

# Automation eines Search-and-Rescue-Prozesses auf See

Martin Kurowski, Universität Rostock, CeMarIS

[martin.kurowski@uni-rostock.de](mailto:martin.kurowski@uni-rostock.de)

Alexander Krüger, Universität Rostock, CeMarIS

[alexander.krueger@uni-rostock.de](mailto:alexander.krueger@uni-rostock.de)

Matthias Wulff, Universität Rostock, CeMarIS

[matthias.wulff@uni-rostock.de](mailto:matthias.wulff@uni-rostock.de)

## **Zusammenfassung**

Die Universität Rostock entwickelt zusammen mit weiteren Partnern ein neuartiges Satelliten-gestütztes Rettungssystem. Dabei kommt ein autonomes Rettungsfahrzeug zum Einsatz, welches eine überbordgegangene Person (POB) selbsttätig auffindet und somit deren Überlebenschance beträchtlich erhöht. Eine erhebliche Herausforderung liegt dabei in der Automatisierung dieses autonom agierenden Rettungsfahrzeuges sowie der Integration in den übergeordneten Search-and-Rescue-Prozess (SAR).

Heutzutage bilden die Steuerungs- und Regelungstechnik, die hydrodynamische Simulationstechnik, die Überwachungssysteme sowie die Informationsübertragung und -verarbeitung zumeist unabhängige Fachgebiete. In diesem Beitrag wird ein komplexes System vorgestellt, das diese interdisziplinären Aufgabenfelder effizient miteinander verbindet und somit den gesamten Search-and-Rescue-Prozess lückenlos abdeckt und so einen wichtigen Beitrag zur Sicherheit in der Seeschifffahrt leistet. Mittels des entwickelten Systems wird die Möglichkeit geschaffen, weitgehend wetterunabhängig mit einer bisher nicht gegebenen Sicherheit bei gleichzeitiger Minimierung der Gefährdung der Rettungskräfte Menschen aus Seenot zu retten.

## **1 Einleitung**

Das Über-Bord-Gehen von Personen stellt einen schweren Seeunfall mit einer erheblichen Gefährdung für das Leben des Verunglückten und der an der Rettung beteiligten Personen dar. Auf hoher See ist dabei die Besatzung des Schiffes des verunglückten Seemannes mit dezimierter Stärke häufig auf sich allein gestellt. Auch wird der Unfall oftmals zu spät festgestellt. Weil Rückführ-, Aussetz- und Rettungsmanöver nach konventioneller Methode weitere Zeit in Anspruch nehmen, ertrinkt der Verunfallte nicht selten wegen Erschöpfung oder unterkühlt sich mit Todesfolge innerhalb von Minuten. Auch wird die schnellere Rettung

eine wesentliche Aufgabe im Hinblick auf die Erschließung der Nordwest- und der Nordost-Passage durch das Nordpolarmeer für die kommerzielle Schifffahrt.

Um dieses Problem zu lösen, haben sich unterschiedliche Forschungsgruppen der Universität Rostock und weitere wissenschaftliche und industrielle Partner zusammengeschlossen und das interdisziplinäre Forschungsprojekt AGaPaS ins Leben gerufen. Dieses Projekt wird durch das deutsche Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) unter dem Förderkennzeichen 03SX259 gefördert.

Hauptaufgabe des Projektes ist es, den Zeitspanne zwischen dem Unfall und der Rettung des Verunglückten durch die Entwicklung eines automatischen Alarmierungssystems in Verbindung mit einem autonomen und ferngesteuerten Rettungsfahrzeuges wesentlich zu verringern und somit den gesamten Search-and-Rescue-Prozess abzudecken.

## 2 Der SAR-Prozess

Die Funktionsweise des Rettungssystems bildet die SAR-Prozesskette, wie sie in Abbildung 1 dargestellt ist, lückenlos ab und wird durch verschiedene Komponenten gekennzeichnet.

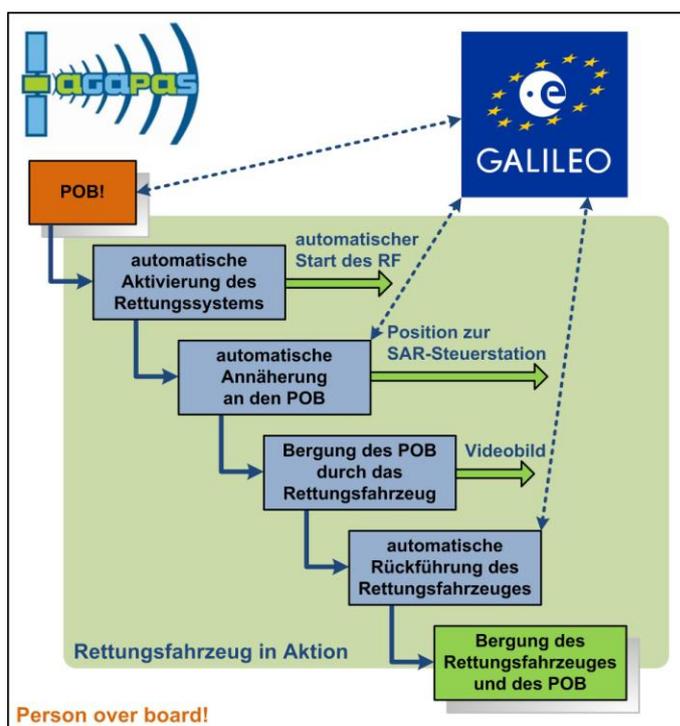


Abbildung 1: SAR-Prozess

Geht eine Person über Bord, wird automatisch ein Alarm ausgelöst. Durch eine speziell entwickelte Rettungsweste wird fortlaufend die Position des Verunfallten mit Hilfe von Positionierungssystemen wie GALILEO oder (D)GPS bestimmt und an die SAR-Steuerstation des Mutterschiffes sowie das Rettungsfahrzeug gesendet. Über die SAR-Steuerstation wird ebenfalls das Rettungsfahrzeug aktiviert. Der schiffbauliche Entwurf sowie der Bau erfolgten durch die Technische Universität Berlin. Ein CAD-Modell des Rettungskatamarans ist in Abbildung 2 dargestellt.

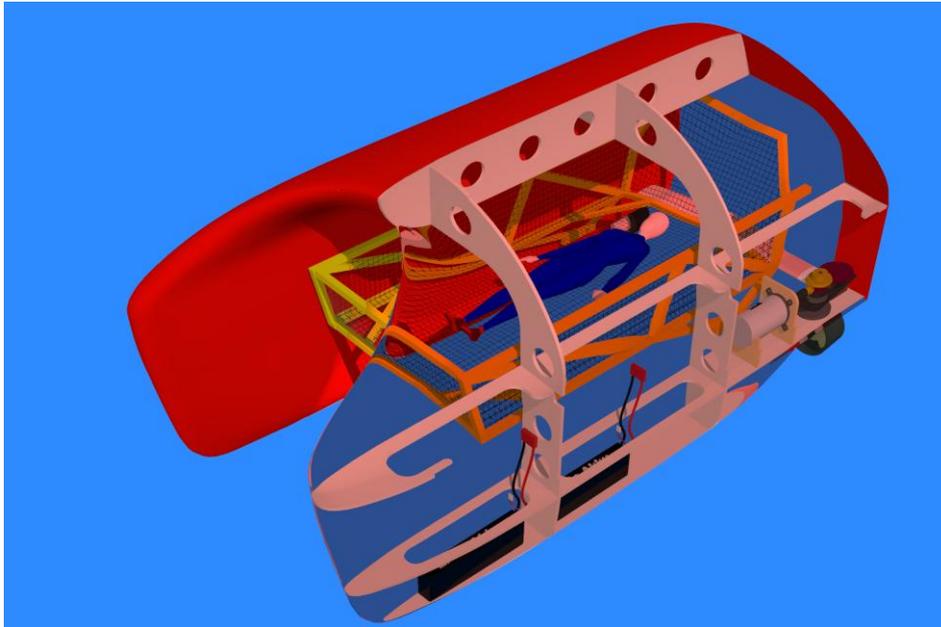


Abbildung 2: Rettungsfahrzeug [Technische Universität Berlin, Meerestechnik-Projekt AGaPaS]

Das automatisch ausgesetzte Rettungsfahrzeug wird ständig mit den Positionsdaten der verunfallten Person versorgt und manövriert selbstständig und schnellstmöglich zur Unglücksstelle. Um diese Aufgabe zu realisieren, wurden verschiedene kaskadierte Bahn- und Lageregelungen entwickelt [1], die zusätzlich auch die Umweltsituationen in die Regelung einbeziehen sollen. Ab einer minimalen Distanz zur verunfallten Person wird der Katamaran auf Basis von Telemetriedaten und einer Videoübertragung ferngesteuert und in eine Bergungsposition gebracht, die es erlaubt, den Verunfallten aufzunehmen. Der POB wird dann mittels einer speziell entwickelten Aufnahmeeinrichtung geborgen. Nach der erfolgreichen Bergung manövrieren das Rettungsfahrzeug und das Mutterschiff zueinander, hierbei steht eine ständige Funkverbindung für die am SAR-Prozess beteiligten Seeleute zur Verfügung. Zur Automatisierung dieses komplexen SAR-Prozesses ist es notwendig Strukturen zu schaffen, die es ermöglichen die Steuerungs- und Regelungstechnik, die Überwachungssysteme, die hydrodynamische Simulationstechnik sowie die Informationsverarbeitung und -übertragung in einem System zu integrieren. Anhand dieses Systems können dann gezielte Prozeduren wie die Reglersynthese, der Entwurf optimierter Kommunikationsketten sowie das Entwickeln adäquater Mensch-Maschine-Schnittstellen erfolgen.

Im Wesentlichen wird der SAR-Prozess durch zwei Kernelemente gekennzeichnet. Das ist zum Einen das autonome Rettungsfahrzeug und zum Anderen das SAR Steuerungs- und Überwachungssystem, deren Strukturen in den folgenden Kapiteln näher erläutert werden sollen.

### 3 SAR-Steuerungs- und Überwachungssystem

Zur Steuerung, Überwachung und Darstellung des gesamten SAR-Prozesses wurde die SAR-Steuerstation entwickelt. Sie befindet sich auf dem Mutterschiff und ist wiederum aus zwei wesentlichen Bestandteilen zusammengesetzt. Diese sind zum Einen der SAR-Steuerstand, der das zentrale Steuerungs- und Überwachungsmodul repräsentiert und zum Anderen das mobile dezentrale Fernbedienungsmodul (MDF), das die manuelle Steuerung des Rettungsfahrzeuges sowie der Bergeausrüstung bei Sichtverbindung zum POB ermöglicht. Diese Bestandteile sind in der Abbildung 3 dargestellt.



Abbildung 3: SAR-Steuerstation und MDF

Durch den Empfang aller Sensorwerte und Zustände des Rettungsfahrzeuges, der Vitaldaten des Verunfallten, der Audio- und Videodaten, sowie der Positionsdaten aller umliegenden Objekte über AIS und (D)GPS bzw. GALILEO kann der gesamte SAR-Prozess durch den, mit einer elektronischen Seekarten (ECDIS) ausgestatteten, SAR-Steuerstand überwacht, kontrolliert aber auch gesteuert und protokolliert werden. Durch den Empfang von Videosignalen und eines Wärmebildstreams kann das Rettungsfahrzeug auch bei Entfernungen über Sichtweite hinaus und im Dunkeln über das grafische Userinterface des SAR-Steuerstandes ferngesteuert und eine verunfallte Person gezielt aufgenommen werden. Für die Rettung in Sichtweite gibt es die Möglichkeit mit dem MDF eine ferngesteuerte Bergung durchzuführen. Sowohl mit dem MDF als auch dem SAR-Steuerstand lassen sich verschiedenste Steuerungs- und Regelungsmodi ein- und ausschalten sowie parametrieren. Vorgesehen sind dabei die Joystick-Regelung über Drehrate und Heading, eine CTS- sowie eine Wegpunktbahnregelung. Die Vorgabewerte der unterschiedlichen Modi werden dann vom Navigationsrechner auf dem Rettungsfahrzeug verarbeitet und in den verschiedenen Regelkaskaden umgesetzt.

Durch die Integration redundanter Kommunikationskanäle und Datenübertragungsfrequenzen bewirkt der Teilausfall von Systemen nicht den Ausfall des Gesamtsystems, so dass der Rettungsprozess weiterhin durchgeführt werden kann. Der Datenaustausch zwischen

dem Rettungsfahrzeug und der SAR-Steuerstation auf dem Mutterschiff kann auch bei Ausfall des MDF stattfinden und umgekehrt. Die gesamte Kommunikation innerhalb der Automatisierungsstruktur ist somit gekapselt und eigenständig. Der SAR-Steuerstand ist das einzige Element, das über die Schiffsbrückenstation Daten an das Mutterschiff weitergibt und somit in den Schiffsführungsprozess des Mutterschiffes eingebunden ist.

## **4 Automation des Rettungsfahrzeuges**

Das Herzstück einer Rettungsoperation bildet das Rettungsfahrzeug. Es muss nach dem Aussetzen durch das Mutterschiff den Verunfallten selbstständig auffinden und sich in eine günstige Bergeposition bewegen. Dabei ist die Automation des Rettungskatamarans von entscheidender Bedeutung. Zur späteren selbsttätigen Navigation des Rettungsfahrzeuges wurde aus den verwendeten Einzelsensoren ein integriertes Navigationssystem entwickelt, bestehend aus:

- Fluxgate-Kompass,
- Multi-(D)GNSS Empfänger und
- Triducer (Log, Echolot, Temperatur).

Außerdem wurden die Antriebsorgane in das komplexe Steuerungssystem eingebunden. Die zentrale Recheneinheit bildet dabei der Navigationsrechner auf Grundlage eines PC/104 Systems, welches mit zusätzlichen Schnittstellenkarten zur Anbindung der Sensoren und weiteren Geräten ausgestattet wurde. Innerhalb des Rettungsfahrzeuges wurde ein Ethernet-Netzwerk etabliert, welches die verschiedensten Geräte miteinander verbindet. Zur Ansteuerung der Antriebe kommuniziert der Navigationsrechner per UDP-Protokoll mit einer Steuerbaugruppe, welche die eigentliche Ansteuerung der Antriebe auf Feldebene per serieller RS485-Schnittstelle übernimmt.

Die entwickelten Steuerungen und Regelungen zum Betrieb des Fahrzeuges sind als Softwareroutinen auf dem Navigationsrechner untergebracht. Dazu wird das Echtzeitbetriebssystem xPC-Target der Firma MATLAB/Simulink verwendet. Folgende übergeordneten Steuerungs- und Regelungsmodi sind realisiert:

- Handsteuerung,
- Rate of turn (ROT) Joystick-Steuerung,
- Heading (HDG) Joystick-Steuerung,
- Course to Steer (CTS) Bahnregelung und
- Wegpunktbahnregelbetrieb.

Die Vorgabewerte der verschiedenen Betriebsmodi werden aus Sicherheitsgründen wie bereits beschrieben redundant über verschiedene Funkstrecken und Frequenzen an das Rettungsfahrzeug übertragen.

#### 4.1 Realisierung der Steuerungs- und Regelungsaufgaben

Eine der schwierigsten Aufgaben innerhalb des SAR-Prozesses ist die autonome Annäherung des POB durch das Rettungsfahrzeug. Der gesamte Steuerungsprozess stellt sich als sehr zeitkritisch dar und wird durch unterschiedliche Abschnitte gekennzeichnet. Die eigentliche Ansteuerung im freien Seeraum kann durch kommerzielle kaskadierte Kurs- (Richtungs-) und Bahn- (Wegabstands-) Regler realisiert werden, vergleiche [2]. Die Neuartigkeit besteht hier lediglich in der Online-Anpassung des Endpunktes, welcher sich durch verdriften des Verunfallten verändern kann.

Nach erfolgter Ansteuerung muss der Katamaran in einem bestimmten Abstand zum Verunfallten aufstoppen und diese Entfernung zum POB beibehalten ohne diesen während des Verzögerns oder der folgenden Positionierung zu gefährden. Derartige Abläufe können mit herkömmlichen kaskadierten Bahnregelungen nicht realisiert werden, da hierfür spezielle Algorithmen nötig sind, wie sie beim Einsatz von so genannten DP-Systemen (Dynamic Positioning) verwendet werden. Antriebsleistungen, die für die Vorwärtsfahrt eingesetzt werden, müssen hierbei ebenso zur Richtungssteuerung verwendet werden. Dies wird erst durch den Einsatz spezieller Antriebssysteme, wie beispielsweise den am Rettungsfahrzeug verwendeten POD-Antrieben, ermöglicht. Um die Lücke zwischen diesen beiden Regelungskonzepten zu schließen, musste eine Trennung der Reglervorgaben von den zur Verfügung stehenden Stellaggregaten vorgenommen werden.

Das für die Reglersynthese zu Grunde gelegte Modell bildet die Bewegung eines starren Körpers in den drei Freiheitsgraden Längsgeschwindigkeit  $u$  (1), Quergeschwindigkeit  $v$  (2) und Drehrate um die Hochachse  $r$  (3).

$$m_x \dot{u} - m_y r v = X \quad (1)$$

$$m_y \dot{v} + m_x r u = Y \quad (2)$$

$$J_z \dot{r} = N \quad (3)$$

Hierbei stellen  $m_x$  und  $m_y$  die hydrodynamischen Massen und  $J_z$  das hydrodynamische Trägheitsmoment in die jeweilige Richtung dar.  $X$ ,  $Y$  und  $N$  sind die Summen der äußeren Kräfte und Momente entsprechend den Antriebs- und Steuerorganen sowie Störungen wie Wellen, Wind und Strömung.

Geht man nun von einer Beschränkung der Beschreibung auf kleine Abweichungen nahe einem Arbeitspunkt aus, kann lineare Theorie angewendet und die Splittung der Bewegungsgrößen in Teilgrößen vorgenommen werden, so dass die Schiffsbewegung als Zustandsraum beschrieben werden kann und so ein Modell aus den nahezu unabhängigen Zustandsgrößen

$x = [u \ v \ r]^T$  und den Stellgrößen für die POD-Drehzahlen  $p$  und den Verdrehwinkeln der Antriebe  $\delta$  mit  $u = [p_1 \ p_2 \ \delta_1 \ \delta_2]^T$  entsteht. Ein entscheidender Vorteil dieser Beschreibungsart ist die einfache Adaption des Modells bei geänderten Stellaggregatekonfigurationen oder bei Einbeziehung von externen Einflüssen.

Die Reglersynthese selbst erfolgt dann in zwei Schritten, ein linearer Reglerentwurf mit einem nachgeschalteten Verteiler, der die Kräfte- und Momentenanforderungen des Reglers als virtuelle Stellgrößen auf die aktuelle Stellkonfiguration verteilt (4), vergleiche dazu [3].

$$\eta = \begin{bmatrix} F_x & F_y & M_z \end{bmatrix}^T = B \cdot u \quad (4)$$

Die Abbildung 4 zeigt die offene Kette dieses Geschwindigkeitsregelkreises. Der Allokationsalgorithmus ist als Bestandteil der Regelung zu erkennen und verteilt die Kräfte und Momente auf die einzelnen Aggregate, entsprechend ihrer Einsatzbereiche und Effizienz. Wie ersichtlich wird, bildet im idealen Fall ( $\eta' = \eta$ ) die Verteilung und Umwandlung zu den Aggregatstellungen die (Pseudo) Inverse der Stellmatrix  $B$ .

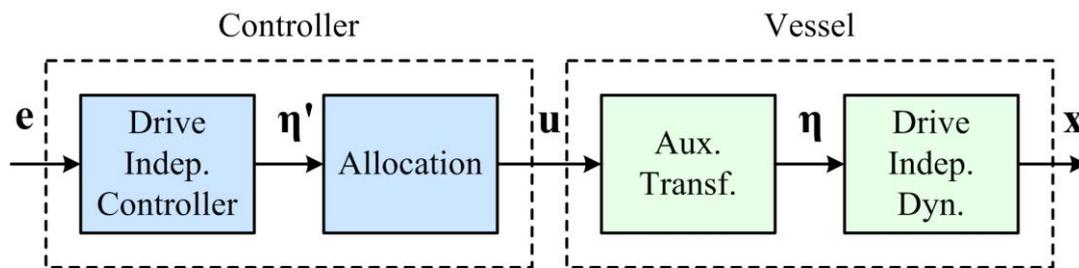


Abbildung 4: Offene Kette der Geschwindigkeitsregelkaskade

Die Geschwindigkeitskaskade selbst wird nun den verschiedenen übergeordneten Regelkreisen unterlagert. Der Geschwindigkeitsfehler  $e = x - x_r$  speist den Regler, wobei die Vorgabegrößen  $x_r$  durch die jeweiligen übergeordneten Regelalgorithmen generiert werden. Diese Struktur wird durch die Abbildung 5 am Beispiel der Bahnregelung verdeutlicht.

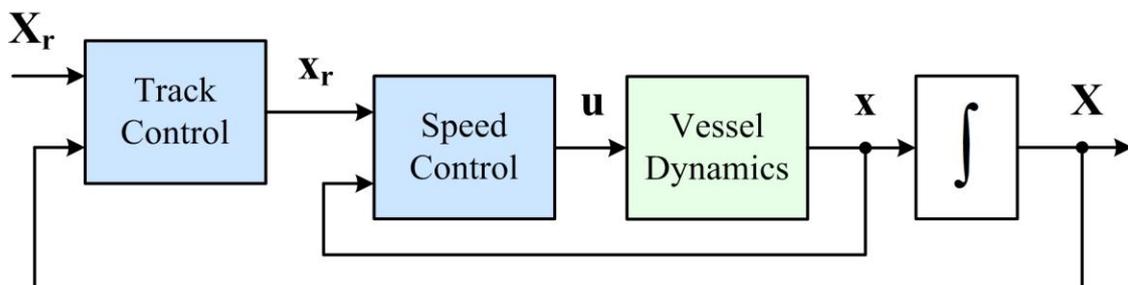


Abbildung 5: Bahnregelungsstruktur

## 5 Integration zum SAR-Rettungssystem

Nach der Entwicklung und Ausrüstung der einzelnen Komponenten wurden diese zu einem komplexen System zur Personenrettung auf See integriert. Neben der Integration der eigentlichen Hard- und Software der SAR-Steuerstation und des Rettungsfahrzeuges wurden zusätzliche Module geschaffen, um Komponenten „offline“ ersetzen und das komplexe Rettungsszenario vollständig simulieren zu können [4]. Damit wurde die Möglichkeit geschaffen Regelalgorithmen und Informationsverarbeitungssysteme entwerfen und testen, Kommunikationstechniken untersuchen sowie gezielt Mensch-Maschine-Schnittstellen entwickeln zu können. Auch die Ausbildung der Besatzung des Schiffes ist ein weiterer Aspekt des entwickelten Hardware-in-the-Loop-Systems. Es ermöglicht das Training extremer Situationen während einer SAR-Operation, beispielsweise den Umgang mit dem Rettungsfahrzeug und die manuelle Bergung eines POB bei schlechtem Wetter. Abbildung 6 zeigt die wichtigsten Elemente des entwickelten SAR-Rettungssystems.

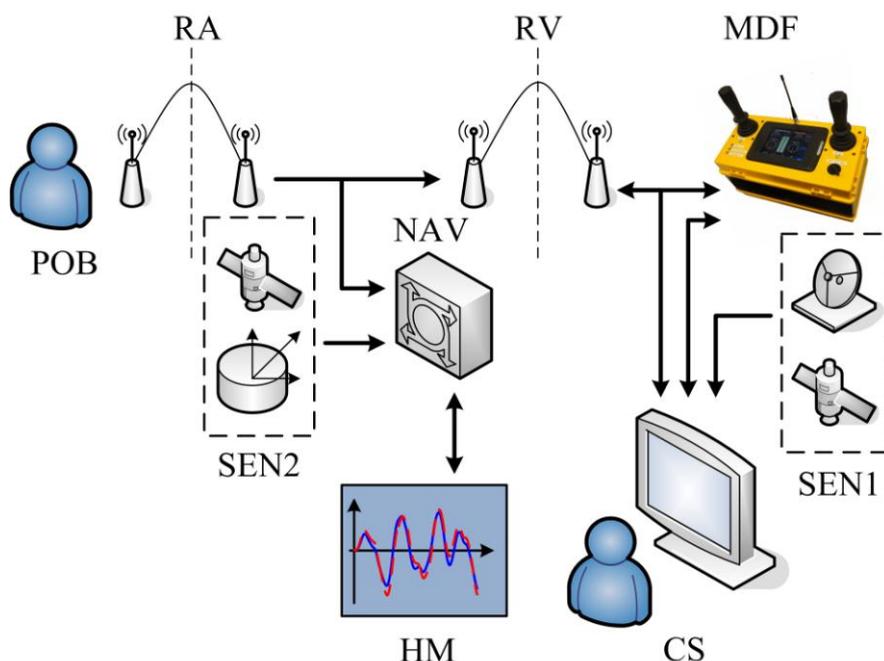


Abbildung 6: Integriertes SAR-Rettungssystem

Das zentrale Element ist die bereits beschriebene SAR-Steuerstation (**CS**). In einem Unglücksfall empfängt und verarbeitet die SAR-Station die AIS-Daten und die Vitalparameter des POB und leitet alle weiteren Maßnahmen ein. Während der Simulation des SAR-Prozesses generiert ein spezielles **POB**-Modul die AIS-Daten (offline) sowie die Vitalfunktionen eines virtuellen POB. Die Bewegung des Mutterschiffes sowie die Verkehrssituation werden durch die Bordsensoren **SEN1** ermittelt. Der mittlere Teil der Abbildung 6 zeigt die unterschiedlichen Elemente hinsichtlich des Rettungsfahrzeuges. Das Kommunikations- und Steuerungssystem (**NAV**) besteht aus dedizierten PC/104 Rechnern, die einerseits die beschriebenen Steuerungen und Regelungen und andererseits die

Videovorverarbeitung und -übertragung realisieren. Das integrierte Navigationssystem ist mit **SEN2** dargestellt. Während des Simulationsmodus stellt das hydrodynamische Modul (**HM**) die Bewegungsdaten des Rettungsfahrzeuges einschließlich des Einflusses von Störungen wie Seegang per UDP-Schnittstelle zur Verfügung. Die eingerichtete Datenkommunikation **RA** wird zur Übertragung der Vitaldaten des POB zum Rettungsfahrzeug via Bluetooth genutzt. Dieser Kanal ist aktiv, wenn sich das Rettungsfahrzeug in der Nähe des POB befindet oder dieser bereits geborgen wurde. Schließlich werden die Video- und Datenübertragungen zwischen dem Rettungskatamaran und der SAR-Steuerstation durch die redundanten Funkkanäle **RV** verwirklicht.

## 6 Simulationstests

Durch das entwickelte System können umfangreiche Vorabtests der Rettungsausrüstung durchgeführt werden, auch ohne Menschen dabei zu gefährden. So ist es möglich unterschiedlichste Steuerstrategien zu entwerfen und zu optimieren, um sich einem POB zu nähern. Ebenso können die eingesetzten Regelungen unter unterschiedlichen Wetterbedingungen getestet werden. Abbildung 7 zeigt die Simulationsergebnisse während der Ansteuerung eines virtuellen POB unter Seegangseinfluss.

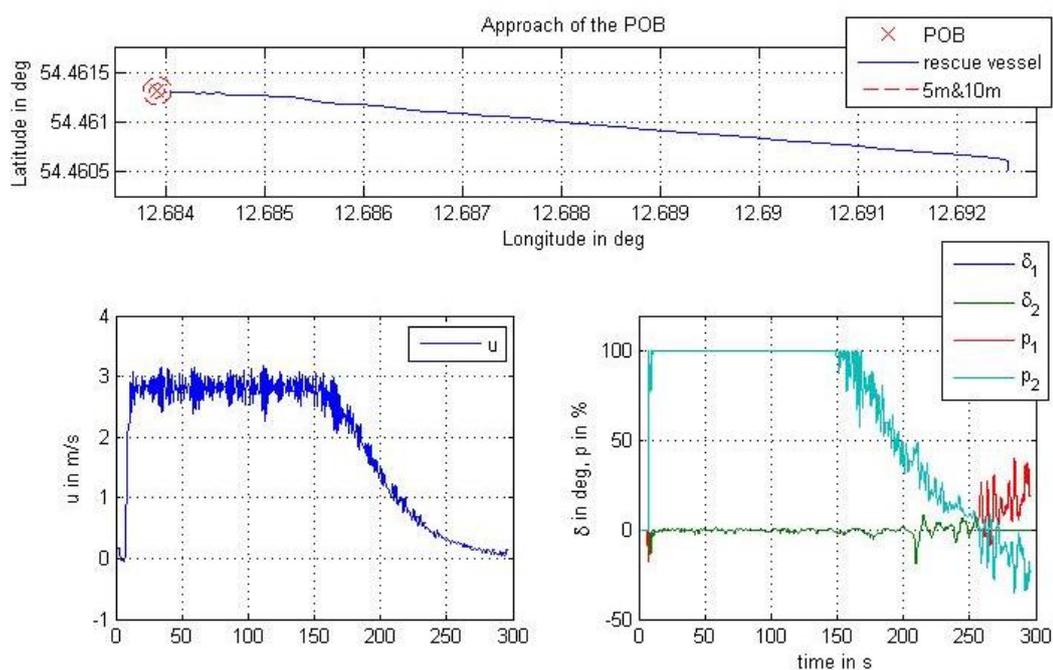


Abbildung 7: Simulationsergebnisse

Während der Rettungsoperation herrscht irregulärer Seegang mit einer maximalen Wellenhöhe von  $1.5m$ . Die Bahnführung des Rettungsfahrzeuges wird durch eine Line-of-Sight- sowie eine kaskadierte Geschwindigkeits-Abstands-Regelung durchgeführt. Die obere Abbildung zeigt die Bahn des Rettungsfahrzeuges, das in der rechten Bildseite startet und autonom zum POB manövriert. Der Abstand kann mit ca.  $600m$  angegeben werden. Die

weiteren Abbildungen zeigen die Längsgeschwindigkeit (unten links) des Katamarans sowie die Propellergeschwindigkeit und die Verdrehwinkel der POD-Antriebe (unten rechts).

Der erste Abschnitt der Ansteuerung wird durch die Line-of-Sight-Regelung gekennzeichnet. In diesem Fall drehen die Propeller mit maximaler Geschwindigkeit und die Richtungssteuerung wird durch Drehung der POD-Antriebe verwirklicht. Nachdem der Katamaran einen 10m Sicherheitskreis um den POB erreicht hat, gekennzeichnet durch einen gestrichelten Ring in Abbildung 7, schaltet das Rettungsfahrzeug in den DP-Modus und hält den Abstand und die Richtung zum POB bei, ohne diesen zu gefährden und bringt sich so in eine günstige Bergeposition. Diese Funktionalität wird durch Differenzschub der Einzelaggregate erreicht.

## 7 Zusammenfassung

Der Beitrag beschreibt ein neuartiges Search-and-Rescue-Rettungssystem, welches den gesamten SAR-Prozess lückenlos abdeckt. Es kombiniert effizient interdisziplinäre Forschungssektoren wie Automatisierungstechnik, Steuerungs- und Regelungstechnik, hydrodynamische Simulation sowie Informationsverarbeitung- und Datenübertragungstechnologien. Das entwickelte SAR-Rettungssystem soll es ermöglichen überbordgegangene Personen schnell auffinden und bergen zu können. Damit soll ein wichtiger Beitrag zur Sicherheit in der Seeschifffahrt geleistet werden.

Dieses integrierte SAR-Rettungssystem ermöglicht es darüber hinaus den Entwicklern von Regelungs- und Steuerungsstrukturen, Mensch-Maschine-Schnittstellen oder Datenverarbeitungssystemen, Module für eine Satelliten-gestützte Rettung mit einem autonomen Katamaranfahrzeug unter nahezu realen Bedingungen gezielt entwerfen und effizient testen zu können. Zusätzlich kann die Mannschaft eines Schiffes SAR-Operationen trainieren, um Erfahrungen in derart extremen Situationen zu gewinnen.

## Literatur

- [1] Lampe B.P., Korte H., Kurowski M., Wulff M., Korte C.: *ADANAV – Adaptive Navigationssystem zur präzisen Lage-, Kurs und Geschwindigkeitsregelung von Schiffen mit neuen Antrieben. Teilprojekt: Modulare Regelung auf Schiffen*, Abschlussbericht Projekt ADANAV, BMBF-FKZ: 03SX198B, Universität Rostock, 2008.
- [2] Berking, B., Huth, W. (Hrsg.): *Handbuch Nautik - Navigatorische Schiffsführung*, Seehafen Verlag, Hamburg, 2010.
- [3] Korte H., Kurowski M., Baldauf M., Lampe B.P.: *AdaNav - A Modular Control and Prototyping Concept for Vessels with variable Gear Configuration*, Proc. 8th IFAC

Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft, Guarujá (BRA), 16.-

18.09.2009, pp. 91-96.

- [4] Bronsart, R., Buch, T., Haase, M., Ihde, E., Kornev, N., Kurowski, M., Lampe, B.P.:  
*Integrated Software-in-the-Loop Simulation of an Autonomously Acting Rescue Boat*,  
Proc. International Conference on Computer Applications in Shipbuilding, Trieste,  
Italy, 20.-22.09.2011.