



# Projekt Maritime Verkehrstechnik: E-Navigation Integrität

Abschlussbericht



## Autoren:

<i>Kapitel 1</i>	<i>Einführung</i>	<i>E. Engler</i>
<i>Kapitel 2</i>	<i>Herausforderungen und Forschungsfelder</i>	<i>E. Engler</i>
<i>Kapitel 3</i>	<i>PNT-Systemkonzept</i>	<i>E. Engler</i>
<i>Kapitel 4</i>	<i>Entwicklungs-, Test- und Demonstrationsumgebungen</i>	<i>S. Gewies</i>
<i>Kapitel 5</i>	<i>GNSS-Ergänzungsdienste und Integrität</i>	<i>A. Born</i>
<i>Kapitel 6</i>	<i>PNT Unit</i>	<i>R. Ziebold</i>
<i>Kapitel 7</i>	<i>Verkehrslageerfassung und Bewertung</i>	<i>F. Heymann</i>
<i>Kapitel 8</i>	<i>Zusammenfassung und Ausblick</i>	<i>T. Noack</i>

---

## Freigabe:

Evelin Engler  
*MVT Projektmanager*

Thoralf Noack  
*Abteilungsleiter „Nautische Systeme“*

Detlef Zukunft  
*Programmdirektion Verkehr,  
Auftraggeber MVT Projekt*



## Präambel

Deutschlands Wirtschaft wickelt den überwiegenden Teil seines Handels über den Seeweg ab und ist damit von der Schifffahrt in erheblichem Maße abhängig. Vor unseren Küsten kreuzen Schnellfähren täglich die Routen von langsam fahrenden Öl- und Gastankern. Zudem wächst der Verkehr in engen Passagen, wie der Kadetrinne oder der Elbe, stetig. Beides ist mit Risiken bzw. wachsenden Risiken verbunden. Auf der Passagierseite nimmt die Zahl der Deutschen, die ihre Ferien auf Kreuzfahrtschiffen verbringen, weiter zu. All diese Faktoren führen dazu, dass eine sichere, ökonomische und umweltfreundliche Schifffahrt für Deutschland eine große Bedeutung hat.

Dieses Ziel ist heute bei weitem nicht erreicht: alleine im Jahr 2012 fanden in der Ostsee 48 Schiffskollisionen statt. Etwa gleich häufig liefen Schiffe auf Grund. Solche Ereignisse werden kaum wahrgenommen. Der breiten Öffentlichkeit sind eher das Sinken der Rena, der Costa Concordia, der Sea Diamond, der Lamma IV, der Jolly Nero und der St. Thomas of Aquinas bekannt. All diese Unglücke sind auf Navigationsfehler zurückzuführen, die für ca. 50% aller Schiffsunglücke verantwortlich sind. Dies veranlasste die „International Maritime Organisation (IMO)“, die Initiative „e-Navigation“ ins Leben zu rufen.

Das DLR ist mit seiner Systemkompetenz „Communication, Navigation and Surveillance“ im Bereich der Luftfahrt prädestiniert bei der „e-Navigation“-Initiative eine wichtige Rolle zu spielen. Die Parallelen zwischen Luftfahrt und Schifffahrt sind vielfältig, die Unterschiede aber zugleich so groß, dass eine direkte Übertragbarkeit nicht gegeben ist. Wenn navigatorische Unsicherheiten bestehen, kann ein Flugzeug im Landeanflug durchstarten und damit

in den Zustand „Flug in sicherer Höhe“ zurückkehren. Etwas Äquivalentes ist beim Schiff nicht möglich.

Im vorliegenden Projekt galt es, zwei Grundvoraussetzungen für das Ziel der „kollisionsarmen Navigation“ auszuloten, nämlich einerseits die genaue und störteste Bestimmung der Position und Bewegung des eigenen Schiffes und andererseits die zuverlässige Erfassung des übrigen Verkehrs. Die Analyse heutiger Systeme führte zu ernüchternden Ergebnissen. Entsprechend wurde ein neuer Ansatz entwickelt, bei dem ausgewählte Sensoren mit komplementären Eigenschaften und beherrschbaren Fehlermodellen kombiniert genutzt werden. Die Ergebnisse der Untersuchungen werden im vorliegenden Bericht beschrieben. Sie wurden bereits in Gremien der IMO und „International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities (IALA)“ zur Entwicklung neuer Konzepte eingebracht und entfalten dort eine erste Wirkung. Der Weg zu einer umfassenden Lösung ist noch lang. Aber schon die Umsetzung von Zwischenergebnissen wird dazu beitragen, dass „immer ‘ne Hand voll Wasser unterm Kiel“ bleibt und mit sicherem Abstand zu anderen Schiffen navigiert wird. Das ultimative Ziel ist allerdings, dass Schiffe nicht mehr durch Navigationsfehler kollidieren. Damit dies Wirklichkeit wird, müssen die Lösungen kostengünstig umzusetzen sein. Auch in dieser Beziehung sind die neuen Ansätze vielversprechend.

Prof. Dr. Christoph Günther  
Direktor des DLR Instituts für Kommunikation und Navigation

# Inhaltsverzeichnis

<b>1.</b>	<b>EINLEITUNG .....</b>	<b>8</b>
<b>2.</b>	<b>HERAUSFORDERUNGEN UND FORSCHUNGSFELDER .....</b>	<b>9</b>
2.1	SICHERHEIT UND SEINE FACETTEN .....	9
2.2	STRATEGISCHE MAßNAHMEN UND DIE DEFINITION VON ANFORDERUNGEN.....	9
2.3	ABGELEITETE FORSCHUNGS- UND ENTWICKLUNGSBEREICHE.....	12
<b>3.</b>	<b>PNT- SYSTEMKONZEPT.....</b>	<b>13</b>
3.1	STATUS UND HERAUSFORDERUNGEN .....	13
3.2	DEFINITIONSRAHMEN FÜR DAS MARITIME PNT-SYSTEM.....	15
3.3	GENERISCHE ARCHITEKTUR DES PNT-SYSTEMS.....	16
3.4	KONZEPT DER PNT-UNIT .....	17
<b>4.</b>	<b>ENTWICKLUNGS-, TEST- UND DEMONSTRATIONSPLATTFORM .....</b>	<b>20</b>
4.1	STATUS UND HERAUSFORDERUNGEN .....	20
4.2	VOM DEMONSTRATIONSSYSTEM ZUM PLATTFORMKONZEPT.....	20
4.3	HARDWAREPLATTFORM .....	22
4.4	MIDDLEWAREPLATTFORM .....	24
<b>5.</b>	<b>GNSS-ERGÄNZUNGSDIENSTE UND INTEGRITÄT .....</b>	<b>25</b>
5.1	STATUS UND HERAUSFORDERUNGEN .....	25
5.2	AUSBAU DER MGBAS-SERVICEPORTFOLIOS: GALILEO UND MULTIGNSS .....	26
5.3	IALA BEACON DGNSS - VALIDIERUNG MARITIMER AUGMENTIERUNGSDIENSTE .....	29
5.4	NUTZBARKEITSANALYSE VON PDGNSS-DIENSTEN FÜR MARITIME LONG-RANGE ANWENDUNGEN .....	30
<b>6.</b>	<b>PNT-UNIT .....</b>	<b>31</b>
6.1	STATUS UND HERAUSFORDERUNGEN .....	31
6.2	SENSOREN DER PNT-UNIT (V1.0).....	32
6.3	SENSORCHARAKTERISIERUNG .....	33
6.4	PROZESSIERUNGSKETTEN DER PNT UNIT (V1.0) .....	34
6.5	ERGEBNISSE DER EXPERIMENTELLEN VALIDIERUNG .....	36
<b>7.</b>	<b>VERKEHRSLAGEERFASSUNG UND BEWERTUNG .....</b>	<b>39</b>
<b>7.1</b>	<b>STATUS UND HERAUSFORDERUNGEN.....</b>	<b>39</b>
7.2	AIS-PLAUSIBILITÄT.....	40
7.3	AUTOMATISCHE RADARBILDERFASSUNG.....	43
7.4	AIS-FUSION (OBJEKTAUSSOZIIERUNG).....	44
<b>8.</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....</b>	<b>45</b>
8.1	ZUSAMMENFASSUNG DER PROJEKTERGEBNISSE .....	45
8.2	AUSBLICK AUF WEITERFÜHRENDE FORSCHUNGS- UND ENTWICKLUNGSARBEITEN .....	47
<b>ANNEX A</b>	<b>LISTE DER PUBLIKATIONEN.....</b>	<b>49</b>
<b>ANNEX B</b>	<b>LISTE VON VORTRÄGEN UND WORKSHOPS.....</b>	<b>51</b>
<b>ANNEX C</b>	<b>REFERENZEN.....</b>	<b>52</b>
<b>ANNEX D</b>	<b>BILDQUELLEN .....</b>	<b>52</b>

# Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	SCHIFFSVERKEHR IM FORSCHUNGSHAFEN ROSTOCK.....	8
Abb. 2:	SINKEN DER M/S "EXPLORER" IM JAHR 2007.....	9
Abb. 3:	VERBALE FORMULIERUNG BESTEHENDER NUTZERANFORDERUNG (AUSWAHL) .....	10
Abb. 4:	STANFORD-DIAGRAMM ZUR GEGENÜBERSTELLUNG VON GESCHÄTZTER UND REALER PERFORMANZ VON DX.....	11
Abb. 5:	ÜBERBLICK ÜBER PNT-KOMPONENTEN (DUNKELBLAU: STANDARDISIERT/GENUTZT, BEIGE: NUTZBAR).....	14
Abb. 6:	GENERISCHE ARCHITEKTUR DES MARITIMEN PNT-SYSTEMS .....	16
Abb. 7:	KLASSISCHE REALISIERUNG DES SCHIFFSSEITIGEN PNT-MODULS (PVT=POSITION, VELOCITY, AND TIME; N=NAVIGATION) ...	17
Abb. 8:	INS-BASIERTE REALISIERUNG DES PNT-MODULS.....	18
Abb. 9:	PNT-UNIT FÜR EINE GENAUIGKEITSBEZOGENE INTEGRITÄTSÜBERWACHUNG DES BORDSEITIGEN PNT-MODULS .....	19
Abb. 10:	DESIGN DES ANGESTREBTEN DEMONSTRATORSYSTEMS, DAS ENTWORFEN WURDE, UM DIE MACHBARKEIT UND NUTZEN DES INTEGRITÄTSMONITORING ZU ZEIGEN. ....	21
Abb. 11:	GESAMTKONZEPT DER MARITIMEN DATENVERARBEITUNG .....	21
Abb. 12:	GRUNDLEGENDE GENUTZTES EQUIPMENT AN BORD DER „BALTIC TAUCHER II“ .....	22
Abb. 13:	GENERIERUNG EINES ZEITGESTEMPELTEN KOMBINIERTEN DATENSTROMS AUF DEM SCHIFF.....	22
Abb. 14:	SENSORIK BZW. EMPFANGSANLAGEN DER BEIDEN IM FORSCHUNGSHAFEN ROSTOCK INSTALLIERTEN STATIONEN .....	23
Abb. 15:	GENERIERUNG ZEITGESTEMPELTER DATENSTRÖME AN DEN LANDSTATIONEN.....	24
Abb. 16:	PROGRAMMENTWICKLUNG UNTER NUTZUNG DER MIDDLEWAREPLATTFORM .....	24
Abb. 17:	ERFOLGSAHNEINLICHKEIT DER MEHRDEUTIGKEITS-BESTIMMUNG FÜR „GPS L1“- UND „GPS L1+L2“- SERVICE DES MGBAS (DOY 036-050 2011) BESTIMMT AN DER MGBAS-MONITORINGSTATION .....	26
Abb. 18:	MAXIMALER POSITIONSFEHLER AN DER MGBAS-MONITORINGSTATION PRO TAG BEI VERWENDUNG DES „GPS L1+L2“- ERGÄNZUNGSSERVICES IN ABHÄNGIGKEIT VOM STATUS DER MEHRDEUTIGKEITSFIXIERUNG (LINKS) UND IN RELATION ZUR IMO- ANFORDERUNG FÜR AUTOMATISCHE ANLEGEMANÖVER (RECHTS).....	27
Abb. 19:	WAHRSCHEINLICHKEIT FÜR EINE ERFOLGREICHE MEHRDEUTIGKEITSFIXIERUNG : „GPS L1“, „GALILEO E1“ UND „GPS L1 & GALILEO E1“ AUF DER GRUNDLAGE VON DATEN DES „SPIRENT“ GNSS-SIMULATORS .....	27
Abb. 20:	MGBAS-MONITOR ZUR VISUALISIERUNG VON MGBAS-RELEVANTEN INTEGRITÄTSAUSSAGEN .....	28
Abb. 21:	USER-FRIENDLY MGBAS-MONITOR .....	29
Abb. 22:	POSITIONSGENAUIGKEIT OHNE UND MIT KORREKTUREN DER IALA BEACON-STATION GROß MOHRDORF UND DER MGBAS- STATION.....	29
Abb. 23:	DARSTELLUNG DES HORIZONTALEN POSITIONSFEHLERS ALS BOXPLOT BEI VERWENDUNG VON ZEITLICH VERZÖGERTEN RTCM2 KORREKTURDATEN DES IALA BEACON DGNSS AN DER MGBAS REFERENZSTATION IN ROSTOCK (DOY 235, 2010) .....	30
Abb. 24:	HORIZONTALER (BLAU) UND VERTIKALER (ROT) PDGPS-POSITIONSFEHLER ( $1\sigma$ ) IN ABHÄNGIGKEIT VON DER DER BASISLINIENLÄNGE.....	31
Abb. 25:	ANTEIL VON PDGPS-POSITIONSLÖSUNGEN MIT FIXIERTEN MEHRDEUTIGKEITEN IN ABHÄNGIGKEIT VON DER BASISLINIENLÄNGE.....	31
Abb. 26:	GNSS-EMPFÄNGERGRUPPE DER PNT-UNIT .....	32
Abb. 27:	ÜBERSICHT DER FÜR DIE PNT-UNIT V1.0 EINGESETZTEN SENSOREN UND IHREM NUTZEN HINSICHTLICH DER LIEFERUNG VON PNT PARAMETERN (x) BZW. DEREN LIEFERUNG INCL. REDUNDANZ (xx) .....	32
Abb. 28:	QUASISTATISCHE BESTIMMUNG DES HEADING (YAW) ZUR ABLEITUNG VON GENAUIGKEITSAUSSAGEN FÜR DEN GNSS- KOMPASS: ZEITVERLAUF DES HEADING (LINKS) UND ZUGEORDNETE VERTEILUNGSFUNKTION (RECHTS).....	33
Abb. 29:	ALLAN VARIANZ -ANALYSE FÜR DIE DREHRATENSSENSOREN DER IM PROJEKT VERWENDETEN IMU: iVRU FCAI.....	34
Abb. 30:	HW DES DEMONSTRATORS DER PNT-UNIT (V1.0).....	34
Abb. 31:	SNAPSHOT DER WEBBROWSER BASIERTEN PNT UNIT VISUALISIERUNG .....	35
Abb. 32:	SCHIFFSTRAJEKTORIE DER MESSFAHRT VOM 9.4.2014 .....	36
Abb. 33:	HORIZONTALER POSITIONSFEHLER DES GPS-BASIIERTEN SPP-VERFAHREN: KUMULIERTER VERTEILUNGSFUNKTION (LINKS) UND ZEITLICHER VERLAUF (RECHTS) .....	36
Abb. 34:	HORIZONTALER POSITIONSFEHLER SPP OHNE RAIM (BLAU) UND MIT RAIM (ROT) FÜR ZWEI ZEITABSCHNITTE MIT POSITIONSSPRÜNGEN IN DER SPP LÖSUNG.....	37
Abb. 35:	HORIZONTALE POSITIONSFEHLER FÜR LOSE (GRÜN) UND ENG GEKOPPELTEN EKF (SCHWARZ) IM VERGLEICH ZU SPP MIT (ROT) UND OHNE (BLAU) RAIM.....	37

ABB. 36:	STANFORD DIAGRAMM FÜR SINGLE POINT POSITIONING MIT RAIM .....	38
ABB. 37:	HORIZONTALER POSITIONSFehler FÜR PHASENBASIERTES DGPS: BEI FIXIERTEN MEHRDEUTIGKEITEN (LINKS) UND MIT FLOAT-LÖSUNGEN (RECHTS).....	38
ABB. 38:	ZEITLICHER VERLAUF DES HORIZONTALEN POSITIONSFehlerS FÜR PDGPS FIX / FLOAT LÖSUNGEN IM VERGLEICH ZU DEM LOSE GEKOPPELTEN EKF PDGPS + IMU + GNSS KOMPASS .....	39
ABB. 39:	SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER SCHIFFSBEWEGUNG IN BEZUG AUF AUF EINANDERFOLGENDE AIS-NACHRICHTEN.....	41
ABB. 40:	HISTOGRAMM DER DIFFERENZEN ZWISCHEN ÜBERTRAGENEN UND ABGELEITETEN SOG-WERTEN (BLAU) UND DER BESTMÖGLICHE FIT EINER GAUßVERTEILUNG (GRÜN).....	41
ABB. 41:	ZEITLICHER VERLAUF DER PRO TAG BESTIMMTEN MITTELWERTE UND STANDARDABWEICHUNGEN DER SOG-DIFFERENZEN IM SEPTEMBER DES JAHRES 2011: IM ROSTOCKER HAFEN (LINKS) UND AUF DER OSTSEE (RECHTS) .....	42
ABB. 42:	STATISTISCHE AUSWERTUNG ALLER AIS-NACHRICHTEN DER HELCOM DATENBANK FÜR DEN MONAT SEPTEMBER DES JAHRES 2011	42
ABB. 43:	WEBVISUALISIERUNG DES AIS-MONITORS IM FORSCHUNGSHAFEN ROSTOCK .....	43
ABB. 44:	OBJEKTDETEKTIONSVERFAHREN (LINKS); TEMPLATE-MATCHING-VERFAHREN ZUR RADARZIELVERFOLGUNG (RECHTS) .....	43
ABB. 45:	HISTOGRAMM DER ZEITVERZÖGERUNGEN IM AIS .....	44
ABB. 46:	HISTOGRAMM DER ZEITVERZÖGERUNG WELCHE BEI INNERHALB DES ARPA SYSTEMS AUFTRETEN .....	45

## Tabellenverzeichnis

TABELLE 1:	DEFINITION DES INTEGRIERTEN PNT-SYSTEMS.....	15
TABELLE 2:	PRIMÄRE PNT-DATEN .....	15
TABELLE 3:	PNT-RELEVANTE ERGÄNZUNGSDATEN .....	16

## Abkürzungen

AIS	-	Automatic Identification System
ARPA	-	Automatic Radar Plotting Aid
AtoN	-	Aids to Navigation
BSH	-	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
COG	-	Course over Ground
DB	-	Data Bank
DGNSS	-	Differential GNSS
DNV	-	Det Norske Veritas
ECDIS	-	Electronic Chart Display and Information System
EGNOS	-	European Geostationary Overlay System
ENC	-	Electronic Nautical Chart
EVnet	-	Experimentation and Verification Network
Galileo	-	Europäisches GNSS (im Aufbau)
GBAS	-	Ground Based Augmentation System
GL	-	Germanischer Lloyd
GLONASS	-	Глобальная навигационная спутниковая система
GNSS	-	Global Navigation Satellite System
GPS	-	Global Positioning System
IALA	-	International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities
IMO	-	International Maritime Organization
IMU	-	Inertial Measurement Unit
INS	-	Integrated Navigation System
LRIT	-	Long Rang Identification and Tracking
MGBAS	-	Maritime GBAS
MVT	-	Maritime Traffic Engineering
NMEA	-	National Marine Electronics Association
CDGNSS	-	Kodebasiertes DGNSS
PDGNSS	-	Phasenbasiertes DGNSS
PNT	-	Position, Navigation, and Timing
PVT	-	Position, Velocity, and Timing
RADAR	-	Radio Detection and Ranging
RAIM	-	Receiver Autonomous Integrity Monitoring
ROT	-	Rate of Turn
ROTI	-	ROT Indicator
RTCM	-	Radio Technical Commission for Maritime Services
RTK	-	Real Time Kinematic
SBAS	-	Space Based Augmentation System
SDME	-	Speed and Distance Measurement Equipment
SOG	-	Speed over Ground
SOLAS	-	International Convention for the Safety of Life at Sea
STW	-	Speed through Water
TCP	-	Transmission Control Protocol
UDP	-	User Datagram Protocol
UKC	-	Under Keel Clearance
UNCTAD	-	United Nation Conference on Trade and Development
UTC	-	Universal Time Coordinated
WAAS	-	Wide Area Augmentation System

## 1. EINLEITUNG

Globalisierung ist eine Antriebskraft, mit der die Leistungsfähigkeit der Weltwirtschaft in den letzten Jahrzehnten weiterentwickelt und ausgebaut wurde. So konnte seit 1990 das globale Bruttoinlandsprodukt auf mehr als 150% gesteigert werden. Globalisierung impliziert auch die Notwendigkeit, dass die Bereitstellung von Rohstoffen sowie die Versorgung mit bezahlbaren Lebensmitteln und Gütern weltweit abgesichert werden muss. Infolgedessen verdreifachte sich das globale Transportaufkommen im Vergleichszeitraum. Mittlerweile hat der maritime Transport eine Schlüsselrolle im weltweiten Handel übernommen. Heutzutage werden 80% des Gütervolumens bzw. 70% der Güterwerte auf den Seeweg transportiert [UNCTAD-2012].

Die zunehmende räumliche Trennung von Funktionen, mit denen menschliche Bedürfnisse wie Wohnen, Arbeiten, Erholen, Bilden und Versorgen erfüllt werden, führt zu einer tendenziell steigenden Mobilitätsnachfrage. Insbesondere auf Inseln, in peripheren Regionen und Küstenländern bildet sich dieser Trend auch in einer Zunahme des seegebundenen Passagieraufkommens ab. In Ländern wie Litauen, Lettland und Estland konnte allein im Zeitraum 2006-2011 ein Zuwachs an Passagierzahlen in Höhe von 30 % bis zu 260% beobachtet werden [Eurostat-2013]. Weltweit boomt die Kreuzfahrtbranche. Allein in den letzten 10 Jahren hat sich die Anzahl von Passagieren auf Kreuzfahrtschiffen verdoppelt und erreichte im Jahr 2013 fast 21 Millionen [Cruise-2014]. Damit kann zu Recht behauptet werden, dass das maritime Verkehrssystem essentiell für den weltweiten Transport von Personen und Gütern ist.



**Abb. 1: Schiffsverkehr im Forschungshafen Rostock**

Das maritime Verkehrssystem stellt die Summe aller strukturellen Komponenten dar, die erforderlich sind, um Personen und Güter auf den Seeweg transportieren zu können. Dazu gehören Häfen und Seewege mit ihren Leitsystemen, Schiffe verschiedenster Art als Transportmittel sowie Einrichtungen, mit deren Hilfe die Transport- und Verkehrsprozesse sich planen, managen und umsetzen lassen. Wirtschaftlichkeit und Sicherheit sind in diesem Kontext gestellte Anforderungen, um die Wettbewerbsfähigkeit des maritimen Transportsystems abzusichern.

Folglich wurden die Arbeiten des Projekts „Maritime Verkehrstechnik“ (MVT) auf die Fragestellung ausgerichtet, wie das maritime Verkehrssystem harmonisiert, technologisch ausgebaut und optimiert werden müsste, um die Wirtschaftlichkeit, Sicherheit und Leichtigkeit des Seeverkehrs weiter verbessern zu können. Damit ordnete sich das Projekt in die „E-navigation“-Strategie ein, die im Jahr 2006 durch die Internationale Maritime Organisation (IMO) als international abgestimmtes Arbeitsprogramm ins Leben gerufen wurde [MSC-2008]. Das Projekt MVT legte besonderes Augenmerk auf den Einsatz moderner und innovativer Kommunikations-, Navigations- und Informationstechnologien. Nur durch ihre integrative Nutzung kann die Bereitstellung von notwendigen Informationen abgesichert werden, mit denen nautische Aufgaben an Bord von Schiffen – jeweils von der Situationserfassung über die Situationsbewertung bis hin zur Entscheidungsfindung – überhaupt realisiert werden können. Zu diesen Informationen gehören die Position und Bewegung des eigenen Schiffes und anderer Verkehrsteilnehmer, aktuelles Kartenmaterial, Wind- und Strömungsverhältnisse und vieles mehr. Eine vollständige und umfassende Beschreibung der aktuellen Lage mit einem Mindestmaß an Genauigkeit und Zuverlässigkeit entscheidet oftmals darüber, ob Gefährdungen durch Kollisionen und Grundberührungen frühzeitig erkannt und Unfälle vermieden werden können. Das in diesem Kontext weiterhin Entwicklungsbedarf besteht, leitet sich aus der Tatsache ab, dass nach wie vor 50% aller Seeunfälle nautische Ursachen haben, die in einer unzureichenden Lageerfassung, in einer mangelhaften Situationsbewertung oder falschen Entscheidungen begründet sind [DNV-2011]. Das MVT-Projekt fokussierte sich folglich auf die Entwicklung von Methoden, mit denen die Prozesse Situationserfassung und Situationsbewertung zuverlässiger und störfester umgesetzt werden können.

## 2. HERAUSFORDERUNGEN UND FORSCHUNGSFELDER

### 2.1 Sicherheit und seine Facetten

Sicherheit im Kontext des maritimen Verkehrsmanagements reflektiert den Wunsch nach einer gefahrenfreien Realisierung aller maritimen Transportprozesse bzw. nach einem gefahrenfreien Zustand im gesamten Verkehrssystem. Die IMO führt auf ihrer Internetseite aus, dass der beste Weg zur Verbesserung der Sicherheit auf See über die Entwicklung international gültiger Vorschriften und ihrer Umsetzung geht. Das erfolgreiche Vermeiden von Kollisionen und Grundberührungen wird in diesem Kontext mit erreichter Sicherheit auf See gleichgesetzt.



Abb. 2: Sinken der M/S "Explorer" im Jahr 2007

Das Sinken der Titanic am 14. April 1912 nach einer Kollision mit einem Eisberg war die treibende Kraft, um die 1. Version des wohl bekanntesten Regelwerkes im maritimen Bereich zu entwickeln: dem Internationalen Übereinkommen zum Schutz des menschlichen Lebens auf See (SOLAS: International Convention for the Safety of Life at Sea). In den letzten 100 Jahren wurde die SOLAS-Konvention weiterentwickelt, indem viele Lehren aus der täglichen Berufspraxis sowie aus aufgetretenen Unfällen gezogen und in regulative, administrative und technische Vorschriften umgesetzt wurden. Die gegenwärtig gültige SOLAS-Konvention setzt sich aus 12 Kapiteln zusammen, die sich unter anderem mit Schiffskonstruktion, Feuerschutz, lebensrettenden Geräten, funkbasierter Kommunikation und Sicherheitsmaßnahmen für spezielle Schiffe (z.B. Gas- und Öltanker, nuklear angetriebene Schiffe,

Hochgeschwindigkeitsschiffe) auseinandersetzen. Die zunehmende Gefährdung durch kriminelle und terroristische Aktivitäten führte dazu, dass auch spezielle Maßnahmen für den verbesserten Schutz (engl. Security) des maritimen Verkehrssystems in SOLAS vereinbart werden mussten.

Das MVT-Projekt wurde inhaltlich ausschließlich auf die Betriebssicherheit (engl. safety) des maritimen Verkehrssystems fokussiert. Besondere Aufmerksamkeit wurde auf Sensoren, Daten und Methoden gelegt, mit denen Lageerfassung und Situationsbewertung bei der Schiffsführung umgesetzt wird. Deshalb widmete sich das Projekt primär den folgenden drei Themengruppen: der maritimen Nutzung von globalen Funknavigationssystemen, dem maritimen Positions-, Navigations- und Zeitsystem (PNT) sowie der Lageerfassung im Verkehrsraum unter Verwendung des Automatischen Identifikationssystems (AIS) und bordseitiger Radarsysteme. Auf ihrer Grundlage ist es in Kopplung mit weiteren Informationen (z.B. nautischen Karten) möglich, Kollisionen und Grundberührungen zu vermeiden.

### 2.2 Strategische Maßnahmen und die Definition von Anforderungen

Auf seiner 81-ten Session beschloss das Maritime Safety Committee (MSC) der IMO, ein Arbeitsprogramm – die sogenannte „e-navigation“-Strategie – für die weitere Verbesserung des maritimen Verkehrssystems zu entwickeln. „E-navigation“ wurde in diesem Kontext als das abgestimmte Sammeln, Integrieren, Austauschen, Darstellen und Analysieren von maritimen Informationen – sowohl bord- als auch landseitig – unter Verwendung von elektronischen Geräten definiert. Ziel des Arbeitsprogramms ist es, die Schiffsnavigation von Kai- zu Kaikante und dafür notwendige Dienste weiterzuentwickeln, um die Sicherheit auf See zu gewährleisten und den maritimen Lebensraum weiterhin schützen zu können [Nav54-2006].

Es wurde vereinbart, dass „e-navigation“ nicht als ein Forschungsprogramm interpretiert werden darf. Aus diesem Grund wurde die Entwicklung der „e-navigation“-Strategie mit einer Nutzerbefragung begonnen. Im Folgeschritt wurde das gegenwärtige Verkehrssystem umfassend analysiert, um Defizite im System in Bezug auf die identifizierten Nutzerbedürfnisse zu detektieren. In diesen Rahmen wurde eine Vielfalt von Lücken identifiziert und ambitionierte Entwicklungsziele formuliert, die als eine hinreichende Motivation für Forschungs- und

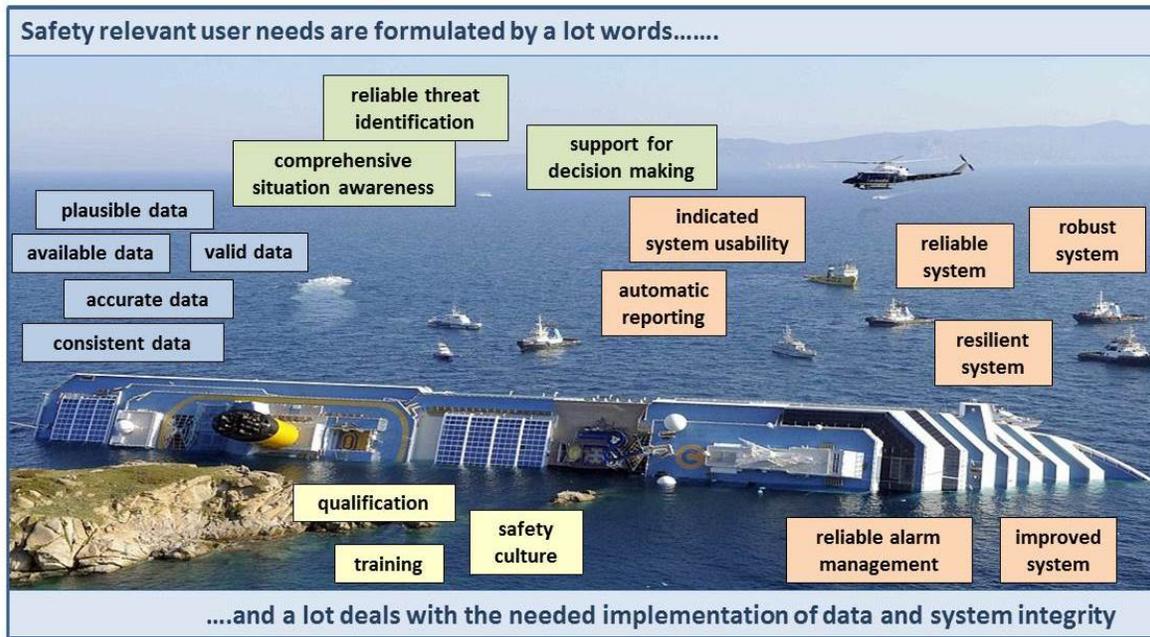


Abb. 3: Verbale Formulierung bestehender Nutzeranforderung (Auswahl)

Entwicklungsaktivitäten in diesem Gebiet betrachtet werden können. Vom technischen Gesichtspunkt aus ist es nachteilig, dass bis heute die meisten Anforderungen rein durch verbale Aussagen und nicht in messbarer Form angegeben werden. Dies gilt auch für Anforderungen, die sich auf die Verbesserung der Sicherheit fokussieren (siehe Abb. 3). Anforderungen wie Implementierung von Daten- und System-integrität, der Einsatz von automatisierten Funktionen zur Berichterstattung sowie die Anwendung von smarten Analysefunktionen zur Unterstützung der bordseitigen Entscheidungsfindung gehören zu den 8 wichtigsten Nutzeranforderungen von „e-navigation“.

Primäre Anforderungen an sicherheitskritische Systeme werden durch die Zuverlässigkeit, die Integrität und die Störfestigkeit des Systembetriebs beschrieben. Diese sind wie folgt definiert:

- **Zuverlässigkeit** ist die Fähigkeit eines Systems, die geforderten Aufgaben unter bestimmten Randbedingungen für eine vorgegebene Zeit auszuführen. Folglich wird die Zuverlässigkeit als Wahrscheinlichkeit gemessen, dass ein verfügbares System seine Funktionen unter bestimmten Bedingungen für eine spezifizizierte Zeit fehlerfrei umsetzt. In informationstechnischen System ist eine spezifikationsgerechte Bereitstellung von Daten ein geeignetes Maß für eine erreichte Systemzuverlässigkeit.

Um den gewünschten oder erreichten Grad an Zuverlässigkeit bewerten zu können, muss Klarheit darüber bestehen, welche Funktionen, welche Daten, welche Leistungsmerkmale und welche Randbedingungen bei der Bewertung letztlich zu berücksichtigen sind. Damit wird einerseits entschieden, welche Fehlerquellen erkannt und kompensiert werden müssen. Andererseits wird festgelegt, ob sich die Systemzuverlässigkeit auch auf Integritätsüberwachungsfunktionen beziehen soll oder nicht.

- **Integrität** ist die Fähigkeit eines Systems, den Nutzer über die augenblickliche Verwendbarkeit des Systems (Systemintegrität) oder bereitgestellter Daten (Datenintegrität) zu informieren. Folglich muss das System mit zusätzlichen Funktionen ausgestattet sein, die eine Integritätsüberwachung system- bzw. datenbezogen durchführen und letztlich abschätzen, ob gestellte Leistungsmerkmale an Funktionen oder Daten eingehalten werden konnten oder nicht.

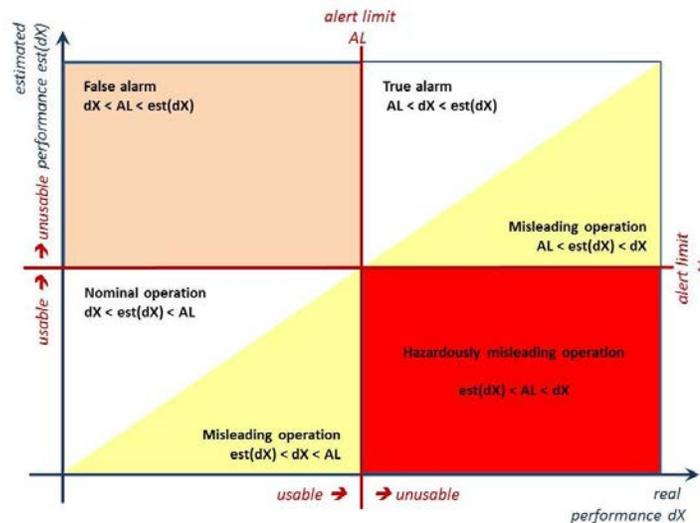
Kohärente Integritätsaussagen können nur erzielt werden, wenn die für die Integritätsüberwachung genutzten Methoden, Schwellwerte und Entscheidungskriterien eindeutig spezifiziert sind. Insbesondere für sicherheitskritische Systeme ist es wichtig, dass eine möglichst realitätsnahe Abschätzung der Integrität erreicht wird. In der Regel erfordert das den Einsatz von höherwertigen Integritätsüberwachungsmethoden. Deren Einsatz wird nur dann möglich, wenn ein bestimmtes Niveau an systeminterner Redundanz abgesichert werden kann.

Unabhängig vom Integritätsmonitoringverfahren muss erwartet werden, dass verbleibende Restunsicherheiten im Schätzverfahren dazu führen können, dass die in Echtzeit erfolgte Abschätzung der Performanz (estimated) von ihrem wahren Wert (real) abweicht (Abb. 4). Der Alarmpegel stellt den anwendungs-spezifischen Grenzwert dar, anhand dessen zwischen Nutzbarkeit und Nichtnutzbarkeit eines Systems oder von Daten unterschieden wird. Der Alarmpegel kann ein einzelner Schwellwert (z.B. eine Genauigkeitsanforderung) sein oder ein Endergebnis, dass sich aus der logischen Auswertung vieler Einzeltests ergibt. Letztlich bestimmt die spezifische Anwendung, wie der Alarmpegel festzulegen ist. Im Idealfall gelingt es der Integritätsüberwachung, ein nutzbares System als nutzbar bzw. ein nicht nutzbares System als nicht nutzbar zu kennzeichnen. Probleme entstehen, wenn Schätzwert und Realwert der Performanz zu unterschiedlichen Einschätzungen hinsichtlich der aktuellen Nutzbarkeit führen. Werden nutzbare Systeme bzw. Daten als nicht nutzbar eingestuft, so liegt ein Fehlalarm vor, der sich negativ auf die System- bzw. Datenverfügbarkeit auswirkt. Kritischer ist, wenn ein nicht nutzbares System als nutzbar eingestuft wird und damit die Gefahrenerkennung und Gefahrenabwendung nicht mehr abgesichert werden kann.

- **Störfestigkeit** ist die Fähigkeit eines Systems, externe und interne Störungen, Fehlfunktionen und Ausfälle in Teilen des Systems detektieren und kompensieren zu können. Dies sollte ohne Einschränkung der Funktionalität oder Verluste bei der Datenbereitstellung und vorzugsweise ohne Verschlechterung der Performanz erfolgen.

Systeminterne Integritätsüberwachungsfunktionen sind erforderlich, um Störungen, Fehlfunktionen und Ausfälle in Teilen des Systems detektieren zu können. Die Analyseergebnisse werden dann für die Systemsteuerung genutzt, um zwischen alternativ anwendbaren Verfahren bzw. zwischen redundanten Zwischen- und Endergebnissen umschalten zu können. Welche Fehler letztlich erkannt und kompensiert werden müssen, hängt von der geforderten Systemperformanz ab. Der Bedarf an systeminterner Redundanz steigt im Vergleich zu Systemen mit Eigenüberwachung weiter, weil zusätzlich zur Fehlererkennung eine Fehlerkompensation durchgeführt werden muss.

Die vorherigen Ausführungen verdeutlichen die Notwendigkeit, dass die Nutzeranforderungen in technische und messbare Leistungskenngrößen transferiert werden müssen. Erst damit wird es möglich, geeignete Technologien zu identifizieren, mit denen die geforderten Systemfunktionen unter Berücksichtigung von benötigten Leistungsklassen realisiert werden können. Darauf aufbauend können die Systemarchitektur wie auch interne und externe Schnittstellen im Detail designt werden.



**Abb. 4: Stanford-Diagramm zur Gegenüberstellung von geschätzter und realer Performanz von dX**

### 2.3 Abgeleitete Forschungs- und Entwicklungsbereiche

Wie bereits ausgeführt, stellt die zuverlässige Bereitstellung von navigationsrelevanten Daten ein wesentliches Schlüsselement für die weitere Erhöhung der Sicherheit im Schiffsverkehr dar. Zum Projektbeginn wurden zunächst 2 komplementäre Studien durchgeführt. Zweck dieser Studien war zu klären, wie das gegenwärtige maritime Verkehrssystem die Zuverlässigkeit von Daten und Komponenten bewertet und managt.

Die erste Studie folgte dem „bottom-up“-Ansatz und analysierte, welche der genutzten Sensoren, Teilsysteme und Dienste bereits in der Lage ist, seine eigenen Datenprodukte hinsichtlich Genauigkeit und Integrität zu bewerten. Für diesen Zweck wurde eine Vielzahl von zugeordneten IMO- und IALA-Dokumenten analysiert und interpretiert, um das Vorhandensein von Fehlermodellen und die Anwendung von Methoden zur Integritätsüberwachung untersuchen zu können. Die Ergebnisse führten zur Schlussfolgerung, dass bis heute für die meisten Komponenten des maritimen Verkehrssystems die Bestimmung von Daten- und Systemintegrität eine noch zu lösende Aufgabe ist. Die zweite Studie verwendete den „top-down“-Ansatz. Dieser fokussierte sich auf die Frage, welche Methoden durch die maritime Gemeinschaft genutzt werden, um den Sicherheitsstatus im maritimen Verkehrssystem zu analysieren und zu verbessern. In anderen Worten, es wurde das Vorhandensein eines übergeordneten Integritätskonzepts für das maritime Verkehrssystem hinterfragt. Ein geeigneter Ausgangspunkt für ein übergeordnetes Integritätskonzept ist die Spezifikation eines akzeptierbaren Restrisikos für das Auftreten von Unfällen unter normalen Betriebsbedingungen. Ein mathematisch parametrisiertes Modell ist notwendig, um herausfinden zu können, ob ein System in einem sicheren Zustand ist oder nicht. Der gesamte maritime Verkehr kann nur als sicher deklariert werden, wenn alle Verkehrsteilnehmer in einem sicheren Zustand sind. Die Sicherheit eines einzelnen Schiffes hängt u.a. von der Verkehrssituation, den Umgebungsbedingungen, dem Schiff und seinem gegenwärtigen Navigationsstatus ab. Ohne umfassende Systemmodellierung kann ein toleriertes Restrisiko nicht auf einzelne Komponenten verteilt und optimiert werden.

Obwohl beide Lösungsansätze für die Weiterentwicklung des maritimen Verkehrssystems einzeln oder in Kombination angewendet werden könnten, wird innerhalb der maritimen Nutzergemeinschaft der „bottom-up“-Ansatz bevorzugt, um eine zügige Verbesserung von Schlüsselementen des maritimen Verkehrssystems zu ermöglichen. Infolgedessen und unter Beachtung der verfügbaren Projektressourcen wurde entschieden, dass das MVT-Projekt ebenfalls dem „bottom-up“-Ansatz folgt.

Mit Hilfe der Studienergebnisse konnten anfängliche Projektideen konsolidiert und priorisiert werden. Ausgangspunkt dafür waren identifizierte Abweichungen zwischen der heutigen Praxis und bestehenden Nutzerbedürfnissen, für die im Folgeschritt erste Lösungsansätze zu deren Überwindung entwickelt werden mussten. Diese wurden aufbereitet und in Form von Informations- oder Konzeptpapieren zu verschiedenen IALA- und IMO-Sitzungen eingereicht [NAV/58/6/1-2012; NSCR1/9/2-2014]. Aus FuE-Sicht wurde das MVT-Projekt auf den Ausbau des maritimen Verkehrssystems und die schrittweise Einführung von Daten- und Systemintegrität in dedizierte Navigationsfunktionen fokussiert. Folglich veranschaulicht der gewählte Projektname „Maritime Verkehrstechnik: E-Navigation Integrität“ auch bereits die 3 wesentlichen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten:

#### (1) Integrität von Globalen Navigationssatellitensystemen (GNSS) und Ergänzungsdiensten

Die Störanfälligkeit von GNSS ist ein berechtigter Grund, um im Fall von sicherheitskritischen Anwendungen eine Integritätsüberwachung auf Signal-, Komponenten- wie auch Serviceebene zu fordern. Folglich wurde der Fokus der Forschung auf die Entwicklung und experimentelle Validierung von Methoden gelegt, die zur Integritätsüberwachung von GNSS in der System- und Servicedomäne unter Beachtung maritimer Leistungsanforderungen dienen. In Ergänzung dazu wurden geeignete Lösungsansätze gesucht, um eine abgestimmte Verwendung von Integritätsinformation zu erreichen und um weiterführend einen störfesten Betrieb von GNSS-Komponenten und Anwendungen durch Einsatz integritätsbasierter Steuerfunktionen zu gewährleisten.

#### (2) Multisensorbasierte Unit zur bordseitigen Bestimmung von Positions-, Navigations- und Zeitdaten (PNT-Unit)

Eine integrierte Nutzung aller PNT-relevanten Messungen, die durch eine Vielzahl von unabhängig arbeitenden Bordsensoren bereitgestellt werden, schafft die benötigte Redundanz in der Datenbasis, um eine leistungsfähige Integritätsüberwachung des bordseitigen PNT-System und erzeugter PNT-Daten zu ermöglichen. Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten fokussierten sich auf die Entwicklung und experimentelle Erprobung von Datenfusionserfahren bis hin zu ihrer alternativen und komplementären Nutzung im Rahmen einer PNT-Unit. Ziel war es, auf Basis des Multisensoransatzes und erster Integritätsfunktionalitäten zu demonstrieren, dass damit eine möglichst zuverlässige Abschätzung des Fehlers verschiedenster navigationsrelevanter Parameter erreicht werden kann.

### (3) Überwachung und Bewertung der Verkehrslage

Eine umfassende Erfassung der Verkehrslage ist dann erreicht, wenn die Position und Bewegung aller Verkehrsteilnehmer mit der erforderlichen Genauigkeit und Zuverlässigkeit bekannt ist. Inwieweit einzelne Technologien (z.B. RADAR oder AIS) heutzutage in der Lage sind, eine vollständige Beschreibung der Verkehrslage zu ermöglichen, war Untersuchungsgegenstand sich ergänzender Studien. Dafür war es notwendig, verschiedene Prüfmethode zu entwickeln, die z.B. die Plausibilität von AIS-Nachrichten überprüfen oder AIS- und RADAR-Objekte zur Validierung ihrer Positionsgenauigkeit assoziieren. Die kombinierte Nutzung von AIS- und RADAR-Daten wird als erfolgsversprechender Lösungsansatz betrachtet, um eine umfassende und zuverlässige Bereitstellung von Verkehrslagebildern zu erreichen. Folglich wurden die im MVT-Projekt geplanten Forschungsaktivitäten auf die Entwicklung geeigneter Datenfusionsmethoden und ihre experimentelle Verifikation im Forschungshafen Rostock ausgerichtet.

## 3. PNT- SYSTEMKONZEPT

### 3.1 Status und Herausforderungen

Die zuverlässige und störteste Bereitstellung von PNT-Daten ist ein Ziel, das durch die IMO priorisiert wurde und als Motivation für die Weiterentwicklung des maritimen Verkehrssystems dient. Um Kollisionen und Grundberührungen vermeiden zu können, ist eine zuverlässige Kenntnis der Position und Bewegung des eigenen Schiffes in Relation zu anderen Verkehrsteilnehmern und dem verfügbaren Verkehrsraum erforderlich. Das erklärt die sicherheitskritische Bedeutung einer zuverlässigen PNT-Datenbereitstellung.

AIS, ECDIS (Electronic Chart Display and Information System) oder INS (Integrated Navigation System) sind Systeme, in denen PNT-Daten zur Lageerfassung, Situationsdarstellung und -bewertung genutzt werden. Die Effektivität dieser navigationsrelevanten Aufgaben hängt davon ab, ob die genutzte Datenbasis die notwendigen Leistungsanforderungen (z.B. Vollständigkeit, Aktualität, Genauigkeit) erfüllt. Bedauerlicherweise sind bis heute für die meisten PNT-Daten die Zuverlässigkeits- und Integritätsanforderungen, die aus der Vielfalt von nautischen Aufgaben und Verkehrsgebieten resultieren, nicht spezifiziert. Eine konsolidierte Spezifikation benötigter PNT-Daten und ihrer Qualität sind jedoch Voraussetzung, um technische Defizite im gegenwärtigen PNT-System eindeutig identifizieren und überwinden zu können.

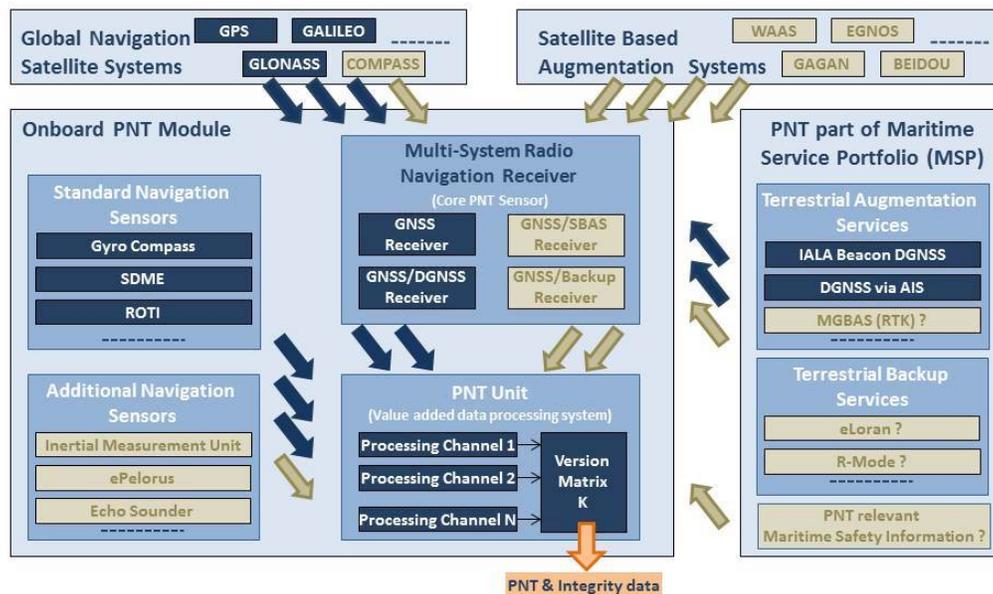
Die durchgeführten „top-down“- und „bottom-up“-Studien dienten zur Klärung, wie im heutigen PNT-System die Zuverlässigkeit system- und ergebnisbezogen bewertet, angezeigt und verwaltet wird. Es zeigte sich, dass gegenwärtig nur für folgende PNT-Komponenten eine Integritätsüberwachung vorgesehen ist:

- Es existiert die Empfehlung, dass GNSS-Empfänger RAIM-Verfahren (Receiver Autonomous Integrity Monitoring) anwenden sollen, um die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Positionsbestimmung zu verbessern.
- Integrierte Navigationssysteme müssen die Zuverlässigkeit genutzter Sensoren und Datenquellen mit Hilfe von Plausibilitäts- und Konsistenztests bewerten. Für diesen Zweck ist eine redundante Sensorausstattung vorgesehen.
- Das IALA Beacon DGNS wurde als maritimer GPS-Ergänzungsdienst in den 90-er Jahren entwickelt, um Genauigkeits- und Integritätsanforderung für eine Positionsbestimmung in Küstenbereichen zu erreichen. Der

Service stellt Rangekorrekturen wie auch Flags zur Verfügung, die die aktuelle Verwendbarkeit von einzelnen GNSS-Signalen und bereitgestellten Ergänzungsdaten anzeigen.

Eine Weiterentwicklung des maritimen PNT-Systems ist jedoch erforderlich, um Nutzeranforderungen wie "Verbesserung der Zuverlässigkeit", "Anzeige der Zuverlässigkeit" und "Verbessertes Alarmmanagement" für alle PNT-Daten zu erreichen. Die Schere zwischen Technologien, die für die maritime Nutzung standardisiert sind, und kommerziell verfügbaren Technologien ist so immens geworden, dass eine koordinierte Ausnutzung des gegenwärtigen Stands der Technik die Sicherheit im maritimen Verkehrssystem deutlich erhöhen könnte. Das wird sichtbar, wenn man die genutzten und die nutzbaren PNT-Komponenten in Abb. 5 betrachtet.

Im Allgemeinen beruht die bordseitige PNT-Datenbereitstellung auf der kombinierten Nutzung von GNSS, PNT-relevanten terrestrischen Diensten und schiffseitigen Sensoren. Kernelement des bordseitigen PNT-Systems sind GNSS-Empfänger, die die Positions-, Geschwindigkeits- und Zeitinformationen (PVT) aus den GNSS-Entfernungsmessungen berechnen. In Küstengebieten, wo Dienste wie IALA Beacon DGNS und AIS DGNS zusätzlich codebasierte Korrektur- und Integritätsdaten bereitstellen, können höhere PVT-Genauigkeiten erreicht und erste Integritätsaussagen bezüglich genutzter GNSS-Signale und bereitgestellter Services genutzt werden. Obwohl Satellite Based Augmentation Systems (SBAS) bereits operationell in Europa und Amerika genutzt werden



**Abb. 5: Überblick über PNT-Komponenten (dunkelblau: standardisiert/genutzt, beige: nutzbar)**

können, ist ihre Anerkennung als maritimer PNT-Service bis heute noch offen. Es ist aber unbestritten, dass SBAS den Versorgungsbereich von codebasierten DGNS vergrößern und die Verfügbarkeit von Integritätsinformationen verbessern kann.

Dem Gedanken von "e-navigation" folgend, sollten PNT-Daten derart bereitgestellt werden, dass Leistungsanforderung für alle Operationsgebiete (z.B. Ozean, Küste, Häfen, Binnenwasserstraßen) und nautischen Aufgaben (z.B. automatisches Anlegen, Manöverüberwachung) erreicht werden, wann und wo es notwendig ist. Folglich muss die Architektur des maritimen PNT-Systems auch Ergänzungsdienste beinhalten, um zu ermöglichen, dass Anforderungen an die Hafennavigation und ein automatisches Anlegen erfüllt werden können. Gegenwärtig wird die Störanfälligkeit von GNSS als ein ausreichender Grund angesehen, um den Aufbau zusätzlicher terrestrischer Funknavigationssdienste (e.g. eLORAN oder R-Mode) zu fördern, die die Störfestigkeit der PVT-Datenbereitstellung verbessern. Ob durch Bereitstellung von PNT-relevanten Sicherheitsinformationen die Zuverlässigkeit der bordseitigen PNT-Datenbestimmung erhöht werden könnte, ist ein weiterer Untersuchungsgegenstand.

Eine störfeste Bereitstellung von PNT-Daten ist eine höherwertige Herausforderung, weil PNT-Daten einerseits die PVT-Daten und andererseits weitere Navigationsdaten (n) umfassen, die die aktuelle Bewegung und Lage des Schiffes beschreiben (z.B. Heading, Rate of Turn, Rollwinkel). Für das sichere Passieren von Schleusen, Brücken, Engstellen oder verkehrsreichen Seewegen ist es erforderlich, dass der geforderte Sicherheitsabstand zwischen der Hüllkurve des Schiffes und Hindernissen bestimmt, bewertet und überwacht werden kann. Für diesen Zweck müssen die Lage und die dreidimensionale Bewegung der Schiffe zuverlässig bestimmt sein. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, dass die Genauigkeit und Integrität von Navigationsdaten wie auch der Betrieb von Bordsensoren wie z.B. Speed and Distance Measurement Equipment (SDME), Rate of Turn Indicators (ROTI), oder Gyros zu überwachen ist.

### 3.2 Definitionsrahmen für das maritime PNT-System

Das IKN entwickelte eine vorläufige Definition des maritimen PNT-Systems, die innerhalb der PNT-Arbeitsgruppe des IALA e-navigation Komitees im Juni 2011 konsolidiert wurde (Tabelle 1).

Diese Definition reflektiert die Nutzeranforderung, dass alle navigationsrelevanten Daten und Systeme hinsichtlich ihrer Integrität überwacht werden sollen. Jedoch beantwortet diese Definition nicht, welche Leistungsanforderungen zu erfüllen sind und welche Dienste und Komponenten dafür notwendig sind. Um eine schrittweise Realisierung, Konsolidierung und Implementierung benötigter Komponenten in existierende Strukturen zu erreichen, wird eine Skalierbarkeit von Datenprodukten, Anforderungen, Sensoren und Diensten verfolgt, die sich auf zu unterstützende PNT-Prozessierungskanäle abbilden lässt.

**Tabelle 1: Definition des integrierten PNT-Systems**

The "Integrated PNT System" specifies the required overlay of satellite based, ashore, and aboard components, whose integrated use ensure the accurate and reliable provision of ships' position, navigation, and time (PNT) data and assigned integrity data (PNT system and data integrity) to applications during all phases of vessel navigation in a timely, complete and unambiguous manner. The "Integrated PNT System" monitors the current HW and SW configuration in use as well as the complete PNT output data to generate PNT relevant alerts and to provide PNT status messages (reporting) in a timely, complete and unambiguous manner.

Ein integriertes PNT-System sollte mindestens in der Lage sein, die primären PNT-Daten (siehe Tabelle 2) bereitzustellen. Der Tiefgang eines Schiffes (Kielfreiheit = under keel clearance) ist ebenfalls für eine sichere Schiffsnavigation relevant. Solche Daten werden jedoch durch nautische Anwendungsfunktionen abgeleitet, indem PNT-Daten mit anderen Daten wie Tidenhub und elektronische Seekarten kombiniert verarbeitet werden.

**Tabelle 2: Primäre PNT-Daten**

Position data are latitude, longitude, and altitude of ship's Consistent Common Reference Point given in a global coordinate system such as WGS84.  
Primary navigation data serves the horizontal description of ship's attitude and movement and cover SOG, STW, ROT, Heading and COG.  
Secondary navigation data aims the three-dimensional description of ship's attitude and movement. Therefore yaw, pitch, and roll angles as well as their rates should complete the navigation data set.  
Time data describes the current time and date in a common time system, e.g. UTC.

Ziel der Integritätsüberwachung ist die Bewertung, ob Systeme und Daten die gestellten Leistungsanforderungen augenblicklich erfüllen oder nicht. Anhand welcher Kriterien letztlich entschieden wird, ob Daten- oder Systemintegrität erreicht wurde oder nicht, muss in Performanzstandards verbindlich spezifiziert sein. PNT-relevante Integritätsdaten (Tabelle 3) dienen letztlich dazu, dem Nutzer das Ergebnis der Integritätsbewertung zu vermitteln. Das Ergebnis kann ein Flag sein, das anzeigt, ob aktuell die Anforderungen erreicht werden konnten oder nicht. Alternativ können Parameter bereitgestellt werden, die die aktuellen Eigenschaften beschreiben, anhand derer Nutzer oder die Anwendungen über die Verwendbarkeit selbst entscheiden können.

**Tabelle 3: PNT-relevante Ergänzungsdaten**

Integrity of each PNT data describing either the estimated accuracy of provided PNT data or indicating the fulfillment of momentary accuracy requirements, if they are available;  
 Integrity of current used Integrated PNT System describing either the usability of the PNT data products in a scalable manner or the fulfillment of all current requirements, if they are available;  
 Alerts announcing abnormal situations and conditions of the current used Integrated PNT System requiring attention, decisions or caution in the frame of ship navigation;  
 Status messages describing the current HW and SW configuration in use (or their change) for automatic reporting and certification purposes.

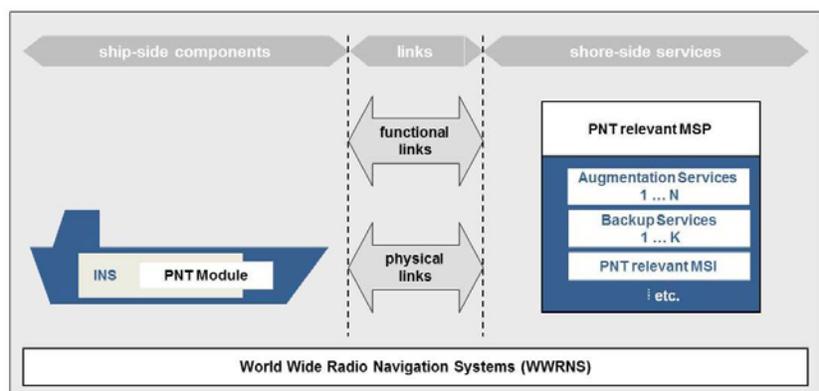
Ein Nebenprodukt der Systemüberwachung sind sogenannte Statusinformationen, die z.B. die augenblicklich genutzte Hard- und Softwarekonfiguration (oder Änderungen) für die automatische Erstellung von Berichten oder Zertifizierungsprozeduren beschreiben. Alarme werden jedoch nur verwendet, um abnormale Situationen und Bedingungen im augenblicklich genutzten System anzuzeigen, die im Rahmen der Schiffsnavigation besondere Beachtung, Entscheidungen oder Aufmerksamkeit erfordern. Alarme werden auch aus Integritätsdaten generiert, wenn die detektierte Nichtnutzbarkeit von Daten bzw. Systemen sicherheitskritische Konsequenzen nach sich zieht.

### 3.3 Generische Architektur des PNT-Systems

Der Definition folgend (Tabelle 1) baut sich das maritime PNT-System aus terrestrischen PNT-Diensten und dem schiffseitigen PNT-Modul auf, wobei beide weltweit verfügbare Funknavigationssysteme (WWRNS) wie GNSS als raumfahrtbasierte Infrastrukturen nutzen. Die generische Architektur des PNT-System ist in Abb. 6 dargestellt.

Prinzipiell können landseitige PNT-Dienste zur Umsetzung folgender Aufgaben dienen:

- Bereitstellung von GNSS-Ergänzungsinformationen, die Korrektur-, Referenz- bis hin zu Integritätsdaten umfassen können, mit denen nutzerseitig die Zuverlässigkeit und/oder Genauigkeit von GNSS-basierter PVT-Bestimmung verbessert werden kann;
- Übertragung von terrestrischen Funknavigationssignalen als Backup zu GNSS, um eine PVT-Bestimmung auch im Fall von gestörten GNSS zu ermöglichen; und



**Abb. 6: Generische Architektur des maritimen PNT-Systems**

- Bereitstellung von PNT-relevanten, maritimen Sicherheitsinformationen (PSI), mit denen das geforderte Serviceniveau gekennzeichnet, Tidendaten bereitgestellt, oder dass derzeit nutzbare, maritime PNT-System charakterisiert und gesteuert wird.

Um die Nutzeranforderung an eine Integritätsüberwachung zu erfüllen, muss jeder Service mit Funktionen ausgestattet sein, die eine Eigenüberwachung des Dienstes ermöglichen. In Systemen, die mit verteilten Komponenten arbeiten, sind systeminterne und externe Interfaces vorzusehen, über die der koordinierte Austausch von Integritätsdaten erfolgen kann.

GNSS-Ergänzungssysteme werden bis heute im maritimen Bereich genutzt, um die Genauigkeits- und Integritätsanforderungen für Küstenbereiche mit dem GNSS der ersten Generation (GPS L1 und/oder GLONASS L1) zu erreichen [IALA-R121-2004]. Durch Modernisierung und Ausbau der Satellitennavigationssysteme können zukünftig multisystem- und multifrequenzbasierte Methoden angewendet werden, die die erhöhte Redundanz in der Datenbasis für die Eigenüberwachung der Integrität und die Verbesserung der PVT-Bestimmung ausnutzen. Folglich wurde auch die zukünftige Rolle von GNSS-Ergänzungsdiensten hinterfragt. (siehe Kapitel 5).

Der PNT-Modul ist das Frontend des maritimen PNT-Systems zu Anwendungen wie AIS, ECDIS oder INS. Er repräsentiert das schiffseitige Overlay an Sensoren und Geräten, die für die Bereitstellung von PNT-Daten benötigt werden. Erhöhte Anforderungen an die Genauigkeit und Integrität von PNT-Daten implizieren einerseits strengere Ausrüstungspflichten. Andererseits kann eine verbesserte Bewertung der PNT-Datenqualität nur erreicht werden, wenn in der Zukunft datenfusionsbasierte Methoden zum Einsatz kommen. Dieser Idee folgend, wurde im MVT Projekt ein integriertes Prozessierungstool entwickelt, die sogenannte „PNT-Unit“. Das dafür entwickelte Konzept wird im folgenden Abschnitt erläutert. Die Umsetzung und Validierung eines ersten Prototyps einer PNT-Unit V1 wird in Kapitel 6 beschrieben.

### 3.4 Konzept der PNT-Unit

Der schiffsseitige Teil des PNT-Systems setzt sich aus 2 komplementären Ebenen zusammen:

- (1) Die Sensorebene stellt das Set an Sensoren dar, die durch Standards für die maritime PNT-Datenbereitstellung zugelassen sind oder zugelassen werden sollten.
- (2) Die Verarbeitungsebene umfasst die eingesetzten Methoden, mit denen die PNT-Daten und gegebenenfalls ihre Integrität bestimmt werden.

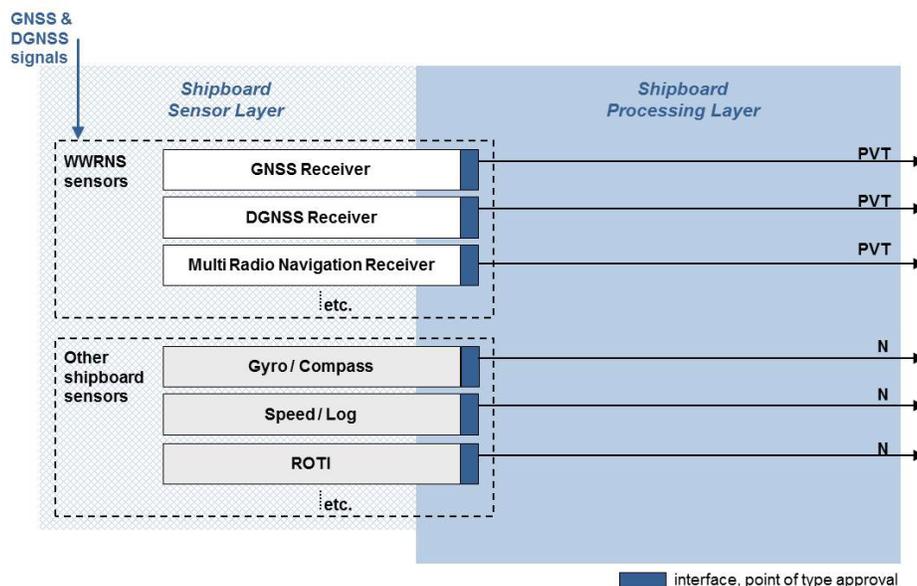
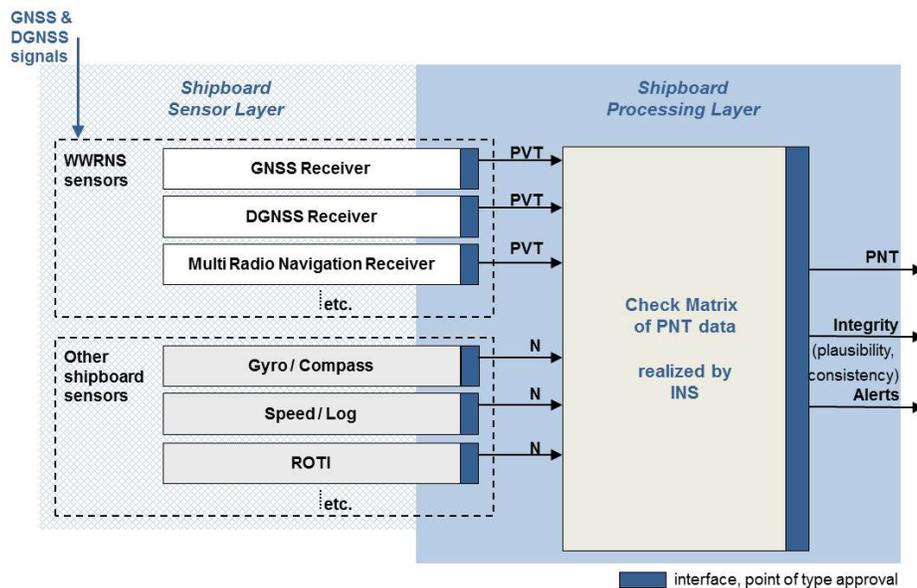


Abb. 7: Klassische Realisierung des schiffsseitigen PNT-Moduls (PVT=position, velocity, and time; N=navigation)

Das entwickelte Konzept der PNT-Unit liefert einen skalierbaren Lösungsansatz, um den Übergang vom gegenwärtig genutzten PNT-System zu einem störfesten PNT-System schrittweise zu realisieren.

Die klassische Realisierung des schiffseitigen PNT-Moduls ist in Abb. 7 dargestellt. Einzelne Sensoren sind für die Bereitstellung spezifischer PNT-Daten verantwortlich z.B. die WWRNS-Sensoren für die PVT-Daten und die anderen schiffsseitigen Sensoren für die Navigationsdaten. Die PNT-relevante Datenverarbeitungsebene ist Bestandteil der einzelnen Sensoren und repräsentiert die sensorinternen Methoden, die zur Bestimmung der PVT- bzw. N-Daten genutzt werden. Die Verwendung von GNSS-Ergänzungsdiensten wird durch die WWRNS-Sensoren selbst organisiert und basiert auf integrierten oder angeschlossenen Kommunikationsgeräten. Durch die unzureichende Redundanz innerhalb einzelner Sensoren und der nicht unterstützten Verwertung von multisensor-basierter Redundanz ist das klassische PNT-Modul nicht in der Lage, eine Verbesserung und Indikation der Zuverlässigkeit aller PNT-Daten zu erreichen.

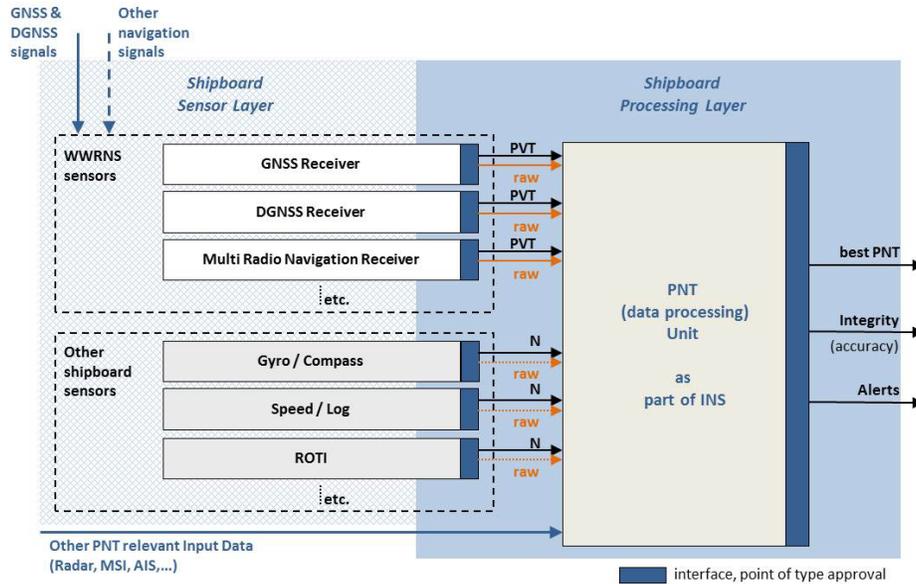


**Abb. 8: INS-basierte Realisierung des PNT-Moduls**

Der INS-basierte PNT-Modul (Abb. 8) unterstützt die Anwendung einer zusätzlichen Datenverarbeitungsfunktion, die die PVT- und N-Daten der WWRNS-Sensoren und anderer baumustergeprüften Sensoren kombiniert, um die Integrität genutzter Sensoren und bereitgestellter Daten bewerten zu können. Als Prüfmatrix von PNT-Daten werden verschiedene Plausibilitäts- und Konsistenztests durchgeführt. Jedoch sind diese Tests immer noch ungeeignet, die aktuell erreichte Genauigkeit aller PNT-Daten abzuschätzen.

Eine Weiterentwicklung des INS-basierten PNT-Moduls stellt daher die PNT-Unit dar (Abb. 9), die auf der integrierten Nutzung von Datenprodukten und Rohdaten verschiedenster GNSS-Empfänger und bordseitiger Sensoren beruht. Dadurch können leistungsfähige Datenfusionsmethoden verwendet werden, die die Redundanz auf Rohdatenebene ausnutzen, um die Qualität bereitgestellter PNT-Daten zu verbessern und zu überwachen.

Die Nutzung von PNT-relevanten Ergänzungsdaten, die von verschiedenen landseitigen Diensten bereitgestellt werden, das Erschließen zusätzlicher Datenquellen (z.B. ePelorus, Racon, Multifunknavigationsempfänger), und die zukünftige Anwendung von PNT-relevanten maritimen Sicherheitsinformationen werden durch diesen Ansatz unterstützt. Durch Implementierung geeigneter Integritätsüberwachungsfunktionen kann die PNT-Unit qualifiziert werden, die besten PNT-Daten auszuliefern sowie deren Genauigkeit und Integrität anzuzeigen.



**Abb. 9: PNT-Unit für eine genauigkeitsbezogene Integritätsüberwachung des bordseitigen PNT-Moduls**

Die PNT-Unit selbst baut sich aus einem Set von parallelen Prozessierungskanälen auf. Ein einzelner Kanal realisiert ein Verfahren, mit dem die PNT-Unit eine Bestimmung der PNT-Daten und gegebenenfalls Integritätsdaten realisiert. Nur im Fall, dass die für das Verfahren benötigte Datenbasis (Sensorik, Dienste, andere Datenquelle) in Umfang und Qualität auch verfügbar ist, kann erwartet werden, dass das Verfahren auch spezifikationsgerecht arbeiten kann. Für jede gewünschte Performanzklasse muss mindestens ein geeigneter Prozessierungskanal bereitgestellt werden. Jedes Verfahren ist mehr oder minder stör anfällig gegenüber bestimmten Fehlerquellen. Um signifikante Fehlerquellen in Echtzeit erkennen und kompensieren zu können, ist eine redundante Verarbeitung von Daten möglichst unabhängiger Datenquellen und der Einsatz geeigneter Integritätsmonitoringverfahren erforderlich. Dafür ist eine teilweise oder vollständige Parallelisierung von Prozessierungskanälen notwendig, um die angestrebte Störfestigkeit der PNT-Datenbereitstellung zu erreichen.

Ohne messbare Leistungsanforderungen an die PNT-Datenbereitstellung kann weder das erreichte noch das angestrebte Niveau an Zuverlässigkeit und Störfestigkeit evaluiert werden. Dies kompliziert bis heute die technische Detailierung des maritimen PNT-Systems u.a. in Bezug auf Architektur, Interfaces, Methoden, und Verantwortlichkeiten. Jedoch ist das Konzept der PNT-Unit geeignet, schrittweise eine mehrdimensionale Harmonisierung in Richtung stör fester PNT-Datenbereitstellung voranzutreiben. Dies wird getan in Bezug auf:

- die Auswahl zu unterstützender und anzuwendender Verfahren pro geforderter Genauigkeitsklasse für die PNT-Datenbereitstellung;
- die Harmonisierung von Bewertungsmethoden pro gewünschten Integritätsniveau unter Beachtung derzeitig und zukünftig genutzter PNT-Prozessierungskanäle;
- die umfassende und eindeutige Spezifikation von Dateninhalten und Datenformaten für die Bereitstellung von PNT- und Integritätsdaten; und
- die Harmonisierung und Reduzierung von PNT-bezogenen Alarmen unter Beachtung aktueller Leistungsanforderungen (Servicegebiete, prioritäre Navigationsaufgaben).

## 4. ENTWICKLUNGS-, TEST- UND DEMONSTRATIONSPLATTFORM

### 4.1 Status und Herausforderungen

Ein Kernaspekt der drei Forschungs- und Entwicklungslinien des Projekts ist das Zusammenführen von Informationen diverser Quellen, um eine gemeinsame Bewertung (Integrität) und Verbesserung der Systemleistungsfähigkeit (Zuverlässigkeit, Störfestigkeit) zu erreichen. Datenfusionsbasierte Verfahren werden heutzutage nur punktuell auf den Schiffen eingesetzt. Es gibt eine Reihe von Sensoren und weiteren Informationsquellen an Bord, deren Informationen meist direkt und oftmals unbewertet dem Schiffsführer zur Verfügung gestellt werden.

Das Projekt hatte sich die Aufgabe gestellt, durch kombinierte Nutzung aller bordseitig verfügbaren Datenquellen (z.B. an Bord von Schiffen existierender Sensorik, verfügbare landbasierte Ergänzungsdienste) dem Schiffsführer navigationsrelevante und auch integritätsbewertete Daten bereitzustellen. Für die Umsetzung dieser Aufgabe ist eine geeignete Datenakquise und -bereitstellung erforderlich, die Thema dieses Kapitels ist. Die durch Algorithmen getriebene Datenverarbeitung wird in den drei folgenden Kapiteln beschrieben.

Die Herausforderungen für die Datenakquise und -bereitstellung bestand in der Entwicklung und Bereitstellung einer Plattform, die es ermöglicht, komplexe Prozessierungsketten aufzusetzen, die in Echtzeit mit geringer Latenz die in ihrer Art sehr unterschiedlichen Datenströme von Sensoren und Diensten an Land und auf dem Schiff verarbeiten. Ein modulares Design sollte den Austausch von Datenquellen, Hardwarekomponenten und Softwarekomponenten unterstützen sowie den Einsatz auf unterschiedlichen Schiffen und Landstationen ermöglichen. Die Softwaremodule als Träger der wissenschaftlichen Algorithmen sollten ohne Änderung in der Entwicklungs-, Test- als auch Demonstrationsumgebung laufen. Hierzu war ein geeigneter Übergang von der Entwicklungsumgebung (Nachprozessierung) zum Demonstrationssystem (Prozessierung in Echtzeit) zu finden.

### 4.2 Vom Demonstrationssystem zum Plattformkonzept

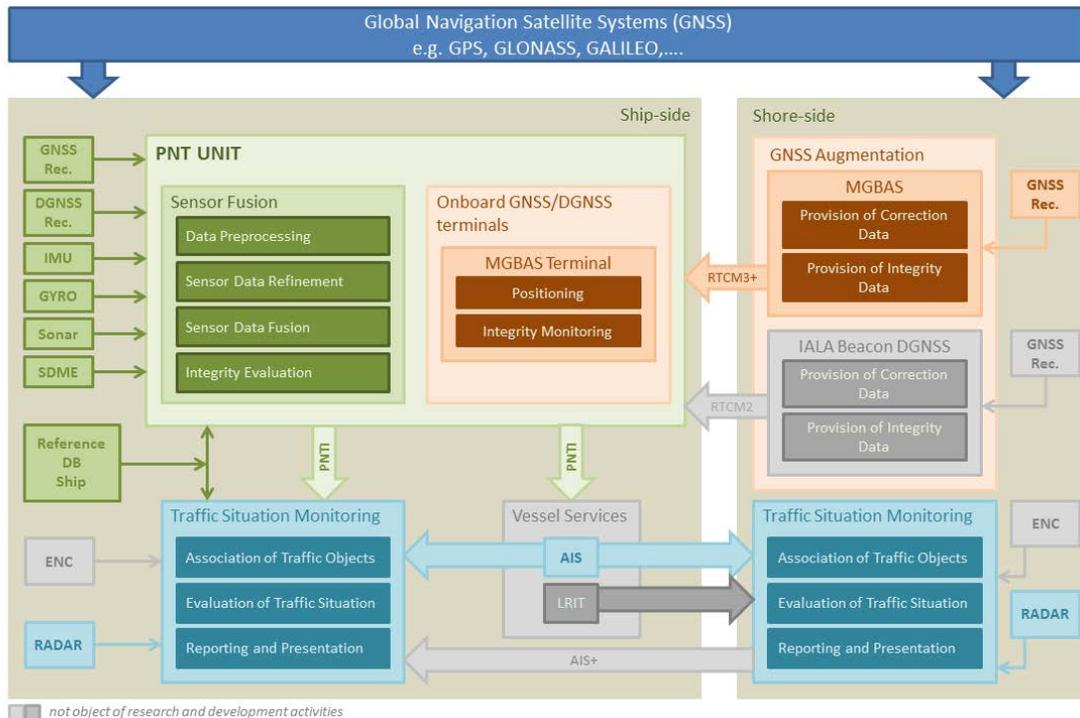
In der Definitionsphase des Projekts wurde die Entwicklung eines gemeinsamen Demonstrationssystems realisiert (Abb. 10). Dies gewährleistete, dass die Abhängigkeiten zwischen den drei Forschungsbereichen des Projektes frühzeitig erkannt und berücksichtigt werden konnten. Weiterhin wurde es dadurch möglich, dass methodische Ansätze für eine koordinierte Nutzung von Integritätsinformationen im Projekt untersucht und optimiert werden konnten.

Die orangefarbenen Blöcke in Abbildung 10 stellen die land- und bordseitigen Komponenten des MGBAS dar, die benötigt werden, um die Genauigkeits- und Integritätsanforderungen an GNSS für ein automatisches Anlegen zu erfüllen. Der Ausbau des MGBAS wurde einerseits verfolgt, um auch Ergänzungsdienste für modernisiertes und zukünftiges GNSS bereitstellen und erproben zu können. Andererseits entsteht mit der Implementierung zusätzlicher Überwachungsfunktionen die Möglichkeit, dass MGBAS-Experimentalsystem im Forschungshafen Rostock auch für die experimentelle Validierung von modernisierten GNSS und von Standardtechnologien zu nutzen.

Die grünen Boxen sind mit dem Themenfeld zwei assoziiert (Multisensorbasierte PNT-Unit) und stellen die bordseitig genutzte Datenquellen und Verfahren dar, mit denen eine störffeste Bereitstellung von PNT-Daten erreicht wird. Wie dargestellt sind GNSS- und DGNSS-Empfänger wie auch das MGBAS-Bordterminal einige der bordseitig genutzten PNT-Sensoren. Verarbeitungsschritte wie die Datenvorverarbeitung bis zur Evaluierung der Integrität reflektieren allgemeine Aufgaben, die für eine störffeste PNT-Datenbereitstellung notwendig sind.

Für die Erfassung und Bewertung der Verkehrslage stellt die bordseitige PNT-Unit eine Datenquelle dar, indem sie Position und Bewegung des eigenen Schiffes beschreibt. Weitere Datenquellen liefern AIS- und RADAR-Daten, die die Position und Bewegung anderer Verkehrsteilnehmer beschreiben. Im Idealfall sollten die vom Schiff verteilten, dynamischen AIS-Daten mit den von der PNT-Unit verteilten PNT-Daten inhaltlich identisch sein. Das würde erlauben, dass die PNT-bezogenen Integritätsinformationen als Integritätsindikator für ausgetauschte AIS-Dateninhalte zukünftig genutzt werden könnte. Anderenfalls stellen AIS und RADAR unabhängige Datenquellen dar, deren integrierte Nutzung die Vollständigkeit und Zuverlässigkeit von Verkehrslagebildern durch Anwendung

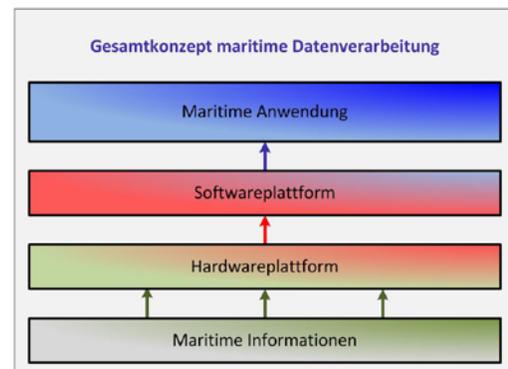
geeigneter Datenfusionsmethoden verbessern könnte. Komponenten und Wechselwirkungen sind in Abb. 10 durch türkisarbene Blöcke und Pfeile dargestellt.



**Abb. 10: Design des angestrebten Demonstratorsystems, das entworfen wurde, um die Machbarkeit und Nutzen des Integritätsmonitoring zu zeigen.**

Das hier vorgestellte Design des Demonstratorsystems zusammen mit den unter Abschnitt 4.1 zusammengefassten Herausforderungen mündeten in das in der Abb. 11 skizzierte Gesamtkonzept für die maritime Datenverarbeitung. Dieses Konzept besteht aus vier funktionalen Schichten.

1. Maritime Informationen: ist die Menge der Informationsquellen (Sensoren, Kommunikationskanäle) an Bord eines Schiffes oder an Land.
2. Hardwareplattform: hat die Aufgabe, sämtliche maritime Informationen einzusammeln und diese Daten in einem kombinierten Datenstrom bereitzustellen. Hierbei findet eine erste Synchronisation der Daten verschiedener Sensoren und Kommunikationsgeräte auf Grundlage der Datenbereitstellungszeitpunkte (Synchronisationsstufe 1) statt.
3. Middlewareplattform: übernimmt weitere Synchronisierungsaufgaben (zweite Stufe) basierend auf den inhärenten Zeitstempeln in den Datenströmen und stellt Softwaremodule zur Verfügung, mit denen die Entwicklung von echtzeitfähigen Programmen auf der Grundlage komplexer Algorithmen unterstützt wird.
4. Maritime Anwendung: ist eine Software, die basierend auf Funktionalitäten der Softwareplattform die maritimen Informationen fusioniert, um höherwertige Datenprodukte z. B. integritätsbewertete PNT-Daten bereitzustellen.



**Abb. 11: Gesamtkonzept der maritimen Datenverarbeitung**

### 4.3 Hardwareplattform

**Schiffsseitige Hardwareplattform:** Im Rahmen des Projekts MVT wurde die Kooperation mit der Firma „Baltic Taucher“ aufgebaut. Damit wurde es möglich, dass neben dem BSH-Schiff „Deneb“ das Schiff „Baltic Taucher II“ der Firma als Versuchs- und Demonstrationsträger genutzt werden konnte. Die Entwicklung der schiffsseitigen Hardwareplattform ist auf das spezielle Schiff optimiert, wurde jedoch bewusst offen gestaltet, um auch auf anderen Schiffen und Verkehrsträgern eingesetzt werden zu können. Die „Baltic Taucher II“ ist mit ihrer Länge von 29 m ein kleines Schiff im Vergleich zu vielen Frachtern, Fähren oder Kreuzfahrtschiffen. Sie ist aber aufgrund von Ausrüstungspflichten und Erfordernissen ihrer Schiffsnutzung mit dem Standardequipment größerer Schiffe ausgestattet. Auf dieses konnte im Rahmen des Projekts voll zugegriffen werden. Ergänzt um weitere kommerziell verfügbare Hardware ergab sich der in Abb. 12 dargestellte Messaufbau an Bord der „Baltic Taucher II“.

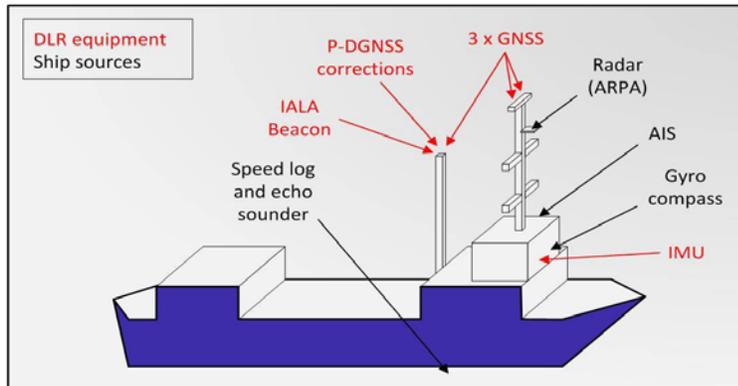


Abb. 12: Grundlegend genutztes Equipment an Bord der „Baltic Taucher II“

mit bis zu 38,4 kBit/s über die serielle Schnittstelle.

Die über die Standardausrüstung der „Baltic Taucher II“ hinausgehenden Sensoren und Kommunikationsquellen (rot gekennzeichnet in Abb. 12) leiteten sich aus den Anforderungen des geplanten Demonstrationssystems ab (siehe Abb. 10). Dem zusätzlichen Equipment ist gemein, dass es abweichende Schnittstellen besitzt. IALA-Beacon Empfänger (CSI MBX-3), Empfangsmodem für PDGNSS (RTK) Korrekturen, GNSS-Empfänger (Javad SIGMA G3T und Javad DELTA G3T) sowie IMU (iMAR iVRU-FCAI) liefern ihre Datenströme im RTCM2- bzw. RTCM3-Format bzw. unter Verwendung von herstellereigenen Übertragungsprotokollen. Als Ausgabeschnittstellen kommen serielle Schnittstellen und Ethernet zum Einsatz. Die Datenübertragungsrate für einen Datenstrom beträgt bis zu 450 kBit/s. Im Gegensatz zu den NMEA-Datensätzen besitzen alle diese Datenströme selbst einen inhärenten Zeitstempel für die Gültigkeit der Daten. Die Updateraten liegen bei 0,2 bis 200 Hz.

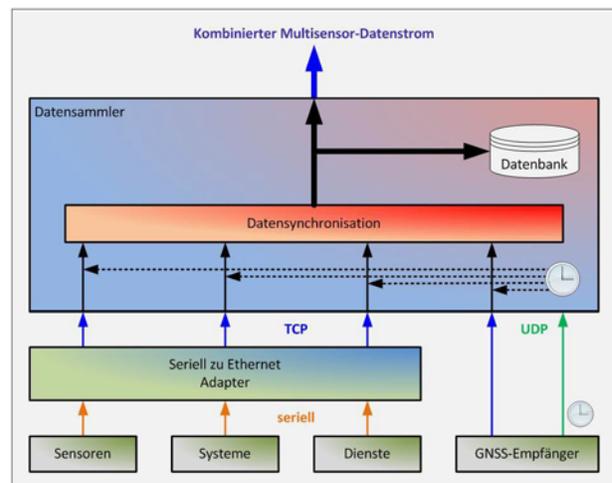


Abb. 13: Generierung eines zeitgestempelten kombinierten Datenstroms auf dem Schiff

Unter Berücksichtigung der Diversität der Datenquellen an Bord des Schiffes wurde das folgende Konzept der schiffsseitigen Hardwareplattform (Abb. 13) entwickelt und umgesetzt. Es sichert die zeitgestempelte kombinierte Bereitstellung der gesamten Daten an Bord eines Schiffes ab. Diese Daten werden mittels Adapter auf das Ethernetprotokoll TCP (Transmission Control Protocol) umgesetzt, insofern die Sensorik ihre Daten nicht von sich

aus per TCP zu Verfügung stellt. Alle Daten werden von einem Datensammler entgegengenommen, der jedes einzelne Datenpaket beim Eintreffen mit der aktuellen UTC-Zeit stempelt, so dass im Anschluss ein kombinierter und synchronisierter Datenstrom aller Informationsquellen erzeugt wird. Dieser Datenstrom wird zum einen direkt den Softwareanwendungen per TCP bereitgestellt. Zum anderen wird der Datenstrom auch für mögliche Nachprozessierungen in einer SQLite-Datenbank gespeichert.

Dienste und Systeme sind hier als eine Verallgemeinerung für weitere, datenstrombasierte Informationsquellen zu verstehen. Diese können ihre Daten zum einen auf dem eigenen Schiff generieren (z. B. Radar) oder auf einem fremden Schiff (z. B. AIS-Daten) als auch an Land (z. B. IALA Beacon DGNS). Dienste und Systeme decken damit auch jegliche datenstrombasierten Kommunikationskanäle ab. Für Informationsquellen, die nicht von sich aus ihre Daten seriell oder per TCP abgeben, wurde ein geeigneter TCP-Adapter bereitgestellt. Durch die konsequente Umsetzung auf das Übertragungsprotokoll TCP konnte eine große Flexibilität bezüglich der Nutzung verschiedener maritimer Informationsquellen erreicht werden. Infolgedessen wurde damit ein modularer Aufbau des Gesamtsystems abgesichert.

Bei dem Datensammler handelt es sich um eine in C++ geschriebene Software, die auf einem Standard-Linux-System läuft. Um eine möglichst gute Stabilität der Rechneruhr zu erlangen, wird diese ständig per Ethernet über UDP (User Datagram Protocol) mit den Uhren der drei GNSS-Empfänger synchronisiert. Damit ist abgesichert, dass Ungenauigkeiten der Systemzeit generell unter 1 ms liegen

**Landseitige Hardwareplattform:** Schon seit mehreren Jahren nutzt das DLR Neustrelitz den Forschungshafen Rostock als maritimes Testfeld. In den Projekten ALEGRO und ASMS wurden hier zwei MGBAS-Stationen (Maritimes Ground Based Augmentation System) aufgebaut, um Verfahren für maritime PNT-Dienste experimentell erproben und validieren zu können. Die Weiterentwicklung der beiden Sensorstationen erfolgte im Rahmen dieses Projekts, um sie an zusätzliche Anforderungen anzupassen, die aus der landseitigen Verkehrsüberwachung, dem Monitoren von maritimen GNSS-Diensten sowie der Implementierung von Galileo-Diensten in das MGBAS resultierten. In Abb. 14 werden neben der Lage der Stationen im Forschungshafen Rostock auch wesentliche Datenquellen dargestellt, die in der landseitigen Hardwareplattform zu managen sind. So sind beide Stationen mit GNSS-Empfangstechnik und die Basisstation zusätzlich mit IALA-Beacon-Empfänger, AIS-Empfänger und Sender für PDGNSS-Korrekturen ausgestattet. Die Lage der Basisstation im Herzen des Rostocker Hafens sichert ab, dass eine Serviceabdeckung für das gesamte Gebiet des Überseehafens erreicht wird.



**Abb. 14: Sensorik bzw. Empfangsanlagen der beiden im Forschungshafen Rostock installierten Stationen**

Basisstation sowie Monitorstation des MGBAS sind an das Forschungsnetzwerk EVnet angeschlossen. Dies bietet den Vorteil, dass neben der Funkübertragung auch über Internet auf die Stationsdaten in Echtzeit zugegriffen werden kann. Darüber hinaus können die im Forschungshafen Rostock abgestrahlten maritimen Zusatzinformationen zentral an anderer Stelle generiert werden.

Nicht nur aus Kompatibilitätsgründen wird landseitig das gleiche Konzept zur Datenbereitstellung verfolgt. Vielmehr stellt die landseitig genutzte Technik (Sensoren, Dienste, Systeme) eine Teilmenge der Schiffsausrüstung dar, so dass hier geltende Anforderungen weitestgehend denen der Schiffseite gleichen. Das Konzept wurde daher vom Schiff übernommen, und für die Erzeugung kombinierter synchroner Datenströme auf den landseitigen Stationen angepasst und umgesetzt (Abb. 15). Ein Unterschied ist die geringere Anzahl von Datenquellen sowie deren inhärenten Schnittstellen. Die räumliche Distanz der beiden Landstationen und die Notwendigkeit der zeitlichen Protokollierung der Messungen erfordern jeweils eine getrennte Bereitstellung von kombinierten

Multisensor-Datenströmen. Diese lassen sich über den in den Datenströmen eingebetteten Zeitstempel der Datenpakete zu einem kombinierten Multisensor-Land-Datenstrom kombinieren.

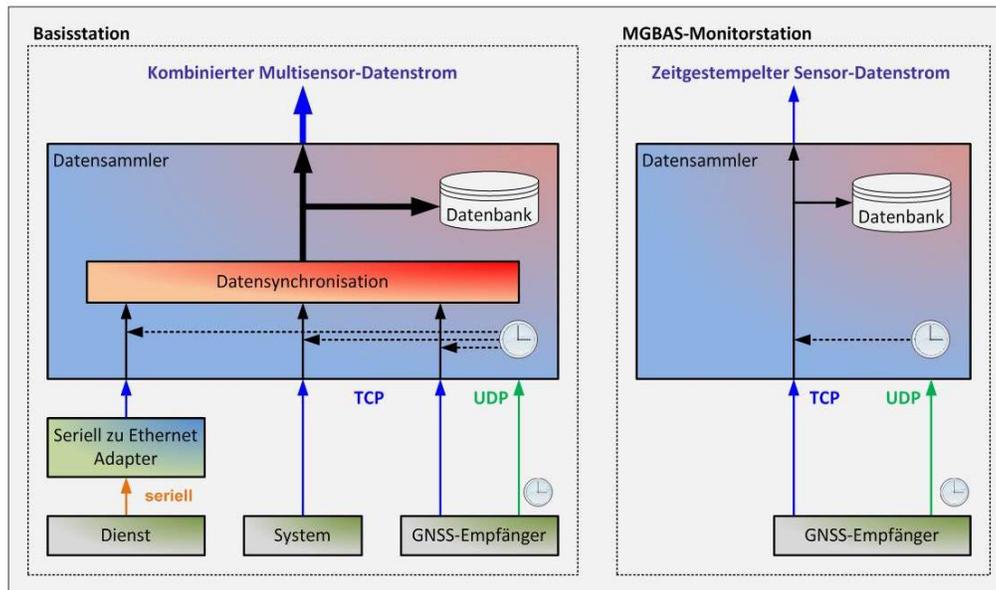


Abb. 15: Generierung zeitgestempelter Datenströme an den Landstationen

Konkret werden auf der Hauptstation fünf Datenströme – einer vom GNSS-Empfänger und vier von Systemen oder Diensten – verarbeitet. Auf der Monitorstation findet hingegen zurzeit nur die zeitliche Stempelung eines Sensordatenstroms statt. Das modulare Konzept erlaubt bei beiden Station, dass durch eine einfache Erweiterung weitere Sensoren und Datenquellen genutzt werden können.

#### 4.4 Middlewareplattform

Diese Ebene im komplexen Softwaresystem dient dazu, einmal entwickelten und getesteten Programmcode über längere Zeit in verschiedenen Konstellationen mit weiteren Softwarekomponenten benutzen und testen zu können. Sie bietet zusätzlich die Möglichkeit, dass eine Vielzahl von weiteren Projektanforderungen bereits plattformbedingt gelöst werden können, so dass eine darauf aufbauende Programmierfähigkeit sich auf die

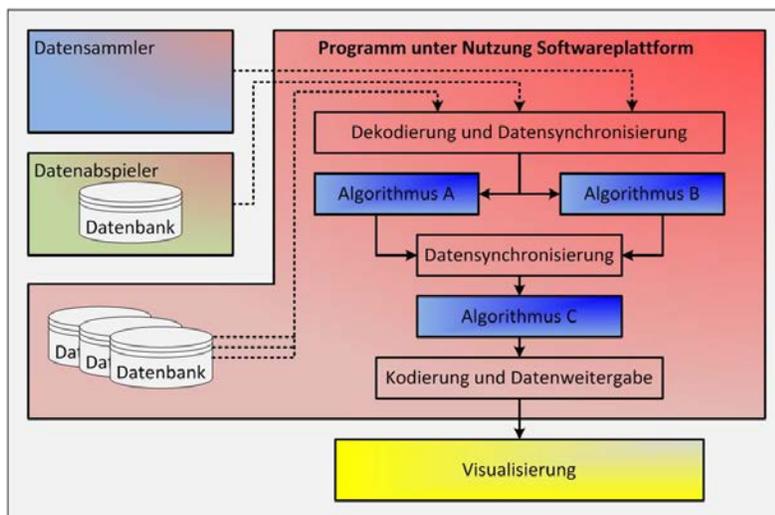


Abb. 16: Programmentwicklung unter Nutzung der Middlewareplattform

Entwicklung und Erprobung spezieller Algorithmen fokussieren kann. In dem Projekt wurde basierend auf diesem Ansatz ein vorhandenes C++ GNSS-Framework zu einem Multi-Sensor-Echtzeit-Framework (kurz RT-Framework) weiterentwickelt. Dieses ermöglichte den Entwicklungslinien PNT-Unit, GNSS-Ergänzungsdienste, sowie Verkehrslageüberwachung und -bewertung ihre spezifischen Anwendungen in einem Framework zu erstellen.

Die Abb. 16 zeigt den im Projekt verfolgten Ansatz der Middlewareplattform basierend auf dem RT-Framework. Demnach besteht ein Programm im Wesentlichen aus

grundlegenden Elementen (rot): von der Dekodierung, Datensynchronisierung (auf Basis den Daten inhärente Zeitstempel), dem Datentransport zwischen einzelnen Softwaremodulen, der Kodierung und Datenweitergabe bis hin zu einem breiten Spektrum von weiteren Tools. In blau sind spezielle Softwaremodule hervorgehoben, mit denen eine aufgabenspezifische Datenverarbeitung durchgeführt wird. In gelb abgesetzt befindet sich die Visualisierung der Ergebnisse und Zustandsinformationen. Als besonderer Service für alle Schiffsführer wurde die Visualisierung der Informationen plattformunabhängig über einen Web-Browser realisiert.

Ein weiteres besonderes Leistungsmerkmal der Middlewareplattform ist der unterstützte Zugriff für eine Prozessorverschaltung auf drei verschiedene Datenquellen. So kann man entweder im Rahmen von Live-Demonstrationen direkt auf den kombinierten synchronisierten Multisensor-Datenstrom des Datensammlers zugreifen (Abb. 16, links oben) oder den Fall der Echtzeitanwendung jederzeit simulieren, indem man die im Datensammler aufgezeichnete Datenbank anhand der gespeicherten Zeitstempel wieder abspielt (Abb. 16 links, zweite von oben). Als dritte Option können ein oder mehrere Datenbanken mit maximaler Geschwindigkeit in der Nachprozessierung speziell zur Algorithmenentwicklung und Validierung eingelesen werden (Abb. 16 links, dritte von oben).

Mit dem umgesetzten Design konnte eine flexible Code-Parallelisierung zur optimalen Ausnutzung von Hardwareressourcen erzielt werden. Diese ist für die Realisierung des Gesamtdemonstrationskonzepts notwendig, um eine parallele Verarbeitung verschiedener Datenströmen an Bord eines Schiffs sowie an Land im Kontext der Servicebereitstellung und -überwachung zu ermöglichen.

Die Ebene der Dekodierung und Datensynchronisierung führt zu einer kompletten Entkopplung der Programmalgorithmen von den Datenquellen. Damit lassen sich alle Probleme des Datenmanagements an einer Stelle lösen. Derartige Probleme resultieren u. a.

- aus der großen Diversität der Datenquellen in ihren unterschiedlichen Updateraten (0,5 bis 200 Hz), ihren unterschiedlichen Latenzen (6 ms bis 5 s), sowie ihrer zeitlichen Varianz der Latenzen (0,4 bis 1,7 s);
- aus den auftretenden Datenlücken bei Änderungen des Servicegebiets oder Umweltbedingungen; sowie
- aus der Eigenschaft einen oder keinen inhärenten Datenzeitstempel zu haben.

Das modulare Design des RT-Framework und die modular gehaltenen Prozessoren als Implementierung spezieller Algorithmen erlauben eine hohe Wiederverwertbarkeit einmal erstellter Programmcodes. So lassen sich mit geringem Aufwand neue komplexe Prozessorketten aufbauen, die wiederum mit weiteren kombiniert werden können. Hierüber können auch recht komfortabel die Leistungsbewertung unterschiedlicher Algorithmen durchgeführt werden.

## 5. GNSS-ERGÄNZUNGSDIENSTE UND INTEGRITÄT

### 5.1 Status und Herausforderungen

In den 90-er Jahren wurde durch die maritime Nutzergemeinschaft der „IALA Beacon DGPS“-Dienst entwickelt und weltweit aufgebaut, um die in Küstenbereichen geltenden Leistungsanforderungen an eine GPS-basierte Positionsbestimmung erfüllen zu können. Die Genauigkeit von Entfernungsmessungen lässt sich mit Hilfe bereitgestellter Rangekorrekturen verbessern, die gleichermaßen Effekte der künstlichen Verschlechterung (ab Mai 2005 deaktiviert) und Signalausbreitung reduzieren können. Dadurch konnte der Fehler bei der horizontalen Positionsbestimmung auf weniger als 10 m reduziert werden. Ergänzende Integritätsdaten sichern einerseits ab, dass die Nutzer über die aktuelle Verwendbarkeit von GNSS und bereitgestellter Korrekturwerte informiert werden. Andererseits zeigen die Integritätsdaten an, ob eine DGNSS-basierte Positionsbestimmung mit der geforderten Genauigkeit überhaupt realisiert werden kann oder nicht. Diese Integritätsbewertung des Services erfolgt mit Hilfe von Integritätsmonitoren, die entweder in der Nähe der Referenzstation (LIM - Local Integrity Monitoring) oder weiter entfernt (FFIM - Far Field Integrity Monitoring) betrieben werden und als virtuelle Nutzer fungieren. Letztlich wird die im Servicebereich erreichbare DGNSS-Positionsgenauigkeit anhand des Positionsfehlers, der am

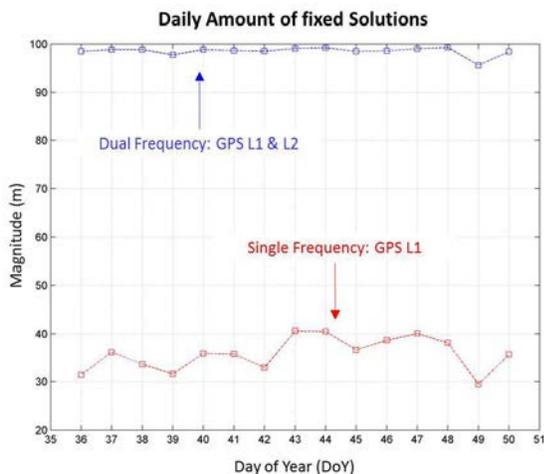
Integritätsmonitor ermittelt wurde, abgeschätzt. Eine verbindliche Aussage am Ort des Nutzers ist jedoch so nicht möglich. Die Ergänzungsdaten werden mit Hilfe von Mittelwellensignalen verteilt und stehen folglich allen Nutzern zur Verfügung, die im Servicebereich der Referenzstation – also in einem Umkreis von 200-300 km – operieren. Prinzipiell ergibt sich aus der Modernisierung von GNSS (neue Systeme, Signale und Frequenzen) die Notwendigkeit, dass auch die GNSS-Ergänzungsdienste modernisiert werden müssten, um Integritätsinformationen und Korrekturdaten für weitere GNSS-Signale bereitstellen zu können. Ob und wie das erfolgen sollte, ist eine Fragestellung, die zukünftig mit der Spezifikation des PNT-relevanten Maritimen Service Portfolios (MSP) zu beantworten ist.

Die Entwicklung von MGBAS (Maritime Ground Based Augmentation System) ist eine komplementäre GNSS-Serviceentwicklung, die auf das Erreichen höherer Genauigkeitsklassen (Port: <1m, Anlegemanöver: <1dm) bei gleichzeitiger Integritätsbewertung zielt [IMO A915(22)]. Im Rahmen von Vorläuferprojekten wurde ein MGBAS-Experimentalsystem im Forschungshafen Rostock aufgebaut, um nachzuweisen, dass mit phasenbasierten DGNSS-Verfahren (PDGNSS) absolute Positionsgenauigkeiten im dm-Bereich erreicht werden können. Um eine Überwachung der Integrität von PDGNSS-Diensten zu ermöglichen, musste ergänzend ein erstes Integritätskonzept konzipiert und dafür geeignete Monitoringmethoden entwickelt werden.

Innerhalb des Projekts MVT wurde der Ausbau des landseitigen MGBAS-Experimentalsystems mit komplementären Zielen verfolgt. Einerseits sollte das MGBAS verfahrenstechnisch so erweitert werden, dass es auch GALILEO- und multiGNSS-basierte PDGNSS-Dienste bereitstellen kann. Andererseits sollten das MGBAS schrittweise mit Monitoren ausgestattet werden, mit denen sich die Leistungsfähigkeit von modernisierten und zukünftigen GNSS als auch von maritimen PNT-Diensten wie das IALA Beacon DGNSS evaluieren lässt. Messkampagnen als auch Langzeitvalidierungen in beiden Entwicklungslinien wurden als notwendig angesehen, um durch experimentell evaluierte Leistungskenngrößen eine Entscheidungsgrundlage für die technische Detaillierung des maritimen PNT-Systemdesigns und die bedarfsgerechte Spezifikation des PNT-relevanten Maritimen Serviceportfolios zu schaffen.

## 5.2 Ausbau der MGBAS-Serviceportfolios: GALILEO und multiGNSS

Mit Hilfe des experimentellen MGBAS im Forschungshafen wurde vor Projektbeginn nachgewiesen, dass mit phasenbasierten DGPS-Diensten horizontale Positionsgenauigkeiten im dm-Bereich erreichbar sind. Folglich ist MGBAS ein geeignetes Ergänzungssystem, mit dem die maritimen Genauigkeitsanforderungen für eine GNSS-basierte Positionsbestimmung in Häfen als auch für automatisches Anlegen erfüllt werden könnten [IMO A.915(22)].

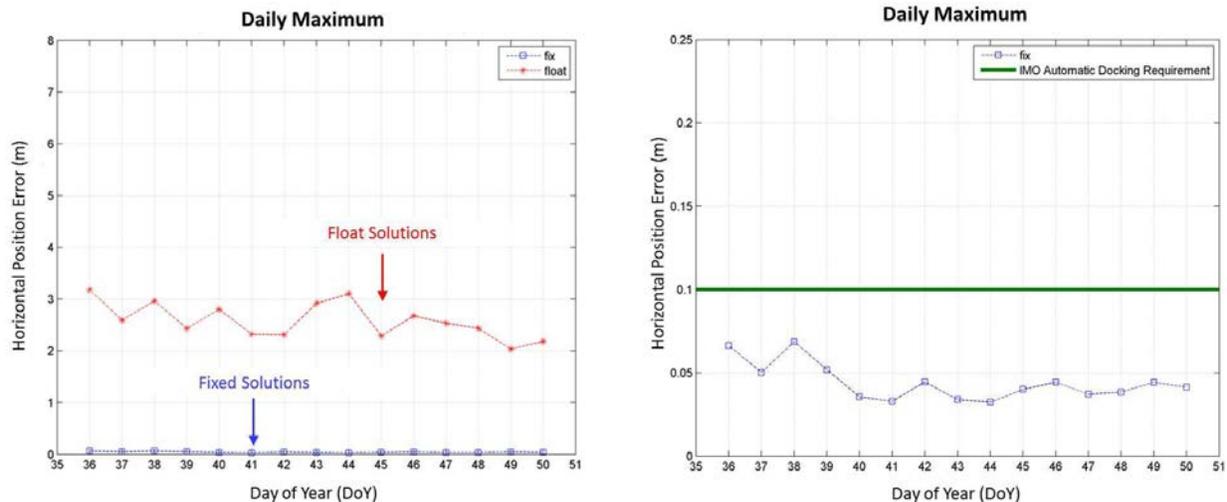


**Abb. 17: Erfolgswahrscheinlichkeit der Mehrdeutigkeitsbestimmung für „GPS L1“- und „GPS L1+L2“- Service des MGBAS (DOY 036-050 2011) bestimmt an der MGBAS-Monitoringstation**

Mit dem Ziel, die Zuverlässigkeit der MGBAS-Servicebereitstellung sowie der Integritätsbewertung weiter zu verbessern, wurden die experimentellen Untersuchungen der GPS-basierten MGBAS-Dienste innerhalb des MVT-Projekts fortgeführt. Dafür war es notwendig, dass eine statistisch repräsentative Datenbasis analysiert wurde, aus der eine fundierte Beschreibung der erreichten Genauigkeit, Integrität und Verfügbarkeit unter Beachtung systeminterner und externer Abhängigkeiten abgeleitet werden konnte. Auf dieser Grundlage wurden auch systemintern genutzte Schwell- und Entscheidungswerte, mit denen der MGBAS-Systembetrieb überwacht und gesteuert wird, optimiert.

Allgemein bekannt ist, dass die Positionsgenauigkeit einer GPS- als auch einer DGPS-basierten Positionsbestimmung steigt, wenn die Entfernungen zwischen Satelliten und Empfänger aus zweifrequenzbasierten anstatt aus einfrequenzbasierten Laufzeitmessungen bestimmt werden. Durch ihre Frequenzabhängigkeit lassen sich ionosphärische

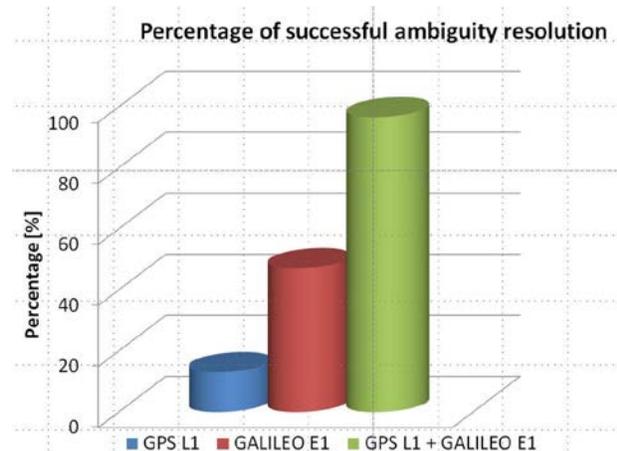
Laufzeitfehler 1. Ordnung direkt in den Entfernungsmessungen korrigieren. Damit werden Restfehler vermieden, die entstehen würden, wenn ionosphärische Laufzeitfehler mit Werten korrigiert werden, die aus Modellen abgeleitet oder an anderen Orten bestimmt wurden. Bei ionosphärenkorrigierten Phasenmessungen kann infolgedessen erwartet werden, dass sich die Mehrdeutigkeiten der Phasen exakter bestimmen lassen sollten. Experimentelle Untersuchungen zeigten, dass im Einfrequenzfall die Erfolgswahrscheinlichkeit einer Mehrdeutigkeitsfixierung nur bei 30 bis 40% lag. Im Vergleich dazu konnten bei einem zweifrequenzbasierten Verfahren die Mehrdeutigkeiten in mehr als 95% der Fälle bestimmt werden (Abb. 17).



**Abb. 18: Maximaler Positionsfehler an der MGBAS-Monitoringstation pro Tag bei Verwendung des „GPS L1+L2“-Ergänzungsservices in Abhängigkeit vom Status der Mehrdeutigkeitsfixierung (links) und in Relation zur IMO-Anforderung für automatische Anlegemanöver (rechts)**

Wie in Abb. 18 (links) verdeutlicht, lassen sich bei phasenbasierten DGNSS-Verfahren nur dann die gewünschten Genauigkeiten erreichen, wenn die Bestimmung der Mehrdeutigkeiten (Fixing) in den Phasenmessungen erfolgreich war. Wurde die horizontale Position nur durch eine „Float“-Lösung bestimmt, also ohne fixierte Mehrdeutigkeiten, so betrug der maximale Positionsfehler pro Tag 2-3 m. Wenn jedoch eine „Fixed“-Lösung erreicht wurde, so lag der maximale Positionsfehler deutlich unter 1 dm. Er erfüllte dann die Genauigkeitsanforderungen (Abb. 18, rechts), um ein automatisiertes Anlegemanöver ausführen zu können.

Für sicherheitskritische Anwendungen von MGBAS ist es folglich essentiell, dass die Betriebs- und Nutzungsbedingungen so ausgelegt sein, dass eine stabile Mehrdeutigkeitsfixierung beim Nutzer weitestgehend abgesichert werden kann. Dazu gehören robuste Kommunikationskanäle zur Übertragung der Ergänzungssignale wie auch eine Integritätsbewertung des genutzten GNSS und bereitgestellter Korrekturen. Die Ergebnisse zeigten aber auch, dass ein zweifrequenzbasiertes PDGNSS-Verfahren unter Verwendung der Signale eines Satellitennavigationssystems (hier GPS) nicht ausreicht, um Verfügbarkeiten von 99.8% bei der GNSS/DGNSS-basierten Positionsbestimmung zu erreichen.



**Abb. 19: Wahrscheinlichkeit für eine erfolgreiche Mehrdeutigkeitsfixierung : „GPS L1“, „GALILEO E1“ und „GPS L1 & GALILEO E1“ auf der Grundlage von Daten des „SPIRENT“ GNSS-Simulators**

Daraus ergab sich die berechtigte Fragestellung, ob und wie sich die Leistungsfähigkeit von phasenbasierten DGNSS-Verfahren erhöhen lässt, wenn MGBAS-Dienste für modernisiertes GNSS z.B. GALILEO oder für eine kombinierte Nutzung von GPS und GALILEO zur Verfügung gestellt werden. Folglich wurden neue Prozessierungskanäle konzipiert und softwaretechnisch umgesetzt, um das Serviceportfolio des MGBAS-Experimentalsystems um folgende 4 Dienste zu erweitern: „GALILEO E1“, „GALILEO E1+E5“, „GPS L1 & GALILEO E1“ und „GPS L1+L2 & GALILEO E1+E5“. Ursprünglich war angedacht, dass auch innerhalb der Projektlaufzeit eine umfassende experimentelle Validierung und Optimierung dieser neuen Dienste mit realen Messwerten durchgeführt werden kann. Jedoch führten Verzögerungen beim Aufbau von GALILEO dazu, dass die real verfügbare GALILEO-basierte Datenbasis unzureichend ist, um z.B. phasenbasierte DGALILEO-Verfahren bewerten und optimieren zu können. Deshalb wurden mit einem GNSS-Simulator vom Typ „Spirent“ generierte Entfernungsmessungen genutzt, um den Gewinn an Leistungsfähigkeit bei Verwendung von GALILEO- bzw. multiGNSS-basierten MGBAS-Verfahren abschätzen zu können.

Der in Abb. 19 dargestellte Vergleich verdeutlicht, dass auch bei einfrequenzbasierten Verfahren sich die Erfolgswahrscheinlichkeit der Mehrdeutigkeitsfixierung erhöhen lässt, wenn Navigationssignale mit erhöhter Störfestigkeit (z.B. GALILEO) oder Navigationssignale mehrerer GNSS (z.B. GPS+GALILEO) kombiniert genutzt werden [2011-09]. Vergleicht man die in Abb. 17 und Abb. 19 dargestellten Erfolgswahrscheinlichkeiten für eine Mehrdeutigkeitsfixierung mit „GPS L1“-Signalen, so liegt das simulierte Ergebnis (ca. 10%) deutlich unter dem realen Ergebnis (20-30%). Das berechtigt zur Annahme, dass auch bei „Galileo E1“ bzw. „GPS L1 & GALILEO E1“ die erreichbare Wahrscheinlichkeit für eine erfolgreiche Mehrdeutigkeitsbestimmung über den simulierten Ergebnissen liegen wird.

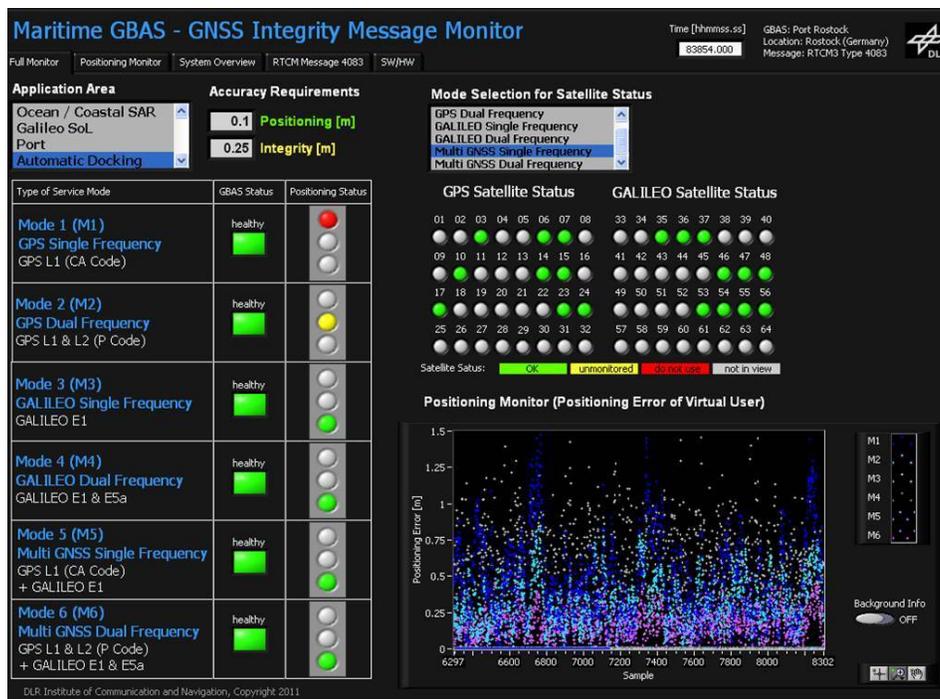


Abb. 20: MGBAS-Monitor zur Visualisierung von MGBAS-relevanten Integritätsaussagen

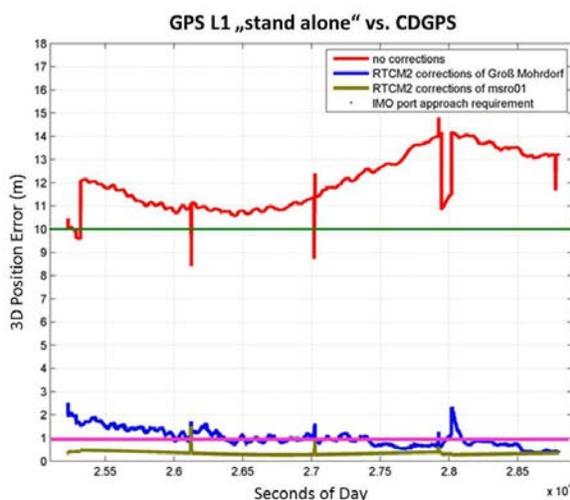
Ergänzend zu den methodischen Entwicklungen wurde eine grafische Benutzeroberfläche geschaffen, die den MGBAS-Operator über die aktuelle Leistungsfähigkeit der angebotenen MGBAS-Dienste und die Integrität dafür genutzter GNSS-Signale informiert (Abb. 20). Das Multifunktionsdisplay zeigt auf der linken Seite an, welcher der MGBAS-Dienste die Anforderungen der gewählten Performanzklasse (z.B. Port oder Automatic Docking) erfüllt (grün) bzw. nicht erfüllt (rot). Aus dem Zeitverhalten des Positionsfehlers pro Verfahren (Abb. 20, rechts unten) kann der Operator auch Rückschlüsse über die Performanzstabilität der bereitgestellten Dienste ziehen. Ergänzend

wird rechts oben angezeigt, welche GNSS-Signale für die Servicebereitstellung und damit für die Positionsbestimmung als verwendbar eingestuft wurden.

Eine eher anwendungsfreundliche Darstellung der MGBAS-Leistungsfähigkeit (Abb. 21) wurde mit der Entwicklung einer 2. Nutzeroberfläche verfolgt. Hier wurde insbesondere auf die Darstellung von technischen Details verzichtet. Aktuelle Positionsfehler werden rechts unten angegeben. Die Ampeln (oben) werden nur dann pro Service und Genauigkeitsklasse grün gesetzt, wenn in den vergangenen Epochen ein bestimmter Mindest-anteil von Positionsergebnissen (hier 80%) die geforderte Genauigkeit erreicht hat. Damit wird vermittelt, wie stabil derzeit das einzelne Verfahren arbeitet.

### 5.3 IALA Beacon DGNSS - Validierung maritimer Augmentierungsdienste

Neben der Generierung und Bewertung von originären MGBAS-Diensten wurden weitere Monitoringverfahren in die MGBAS-Experimentalplattform implementiert, um eine experimentelle Validierung der Leistungsfähigkeit bereits etablierter maritimer PNT-Dienste zu ermöglichen. Dazu wurde ein Integritätsmonitor nach dem „IALA Beacon DGNSS“-Standard [IALA-R121-2004] softwaretechnisch entwickelt und in das Experimentalsystem implementiert. So wurde es am Standort Rostock möglich, die mit CDGPS erreichbaren Positionsgenauigkeiten unter Verwendung der RTCM2-Korrekturnachrichten der Station Groß Mohrdorf zu untersuchen. Durch die neue Funktionalität fungiert die Referenzstation des MGBAS jetzt auch als Far Field Integritätsmonitor nach dem „IALA Beacon DGNSS“-Standard [IALA-R121-2004].



**Abb. 22: Positionsgenauigkeit ohne und mit Korrekturen der IALA Beacon-Station Groß Mohrdorf und der MGBAS-Station**



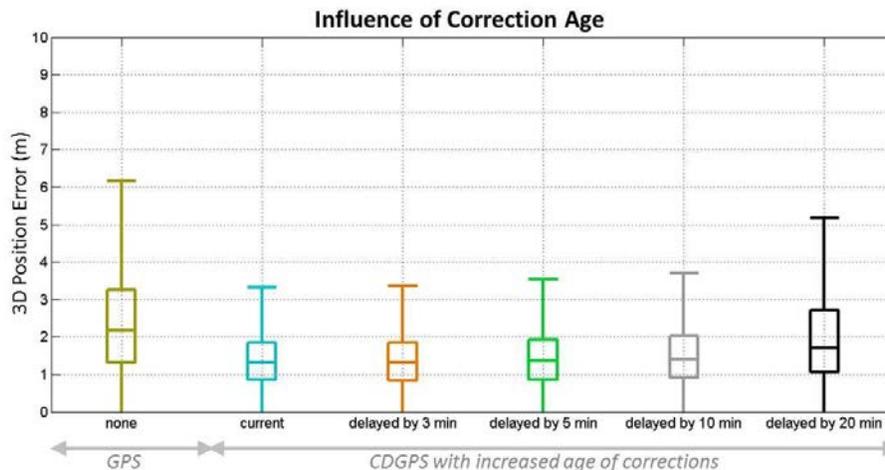
**Abb. 21: User-friendly MGBAS-Monitor**

In Abb. 22 sind die erreichten 3D-Positionsgenauigkeiten ohne (rote Linie) sowie mit Verwendung der Korrekturen (blaue Linie) der Station Groß Mohrdorf exemplarisch für eine Stunde dargestellt. Es zeigt sich, dass die erreichten Positionsgenauigkeiten im Bereich von 1 bis 2 m liegen und dass unter Verwendung des Services die Genauigkeitsanforderungen für eine GNSS-basierte Positionsbestimmung in Küstenbereichen und für Hafenanfahrten eindeutig erfüllt werden (10 m (grüne Linie)).

In einem weiteren Schritt wurde untersucht, welche Verbesserungen sich im Hafen Rostock erzielen lassen, wenn die Referenzstation des MGBAS eigene Korrekturen nach dem „IALA Beacon DGNSS“-Standard [IALA-R121-2004] bereitstellt, die zudem an der Integritätsmonitoringstation (IMS) hinsichtlich ihrer Integrität evaluiert wurden. Es konnte nachgewiesen werden, dass im Nahbereich von

Referenzstationen Positionsgenauigkeiten im Submeterbereich erreicht werden (siehe unterer Kurvenverlauf in Abb. 22) und damit die IMO-Genauigkeitsanforderungen für Hafenbereiche (<1m, pinkfarbene Linie) erfüllt werden können. Der Unterschied in den erreichten Genauigkeiten bei alternativer Nutzung von Korrekturdaten aus Groß Mohrsdorf und aus Rostock lässt sich aus der räumlichen Dekorrelation der Fehleranteile in den Korrekturdaten erklären.

Die erreichbare Genauigkeit beim Nutzer ist auch vom Alter der Korrekturdaten abhängig. Die IALA empfiehlt, dass nur Korrekturdaten mit einem maximalen Datenalter von 30s verwendet werden sollten [IALA-R121-2004], um z.B. auch SA-Effekte geeignet korrigieren zu können. Mittlerweile ist der SA-Effekt ausgeschaltet, so dass eine geringere Abhängigkeit vom Datenalter erwartet werden kann. Um dies analysieren zu können, wurden an der Referenzstation des MGBAS erzeugte RTCM2- Korrekturdaten künstlich verzögert, bevor sie an der Monitoringstation für die Positionsbestimmung genutzt wurden.



**Abb. 23: Darstellung des horizontalen Positionsfehlers als Boxplot bei Verwendung von zeitlich verzögerten RTCM2 Korrekturdaten des IALA Beacon DGNSS an der MGBAS Referenzstation in Rostock (DOY 235, 2010)**

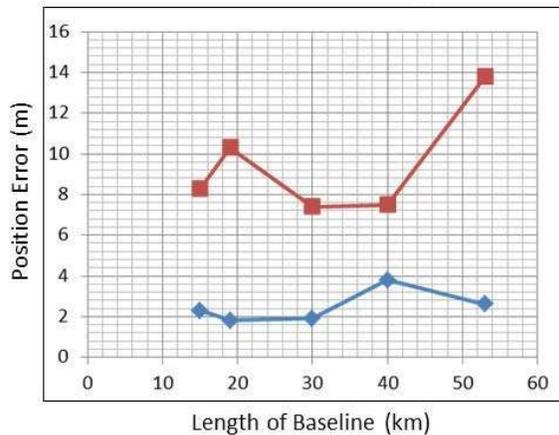
Wie sich das Datenalter auf den horizontalen Positionsfehler auswirkt, ist in Abb. 23 illustriert. Erwartungsgemäß ist ein Anstieg des horizontalen Positionsfehlers mit Zunahme des Alters angewandter Pseudorangekorrekturen zu beobachten. Interessant ist jedoch der Fakt, dass bei ausgeschaltetem SA ein deutlicher Anstieg des Positionsfehlers erst dann zu beobachten ist, wenn die Korrekturdaten älter als 10 min sind [2010-12B].

Mit der Implementierung von CGNSS-Verfahren in das MGBAS konnte das Portfolio von PNT-relevanten Diensten im Forschungshafen Rostock und damit möglichen Untersuchungen erweitert werden.

#### 5.4 Nutzbarkeitsanalyse von PDGNSS-Diensten für maritime long-range Anwendungen

Der zunehmende Aufbau und Betrieb von Offshore-Windanlagen in der Nordsee sowie der Ostsee führt dazu, dass auch in Entfernungen von 50 bis zu 150 km von der Küste Positionsbestimmungen mit hoher Genauigkeit benötigt werden. So werden im Kontext von z.B. Erkundungs- oder Wartungsarbeiten Positionsgenauigkeiten im unteren dm-Bereich gefordert. Wie in Abb. 22 erkennbar, können solche Genauigkeiten mit codebasierten DGNSS-Verfahren, wie dem IALA Beacon DGNSS, nicht erreicht werden (vgl. Untersuchungen im vorigen Abschnitt).

Eine Möglichkeit, diese Anforderungen eventuell näherungsweise zu erreichen, könnte sich aus der Verwendung von PDGNSS-Verfahren ergeben. Allgemein bekannt ist, dass die Leistungsfähigkeit von DGNSS-Verfahren mit zunehmender Entfernung von der Referenzstation aufgrund der Fehlerdekorrelation abnimmt, d.h. der Positionsfehler zunimmt. Deshalb sollte in einer speziellen Messkampagne für phasenbasierte DGPS-Verfahren untersucht werden, wie sich die Entfernung zwischen Referenzstation und Nutzer auf die erreichbare Fixierbarkeit von Phasenmehrdeutigkeiten und damit auf die Positionsgenauigkeit auswirkt. Da seeseitig keine Referenzpunkte



**Abb. 24: Horizontaler (blau) und vertikaler (rot) PDGPS-Positionsfehler ( $1\sigma$ ) in Abhängigkeit von der Basislinienlänge**

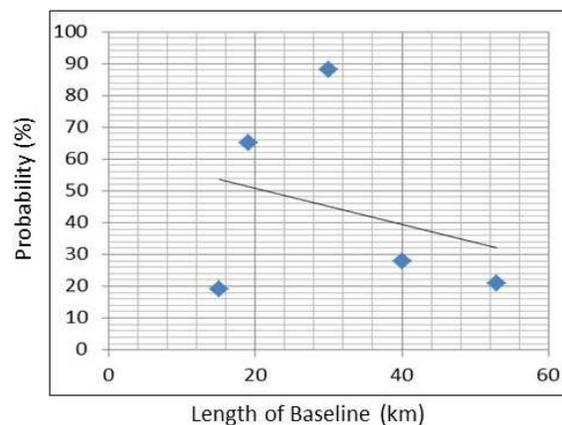
der Mehrdeutigkeiten erreicht wurde, ist generell nicht zufriedenstellend, da an keinem Messpunkt eine Erfolgswahrscheinlichkeit von 100% erreicht werden konnte. Für statische Anwendungen wäre es damit noch möglich, auch bei größeren Entfernungen zur Referenzstation phasenbasierte Korrekturverfahren für eine hochgenaue Positionsbestimmung einzusetzen. Dann muss man aber tolerieren können, dass die Effizienz der PDGPS-basierten Positionsbestimmung deutlich abnehmen wird.

Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Wahrscheinlichkeit und Entfernung zur Referenzstation konnte aus diesen Ergebnissen nicht abgeleitet werden. Eine lineare Interpolation über die 5 Messpunkte offeriert, dass mit Zunahme der Entfernung (von 15 auf 54 km) die Wahrscheinlichkeit der Mehrdeutigkeitsfixierung von 50 auf 30% abfällt. Die Qualität (insbesondere Kontinuität und Verfügbarkeit) von phasenbasierten Positionsbestimmungen, die sich in größeren Entfernungen zur Referenzstation bei Verwendung von Signalen der 1. GNSS-Generation ergibt, ist unzureichend, um damit Fahrzeugbewegungen überwachen oder steuern zu können.

(Vergleichspunkte bereits bekannter Koordinaten) vorlagen, wurde die Messkampagne vorerst landseitig durchgeführt.

Von der Referenzstation des MGBAS in Rostock ausgehend wurden dazu an mehreren Messpunkten, die bis 60 km von der Referenzstation entfernt waren, phasenbasierte Positionsbestimmungen durchgeführt. Dafür wurden zweifrequenzbasierte GPS-Messungen (geodätischer Empfänger und Antenne) genutzt. Im Ergebnis konnte festgestellt werden (Abb. 24, dass am entferntest gelegenen Punkt (54 km) der horizontale Positionsfehler unter 4 cm (HPE) und der vertikale unter 15 cm (jeweils für  $1\sigma$ ) lag. Diese Genauigkeiten gelten jedoch nur für die Ergebnisse, für die bei der Positionsbestimmung auch eine Mehrdeutigkeitsfixierung erreicht wurde.

Der Anteil der Positionslösungen, für die eine Fixierung



**Abb. 25: Anteil von PDGPS-Positionslösungen mit fixierten Mehrdeutigkeiten in Abhängigkeit von der Basislinienlänge**

## 6. PNT-UNIT

### 6.1 Status und Herausforderungen

Wie Kapitel 3 dargelegt, besteht das Bordelement zur Bereitstellung von Positions-, Navigations- und Zeitdaten aus einer Vielzahl von Sensoren wie z.B. GPS-Empfänger für die PVT-Daten, Gyro-Kompass für den rechtweisenden Steuerkurs oder Speed Log für die Geschwindigkeit über Grund. Solche Einzelsensoren sind meistens nicht in der Lage, die Integrität ihrer Datenprodukte in Echtzeit zu charakterisieren. Wenn folglich die PNT-Daten nur durch Einzelsensoren zur Verfügung gestellt werden, muss dann mehr oder minder der Nautiker oder Kapitän die Qualitätsbewertung der Daten übernehmen. Ist das SOLAS-Schiff mit einem Integrierten Navigationssystem (INS)

ausgestattet, so wird eine kombinierte Nutzung der Sensordaten und damit eine Bewertung ihrer Integrität möglich. Bisherige INS-Systeme nutzen Plausibilitäts- und Konsistenztests, um die Integrität von Daten abzuschätzen. Plausibilitätstests prüfen auf Wertebereichsverletzungen, indem z.B. aktuell gemessene Geschwindigkeiten mit der maximal möglichen Geschwindigkeit des Schiffes verglichen werden. Konsistenztests beruhen auf einem gemeinsamen Messmodell und prüfen die Widerspruchsfreiheit der Werte, indem z.B. Positionsergebnisse redundanter Datenquellen oder die Stimmigkeit zwischen Zeit- und Geschwindigkeitsangaben und aufeinanderfolgenden Positionsergebnissen überprüft werden. Im Rahmen der „e-navigation“-Strategie erfasste Nutzeranforderungen zielen jedoch auf die Implementierung von Daten- und Systemintegrität, um die Zuverlässigkeit aller navigationsrelevanter Daten – möglichst in Bezug auf die erreichte Genauigkeit – bestimmen und dem nautischen Personal anzeigen zu können. Diese Anforderung wird auch von einem INS derzeit nicht erfüllt.

Ausgehend von dem PNT-Systemkonzept (Kapitel 3) bestand die Herausforderung, eine PNT-Unit als bordseitiges Element des maritimen PNT-Systems zu entwickeln, die in der Lage ist, dem Nutzer genauigkeitsbezogene Integritätsinformationen zur Verfügung zu stellen. Als ein dafür geeigneter Lösungsansatz wurde die kombinierte Verarbeitung aller PNT-relevanten Messungen mit Methoden der Daten- bzw. Sensorfusion identifiziert. Durch Aufbau eines echtzeitfähigen Demonstrators sollte die Grundlage für den experimentellen Nachweis der Machbarkeit einer störstfesten PNT-Datenbereitstellung auf Basis des entwickelten PNT-Gesamtkonzeptes geschaffen werden.



Abb. 26: GNSS-Empfängergruppe der PNT-Unit

### 6.2 Sensoren der PNT-Unit (V1.0)

Für eine erste Realisierung der PNT-Unit (V1.0) wurden die in Abb. 27 links aufgelisteten Sensoren ausgewählt. Die in Abb. 26 exemplarisch gezeigte GNSS-Empfängergruppe der PNT-Unit verfügt über einen 4. GNSS-Empfänger, der in der Regel als Referenzempfänger mitgeführt wird.

Sensors	Position			Navigation						Timing
	Longitude	Latitude	Altitude	Velocity			Attitude			
				SOG	COG	ROT	jx	jy	jz	
3 x GNSS	XX	XX	XX	XX	XX	X	X	X	X	XX
Gyro						X				X
SDME				X						
IMU	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX

Abb. 27: Übersicht der für die PNT-Unit V1.0 eingesetzten Sensoren und ihrem Nutzen hinsichtlich der Lieferung von PNT Parametern (x) bzw. deren Lieferung incl. Redundanz (xx)

Ziel der Sensorauswahl war es, dass für alle relevanten PNT-Parameter, d.h. Position, Geschwindigkeit über Grund (SOG), Kurs über Grund (COG), Drehrate (ROT), dreidimensionale Lage (Roll-, Pitch- und Yaw-Winkel) sowie Zeit, jeweils mindestens 2 redundante Messungen (dann gekennzeichnet mit „xx“) genutzt werden können. Weitestgehend sollten dafür maritime Standardsensoren wie GPS-Empfänger, Gyro und SDME genutzt werden. Mit den 3 auf dem Schiff betriebenen geodätischen GNSS-Empfängern ist eine redundante, jedoch nicht unkorrelierte Bestimmung der Positions-, Geschwindigkeits- und Zeitdaten (PVT) mit GNSS ermöglicht. Durch geeignete

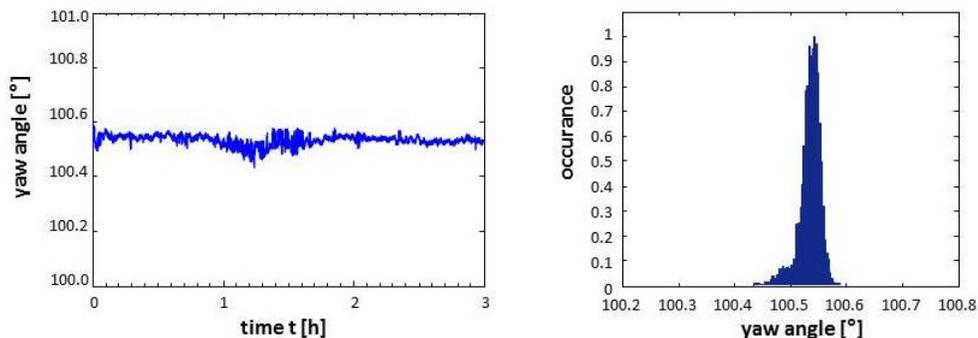
Anordnung der empfängerspezifischen Antennenstandorte wurde abgesichert, dass bei gemeinsamer Nutzung aller GNSS-Daten auch die 3-dimensionale Lage des Schiffes bestimmt werden kann. Dafür werden phasenbasierte „GNSS-Kompass“-Algorithmen eingesetzt. Eine Inertiale Messeinheit (IMU = Inertial Measurement Unit) stellt Drehraten und Beschleunigungen in allen 3 Bewegungsrichtungen zur Verfügung. Unter Nutzung von entsprechenden „Strap-Down“-Integrationsverfahren und geeigneter Initialisierung wird es dadurch möglich, die PNT-Daten auch im Fall von kurzzeitigen GNSS-Ausfällen zu bestimmen.

Die durch diese Sensorauswahl geschaffene Redundanz für alle PNT-Parameter bildet letztlich die benötigte Datengrundlage für die Entwicklung von datenfusionsbasierten Integritätsmonitoringverfahren.

### 6.3 Sensorcharakterisierung

Um die Daten verschiedenster Sensoren in Datenfusionsverfahren effektiv nutzen zu können, werden Fehlermodelle für jeden einzelnen Sensor benötigt. Daher wurden innerhalb des Projektes alle eingesetzten Sensoren hinsichtlich ihres Fehlerverhaltens untersucht und charakterisiert. Beispielhaft sollen hier die Bestimmung des rechtweisenden Steuerkurses (Heading) mit Hilfe des GNSS-Kompasses und die Charakterisierung der Fehler der Inertialsensorik dargelegt werden.

Zur Charakterisierung des GNSS-Kompasses wurden quasistatische Daten, die mit dem BSH-Forschungsschiff „DENEb“ im Stadthafen von Rostock über einen Zeitraum von 3h aufgezeichnet wurden (Abb. 28, linke Grafik), ausgewertet. Bei diesen Messungen betrug der Abstand der zwei hierbei genutzten GNSS-Antennen ca. 50 m. Da eine leichte Bewegung des Schiffes auch am Pier nicht ausgeschlossen werden kann, stellt die in Abb. 28 (rechte Grafik) dargestellte Verteilungsfunktion eine eher pessimistische Abschätzung der tatsächlichen Fehlerverteilung dar. Die Standardabweichung  $\sigma$  wurde mit  $0.02^\circ$  bestimmt und stellt eine gute Basis für die Festlegung eines konsistenten Schiffskordinatensystems dar.



**Abb. 28: Quasistatische Bestimmung des Heading (yaw) zur Ableitung von Genauigkeitsaussagen für den GNSS-Kompass: Zeitverlauf des Heading (links) und zugeordnete Verteilungsfunktion (rechts)**

Bei der eingesetzten IMU handelte es sich um eine vom Typ „tactical grade“: iVRU FCAI der Firma iMAR. Typische IMU-Fehler sind Biasfehler, Skalenfaktorfehler, und Kreuzkopplungsfehler. Für die in diesem Projekt eingesetzte IMU ist nur der Biasfehler relevant. Der Biasfehler lässt sich in eine statische Komponente und eine dynamische Komponente unterteilen. Die statische Komponente, die auch als fester Bias bekannt ist, umfasst die „run-to-run“-Variation der integrierten Sensoren sowie einen nach erfolgter Kalibrierung verbleibenden festen Bias. Für die Charakterisierung des dynamischen Bias („in-run“- Bias) wurden über 24h IMU-Daten im statischen Betrieb aufgenommen und einer sogenannten Allan-Varianz Analyse unterzogen. In der Abb. 29 ist die Abhängigkeit der Allan-Varianz von der verwendeten Mittelungszeit  $t$  für die drei Drehratensensoren der IMU dargestellt. Man erkennt, dass mit zunehmender Mittelungszeit  $t$  die Allan-Varianz zunächst erst einmal abnimmt. Für ein perfektes weißes Rauschen sollte sich mit  $\sigma \approx 1/\sqrt{\tau}$  eine Gerade ergeben, die in der doppellogarithmischen Darstellung einen Anstieg von  $-1/2$  aufweist. Man erkennt, dass sich insbesondere für kleine Mittelungszeiten die „Allan-Varianzen“ sehr gut durch eine solche Gerade beschreiben lassen. Bei größeren Mittelungszeiten  $t$  steigt die Allan-Varianz

aufgrund der Bias-Instabilität des Sensors dagegen wieder an. Eine Standarddefinition der Bias-Stabilität von Inertialsensoren ist durch das Minimum in der Allan-Varianz-Kurve beschrieben. Die FOG-basierten Drehratensensoren iVRU FCAI besitzen somit eine Stabilität von ca. 0.02 °/h bei einer Mittelungszeit von  $\sim 1/2$ h.

#### 6.4 Prozessierungsketten der PNT Unit (V1.0)

Wie in Kap. 3.4 dargelegt, baut sich die PNT-Unit aus einem Set von parallelen Prozessierungskanälen auf, um operationell bedingt verschiedene Genauigkeits- und Integritätslevel bedienen zu können. Ihre Spezifikation ist, wie bereits im Kapitel 3.2

ausgeführt, eine Aufgabe, die im Rahmen des maritimen PNT-Systemkonzepts zu beantworten ist. Ein einzelner Kanal repräsentiert ein spezifisches Verfahren, das durch die PNT-Unit effektiv für die Bestimmung der PNT- und Integritätsdaten genutzt wird, um eine spezifische Performanzklasse bedienen zu können. Für die PNT-Unit V1.0 wurden folgende Prozessierungsketten<sup>1</sup> implementiert:

- (1) GPS Single Point Positioning (SPP);
- (2) GPS Single Point Positioning (SPP) inklusive Receiver Autonomous Integrity Monitoring (RAIM)
- (3) Codebasiertes DGPS unter Nutzung des IALA Beacon DGNSS (CDGPS)
- (4) Phasenbasiertes DGPS unter Nutzung des MGBAS-Services (PDGPS)
- (5) Extended Kalman Filter: lose (loosely) gekoppelt IMU + SPP inclusive RAIM + GNSS-Kompass
- (6) Extended Kalman Filter: eng (tightly) gekoppelt IMU + GPS + GNSS-Kompass
- (7) Extended Kalman Filter: lose gekoppelt IMU + CDGPS + GNSS-Kompass
- (8) Extended Kalman Filter: lose gekoppelt IMU + PDGPS + GNSS-Kompass

Die Prozessierungsketten 1-4 umfassen reine GNSS-basierte Verfahren zur Positions-, Geschwindigkeits-, und Zeitbestimmung (PVT), wobei Verfahren 3 und 4 dafür Ergänzungsdaten nutzen, die durch landseitige Dienste bereitgestellt werden. Die Prozessierungsketten 1 und 3 entsprechen dem im maritimen Bereich genutzten Stand der Technik und sind in den Performanzstandards als Verfahren für maritime GNSS-Empfänger spezifiziert. Das in der Prozessierungskette 2 genutzte RAIM ist ein rein GNSS-basiertes Integritätsmonitoringverfahren, das die Detektion von fehlerbehafteten Satellitensignalen und ihren Ausschluss von der Positionierung umsetzen soll. Es nutzt die messtechnische Redundanz aus, die bei gleichzeitiger Verfügbarkeit von mindestens 6 Satellitensignalen entsteht. Für das Projekt wurde ein für sicherheitskritische Luftfahrtanwendungen entwickeltes RAIM-Verfahren hinsichtlich maritimer Anforderungen adaptiert und implementiert.



Abb. 30: HW des Demonstrators der PNT-Unit (V1.0)

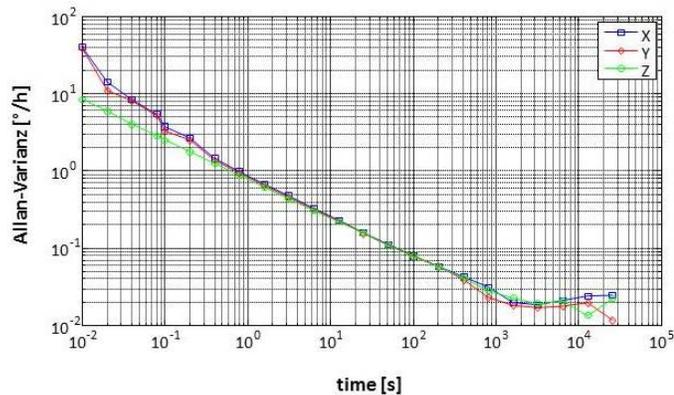


Abb. 29: Allan Varianz -Analyse für die Drehratensensoren der im Projekt verwendeten IMU: iVRU FCAI

<sup>1</sup> In der Regel werden GPS-Signale in den Verfahren verwendet. Im Fall des GNSS-Kompasses werden derzeit auch zusätzlich GLONASS-Signale genutzt.

Der in den Prozessierungsketten 5 bis 8 genutzte Extended Kalman Filter (EKF) ist die einfachste Form eines Bayes'schen Filters, bei dem normalverteilte Fehler und ein näherungsweise linearisiertes Systemmodell angenommen werden. Allgemein unterscheidet man zwischen einer lose und einer eng gekoppelten GNSS-IMU-Integration. Bei der lose gekoppelten Integration fusioniert man die Positions- und Geschwindigkeitsdaten des GNSS-Sensors mit den IMU-Daten. Bei einer eng gekoppelten Integration werden die GNSS-Rohdaten, also die code- und trägerphasenbasierten Entfernungsmessungen zu den einzelnen Satelliten, mit den IMU-Daten fusioniert. Der Vorteil der losen Kopplung besteht in der Einfachheit der Realisierung und in der Unabhängigkeit des Fusionsverfahrens vom genutzten GNSS- bzw. DGNSS-Verfahren. Das lose Verfahren wurde für die drei verwendeten GNSS/DGNSS-Verfahren SPP, CDGPS und PDGPS implementiert. Die eng gekoppelte GNSS-IMU-Integration ist sowohl verfahrenstechnisch komplexer als auch rechentechnisch aufwendiger. Dieses Verfahren ermöglicht jedoch eine Integritätsüberwachung auf Sensorrohdatenebene. Somit können fehlerhaftete Satellitensignale z.B. unter Einsatz eines sogenannten Innovationsfilters [Grooves 2007] detektiert und von der weiteren Prozessierung ausgeschlossen werden.

Die Prozessierungsketten wurden letztlich auf Basis des in Abschnitt 4 beschriebenen C++ Real-Time Frameworks implementiert und auf unterschiedlicher Hardware getestet. Für den Einsatz auf dem Schiff wurde ein Single-Bord System (Boxer TF AEC 6637) ausgewählt, welches sich aufgrund seiner Kompaktheit und Robustheit als besonders geeignet herausgestellt hat (siehe Abb. 30). Die gewählte HW-Lösung diente vor allem dazu, die PNT-Unit unter realen Bedingungen auf einem Schiff testen und validieren zu können. Unter Beachtung des PNT-Systemkonzeptes liegen jedoch die entscheidenden Komponenten der PNT-Unit in den SW-Lösungen (Prozessorketten), die auch Bestandteil zukünftiger INS sein können.



Abb. 31: Snapshot der Webbrowser basierten PNT Unit Visualisierung

Um die Ausgaben und Ergebnisse der Prozessierungsketten grafisch darzustellen, wurde ein grafisches Nutzerinterface (GUI) entwickelt, das über Webbrowser läuft und bedient wird (Abb. 31). Das GUI ermöglicht es bereits während diverser Messkampagnen eine unmittelbare Rückmeldung bzgl. der errechneten PNT-Daten zu bekommen. Das grafische Tool gibt die Ergebnisse der einzelnen Prozessierungsketten aus und verfügt über weiterführende Funktionen zur Verifikation von Zwischenergebnissen der PNT-Datenprozessierung.

## 6.5 Ergebnisse der experimentellen Validierung

Datenbasis für die hier dargestellte experimentelle Validierung ist eine 8-stündige Messfahrt, die mit dem Schiff „Baltic Taucher II“ im Bereich des Rostocker Hafens incl. Stadthafen und Warnow durchgeführt wurde (siehe Abb. 32). Während dieser Messfahrt wurden die PNT-Daten der 8 Prozessierungsketten in Echtzeit berechnet und für weitere Validierungen abgespeichert. Um die erzielte Positionsgenauigkeit bewerten zu können, wurde zudem eine Referenztrajektorie unter Einsatz der RTK-Postprozessierungssoftware Justin bestimmt.

### ERGEBNISSE DER SINGLE POINT POSITIONIERUNG (SPP)

In einem ersten Schritt wurde die horizontale Positionsgenauigkeit der auf GPS L1 Code basierten Single Point Positionierung ausgewertet. Die linke Grafik in Abb. 33 stellt die kumulierte Fehlerverteilungsfunktion des horizontalen Positionsfehlers dar. Erkennbar ist, dass 95% der bestimmten Positionen einen horizontalen Positionsfehler unter 2.16 m aufweisen. Dies stellt eine sehr gute Genauigkeit für SPP-Verfahren dar. Für sicherheitskritische Anwendungen ist die Angabe eines 95%-Fehles jedoch nicht ausreichend. Vielmehr gilt es, dass signifikante Ausreißer in der Positionsgenauigkeit (siehe rechtes Bild von Abb. 33) erkannt und als Integritätsverlust angezeigt werden. Diese können ein Risiko für eine sichere Schiffsnavigation darstellen und Kollisionen wie auch Grundberührungen zur Folge haben.



Abb. 32: Schiffstrajektorie der Messfahrt vom 9.4.2014

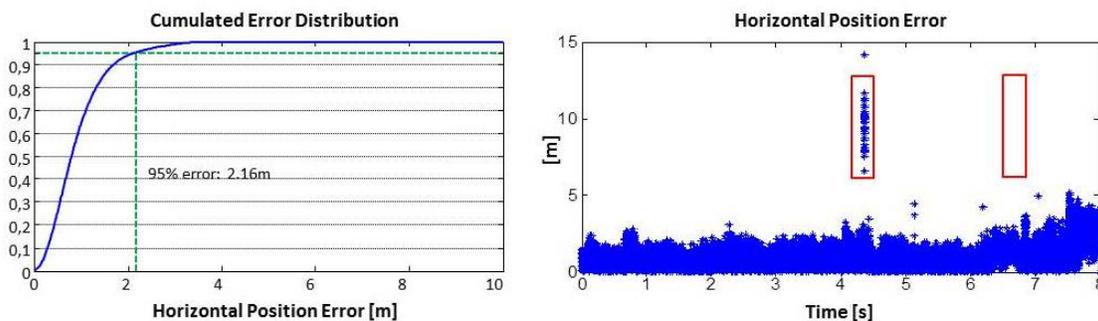
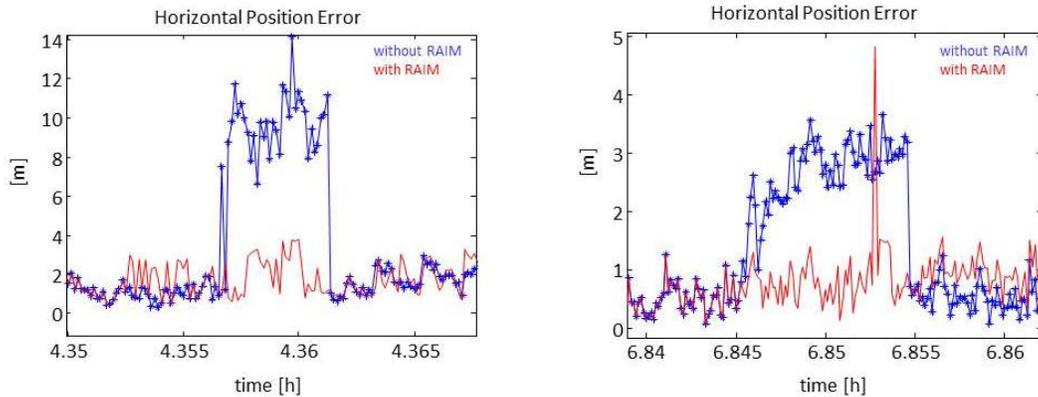


Abb. 33: Horizontaler Positionsfehler des GPS-basierten SPP-Verfahren: kumulierter Verteilungsfunktion (links) und zeitlicher Verlauf (rechts)

### DETEKTION UND AUSSCHLUSS VON FEHLERN DURCH DEN EINSATZ VON RAIM

Eine detaillierte Analyse in der SPP-Positionierung zeigte, dass Ausreißer in der Positionsgenauigkeit von Sprüngen in den kodebasierten Entfernungsmessungen von einzelnen Satelliten verursacht wurden. Ein Fehler-, Detektions- und Ausschlussverfahren, welches ein inhärenter Bestandteil von RAIM-Verfahren ist, sollte daher prinzipiell in der Lage sein, solche fehlerhaften Satellitensignale zu detektieren und von der Positionslösung auszuschließen.

In der Abb. 34 sind exemplarisch 2 Ausreißer vergrößert dargestellt. In der linken Grafik erkennt man einen temporären Anstieg des Positionsfehlers um 10-15m in der reinen SPP-Lösung (blau). Wird RAIM genutzt, so werden die fehlerhaften Messungen von der Positionsbestimmung ausgeschlossen, der Positionsfehler (rot) verbleibt im Bereich von 1-3 m.



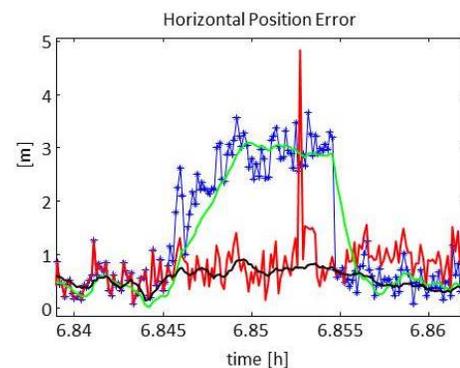
**Abb. 34: Horizontaler Positionsfehler SPP ohne RAIM (blau) und mit RAIM (rot) für zwei Zeitabschnitte mit Positionssprüngen in der SPP Lösung**

Bei einem anderen Beispiel (rechte Grafik) wird an dem kurzzeitigen Positionsfehler von 3-4 m deutlich, dass es einem RAIM-Verfahren nicht immer gelingt, fehlerbehaftete Navigationssignale von der Positionsbestimmung auszuschließen.

#### **DETEKTION UND AUSSCHLUSS VON FEHLERN DURCH GNSS/IMU-BASIERTE EKF-VERFAHREN**

Wie bereits in 6.4 dargelegt, ermöglicht ein eng gekoppelter (tightly coupled) EKF ein Integritätsmonitoring auf Sensorrohdatenebene und die Detektion und den Ausschluss von fehlerbehafteten GNSS-Satellitensignalen.

In Abb. 35 sind die Positionsfehler für den lose gekoppelten EKF IMU + SPP ohne RAIM und den eng gekoppelten EKF IMU + GNSS zusammen mit den Positionsfehlern der SPP mit und ohne RAIM für die gleichen Zeitraum wie in Abb. 34 (rechte Grafik) dargestellt. Man erkennt, dass der Innovationsfilter im eng gekoppelten EKF IMU + GNSS in der Lage ist, das fehlerhafte Satellitensignal zuverlässig auszuschließen, so dass für die Positionsbestimmung die beste Genauigkeit erreicht werden kann. Der lose gekoppelte EKF IMU + SPP ohne RAIM hingegen verringert zwar im Allgemeinen das Rauschen der SPP-Lösung, jedoch bei einem länger anhaltenden Fehler von  $\Delta t > 10s$  folgt die Kurve der fehlerbehafteten SPP-Lösung.



**Abb. 35: Horizontale Positionsfehler für lose (grün) und eng gekoppelten EKF (schwarz) im Vergleich zu SPP mit (rot) und ohne (blau) RAIM**

#### **ABSCHÄTZUNG DER AKTUELL ERREICHBAREN POSITIONSGENAUIGKEIT MITTELS RAIM**

In dem in der PNT-Unit (V1.0) implementierten RAIM-Algorithmus wird der sogenannte Horizontale Protection Level (HPL) in Echtzeit bestimmt. Per Definition stellt der HPL eine Abschätzung des horizontalen Positionsfehlers unter Berücksichtigung eines verbleibenden Integritätsrestrisikos dar. Die IMO hat in [IMO-A.915(22)] das Integritätsrestrisiko für Hafen- und küstennahe Anwendungen mit  $10^{-5}$  festgelegt. Die Integrität der aktuellen Positionslösung ist gewährleistet, wenn der HPL bestimmt werden konnte und unter dem festgelegten Alarmpegel liegt. Dieser ist für küstennahe Anwendungen mit 25 m und für Hafenanwendungen mit 2.5m in [IMO-A.915(22)] spezifiziert. In Abb. 36 ist in einem Stanford Diagramm der in Echtzeit ermittelte HPL dem horizontalen Positionsfehler des SPP-Verfahrens gegenübergestellt.

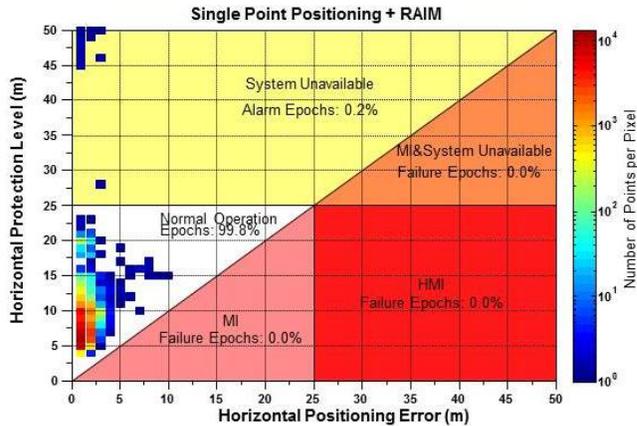


Abb. 36: Stanford Diagramm für Single Point Positioning mit RAIM

Man erkennt, dass der in Echtzeit auf dem Schiff abgeschätzte HPL immer größer ist als der in der Postprozessierung ermittelte wahre Positionsfehler. Für das betrachtete Zeitintervall der 8-stündigen Messfahrt konnte gezeigt werden, dass der HPL seine Funktion als obere Schranke des wahren Fehlers folglich erfüllt hat. Das ursprünglich für die Luftfahrt entwickelte RAIM-Verfahren kann in diesem Fall auch im maritimen Bereich trotz der stark unterschiedlichen Signalumgebung (z.B. durch das Schiff bzw. der Meeresoberfläche verursachte Mehrwegeeffekte) angewendet werden. Weiterhin ist ersichtlich, dass der HPL in 99.8% der Zeit unterhalb des für küstennahe Anwendungen spezifizierten Alarmpegels von 25m lag. Lediglich in 0.2% der Fälle, wurde eine

ausreichend genaue Positionslösung durch den HPL als nicht nutzbar klassifiziert.

Höhere Genauigkeitsanforderungen, bei denen die spezifizierten Alarmpegel von wenigen Metern (Hafenmanöver) bis in den dm-Bereich (automatisches Anlegen) reichen, können von SPP-Verfahren in Kopplung mit RAIM nicht erfüllt werden. Um solche Genauigkeiten mit dem GNSS der 1. Generation erreichen zu können, müssen differentielle Positionierungsverfahren eingesetzt werden, für die geeignete Ergänzungsdaten durch DGNSS-Diensten bereitzustellen sind.

### Leistungsfähigkeit von phasenbasierten DGPS-Verfahren

Für hochgenaue Hafenanwendungen wurde ein phasenbasiertes DGPS-Verfahren implementiert, das die Korrekturdaten des MGBAS-Dienstes (siehe Kap. 5.2) im Hafen von Rostock nutzt. Wie bereits im Kap. 5.2 und 5.4 ausgeführt, werden Positionsgenauigkeiten im dm-Bereich nur dann erreicht, wenn das Positionsverfahren in der Lage war, die ganzzahligen Mehrdeutigkeiten der genutzten Phasenmessungen zu fixieren.

Wenn die Mehrdeutigkeiten fixiert werden konnten (Abb. 37, linke Grafik), konnte bordseitig die horizontale Position mit einer Genauigkeit von wenigen Zentimetern während der ganzen Messfahrt (8h) bestimmt werden. War die Mehrdeutigkeitsfixierung nicht erfolgreich (Abb. 37, rechte Grafik), so erhöhte sich der Positionsfehler auf bis zu max. 4 m.

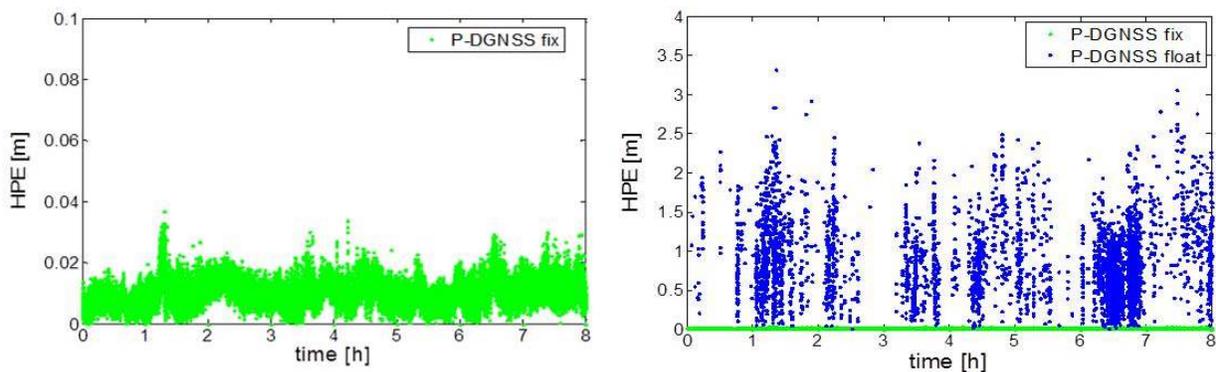


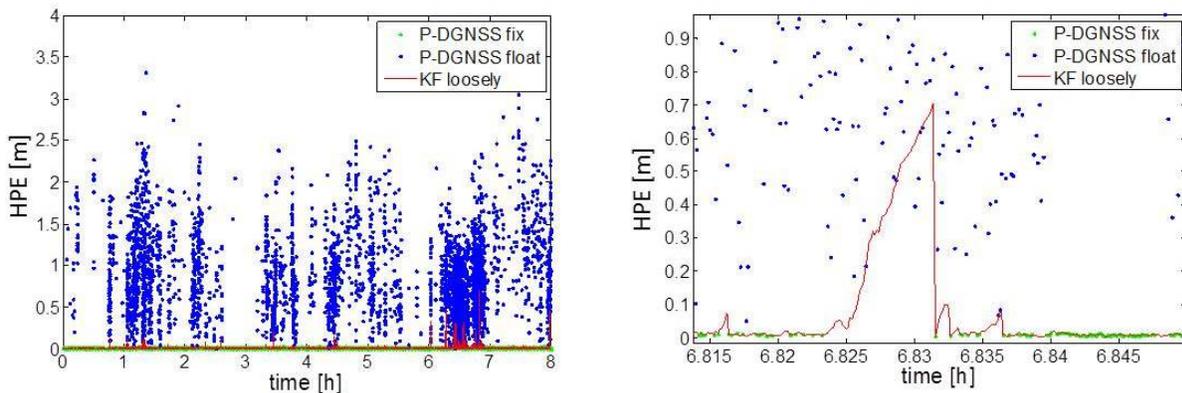
Abb. 37: Horizontaler Positionsfehler für phasenbasiertes DGPS: bei fixierten Mehrdeutigkeiten (links) und mit float-Lösungen (rechts)

Bemerkenswert ist, dass die Wahrscheinlichkeit für fixierte Mehrdeutigkeiten bei 93% lag und damit deutlich über den Werten der landseitigen Analyse (Kap. 5.4) lag. Bedingt durch den Charakter eines Hafens mit diversen

Abschattungen sowie der Tatsache, dass ein relativ hoher Aufwand getrieben werden müsste, um mittels eines erweiterten MGBAS eine Fixrate über 99% zu erzielen, erscheint der reine Einsatz von phasenbasierten DGNSS für eine hochgenaue Positionsbestimmung für sicherheitskritische Anwendungen als unzureichend. Insofern ist daher auch hier eine Kopplung der hochgenauen, aber diskontinuierlichen DDGPS-Positionslösung mit der intrinsisch zuverlässigen, aber zeitlich langsam wegdriftenden Inertialsensorik mit Hilfe z.B. eines lose gekoppelten Extended Kalman Filters ein sinnvoller Ansatz, um kontinuierlich zuverlässige Lösungen zu erhalten.

In Abb. 38 ist der horizontale Positionsfehler des lose gekoppelten EKF IMU + PDGPS + GNSS Kompass (rote Linie) dargestellt. Man erkennt, dass der Positionsfehler während der 8h Messfahrt immer kleiner als 1 Meter war. Der größte Positionsfehler ist auf der rechten Seite noch einmal vergrößert dargestellt. Innerhalb von 30 s war es dem PDGPS-Verfahren nicht möglich, die Mehrdeutigkeiten der Phasenmessungen zu fixieren. Während dieser Zeitspanne basierte die Positionsbestimmung somit allein auf der Integration der Beschleunigungen und Drehraten der IMU. Die Positionsdrift von rund 0.7 m für einen Zeitraum von 30s ist für die eingesetzte tactical grade IMU ein guter Wert, der durch eine gute Initialisierung und eine optimale Schätzung der IMU-Biasfehler erreicht werden konnte.

Durch die Prozessierungskette eines lose gekoppelten EKF IMU + pDGPS + GNSS Kompass konnte somit in diesem Fall eine Verfügbarkeit der Positionslösung von 100% für eine Genauigkeit von < 1m erreicht werden. Diese Prozessierungskette stellt somit einen vielversprechenden Lösungsansatz für hochgenaue Hafenanwendungen dar.



**Abb. 38: Zeitlicher Verlauf des Horizontalen Positionsfehlers für pDGPS fix / float Lösungen im Vergleich zu dem lose gekoppelten EKF pDGPS + IMU + GNSS Kompass**

## 7. VERKEHRSLAGERFASSUNG UND BEWERTUNG

### 7.1 STATUS UND HERAUSFORDERUNGEN

Eine essentielle Grundlage, um Kollisionen vermeiden zu können, ist die zuverlässige Erfassung der Verkehrslage. Die aktuelle Verkehrssituation ist aus Sicht des einzelnen Schiffes eindeutig und umfassend beschrieben, wenn die Position und Bewegung des eigenen Schiffes in Relation zur Position und Bewegung anderer Verkehrsteilnehmer unter Beachtung des nutzbaren Verkehrsraums bestimmt werden konnte.

Derzeit beruht die schiffsseitige Erfassung der maritimen Verkehrslage auf RADAR und AIS. Bordseitige RADAR-Geräte strahlen mit einer rotierenden Antenne elektromagnetische Wellen im X-Band (8–12 GHz) bzw. im S-Band (2–4 GHz) ab. Durch den Empfang und die Auswertung reflektierter Signale werden letztlich Entfernung und Richtung anderer Verkehrsteilnehmer bestimmt. AIS wird seit 2004 als Kommunikationsplattform genutzt, um den Datenaustausch von navigationsrelevanten Daten zwischen Schiffen sowie zwischen Schiffen und Land zu ermöglichen. Dafür werden derzeit 2 Kommunikationskanäle im VHF-Band (AIS 1: 161.975 MHz; AIS 2: 162.025 MHz) genutzt. Zu den navigationsrelevanten Daten gehören statische, dynamische und reisebezogenen Daten,

wobei die dynamischen Daten durch bordseitige PNT-Sensoren (u.a. GNSS, Kompass) bereitgestellt werden. Wie jede andere Technik haben auch diese zwei Systeme ganz eigene Stärken und Schwächen.

Der Vorteil von RADAR ist, dass die Detektion anderer Verkehrsteilnehmer mit Hilfe eines bordautark arbeitenden Systems realisiert wird. Deshalb gibt es die Vorgabe der IMO, dass das RADAR als primäres System zur Kollisionsverhütung genutzt werden soll. Jedoch detektiert RADAR auch mehr oder weniger alle Objekte, die Radarstrahlen reflektieren: neben den anderen Verkehrsteilnehmern auch Kaikanten, Wellenberge bis hin zu Vogelschwärmen. Objekte, die sich im Funkschatten anderer Objekte befinden, können wiederum nicht mit RADAR detektiert werden.

Im Vergleich zu RADAR werden die von AIS bereitgestellten Positionen als Absolutwerte angegeben, die in der Regel eine höhere Genauigkeit aufweisen als die relativen RADAR-Positionen. Die Positionen werden mit Funknavigationssystemen wie GPS bestimmt, wobei dafür entweder im AIS-Gerät integrierte oder extern angeschlossene GNSS-Empfänger genutzt werden. Folglich ist die Sicherheitsdiskussion über die Störanfälligkeit von GNSS auch für eine störteste Bereitstellung von AIS-Dateninhalten relevant. Eine korrekte Eingabe von statischen wie auch reisebezogenen AIS-Daten und eine sorgfältige Konfiguration aller navigationsrelevanten Sensoren, die als AIS-Datenquellen dienen, sind Anforderungen, die an das nautische Personal gestellt werden, um eine zuverlässige Bereitstellung von AIS-Dateninhalten abzusichern. Diese Abhängigkeit, der Ausstattungsgrad mit AIS-Geräten sowie die bordseitige Möglichkeit, AIS-Geräte auszuschalten, sind Argumente, dass nach wie vor RADAR als primäres System zur Kollisionsverhütung trotz seiner Leistungsgrenzen angesehen wird.

Eine qualitative Bewertung der Leistungsfähigkeit von Technologien, die für die Verkehrslagebestimmung relevant sind, wurde als ein geeigneter Ausgangspunkt angesehen, um den erreichten Stand der Technik charakterisieren und Entwicklungsaufgaben konsolidieren zu können. In diesem Kontext zu lösende Herausforderungen umfassten die Beschaffung repräsentativer Testdaten sowie die Entwicklung von Validierungsmethoden, um geplante Untersuchungen umsetzen und bestehende Fragen beantworten zu können. Ein Untersuchungsgegenstand war auf die qualitative und quantitative Beschreibung der Stärken und Schwächen von RADAR und AIS ausgerichtet. Damit konnten im Folgeschritt Entwicklungsziele detailliert spezifiziert sowie mögliche Lösungsansätze für eine Fehlerkompensation identifiziert und evaluiert werden. So wurden erste Analysen zu Funktionalität und Leistungsfähigkeit des Radars und dessen Softwaretools „Automatic Radar Plotting Aid“ (ARPA), welches den Nautiker bei der Bestimmung von Geschwindigkeit und Kurs anderer Schiffe unterstützt, durchgeführt. Dabei lag der Fokus auf dem automatischen Erkennen von Zielen, um zukünftig eine automatische Verschneidung von AIS- und RADAR-Daten zur Integritätsbewertung realisieren zu können. Eine weitere Entwicklungsaufgabe widmete sich der möglichst realitätsnahen Fehlermodellierung beider Sensoren. Solche Fehlermodelle stellen z.B. ein notwendiges Element dar, um RADAR- und AIS-Daten effizient für eine umfassende und zuverlässige Bestimmung der Verkehrslage fusionieren zu können.

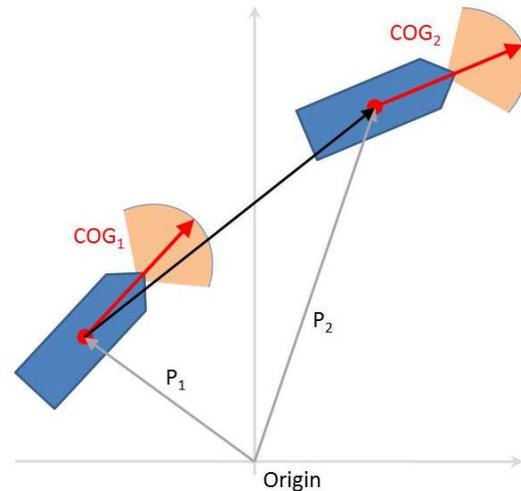
Welche Extraktions- und Fusionsmethoden überhaupt geeignet sind, im Bereich der schiffs- als auch landseitigen Verkehrslageerfassung und -bewertung eingesetzt zu werden, wurde als berechtigte Frage identifiziert. Der Hintergrund der Fragestellung liegt einerseits in der bestehenden Diversität an AIS- und RADAR-Dateneigenschaften, die die Anwendung spezifischer Datenfusionsmethoden verbieten oder die den Einsatz ein spezifisches Datenmanagementmethoden erfordern. Andererseits ist die technische Machbarkeit und Nutzbarkeit verschiedenster Ansätze möglichst frühzeitig und experimentell nachzuweisen, um letztlich Fehlentwicklungen zu vermeiden.

## **7.2 AIS-Plausibilität**

Plausibilitäts- und Konsistenzprüfungen sind in der Praxis genutzte Ansätze, um die Datenqualität insbesondere in solchen Fällen abzuschätzen, wo eine Bestimmung der Genauigkeit und Integrität von Dateninhalten erschwert oder nahezu unmöglich ist. Die Untersuchungen zur Qualität von verkehrsrelevanten AIS-Daten begannen folglich mit der Entwicklung von geeigneten Prüfverfahren, die anhand des zeitlichen Verhaltens von AIS-Daten eine Plausibilitätsbewertung vornehmen.

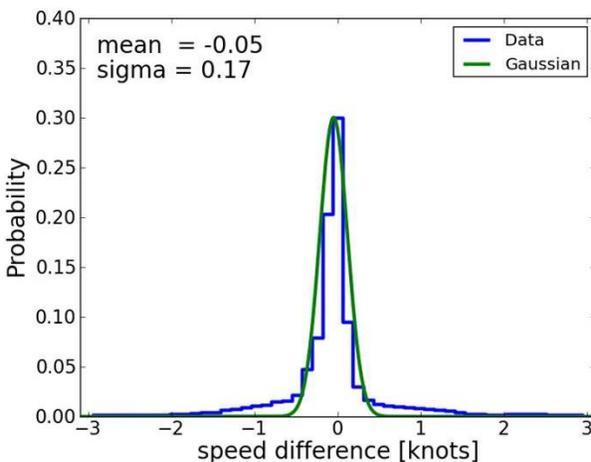
Die entwickelten Methoden beruhen auf der Annahme, dass das Bewegungsverhalten von Schiffen über kurze Zeiträume bzw. kleine Strecken durch ein lineares Bewegungsmodell beschrieben werden kann. Um diese Annahme nicht zu verletzen, wurden nur AIS-Nachrichten untersucht, deren aufeinanderfolgenden Schiffspeditionen nicht weiter als 500 m voneinander entfernt waren. Die 500 m Grenze wurde nur von wenigen AIS Nachrichten überschritten, so dass durch diese Annahme keine signifikanten Einschränkungen für die Analyse entstanden.

Die Qualitätsuntersuchungen fokussierten sich auf dynamische AIS-Daten wie Geschwindigkeit über Grund (SOG), Kurs über Grund (COG), rechtweisender Steuerkurs (THDG) sowie die Updaterate. Abb. 39 zeigt schematisch, wie zwei aufeinanderfolgende AIS-Nachrichten eines Verkehrsteilnehmers zeitlich mit seiner Position und Bewegung assoziiert sind. So kann aus zwei aufeinanderfolgenden Positionen unter Beachtung ihres Zeitbezugs der Durchschnittswert der SOG als auch der COG berechnet werden. Der COG beschreibt im Fall von kleinen Strömungen und vorwärtsfahrenden Objekten auch den THDG des Schiffes. Prinzipiell sind immer Abweichungen zwischen übertragenen und abgeleiteten Werten spezifischer AIS-Daten zu erwarten. Diese resultieren aus dem linearen Modellansatz, dem Fehlerverhalten des Messverfahrens und Genauigkeitsgrenzen der numerischen Darstellung der Daten. Für den Fall, dass die gemessenen und abgeleiteten Werte sehr stark voneinander abweichen, werden die betreffenden Daten als nicht plausibel eingestuft.



**Abb. 39: Schematische Darstellung der Schiffsbewegung in Bezug auf aufeinanderfolgende AIS-Nachrichten**

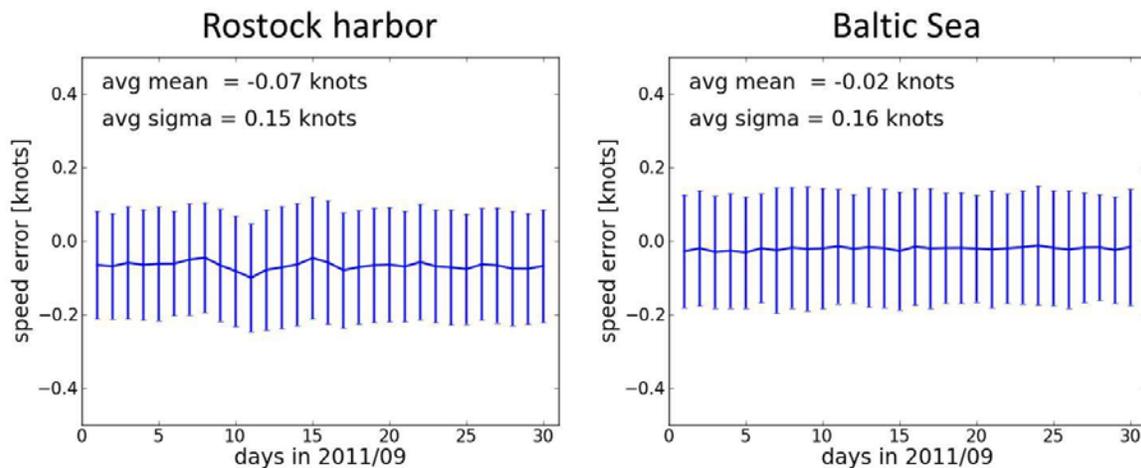
Mehr als 100 Millionen AIS-Nachrichten, die von der Helsinki Kommission (HELCOM) im Ostseeraum gesammelt und archiviert wurden, konnten als Datenbasis für die durchgeführte Plausibilitätsstudie genutzt werden. Abb. 40 zeigt das Histogramm der SOG-Differenzen, die am 13.



**Abb. 40: Histogramm der Differenzen zwischen übertragenen und abgeleiteten SOG-Werten (blau) und der bestmögliche Fit einer Gaußverteilung (grün).**

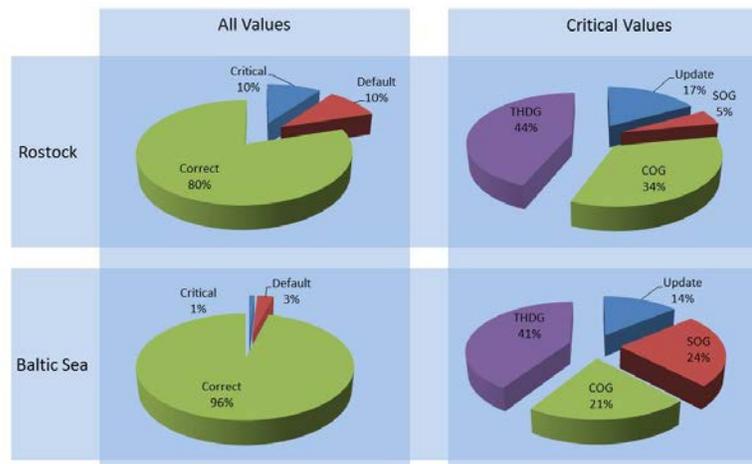
September 2011 beobachtet wurden. Aus dieser Grafik lässt sich ableiten, dass die Abweichungen in 90% der Fälle weniger als 0.35 Knoten (doppelte Standardabweichung) betragen. Jedoch konnten auch deutlich größere Abweichungen von mehreren Knoten an diesem Tag beobachtet werden. Unter der Annahme, dass das Histogramm gut die aus der Linearisierung resultierenden Fehler abbildet, sind derartige Ausreißer eher als ein Indiz für eine schlechte Sensorqualität anzusehen. Derartig kritische Werte können möglicherweise auch zu Fehlern bei der Verkehrslageeinschätzung führen.

Langzeitanalysen zeigten, dass pro Tag ermittelte statistische Kenngrößen der analysierten Abweichungen kaum innerhalb eines Monats variieren (Abb. 41). Auch lassen sich keine signifikanten Unterschiede, wie anhand der SOG-Abweichungen beispielhaft dargestellt, zwischen Ergebnissen im Rostocker Hafen und auf der Ostsee erkennen.



**Abb. 41:** Zeitlicher Verlauf der pro Tag bestimmten Mittelwerte und Standardabweichungen der SOG-Differenzen im September des Jahres 2011: im Rostocker Hafen (links) und auf der Ostsee (rechts)

Bei der Auswertung des gesamten Datensatzes für den Monat September wurde neben den kritischen Werten auch die Häufigkeit von „Default“-Werten analysiert. Wie bereits ausgeführt, werden Ausreißer, die sehr stark von der linearen Prädiktion abweichen, als kritische Werte deklariert (siehe dazu auch Heymann et. al. 2012). Wenn im Gegensatz dazu „Default“-Werte übertragen werden, markiert der AIS-Sender, dass ihm die eigentlichen Messwerte beim Erstellen der AIS-Nachricht nicht zur Verfügung standen. Mögliche Ursachen dafür können nicht ordnungsgemäß angeschlossene als auch fehlerhaft arbeitende Sensoren sein. In der Gesamtstatistik ist erkennbar (Abb. 42), dass kritische als auch „Default“-Werte mit einer deutlich erhöhten Wahrscheinlichkeit im Rostocker Hafen auftraten. Eine erhöhte Anzahl von „Default“-Werten in Hafengebieten lässt sich mit dem Abschalten gewisser Sensorik im festgemachten Zustand erklären. Eine erhöhte Wahrscheinlichkeit von kritischen Werten resultiert aus der Tatsache, dass die Ungenauigkeit von GNSS-Positionen sich stärker auf abgeleitete Größen wie SOG und COG auswirkt, wenn – wie in Hafengebieten zu erwarten – die Verkehrsteilnehmer eine geringere Dynamik aufweisen. Ob dass die alleinige Ursache ist oder nicht, ist durch Folgeuntersuchungen nachzuweisen.



**Abb. 42:** Statistische Auswertung aller AIS-Nachrichten der HELCOM Datenbank für den Monat September des Jahres 2011

In Zusammenarbeit mit dem Projekt „SaMariS“ wurde ein in Echtzeit arbeitender Prozessor entwickelt, der in der Lage ist, die Plausibilität von AIS-Daten in Echtzeit zu überwachen und zu bewerten. Dieser wird im Rahmen des DLR-Experimentalsystems genutzt, um AIS-Daten hinsichtlich ihrer Verwendbarkeit für eine Verkehrslagebestimmung im Forschungshafen Rostock zu bewerten. Dazu werden die mit einem eigenen AIS-

Empfänger gewonnenen Daten nach Neustrelitz übermittelt, wo sie mit Hilfe des Prozessors hinsichtlich ihrer Plausibilität analysiert werden. Eine Webapplikation (Abb. 43) dient dazu, dem Nutzer über die aktuelle Verfügbarkeit und Qualität von AIS-Daten zu informieren.

### 7.3 Automatische Radarbildfassung

Eine automatisierte Integritätsbewertung von verkehrslagerelevanten Daten verschiedenster Sensoren erfordert, dass diese automatisiert bereitgestellt und verarbeitet werden können. Eine durchgeführte Performanzanalyse des ARPA-Sensors im automatischen Zielerkennungsmodus zeigte, dass die Leistungsfähigkeit existierender ARPA-Systeme bei der automatisierten Objekterkennung unzureichend ist, um eine automatische Fusion von AIS- und RADAR-Daten und darauf aufbauend eine Integritätsbewertung von Verkehrslagebildern zu ermöglichen. Aus diesem Grund wurde es notwendig, nach alternativen Lösungsansätzen zu suchen, mit denen eine RADAR-basierte Objekterkennung und -verfolgung verbessert werden könnte.

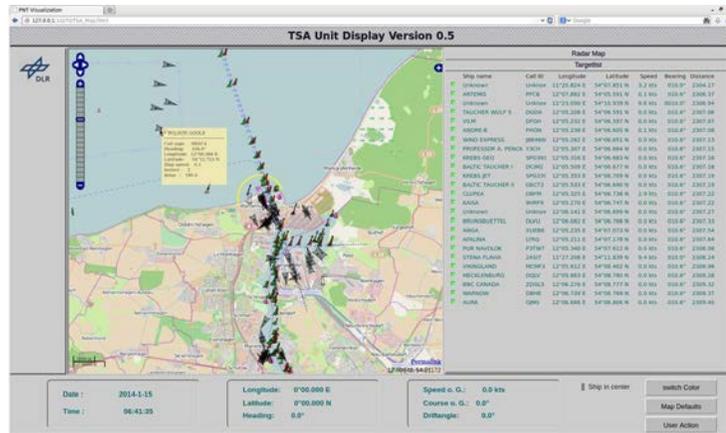


Abb. 43: Webvisualisierung des AIS-Monitors im Forschungshafen

Eines der untersuchten Verfahren lieferte vielversprechende Ergebnisse. Bei dieser Methode handelt es sich um ein in der Astronomie eingesetztes Objekterkennungstool, welches zur Extraktion und Klassifikation von Sternen und Galaxien verwendet wird. Es zeigte sich, dass dieses Verfahren trotz Merkmalsarmut zur Erkennung von maritimen Zielen auf Radarbildern genutzt werden kann. Abb. 44 (links) illustriert das Verfahren zur Objektdetektion.

Alle Pixel, deren Werte sich signifikant aus dem Hintergrundrauschen hervorheben, werden in einem ersten Schritt als Objektpunkte identifiziert. In einem zweiten Schritt werden benachbarte Objektpunkte zu einem Objekt zusammengeführt. Um ein einmal detektiertes Objekt in aufeinanderfolgenden Bildern – also über längere Zeit in Radarbildern – wiederzufinden, wird das in Abb. 44 (rechts) illustrierte Template-Matching-Verfahren eingesetzt. Dazu wird für jedes im Originalbild identifizierte Objekt ein Template angelegt. In Folgebildern wird das gesamte Bild untersucht, welche der dort identifizierten Objekte dem Template am ähnlichsten sind.

Erste Ergebnisse zeigen, dass es mit diesem Verfahren möglich ist, Objekte über längere Zeit im Radarbild zu verfolgen. Weiterführende Untersuchungen und Entwicklungen sind jedoch notwendig, um eine robuste und störteste Objekterkennung und -verfolgung in Echtzeit und weiterführend eine Integritätsbewertung mittels AIS- und RADAR-Datenfusion zu erreichen.

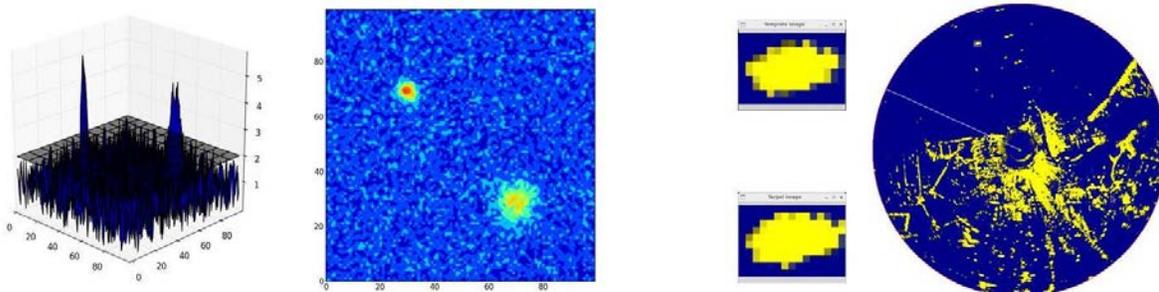


Abb. 44: Objektdetektionsverfahren (links); Template-Matching-Verfahren zur Radarzielverfolgung (rechts)

## 7.4 AIS-Fusion (Objektassoziiierung)

Wie bereits im vorhergehenden Abschnitt dargelegt, sind Objekterkennung und -verfolgung zwei wesentliche Aufgaben, die permanent und aufeinander abgestimmt für eine Kollisionsvermeidung zu gewährleisten sind. Um komplementäre Datenquellen für eine Integritätsbewertung ausnutzen zu können, muss vorab geklärt werden, wie AIS- und RADAR-Objekte miteinander assoziiert werden können. Grundsätzlich können die Radarzieldaten, die als Peilung und Entfernung bereitgestellt werden, durch eine Gauß-Krüger-Koordinatentransformation mit Hilfe der eigenen Schiffsposition in eine absolute Position umgerechnet werden. Dadurch ist ein direkter Vergleich mit den absoluten Positionsangaben der AIS-Daten gegeben. Jedoch führen Unterschiede in der Datenrate, der Zeitsynchronisation sowie der erreichbaren Genauigkeit und Verfügbarkeit von Positionsangaben dazu, dass eine Assoziierung von AIS- und RADAR-Objekten nicht so einfach und auch nicht immer erreicht werden kann. Prinzipiell kann der Versuch einer Objektassoziiierung mit folgenden Ergebnissen enden: die ARPA-Ziele sind für bestimmte AIS-Ziele nicht verfügbar, ein AIS-Ziel hat exakt ein passendes ARPA-Ziel, ein AIS-Ziel hat mehrere ARPA-Ziele im Umkreis, oder ein ARPA-Ziel existiert ohne Verfügbarkeit eines passenden AIS-Ziel.

Mit Hilfe von experimentellen Untersuchungen sollte geklärt werden, welche methodischen Ansätze eine Fusion von AIS- und ARPA-Daten ermöglichen und welche Randbedingungen (Schwellwerte, Fehlermodelle) dafür geeignet sind. Dazu wurde eine Messkampagne auf dem Schiff „BALTIC TAUCHER II“ durchgeführt, bei der voll automatisch erfasste Radarzieldaten von ARPA, Positionsdaten der PNT-Unit des eigenen Schiffes und die von AIS empfangen Nachrichten der umgebenden Verkehrsteilnehmer gemeinsam aufgezeichnet wurden. Alle Daten wurden in einer SQLite Datenbank gespeichert. Die zwölfstündige Messkampagne im Gebiet des Rostocker Hafens und auf der Ostsee lieferte 70.000 AIS- und 200.000 ARPA-Datensätze. Bei der Messfahrt wurden die AIS-Daten von 59 Schiffen empfangen. Es wurde festgestellt, dass es AIS-Ziele gibt, denen kein ARPA-Ziel zugeordnet werden konnte. Es gab auch wenige ARPA-Ziele, für die kein entsprechendes AIS-Ziel gefunden wurde. Die Durchschnittsverfügbarkeit von ARPA für ein AIS-Ziel lag bei 56% (Hafen: 41%-46%, See: 82%). Der mittlere Abstand zwischen ARPA- und AIS-Zielen betrug etwa  $150 \pm 30$  m und lässt sich einerseits mit den geringeren Positionsgenauigkeiten von RADAR-Zielen erklären. Andererseits war eine exakte zeitliche Synchronisierung von AIS- und ARPA-Daten durch unterschiedliche Updateraten und Zeitbezügen nicht gegeben. Folglich ist es nicht verwunderlich, dass einem AIS-Ziel durchaus mehrere ARPA-Ziele in der Umgebung zugeordnet werden konnten. Nur wenn eine Assoziierung von AIS- und ARPA-Objekte erfolgreich war, kann daraus durchaus eine Integritätsinformation für die Objekterkennung abgeleitet werden. Jedoch bezieht sich diese Integritätsaussage nur auf Positionsgenauigkeiten im Bereich von  $150 \pm 30$  m.

Während der Messfahrt wurde auch deutlich, dass die Verfügbarkeit einer ARPA-basierten Zielerkennung von der Umgebung abhängig war. In Bereichen, in denen viele Radarreflektionsstörungen zu erwarten sind, sank die Leistungsfähigkeit von ARPA, Objekte zu detektieren. Um den zeitsynchronisationsbedingten Fehleranteil am relativen Positionsfehler zwischen assoziierten AIS- und ARPA-Zielen besser abschätzen zu können, wurden weiterführende Untersuchungen initiiert.

Abb. 45 zeigt, dass dynamischen Schiffsdaten im Mittel mit einer Zeitverzögerung von 16 ms an einem AIS-Empfänger (hier landseitiger AIS-Empfänger im Experimentalsystem des Forschungshafens Rostock) zur Verfügung stehen. Für Schiffe, die mit 20 Knoten fahren, impliziert diese Zeitverzögerung im AIS-System einen Positionsfehler von ca. 16 cm. Bezogen auf die mittlere Distanz zwischen AIS- und ARPA-Zielen ist der lauffzeitbedingte Positionsfehler somit als vernachlässigbar klein einzustufen.

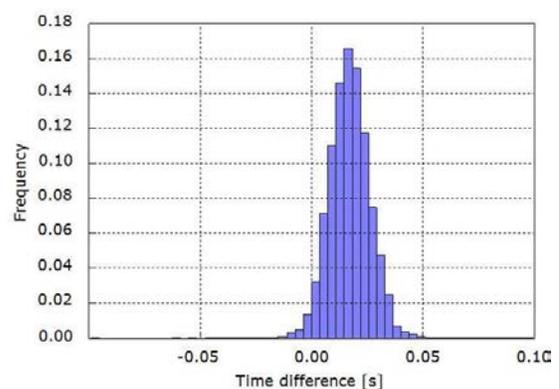
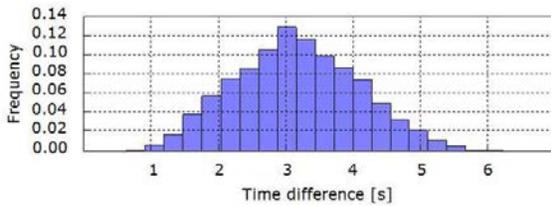


Abb. 45: Histogramm der Zeitverzögerungen im AIS



**Abb. 46: Histogramm der Zeitverzögerung welche bei innerhalb des ARPA Systems auftreten**

Ergebnisse einer ARPA-bezogenen Untersuchung von Laufzeiten sind in Abb. 46 dargestellt. Die Radardaten wurden als TTM-Sätze gespeichert und enthielten die Entfernung und die Peilung von Radarzielen. Jeder TTM-Satz besitzt einen UTC-Zeitstempel, der von ARPA gesetzt wurde. Die bordinterne ARPA-Laufzeit ergibt sich aus der Zeitdifferenz vom UTC-Zeitstempel und dem Zeitpunkt, wo ein TTM-Datensatz in die Datenbank (als symbolische Applikation) aufgenommen wird. Im Mittel wurden Laufzeiten von 3 s bestimmt, die einem Positionsfehler von etwa 30 m entsprechen, wenn

Schiffe sich mit einer Geschwindigkeit von 20 Knoten bewegen. Dieser Fehler ist bei der Assoziation von ARPA- und AIS-Objekten nicht vernachlässigbar. Ob und wie dieser Fehler reduziert werden kann, ist ein weiterführender Entwicklungsgegenstand. Jedoch zeigt sich auch, dass weitere Fehlerursachen existieren müssen, die für eine verbesserte Objektassoziiierung geeignet gemanagt werden müssen.

## 8. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

### 8.1 Zusammenfassung der Projektergebnisse

Die im Projekt MVT durchgeführten Forschungs- und Entwicklungsaufgaben wurden auf das Thema Daten- und Systemintegrität ausgerichtet, d.h. der Fragestellung, wie sicherheitskritische Systeme und Daten im maritimen Verkehrssystem hinsichtlich ihrer Verwendbarkeit analysiert und bewertet werden. Damit ordneten sich die geplanten FuE-Aktivitäten in die „e-navigation“-Strategie der IMO ein und fokussierten sich auf die hochprioritäre Nutzeranforderung, die aktuelle Verwendbarkeit von sicherheitskritischen Daten und System zu überwachen und anzuzeigen. Durch ihre Relevanz für eine sichere Schiffsführung werden das maritime PNT-System inkl. GNSS-Nutzung sowie die Verkehrslageerfassung und -bewertung gleichermaßen als sicherheitskritisch eingestuft. Nur wenn ihre Daten vollständig und in der erforderlichen Qualität (u.a. genau genug, aktuell, integritätsbewertet) bereitgestellt werden, lässt sich das Risiko an Kollisionen und Grundberührung weiter senken.

In einer ersten Projektphase wurden 2 komplementäre Studien zur Integrität im maritimen Verkehrssystem durchgeführt. Die „Top down“-Studie untersuchte, welche Integritätskonzepte für das gesamte maritime Verkehrssystem bereits entwickelt und gegebenenfalls implementiert wurden. Die „Bottom up“-Studie suchte nach technologischen Ansätzen, wie die Integrität navigationsrelevanter Daten und genutzter Einzelsensoren, Komponenten und Diensten überwacht, angezeigt und innerhalb von Entscheidungsfindungsprozessen berücksichtigt werden. In diesem Kontext wurden auch Performanzstandards, Handlungsempfehlungen und Richtlinien der IMO, IALA und weiterer Gremien analysiert, um zu prüfen, inwieweit Verantwortlichkeiten und Verbindlichkeiten bei der Integritätsüberwachung sowie bei der Bereitstellung und Nutzung von Integritätsdaten bereits festgeschrieben wurden.

Die Ergebnisse beider Konzeptstudien fielen eher ernüchternd aus, wenn man den Stand der Technik und damit die heutzutage bestehenden Möglichkeiten von Integritätsüberwachung und -management betrachtet. Beide Studien bestätigten, dass ausreichend Nachholbedarf und FuE-Potential im Themenbereich Integrität besteht. Das gilt gleichermaßen für das maritime Verkehrssystem im Allgemeinen und für die PNT- und TSA-Systeme im Besonderen. Eine wesentliche Schlussfolgerung aus den Konzeptstudien bestand darin, sich im Rahmen des Projektes ausschließlich auf die Entwicklung, Implementierung und Analyse von Integritätsüberwachungsfunktionen in den Bereichen GNSS-Augmentierung, PNT- und TSA-System zu konzentrieren.

- Im Themenbereich „GNSS-Ergänzungsdienste“ wurde das im Forschungshafen Rostock aufgebaute Maritime Ground Based Augmentation System (MGBAS) erweitert, um einerseits neben GPS-Diensten auch GALILEO- bzw. GPS/GALILEO-basierte DGNS-Dienste bereitstellen und zukünftig erproben zu können. Andererseits wurde das MGBAS als Performanzmonitor und Referenzsystem ausgebaut, um bestehende PNT-Dienste wie das IALA Beacon DGNS als auch neue PNT-Verfahren hinsichtlich ihrer

Leistungsfähigkeit und Nutzbarkeit experimentell untersuchen zu können. Mittels speziell am Institut entwickelter RTCM3+ Korrektursignale ist es dem operationell verfügbaren MGBAS-System möglich, neben phasenbasierten DGNSS-Korrekturen auch zugeordnete Integritätsinformation im Servicebereich des Forschungshafen Rostocks bereitzustellen. Experimentell konnte der Nachweis erbracht werden, dass unter Verwendung von MGBAS-Diensten Genauigkeitsanforderungen im dm-Bereich bei gleichzeitiger Integritätsbewertung - wie für das automatische Anlegen gefordert – machbar sind. In konsequenter Fortführung der Arbeiten sind die Vorteile von Multisystem- und Multifrequenzverfahren in der Kombination mehrerer GNSS-Systeme (GPS, GLONASS, GALILEO, COMPASS) zu untersuchen und zugeordnete Dienste als auch Monitore in das MGBAS zu integrieren.

- Im Themenbereich „PNT-Unit“ wurde der erste Demonstrator (V1.0) einer auf Basis von multisensorbasierten Daten arbeitenden Prozessierungseinheit entwickelt, evaluiert und auf einem Schiff im Echtzeitbetrieb vorgestellt. Das von uns entwickelte Konzept einer bordseitigen „PNT-Unit“ wurde projektbegleitend auf nationaler und internationaler Ebene im Rahmen unserer Mitarbeit im „e-navigation“-Komitee der IALA und der „e-navigation“-Spiegelgruppe des BMVI diskutiert und konsolidiert. Bemerkenswert ist, dass die Verbesserung der Zuverlässigkeit, Störfestigkeit und Integrität von Brückenausstattung und Navigationsinformationen im Strategischen Implementierungsplan (SIP) für „e-navigation“ priorisiert wurde und in diesem Kontext die Bereitstellung störfester PNT-Verfahren als eine der Risikokontrollgrößen zu nutzen ist. Dies verdeutlicht, dass der Bedarf für eine konsequente Fortführung der FuE-Arbeiten in diesem Themenkomplex besteht. Ein wichtiges Ziel künftiger Arbeiten wird vor allem darin bestehen, die PNT-Unit zu standardisieren und als modularen Bestandteil in das Integrierte Navigationssystem (INS) von Schiffen zu implementieren.
- Im Themenbereich „Verkehrslage“ wurde untersucht, ob der Umfang und die Qualität heutzutage verfügbarer AIS- und RADAR-Daten ausreicht, um eine umfassende und zuverlässige Beschreibung der Verkehrslage erzielen zu können. Erste dafür geeignete Analysemethoden wurden entwickelt und auf eine Vielfalt umfangreicher Datensätze (z.B. HELCOM, BSH) angewendet. Plausibilitätsprüfungen von AIS-Daten zeigten, dass AIS zwar systemkonform arbeitet, jedoch unter Bezug auf spezielle Navigationsparameter signifikante Fehlinformationen liefern kann. Die erprobten Methoden konnten als automatisch arbeitender Prozessor zur Plausibilitätsbestimmung von AIS-Daten realisiert und in das MGBAS-Experimentalsystem implementiert werden. Das ermöglicht, dass jetzt im Umfeld des Forschungshafen Rostock eine Plausibilitätsprüfung von AIS-Daten in Echtzeit erfolgt und Aufschluss darüber gibt, ob navigationsrelevante Daten eines Schiffes außerhalb eines definierten Fehlerbereiches liegen oder nicht. Das übergeordnete Ziel, AIS-Daten mit RADAR-Daten zu fusionieren, um eine Integritätsbewertung von Verkehrslagebildern zu erzielen, wurde nur partiell erreicht. Eine Ursache dafür waren Probleme, die in der unterschiedlichen Synchronität, Verfügbarkeit und Genauigkeit beider Datenströme lagen und geeignet zu kompensieren waren. Außerdem mussten auch Verfahren zur automatischen Erkennung und Verfolgung dynamischer Radarziele entwickelt werden, um im Folgeschritt eine Fusion z.B. auf der Grundlage von Bayessche Schätzverfahren erzielen zu können.

Während der Projektlaufzeit konnten parallel zu den fachlichen Arbeiten erhebliche Fortschritte bei der Vernetzung auf nationaler und internationaler Ebene erzielt werden:

National arbeiten wir sehr eng mit der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes und hier im Besonderen mit der Fachstelle für Verkehrstechniken (FVT) und dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) zusammen. Wesentliche Anknüpfungspunkte bilden gemeinsame Arbeiten als auch Veröffentlichungen im PNT- als auch TSA-Bereich. So stellte z.B. das BSH simulierte RADAR- und AIS-Daten zu Verfügung und ermöglichte die Nutzung des Forschungsschiffs DENEb zur Testdatengewinnung. Einen weiteren wichtigen Beitrag leistete während der Projektlaufzeit unsere Mitwirkung im Netzwerk für maritime Anwendungen des Forschungshafen Rostock. Dadurch sind viele Kontakte zu Firmen und Forschungseinrichtungen wie u.a. zu SIGNALIS, Marinesoft, HERO, EADS RST, Hochschule Wismar, Universität Rostock, und Septentrio entstanden, die partiell auch dazu geführt haben, gemeinsame Projekte zu initiieren. Der Forschungshafen Rostock stellte im Projekt notwendige Test- und Entwicklungsumgebung dar, mit der die Machbarkeit und Leistungsfähigkeit von Entwicklungen experimentell nachgewiesen werden konnte. Folglich wird der Forschungshafen auch für zukünftige Arbeiten eine wichtige Rolle

als Testfeld spielen. Über die Mitgliedschaft des Forschungshafens im SATNAV-Forum des BMVI konnte permanent abgesichert werden, dass national eine Abstimmung von GNSS-relevanten FuE-Aktivitäten im maritimen Bereich erfolgt.

Die IALA, der wir seit 2011 als assoziiertes Mitglied angehören, war ein entscheidender Katalysator für unsere internationale Vernetzung sowie für die Konsolidierung unsere Konzepte vorrangig im PNT-Bereich. Unsere Mitarbeit in der IALA fand im Rahmen des „e-navigation“-Komitees statt und fokussierte sich auf die Architekturentwicklung, das maritime PNT-System und ab 2013 auch auf die Entwicklung und Nutzung von „e-navigation“-Testbetten. Als Ergebnis dieser Arbeit entstanden Eingangspapiere zu verschiedenen IMO-Sitzungen, die Konzepte zur Diskussion stellten, Entwürfe für neue oder überarbeitete Performanzstandards und Handlungsempfehlungen lieferten, oder parallel laufende Entwicklungsvorschläge kommentierten.

## 8.2 Ausblick auf weiterführende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten

In MVT begonnene Forschungs- und Entwicklungsarbeiten werden im Zeitraum von 2014 bis 2018 durch das Projekt „Automated Aids for Safe and efficient vessel traffic processes“ (A++Set) fortgeführt und widmen sich der methodischen und konzeptionellen Weiterentwicklung des Systems zur Positions-, Navigations- und Zeitdatenbereitstellung (PNT) sowie des Systems zur Verkehrslageerfassung und -bewertung (TSA). Primär wird das Ziel verfolgt, eine technisch detaillierte Architektur mit konsolidiertem Integritätskonzept für beide Systeme zu erreichen. In diesem Kontext wird besonderes Augenmerk auf die Automatisierbarkeit von Diensten, Verfahren und Systemen inklusive der internen Integritätsüberwachung gelegt.

Innerhalb des Themenfeldes PNT werden der Ausbau der PNT-Unit (V2.0) und komplementär dazu die Weiterentwicklung von PNT-relevanten Diensten verfolgt:

- Der verfahrenstechnische Ausbau der PNT-Unit folgt der Zielstellung, die Verwendbarkeit und Leistungsfähigkeit neuer und kombinierter PNT-Verfahren zu untersuchen, die sich aus der Weiterentwicklung und Modernisierung von GNSS (z.B. GPS2, Galileo, COMPASS) und zugeordneter GNSS-Empfänger, der Nutzung neuer terrestrischer Navigationsdienste (z.B. eLoran, R-Mode), der Einbeziehung komplementärer Sensorik (z.B. Sonar) sowie spezifischen Sensorentwicklungen in Richtung Hybridisierung und low-cost ergeben. Daraus resultierende Konsequenzen auf die Systemarchitektur, Schnittstellen (PNT- und Integritätsdaten im maritimen Datenmodell) sowie anzuwendender Methoden sollen herausgearbeitet und für die angestrebte Standardisierung der PNT-Unit genutzt werden.
- Das PNT-relevante Serviceportfolio auszubauen, resultiert direkt aus 2 komplementären Denkansätzen. Einerseits können Ergänzungsdienste, die auch für neue und modernisierte GNSS-Signale bereitgestellt werden, zu einer Genauigkeits- und Integritätssteigerung beitragen. Andererseits besteht in der maritimen Nutzergemeinschaft der Wunsch, über alternative Funknavigationsverfahren zu verfügen, um im Fall von gravierenden GNSS-Störungen auch weiterhin eine Positionsbestimmung zu ermöglichen. Weiterführende Untersuchungen sollen die Frage beantworten, inwieweit der Einsatz von Ergänzungsdiensten für neue GNSS-Signale, u.U. in Kombination mit Backup-Diensten wie eLoran und R-Mode, hilft, die Störanfälligkeit des PNT-Systems zu reduzieren. In diesem Rahmen soll auch geklärt werden, ob PNT-relevante Sicherheitsinformationen (PSI), die durch landseitige Dienste bereitgestellt werden könnten, zu einem Gewinn an Genauigkeit und Integrität bei der bordseitigen PNT-Bestimmung führen.

Der Themenbereich Traffic Situation Assessment (TSA) wird sich intensiver der Datenanalyse und der Entwicklung zugeordneter Analysemethoden widmen, mit denen das räumliche und zeitliche Verhalten von Fehlern in AIS- und RADAR-Daten beschreibbar sowie kausale Abhängigkeiten modellierbar werden. Ziel ist es, solche Fehler sicher zu identifizieren und in ihren Auswirkungen auf Entscheidungsprozesse (z.B. zur Kollisionsverhütung) besser bewerten zu können.

- In MVT begonnene Entwicklungsarbeiten zur Assoziierung von AIS- und ARPA-basierten Verkehrsobjekten werden fortgeführt, um zukünftig auch die Integrität bereitgestellter Verkehrslagebilder bewerten zu können. Dafür ist es erforderlich, dass geeignete Verfahren bereitgestellt werden, mit denen eine automatisierte Detektion von Verkehrsobjekten aus ARPA-Daten machbar wird.

- Im Rahmen zunächst konzeptioneller Entwicklungen soll untersucht werden, wie die Vollständigkeit und Integrität von Verkehrslagebildern mittels netzwerkbasierter bzw. kooperativer Methoden verbessert werden kann. Als erste Lösungsansätze in diesem Kontext werden die synthetische Generierung von AIS-Nachrichten und der automatische Abgleich von Verkehrslagebildern zwischen den Verkehrsteilnehmern betrachtet und hinsichtlich Mehrwert und Machbarkeit analysiert.

Ergänzend zu den beiden Schwerpunktthemen PNT und TSA ist eine ergänzende Studie vorgesehen, in der einerseits untersucht wird, inwieweit navigationsrelevante Daten (z.B. PNT, AIS, RADAR) komplementär genutzt werden könnten, um intermodale Transportketten aufzubauen und mittels eines übergeordneten Verkehrsmanagements zu steuern. Andererseits soll analysiert werden, wie Informationen aus dem Transport- und Logistikbereich helfen könnten, den Verkehrsträger Schiff effizienter zu betreiben und auszulasten. Im Fokus der Studie stehen vorhandene und ausbaubare Datenschnittstellen, mit denen der Informationsaustausch zwischen dem Schiff und Stakeholdern des maritimen als auch anderer Transportsysteme erfolgt.

## ANNEX A LISTE DER PUBLIKATIONEN

- [2009-09] Noack, Thoralf and Engler, Evelin and Klisch, Anja und Gewies, Stefan und Minkwitz, David (2009) Integrity concepts for future maritime Ground Based Augmentation Systems. 2nd GNSS Vulnerabilities and Solutions 2009, 2.-5. Sep. 2009, Baska, Kroatien.
- [2009-10A] Noack, Thoralf und Engler, Evelin und Klisch, Anja und Gewies, Stefan und Becker, Carsten (2009) Statistical GNSS performance assessment as part of the ALEGRO Ground Based Augmentation System inside Research Harbour Rostock. In: Proceedings of XIII International Scientific and Technical Conference on Marine Traffic Engineering, Seiten 311-317. Maritime University of Szczecin. XIII International scientific and technical Conference on Marine Traffic Engineering, 19.-22. Okt. 2009, Malmö, Schweden. ISBN 987-83-89901-38-5
- [2009-10B] Hirrle, Angelika und Engler, Evelin (2009) GNSS Signal Error Part Determination for Satellite Based Navigation within Maritime High Precision Applications. Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin (18(90)), Seiten 48-53. Maritime University of Szczecin. ISSN 1733-8670.
- [2009-11] Engler, Evelin und Minkwitz, David und Noack, Thoralf und Klisch, Anja und Gewies, Stefan und Becker, Carsten (2009) Integritätsmonitoring für ein maritimes, phasenbasiertes Ground Based Augmentation System (GBAS). DGON PosNav 2009 Proceedings.
- [2010-04] Minkwitz, David und Engler, Evelin und Schlüter, Stefan (2010) Maritime GBAS: Improvement of Positioning Accuracy and Reliability by Integrity Monitoring. CERGAL 2010, 28.-29. Apr. 2010, Rostock, Deutschland. Volltext nicht online.
- [2010-09] Evelin Engler (2008), IALA Enav8: Towards an international recognized Maritime Radio Navigation Integrity Concept (INF Paper), 20.-24.9.2010, Paris, France
- [2010-12A] Ralf Ziebold, Zhen Dai, Thoralf Noack, Evelin Engler (2010), Concept for an Integrated PNT-Unit for Maritime Applications., NAVITEC 2010, 8.-10.12.2010, Noordwijk, Netherlands
- [2010-12B] Stefan Schlüter, David Minkwitz, Angelika Hirrle (2010), Investigations of Decorrelation Effects on the Performance of DGNSS Systems in the Baltic Sea., NAVITEC 2010, 08.-10.12.2010, Noordwijk, Netherlands
- [2011-06] Ralf Ziebold, Zhen Dai, Thoralf Noack, Evelin Engler (2011), Concept for an Onboard Integrated PNT Unit, CRC Press. TransNav 2011, 15.-17.6.2011, Gdynia, Poland. ISBN 978-0-415-96112-3
- [2011-eNav9-A] Evelin Engler, Ralf Ziebold, Michael Hoppe\*, Johann Winell\*\*, Jan-Hendrik Oltmann\*\*\* (2011), Development of Maritime Integrated PNT System (Input Paper), IALA Enav9, 14.-18.3.2011, Kopenhagen, Denmark, \*FVT Koblenz, \*\*STA Norrköping, \*\*\*WSD Nord
- [2011-eNav9-B] Jan-Hendrik Oltmann\*, Evelin Engler, Ralf Ziebold, Michael Hoppe\*\* (2011), ADDENDUM.1 to Development of a Maritime Integrated PNT System: Graphical representation of Integrated PNT System and the PNT Unit as a future INS Module, IALA Enav9, 14.-18.3.2011, Kopenhagen, Denmark, \*WSD Nord, \*\*FVT Koblenz
- [2011-06] Dai, Zhen und Ziebold, Ralf und Born, Alexander und Engler, Evelin (2012) Heading-determination using the Sensor-fusion Based Maritime PNT Unit. In: IEEE/ION PLANS 2012. IEEE/ION PLANS 2012, Myrtle Beach, South Carolina, USA.
- [2011-09] David Minkwitz, Jamila Beckheinrich, Achim Hornbostel (2011), Installation of an Experimental Galileo GBAS at Research Port Rostock, ISIS 2011, 15.-16.09.2011, Hamburg, Germany
- [2011-ENAV10] Evelin Engler et.al. (2011), Development of Maritime Integrated PNT System (Input Paper) + PPT Presentation, IALA Enav10, 26.-30.9.2011
- [2011-10A] Paweł Banyś, Thoralf Noack, Evelin Engler, Stefan Gewies (2011), The Role of Integrity for Maritime Traffic Situation Assessment, MTE 2011, 12.-14.10. 2011, Swinoujście, Poland
- [2011-10B] Ralf Ziebold, Zhen Dai, Thoralf Noack, Evelin Engler (2011), The on-board maritime PNT Module – Integrity monitoring aspects and first experimental results, MTE 2011, 12.-14.10. 2011, Swinoujście, Poland
- [2011-11] Dai, Zhen und Ziebold, Ralf und Engler, Evelin (2011) The on-board maritime PNT Module – a focus on integrity monitoring and preliminary results. European Navigation Conference GNSS (ENC GNSS 2011), 28.Nov-2.Dez.2011, London, United Kingdom.
- [2012-book] Dai, Zhen (2012) MATLAB software for GPS cycle-slip processing. GPS Solutions, 16 (2), Seiten 267-272. Springer Verlag. DOI: 10.1007/s10291-011-0249-1 . ISSN 1080-5370.
- [2012-05] Ziebold, Ralf und Dai, Zhen und Noack, Thoralf und Engler, Evelin (2012) The on-board maritime PNT Module – Concept and preliminary experimental results. In: Proceedings of WMTTC 2012.

- Rozhdestvesny, K.V. World Maritime Technology Conference 2012, 29.5. - 1.6.2012- , St. Petersburg, Russland.
- [2012-09] Minkwitz, David und Zachhuber, Philipp und Engler, Evelin (2012) MGBAS: RTK Service Validation and Service Integration Approach for a PNT Unit. ISIS 2012: International Symposium Information On Ships, 30. - 31. Aug. 2012, Hamburg, Deutschland.
- [2012-10] Vierhaus, Ingmar und Born, Alexander und Minkwitz, David (2012) Challenges to PNT and driver assistance systems in inland water. In: Proceedings of the 14th IAIN Congress 2012 Seamless Navigation (Challenges & Opportunities), Seiten 1-10. AIN. The 14th IAIN Congress 2012 Seamless Navigation (Challenges & Opportunities), 01-03 October 2012, Cairo, Egypt.
- [2012-12a] Vierhaus, Ingmar und Born, Alexander und Engler, Evelin (2012) Trajectory optimisation for inland water vessels based on a next generation PNT-Unit. IEEE. 6th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies, 5-7 Dec 2012, Noordwijk, Netherlands. ISBN 978-1-4673-2010-8. ISSN 2325-5439
- [2012-12B] Gewies, Stefan und Becker, Carsten und Noack, Thoralf (2013) Deterministic Framework for parallel real-time Processing in GNSS Applications. In: IEEE Xplore. IEEE. NAVITEC 2012, 05. - 07. Dez. 2012, Noordwijk, Netherlands. ISBN 978-1-4673-2010-8. ISSN 2325-5439
- [2013-01] Ziebold, Ralf und Dai, Zhen und Lança, Luis und Minkwitz, David und Zachhuber, Philipp und Noack, Thoralf und Engler, Evelin (2013) Resilient PNT: From PNT-Unit concept to first realization. E- Navigation Underway Conference, 29-30.1.2013, Fährre Kopenhagen-Oslo.
- [2013-03] Ziebold, Ralf und Dai, Zhen und Lança, Luis und Noack, Thoralf und Engler, Evelin (2013) Initial Realization of a Sensor Fusion Based Onboard Maritime Integrated PNT Unit. TransNav : International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Journal Vol.7 (No. 1- March 2013), Seiten 127-134. Faculty of Navigation Gdynia Maritime University. DOI: 10.12716/1001.07.01.17. ISSN 2083-6473.
- [2013-04] Heymann, Frank und Noack, Thoralf und Banyś, Paweł (2013) Plausibility analysis of navigation related AIS parameter based on time series. ENC2013, Wien.
- [2013-06] Heymann, Frank und Noack, Thoralf und Banyś, Paweł und Engler, Evelin (2013) Is ARPA Suitable for Automatic Assessment of AIS Targets? In: MARINE NAVIGATION AND SAFETY OF SEA TRANSPORTATION, ADVANCES IN MARINE NAVIGATION (1). Taylor & Francis Group, London, UK. Seiten 223-232. ISBN 978-1-138-00106-0.
- [2013-11] Engler, Evelin und Ziebold, Ralf und Noack, Thoralf (2013) Maritimes PNT-System: Ansätze für ein koordiniertes Integritätsmonitoring und -management. PosNav Conference Proceedings, DGON

## ANNEX B LISTE VON VORTRÄGEN UND WORKSHOPS

- [2010-06] Thoralf Noack, Evelin Engler (2010), Integrity Concepts for Maritime Ground Based Augmentation Systems, 7th ALLSAT Open 2010, 17.06.2010, Hannover, Germany
- [2010-02] Engler, Evelin und Schlüter, Stefan (2010) Future accurate navigational systems in port areas. Internationaler Workshop der Maritime University Szczecin, 25.02.2010, Szczecin, Poland.
- [2010-06] Klisch, Anja und Noack, Thoralf (2010) Integrity as Part of E-Navigation. Baltic Future, 04.-06.05.2010, Rostock
- [2010-06] Noack, Thoralf und Engler, Evelin (2010) Integrity Concepts for Maritime Ground Based Augmentation Systems. 7th ALLSAT Open 2010, 17.06.2010, Hannover.
- [2011-05] Evelin Engler, Thoralf Noack (2011), Maritime Integrated PNT System, Satellitenbasierte Positionierung und deren maritime Anwendung, 04.05.2011, Rostock, Deutschland
- [2012-01] Engler, Evelin und Hoppe, Michael und Ziebold, Ralf und Dai, Zhen und Noack, Thoralf (2012) Resilient PNT: Vision and Mission. E-Navigation Underway 2012, 18.01. - 20.01.2012, Kopenhagen/Oslo.
- [2012-03] Noack, Thoralf und Engler, Evelin und Ziebold, Ralf und Dai, Zhen (2012) Resilient Position, Navigation and Timing (PNT) Unit as part of the maritime Integrated Navigation System (INS). Munich Satellite Navigation Summit 2012, 13.-15.3.2012, München.
- [2012-06A] Minkwitz, David (2012) Mathematical Approaches in GNSS Positioning and Integrity Monitoring. Freiburger Forschungsforum 2012 - 63. Berg- und Hüttenmännischer Tag, 13.-15. Juni 2012,
- [2012-06B] Ziebold, Ralf (2012) Multisensor-Integration auf Schiffen am Beispiel einer integrierten PNT - Unit. ALLSAT open: Multi Sensor Anwendungen mit GNSS, 21.6.2012, Hannover.
- [2012-09A] Noack, Thoralf und Engler, Evelin und Hoppe, Michael (2012) A new modular and open concept for the maritime Integrated PNT System. BIT 3rd Annual World Congress of MarineTech Summit-2012, 19.-22.9.2012, Dalian, China.
- [2012-09B] Ziebold, Ralf (2012) Nautical Space Applications. Polish-German Space Research Symposium at ILA Berlin Air Show 2012, 13.Sept. 2012, Berlin, Deutschland. (nicht veröffentlicht)
- [2012-eNAV12] Ziebold, Ralf und Dai, Zhen und Noack, Thoralf und Engler, Evelin (2012) The on-board maritime PNT Module – Concept & Status of Realization as a Demonstrator. IALA 12th Meeting of the e-Navigation Committee , 24-28.Sept. 2012, St. Germain en Laye, Frankreich.
- [2013-01] Ziebold, Ralf und Dai, Zhen und Lança, Luis und Minkwitz, David und Zachhuber, Philipp und Noack, Thoralf und Engler, Evelin (2013) Resilient PNT: From PNT-Unit concept to first realization. E-Navigation Underway Conference, 29-30.1.2013, Fährø Kopenhagen-Oslo
- [2013-05] Engler, Evelin und Ziebold, Ralf und Noack, Thoralf (2013) Herausforderung an die maritime Kommunikation: Integritätsüberwachung in verteilten Systemen am Beispiel des PNT-Systems. DGON Schifffahrtstage 2013/1, 15. Mai 2013, Hamburg / Deutschland.
- [2013-10a] Zachhuber, Philipp und Herrera Pinzon, Ivan Dario (2013) Towards Collision-Free Navigation on Inland Waterways based on reliable Position, Navigation and Time (PNT) Data. Next Generation Forum, 23.-24. Okt. 2013, Stuttgart.
- [2013-10B] Heymann, Frank (2013) Traffic monitoring - Automatic radar target tracking. Next Generation Forum 2013, 23.-24. Okt. 2013, Stuttgart

## ANNEX C REFERENZEN

[Cruise-2014]	<a href="http://www.cruisemarketwatch.com/growth/">http://www.cruisemarketwatch.com/growth/</a>
[DENV-2011]	Det Norske Veritas: Safety trends reversed. Press release 05/2011, <a href="http://www.dnv.com/press_area/press_releases/2011/safetytrendreversed.asp">http://www.dnv.com/press_area/press_releases/2011/safetytrendreversed.asp</a> (Download 23.09.2011)
[Eurostat-2013]	Eurostat Pocketbooks: Energy, transport and environment indicators. 2013 edition. ISSN 1725-4566 (download: <a href="http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_OFFPUB/KS-DK-13-001/EN/KS-DK-13-001-EN.PDF">http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_OFFPUB/KS-DK-13-001/EN/KS-DK-13-001-EN.PDF</a> )
[Grooves 2007]	P. D. Groves, Principles of GNSS, Inertial, and Multi-Sensor Integrated Navigation Systems (GNSS Technology and Applications). Artech House Publishers, 2007.
[IALA-R121-2004]	IALA Recommendation R-121 on the Performance and Monitoring of DGNSS Services in the Frequency Band 283.5-325 kHz. Edition 1.1, December 2004)
[MSC-2006]	Maritime Safety Committee of IMO: Report of the maritime Safety Committee on its eighty-first Session (MSC 81/25). 1st June 2006.
[MSC-2008]	Maritime Safety Committee of IMO: Report of the maritime Safety Committee on its eighty-fifth Session (MSC 85/26). Annex 20: Strategy for the Development and Implementation of eNavigation. 19th December 2008.
[NAV54-2006]	Sub-Committee on Safety of Navigation: Development of an E-Navigation Strategy. Report from the e-Navigation Correspondence Group. NAV54/13, 28. March 2006.
[Nav58/6/1-2012]	Development of an e-navigation strategy implementation plan: Proposed architecture for the provision of resilient PNT data. Submitted by Germany (30. March 2012).
[NCSR1/9/2-2014]	Development of an e-navigation strategy implementation plan: Review and modernization of maritime PNT system. Comments on the report of the e-navigation Correspondence Group. Submitted by Germany (16. April 2014).
[SOLAS]	<a href="http://www.imo.org/About/Conventions/ListOfConventions/Pages/Default.aspx">http://www.imo.org/About/Conventions/ListOfConventions/Pages/Default.aspx</a>
[UNCTAD-2012]	United Nation Conference on Trade and Development: Review of Maritime Transport 2012. ISBN 978-92-1-112860-4.
[IALA-R-135]	IALA: Recommendation R-135 on the Future of DGNSS. Edition 1, Dez. 2006 ( <a href="http://site.ialathree.org/pages/publications/">http://site.ialathree.org/pages/publications/</a> , Download 23.10.2008)
[IALA-R-121]	IALA: Recommendation R-121 on the Performance and Monitoring of DGNSS services in the Frequency Band 283.5 – 325 kHz; Edition 1.1, Dez. 2004 ( <a href="http://www.tidelandsignal.com/web/information/IALA/Recommendations/R-121-DGNSS-2004.pdf">http://www.tidelandsignal.com/web/information/IALA/Recommendations/R-121-DGNSS-2004.pdf</a> , Download 15.10.2008)
[IMO-A.915(22)]	IMO: Revised maritime Policy and Requirements for a future Global Navigation satellite System (GNSS), 22.01.2001, A22/Res.915, ( <a href="http://www.imo.org">http://www.imo.org</a> , Download 01.10.2008)
[ALEGRO-08]	J. Beckheinrich, E. Engler, T. Noack, S. Schlüter, A. Hirtle, D. Klähn: ALEGRO: A STEP TOWARDS A MARITIME GALILEO GBAS, Toulouse, 2008.

## ANNEX D BILDQUELLEN

Quelle	Abbildungsnummer
Chilean Navy	2
DLR IKN	sonstige
Hans-Georg Engler	Deckblatt, 1
Reuters	3 (Hintergrundfoto)