

Steuersystem für Schiffe mit oberflächenschneidenden Propellern – Einsatz auf dem Solarkatamaran „Turanor-PlanetSolar“

Roland Lück, Marine- und Automatisierungstechnik Rostock GmbH, r.lueck@mar-hro.de

Matthias Markert, Hochschule Wismar, Bereich Seefahrt, matthias.markert@hs-wismar.de

Abstract: Mit dem Antriebs und Steuersystem mit oberflächenschneidenden Doppelpropellern, das für Schiffe mit geringem Tiefgang konzipiert wurde, können Verbesserungen des Wirkungsgrades gegenüber konventionellen Antrieben bis zu 40% erreicht werden. Das Schiff wird durch Variation von Drehzahl, Steigung und Drehrichtung beider Propeller gesteuert und benötigt deshalb ein spezielles Steuersystem. Dieses wird am Beispiel des Solarbootes „Turanor-PlanetSolar“ dargestellt.

1. Antriebssystem

1.1 Antriebssystem für Flachwasserschiffe

Die Antriebssysteme für Schiffe mit geringem Tiefgang, die hauptsächlich im Flachwasserbereich (Binnen- und küstennaher Bereich) zum Einsatz kommen, erfordern – auch durch den geringen Abstand zum Grund – die Verwendung von kleinen Propellern. Zum Erreichen des erforderlichen Schubes sind diese Propeller mit einer relativ großen Drehzahl verbunden. Diese Antriebssysteme besitzen auf Grund der Kombination von kleinem Propellerdurchmesser und hoher Drehzahl einen geringen Wirkungsgrad.

1.2 Verbesserung des Wirkungsgrades durch halbtauchende Doppelpropeller

Der Wirkungsgrad des Propellers verbessert sich mit Vergrößerung der Fläche und Verringerung der Drehzahl. Es war notwendig eine technische Lösung zu entwickeln, mit der trotz des geringen Tiefgangs des Schiffes die Fläche des Propellers vergrößert und damit die Drehzahl verringert werden kann, und trotzdem der erforderliche Schub erreicht wird.

Durch zwei gegenläufige halbgetauchte Verstellpropeller ist eine Vergrößerung der Propellerfläche um etwa den Faktor 2,5 möglich. Entsprechend wird die Drehzahl verringert.

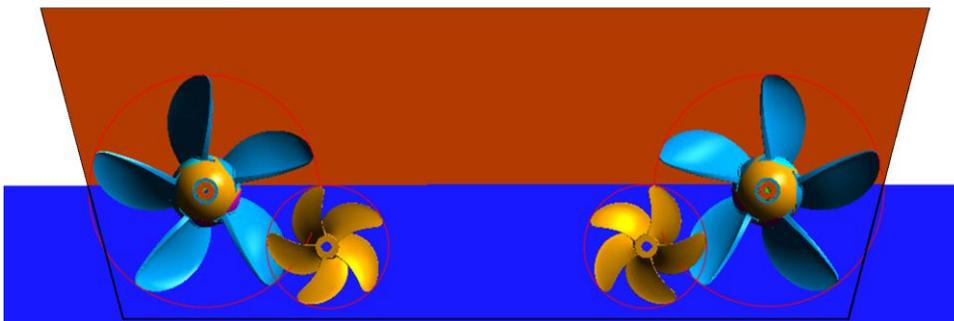


Abbildung 1: Konventioneller und halb getauchter Propeller /3/

Ziel ist es, möglichst mit dem Radius den Tiefgang und mit den beiden Durchmessern die Breite des Schiffes zu nutzen.

1.3 Modelluntersuchungen

Untersuchungen in der Schiffbauversuchsanstalt Potsdam an einem Schubschiffmodell, ausgerüstet mit konventionellen und mit halbtauchenden Doppelpropellern ergab große Unterschiede im Leistungsbedarf des Antriebes zum Erreichen der gleichen Geschwindigkeit (Abbildung 2.).

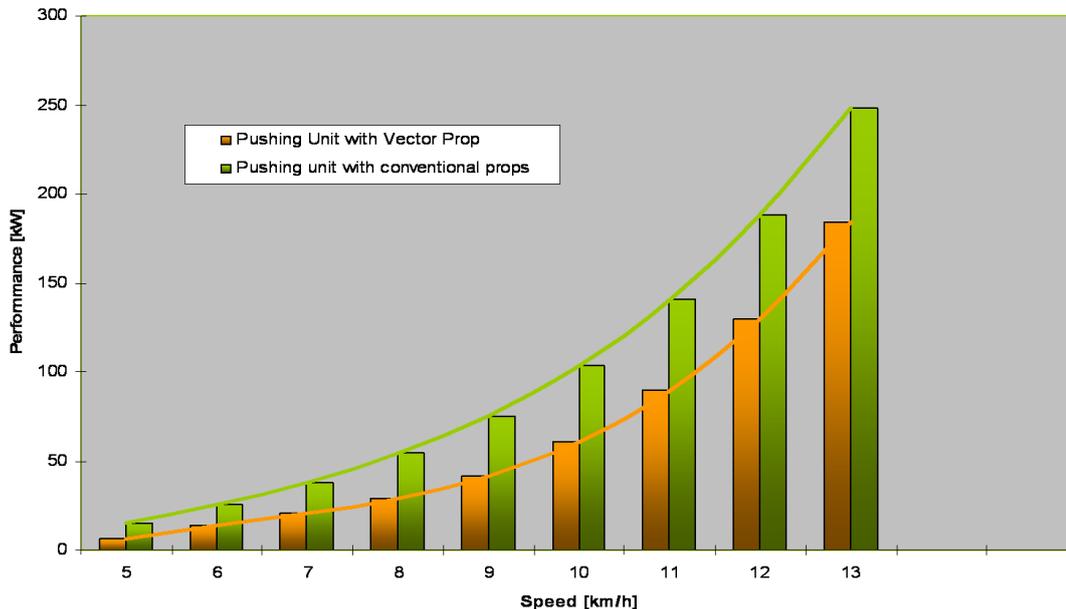


Abbildung 2: Vergleich der erforderlichen Antriebsleistungen /3/

1.4 Oberflächenschnellende Doppelpropeller

Das Antriebssystem mit oberflächenschnellenden Doppelpropellern für den Flachwasserbereich verwendet große und langsam drehende Propeller und ermöglicht damit eine Wirkungsgraderhöhung gegenüber konventionelle Antrieben um 20...40%. Die Propeller werden mit der Nabe im Bereich der Wasserlinie montiert. Die mögliche Größe der Propeller ist abhängig von der Breite des Heckspiegels und dem Tiefgang des Schiffes. Da die halbgetauchten Propeller eine Schubkomponente in Schiffsquerrichtung erzeugen, drehen sie gegeneinander um diese zu kompensieren. Diese Querkomponenten der Propeller werden für die Richtungssteuerung des Schiffes genutzt, indem von einem oder beiden Propellern die Steigung und/oder Drehzahl/Drehrichtung verändert werden. Dadurch ist keine Ruderanlage erforderlich. Das Steuerungssystem setzt die Vorgaben von Geschwindigkeit und Richtung sowie Betriebsart unter Verwendung der vier Stellgrößen in die günstigste Steuerwirkung bei Freifahrt und auch beim Manövrieren um.

Neben dem Vorteil des höheren Wirkungsgrades dieses Antriebskonzeptes wird damit erreicht, dass sich die Schiffspropeller nicht mehr in direkter Nähe zum Grund befinden und dadurch die Gefahr einer Beschädigung verringert wird. Auch können die Propeller einer Wartung unterzogen werden, ohne das Schiff aus dem Wasser zu nehmen, da sie ständig zugänglich sind.

Das Antriebssystem kann bei entsprechenden schiffbaulichen Anforderungen auch mit vier Propellern realisiert werden (Abbildung 3).

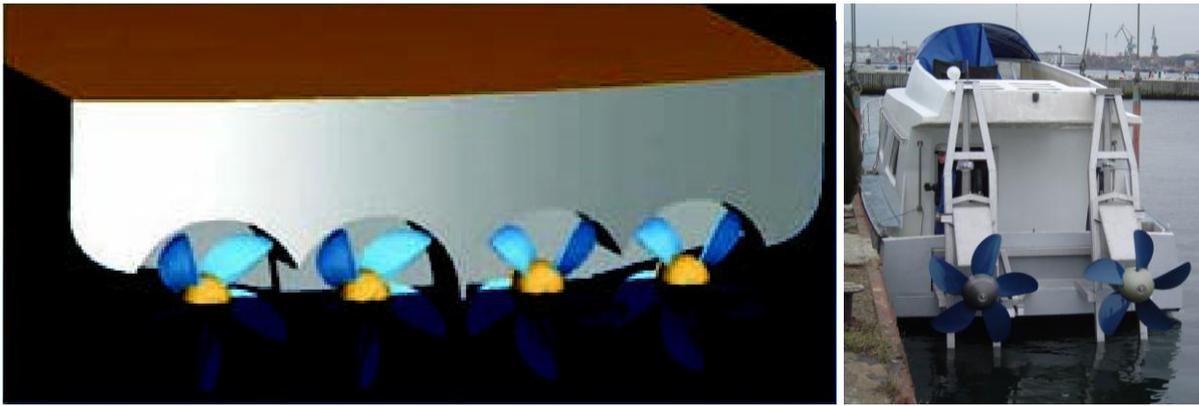


Abbildung 3: Propellervarianten /3/

Der Antrieb der Propeller erfolgt bei einem Doppelsystem mit je zwei Diesel- oder Elektro-Motoren, um die Steuerfähigkeit bei Ausfall eines Motors aufrechtzuerhalten. Die Synchronisation der Motoren erfolgt in deren Stellsystem.

Bei einem Vierpropellersystem wird jeder Propeller von einem Motor angetrieben.

Die Steigungsverstellung ($\pm 70^\circ$) der Propeller kann projektabhängig durch hydraulische oder elektrische Stellantriebe erfolgen. Das Antriebssystem ist nur für Schiffe mit geringer Tiefgangsänderung wie Schubschiffe und Passagierschiffe geeignet.

1.5 Kurssteuerung ohne richtungsstellendes Organ

Bei der Richtungssteuerung mit einem Ruderblatt wird der Propellerschub in Bezug auf die Schiffslängsachse ausgelenkt.

Der halbgetauchte Propeller hat neben der Schubkomponente in Schiffslängsrichtung eine sehr große Schubkomponente in Schiffsquerrichtung, die durch Drehzahl/Drehrichtung und besonders Steigung beeinflusst werden kann.

→ Bis zu 65% des Gesamtschubes können in die Querkomponente gelegt werden.

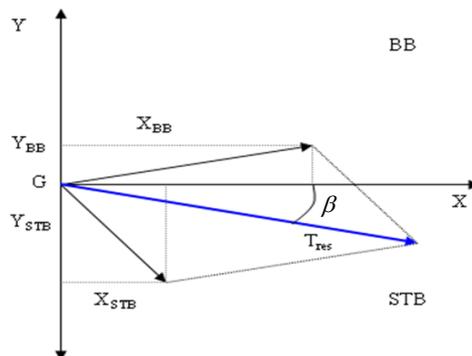


Abbildung 4: Schubkomponenten der Propeller /1/

Durch Aufheben des Gleichgewichtes bei Einstellung einer Drehzahl- oder Steigungsdifferenz zwischen beiden Propellern entsteht ein resultierender Schubvektor, der wie ein „scheinbares“ Ruderblatt in seiner Richtung (Winkel β) gestellt werden kann.

$$\beta = \arctan \frac{Y_{BB} - Y_{STB}}{X_{BB} + X_{STB}} \quad (1)$$

Dadurch ergeben sich folgende Ansätze für die Steuerung des Schiffes durch:

- Variation der Drehzahlunterschiede der Propeller
- Veränderung der Steigungsunterschiede
- Drehrichtungsumkehr

Die damit möglichen Bewegungsformen zum Manövrieren (Abbildung 5) sind

- Kursänderung
- Drehen auf der Position
- Traversieren.

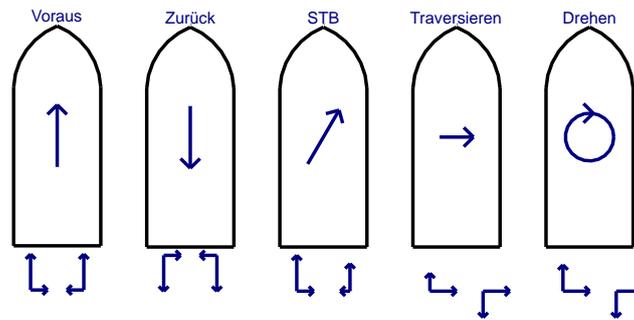


Abbildung 5: Prinzipien der Richtungsteuerung /3/

Abbildung 6 zeigt das realisierbare Richtungsdiagramm der gemeinsamen Schubwirkung sowie das der einzelnen Propeller für die möglichen Kombinationen aus Drehrichtung, Drehzahl und Steigung. Mit den Bedienelementen wird die gewünschte Schubrichtung und -stärke vorgegeben. Für die Realisierung der entsprechenden Bewegung des Schiffes müssen im Steuersystem die Stellgrößen für beide Propeller gemäß dem Diagramm berechnet werden.

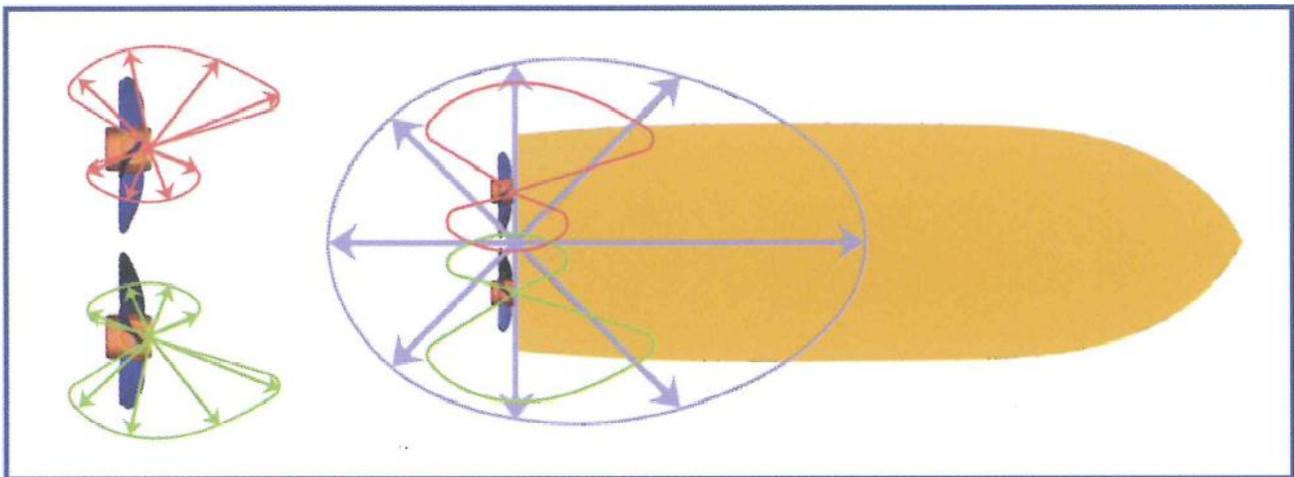


Abbildung 6 Schubvektoren des Propellersystems /3/

Die vier Stellgrößen, die die Fahrt des Schiffes **und** den Schubvektor als „scheinbares“ Ruder steuern, erfordern eine neu Form der Steuerung, da sich beide Teilprozesse nicht trennen lassen. Die Komplexität der daraus resultierenden Steuerung des Schiffes erfordert ein Steuersystem, das trotz der vier Stellgrößen durch den Schiffsführer bedient wird und für ihn wirkt, wie ein herkömmliches System aus:

Propeller, Ruderblatt (und Querstrahlpropeller)

Eine direkte „Bedienung“ der vier Stellantriebe ist vergleichbar dem Steuern eines Kettenfahrzeuges.

2. Steuersystem für Geschwindigkeit und Richtung

2.1 Klassifikationsvorschriften

Da die Klassifikationsvorschriften nicht die technischen Besonderheiten des Antriebssystems abdecken, wurden auf Basis einer Fehlermode- und Effekt-Analyse gemeinsam mit dem Germanischen Lloyd zu erfüllende technische und funktionelle Vorgaben für das Steuersystem erarbeitet, die im redundanten Aufbau des Antriebssystems und der Stellantriebe sowie in der redundanten Steuerung und Überwachungsfunktionen umgesetzt sind. Das Gesamtsystem der Steuerung ist vom Germanischen Lloyd für den Schiffseinsatz zugelassen (86249-09 HH).

Das wesentlichste Ergebnis der Untersuchungen war, dass das System der halbtauchenden Doppelpropeller neben seinen vielen Vorteilen nur einen „Fehler“ hat:

- bei Ausfall eines Propellers geht das Schiff sofort in eine Drehbewegung!

Dieser Nachteil wird korrigiert durch die Dopplung der Antriebsmotoren für jeden Propeller oder den Einsatz von 4 Propellern (Abbildung 3).

2.2 Geschwindigkeitssteuerung

Die Fahrtsteuerung ist mit einer einfachen Steuerfunktion realisierbar. Die Propeller werden in ihren Kennwerten für eine optimale Schuberzeugung entsprechend der Wirkungsgradkurve – zu jeder Drehzahl gehört eine wirkungsgradoptimale Steigung – dem Schiff angepasst. Die Wirkungsgradkurve wird in Form der Kombinatorikurve für Drehzahl und Steigung in der Steuerung abgelegt. Die Geschwindigkeitsvorgabe mit dem Maschinentelegraph wird mit dem zugehörigen Arbeitspunkt auf der Kombinatorikurve für beide Propeller in gleiche Sollwerte für die Stellgrößen umgesetzt.

2.3 Richtungssteuerung

Der durch die Fahrtsteuerung eingestellte Arbeitspunkt bildet die Basis für die Richtungssteuerung. Durch Einstellung einer Differenz zwischen beiden Propellern wird der „scheinbare“ Ruderwinkel erzeugt. Abhängig von der Betriebsart, der Art des Antriebsmotors, der aktuellen Einstellung des Arbeitspunktes bestehen mehrere Möglichkeiten, eine Richtungsänderung (z.B nach Stb) des Schiffes im Freifahrtbetrieb zu realisieren:

- Steigung und/oder Drehzahl Bb erhöhen
- Steigung und/oder Drehzahl Stb verringern
- Steigung und Drehzahl Bb erhöhen und Stb verringern.

Für die Richtungsänderung im Manöverbetrieb wird zusätzlich die Drehrichtung in die Steuerung einbezogen. Da der „scheinbare“ Ruderwinkel dem resultierenden Schubvektor entspricht, kann er die Bediengröße für die Richtungssteuerung bilden.

Damit steht dem Schiffsführer die bekannte Bedienoberfläche mit Ruderrad und Maschinentelegraph zur Verfügung.

2.4 Arten der Richtungssteuerung

Da das Antriebssystem sehr gute Manövriereigenschaften besitzt, können dem Schiffsführer folgende Betriebsarten durch Anpassung der Struktur der Steuerung zur Verfügung gestellt werden:

Manoeuvre Mode: In dieser Betriebsart ist eine unbegrenzte Richtungsvorgabe möglich. Die Verstellung von Drehzahl und Steigung werden für die Erzeugung einer großen Richtungsänderungsgeschwindigkeit und eines großen Schubes genutzt.

Position Turn Mode: Bei einer Richtungsvorgabe von 90° (BB oder STB) dreht das Schiff auf der Position und befindet sich im „Position turn mode“.

Sea Mode: Der Sea Mode dient der Streckenfahrt des Schiffes mit kleinen Kursänderungen. Die Richtungsvorgabe („scheinbarer“ Ruderwinkel) wird in dieser Betriebsart durch die Steuerung auf 45° (projektabhängig parametrierbar) begrenzt.

In den Manöverbetriebsarten geht die Richtungsvorgabe über 45° hinaus. Deshalb wird das Prinzip der gemeinsamen Bedienung von Fahrt und Richtung analog zu den Azimut-Antrieben genutzt (Abbildung 7), um Fehlbedienungen bei getrennten Bedienelementen auszuschließen.



Abbildung 7: Azimut-Bedienhebel

3. Struktur des Steuersystems

Entsprechend der Klassifikationsvorschriften ist die Richtungssteuerung von Schiffen redundant auszuführen. Da das Steuersystem die Richtungssteuerung beinhaltet, ist eine redundante Ausführung erforderlich. Diese kann realisiert werden durch eine Kombination aus einer Non Follow Up (NFU) Steuerung und einer Follow Up (FU) Steuerung oder durch zwei Follow Up Steuerungen.

3.1 FU-Steuersystem - Hauptsteuerung

Bei Follow Up Steuerung werden die Sollwerte für die Richtung (umlaufend $\pm 180^\circ$) und Geschwindigkeit ($\pm 100\%$) mit einem kombinierten Bedienhebel (Abbildung 7) vorgegeben. Das Steuersystem setzt die eingestellten Vorgaben für die Geschwindigkeit und für die Richtung (Ruderwinkel) in die dafür erforderlichen Stellgrößen um. Die Steuerung übernimmt damit die manuelle Fahrt- und Rudersteuerung, nicht die automatische Kursregelung des Schiffes.

Da die Struktur der jeweiligen Schiffsprojekte sehr von den Entfernungen zwischen den Anlagenteilen (Brückensteuerstand, Nebensteuerstand, Elektronikraum, Maschinenraum, Vorortsteuerstand) und von den Stellantrieben der Propeller abhängt, kann ein FU-Steuersystem projektabhängig aus folgenden Teilsystemen aufgebaut werden, die untereinander vorzugsweise über eine Feldbusstruktur verbunden sind:

- FU-Steuersystem mit SPS oder IPC – abhängig von Art und Anzahl der Feldbussysteme
- Abgesetztes Steigungs- und Drehzahl-Steuersystem für die Stellantriebe
- Feldbuskoppler für den Anschluss abgesetzter Bedienstände

Das FU-Steuersystem berechnet aus den Sollwertvorgaben für Richtung und Geschwindigkeit die Sollwerte für Drehzahl und Steigung der einzelnen Propeller. Bei auftretenden Fehlern in der Anlagenstruktur werden durch die Steuerung Wechsel in der Steuerfunktion realisiert und angezeigt, um einen sicheren Weiterbetrieb der Anlage, gegebenenfalls mit eingeschränkten Funktionalitäten zu ermöglichen. Das abgesetzte Steigungs- und Drehzahlsteuerungssystem dient der Regelung und Überwachung der Stellantriebe der Propeller. Bei direktem Anschluss der Stellantriebe erfolgt deren Regelung auch im FU-Steuersystem.

Das FU-Steuersystem, auch als Hauptsteuersystem bezeichnet, wird mit einer Speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS / IPC) als intelligente Einheit realisiert. Der größte Teil der Programmstruktur der SPS umfasst Funktionen, die der Sicherheit des Systems dienen, um auf Fehler, die die Steuerfähigkeit beeinflussen, ohne Verzögerung zielgerichtet reagieren zu können.

Die Steuerung realisiert dabei folgende Teilfunktionen:

- Umsetzung der Sollwerte Richtung und Fahrt in Sollwerte und Stellsignale für die Stellantriebe
- Umschaltung der Betriebsarten und Anpassung der Steuerungsstruktur und -parameter
- Überwachung und Ausführung der Steuerstandsumschaltung (Abgleich Sollwertgeber vor Umschaltung)
- Überwachung der Schnittstellen und Istwerte der Stellantriebe
- Bereitstellung der Prozesswerte für die Anzeige
- Störmeldefunktionen
- Umschaltung in die redundante Steuerung bei Ausfällen

3.2 Anzeige- und Meldedisplay

Die Bedienoberfläche für die Hauptsteuerung besteht aus einem bei Sonnenlicht lesbaren Touch-Panel und einem Schalterfeld für die Schaltung der Anlage und die Betriebsarten.

Bei einem Aufbau der Bedienoberfläche mit einzelnen Baugruppen entsteht ein verhältnismäßig großer Flächenbedarf für die erforderliche Anzahl von Anzeige- und Bedienmöglichkeiten. Durch den Einsatz von Touch-Panels mit einer Prozessvisualisierungssoftware ist eine Konzentration der Bedienoberfläche auf eine kleine, übersichtliche Fläche möglich (Abbildung 8).

Das Anzeige- und Meldedisplay dient:

- der Anzeige der Betriebsarten und Bedienhinweisen (unterer Bildbereich)
- Anzeige der aktiven FU-Steuerung (rechte Bildbereich)
- der Anzeige der Soll- und Istwerte von Steigung und Drehzahl sowie der Schubrichtung („scheinbaren“ Ruderwinkel) und der Schubstärke (mittlerer Bildbereich)
- der optischen und akustischen Anzeige sowie Quittierung von Störungs- und Betriebsmeldungen einschließlich einer Historie (oberer Bildbereich)
- Parametrierung der Steuerung (bedienbar nur für Servicepersonal)
- Dimmung des Displays in mehreren Stufen (unten rechts.)

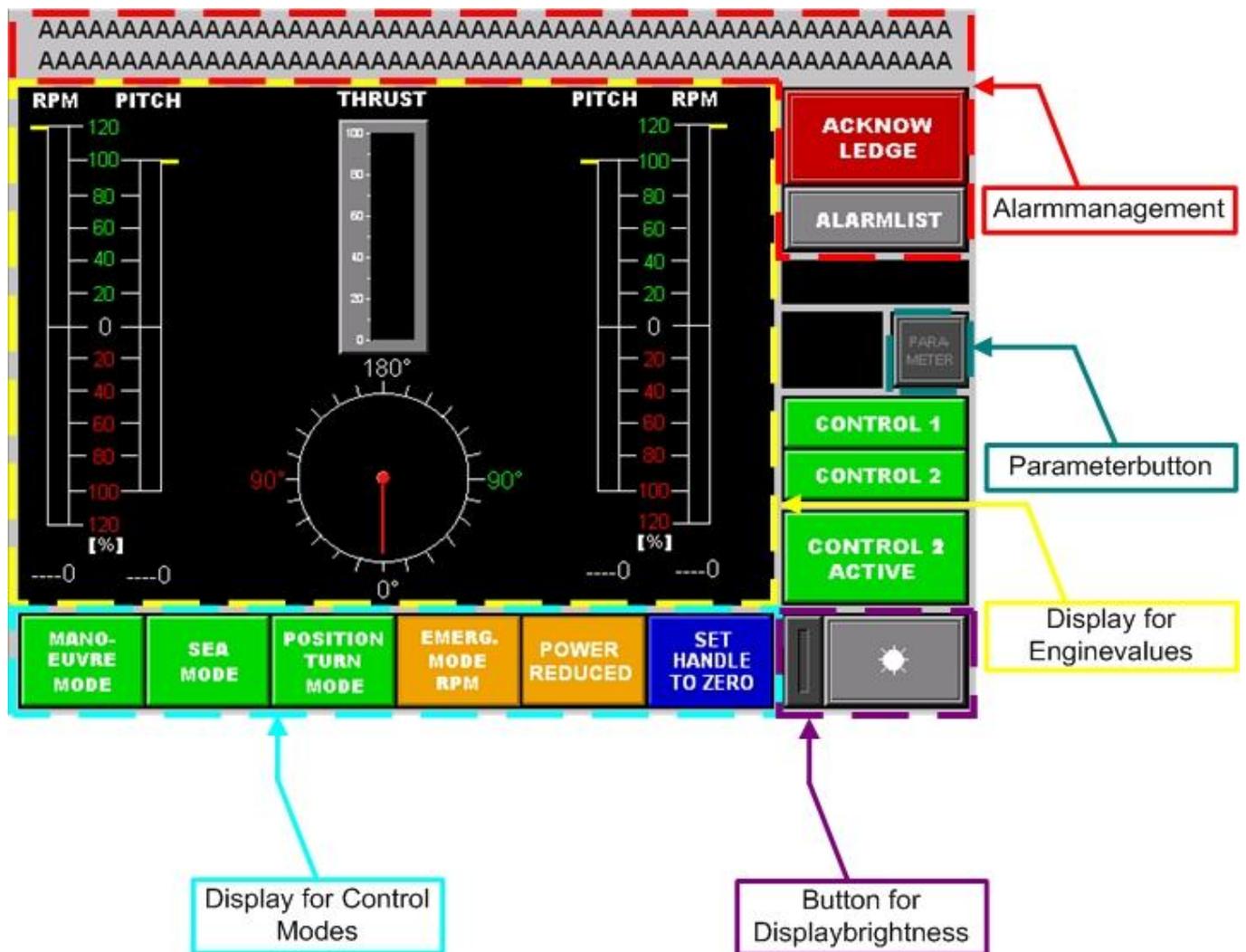


Abbildung 8: Anzeige- und Meldedisplay

3.3 Redundante FU-Steuerung auf „Turanor-PlanetSolar“

Bei redundanter Ausführung des Hauptsteuersystems werden alle Komponenten der Steuerstruktur doppelt ausgeführt. Das Bediendisplay erhält die Informationen vom aktiven System. Zusätzlich werden alle relevanten Steuergrößen entsprechend der Klassifikationsvorschriften auf der vom Steuersystem unabhängigen redundanten Istwertanzeige dargestellt. Die redundante Steuerung erzeugt die Stellgrößen in gleicher Weise wie die aktive, diese werden aber nicht zu den Stellantrieben durchgeschaltet.

Bei Ausfall einer Steuerungskomponente durch Hard- oder Softwarefehler wechselt die Steuerung automatisch auf das redundante System.

Auf dem Solarschiff „Turanor PlanetSolar“ ist ein redundantes Steuersystem mit SPS- und IPC-Komponenten der WAGO Kontakttechnik GmbH & Co. KG realisiert (Abbildung 9), die über die erforderlichen Klassifikationszulassungen verfügen.

Ein Follow-Up-Steuerstrang besteht aus einem IPC (758-875/000-0112) für die Ausführung der Steuerfunktionen sowie die Anbindung der Bussysteme Ethernet und CANopen. Zwei CANopen-Koppler (750-337) verbinden für jeden der beiden Steuerstränge elektrisch voneinander unabhängig die Bedienoberfläche des Hauptsteuerstandes mit dem jeweiligen IPC. Der tragbare Nebensteuerstand ist über einen CANopen-Koppler angeschlossen, der nur auf das aktive System geschaltet wird. Die Umrichter der Antriebsmotore sind an beide CANopen-Strukturen angeschlossen und übernehmen aus dem aktiven Steuerstrang die Sollwerte.

Die SPS (750-871) für die Steigungsstellantriebe sind nicht redundant ausgeführt, da sie nur für die geschwindigkeitsabhängige Optimierung der Steigungseinstellung im Sea-Mode erforderlich sind.

Die redundante Istwertanzeige der Antriebe und das von der Steuerung unabhängige Störmeldesystem sind jeweils mit einer SPS (750-881) realisiert.

Alle Controllerbaugruppen des Steuerungssystems sind in eine Servicestruktur zur Fernwartung eingebunden.

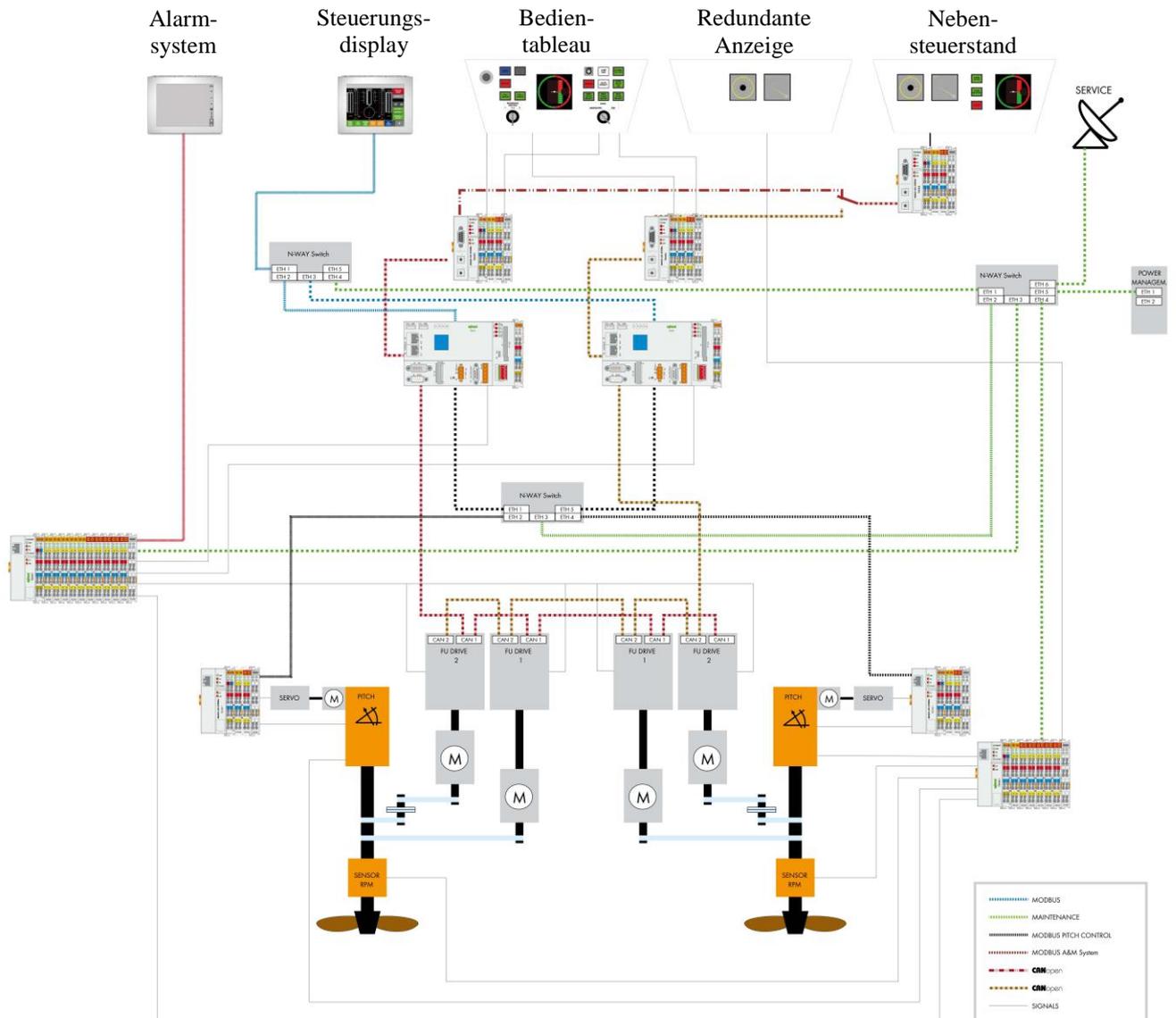


Abbildung 9: Steuerungsstruktur Turanor-PlanetSolar /4/

3.4 Redundante Istwertanzeige

Durch Sensoren, die unabhängig von denen des Steuersystem sind, werden die Istwerte für Drehzahl und Steigung der Propeller erfasst.

Die Anzeige besteht für ein FU Steuersystem aus:

- einer analoger Anzeige für den Schubwert (0...100%)
- einer analogen Schubrichtsungsanzeige / Ruderwinkel (+/-180°).

Die Schubrichtsungsanzeige und die Schubstärke werden aus den Istwerten der Drehzahl und der Steigung der Propeller in der SPS berechnet.

4. Solarboot „Turanor-PlanetSolar“

Auf dem mit Solarenergie angetriebenen Schiff „PlanetSolar“, das eine Länge von 31m und eine Breite von 15m bei einer Masse von ca. 82t hat, wird der Antrieb erstmal auf einem größeren Schiff eingesetzt. Die Antriebsleistung beträgt pro Propeller, die einen Durchmesser von 2m haben, jeweils maximal 60 kW. Damit kann eine Geschwindigkeit von 14 Knoten erreicht werden.



Abbildung 10: Solarschiff „Turanor PlanetSolar“ /2/



Abbildung 11: Halbtauchende Propeller des Solarschiffes /2/

/1/ Büchler, D., Markert, M. (2005). Oberflächenschneidende Doppelpropeller, Vortrag an der Universität Duisburg

/2/ “ www.planetsolar.org/de/multimedia/fotos.html” am 05.08.2011

/3/ Büchler, D., Markert, M. (2005): Projektbericht zum Verbundprojekt „Systeme für Niedrigenergie-Wasserfahrzeuge“

/4/ WAGO Kontakttechnik GmbH & Co. KG, Präsentationstafel SMM 2010