnvoll und produktivitätssteigernd eingesetzt werden. Um die Bauteile mit geringem Verzug miteinander verschweißen zu können, müssen diese vorher ausreichend fest miteinander verbunden werden. Dies geschieht derzeit über manuell eingebrachte Heftnähte, die typischerweise als kurze Nähte mit großen Nahtabständen ausgeprägt und damit ideal für den Einsatz der Laser-Remote-Technologie sind.

Einem alleinigen Einsatz dieser Technologie für das Verschweißen schiffbaulicher Strukturen steht das fehlende Zusatzmaterial entgegen ohne das das notwendige Nahtvolumen nicht eingebracht werden kann. Eine Lösung ist die Kombination der Laser-Remote-Technologie mit der im Schiffbau bereits bekannten Laser-Hybrid-Technologie, die für das Ausschweißen eingesetzt wird. Diese Kombination eröffnet somit vollkommen neue Möglichkeiten der Prozess- und Fertigungsgestaltung. Durch diese technologische Verknüpfung zweier zunächst sehr unterschiedlich erscheinender lasergestützter Fügetechnologien kann die Produktivität sowie die Qualität der Bauteile signifikant gesteigert und die Kosten gleichzeitig reduziert werden.

## 2 Stand der Technik

### 2.1 Laserstrahlfügetechnologie im Schiffbau

Das Laserstrahlschweißen hat seit einigen Jahren erfolgreich Einzug in die industrielle Fertigung gehalten. Schwerpunktmäßig werden derzeit Laserstrahlschweißverfahren im Dünnschleibereich, z. B. dem Automobilbau und der Blechverarbeitung eingesetzt [1, 2, 3, 4, 5]. Darüber hinaus sind erste Anwendungen im Schiffbau dokumentiert [6, 7, 8], in denen insbesondere CO<sub>2</sub>-Laserstrahlquellen zum Verschweißen zweidimensionaler Unterbaugruppen verwendet werden. Neben den Vorzügen des Laserstrahlschweißens, wie z. B. der einseitigen Bearbeitungsmöglichkeit [9], ist beim Einsatz von CO<sub>2</sub>-lasergestützten Schweißanlagen ein aufwändiger und steifer Maschinenaufbau Voraussetzung, damit die Bauteile aufgrund der hohen Toleranzanforderungen an die Fügespalte geeignet positioniert und verschweißt werden können. Darüber hinaus ist die Bauteilflexibilität dieser Maschinensysteme durch die lineare Strahlführung über Spiegelsysteme eingeschränkt und bisher auf das zweidimensionale Fügen begrenzt [10]. Um das Bauteilspektrum zu erweitern und eine konsequente Anwendung im Schiffbau zu ermöglichen, wurden in ersten Forschungsvorhaben in Konsortien aus Werften und Forschungsinstituten Anlagen und Prozesse u. a. für das Schweißen von Steig- und Ecknähten in der Paneelfertigung mittels hybrider Laserstrahlfügeverfahren untersucht [10, 11]. Übereinstimmend kommen diese Projekte zu dem Ergebnis, dass durch den Einsatz von festkörperlaserbasierten Fügetechnologien signifikante Erhöhungen der Flexibilität und Produktivität zu erwarten sind. In den o. g. Projekten wurden dabei Faserlaser mit Laserstrahlleistungen bis zu 10 kW eingesetzt [10]. Prozessbedingt führt dies zu einer maximal schweißbaren Materialstärke bis zu 10 mm Stahl. Der Schwerpunkt der Untersuchungen lag hier auf der Fertigung zweidimensionaler Bauteile. Erste Ansätze einer dreidimensionalen Bearbeitung wurden von der Meyer Werft im Projekt PaLas entwickelt. Durch die geringen Längen der untersuchten Steignähte ist die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf großformatige dreidimensionale Bauteile wie Schiffssektionen nur eingeschränkt gegeben. Weiter zeigen die bisher untersuchten Lösungsansätze den Bedarf umfangreicher und kostenintensiver Spanntechnik auf, mit der die toleranzbehafteten Bauteile an die geringen Füge-toleranzen des Laserstrahlschweißprozesses angepasst werden müssen. [10, 11]

Während die derzeit eingesetzten Laserstrahlfügeverfahren wie das Laser-Hybrid-Schweißen mit bis zu 10 kW Laserstrahlleistung und das konventionelle Laserstrahlschweißen im Schiffbau wie auch in anderen Branchen zum Stand der industriellen Technik zählen, befinden sich neuartige lichtleitfaserbasierte Strahlführungssysteme und Hochleistungslaserstrahlquellen mit mehr als 20 kW Ausgangsleistung in der Entwicklung und sind im Schiffbau noch nicht qualifiziert worden, um u. a. die Fügeproduktivität nachhaltig zu steigern.

### 2.2 Laser-Remote-Technologie

Eine innovative Entwicklung stellt das Laser-Remote-Schweißen dar. Hier werden bereits erste Systeme für den Dünnschleibereich in der Automobilindustrie industriell qualifiziert [5, 12, 13, 14, 15]. Das iLAS erforscht bereits seit mehreren Jahren die Möglichkeiten, Grenzen und geeignete Anwendungsszenarien für das Laser-Remote-Schweißen [16, 17, 18, 19]. Dabei hat sich gezeigt, dass das Potenzial vor allem bei dem Einsatz in Fertigungsaufgaben mit hohen unproduktiven Nebenzeiten durch aufwändiges Umpositionieren ausgeschöpft werden kann. In ersten Umsetzungen dieser Technologie im Automobilbau konnte so die Lasereinschaltzeit von 30 % auf ca. 90 % gesteigert werden [18, 20, 21]. Dieses erworbene Prozess- und Technologiewissen kann nach ersten Ansätzen auch auf die schiffbaulichen Anforderungen übertragen werden.

Das Schweißen mit „entfernten“ Abständen über 700 mm im Vergleich zu konventionellen Laserschweißverfahren mit typischerweise unter 200 mm Abstand zwischen der Bearbeitungsoptik und dem Werkstück wird als Laser-Remote-Schweißen (LRW: Laser-Remote-Welding) bezeichnet. Für die Abbildung des Laserstrahlfokus über diese großen Arbeitsabstände sind einerseits hochbrillianten Laserstrahlquellen sowie ein entsprechender optischer Aufbau erforderlich, der die benötigten Fokusburchmesser (600 µm – 800 µm) mit großen Brennweiten (> 1000 mm) und einer hohen Abbildungsgüte abbilden kann.

Am iLAS der Technischen Universität Hamburg-Harburg wurde ein neuartiger Hochleistungs-Scannerkonzept namens „Dragon“ zum Remote-Schweißen entwickelt. Das Hochleistungs-Laser-Scanner-System „Dragon“ ist für die Verwendung von Festkörperlasern konzipiert. Die Forderung nach großen Arbeitsräumen auch unter der Verwendung von Laserstrahlquellen relativ geringer Strahlqualität führte zu einem neuen optischen Aufbau ohne Galvanometerantriebe und Planfeldlinse. Dieser Laser-Remote-Scanner ist grundsätzlich geeignet, Faserlaserstrahlung mit 30 kW Ausgangsleistung für den Remote-Schweißprozess in großen Arbeitsabständen zum Werkstück ( $\geq 1$  m) hochdynamisch zu bewegen [17]. In diesem Remote-Scanner-Konzept werden Optiken mit Aperturen von über 120 mm verwendet, die die Strahlführung und -formung von Hochleistungslaserstrahlung von 30 kW thermisch und optisch stabil beherrschbar machen.

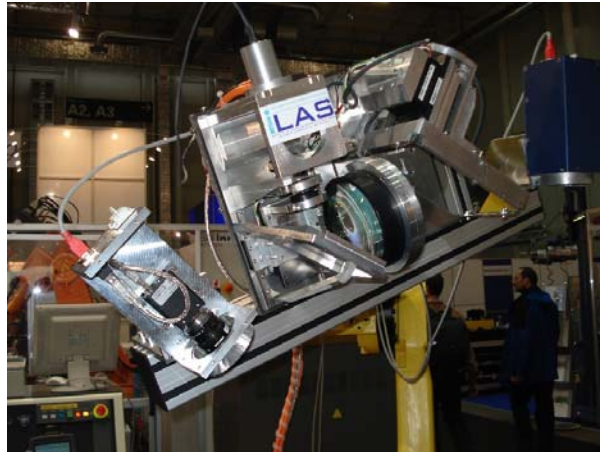


Abbildung 1: Remote Laser-Scanner Dragon

Diese sind im Vergleich zu den am Markt existierenden Scanneroptikaperturen ( $\leq 30$  mm) um Faktor 4 größer. Mit dem derzeitigen Prototyp, der für einen diodengepumpten Stablaser mit einer Laserstrahlleistung von 4 kW und einem Faserdurchmesser von  $400 \mu\text{m}$  ausgelegt ist, ist es möglich, bei einem Abbildungsverhältnis des Laserstrahldurchmessers von 1:1,5 und einem Arbeitsabstand von mindestens 700 mm einen Arbeitsraum von  $500 \times 500 \times 120 \text{ mm}^3$  aufzuspannen. Aufgrund dieser großen Apertur sind Ablenkspiegel mit entsprechenden Abmessungen und Gewichten erforderlich, die von konventionellen Antriebssystemen wie den Galvanometerantrieben nicht mehr bewegt werden können. Daher wurde in diesem Konzept ein 1-Spiegel-System umgesetzt, indem die Bewegung über drehmomentstarke Linearmotoren erfolgt. Das Scanner-System „Dragon“, s. Abbildung 1, ist in der nachobjektiven Bauart ausgeführt. Der prinzipielle Aufbau des Linsensystems ist in Abbildung 2 dargestellt.

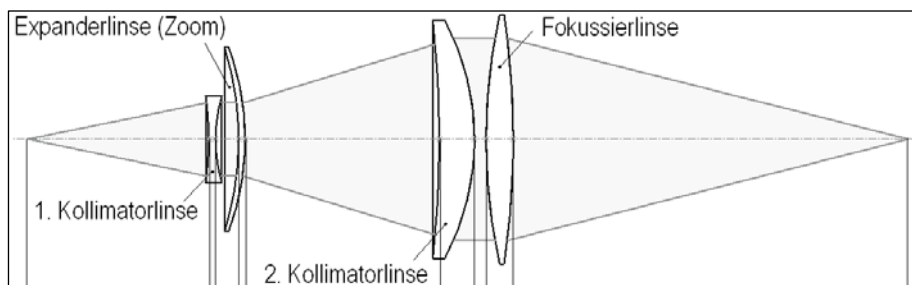


Abbildung 2: Linsensystem des Remote-Scanners Dragon [Emm 05a]

Der divergierende Laserstrahl wird mit der ersten Linse kollimiert. Über eine Expanderlinse wird der Strahl aufgeweitet. Diese Linse ist entlang der optischen Mittelachse linear beweglich gelagert, wodurch sich eine veränderliche Brennweite des Linsensystems einstellen lässt (Zoomoptik). Über die dritte Linse wird der Strahl wieder kollimiert, bevor er durch die vierte Linse fokussiert wird.

Die Aufhängung des Spiegels ist derzeit als Kugelgelenk ausgeführt. Der Antrieb erfolgt über zwei Linearmotoren, die am Fassungsrand des Spiegels angelenkt sind. Diese Motoren weisen eine hohe Schubkraft auf, so dass auch Spiegel großer Abmessungen mit hoher Dynamik verstellt werden können. Beispielsweise beträgt die mittlere Sprungzeit zwischen Steppnähten bei einer Sprunglänge von 100 mm ca. 20 ms. Die Wiederholgenauigkeit in der x-y-Ebene kann mit 50 µm angegeben werden.

Das Scannerkonzept „Dragon“ wird an der Technischen Universität Hamburg-Harburg in Verbindung mit einem Industrieroboter verwendet. Die Steuerung des Scanners und des Roboters erfolgen derzeit getrennt voneinander. Die verwendete Laserstrahlquelle kann sowohl von der Scanner- wie auch von der Robotersteuerung angesprochen werden und führt ein vorprogrammiertes Programm aus.

### **3 Ziele und Ansatz der innovativen Schweißbearbeitung**

Ziel der angestrebten innovativen lasergestützten 3D-Fügebearbeitung ist das verzugsarme Verschweißen von Sektionsbauteilen. Insbesondere bei langen Schweißnähten ist das Verhalten der Werkstoffe aufgrund der fehlenden Erfahrungen derzeit nur schwer vorhersehbar. Um verzugsarme große Bauteile herzustellen, ist die Entwicklung eines neuartigen, lasergestützten und automatisierten Fertigungskonzeptes notwendig. Grundlage für dieses Konzept wird der bisher manuelle sequentielle Ablauf in der Fertigung in Form des Fixierens, Heftens und Ausschweißens sein. Während das Fixieren der Bauteile, d.h. das Positionieren der Einzelteile im Igelfeld zueinander, auch im angedachten neuen Konzept eine manuelle Tätigkeit bleiben wird, wird eine Automatisierung beim Heften durch das Laser-Remote-Schweißen umgesetzt. Abweichungen von der Soll-Position der Einzelteile, die durch eine manuelle Fehlpositionierung oder aufgrund von Bauteilverformungen infolge großer Bauteildimensionen entstanden sind, müssen im Vorfeld durch eine geeignete Messtechnik eindeutig identifiziert und für eine Positions Korrektur aufbereitet werden. Mit diesen Daten wird im Anschluss das produktive und verbindungssteife Heften mittels der Laser-Remote-Schweiß-Technologie erfolgen, das die notwendige Steifigkeit der Bauteilfixierung für das anschließende Ausschweißen mittels Laser-Hybrid-Technologie ermöglicht. Das Ausschweißen erfolgt ebenfalls automatisiert und lasergestützt.

Abbildung 3 gibt den angestrebten Grobentwurf des Fertigungsdemonstrators wieder. In diesem Konzept sind drei Roboter für das Fügen und die Qualitätsbewertung vorgesehen. Dabei stellen die in der Abbildung aufgeführten Positionen die einzelnen Prozessschritte für die Bearbeitungsstrategie dar. Nach dem Positionieren der Bauteile auf der Bearbeitungsfläche werden die Bauteil- (1) und die Nahtlage (2) durch die Pre-Prozess-Diagnose bestimmt. Zur Fixierung der Bauteilposition werden die Bauteile anschließend durch das Laser-Remote-Schweißen geheftet (3) und die Bauteile entsprechend ihrer Spezifikation durch das Laser-Hybrid-Verfahren ausgeschweißt (4). Schwerpunktmäßig wird der Laser-Hybrid-Prozess dabei prozessbegleitend durch In-Prozess-Diagnose-Systeme überwacht. Den Abschluss bildet eine Post-Prozess Qualitätsdiagnose (5), die dann in Verbindung mit den In-Prozess gewonnenen Diagnosedaten eine eindeutige Aussage über die Qualität der Schweißnaht zulässt.

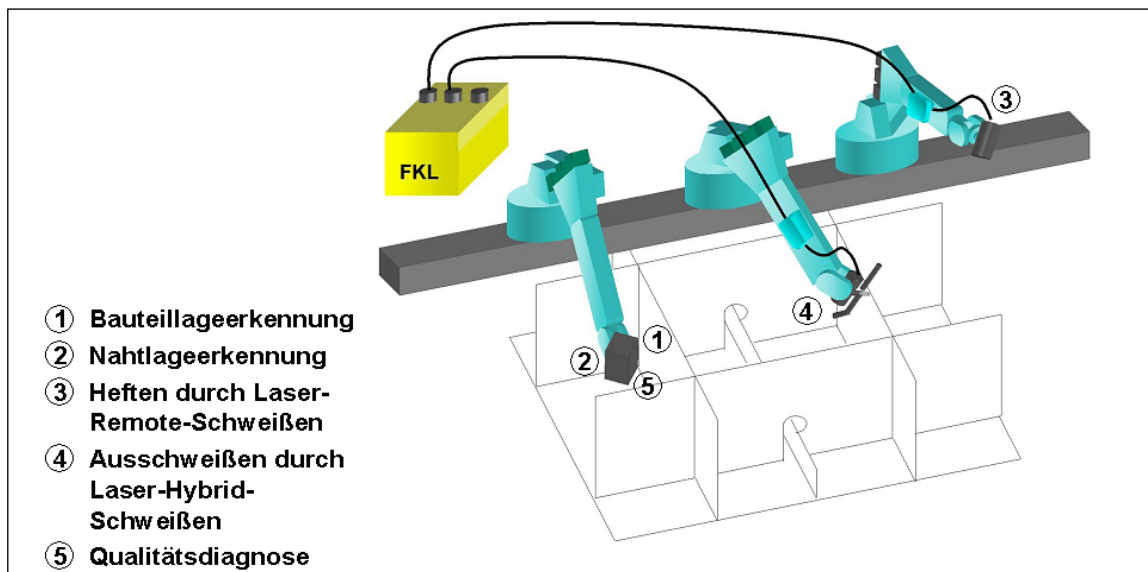


Abbildung 3: Ablaufskizze der innovativen Fertigung

Auf Seiten der Qualität gilt es, die Schweißprozessqualität zu sichern und die für die Klassifikation notwendigen Dokumentationen zu ermöglichen. Hierzu ist die Erfüllung der Richtlinien der Klassifikationsgesellschaft notwendig. Diese sind für die neuartigen Fügeverfahren auf der Grundlage der bisherigen Richtlinien zu entwickeln und entsprechend mit Fertigungs- und Konstruktionsrichtlinien zu hinterlegen. Für die Bewertung der Prozessqualität ist zunächst eine Analyse des Prozesses notwendig, die letztendlich in ein Qualitätssicherungssystem für den entwickelten Prozess einfließt.

Durch den Einsatz der Laserfügetechnologie werden innovative Schiffbaukonstruktionen möglich, die mit den bisherigen konventionellen Verfahren nicht zu fertigen waren. So können neue Konstruktionen die Positionierung der Bauteile vereinfachen, ohne die Fertigungsqualität und damit die Lebensdauer der Verbindung zu reduzieren. Insbesondere im Hinblick auf die Klassifikation ist die Validierung der Konstruktionskonzepte vor dem Hintergrund der Qualität und Lebensdauer notwendig.

## Literatur

- [1] Bernhardt, R.: Robotergestütztes Remote-Laserschweißen auf dem Weg in den Karosseriebau; *Beitrag zur EALA 2005*; Bad Nauheim/Frankfurt, 2005
- [2] Beyer, E.; Morgenthal, L.; Klotzbach, A.; Fleischer, V.: Project of remote laser welding with YAG-Scanner – An up to date description of the status quo; *Beitrag zur EALA2005*; Bad Nauheim/Frankfurt, 2005
- [3] Breitschwerdt, S.: Qualitätssicherung beim Laserstrahlschweißen, *Dissertation an der Universität Stuttgart*; München; Herbert Utz Verlag, 2001
- [4] Rippl, P. (2002) Lasertechnik in flexiblen Fertigungssystemen für Fahrzeugfertigung – Einsatzbeispiele für das Laserstrahlschweißen, Laserstrahllöten und die Hybrid-Technik; *Beitrag im Band Strahltechnik (2002)* von Sepold, G. und Seefeld, T.; Bremen; BIAS, 2002
- [5] Rippl, P. (2005): Remote-Schweißen mit dem Robot PFO und KUKA RoboSCAN – Herausforderung und Chancen; *Beitrag zur EALA 2005*
- [6] Blohm + Voss GmbH: Laser Beam Welding and Cutting at Blohm+Voss GmbH; Eigendruck 2002
- [7] Jasnau, U.; Hoffmann, J.; Seyffarth, P.: Ausrüstung von schweißtechnischen Geräteträgern mit Festkörperlasern im Schiffbau und anderen Industriezweigen; *7. Schiffbautag Mecklenburg-Vorpommern*, 29.10.2003
- [8] Kahl, A.: Schiffbau-Teile auch ohne Richten präzise; *Fachartikel in Industrieanzeiger*, 26/2001, S. 18
- [9] Emmelmann, C.; Lunding, S.: Einführung in die industrielle Lasermaterialbearbeitung; *Sonderdruck anlässlich der Nortec Hamburg Messe*, 23.-25.01.2002
- [10] Hausmann, P.: MoMaKoS – Modulares Maschinenkonzept zur verzugsarmen Herstellung langer Stumpnähte; in Statustagung 2007, [http://www.fz-juelich.de/ptj/lw\\_resource/datapool/\\_\\_pages/pdp\\_38/Statustagung2007.pdf](http://www.fz-juelich.de/ptj/lw_resource/datapool/__pages/pdp_38/Statustagung2007.pdf) (Letzter Abruf: 15.11.2008)
- [11] Pethan, G.; Boekhoff, F.; Witolla, T.: PaLas – Entwicklung eines mehrdimensionalen Laserhybridschweißsystems zur Steigerung der Effizienz und Qualität der Arbeiten im Paneellinienbereich des Schiffbaus, in Statustagung 2007, [http://www.fz-juelich.de/ptj/lw\\_resource/datapool/\\_\\_pages/pdp\\_38/Statustagung2007.pdf](http://www.fz-juelich.de/ptj/lw_resource/datapool/__pages/pdp_38/Statustagung2007.pdf) (Letzter Abruf: 15.11.2008)
- [12] Gapontsev, D.: Fiber lasers and amplifier – beyond telecom and material processing; *4th International Workshop on Fiber Laser*, Dresden 2008
- [13] Kessler, B.; Thieme, J.: Super high power fiber laser and their applications – from 3 kW single-mode to 30 kW multimode; *4th International Workshop on Fiber Laser*, Dresden 2008
- [14] Emmelmann, C.; Kirchhoff, M.: Neuartige Strahlführung und –formung für die Laser-Remote-Schweiß-Bearbeitung; *Die Verbindungs Spezialisten Basel 2007*, Düsseldorf 2007
- [15] Grupp, M.; Seefeld, T.; Vollertsen, F. (2003): Laser beam welding with scanner; Bremer Institut für angewandte Strahltechnik GmbH, *Second International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing*, München, 2003

- [16] Emmelmann, C.: Grundlagen und Bedeutung der Remoteschweißtechnik; *1. VDI Forum Remoteschweißen*, Hamburg 23.06.2004
- [17] Emmelmann, C.: Laser Remote Welding – Status and Potential for Innovations in Industrial Production; *Proceedings of the Third International WLT-Conference on “Lasers in Manufacturing” (LIM 2005)*, München, 2005
- [18] Emmelmann, C., Stemmann, J.: Highperformance Scanner for Remote Welding with Nd:YAG Lasers; *21st International Congress of Lasers & Electro-Optics, ICALEO*, Miama, USA, 2005
- [19] Emmelmann, C.; Kirchhoff, M.: Design of a Solid State Laser Remote System of High Economic Efficiency and High Flexibility for Multiple Applications; *Proceedings of the Fourth International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing 2007*, Munich, June 2007
- [20] Emmelmann, C.; Stemmann, J.: Remoteschweißgerechte Konstruktion und Six-Sigma Analyse; Vortrag und Abschlussbericht zum BMBF-Verbundprojekt „ProFi“, Hannover, 07.12.2004
- [21] Stemmann, Jannis M.: Laser Remote Welding; Göttingen; Cuvillier Verlag (Dissertation an der Technischen Universität Hamburg-Harburg), 2006

# Festigkeit von mit großem Luftspalt verschweißten Stößen von Schiffssektionen

Sonja Zacke \*, Sefika Elvin Eren \*\*, Wolfgang Fricke \*, Mustafa Kocak \*\*

\*Technische Universität Hamburg-Harburg  
Schwarzenbergstraße 95C, 21073 Hamburg  
e-mail: sonja.zacke@tu-harburg.de

\*\* GKSS Research Centre Geesthacht  
Max-Planck-Straße 1, 21502 Hamburg  
e-mail: Sefika.Eren@gkss.de

## 1 Einleitung

Das Verschweißen der Stöße von Schiffssektionen ist im Hinblick auf den zu verschweißenden Luftspalt oft mit hohem Fertigungsaufwand verbunden, weil bei der zugabenfreien Genaufertigung fallweise größere Luftspalte auftreten. Aus diesem Grund wurde innerhalb des AiF-Projektes 14796N untersucht, ob Schweißstöße mit größeren Luftspalten den Anforderungen der Regelwerke entsprechen. Ziel des Projektes war der Nachweis einer ausreichenden Festigkeit beim Verschweißen von Schiffssektionen mit Luftspaltbreiten von bis zu 30 mm. Zu diesem Zweck wurden Schweißstöße an Platten (150 x 250 x 15 mm, D36 bzw. A-Stahl) verschieden breiter Luftspalte hinsichtlich ihrer Ermüdungs- und Bruchfestigkeitseigenschaften untersucht. Das Verschweißen der Luftspalte erfolgte sowohl mit der Strichraupen- als auch mit der Pendeltechnik.

## 2 Herstellung der Proben

Für die Hauptversuche wurden insgesamt 62 Proben geschweißt, deren Dimensionen Abb. 1 entnommen werden können.

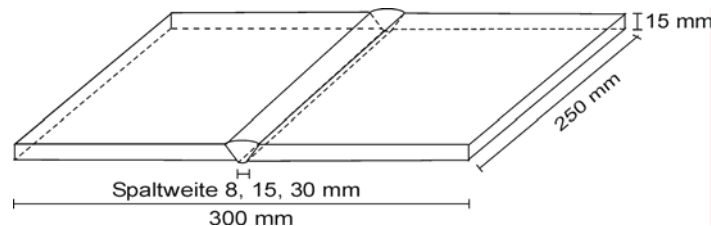


Abb. 1: Geometrie der Schweißproben

Das Verschweißen der Proben erfolgte nach einigen Vorversuchen in einer Einspannschweißanlage (Abb. 2) mit definiertem Steifigkeitsgrad. Dieser soll die Steifigkeit der umgebenden Schiffsstruktur abbilden. Auf den Rohren der Einspannschweißanlage verläuft eine quer liegende Schiene, die den Schweißautomaten führt. Die Bewegungsmechanismen des Automaten lassen neben dem Verschweißen mittels der Strichraupentechnik auch die Pendelbewegung zu.

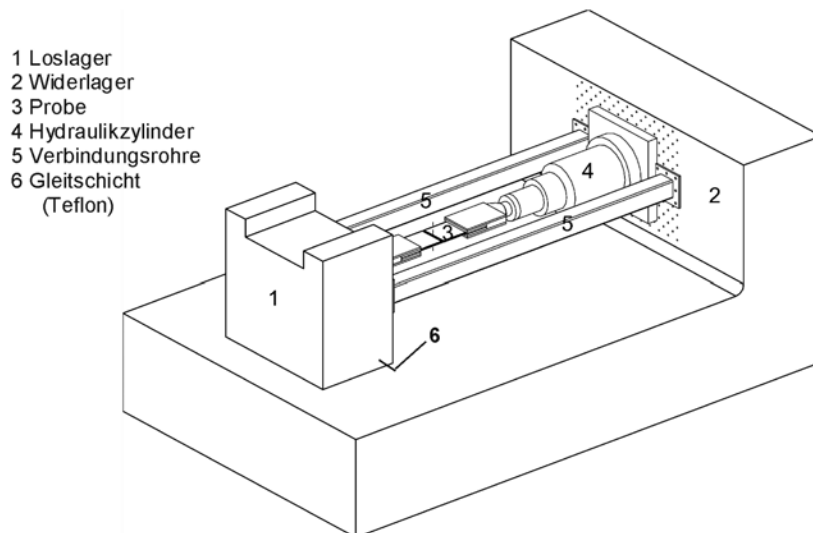
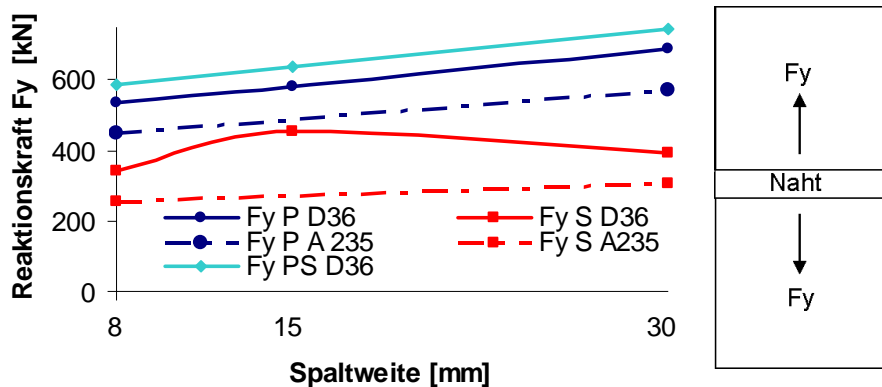


Abb. 2: Einspannschweißanlage

### 3 Messung der Reaktionskräfte

Durch die Erfassung der Reaktionskräfte während und nach dem Schweißprozess kann abgeschätzt werden, welche Eigenspannungen bereits vor Inbetriebnahme des Schiffes in den Sektionsstößen bzw. der umliegenden Struktur aufgrund der Schweißvorgänge auftreten. Diese Last wird bei einem Teil der Ermüdungsproben im nächsten Schritt als Vorlast bzw. Mittelspannung für die Schwingfestigkeitsversuche übernommen. Ein weiterer Vorteil besonders der transienten Messung ist der Umstand, dass sichtbar wird, was während des Schweißprozesses passiert und welche Bewegungsrichtungen bzw. Spannungsgrößen dominierend sind.



P=Pendeltechnik; S=Strichraupentechnik; PS=Pendeltechnik steigend geschweißt

Abb. 3: Gemessene Reaktionskraft  $F_y$

Abb. 3 zeigt die Kraft  $F_y$ , die sich zwischen 250 und 720 kN bewegt. Die blauen Kurven sind der Pendeltechnik zuzuordnen, die gestrichelten Linien dem normalfesten A-Stahl. Allgemein befinden sich die Kräfte für die Strichraupentechnik immer unterhalb des Kraftniveaus der Pendeltechnik, auch der normalfeste Stahl liegt grundsätzlich unter dem höherfesten D36. Weiterhin kann allgemein festgehalten werden, dass die Kraft  $F_y$  mit zunehmender Spaltweite ansteigt, die Steigung allerdings gering ist. Eine Ausnahme bildet die Kurve  $F_y$  S D36, deren Werte für den 30 mm breiten Spalt wieder reduziert wurden. Die steigend geschweißten Stöße zeigen im Vergleich zu den Schweißungen in Wannenlage kaum einen Unterschied, liefern aber die höchsten Kräfte. Des Weiteren wurden die Reaktionsmomente um die Achse in Schweißrichtung sowie um diejenige in Dickenrichtung gemessen. Dabei stellte sich heraus, dass die Pendeltechnik-Proben kaum nennbare Momente zeigen, während das Verschweißen mit der Strichraupentechnik zu deutlichen, mit zunehmender Luftspaltbreite erhöhten Momenten führt.

## 4 Bruchsicherheitsuntersuchungen

### 4.1 Risswiderstandsuntersuchungen

Im Rahmen der bruchmechanischen Kennwertermittlung wurden Drei-Punkt-Biegeversuche an Kleinproben (Querschnitt 15 x 15 mm) durchgeführt. Während des Versuchs wurde mittels  $\delta_5$ -Clips [1] der Risswiderstandskennwert CTOD (Crack Tip Opening Displacement) ermittelt. Der Versuchsaufbau für den Drei-Punkt-Biegeversuch ist in Abb. 4 dargestellt. Nach Anbringen der Messvorrichtung werden die Proben im Drei-Punkt-Biegeversuch dynamisch belastet. Bevor der Rissfortschritt die instabile Phase erreicht, wird der Versuch gestoppt und die Last für die nachfolgende, statische Belastung neu eingestellt. An diesem Punkt soll vermieden werden, dass der Gewaltbruch eintritt. Aus diesem Grund wird eine geringere Spannung als statische Last eingestellt. Hat die daraus resultierende Risslänge einen ausreichenden Wert erreicht, wird die Belastung erneut dynamisch aufgebracht. Der Riss führt in dieser Phase zum Bruch, wobei der Wechsel zwischen dynamischer und statischer Belastung häufig mehrmals erfolgt. Diese Vorgehensweise soll einen ausreichenden Datensatz über den stabilen Rissfortschritt sicherstellen.

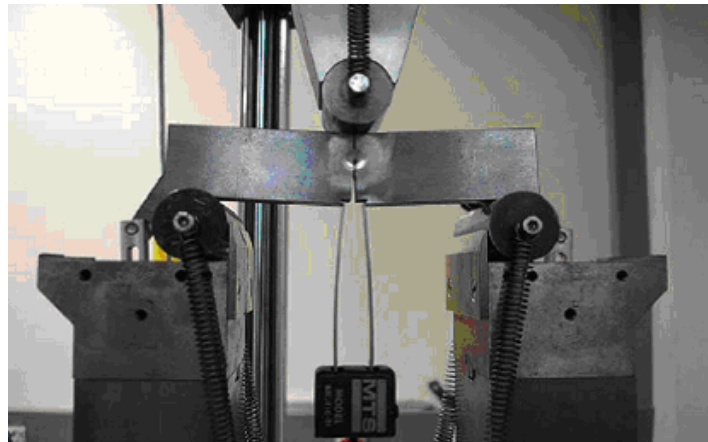


Abb. 4: Drei-Punkt-Biegeversuchsaufbau, CTOD-Wert Ermittlung

Als Ergebnis der Untersuchungen (Abb. 5) kann festgehalten werden, dass das Grundmaterial der Proben mit einem Streuband zwischen  $CTOD=0,85-1,05$  mm über den Ergebnissen des Schweißgutes liegt. Der Risswiderstand des Schweißmaterials der Pendeltechnik-Proben liegt knapp unter dem Grundmaterial im Bereich von 0,7 mm.

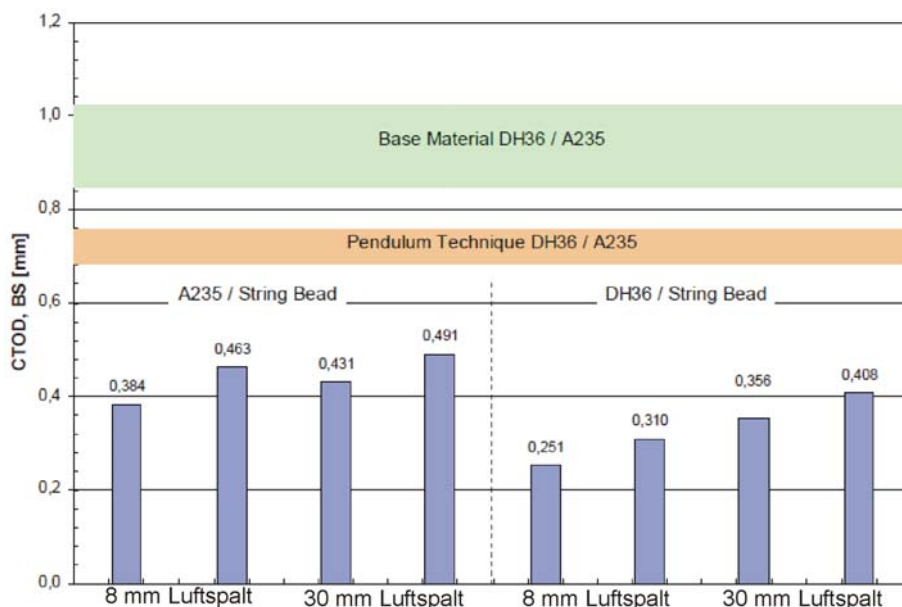


Abb. 5: Maximale CTOD-Werte der Probenserien

Die Ergebnisse der Strichraupentechnik-Proben sind darunter in Form von Säulen einzeln dargestellt. Sie besitzen im Durchschnitt nur die Hälfte des Risswiderstands der Pendeltechnik-Proben, ihre Ergebnisse sind als ungünstig zu bewerten. Der Wert der Probe D36 mit 8 mm Luftspalt liegt mit einem CTOD-Wert von 0,251 mm sogar im kritischen Bereich. Der Grund hierfür könnte der Martensitanteil im Gefüge des Schweißgutes sein, der nur für diese Serie auch im unteren Schweißnahtbereich gefunden werden konnte. Martensit ist ein sehr hartes Gefüge, welches niedrige Bruchzähigkeiten verursachen kann.

## 4.2 Bauteilversuche

Die Untersuchungen am 250 mm breiten Originalbauteil (Bauteilversuche) werden anhand eines Schweißstoßes statt der Kleinproben ermittelt und dienen dem Vergleich und damit der Verifizierung der mittels FITNET [2] ermittelten Ergebnisse der kritischen Last. Zu diesem Zweck wurden die mit einem Anfangsriß im Schweißgut versehenen Proben vorab so angeschwungen, dass deutliche und spitze Rissenden vorhanden waren. An diesen wurden insgesamt vier  $\delta_5$ -Clips instrumentiert. Der Aufbau der Versuchsanlage sowie die Anordnung der Messsignale ist in Abb. 6 gezeigt. Alle Versuche fanden bei Raumtemperatur statt.

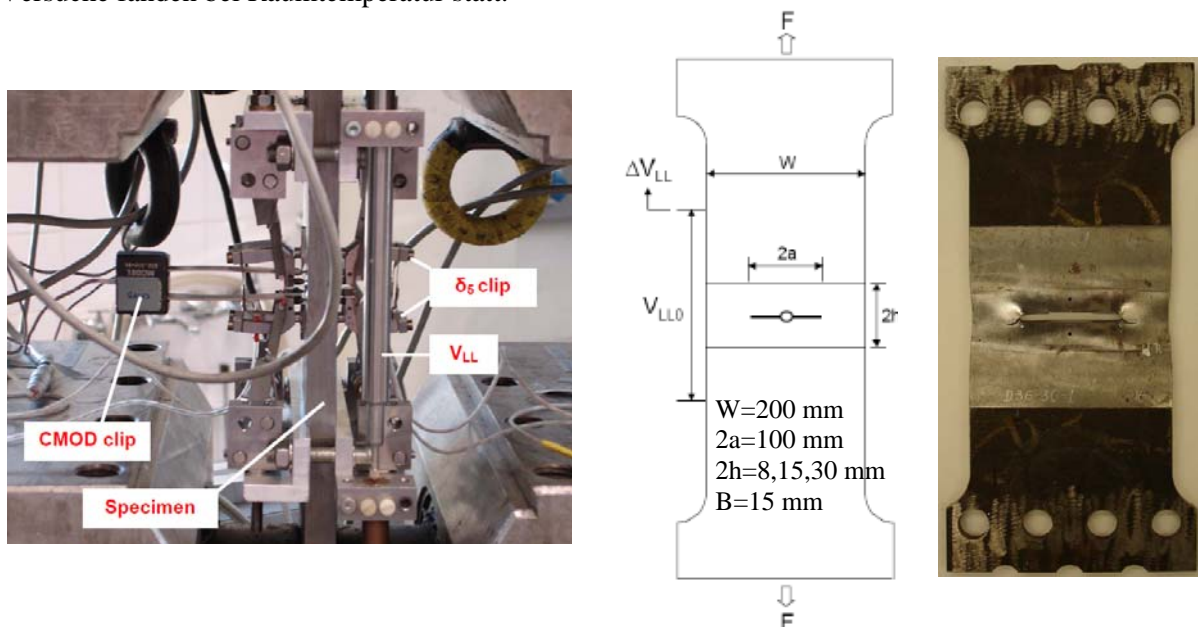


Abb. 6: Versuchsaufbau und Probengeometrie

Insgesamt werden während dieser Versuche acht Signale gemessen, der entscheidende Wert allerdings ist die maximale Kraft, die zum Versagen der Probe führt. Diese Kraft wird im Anschluss der berechneten, kritischen Kraft gegenübergestellt und stellt somit eine Absicherung der rechnerischen Auswertung dar.

## 4.3 Bewertung nach FITNET

Die FITNET-Bewertungsmodule, die im Rahmen dieses Projektes angewandt wurden, basieren auf bruchmechanischen Prinzipien und werden im Allgemeinen für geschweißte oder nicht geschweißte Metalle angewendet. Das Bewertungsschema sieht zwei verschiedene Vorgehensweisen vor: das Konzept des Failure Assessment Diagram (FAD) und das Crack Driving Force Diagram (CDF). Beide beziehen sich auf die gleichen mechanischen Prinzipien und führen bei identischen Eingangsdaten zum selben Ergebnis. Für diese Untersuchungen wird das FAD-Diagramm verwendet, aufgrund seiner einfachen Abbildung der Ergebnisse. Beim FAD-Konzept erfolgt die Analyse aufgrund der Lage eines Bewertungspunktes für das Bauteil relativ zu einer bauteilunabhängigen Versagensgrenzkurve. Die folgenden Diagramme zeigen die jeweiligen FAD-Kurven mit entsprechender maximaler Kraft sowie die Versagenspunkte der Bauteilversuche. Die Bewertung mit FITNET bietet verschiedenen konservative Ansätze der Berechnung, die sich nach den verfügbaren Eingangsdaten richten. Diese Optionen werden numerisch aufsteigend weniger konservativ und wurden für die Option 1 bis 3 in die Auswertung einbezogen.

Abb. 7 zeigt das Ergebnis der FITNET-Analyse für eine Pendeltechnik-Probe mit 30 mm breitem Luftspalt und dem Grundmaterial D36. Hierbei ist  $K_r$  als geometrie- und lastabhängiger (risstreibender) Parameter zu interpretieren, in den auch der Risswiderstand CTOD mit einfließt.  $L_r$  ist als Quotient aus äußerer Last  $F$  und der plastischen Grenzlast  $F_y$  definiert. Die Bezeichnung  $F_y$  ist in diesem Rahmen nicht mit der Reaktionskraft  $F_y$  zu verwechseln, die beiden Kenngrößen stehen in keinem Zusammenhang.

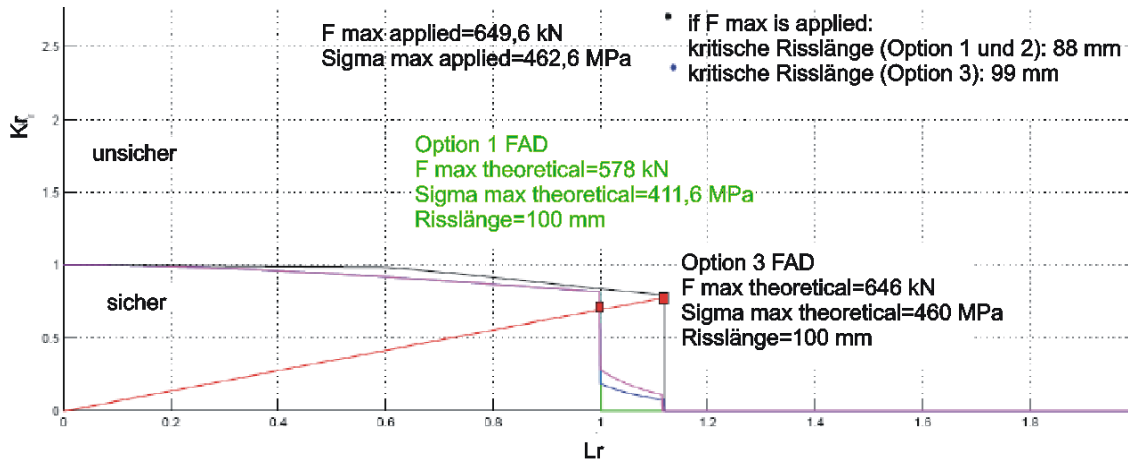


Abb. 7: FAD-Bewertung der Pendeltechnik-Proben D36 mit 30 mm breitem Luftspalt

Die verschiedenen Analyseoptionen sind einander gegenüber gestellt: Für Option 1 ergibt sich eine maximale Spannung von 411 MPa, für Option 3 erhält man 460 MPa. Die Originalversuche erreichten eine maximale Spannung von 462 MPa. Die kritische Risslänge, die sich bei dieser Spannung einstellt, beträgt 88 mm nach Option 1 und 99 mm für Option 3. Die angenommene und in den Versuchen eingebrachte Anfangsrisslänge betrug 100 mm. Als kritische Risslänge versteht sich hierbei die gesamte Länge des Risses zum Zeitpunkt des prognostizierten Versagens. Diese berechnete Risslänge ist Eingangswert für die Untersuchungen am Originalbauteil gewesen, das bedeutet, für den mit Pendeltechnik verschweißten 30 mm breiten Luftspalt wurde eine kritische Risslänge von 100 mm berechnet, die Anrisslänge  $2a$  für den Originalbauteilversuch wurde dementsprechend mit diesem Wert festgelegt.

Die maximal aufnehmbare Spannung bei 460 MPa liegt im Bereich der Streckgrenze des Grundmaterials und für diese Probenserie auch des Schweißgutes und ist demzufolge als hoch einzustufen. Auch die kritischen Risslängen sind recht groß, sie sind Ergebnis der guten Risswiderstandsfähigkeit dieser Probenserie.

Das äquivalente Diagramm für diese Serie, verschweißt mit der Strichraupentechnik, ist in Abb. 8 dargestellt. Hierbei ergeben sich für die Option 3 ebenfalls ca. 460 MPa als maximale Spannung. Die eingebrachte Risslänge betrug allerdings nur 33 mm. Die Originalversuche zeigten eine maximale Spannung von 560 MPa, bei der sich nach Option 3 eine Risslänge von 12 mm eingestellt hat. In diesem Fall ist die erreichte Spannung demnach sehr viel höher als die mit Option 3 prognostizierte.

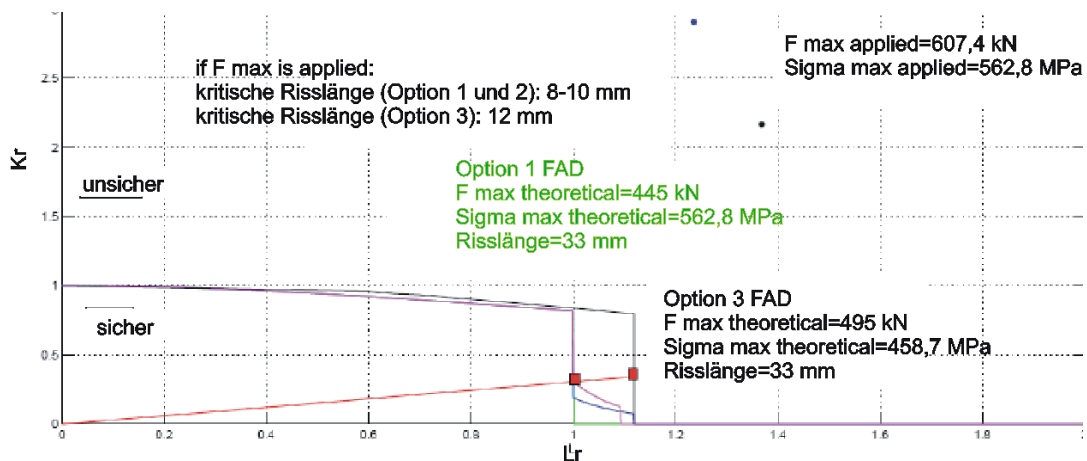


Abb. 8: FAD-Bewertung der Strichraupentechnik-Proben D36 mit 30 mm breitem Luftspalt

Ein auffälliger Unterschied der Ergebnisse der unterschiedlichen Schweißtechniken ergibt sich ausschließlich in den Risslängen. Für die Strichraupentechnik sind kritische Risslängen bereits bei 30% der Risslänge der Pendeltechnik-Proben erreicht, was einer deutlich geringeren Bruchsicherheit bzw. Schadenstoleranz entspricht.

## 5 Ermüdungsversuche

Die Ermüdungsversuche fanden an Kleinproben statt, die verwendete Geometrie ist in Abb. 9 dargestellt.

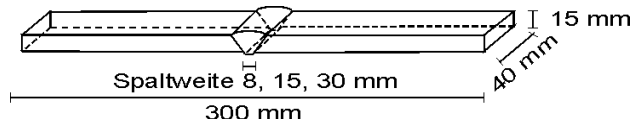


Abb. 9: Probengeometrie für die Ermüdungsversuche

Die Durchführung der Versuche fand in Resonanzpulsern statt. Die Festlegung von Ober- und Unterlast erfolgte in Abhängigkeit von der Stahlsorte, wobei die Oberlast mit 80 bis 90% der Nennstreckgrenze recht hoch angesetzt wurde. Obwohl für beide Stähle die tatsächliche Streckgrenze bekannt ist, wurde als Referenz dennoch die Mindeststreckgrenze genutzt, um eventuelle Streuungen innerhalb der Probenmenge und damit die Gefahr von Versagen des Grundmaterials ausschließen zu können. Die Oberlast für beide Stahlsorten wurde bei 70% der tatsächlichen Streckgrenze festgelegt. So bleibt die Vergleichbarkeit der Ergebnisse erhalten. Für den höherfesten D36-Stahl wurde die Oberlast zu 162 kN, für den normalfesten A-Stahl zu 128 kN festgesetzt. Die Unterlast ist in diesem Fall Null, damit ergibt sich das Grenzspannungsverhältnis  $R$  ebenfalls zu Null.

Um weiterhin eruieren zu können, welchen Einfluss die schweißbedingten Eigenspannungen auf die Ermüdungsfestigkeit haben, wird ein Teil der Proben mit einem anderen Lastverlauf getestet. Dabei erfolgt eine pauschale Anhebung des Grenzspannungsverhältnisses  $R = \sigma_{\text{unten}} / \sigma_{\text{oben}}$ , was eine verkürzte rechnerische Lebensdauer nach sich zieht. Das Aufbringen der Eigenspannung erfolgt als Mittelspannung entsprechend der gemessenen Reaktionsspannungen, die Ermüdungsversuche werden demzufolge bei einem  $R$ -Wert größer Null gefahren.

Die Bewertung erfolgte anhand des Nennspannungskonzeptes [3] sowie anhand lokaler Konzepte [4]. Das Nennspannungskonzept ist unabhängig von der lokalen Nahtgeometrie sowie von den Vorverformungen der Probe und bezieht sich damit ausschließlich auf die aufgebrachte Lastgröße. Rechnet man für alle Serien die Schwingfestigkeit für die Überlebenswahrscheinlichkeiten von  $P_u = 10\%$ ,  $50\%$ ,  $90\%$  und  $97,7\%$  auf  $2E+06$  Lastspiele um, erhält man die in Abb. 10 gezeigten Streubänder.

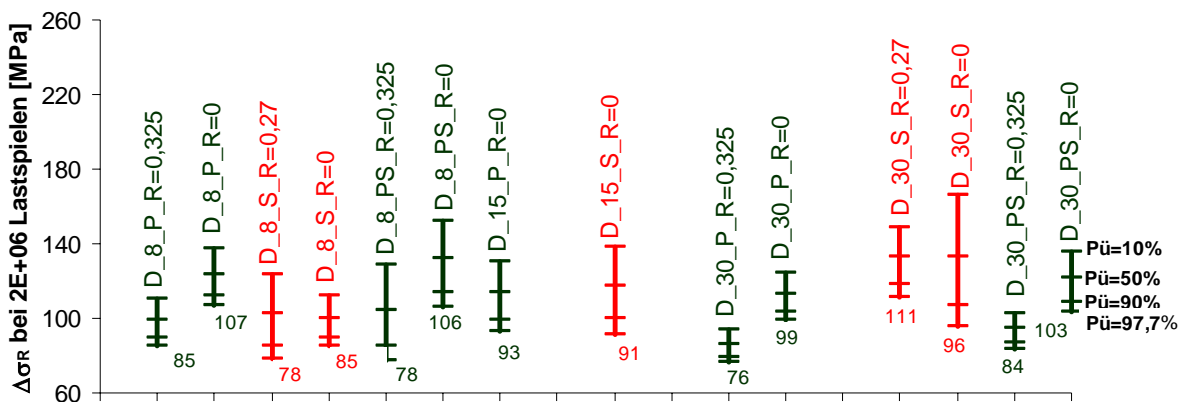


Abb. 10: Auf  $2 \cdot 10^6$  LW extrapoliertes Streuband aller Proben

Besonders interessant sind die Unterschiede hinsichtlich der 50%-Werte, die als Durchschnittswerte eine sehr sichere Abschätzung der Einflussgrößen zeigen. Die Spannungsschwingbreite bei den Pendeltechnik-Proben sinkt mit Erhöhung des  $R$ -Wertes, da die Mittelwerte dieser Serien eine

deutliche Änderung zeigen, während die Mittelwerte der Strichraupentechnik-Proben aufgrund des erhöhten Grenzspannungsverhältnisses  $R$  fast keine Änderung erfahren. Wegen der unterschiedlichen Streuungen zeigt allerdings der charakteristische Wert  $\Delta\sigma_R$  für  $P_{ü}=97,7\%$  bzw. die Detailkategorie teilweise unterschiedliche Tendenzen. Das bedeutet, dass der 97,7%-Wert für die Spannungsschwingbreite aufgrund der geringen Probenzahl mit größeren Unsicherheiten behaftet ist als die Mittelwerte. Insgesamt kann man erkennen, dass für die kleinen Spaltweiten die Pendeltechnik besser geeignet erscheint, für die großen Spaltweiten hingegen die Strichraupentechnik.

## 6 Schlussfolgerungen

Ziel der Untersuchungen war der Vergleich der Pendeltechnik mit der praxisüblichen Strichraupentechnik im Allgemeinen sowie die Anwendbarkeit beider Schweißtechniken für große Luftspaltbreiten insbesondere unter schiffstypischen Einspannbedingungen. Im Vordergrund standen die Festigkeitseigenschaften hinsichtlich Ermüdung und Bruchsicherheit der Verbindungen.

Aus bruchmechanischer Sicht bestehen bezüglich des großen Luftspaltes von 30 mm für die Pendeltechnik keine Bedenken. Sowohl die Materialuntersuchungen als auch die Bewertung der Proben nach der FITNET-Methode zeigten, dass der Einfluss des größeren Luftspaltes hinsichtlich der Materialeigenschaften des Schweißgutes sogar als positiv einzustufen ist. Das Ergebnis für die Strichraupentechnik hingegen ist hinsichtlich der CTOD-Werte sowie der kritischen Risslängen als bedenklich einzustufen. Insgesamt kann festgehalten werden, dass das FITNET-Konzept die Versuchsergebnisse sowie die Effekte der beiden Schweißtechniken gut abbilden kann.

Die Ermüdungsversuche bestätigen die bruchmechanischen Ergebnisse hinsichtlich der Pendeltechnik. Trotz einer geringen Reduzierung der Schwingfestigkeit entspricht die Pendeltechnik den Anforderungen. Wie erwartet üben die Reaktionskräfte aufgrund der Einspannung beim Schweißen einen nennenswerten Einfluss auf die Schwingfestigkeit aus, der über das Grenzspannungsverhältnis  $R$  berücksichtigt werden kann.

Sowohl die Ermüdungsversuche als auch die bruchmechanischen Untersuchungen haben ergeben, dass die Schweißtechnik einen deutlichen Einfluss auf das Bruch- und Ermüdungsverhalten einer Schweißnaht ausübt.

## Literatur

[1] Zerbst, U.; Kocak, M. und Hübner, P., Bruchmechanische Bewertung von Schweißverbindungen. Bericht GKSS 2002/1, GKSS-Forschungszentrum Geesthacht (2002) sowie in Materialprüfung 44 (2002), S. 333 – 357

[2] FITNET, FITNET 2006 - Fracture-Fatigue-Creep-Corrosion, Proc. of Int. Conf. on Fitnet-for-Service (Ed. M. Kocak), GKSS Research Center, Geesthacht (2006)

[3] Haibach, E., Betriebsfestigkeit – Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg (2002)

[4] Radaj, D. und Sonsino, C.M., Ermüdungsfestigkeit von Schweißverbindungen nach lokalen Konzepten. Fachbuchreihe Schweißtechnik, Bd. 142, DVS-Verlag, Düsseldorf (2000)

# Multiscale computations with application to cellular materials

Hans-Georg Sehlhorst\*, Alexander Düster\*, Ralf Jänicke\*\*, Stefan Diebels\*\*, Ernst Rank\*\*\*

\*Numerische Strukturanalyse mit Anwendungen in der Schiffstechnik (M-10)  
Technische Universität Hamburg-Harburg  
e-mail: [hans-georg.sehlhorst;alexander.duester@tu-harburg.de](mailto:hans-georg.sehlhorst;alexander.duester@tu-harburg.de)

\*\*Lehrstuhl für Technische Mechanik  
Universität des Saarlandes  
e-mail: [r.jaenicke;s.diebels@mx.uni-saarland.de](mailto:r.jaenicke;s.diebels@mx.uni-saarland.de)

\*\*\*Lehrstuhl für Computation in Engineering  
Technische Universität München  
e-mail: [rank@bv.tum.de](mailto:rank@bv.tum.de)

## Abstract

The computation of cellular materials is still a topic of research. In this contribution we focus on two different numerical approaches: The  $FE^2$  approach, which is based on scale separation, and the microscopic approach, which resolves all scales in one model. For the first approach we present a two-dimensional multiscale framework of first-order suited for geometrically nonlinear computations. We then apply this framework to a shear test. For the second approach we investigate a three-dimensional cellular material under large strain compression.

## 1 Introduction

There is an increasing interest in the application of cellular materials in science and industry. However, these materials show a complex mechanical behavior due to size effects, see ONCK [8], and deformation-induced anisotropy under large deformations as described, for example, by HOHE and BECKER [6]. In this paper the latter phenomenon will be investigated.

There are basically two different approaches for numerical modeling of cellular materials: The *microscopic* approach, see DIEBELS and STEEB [2] and the *macroscopic* approach [3]. In the first approach, the structure is microscopically fully resolved (mainly by beam elements), while in the second one a phenomenological formulation is applied. In the latter approach the structure is macroscopically discretized by finite elements based on extended continuum theories (i.e. micropolar theories), refer to ANDERSON and LAKES [1]. These theories can capture higher-order effects like, for example, size effects.

A combination of both approaches is called the  $FE^2$  method where a microstructure is embedded into a macroscopic finite element framework via projection and homogenization schemes [7]. There are first-order  $FE^2$  schemes with standard continuum theories on both macro- and microlevel, and schemes of higher-order with extended continuum theories applied to the macrolevel.

In this contribution we present a  $FE^2$  multiscale framework of first-order suited for *two-dimensional* geometrically nonlinear computations of cellular materials. Then we will apply the proposed  $FE^2$  approach to a simple *numerical* shear test in order to demonstrate its ability to capture deformation-induced anisotropy.

Afterwards, we give a short outlook on *three-dimensional modeling* of cellular materials. Here, we apply the microscopic approach to a cellular structure under large strain compression.

## 2 The FE<sup>2</sup> approach

In this section we review the FE<sup>2</sup> method of first-order for the geometrically nonlinear case as stated by KOUZNETSOVA [7]. In the following, index  $M$  indicates macroscopic quantities and  $m$  is used for microscopic quantities. The method is based on the numerical solution of nested boundary value problems (BVPs), where one has to solve a macroscopic nonlinear BVP <sub>$M$</sub>  and  $k$  independent nonlinear BVP <sub>$m$</sub>  on the microscale. Scale separation is assumed allowing to treat the problems on the microscale independently. The main idea for coupling both scales is expressed as follows: At each macroscopic integration point the gradient of the displacement field with respect to the reference configuration (i.e.  $\text{Grad}\mathbf{u}_M$ ) is projected onto the microstructure and homogenized Cauchy stresses  $\boldsymbol{\sigma}_M$  are transferred back after solving the microscopic BVP, cf. Figure 1.

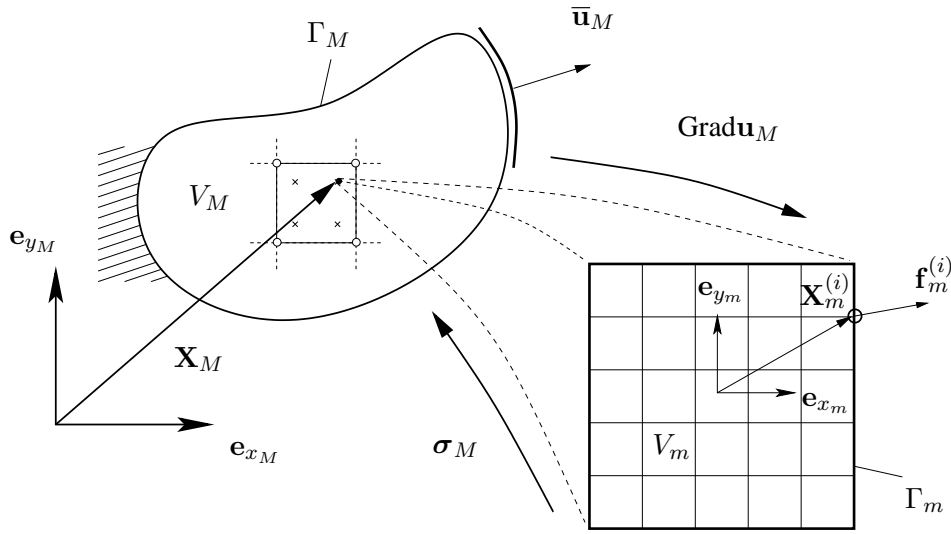


Figure 1: Nested boundary value problem in the reference configuration

To be more specific, let us consider the underlying formulation. By the projection of  $\text{Grad}\mathbf{u}_M$

$$\bar{\mathbf{u}}_m = \text{Grad}\mathbf{u}_M \cdot \mathbf{X}_m \quad (1)$$

onto the microstructure's boundary  $\Gamma_m$  in its reference configuration the microscopic Dirichlet BVP <sub>$m$</sub>  is defined. Here,  $\mathbf{X}_m$  is the so-called branch vector of the reference configuration related to the center of the microstructure, see Figure 1. The homogenization is based on an averaging theorem and leads to the first Piola-Kirchhoff stress tensor

$$\langle \mathbf{P}_M \rangle = \frac{1}{V_m} \int_{\Gamma_m} \mathbf{p}_m \otimes \mathbf{X}_m d\Gamma_m, \quad (2)$$

where  $V_m$  represents the volume of the microstructure. In Equation (2) the integral of the dyadic product of the first Piola-Kirchhoff stress vector  $\mathbf{p}_m = \mathbf{P}_m \cdot \mathbf{N}_m$  and the branch vector over the boundary  $\Gamma_m$  is computed assuming unit thickness (where  $\mathbf{N}_m$  is the outer normal vector defined on  $\Gamma_m$ ). The integration can be simplified when using discrete quantities at the nodes of the finite element discretization of the microscopic structure:

$$\langle \mathbf{P}_M \rangle = \frac{1}{V_m} \sum_{i=1}^n \mathbf{f}_m^{(i)} \otimes \mathbf{X}_m^{(i)} \quad (3)$$

To this end the sum of the dyadic product of the nodal forces  $\mathbf{f}_m^{(i)}$  and the branch vector for all boundary nodes ( $i = 1, \dots, n$ ) is evaluated. In order to obtain the Cauchy stresses from (3) we perform a push forward

$$\boldsymbol{\sigma}_M = \frac{1}{J_M} \langle \mathbf{P}_M \rangle \cdot \mathbf{F}_M \quad (4)$$

utilizing the deformation gradient  $\mathbf{F}_M = \text{Grad} \mathbf{u}_M + \mathbf{I}$  and its determinant  $J_M = \det(\mathbf{F}_M)$ .

Next, implementation aspects are presented. Since we have  $k$  independent microscopic (geometrically nonlinear) BVP<sub>*m*</sub>s the FE<sup>2</sup> approach is perfectly parallelizable. This is illustrated in Figure 2. Within

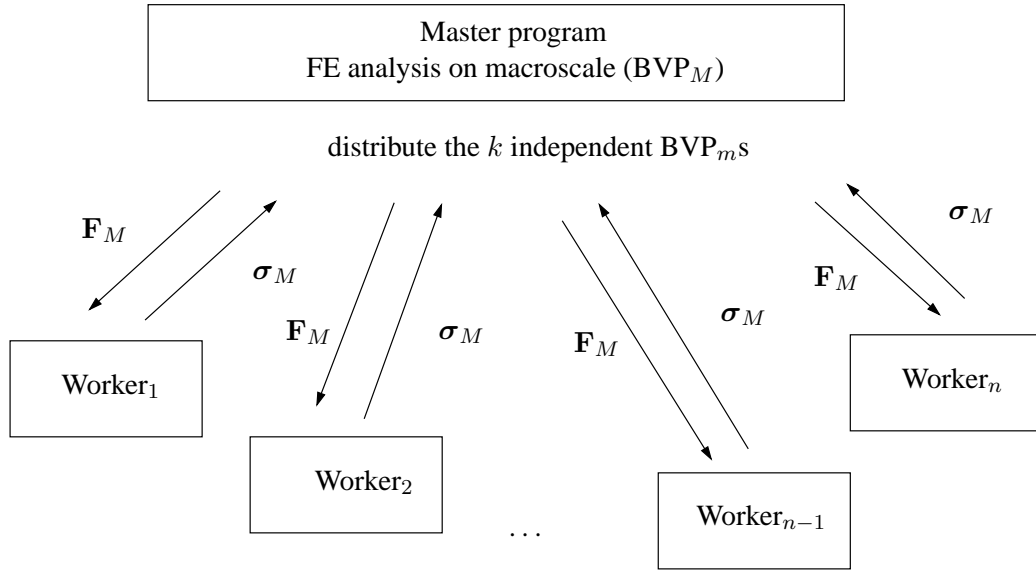


Figure 2: Distributed computing of microscopic BVP<sub>*m*</sub>s

the nonlinear BVP<sub>M</sub> the Master program distributes in each step of the iterative solution procedure the  $k$  independent BVP<sub>*m*</sub>s to the Workers, obtains the homogenized stresses  $\boldsymbol{\sigma}_M$  and solves the macroscopic equation system.

### 3 Simple shear test - first-order FE<sup>2</sup>

In the simple shear test as depicted in Figure 3 we apply periodic boundary conditions to the left and to the right boundary on the macroscopic level. One benefit of the periodic boundary conditions is, of course, the reduction in the number of elements, here only  $1 \times 10$  bi-quadratic elements are used. The height of the shear layer is set to  $H = 2 \text{ mm}$ .

On the microscopic level we use randomly disturbed microstructures as shown in Figure 4. Note, that the disturbances are varied statistically for each macroscopic integration point leading to a more realistic modeling. The aspect ratio (length/thickness) of the beams is  $\leq 15$ . The discretization is based on two-dimensional higher-order finite elements, see for example [4], [11]. The microscopic material behavior is of Neo-Hookean type where the strain energy (density) function per unit volume is given by

$$\Psi = \frac{\mu}{2} (I_C - 3) - \mu \ln J + \frac{\Lambda}{2} (\ln J)^2. \quad (5)$$

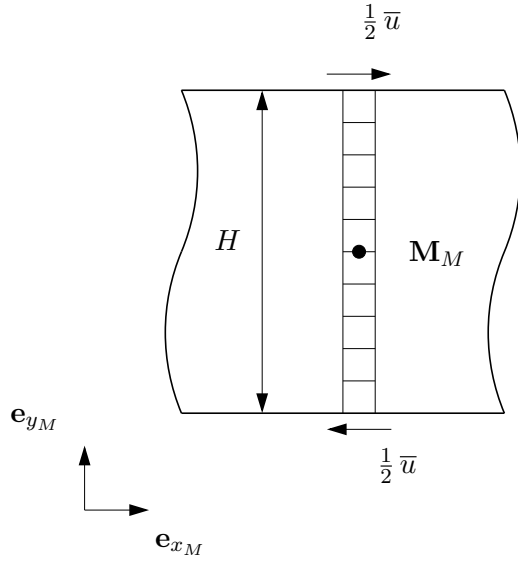


Figure 3: Simple shear test with periodic boundary conditions

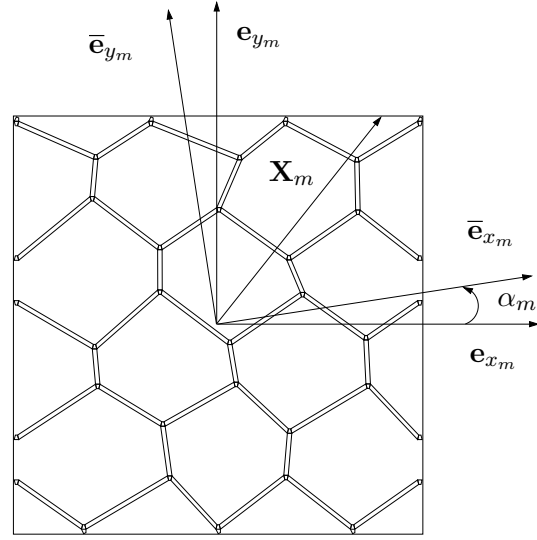


Figure 4: Discretized microstructure with random disturbances and orientation angle  $\alpha_m$

Here,  $I_C$  is the first invariant of the right Cauchy-Green tensor  $\mathbf{C} = \mathbf{F}^T \cdot \mathbf{F}$ , and  $J$  is the determinant of the deformation gradient  $\mathbf{F}$ . The material constants  $\mu$  and  $\Lambda$  are set to:  $\mu = 80.8 \text{ GPa}$  and  $\Lambda = 121.1 \text{ GPa}$ .

In Figure 5 the macroscopic load-shearing-angle curve ( $F_{xy}$  vs.  $\tan(\gamma) = \frac{\bar{u}}{H}$ ) and the deformed microstructures at the midpoint  $\mathbf{M}_M$  (refer to Figure 3) for two different orientations of the microstructure are shown. For both orientations nonlinear curves are observed until  $\tan(\gamma) \approx 0.3$ , which then transform into straight lines. The pictures of the deformed microstructures indicate that there is a deformation-induced anisotropy, i.e. the gradual change of the load carrying behavior from bending to tension. A quantitative investigation of this deformation-induced anisotropy can be found in [9]. Note additionally, that the general anisotropy of our microstructure with respect to the orientation becomes obvious when comparing the tension bands: For  $\alpha_m = 0^\circ$  they are more pronounced and lead to a stiffer behavior.

#### 4 Large strain compression of a three-dimensional cellular structure - microscopic approach

In this section we investigate a three-dimensional large strain compression test as depicted in Figure 6. The computation is force controlled by the load factor  $\lambda$ .

Three-dimensional cellular structures can be modeled by combining polyhedron unit cells as shown by STRÖHLA, WINTER and KUHN [10]. The unit cell, our computation is based on, can be found in Figure 7. It is already discretized and consists of 60 brick- and beamlike three-dimensional higher-order solid elements [11]. In Figure 8 the composed structure is depicted to which the boundary conditions of Figure 6 are applied. In each spatial direction four unit cells are used. In the interior the brick-like elements are statistically disturbed leading to a more realistic modeling of the foam. The thickness of the beams is  $1 \text{ mm}$ , and the length has an average of approximately  $10 \text{ mm}$ . This leads to an equilateral cube with dimension  $D = 113.13 \text{ mm}$ . The material constants in the Neo-Hookean law as stated in

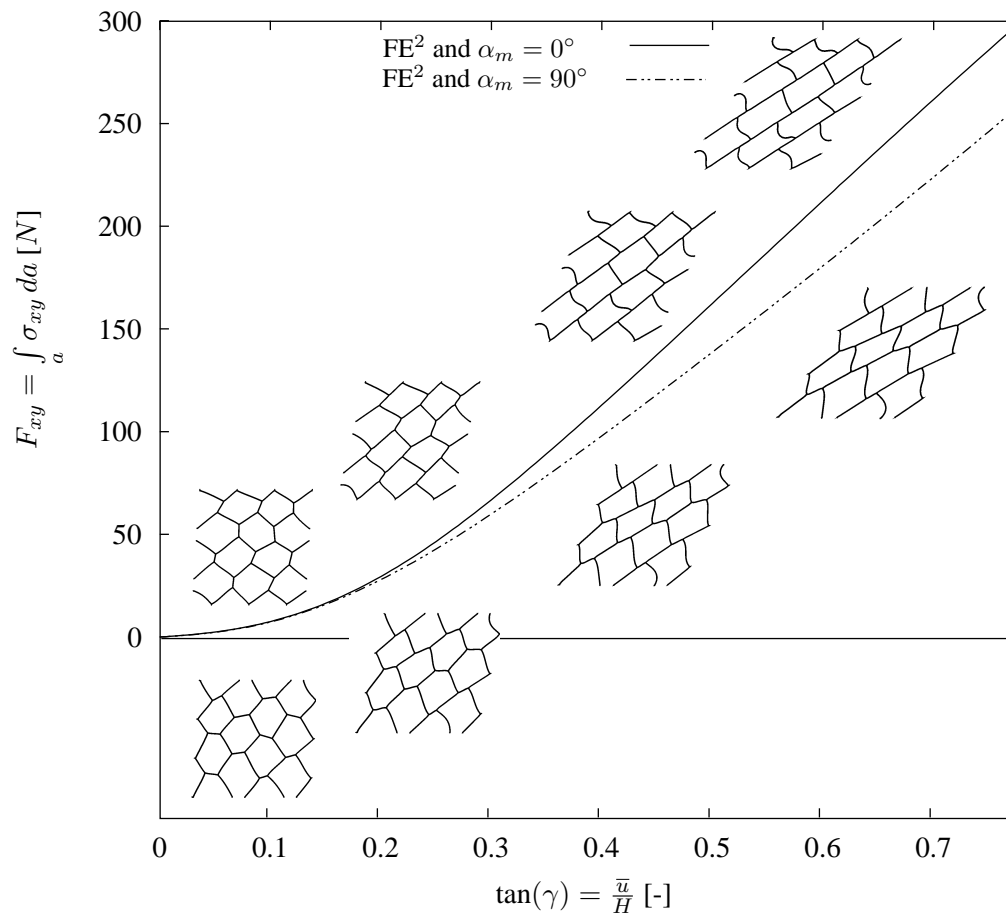


Figure 5: Shear test: Load-shearing-angle curve for orientations  $\alpha_m = 0^\circ$  and  $\alpha_m = 90^\circ$ ; for both orientations the deformed microstructures at the midpoint  $M_M$  (see Figure 3) are plotted

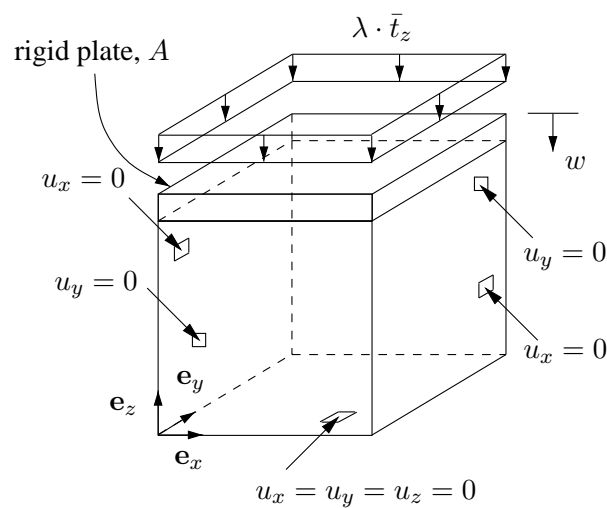


Figure 6: Three-dimensional cellular structure - boundary conditions

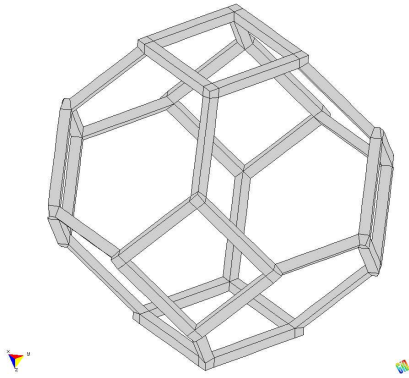


Figure 7: Polyhedron unit cell - geometry and discretization

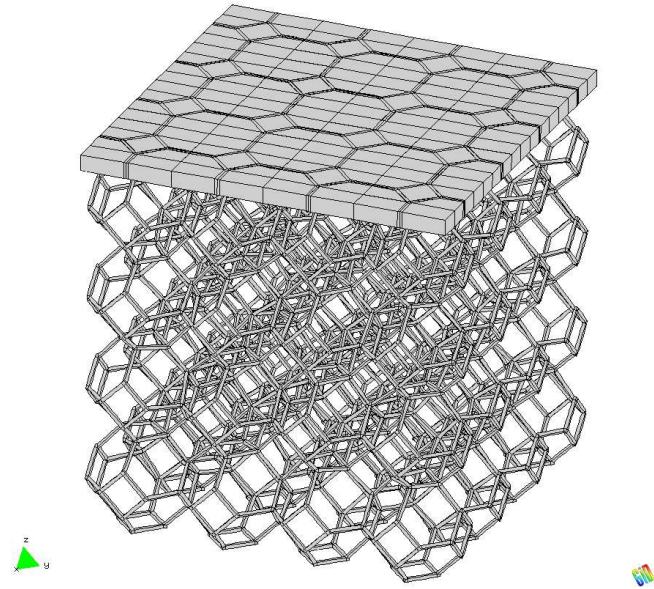


Figure 8: Three-dimensional cellular structure - composed out of unit cells

Equation (5) are:  $\mu = 26.923 \text{ GPa}$  and  $\Lambda = 40.384 \text{ GPa}$ . The numerical simulation yields a load-compression curve ( $F_z$  vs.  $\varepsilon_{eng_z}$ ) as plotted in Figure 9, which is qualitatively in good agreement with experimentally obtained curves, see FÁTIMA VAZ and FORTES [5]. The curve can be divided into three regimes:

- Until  $\varepsilon_{eng_z} \approx 2.5\%$  the curve exhibits a steep slope. This is the bending dominated regime.
- For  $\varepsilon_{eng_z} > 2.5\%$  the slope strongly flattens, i.e. changes in  $F_z$  are small. Therefore, this regime is termed as *stress plateau* in the literature. The reason for the flattening is that more and more cells start to buckle.
- At  $\varepsilon_{eng_z} \approx 20\%$  some cells get into contact. This third regime (crushing regime) cannot be investigated since no contact formulation is implemented, yet.

## 5 Conclusions and outlook

In this contribution we presented a *two-dimensional* first-order  $FE^2$  framework suited for geometrically nonlinear computations of cellular materials. Since the  $FE^2$  approach is parallel by its nature, the presented framework makes use of distributed computing, which reduces the overall computation time. In our numerical multiscale example we demonstrated that the presented framework is able to capture the deformation-induced anisotropy (i.e. changing the load carrying behavior from bending to tension) within the microstructures and the general anisotropy of our microstructures.

To give an outlook on fully *three-dimensional computations* a numerical compression test based on the microscopic approach was included in our paper. In this test the characteristic behavior of cellular materials under compression could be reproduced.

In future work we will mainly focus on two topics: Firstly, our  $FE^2$  framework will be enhanced by extended continua on the macroscale in order to investigate size effects. Secondly, three-dimensional

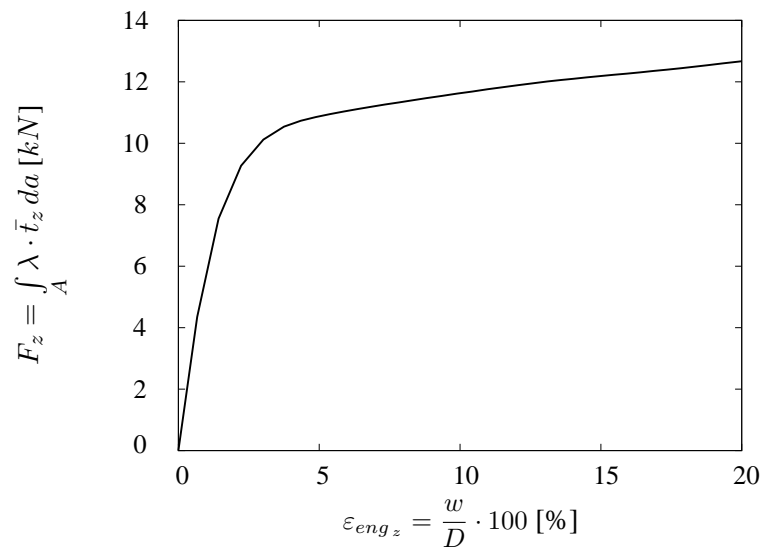


Figure 9: Three-dimensional cellular structure - load-compression curve

multiscale computations with application to sandwich materials are planned.

**Acknowledgments** The support by the Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) is gratefully acknowledged (DI 430/7-2, DU 405/2-2, RA 624/16-2).

## References

- [1] W. B. Anderson and R. S. Lakes. Size effects due to Cosserat elasticity and surface damage in closed-cell polymethacrylimide foam. *J. Mat. Sci.*, 29:6413–6419, 1994.
- [2] S. Diebels and H. Steeb. The size effect in foams and its theoretical and numerical investigation. *Proc. R. Soc. Lond. A*, 458:2869–2883, 2002.
- [3] S. Diebels and H. Steeb. Stress and couple stress in foams. *Comp. Mat. Science*, 28:714–722, 2003.
- [4] A. Düster, H. Bröker, and E. Rank. The p-version of the finite element method for three-dimensional curved thin walled structures. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 52:673–703, 2001.
- [5] M. Fátima Vaz and M. A. Fortes. Characterization of deformation bands in the compression of cellular materials. *Journal of Materials Science Letters*, 12:1408–1410, 1993.
- [6] J. Hohe and W. Becker. Effective mechanical behavior of hyperelastic honeycombs and two-dimensional model foams at finite strain. *International Journal of Mechanical Sciences*, 45:891–913, 2003.
- [7] V. G. Kouznetsova. *Computational homogenization for the multi-scale analysis of multi-phase material*. PhD-thesis, Technische Universiteit Eindhoven, The Netherlands, 2002.

- [8] P. R. Onck. Cosserat modeling of cellular solids. *C. R. Mecanique*, 330:717–722, 2002.
- [9] H.-G. Sehlhorst, R. Jänicke, A. Düster, E. Rank, H. Steeb, and S. Diebels. Numerical investigations of foam-like materials by nested high-order finite element methods. *Computational Mechanics*, 45:45–59, 2009.
- [10] S. Ströhla, W. Winter, and G. Kuhn. Numerische Ermittlung elastischer Eigenschaften von Metallschäumen mit Polyeder-Einheitszellen. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 31:444–446, 2000.
- [11] B.A. Szabó, A. Düster, and E. Rank. The p-version of the Finite Element Method. In E. Stein, R. de Borst, and T. J. R. Hughes, editors, *Encyclopedia of Computational Mechanics*, volume 1, chapter 5, pages 119–139. John Wiley & Sons, 2004.

# Aktuelle Ergebnisse aus der laufenden Forschungsarbeit “Corporate Sustainability Management (CSM) in der Containerschifffahrt“

Patric Drewes

Institut für Verkehrsplanung und Logistik  
Schwarzenbergstrasse 95 E  
21079 Hamburg  
e-mail: Drewes@TU-Harburg.de

## 1 Einleitung und Zielsetzung

### 1.1 Notwendigkeit und Problematik des CSM für Linienreedereien<sup>1</sup>

Die politische Debatte über eine nachhaltige Entwicklung hat sich in konkreten Zielsetzungen niedergeschlagen, die auch die maritime Wirtschaft berücksichtigen. So gab Angela Merkel als EU-Ratspräsidentin das Ziel aus, die Emissionen in der EU bis 2020 um mindestens 20 % zu verringern und ließ in ihrer Eröffnungsrede der EU-Meereskonferenz in Bremen im Mai 2007 keinen Zweifel daran, dass auch die maritime Wirtschaft eine nachhaltige Entwicklung mitgestalten muss (vgl. Merkel 2007, S. 15).

Pro-aktive Linienreedereien nehmen als Teil der maritimen Wirtschaft die politische Forderung an. Häufig fehlt es jedoch an den notwendigen betriebswirtschaftlichen Kenntnissen zum Corporate Sustainability Management (CSM), also zur nachhaltigen Unternehmensführung. Dieses liegt nicht zuletzt an der vorhandenen Vielzahl von wissenschaftlichen und politischen Konzepten. Für Unternehmen ist es schwierig, Konzepte klar abzugrenzen und geeignete Managementanforderungen abzuleiten. Eine Hilfestellung für ein erfolgreiches CSM in der Containerschifffahrt in Form einer anwendungsorientierten Handlungsempfehlung ist für die Privatwirtschaft unabdinglich. Diesen bestehenden Engpass soll die Forschungsarbeit “Corporate Sustainability Management (CSM) in der Containerschifffahrt” aus einer wissenschaftlichen Perspektive beheben.

### 1.2 Zielsetzung, Gegenstand und Forschungsfragen der Arbeit

#### 1.2.1 Zielsetzung

Die Zielsetzung des Forschungsvorhabens strukturiert sich in die folgenden Teilziele:

- *Die pro-aktivsten Linienreedereien im Bereich Corporate Sustainability Management (CSM) aus den Regionen Nordeuropa, China und Japan sollen identifiziert werden.*
- *Das CSM dieser Linienreedereien soll analysiert werden, um Erfolgsfaktoren und Hemmnisse sowie vorliegende regionale Unterschiede zu ermitteln.*
- *Die gewonnenen Erkenntnisse sollen zur Erstellung einer anwendungsorientierten Handlungsempfehlung für ein erfolgreiches CSM in der Containerschifffahrt genutzt werden.*

---

<sup>1</sup> Linienreedereien im containerisierten Seeverkehr werden nachfolgend als „Linienreedereien“ bezeichnet. Es ist jedoch anzumerken, dass in der Schifffahrt vereinzelt Linienverkehre von Reedereien angeboten werden, die sich auf den Transport von nicht-containerisierten Gütern, wie bspw. Stahlrohre oder Industrieanlagen, spezialisiert haben (bspw. die Reederei NYK-Hinode Line, Ltd.).

## 1.2.2 Untersuchungsgegenstand

Gegenstand des Forschungsvorhabens ist das “Corporate Sustainability Management (CSM) von Linienreedereien”. Die zentralen Begrifflichkeiten “CSM” und “Linienreedereien” werden wie folgt definiert:

- *Corporate Sustainability Management (CSM) umfasst die visionäre, strategische und operationelle Antwort auf Nachhaltigkeits-Issues<sup>2</sup>, die durch Primär- und Sekundäraktivitäten eines Unternehmens verursacht werden (Eigene Definition in Anlehnung an Salzmann 2006, S. 17).*
- *Linienreedereien sind in der containerisierten Schifffahrt operierende Unternehmen, die Häfen in bestimmten Fahrtgebieten in einem fixen Rhythmus anfahren (vgl. Voth 2001, S. 238).*

## 1.2.3 Forschungsfragen

Folgende zentrale Forschungsfrage der Arbeit leitet sich von der Zielsetzung der Forschungsarbeit ab:

*Wie gestaltet sich für eine Linienreederei die Umsetzung eines erfolgreichen Corporate Sustainability Management (CSM)?*

Im erweiterten Blickwinkel ergeben sich die nachstehenden untergeordneten Forschungsfragen, die innerhalb der Forschungsarbeit bearbeitet werden:

- *Wie gestalten sich die Struktur der Containerschifffahrtsindustrie, das Geschäftssystem und die Marktpositionierung der Linienreedereien (Status Quo)?*
- *Was sind die zentralen Nachhaltigkeits-Issues der Containerschifffahrtsindustrie, welche Perspektive nehmen die Shareholder- und Stakeholder-Gruppen ein, und welche allgemeine betriebswirtschaftliche Relevanz haben die Nachhaltigkeits-Issues?*
- *Wer sind die pro-aktivsten Linienreedereien im Bereich CSM aus den Regionen Nordeuropa, China und Japan?*
- *Wie gestaltet sich das CSM bei den pro-aktivsten Linienreedereien aus den Regionen Nordeuropa, China und Japan hinsichtlich der Vision, der strategischen Ausrichtung sowie der operationellen Umsetzung?*
- *Was sind die Erfolgsfaktoren und Barrieren für ein erfolgreiches CSM in der Containerschifffahrt?*
- *Bestehen regionale Unterschiede im CSM zwischen den Linienreedereien aus Nordeuropa, China und Japan?*
- *Welche Handlungen sind Linienreedereien für die erfolgreiche Umsetzung eines CSM zu empfehlen?*

---

<sup>2</sup> Nachhaltigkeits-Issues umfassen einen internen oder externen Zustand oder Druck auf ein Unternehmen, der bei Fortbestand signifikante Auswirkungen auf die Funktionsweise des Unternehmens oder der zukünftigen unternehmerischen Interessen haben wird (vgl. Achleitner 1985, S. 90).

### 1.3 Struktur der Forschungsarbeit

Aus den Forschungsfragen und den Erkenntnisinteressen leitet sich folgende Struktur für die Forschungsarbeit ab:

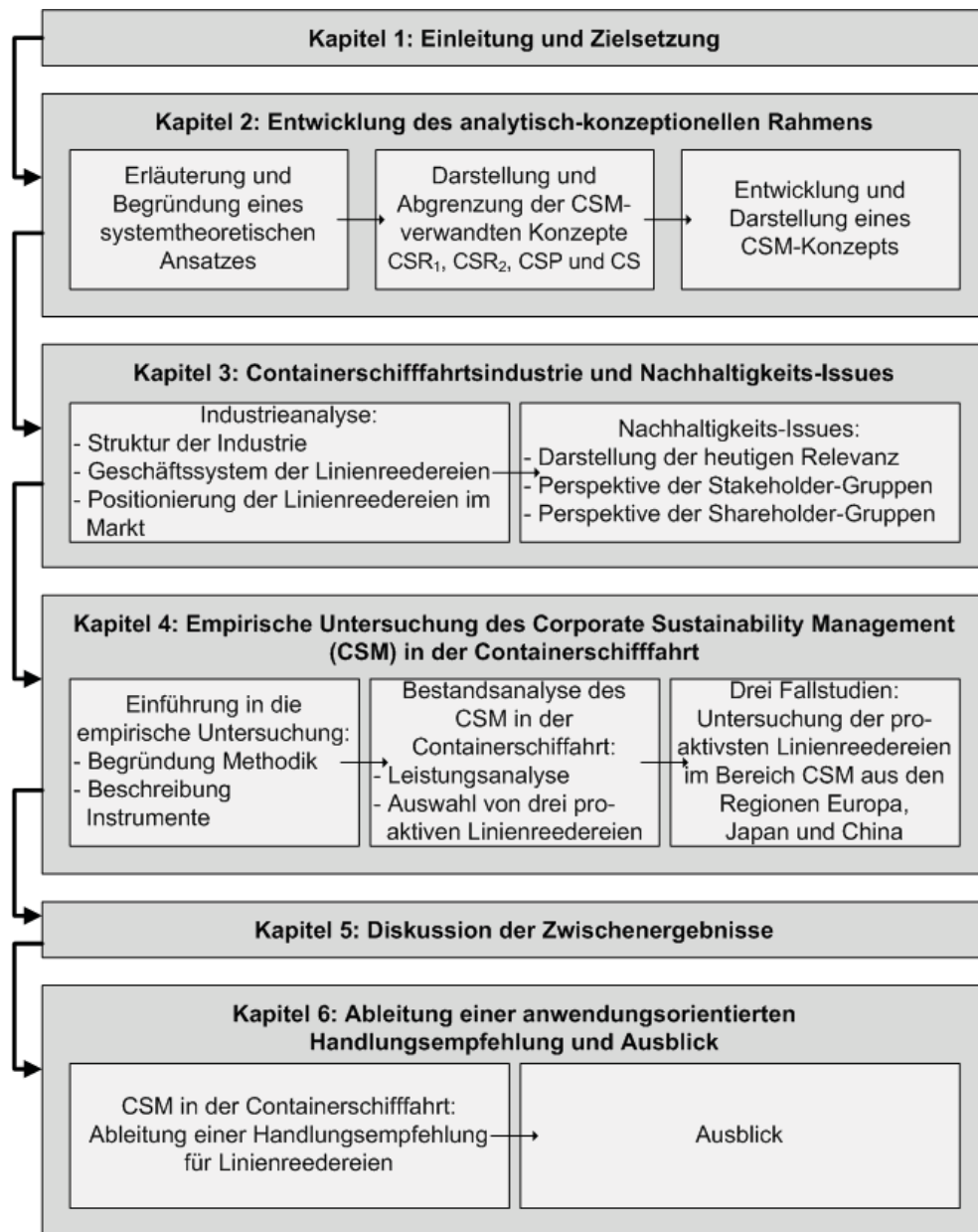


Abbildung 1: Struktur der Forschungsarbeit

Nach Einführung in die Thematik und Erläuterung der Zielsetzung der Forschungsarbeit wird der analytisch-konzeptionelle Rahmen aufgespannt. Dies beinhaltet, dass der gewählte systemtheoretische Ansatz begründet wird und die dem CSM-Konzept angrenzenden Konzepte Corporate Social Responsibility (CSR<sub>1</sub>), Corporate Social Responsiveness (CSR<sub>2</sub>), Corporate Social Performance (CSP) und Corporate Responsibility (CR) abgegrenzt werden. Anschließend werden die bestehenden CSM-Konzepte dargestellt und den CSM-angrenzenden Konzepten gegenübergestellt. Basierend auf diesen Erkenntnissen wird ein eigenständiges CSM-Konzept entwickelt.

Um das notwendige Verständnis für die Containerschiffahrtsindustrie sowie die von ihr verursachten negativen externen Effekte zu vermitteln, folgt im Anschluss an das theoretische Kapitel die Darstellung der Containerschiffahrtsindustrie und die bestehenden Nachhaltigkeits-Issues. Die Industrieanalyse bildet die Struktur der Containerschiffahrtsindustrie, das Geschäftssystem der Linienreedereien, sowie die Positionierung der Linienreedereien im Markt ab. Die Betrachtung der Nachhaltigkeits-Issues fokussiert sowohl auf die damit in Verbindung stehenden negativen externen Effekte, als auch auf die Darstellung der Perspektiven der Shareholder- und Stakeholder-Gruppen.

Abschließend wird die allgemeine betriebswirtschaftliche Relevanz der Nachhaltigkeits-Issues beurteilt.

Hiernach erfolgt die empirische Untersuchung des CSM. Nach Einführung in die angewandte Methodik erfolgt die Erhebung des Status Quos des CSM in der Containerschifffahrt. Die proaktivsten Linienreedereien im Bereich CSM werden ermittelt, um schließlich die Best-Performer aus den Regionen Nordeuropa, China und Japan zu untersuchen. Diese werden mittels Fallstudienmethodik analysiert, um auszuarbeiten, wie sich bei diesen Linienreedereien ein CSM gestaltet, was die damit verbundenen Erfolgsfaktoren und Barrieren sind und ob regionale Unterschiede in den Ansätzen identifizierbar vorliegen.

Nach einer umfassenden Diskussion der erzielten Ergebnisse wird für die Linienreedereien eine anwendungsorientierte Handlungsempfehlung abgeleitet. Ergänzend wird ein Ausblick gegeben, der eine mögliche Entwicklung des CSM in der Containerschifffahrt aufzeichnet und auch zukünftige Forschungsfelder erörtert.

## 2 Entwicklung eines analytisch-konzeptionellen Rahmens

### 2.1 Abgrenzung der bestehenden Konzepte

Welche Managementanforderungen werden an eine nachhaltige Unternehmensführung gestellt? Um diese Fragestellung beantworten zu können, wurden die bestehenden Konzepte erläutert und abgegrenzt sowie ein eigenständiges CSM-Konzept entwickelt.

Für die CSM-angrenzenden Konzepte Corporate Social Responsibility (CSR<sub>1</sub>), Corporate Social Responsiveness (CSR<sub>2</sub>), Corporate Social Performance (CSP) und Corporate Sustainability (CS) konnten eindeutige konzeptionelle Schwerpunkte ermittelt werden:

- *Corporate Social Responsibility (CSR<sub>1</sub>) fokussiert auf normative Unternehmensprinzipien in Bezug auf die Übernahme gesellschaftlicher Verantwortung (Bowen 1953; Davis 1960; McGuire 1963; Davis 1967; Walton 1967; CED 1971; Johnson 1971; Jones 1980; Drucker 1984).*
- *Corporate Social Responsiveness (CSR<sub>2</sub>) richtet den Blick auf Prozesse des Unternehmensverhaltens bzgl. der Übernahme gesellschaftlicher Verantwortung (Sethi 1975; Ackermann und Bauer 1976; Frederick 1978).*
- *Corporate Social Performance (CSP) fokussiert auf die erzielten Ergebnisse (auch prozessorientierte Ergebnisse) bzgl. der Übernahme gesellschaftlicher Verantwortung (Sethi 1975; Carroll 1979; Strand 1983; Wartick und Cochran 1985; Wood 1991; Salzmann 2006).*
- *Corporate Sustainability (CS) beinhaltet das simultane Streben nach ökologischen, sozialen und ökonomischen Zielen (dreidimensionales Zielsystem) in Anlehnung an das politische Konzept der Nachhaltigen Entwicklung (WCED 1987; International Chamber of Commerce 1990; Elkington 1997; Dyllick und Hockerts 2002; Wilson 2003).*

Im Gegensatz zu den Konzepten Corporate Social Responsibility (CSR<sub>1</sub>), Corporate Social Responsiveness (CSR<sub>2</sub>) und Corporate Social Performance (CSP) nimmt das Konzept Corporate Sustainability (CS) keine mikro-ökonomische, sondern eine makro-ökonomische Perspektive an.

### 2.2 Entwicklung eines CSM-Konzepts

Das Konzept Corporate Sustainability Management (CSM) ist in der wissenschaftlichen Debatte nur vereinzelt im Rahmen von Corporate Social Performance- (CSP-) Konzepten debattiert worden (Wood 1991; Salzmann 2006). An der Darstellung wird aufgrund der besseren Verständlichkeit festgehalten, so dass ein CSP-Konzept entwickelt worden ist, welches sich – wie nachstehend abgebildet und erläutert – aus den Bestimmungsgrößen, den Kernelementen und den Ergebnissen und

Folgewirkungen des CSM zusammensetzt.

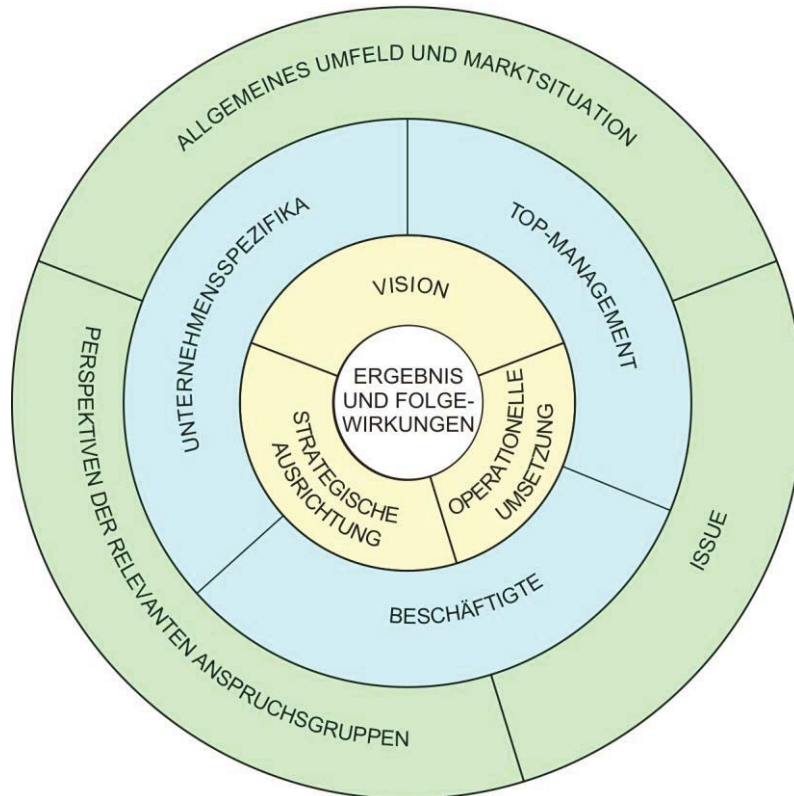


Abbildung 2: CSP-Modell als theoretisches Rahmenkonzept für ein CSM

### Bestimmungsgrößen des CSM-Konzepts

Die zwei äußeren Modellebenen (zweiter und dritter bzw. äußerster Ring) spiegeln die externen und internen Bestimmungsgrößen (Determinanten) des CSM wider. Folgende Bestimmungsgrößen werden differenziert:

- Externe Bestimmungsgrößen des CSM:
  - o Allgemeines Umfeld und Marktsituation,
  - o Nachhaltigkeits-Issues und
  - o Perspektiven der relevanten Anspruchsgruppen.
- Interne Bestimmungsgrößen des CSM:
  - o Unternehmensspezifische Determinanten,
  - o Persönlichkeitsmerkmale des Topmanagements,
  - o Persönlichkeitsmerkmale der Beschäftigten.

Zwischen den Bestimmungsgrößen und dem CSM liegen konkrete Zusammenhänge vor, die an dieser Stelle aus Kapazitätsgründen nicht dargestellt werden.

### Kernelemente des CSM-Konzepts

Die Elemente Vision, strategische Ausrichtung und operationelle Umsetzung bilden den Kern des CSM-Konzepts (erster Ring).

Die **Vision** ist eine „herausfordernde Wunschvorstellung“ (vgl. Eschenbach, Eschenbach *et al.* 2008, S. 125) die „als Reiz [...] Auslöser für den kreativen Prozess“ (Lütke 2007, S. 45) ist, indem die Grundlage für eine „schöpferische Spannung“ (Fatzer 1993, S. 149) gelegt wird. Die Vision gibt eine realistische, glaubwürdige und attraktive Zukunftsbeschreibung ab, die einen Zustand darstellt, der in einigen wichtigen Aspekten besser ist als die gegenwärtige Situation. Die Vision als Kernelement des CSM beinhaltet die Integration ökologischer und sozialer Nachhaltigkeits-Issues in das Zukunftsbild des Unternehmens. Auf diesem Wege wird den Beschäftigten die Fragestellung beantwortet, in

welche Richtung sich das Unternehmen in Bezug auf Nachhaltigkeits-Issues zukünftig entwickeln soll („Wo wollen wir hin?“). Die Vision leistet somit die notwendige konzeptionelle Weitsicht eines CSM.

Die Entwicklung einer Vision strukturiert sich in zwei Hauptphasen. In der ersten Phase wird die Ist-Situation des Unternehmens erfasst. Der Schwerpunkt der Analyse liegt auf der „Problematisierung und Sensibilisierung des unternehmensinternen Identitätsbewusstseins“ (Lux 1992, S. 248). In der zweiten Phase erfolgt die „Bestandsaufnahme der im Unternehmen vorhandenen Erfahrungen und des faktischen Wissens aus der Zusammenarbeit, der Marktbearbeitung sowie der konkreten, anfaßbaren Ergebnisse“ (Lux 1992, S. 241). Die Durchführung der dargestellten Phasen gewährleistet die dynamische Entwicklung einer Vision in einem interaktiven Konsensprozess (vgl. Lux 1992, S. 241-249).

Ein solcher Prozess hat zur Folge, dass bereits zu Beginn der Visionsentwicklung die notwendige „Aufbruchstimmung“ bei den Beschäftigten erzeugt wird. Der Mensch wird in den Mittelpunkt gestellt, um die Zielsetzung zu erreichen, dass die Vision für alle Beschäftigten verständlich ist, jeder seinen Beitrag für ein erfolgreiches CSM nachvollziehen kann und folglich die Vision mitträgt und vorlebt (vgl. Gerlach 1992, S. 281). Auf diese Weise ist die Vision für das Unternehmen sinnstiftend und nimmt die angestrebte motivierende Funktion ein (vgl. Hering und Frick 2003, S. 28).

Die **Strategie** umfasst den unternehmerischen Willen, ökologische und soziale Nachhaltigkeits-Issues und -Ziele sowie die gesellschaftlichen Bedürfnisse systematisch und anhaltend in die Unternehmensstrategie zu integrieren. Der Zeithorizont ist langfristig (vgl. Burschel, Losen *et al.* 2004, S. 586; Salzmann 2006, S. 17). In der zeitlichen Reichweite der Unternehmensstrategien liegt die wesentliche Herausforderung. Einerseits müssen die Auswirkungen von Nachhaltigkeits-Issues antizipativ und andererseits das Verhalten der relevanten Stakeholder-Gruppen über einen bestimmten Zeitraum hinweg klar bestimmt werden, um konkrete Maßnahmen und damit verbundene Handlungen ableiten zu können (vgl. Meffert und Kirchgeorg 1999, S. 319).

**Operationelle Prozesse** umfassen Implementierungsprozesse zur Umsetzung der Strategie. Solche Prozesse beinhalten die Umsetzung von Strukturmaßnahmen, den Einsatz von Managementwerkzeugen („Tools“) sowie das Anstoßen von Initiativen, die wie folgt zu interpretieren sind (vgl. Salzmann 2006, S. 18):

- Das Umsetzen von Strukturmaßnahmen umfasst Eingriffe in die bestehende Unternehmensstruktur (bspw. die Gründung einer CSM-Abteilung).
- Das Einsetzen von Managementwerkzeugen beinhaltet konkrete betriebswirtschaftliche Methoden zur Sicherung der strategischen Ausrichtung.
- Das Anstoßen von Initiativen fokussiert auf unternehmerische Initiativen zur Beseitigung von bestehenden Nachhaltigkeits-Issues.

Als ein erstes Ergebnis kann festgehalten werden, dass keine allgemeine Lösung für die Umsetzung eines erfolgreichen CSM besteht. Jedes Unternehmen besitzt individuelle Charakteristika und einen damit verbundenen spezifischen Komplexitätsgrad. Es sind demnach maßgeschneiderte Lösungen erforderlich.

## **Ergebnisse und Folgewirkungen des CSM**

Es wird zwischen Ergebnissen und Folgewirkungen des CSM differenziert:

- Die **substanziellen Ergebnisse** des CSM umfassen Veränderungen der durch Primär- und Sekundäraktivitäten verursachten ökologischen, sozialen und ökonomischen Leistung. Ergebnisse sind quantitativ erfassbar. Dementsprechend können sie positiv oder negativ sein (vgl. Salzmann 2006, S. 19).
- **Folgewirkungen** eines CSM beinhalten qualitativ darstellbare Folgen eines CSM (bspw. die Sensibilisierung der Beschäftigten). Die zeitliche Dimension nimmt eine mittel- bis langfristige Perspektive an.

Die Evaluation der Ergebnisse und Folgewirkungen nimmt neben der reinen Dokumentation eine wichtige Aufgabe des CSM ein.

### 3 Erste empirische Ergebnisse: Ermittlung der pro-aktivsten Linienreedereien

Mithilfe des aufgezeigten analytischen Rahmens sollen pro-aktive Reedereien im Bereich des CSM aus den Regionen Japan, China und Nordeuropa untersucht werden. Die Grundvoraussetzung für diesen Schritt ist, dass im Vorfeld Best-Practise Unternehmen identifiziert werden. Dieser Schritt ist anhand einer CSM-Leistungsanalyse der 20 führenden Linienreedereien durchgeführt worden. Die folgenden Kriterien sind zur Leistungsbeurteilung ausgewählt worden:

- Veröffentlichung einer Environmental Policy,
- Veröffentlichung eines Environmental Reports,
- Zertifizierung nach ISO 14.001,
- Zertifizierung nach ISO 9.001 und
- Mitglied der Clean Cargo Working Group.

Bei der Kriterienselektion stand die Nachvollziehbarkeit der Erfüllung bzw. Nichterfüllung im Vordergrund. Die Bewertung der Kriterien erfolgte gleichgewichtet, so dass die Erfüllung eines Kriteriums mit 1 Punkt und die Nichterfüllung mit 0 Punkten bewertet wurde. Kriterien zu denen keine Angaben verfügbar waren, sind ebenfalls mit 0 Punkten bewertet worden.

**Tabelle 1: Leistungsanalyse des CSM der 20 größten Linienreedereien (vgl. AXS-AlphaLineer 2008) anhand von fünf Leistungskriterien<sup>3</sup>**

Linienreederei	Unternehmenssitz	Environmental		Certification		Clean Cargo Working Group	Bewertung in Punkten
		Environmental Policy	Environmental Report	ISO 14.001	ISO 9.001		
Maersk	Europa	1	1	1	1	1	5
MSC		1	k. A.	k. A.	k. A.	1	2
CMA-CGM		1	1	-	-	1	3
Hamburg Süd		1	1	1	1	1	5
Hapag-Lloyd		1	1	1	1	1	5
COSCO	China	1	1	1	1	1	5
CSAV		1	-	1	1	-	3
CSCCL		1	-	-	-	-	1
NYK	Japan	1	1	1	1	1	5
MOL		1	1	1	1	-	4
„K“-Line		1	1	1	1	1	5
OOCL	Hongkong	1	1	1	1	1	5
Hanjin	Südkorea	1	1	1	1	-	4
Zim	Israel	1	1	1	1	-	4
Yang Ming Line	Taiwan	1	1	1	1	1	5
Evergreen Line	Taiwan	1	-	S	1	-	2
Hyundai M.M.	Südkorea	1	1	1	1	1	5
APL (NOL)	Singapur	1	1	1	1	1	5
PIL	Singapur	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	-	0
Wan Hai Lines	Taiwan	1	-	1	-	-	2

<sup>3</sup> K.A. = Keine Angaben, S = In Bearbeitung.

50% der befragten Unternehmen erfüllen 100% der Kriterien. 15% dieser Unternehmen sind europäischer, 5% chinesischer, 10% japanischer Herkunft und 20% aus sonstigen Ländern (Singapur, Hongkong, Taiwan und Südkorea). Unter Berücksichtigung des Rankings und der regionalen Herkunft der Unternehmen standen die folgenden Linienreedereien für eine vertiefende Fallstudienanalyse im Rahmen der Forschungsarbeit zur Disposition:

**Tabelle 2: Best-Practise Unternehmen aus den Regionen Japan, China und Europa**

Japan	China	Europa
NYK Line	COSCO	Maersk
Mitsui O.S.K. Line (MOL)		Hapag-Lloyd
„K“-Line		Hamburg-Süd

Die Linienreedereien NYK, COSCO und Maersk sind für die vertiefende Fallstudienanalyse ausgewählt worden, da sie in ihrer Region jeweils Marktführer (gemessen nach TEU-Kapazität) sind. Das Unternehmen Maersk ist zudem globaler Weltmarktführer. Im Falle COSCO ist hinzuzufügen, dass kein alternatives Best-Practise Unternehmen in China identifiziert werden konnte.

## 4 Fazit und Ausblick

Das konzeptionelle Gerüst wurde erarbeitet und die zu untersuchenden Linienreedereien sind ausgewählt worden. Zielsetzung ist es nun, diese Unternehmen im Rahmen von Fallstudien zu analysieren, um die Erfolgsfaktoren und Hemmnisse des CSM in der Containerschifffahrt zu ermitteln. Auf dieser Basis wird eine Handlungsempfehlung für die maritime Industrie erarbeitet. Linienreedereien, die ökologische und soziale Aspekte bisher in ihrem täglichen Geschäftsgebaren nicht berücksichtigen, wird auf diese Weise eine Unterstützung angeboten, die die Initiierung und zu verstetigen.

## Literatur

- (1) Achleitner, P. (1985). Soziopolitische Strategien multinationaler Unternehmungen. Bern und Stuttgart.
- (2) Ackermann, R. und R. Bauer (1976). Responsiveness: The Modern Dilemma. Reston, Reston Publishing Company.
- (3) AXS-Alphaliner (2008). Cellular fleet forecast.
- (4) Bowen, H. R. (1953). Social Responsibilities of the Businessman. New York, Harper and Brothers.
- (5) Burschel, C. J., D. Losen, et al. (2004). Betriebswirtschaftslehre der Nachhaltigen Unternehmung. München.
- (6) Carroll, A. B. (1979). "A Three-Dimensional Conceptual Model of Corporate Performance." Academy of Management Review 4(4): 497-505.
- (7) CED (1971). Social Responsibilities of Business Corporations. New York.
- (8) Davis, K. (1960). "Can Business Afford To Ignore Social Responsibilities?" California Management Review 2(3): 70-76.
- (9) Davis, K. (1967). "Understanding The Social Responsibility Puzzle - What Does The Businessman Owe to Society?" Business Horizons 10: 45-50.
- (10) Drucker, P. F. (1984). "Converting Social Problems into Business Opportunities: The New Meaning of Corporate Social Responsibility." California Management Review 26(2): 53-63.
- (11) Dyllick, T. und K. Hockerts (2002). "Beyond the Business Case for Corporate Sustainability." Business Strategy and The Environment(11): 130-141.
- (12) Elkington, J. (1997). Cannibals With Forks - The Triple Bottom Line of 21st Century Business. Oxford, Capstone Publishing.
- (13) Eschenbach, R., S. Eschenbach, et al. (2008). Strategische Konzepte. Stuttgart, Schäffer-Poeschel Verlag.
- (14) Fatzer, G. (1993). Organisationsentwicklung für die Zukunft - Ein Handbuch.
- (15) Frederick, W. C. (1978). From CSR<sub>1</sub> to CSR<sub>2</sub>: The Maturing of Business-and-Society Thought. Pittsburgh, Graduate School of Business, University of Pittsburgh.
- (16) Gerlach, T. (1992). Vision - mehr als ein Zauberwort. Corporate Policies - Wie Ihr Unternehmen erfolgreich auftritt. Düsseldorf, ECON Verlag.
- (17) Hering, E. und G. Frick (2003). Betriebswirtschaft in Fallbeispielen. München, Carl Hanser Verlag.
- (18) International Chamber of Commerce. (1990). "The Business Charter for Sustainable Development." from [http://www.bsdglobal.com/tools/principles\\_icc.asp](http://www.bsdglobal.com/tools/principles_icc.asp).
- (19) Johnson, H. L. (1971). Business in contemporary society: Framework and issues. Belmont, CA: Wadsworth.
- (20) Jones, T. M. (1980). "Corporate Social Responsibility Revisited, Redefined." California Management Review 22(2): 59-67.
- (21) Lütke, O. (2007). Qualität und Kulturelles Kapital: Wie Haltungen das Ergebnis von Handlungen beeinflussen: Über Mitbestimmung und Kultur im Unternehmen, den Umgang mit Macht und die Auswirkungen. Berlin, dissertation.de - Verlag im Internet GmbH.
- (22) Lux, P. (1992). Anfang gut - Ende gut. Corporate Policies: Wie Ihr Unternehmen erfolgreich auftritt. Düsseldorf, ECON Verlag.
- (23) McGuire, J. W. (1963). Business & Society New York, McGraw-Hill.
- (24) Merkel, A. (2007). Rede der Kanzlerin anlässlich der Europäischen Konferenz "Die künftige Meerespolitik der EU: Eine europäische Vision für Ozean und Meere", Bremen.

- (25)Salzmann, O. (2006). Corporate Sustainability Management in the Energy Sector - An Empirical Contingency Approach. Wirtschaft und Management. Berlin, Technische Universität. Dr.-Ing.: 282.
- (26)Sethi, S. P. (1975). "Dimensions of Corporate Social Performance: An Analytical Framework." California Management Review **17**(3): 58-64.
- (27)Strand, R. (1983). "A Systems Paradigm of Organizational Adaptations to the Social Environment." Academy of Management Journal **8**(1): 90-96.
- (28)Voth, M. (2001). Speditionsbetriebslehre. Herne.
- (29)Walton, C. C. (1967). Corporate Social Responsibilities Belmont, California, Wadsworth Publishing Company, Inc.
- (30)Wartick, S. L. und P. L. Cochran (1985). "The evolution of the Corporate Social Performance Model." The Academy of Management Review **10**(4): 758-769.
- (31)WCED (1987). Our Common Future. General Assembly, Oslo.
- (32)Wilson, M. (2003). "Corporate Sustainability: What is it and where does it come from?" Ivey Business Journal.
- (33)Wood, D. J. (1991). "Corporate Social Performance Revisited." Veröffentlichungsreihe der Abteilung Organisation und Technikgenesung des Forschungsschwerpunkts Technik-Arbeit-Umwelt des Wissenschaftszentrums Berlin für Sozialforschung(FS II 91-101): 0-34.

# EMV-Probleme auf modernen Schiffen

Tobias Pilsak<sup>\*1</sup>, Christian Klünder<sup>\*2</sup> und Jan Luiken ter Haseborg<sup>\*3</sup>

\*Institut für Messtechnik und Elektromagnetische Verträglichkeit  
Harburger Schloßstraße 20, 21079 Hamburg

<sup>1</sup>e-mail: pilsak@tu-harburg.de  
<sup>2</sup>e-mail: c.kluender@tu-harburg.de  
<sup>3</sup>e-mail: terHaseborg@tu-harburg.de

## 1 Einleitung

Moderne Schiffe zeichnen sich durch moderne technische Geräte zur Überwachung, Steuerung und Fortbewegung aus. Hierbei nimmt die Integrationsdichte technischer Systeme auf engem Raum stetig zu, so z.B. auf der Brücke. Moderne Schiffe verfügen zur Kommunikation und zur Überwachung der Umgebung über eine Vielzahl von Sende- und Empfangssystemen. Die abgestrahlte elektromagnetische Leistung dieser Systeme kann zur Störung anderer installierter Systeme führen. Desweiteren besitzen moderne Kreuzfahrt- und Passagierschiffe z.B. aufwendige Beleuchtungs-, Musik- und Klimatechnik. Alle diese Systeme stellen ebenfalls im Sinne der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) potentielle Störquellen und Störsenken dar.



Bild 1: Modernes Kreuzfahrtschiff „AIDAbella“

Im Ersten Teil des Beitrags wird auf die EMV näher eingegangen. Darauf folgen die EMV relevanten Normen, die in der heutigen internationalen Schifffahrt gelten. Es werden Prüfverfahren vorgestellt und geltende Grenzwerte exemplarisch präsentiert. Anschließend werden drei Problemfälle aus der Praxis beispielhaft vorgestellt, welche typische Probleme der EMV auf Schiffen illustrieren. Anhand dieser Beispiele werden Methoden entwickelt, die zur Sicherstellung der EMV auf Schiffen zwingend notwendig sind. Weiterhin zeigen diese Beispiele aus der Praxis die Relevanz einer Untersuchung der Systeme bezüglich ihrer EMV.

## 2 EMV – Elektromagnetische Verträglichkeit

Die Elektromagnetische Verträglichkeit sichert den störungsfreien Betrieb von Systemen in einer elektromagnetisch gestörten Umgebung. Desweiteren beschreibt sie die zulässige Störaussendung eines Systems an diese Umgebung. Hierdurch wird ein sicherer Betrieb aller Systeme in dieser Umgebung sichergestellt. Die EMV-Umgebung auf Schiffen unterscheidet sich elementar von anderen typischen EMV-Umgebungen, denn ein Schiff verfügt über Maschinen für Antrieb, Ladung und Manöver, die große Leistungen aus dem Stromnetz benötigen. Zusätzlich benötigt ein Schiff ebenso empfindliche Navigations- und Kommunikationssysteme. Eine Koexistenz ist von Seiten der EMV zu gewährleisten. Das Schiff ist nicht landseitig mit Strom- und Kommunikationskabeln verbunden, so dass auf diesem Wege keine Störsignale zu berücksichtigen sind. In Häfen nähert sich ein Schiff nur bedingt Gebäuden oder Funkstationen.



Bild 2: Störsenkenkopplung

In Bild 2 ist der prinzipielle Mechanismus der Kopplung von Störungen abgebildet. Der Koppelmechanismus kann vereinfacht als drahtgebundene oder feldgebundene Kopplung interpretiert werden. Die Hauptstörquellen auf Schiffen sind die schiffseigenen Funksender. Die anfälligsten Geräte sind hingegen die schiffseigenen Funkempfänger.

## 2.1 EMV-Normung in der Schifffahrt

In der Schifffahrt gelten eine Vielzahl von Vorschriften, die in Normen zusammengefasst sind. Für jedes installierte System gelten bestimmte Normen. In der MED (Marine Equipment Directive [1]) sind im Annex A.1 für bestimmte Systemklassen, wie z.B. Navigationselektronik und Radiokommunikationselektronik die anzuwendenden Normen gelistet. Hier findet sich die IEC 60945 [2]. Neben z.B. der Haltbarkeit und Beständigkeit unter Umgebungsbedingungen werden hier auch EMV-Grenzwerte definiert, um einen Betrieb in der Umgebung „Schiff“ zu gewährleisten. Zum einen werden die elektromagnetische Aussendung untersucht und hierfür Grenzwerte und Prüfverfahren definiert. Zum anderen geht es um die Störfestigkeit gegen elektromagnetische Umgebungseinflüsse. Auch hier werden Prüfverfahren und geforderte Prüfergebnisse durch Grenzwerte dargestellt. Im Folgenden werden die genannten zwei Bereiche genauer erläutert.

### 2.1.1 Elektromagnetische Aussendung

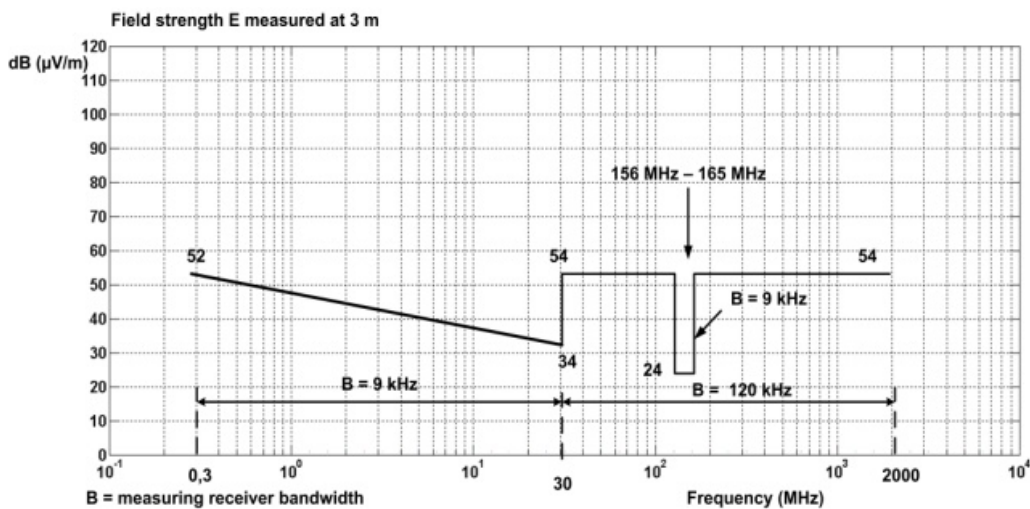


Bild 3: Grenzwerte der maximal erlaubten Störaussendung nach IEC 60945

Es gibt grundsätzlich zwei Arten der elektromagnetischen Störaussendung; die leitungsgebundene und die abgestrahlte. Grenzwerte für die Aussendung sind in der IEC 60945 festgesetzt. Die Prüfmethoden basieren auf der CISPR 16-1 [3]. Die Grenzwerte für die Abstrahlung eines Gehäuses in 3-m-Entfernung sind in Bild 3 dargestellt. Bei Funksystemen werden jedoch auch unbeabsichtigte Störungen über die Antennen abgestrahlt. Anforderungen auf diesem Gebiet stehen in den Gerätenormen.

Die kabelgeführten Störungen lassen sich z.B. mit Hilfe von Stromzangen messen. Abgestrahlte Störungen lassen sich im Freifeld und im Labor mit zum Beispiel einer GTEM-Zelle oder Schirmkabine messen (EN 61000-4).

### 2.1.2 Störfestigkeit

Hier wird die Störfestigkeit gegen die Auswirkungen abgestrahlter Signale von Antennen der Schiffssender entweder unmittelbar oder als induzierte Signale in Verbindungskabeln untersucht, desweiteren die Auswirkungen von sinusförmigen und impulsartigen Störungen, die von der

Schiffsstromversorgung und der elektrostatischen Entladung herrühren können. Die Mindestanforderungen für die Störfestigkeit können in der IEC 60945 nachgelesen werden. Für die Störeinstrahlung lautet der Prüfwert im Frequenzbereich von 80 MHz bis 2 GHz 10 V/m.

### 3 EMV-Probleme auf Schiffen – Beispiele aus der Praxis

Jeder Abschnitt in diesem Kapitel stellt eine andere Problemstellung dar und beschreibt eine mögliche Lösungsmöglichkeit des Problems. Daran anschließend findet sich ein Maßnahmenkatalog zur weitestgehenden Sicherstellung der EMV auf Schiffen.

#### 3.1 Störung eines DGPS-Empfängers

Die Genauigkeit der GPS-Positionierung ist im Mittel etwa 15 m. Gründe hierfür sind die Ungenauigkeiten der Uhren der GPS-Satelliten (typ. 3 m). Hinzu kommen Beeinflussungen der elektromagnetischen Wellen in der Ionosphäre (typ. 5 bis 10 m), sowie die Genauigkeit der Satellitenpositionen (typ. 4 m). Desweiteren können beabsichtigte Signalfehler vorkommen. Um die Positionierungsgenauigkeit deutlich zu verbessern, können DGPS-Empfänger (Differential GPS) verwendet werden. Hierbei werden Korrekturdaten von Landstationen mittels Langwelle empfangen. Die Position der Landstationen, Tabelle 1 gibt einen Überblick, ist genau bekannt. Aus den empfangenen GPS-Daten werden dort Korrekturdaten berechnet und im DGPS-Band, in Europa 283,5 bis 315 kHz, übertragen.

Tabelle 1: DGPS-Stationen im Nord- und Ostseebereich

Referenzstation	Frequenz (kHz)
Helgoland	298,5
Wustrow	308,0
Blaavandshuk	290,0
Skagen	296,0
Vliland	294,0
Hoek van Holland	312,5
Island	293,5
Lista	304,0
Zeven	303,5

Bei einem Schiffsneubau konnte das DGPS-System die Korrekturdaten nicht zuverlässig empfangen. Von Seiten des Lieferanten wurde der Empfänger ausgetauscht, doch das Problem blieb bestehen. Daraufhin wurde die Position des Empfängers an Board geändert. Auch dies führte zu keiner Empfangsverbesserung. Aus Sicht der EMV gibt es zwei mögliche Gründe für die Störungen:

1. Es sind Störungen auf den Zuleitungen des DGPS-Empfängers vorhanden (drahtgebundene Störungen).
2. Andere sich an Bord befindliche Anlagen oder sich dicht am Schiff befindliche Systeme stören das Frequenzband unzulässig stark.

Zunächst wurden mit einer Stromzange (COP-5 [4]) die Störungen auf dem Spannungsversorgungskabel gemessen. Auf der 12V-DC-Leitung konnten jedoch keine Störungen beobachtet werden.

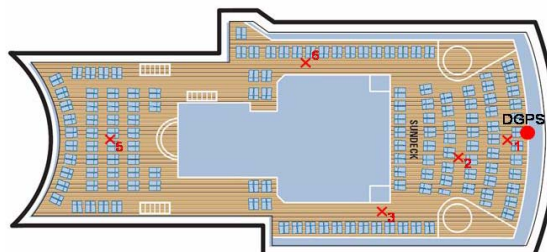


Bild 4: Deckplan und Messpunkte

Im Folgenden wurde das elektromagnetische Spektrum auf dem Schiff vermessen. In Bild 4 ist die Position des DGPS-Empfängers gezeigt. Desweiteren sind die Messpositionen eingezeichnet, an denen das elektromagnetische Spektrum mit Hilfe eines Spektrumanalysators und einer Rahmenantenne vermessen wurde.

An der Messposition 1 direkt neben dem DGPS-Sensor wurde das Spektrum vermessen, siehe Bild 5. Drei Trägerfrequenzen aus Tabelle 1, die am Ort der Messung sicher zu empfangen sein sollten, sind grau hinterlegt. Es ist zu erkennen, dass die Trägerfrequenzen nicht zu erkennen sind. Messungen an den übrigen Messpunkten kamen zum gleichen Ergebnis.

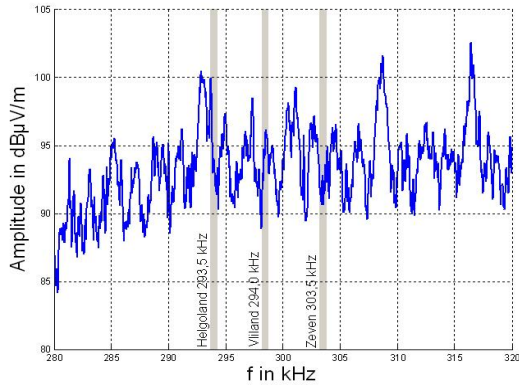


Bild 5: Elektromagnetisches Spektrum am DGPS-Empfänger

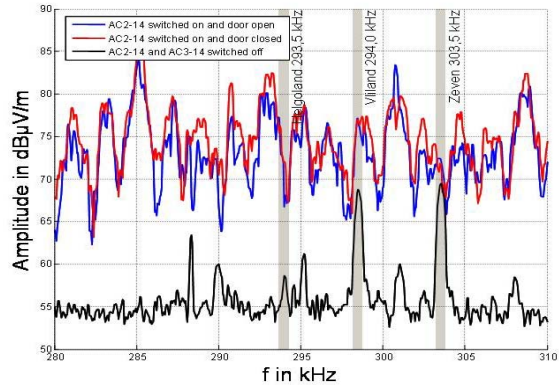


Bild 6: Elektromagnetisches Spektrum an Pos. 6

In der Nähe des DGPS-Empfängers befindet sich das Klimasystem (AC2-14 und AC3-14) und ein Tanzlokal mit aufwendiger Licht- und Soundanlage. In diesen Räumen gibt es große Schaltschränke und Maschinen. Um den Einfluss dieser Systeme auf das DGPS-Frequenzband zu untersuchen, wurden die Systeme nacheinander ausgeschaltet und das elektromagnetische Spektrum erneut vermessen. Dabei war der Einfluss des Tanzlokals auf das Frequenzband vernachlässigbar. Auch der Einfluss des Klimaraumes AC3-14 war nicht problematisch. Der Einfluss des Klimaraumes AC2-14 ist in Bild 6 zu sehen. Es kann deutlich erkannt werden, dass nach dem Ausschalten der Elektronik im Klimaraum die Trägerfrequenzen deutlich besser zu erkennen sind. Bei ausgeschalteter Elektronik im Klimaraum AC2-14 arbeitete der DGPS-Empfänger einwandfrei.

Untersuchungen im Klimaraum zeigten, dass Komponenten im Schaltschrank nicht korrekt geerdet waren und es dadurch zu den geschilderten Störungen gekommen ist. Nach einer korrekten Erdung war der Empfang wieder störungsfrei möglich.

### 3.2 AIS-Empfangsstörung

AIS (Automatic Identification System) ist ein Transpondersystem, welches schiffseigene Daten (z.B. rate of turn, speed over ground, position, course over ground, true heading, timestamp) sendet und diese Daten von anderen Schiffen empfängt. Ein AIS-System ist in der Lage über 4500 Nachrichten pro Minute zu verarbeiten. Die Reichweite von AIS beträgt in der Regel mindestens 20 sm. AIS arbeitet im VHF-Frequenzband (161,975 MHz; AIS1 [Kanal 87B] und 162,025 MHz; AIS2 [Kanal 88B]).

Auf einem modernen Fährschiff war es nicht möglich AIS-Ziele zu akquirieren, die weiter entfernt waren als 8 sm. Aufgrund des gestörten Frequenzbereiches wurde die gesamte Beleuchtung an Bord ausgeschaltet. Dies führte zu einer deutlichen Verbesserung der Qualität der AIS-Empfangssignale, was darauf hinweist, dass die angebrachten Lampen die Ursache des Problems sein könnten. Bild 7 zeigt die AIS-Antenne an Bord des untersuchten Fährschiffes. Direkt unterhalb dieser Antenne ist eine Lampe installiert. Darüber hinaus ist ein Deck tiefer ein Wintergarten, der mit einer Vielzahl von Lampen ausgestattet ist. Um die Ursache der Störung weiter einzugrenzen, wurde je eine der installierten Lampen im Labor vermessen, um den Einfluss der Lampen genauer zu untersuchen.



Bild 7: AIS-Antenne auf einem Fährschiff

Wie in Bild 3 zu sehen, schreibt die IEC 60945 gewisse Grenzwerte für den AIS-Frequenzbereich vor, welche nicht überschritten werden dürfen. Um zu untersuchen, ob diese von den Lampenherstellern eingehalten werden, wurden die Lampen in einer GTEM-Zelle auf deren elektromagnetischen Abstrahlung untersucht. Bei den Lampen handelt es sich um Energiesparlampen mit einem elektronischen Vorschaltgerät. Die Messungen wurden nach der Norm EN 61000-4-20 [5] durchgeführt. In Bild 8 sind der Messaufbau und in Bild 9 das Messergebnis für die Emissionsmessungen unterschiedlicher Energiesparlampen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass bei eingeschalteter Lampe des Typs 1 (auf dem Schiff installierte Lampe) eine Erhöhung der elektrischen Feldstärke zu erkennen ist.

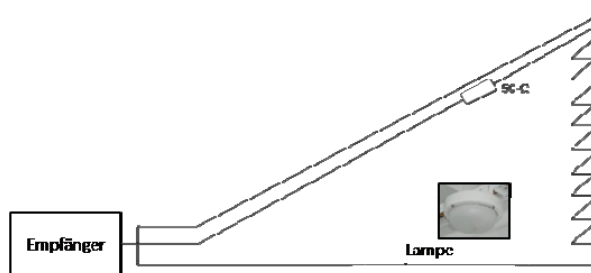


Bild 8: Messaufbau zur elektromagnetischen Emissionsmessung der Energiesparlampen

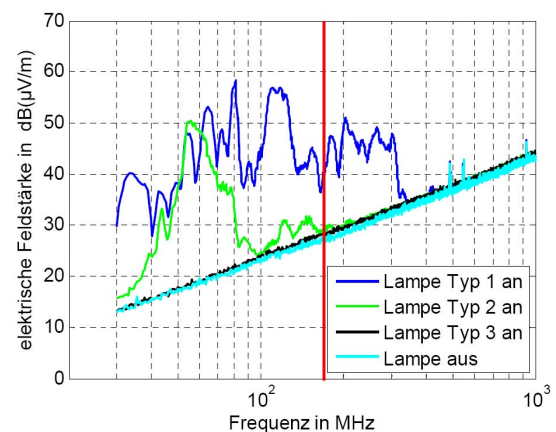


Bild 9: Emissionsmessergebnis dreier Energiesparlampen mit unterschiedlichen Vorschaltgeräten (rote Linie stellt den Frequenzbereich des AIS-Empfangs dar)

Um das Problem zu beheben, wurden vom Hersteller Ersatzlampen mit unterschiedlichen elektronischen Vorschaltgeräten angefordert. Diese wurden ebenfalls vermessen (vgl. Bild 9 Lampe Typ 2 und 3). Es fand sich bei den durchgeführten Messungen eine Lampe (Typ 3) mit Vorschaltgerät, die die Norm erfüllte und so wurden sämtliche Lampen an Bord des Fährschiffes ausgetauscht und das Problem gelöst.

### 3.3 Störung des Satelliten-TV-Empfangs durch ein Navigationsradar

Moderne Kreuzfahrtschiffe verfügen über Satelliten-TV. Die Empfangsantennen sind in sogenannten Radomen untergebracht. Der Empfang findet im C-Band statt, welches analoge sowie digitale Träger zwischen 3,4 und 4,2 GHz besitzt.

Jedes moderne Schiff verfügt über eine, bzw. mehrere Radarantennen zur Navigation. Dabei werden zumeist zwei Radartypen verwendet: Das S-Band Radar bei 3 GHz und das X-Band-Radar bei 9,4 GHz. Die Spitzensendeleistung liegt beim S-Band-Radar typischerweise bei 30 kW und beim X-Band-Radar bei 25 kW.



Bild 10: Radom mit Satellitenantenne (v.l.) und Radaranlage (auf Mast)

Es wurde beobachtet, dass bei aktivem Radar der TV-Empfang an Bord gestört wurde. Die Störung äußerte sich im Empfang durch Blockbildung und kurzzeitigen Bildaussetzern. Bild 10 zeigt das Radom mit der Satellitenantenne und der Mast mit den Radaranlagen im Hintergrund. Es liegt auf der Hand, dass die Radarpulse in das Satellitensystem einkoppeln und so zu Störungen führen. Um die Nutz- und Störsignale messen zu können, ist es nötig den Aufbau des Satellitenempfängers (Low Noise Block Converter (LNB)) zu kennen, siehe Bild 11. Mit einem Spektrumanalysator wurde frequenz aufgelöst am IF- (Intermediate Frequency) Ausgang bei aktivem und nicht aktivem Radar gemessen. Das ungestörte IF-Signal ist in Bild 12 dargestellt. Deutlich sind die einzelnen Träger des Empfangssignals zu erkennen.

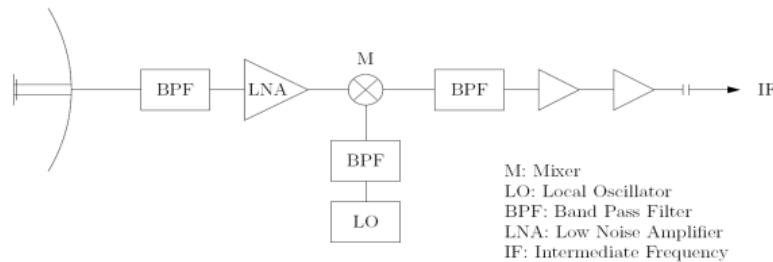


Bild 11: Schematischer Aufbau eines Low Noise Block Converter (LNBs)

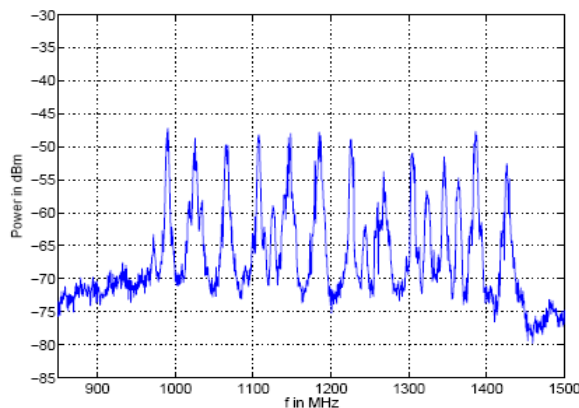


Bild 12: IF-Spektrum ohne Störungen.

Nun wurden nacheinander die Radaranlagen betrieben. Zunächst wurde das X-Band-Radar eingeschaltet. Hier zeigten sich im IF-Spektrum keine nennenswerten Störungen im Nutzspektrum. Auch das TV-Bild wurde nicht gestört. Im nächsten Schritt wurde das S-Band-Radar eingeschaltet und das elektromagnetische Spektrum auf der IF-Leitung vermessen. Hier zeigte sich, wie in Bild 13 zu erkennen, eine deutliche Störungen auf der IF-Leitung über das gesamte Frequenzband, so dass die einzelnen Träger nicht mehr zu erkennen sind.

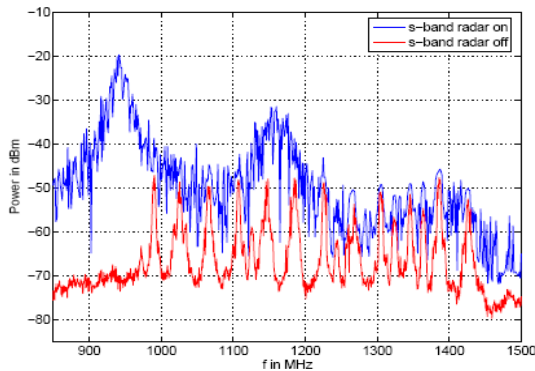


Bild 13: IF-Spektrum (S-Band-Radar ein/aus)

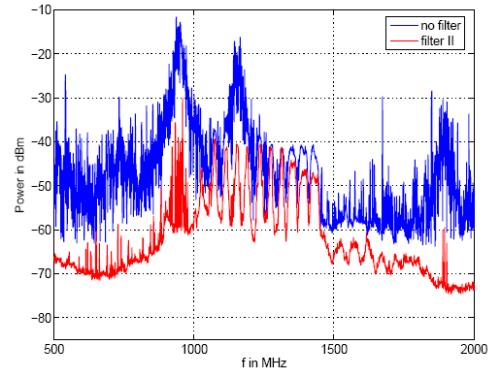


Bild 14: IF-Spektrum bei aktivem Radar mit und ohne Bandpassfilter

Die Messungen haben gezeigt, dass in den Satellitenempfänger das S-Band-Radar einkoppelt und trotz eines vorhandenen Bandpassfilters am LNB das IF-Signal gestört wird. Jedoch ist das Bandpassfilter im LNB nur durch den geometrischen Aufbau des LNBS vorgegeben und begrenzt das Satellitensignal nicht steilflankig genug außerhalb der Frequenzen von 3,7 bis 4,2 GHz. Hierdurch sind die im LNB verbauten Verstärker übersteuert worden, welches zu der Störung im IF-Signal führte.

Aufgrund dessen wurde ein weiteres Bandpassfilter (Hohlleiterbandpass) vor das LNB gebaut und das Spektrum auf der IF-Leitung erneut vermessen. In Bild 14 kann die Verbesserung durch das installierte Filter deutlich gesehen werden. Nach der Installation des Filters war ein fehlerfreier Empfang aller TV-Satellitenprogramme möglich.

## 4 Sicherstellung der EMV auf Schiffen

An dieser Stelle werden einige Empfehlungen zur Vermeidung von EMV-Problemen an Bord von Schiffen gegeben. Diese Empfehlungen basieren auf Erfahrungen aus der Praxis und stellen demnach keinen vollständigen Maßnahmenkatalog dar:

- *Sicherstellung der EMV auf Systemebene:*  
Alle installierten Komponenten müssen auf ihre Störaussendung und Störfestigkeit hin untersucht werden. Dies kann aufgrund der Anzahl der Komponenten nicht unbedingt realisiert werden. Auch sind Freifeld- oder GTEM-Zellen-Untersuchungen teuer und zeitaufwendig. Jedoch sollten generell Komponenten in der Nähe von empfindlichen Empfangsantennen näher betrachtet werden.
- *Überprüfung des elektromagnetischen Spektrums:*  
Die Nutzfrequenzen aller Funksysteme an Bord müssen bekannt sein. Sollte es zu unzulässigen Störungen kommen, müssen Teilsysteme abgeschaltet werden, bis der Verursacher gefunden ist. Der Aufwand kann mit Hilfe von Erfahrungswerten stark eingeschränkt werden, so können z.B. Frequenzwandler oder eine falsche Erdung zur Aussendung von Störungen führen. Auch eine Überprüfung während der Bauphase kann helfen, plötzlich auftretende Störer leichter zu identifizieren.

## 5 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden die gültigen Normen auf Schiffen im Bereich der EMV kurz vorgestellt. Es wurde auf die unterschiedlichen Arten der Störeinkopplung eingegangen. Anhand von drei typischen Beispielen wurde die Auswirkung von potentiellen Störern auf Schiffen untersucht und jeweils gelöst. Dabei waren Auswirkungen auf sicherheitsrelevante Systeme (AIS-Empfang, DGPS-Empfang) und nicht sicherheitsrelevante Systeme (Satelliten-TV-Empfang) aufgetreten. Diese Beispiele haben verdeutlicht, dass die Einhaltung von EMV-Vorschriften sehr wichtig für das Gesamtsystem "Schiff" ist. Am Ende schließt der Beitrag mit generellen Tipps zur Vermeidung von EMV-Problemen auf Schiffen.

## Literatur

- [1] Marine Equipment Directive (MED), Official Journal of the European Communities, Commission Directive 2002/75/EC of 2 September 2002, <http://www.gl-group.com>
- [2] IEC 60945, Navigations- und Funkkommunikationsgeräte und –systeme für die Schifffahrt, DIN EN 60945; 2003-07
- [3] CISPR 16-1, Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods. Radio disturbance and immunity measuring apparatus, 1999
- [4] Datenblatt COP-5 Stromzange, <http://www.egginc.com/>
- [5] EN 61000-4-20: Prüf- und Messverfahren – Messung der Störaussendung und Störfestigkeit in transversal-elektromagnetischen (TEM-)Wellenleitern

# Source Localization and Tracking with a Swarm of Autonomous Underwater Vehicles

Axel Hackbarth\*, Edwin Kreuzer\*\*

Institute of Mechanics and Ocean Engineering  
Hamburg University of Technology

\*e-mail: axel.hackbarth@tuhh.de

\*\*e-mail: kreuzer@tuhh.de

## Abstract

Marine exploration is a growing topic of research for science, oil and gas industry, and military applications. Field measurements and source searching are important tasks for underwater missions. We propose a novel method for source searching with multi-vehicle systems. The dynamics of the field (in our case a field of water) can be described by a set of partial differential equations

We want to use a swarm of underwater vehicles to find heat or similarly behaving diffusive sources. A real-time fluid dynamics simulation predicts how the field changes with each time step. Scalar measurements at the position of the vehicles give us information that is fed back into the simulated model of the fluid field. From this updated fluid field, source positions are estimated and predicted, but also the trajectories for the vehicles are optimized. For the simulated field, not only the field values have to be taken into account, the precision of the field values also play an important role for updating the process. This paper is meant as a rough guideline for future studies and therefore we cannot present results yet.

## 1 Introduction

Most of the earth's surface is covered by water, and since the beginning of time it has always been a source of life. Nowadays, it serves as fishing grounds and as the main route for international trade, and through technological advances natural resources lying underneath the oceans are easier accessible than ever before. Electric energy and data is transported via deep-sea cables, and oil and gas flows in pipelines through the oceans. On the other hand, the world's climate is strongly coupled with the ocean's climate system, which itself is highly dependent on the marine ecosystem. Global warming leads to the melting of the poles which is resulting in a drastic change in the ecosystem above and underneath the water, with long-term consequences that can only vaguely be predicted.

The necessity for maritime exploration is undoubtedly existent, and from military over industry to marine science, the purposes are spread over a wide field. Each of them has their own characteristics, but all of them share a common ground which accelerates development and innovation.

### 1.1 Technological Advances in the Exploration of the Oceans

Exploration of unknown territories deep underneath the sea is a major challenge for our generation. Early technologies in this field are floaters and drifters that move with the ocean currents on the surface or deep below it and have to be picked up to evaluate the recorded sensor measurements. When underwater operation is needed, divers or manned submersibles have been replaced by remotely operated vehicles (ROVs) that were introduced to the off-shore construction sites in the 70s and 80s [1]. The ongoing trend is to change passive underwater systems that need a lot of human attention towards intelligent systems that navigate autonomously through known or unknown environments. Even though it is still an expensive technology, hardware and software are readily available to start underwater missions so that marine scientists do not need deep knowledge about the technology.

## 1.2 Multi-Agent Systems

Since the beginning of this millennium, underwater vehicles have been combined to sensor networks that exchange data, communicate about task accomplishment and work in teams for an improved mission execution [2]. Different strategies for cooperation have been applied, from bio-inspired shoaling and schooling of fish that rely on very simple heuristic rules but offer a great performance in a swarm [7, 8], to computationally very intensive stochastic models that try to grasp the problem as a whole [9].

## 1.3 Source Localization

Source localization is the search for the the highest concentration of a variable of interest in a bounded region. This is similar to finding the maximum of a two- or three-dimensional function and can be accomplished by gradient climbing methods. In this case of underwater source localization, fluid dynamics form the theoretical background. A multi-agent system of underwater vehicles is supposed to navigate in this fluid field and measure local data (e.g. temperature, particle concentration, convection) [3]. These measurements are used to model the field, estimate the source, and refine the search pattern.

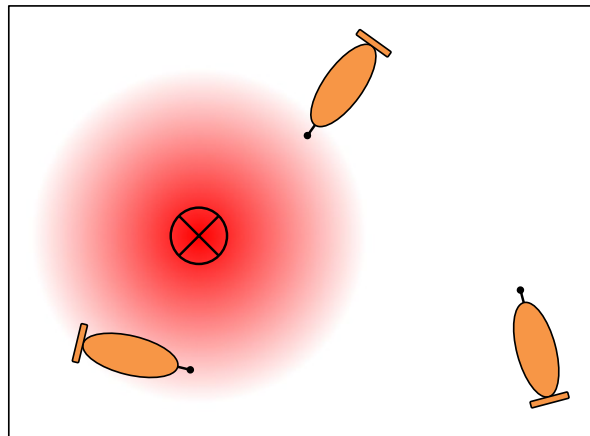


Figure 1: AUVs search for a heat / particle source in a fluid field with local scalar measurements.

Underwater source localization can be formulated as an optimization problem in a three-dimensional space. The source is surrounded by a field of increasing concentration towards the source. Since each sensor by itself is not capable of determining the gradient of a field (only in the direction it is moving), finding the source(s) would require long trajectories to analyze the field as a whole. Furthermore, through time-varying processes like current, changing or moving sources, the scalar field is not static and the data a single vehicle gathers is quickly outdated.

With the measurements of multiple sensing vehicles combined, a potential field can be calculated that the sensors must navigate through. Finding the shortest path to the predicted source is the goal for the optimization strategy. With multiple vehicles, strategies can be tested that do not follow this shortest path approach, but instead try to maximize a cost function of a rich data set, which can lead to a more robust system behavior [8].

## 2 System Components and Control

Our proposed system is modeling the real world system by a simulation of the fluid field and an estimation of heat sources as illustrated in Fig. 2. The update link between the real world system and the simulated system are the sensor measurements. Those measurements are compared to similar measurements undertaken in the simulation. The difference represents the modeling error which is fed back into the simulation to update the fluid field. For the correction part it is important to consider the variance of the field variables and update them relative to the variance of the interpolated sensor values and the variance of the simulation. A similar concept is used for the Kalman Filter for state estimation and sensor fusion [6].

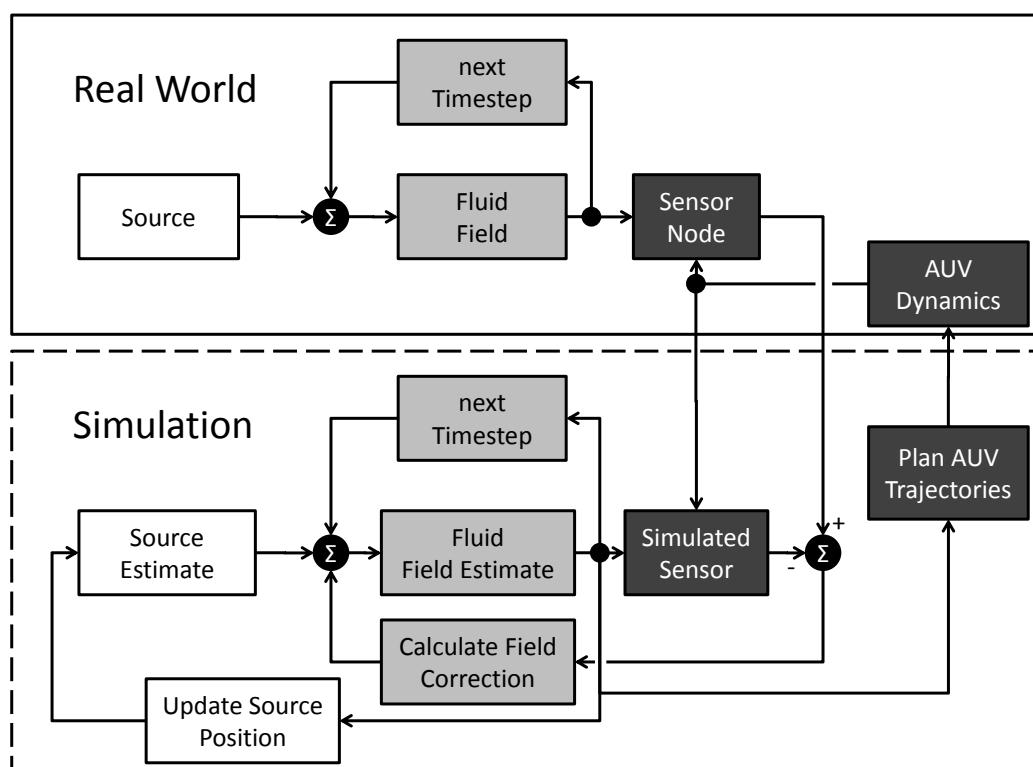


Figure 2: The control loop of the proposed system combines the fluid dynamics simulation (bright) with the source estimation (white) and the dynamic positioning of the sensor-equipped autonomous underwater vehicles (dark). The feedback from the real world to the simulation is only possible through the mobile sensors.

From the fluid field simulations, the strength and position of the source(s) can be estimated. The sources define boundary conditions for the fluid field simulation, and the better they are estimated, the lower their variance will be and therefore they will be taken more into consideration.

Also the results from the fluid dynamics simulation are fed back into the path planner for the AUVs. Regions with a high probability for sources are of similar interest as regions with a very high variance. Task allocation and consensus algorithms decide how the team of vehicles best distribute over the field to satisfy both, a robustness and a fast mission execution.

### 3 Governing System Equations

Underwater source localization can be applied for a variety of tasks. Their common ground is a source that emits energy (heat, mechanical or electromagnetic waves) or particles (e.g. pollutants, minerals, plankton) into the environment. A higher concentration can be measured close to the source that spreads, in case of particles, according to Fick's second laws of diffusion, which is analogous to the heat equation for heat sources:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = D \nabla^2 \phi , \quad (1)$$

where  $\phi$  is the particle concentration,  $D$  is the diffusion coefficient.

Under the additional influence of convection the convection-diffusion equation can be written as

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = D \nabla^2 \phi - \mathbf{v} \cdot \nabla \phi , \quad (2)$$

where  $\mathbf{v}$  is a constant convection velocity.

For a correct solution that includes the buoyancy effects of water with different temperatures, the Navier-Stokes equations represent the fundamentals of fluid dynamics. Since we operate in water and Mach numbers are smaller than 0.3, we can assume incompressible flow and the Navier-Stokes equations read:

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \mathbf{g} \rho(T) . \quad (3)$$

Here  $\rho$  is the density of the water, which is assumed constant for the inertial terms according to the Bussinesq approximations. The change of the density plays an important role for convection through a difference in buoyancy / gravity and therefore has to be taken into account as an external body force. Additionally to the Navier-Stokes equations, the continuity of mass has to be fulfilled, which simplifies to the volume continuity equation for incompressible flows:

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 . \quad (4)$$

These equations build the framework for the on-line fluid dynamic estimation process.

### 4 Multi-Vehicle Coordination and Control

Multi-vehicle systems allow the active measurement and positioning of the sensor-equipped vehicles throughout the area. The dynamic model underlying the vehicles restrict our system to a specific performance and finding optimal trajectories for vehicles become nonlinear equations for simple underwater vehicles [5].

For the control of the team and the consensus about which task is allocated to which agent, a method based on potential fields has been developed. Each layer shown in Fig. 3 has a specific function for the mission execution. The importance of each task can be defined by a specific weight for each layer. The region exploration map illustrated in Fig. 3(a) prevents the agents from visiting places they already visited a short while ago. The source uncertainty layer as seen in Fig. 3(b) is has attractive potentials (local minimums) where sources are located. Sources with a high variance have not been identified well enough and an exact location is not known. The probability of finding it is low because a large area has

to be searched. Map Fig. 3(c) avoids collisions between agents and Fig. 3(d) shows the approximate cost it takes for an agent to move to another point in space. The agents' waypoint map is a strategy for consensus that prevents the team from redundant task assignment. In Fig. 3(e) these waypoints are characterized as Gaussians that should prevent other vehicles from choosing the same waypoint. Summed up, this results in 3(f) which is the cost function to derive the next waypoint.

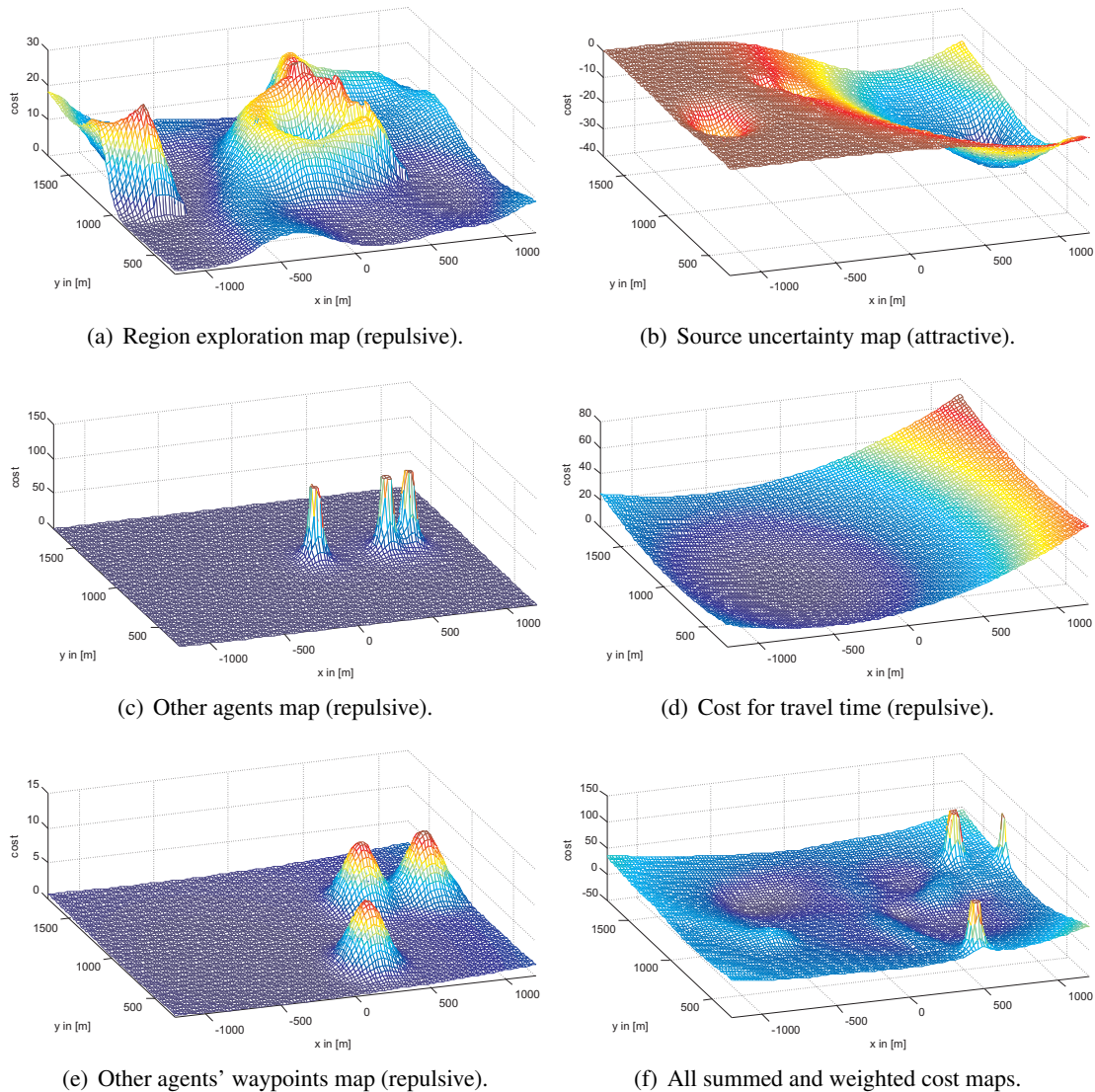


Figure 3: The controller is based on agent-specific cost maps whose minimum defines the next waypoint.

This framework has been successfully applied for a simulation of autonomous aerial vehicles and with little changes it can be customized to a three-dimensional setup for the purpose of this project [4].

## 5 Experimental Setup

Once the simulation results are satisfying and a real-time execution can be guaranteed, the concept should be proven in an experimental environment. Available research facilities at our institute include the  $3\text{m} \times 2.5\text{m} \times 2\text{m}$  water tank and a wave chamber of  $1.5\text{m} \times 1.5\text{m} \times 15\text{m}$ . Miniature underwater vehicles with a maximum length of 15cm are supposed to take temperature measurements while a heat source changes the temperature field in the water tank. The underwater vehicles send their measurements wirelessly to the central control computer. This computer also receives the position information of each underwater vehicle from a stereo camera system. The measurements are sent to the computer executing the on-line computational fluid dynamics (CFD) of the water tank convection problem with heat transfer. With the results from the CFD analysis, the control computer calculates new trajectories for the AUVs and navigates them via remote control.

## 6 Conclusion and Final Remarks

Our plan is to develop a powerful source searching algorithm for unmanned vehicle teams that is backed up by an on-line CFD analysis of the surrounding fluid. Research needs to be done in the field of real-time CFD simulation and the achievable precision that we can expect from such. Since the simulation is supported by live data which corrects the data field according to the variance, a converging behavior is expected. Sources are the unknown boundary conditions of our problem and we want to investigate if it is possible to estimate the source position from the fluid field and then, if the source is moving through the field, track it with a Kalman or Particle Filter.

The proposed system is still in a very early design stage, but the potential for a more efficient control for underwater vehicles is visible. The on-line CFD simulation is definitely the most crucial and critical part. With a coarse mesh, long time-steps and slow convection speeds, a real-time execution of the simulation is believed to be realizable. The question is: how many mobile sensor nodes (underwater vehicles) are needed and how precise can we measure with this system compared to established methods.

## References

- [1] Gianluca Antonelli, Thor I. Fossen, and Dana R. Yoerger. Underwater robotics. In *Springer Handbook of Robotics*, pages 987–1008. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2008.
- [2] E. Fiorelli, N.E. Leonard, P. Bhatta, D. Paley, R. Bachmayer, and D.M. Fratantoni. Multi-AUV control and adaptive sampling in monterey bay. In *Autonomous Underwater Vehicles, 2004 IEEE/OES*, pages 134–147, 2004.
- [3] P. Ögren, E. Fiorelli, and N.E. Leonard. Cooperative control of mobile sensor networks: Adaptive gradient climbing in a distributed environment. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, 49(8):1292–1302, 2004.
- [4] Axel Hackbarth. A Multi-Agent simulation framework and control structure for collaborative searching and tracking, 2009.
- [5] Nguyen Quang Hoang. *Zur Modellierung und Regelung ferngesteuerter Unterwasserfahrzeuge*. Fortschrittberichte VDI . Reihe 12, Verkehrstechnik, Fahrzeugtechnik, ISSN 0933-0992. VDI-Verl., Düsseldorf, als ms. gedr. edition, 2006.

- [6] Gabriel M. Hoffmann. *Autonomy for Sensor-Rich Vehicles: Interaction between Sensing and Control Actions*. PhD thesis, Dept. Aero. Astro., Stanford Univ., 2008.
- [7] Naomi Leonard. Flocks and fleets: Collective motion in nature and robotics. [http://www.princeton.edu/WebMedia/flash/lectures/20091022\\_preslect\\_leonard.shtml](http://www.princeton.edu/WebMedia/flash/lectures/20091022_preslect_leonard.shtml), October 2009.
- [8] N.E. Leonard, D.A. Paley, F. Lekien, R. Sepulchre, D.M. Fratantoni, and R.E. Davis. Collective motion, sensor networks, and ocean sampling. *Proceedings of the IEEE*, 95(1):48–74, 2007.
- [9] Allison Ryan. *Information-Theoretic Control for Mobile Sensor Teams*. PhD thesis, University of California, Berkeley, 2008.