

#### Institut für Maritime Systeme und Strömungstechnik Fachbereich Maschinenbau und Schiffstechnik Universität Rostock

Studienarbeit

Niedrigenergie-Fahrgastschiff für Binnen- und küstennahe Gewässer

Michael Zimmermann

Dezember 2001

Copyright (c) 2001 by Michael Zimmermann.

This material may be distributed only subject to the terms and conditions set forth in the Open Publication License, v1.0 or later (the latest version is presently available at http://www.opencontent.org/openpub/).

Distribution of substantively modified versions of this document is prohibited without the explicit permission of the copyright holder.

#### Selbständigkeitserklärung

Hiermit bestätige ich, Michael Zimmermann, die vorliegende Arbeit selbständig nach bestem Wissen und mit den vorliegenden Informationen erarbeitet zu haben. Alle Quellen und Hilfsmittel sind ordnungsgemäß angegeben.

Rostock im Dezember 2001

Michael Zimmermann

#### Aufgabenstellung

#### Niedrigenergie-Fahrgastschiff für Binnen- und küstennahe Gewässer

Auf der Basis einer vorliegenden Spezifikation ist ein konzeptioneller Entwurf eines Fahrgastschiffes zu erarbeiten. Als Einsatzgebiet des Fahrgastschiffes sind die Binnen- und küstennahen Gewässer Mecklenburg-Vorpommerns zu betrachten. In der Konzeption sind insbesondere energetische Gesichtspunkte (Widerstand, Antrieb, Bordsysteme) zu berücksichtigen.

In der Arbeit sind folgende Schwerpunkte zu betrachten:

- Recherche und Sichtung verfügbarer Informationen
- Betrachtung zu berücksichtigender Rahmenbedingungen, d. h. Gesetze und Vorschriften, geographische Besonderheiten sowie wirtschaftliche Aspekte
- Benennung, Beschreibung und Bewertung von Varianten der Gestaltung des Schiffsrumpfes
- Betrachtung relevanter, die Formgebung des Rumpfes wesentlich beeinflussender Parameter (Stabilität, Seegangsverhalten, Wellenbildung etc.)
- Analyse von Antriebskonzepten mit den Schwerpunkten Propulsionsorgan(e), Manövrierfähigkeit sowie Energiebereitstellung
- Darstellung der Variantenentwürfe

## Inhaltsverzeichnis

1	Ein	leitung	5	1
<b>2</b>	Rah	menbe	edingungen	3
	2.1	Wirtso	chaft und Tourismus	3
		2.1.1	Stellung des Tourismus in Mecklenburg-Vorpommern	3
		2.1.2	Saison	4
		2.1.3	Transportkapazität und Fahrtdauer	5
		2.1.4	Marktbedürfnisse	5
	2.2	Möglio	che Einsatzgebiete und Einsatzrouten	6
		2.2.1	Seebäderverkehr	6
		2.2.2	Boddengewässer der Ostsee	7
		2.2.3	Die Warnow	8
	2.3	Klima		11
		2.3.1	Sonnenschein und solare Einstrahlung	11
		2.3.2	Temperatur	13
		2.3.3	Wind	14
		2.3.4	Seegang	16
	2.4	Umwe	ltschutz	18
		2.4.1	Einordnung des Begriffs "Umweltschutz"	19
		2.4.2	Internationale Abkommen und lokale Initiativen	20
		2.4.3	Zu berücksichtigende Umweltaspekte	21
		2.4.4	Auswirkungen auf das Projekt WaKat	22
	2.5	Vorsch	nriften der Klassifikationsgesellschaften	23
3	Sch	iffbau	/ Entwurf	27
	3.1	Allgen	neine Bemerkungen	27

	3.2	Gestal	tung des Schiffsrumpfes	28
		3.2.1	Rumpftypen	28
		3.2.2	Katamaran - Varianten	29
	3.3	Haupt	abmessungen	32
		3.3.1	Vergleichsschiffe	32
		3.3.2	Länge und Breite	33
		3.3.3	Geschwindigkeit	35
		3.3.4	Abschätzung von Masse und Verdrängung	36
	3.4	Rump	fgestaltung	37
		3.4.1	Spantformen	38
		3.4.2	Gestaltung der Stützen	39
		3.4.3	Raumaufteilung	41
	3.5	Design	1	44
	3.6	Stabili	ität	44
	3.7	Wider	standsabschätzung	45
	3.8	Seegar	ngsverhalten	47
	<b>A</b> 4			40
4			nd Energiebereitstellung	49
4	4.1	Defini	tion und allgemeine Bemerkungen	49
4		Definit Energi	tion und allgemeine Bemerkungen	49 50
4	4.1	Definit Energi	tion und allgemeine Bemerkungen	49 50 50
4	4.1	Definit Energi 4.2.1 4.2.2	tion und allgemeine Bemerkungen	49 50 50 52
4	4.1	Definit Energi 4.2.1 4.2.2 4.2.3	tion und allgemeine Bemerkungen iespeicherung  Wasserstoff  Erdgas  Benzin und Diesel	49 50 50 52 52
4	4.1	Definit Energi 4.2.1 4.2.2 4.2.3 4.2.4	tion und allgemeine Bemerkungen iespeicherung  Wasserstoff  Erdgas  Benzin und Diesel  "Biodiesel"	49 50 50 52 52 52
4	4.1 4.2	Definite Energi 4.2.1 4.2.2 4.2.3 4.2.4 4.2.5	tion und allgemeine Bemerkungen iespeicherung  Wasserstoff  Erdgas  Benzin und Diesel  "Biodiesel"  Akkumulatoren	49 50 50 52 52 52 53
4	4.1	Definit Energi 4.2.1 4.2.2 4.2.3 4.2.4 4.2.5 Energi	tion und allgemeine Bemerkungen iespeicherung  Wasserstoff  Erdgas  Benzin und Diesel  "Biodiesel"  Akkumulatoren ieumwandlung	49 50 50 52 52 52 53 54
4	4.1 4.2	Definit Energi 4.2.1 4.2.2 4.2.3 4.2.4 4.2.5 Energi 4.3.1	tion und allgemeine Bemerkungen  iespeicherung  Wasserstoff  Erdgas  Benzin und Diesel  "Biodiesel"  Akkumulatoren  ieumwandlung  Verbrennungskraftmaschine	49 50 50 52 52 52 53 54 54
4	4.1 4.2	Definit Energi 4.2.1 4.2.2 4.2.3 4.2.4 4.2.5 Energi 4.3.1 4.3.2	tion und allgemeine Bemerkungen  iespeicherung  Wasserstoff  Erdgas  Benzin und Diesel  "Biodiesel"  Akkumulatoren  ieumwandlung  Verbrennungskraftmaschine  Brennstoffzelle	49 50 52 52 52 53 54 54 55
4	4.1 4.2 4.3	Definite Energy 4.2.1 4.2.2 4.2.3 4.2.4 4.2.5 Energy 4.3.1 4.3.2 4.3.3	tion und allgemeine Bemerkungen  iespeicherung  Wasserstoff  Erdgas  Benzin und Diesel  "Biodiesel"  Akkumulatoren  ieumwandlung  Verbrennungskraftmaschine  Brennstoffzelle  Photovoltaik	49 50 52 52 52 53 54 54 55 56
4	4.1 4.2	Definite Energy 4.2.1 4.2.2 4.2.3 4.2.4 4.2.5 Energy 4.3.1 4.3.2 4.3.3 Antrie	tion und allgemeine Bemerkungen iespeicherung  Wasserstoff  Erdgas  Benzin und Diesel  "Biodiesel"  Akkumulatoren ieumwandlung  Verbrennungskraftmaschine  Brennstoffzelle  Photovoltaik  ebskonzepte	49 50 50 52 52 53 54 54 55 56
4	4.1 4.2 4.3	Definite Energy 4.2.1 4.2.2 4.2.3 4.2.4 4.2.5 Energy 4.3.1 4.3.2 4.3.3	tion und allgemeine Bemerkungen despeicherung  Wasserstoff  Erdgas  Benzin und Diesel  "Biodiesel"  Akkumulatoren deumwandlung  Verbrennungskraftmaschine  Brennstoffzelle  Photovoltaik  biskonzepte  Direktantrieb	49 50 52 52 52 53 54 54 55 56
4	4.1 4.2 4.3	Definite Energy 4.2.1 4.2.2 4.2.3 4.2.4 4.2.5 Energy 4.3.1 4.3.2 4.3.3 Antrie	tion und allgemeine Bemerkungen iespeicherung  Wasserstoff  Erdgas  Benzin und Diesel  "Biodiesel"  Akkumulatoren ieumwandlung  Verbrennungskraftmaschine  Brennstoffzelle  Photovoltaik  ebskonzepte	49 50 50 52 52 53 54 54 55 56

		4.4.4 Batteriebetrieb	59
		4.4.5 Solarantrieb	59
	4.5	Bewertung der Antriebskonzepte	60
5	Pro	pulsion	63
	5.1	Propulsionskonzepte	63
	5.2	Propulsion durch tiefgetauchte Propeller	64
	5.3	Propulsion durch Oberflächenpropeller	65
	5.4	Bewertung der Propulsionskonzepte	67
6	Das	Fahrzeug $WaKat$	69
	6.1	Schiffbau / Entwurf	69
	6.2	Antrieb und Energiebereitstellung	70
	6.3	Propulsion	70
7	Fazi	it	<b>7</b> 3
$\mathbf{Li}^{1}$	terat	surverzeichnis	<b>7</b> 5
$\mathbf{A}$	Klir	na	81
	A.1	Die Beaufort-Skala	81
В	Die	Warnow	82
$\mathbf{C}$	Ver	gleichsschiffe	84

## **Tabellenverzeichnis**

2.1	Gemittelte Sonnenstunden pro Tag	13
2.2	Häufigkeit der Windrichtungen	16
2.3	Mindestwindwirkzeit in Abhängigkeit von Wellenhöhe und Windstärke $$	17
2.4	Berücksichtigung der realen Windwirkzeit bei der Ausbildung des Seegangs	17
2.5	Bestimmung der Wellenhöhe zwischen Leeküste und 1. Isounde	17
2.6	Bewertung der Umweltschutzproblematik der Einsatzrouten	23
3.1	Bewertung der Rumpfvarianten	29
3.2	Katamaranvarianten - eine Bewertung	31
3.3	Vergleichsschiffe	33
3.4	Bedarf an Decksflächen	35
3.5	Länge der Auftriebskörper in Metern für einen günstigen Wellenwiderstandskoeffizienten	36
3.6	Massenabschätzung	37
3.7	Beurteilung der Stützenformen	39
3.8	Abschätzung des Schiffswiderstands	47
4.1	Bewertung der Antriebskonzepte	60
5.1	Bewertung der Propulsionsvarianten	68
6.1	Abmessungen der Auftriebskörper und Stützen	70
A 1	Umrechnung zwischen Beaufort, m/s und km/h	81

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Mögliche Einsatzgebiete und -routen	6
2.2	Längsprofil der Warnow	9
2.3	Querprofil der Warnow	10
2.4	Durchflussmenge und Wasserstand der Oberwarnow bei Schwaan	10
2.5	Mittlere tägliche solare Einstrahlung	12
2.6	Mittlere solare Einstrahlung für den Monat Juni	12
2.7	Entwicklung der solaren Jahreseinstrahlung	13
2.8	Gemittelter Temperaturverlauf für Warnemünde	14
2.9	Monatlich gemittelte mittlere Windgeschwindigkeiten in Lübeck $\dots \dots$	15
2.10	Jahresgang der mittleren täglichen Windgeschwindigkeiten	15
2.11	Wellenhöhen bei Wind aus West mit 5 Bft	18
2.12	Wellenhöhen bei Wind aus Nord mit 5 Bft	19
2.13	Naturschutz im Einzugsgebiet der Warnow	24
3.1	Das Swath-Konzept	30
3.2	Beispiel einer Proa-Konfiguration	31
3.3	Konstruktionstiefgang in Abhängigkeit von der Verdrängung	32
3.4	Längen/Breiten-Verhältnis bezogen auf die Verdrängung	33
3.5	Querschnittsversperrung durch den $WaKat$ am Beispiel eines typischen Querprofils der Oberwarnow	34
3.6	Mögliche Spantformen für Swath-Fahrzeuge	38
3.7	Widerstand von Swath und Slice in Abhängigkeit von der Schiffsgeschwindigkeit	40
3.8	Ausrüstung der Auftriebskörper	42
3.9	Deckslayout	43
3.10	Deckslayout II	43

4.1	Direktantrieb durch einen Verbrennungsmotor	57
4.2	Verbrennungsmotor und E-Antrieb	57
4.3	Energieumwandlung durch eine Brennstoffzelle	58
4.4	Solarantrieb	59
5.1	Mögliche Varianten der Anordnung von Oberflächenpropellern	64
5.2	Geschwindigkeitsverteilung für stationäre Rechnung	66
B.1	Die Oberwarnow bei Schwaan, Blick nach Süden	82
B.2	Die Oberwarnow südlich von Rostock	83
В.3	Die Schleuse Rostock-Mühlendamm	83
C.1	Wasserstoffbetriebenes Fahrzeug "Hydra"	84
C.2	Solarbetriebenes Passagierschiff für 60 bis 80 Passagiere	84
C.3	Das Solarschiff "La Becassine"	85
C.4	Die Antriebsanlage von "La Becassine"	85

## Teil 1

## Einleitung

"Nichtstun ist die umweltfreundlichste Art des Daseins!"

Diese, wenn auch oft im Scherz gemachte, aber dennoch provokative Aussage beschreibt ein Dilemma, in welchem sich die Gesellschaft oft befindet.

In unserer dicht besiedelten, hochindustrialisierten Gesellschaft wird durch die Bürger dieses Landes unweigerlich Druck auf die Umwelt ausgeübt. Beispielhaft können Zersiedelung, Schadstoffemissionen sowie übermäßiger Ressourcenverbrauch genannt werden. Dieser Druck auf die Umwelt wird durch menschliche Aktivitäten wie z. B. Sport oder Urlaubsreisen weiter erhöht.

Das Zitat oben zeigt anscheinend eine Lösung auf, wie dieses Problem zumindest abgeschwächt werden könnte. Da aber das menschliche Wesen nicht zu Inaktivität neigt bzw. es nicht Sinn und Zweck der menschlichen Existenz sein kann, über einen längeren Zeitraum inaktiv zu verweilen, sind alternative Wege zu finden, um ein zukunftsfähiges Leben auf dieser Erde zu sichern und dennoch gleichzeitig eine freie Persönlichkeitsentfaltung möglich zu machen.

Der Einsatz umwelteffizienter, nachhaltiger Technologien bietet einen Ansatz, die Lebensqualität zu sichern und dennoch ökologisch verträglich zu agieren. Wird der Einsatz dieser Technologien mit einem Naturerlebnis verbunden, so kann auf diese Weise den Beteiligten der "Wert" der Natur nähergebracht werden. Langfristig sollte durch diesen Erkenntnisgewinn die nachhaltige Entwicklung der Gesellschaft gefördert werden können.

Ausgehend von Anregungen der ATI Küste GmbH wird in dieser Arbeit ein Konzept für ein als Niedrigenergiefahrgastschiff, Projekttitel WaKat, mit minimalem Einfluss auf die Natur ausgelegtes Fahrzeug für den Einsatz in Binnen- und küstennahen Gewässern des Ostseeraums erarbeitet. Da bis heute nur wenige Schiffe in Hinblick auf ihren ökologische Auswirkungen optimiert wurden, sind insbesondere über die umweltrelevanten Aspekte eines solchen Projektes nur wenige Informationen verfügbar. Daher wird in dieser Arbeit in einem ersten Schritt, Teil 2, eine umfassende und weitreichende Beschreibung, Analyse und Beurteilung der die Inbetriebnahme wie auch den Betrieb beeinflussenden Rahmenbedingungen gegeben.

Hierauf aufbauend werden in Teil 3 die schiffbaulichen Aspekte untersucht und vorgestellt. Ein Konzept für die Rumpfgestaltung wird erarbeitet; die Vor- und Nachteile der gewählten Lösung werden benannt. Weiterhin wird eine Darstellung und qualitative Bewertung der hierfür geeigneten Aggregate zur Energieerzeugung und -bereitstellung sowie der Propulsion durchgeführt, siehe Teil 4 und Teil 5. Anschließend werden in Teil 6 die einzelnen vorhergehend diskutierten Aspekte zusammengefügt. Das Konzept WaKat wird beschrieben.

## Teil 2

## Rahmenbedingungen

Das Einsatzprofil des in Teil 1 beschriebenen Fahrzeugs ist darauf ausgelegt, ein attraktives Angebot für den Tourismus und Fremdenverkehr zu bieten. Neben den sich hieraus ergebenden Anforderungen existieren weitere ökologische bzw. klimatische Bedingungen sowie gesetzliche Regelungen.

In diesem Teil wird ein Überblick über die Situation des Tourismus in Mecklenburg-Vorpommern mit besonderem Augenmerk auf die Lage in den küstennahen Gebieten gegeben. Mögliche Einsatzgebiete und -routen werden vorgestellt. Eine detaillierte Darstellung der Klimaverhältnisse schließt an. Der Umweltschutz sowie dessen Relevanz für das Projekt werden in Kapitel 2.4 beleuchtet. Abschließend wird auf die Rolle der Klassifikationsgesellschaften sowie die sich hieraus ergebenden Forderungen eingegangen.

#### 2.1 Wirtschaft und Tourismus

### 2.1.1 Stellung des Tourismus in Mecklenburg-Vorpommern

Der Tourismus hat in Norddeutschland, insbesondere in den küstennahen Gebieten, eine bedeutende Stellung inne. Ca. 20 % des gesamten Gästeaufkommens in Deutschland entfallen auf die nördlichen Bundesländer [1].

Während in anderen Bundesländern ein Rückgang der Gäste- und Übernachtungszahlen beobachtet werden muss, ist in Mecklenburg-Vorpommern weiterhin ein Wachstum zu verzeichnen [2]. Die durchschnittliche Verweildauer der Gäste beträgt 4.1 Tage bzw. 4.6 Tage in den Küstengebieten und liegt damit beträchtlich über dem bundesdeutschen Durchschnitt von 3 Tagen (Stand 1998).

Seit 1990 hat sich die Tourismusindustrie in Mecklenburg-Vorpommern in vielfältiger Weise entwickelt. Hierbei wurden die zu einem großen Teil naturbelassene und unverbrauchte Ostseeküste wie auch die angrenzenden Binnengewässer als landschaftlich reizvolle Gebiete zu besonderen Anziehungspunkten für den Tourismus.

Früh wurden der Wert und das Potential dieser Landschaften erkannt; auch wurde durch

geeignete Maßnahmen versucht, ihren Reiz zu erhalten und in positiver Weise zu Gunsten eines wirtschaftlichen Wachstums zu nutzen. Besonderes Augenmerk wurde auf die Entwicklung des maritimen Tourismus, nämlich den Badeurlaub, Wassersport in allen Facetten sowie Angeln, gerichtet [3].

Insofern wurde in Mecklenburg-Vorpommern der nachhaltige Tourismus, wenn auch primär mit dem Ziel des wirtschaftlichen Wachstums, in den vergangenen Jahren aktiv zu einem Standortvorteil ausgebaut und trägt zur touristischen Attraktivität dieses Bundeslandes bei [4].

Diese positiven Entwicklungstendenzen stellen eine profunde Grundlage für den Einsatz des in dieser Arbeit vorgestellten Passagierschiffs dar. Allerdings ist zu vermerken, dass im Bereich der Ausflugsschifffahrt eine Vielzahl von Angeboten existiert. Dies bedeutet, dass die Platzierung eines neuen Produktes am Markt nur erfolgversprechend ist, wenn Nischenmärkte besetzt bzw. innovative Angebote entwickelt werden.

Die im folgenden vorgestellten Analysen der für das Projekt WaKat geltenden Rahmenbedingungen und technischen Lösungen werden nicht bzw. nur knapp in Hinblick auf die ökonomische Auswirkungen beurteilt. Bei dem in dieser Arbeit vorgestellten Fahrzeug handelt es sich um ein Passagierschiff mit Projektcharakter, d. h. es dient u. a. der Erprobung neuer Technologien und Konzepte unter realistischen Einsatzbedingungen. Dies bedeutet im Allgemeinen höhere Herstellungskosten bei höchstens marginal gesteigerten Einnahmemöglichkeiten. Daher stellt sich die Frage, in wie fern eine Untersuchung und Beurteilung der wirtschaftlichen Parameter notwendig und sinnvoll ist. Häufig wird bei derartigen Projekten eine geringere Rentabilität billigend in Kauf genommen werden, um den Einsatz dieser neuen Lösungen zu ermöglichen. Diese Arbeit erhebt insofern keinen Anspruch, eine umfassende Wirtschaftlichkeitsüberprüfung durchzuführen.

#### 2.1.2 Saison

Mecklenburg-Vorpommern erlebt wie andere Bundesländer bzw. weitere beliebte Urlaubsziele die größten Besucherzahlen während der Hochsaison, d. h. während der Sommermonate. Ein Großteil der Gäste nutzt die sich ihnen bietenden Möglichkeiten, in der Natur auszuspannen bzw. diese zu erleben. In der Vor- und Nachsaison verringert sich der Besucherdruck merklich. In der Off-Season wird das touristische Angebot deutlich reduziert, die Besucherzahlen sind vergleichsweise gering. Der Städtetourismus ist in dieser Zeit dominierend.

Nach Aussagen der Industrie- und Handelskammer Rostock ist als prägende, wirtschaftlich besonders relevante Saison der Zeitraum von Mai bis September anzusehen [5]. Allerdings wird versucht, diese durch Entwicklung eines saisonverlängernden Naturtourismus zu verlängern [3] und hierdurch den z. Zt. bestehenden Konkurenzvorteil im Vergleich zu den benachbarten Bundesländern zu wahren bzw. auszubauen.

Die Konzeption des WaKat sollte derart ausgelegt sein, dass ein Einsatz über den Zeitraum von Mai bis September möglich ist, welcher z. B. bei widrigen Wetterverhältnissen nur im Ausnahmefall zum Erliegen kommt. Eine verlängerte Einsatzzeit kann, sofern die

wirtschaftliche Basis gegeben ist, in Betracht gezogen werden.

#### 2.1.3 Transportkapazität und Fahrtdauer

Aus wirtschaftlicher Sicht ist eine Steigerung der zur Verfügung stehenden Transportkapazität positiv zu beurteilen, da höhere Einnahmen bei nur geringfügig gesteigerten Kosten zu erwarten sind. Unter Berücksichtigung der in Kapitel 2.2 beschriebenen möglichen Einsatzrouten sowie dem Aspekt, ein naturnahes Angebot zu bieten, sind dieser Steigerung allerdings Grenzen gesetzt.

Die Kapazität wird daher auf ca. 60 Plätze festgesetzt. Hierdurch ist die Möglichkeit gegeben, dass Individualreisende, aber auch Busreisen dieses Angebot nutzen können, ohne dass der naturnahe Aspekt sowie das Ausflugserlebnis in einer überschaubaren Gruppe zu sehr gestört werden.

Der Großteil der z. Zt. existierenden Angebote konzentriert sich auf den Sektor der kurzen Fahrten, d. h. auf Fahrten mit einer Dauer von unter drei Stunden. Längere Fahrten werden selten angeboten bzw. mit Aktivitäten an Land kombiniert.

Nach Aussagen der Industrie und Handelskammer Rostock [5] werden vom Publikum primär kurze Ausflugsfahrten nachgefragt. Ein Bedarf für Tagesausflüge ist nur in geringem Umfang vorhanden. Insofern ist der WaKat derart auszulegen, dass ein Einsatz auf den in Teil 2.2 beschriebenen Routen bei einer Fahrtzeit von max. drei Stunden pro Tour möglich ist. Hierdurch ist es möglich, mehrere Fahrten pro Tag anzubieten.

#### 2.1.4 Marktbedürfnisse

Mecklenburg-Vorpommern bietet ÖPNV-Angebote<sup>1</sup> u. a. im küstennahen Bereich, die darauf ausgerichtet sind, den autofreien Tourismus zu ermöglichen und zu fördern. Hierdurch wird zum einen eine Entspannung der Verkehrs- und Parkplatzsituation erreicht, zum anderen die Attraktivität dieses Reisezieles für den autofreien, individuellen Tourismus erhöht.

Zur Zeit wird dieses Angebot durch Linienbusse und Züge, also landgebunden, gewährleistet. Der Ausbau eines marinen Transportnetzes kann zu einer Bereicherung des ÖPNV führen sowie neue Möglichkeiten für touristische Aktivitäten erschließen.

Die individuellen Erwartungen der Passagiere wie auch der Erfolg des Angebotes insgesamt lassen sich durch folgenden Leitspruch beschreiben:

"Qualität, Service und Ambiente bestimmen den Erfolg!" [6]

Der Passagier erwartet, dass die gebotenen Leistungen hohen Ansprüchen Genüge leisten. So hat die eingesetzte Technik störungsfrei zu arbeiten, ohne das Reiseerlebnis des Fahrgastes durch Lärm bzw. Emissionen negativ zu beeinflussen. Der Eindruck des Fahrzeuges

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>ÖPNV: Öffentlicher PersonenNahVerkehr

soll gepflegt sein und sich durch eine saubere Verarbeitung auszeichnen; ein reichhaltiges Platzangebot erfüllt bzw. übertrifft die Erwartungen der Kunden.

Ein zuverlässiger Betrieb sowie Pünktlichkeit im Hinblick auf Ankunfts- und Abfahrtszeiten ist anzustreben. Eine freundliche, offene, aber unaufdringliche Betreuung der Fahrgäste sowie vielfältige, übersichtlich strukturierte und leicht zu verstehende Informationsmöglichkeiten vermitteln den Passagieren einen positiven Eindruck.

Schiffige Ausrüstungselemente sorgen für ein wohliges Ambiente und führen zu einem maritimen Erlebnis der Passagiere. Ein geeignetes Design als Alleinstellungsmerkmal unterstreicht die Neuartigkeit dieses Fahrzeuges.

### 2.2 Mögliche Einsatzgebiete und Einsatzrouten

Wie in Teil 1 beschrieben ist dieses Fahrzeug für den Einsatz im küstennahen Bereich bzw. auf Binnengewässern konzipiert. Im folgenden werden exemplarisch drei mögliche Einsatzszenarien beschrieben. In Abb. 2.1 werden diverse mögliche Einsatzrouten aufgeführt.



Abb. 2.1: Mögliche Einsatzgebiete und -routen

#### 2.2.1 Seebäderverkehr

Bis zu Beginn des ersten Weltkriegs existierte in Mecklenburg-Vorpommern ein reger Seebäderverkehr, der eine Verbindung zwischen den einzelnen Seebädern auf dem Seeweg aufrecht erhielt [7]. Zahlreiche Seebrücken zeugen von diesen Diensten.

Im Zeitraum zwischen ersten und zweiten Weltkrieg wurde der Seebäderverkehr in eingeschränkter Form wieder aufgenommen. Allerdings wurde die Anzahl der Verbindungen wie auch die Taktfrequenz reduziert; die Erfüllung einer Transportaufgabe, d. h. die

Beförderung von Personen und Gütern, rückte zu Gunsten touristischer Angebote in den Hintergrund.

Von 1945 bis 1989 existierte kein nennenswerter Seebäderverkehr. Eine Grundversorgung der Inseln wurde garantiert, touristische Angebote wurden z. T. auch wegen der politische Lage nicht eingeführt.

Erst nach der Wiedervereinigung von BRD und DDR wurde ein Seebäderverkehr in den deutschen Ostseegewässern wieder möglich. Seitdem wurde ein Wiederaufleben des Seebäderverkehrs in einigen Fällen erfolgreich erreicht. So werden z. B. von Rügen bzw. Stralsund aus Ausflugsfahrten angeboten. Hierbei wird der Seebäderverkehr heutzutage mit der Intention betrieben, als Transportmittel die Mobilität im ostdeutschen Küstenraum zu verbessern sowie den Passagieren das Erlebnis einer Ausflugsfahrt auf offener See zu bieten. Güterverkehr, der früher ebenfalls durch den Seebäderverkehr abgewickelt wurde, spielt heute keine Rolle mehr.

Mögliche Einsatzrouten des WaKat sind in Abb. 2.1 dargestellt. So bieten sich z. B. Fahrten auf folgenden Routen an:

- Kühlungsborn Heiligendamm Rostock
- Rostock Graal-Müritz

Diese Routen sind insofern als interessant zu betrachten, da im Umfeld bereits eine gut ausgebaute touristische Infrastruktur vorhanden ist. Der Aufbau eines solchen, für den Betrieb unabdingbaren Umfeldes kann entfallen.

Es ist zu erkennen, dass sich auf der küstennahen Ostsee vielfältige Einsatzmöglichkeiten bieten. Hierbei ist bei der Konzeption des Fahrzeugs darauf zu achten, ein ausreichend gutes Seegangsverhalten für die in Abschnitt 2.3.4 beschriebenen, überwiegend vorherrschenden Verhältnisse zu erreichen. Tiefgangsbeschränkungen existieren nicht bzw. sind unproblematisch.

### 2.2.2 Boddengewässer der Ostsee

Die Boddengewässer der Ostsee sind gekennzeichnet durch geringe Wassertiefe sowie eine im Vergleich zur offenen Ostsee geschützte Lage. Der Tiefgang eines Fahrzeuges in diesen Gewässern sollte zwei Meter nicht überschreiten [8], da ansonsten mit einer Einschränkung des Fahrtgebietes zu rechnen ist.

Höhere Windgeschwindigkeiten sind vergleichsweise selten; bei ungünstiger Windrichtung kann es auf Grund der geringen Wassertiefe zum Entstehen einer steilen, zum Teil auch brechenden Welle kommen. Die maximale Wellenhöhe ist jedoch vergleichsweise gering.

Während dem Seebäderverkehr historisch gesehen primär eine Transportaufgabe zugeschrieben werden kann, ist der Ausflugsverkehr auf den Boddengewässern oft mit dem Gedanken verbunden, reine Luft und schöne Natur zu genießen. Dies sollte bei der Konzeption des Fahrzeuges, z. B. durch ein offenes Design mit gutem Rundumblick, wie auch

bei der Wahl der Fahrtroute berücksichtigt werden. Als mögliche Einsatzrouten sind zu nennen:

- Ribnitz-Damgarten Stralsund mit Halt in Wustrow, Ahrenshoop und Barth
- Stralsund Insel Hiddensee Wiek auf Rügen

Eine eindeutige Unterscheidung zwischen dem Betrieb auf Boddengewässern und dem Seebäderverkehr auf der offenen Ostsee ist allerdings nicht durchgängig möglich; z. T. werden Fahrzeuge auf beiden Gewässern eingesetzt.

#### 2.2.3 Die Warnow

Die Warnow als zweitlängster Fluss Mecklenburg-Vorpommerns kann in zwei Bereiche unterteilt werden, nämlich:

- die Unterwarnow
- die Oberwarnow

Die Unterwarnow umfasst den für die Großschifffahrt zugänglichen Bereich von der Flussmündung in Rostock bis zur Leuchtturmmole von Warnemünde. In diesem Gebiet sind vielfältige Angebote im Bereich der Ausflugsschifffahrt, z. B. Hafenrundfahrten etc., vorhanden.

Neben dem Einsatz des WaKat für Hafenrundfahrten ist der Betrieb im Rahmen der 2003 in Rostock ausgerichteten Internationalen Gartenbauausstellung IGA denkbar. So wären als mögliche Routen der Transfer zwischen West- und Ostufer der Warnow sowie Rundfahrten durch die für im Rahmen der IGA errichteten schwimmenden Gärten zu nennen. Allerdings ist fraglich, ob in der zur Verfügung stehenden kurzen Zeitspanne eine Realisierung des hier genannten Projektes möglich ist.

Während der Betrieb auf der Oberwarnow keine nennenswerten Anforderungen an die Seegangseigenschaften stellt, ist ein gutes Manövrierverhalten notwendig, um z. B. im Bereich der für die IGA geplanten schwimmenden Gärten präzise und fahrplangerecht operieren zu können. Der maximale Tiefgang sollte 3 m nicht überschreiten, da es ansonsten zu Problemen im Bereich der An- und Ablegestellen kommen könnte.

Der Begriff Oberwarnow beschreibt das Fliesgewässer von den Quellen ausgehend bis zur Einmündung in die Unterwarnow in Rostock. Dieser ökologisch sehr sensible Bereich<sup>2</sup> dient der Hansestadt Rostock zur Rohwassergewinnung für die Trinkwasseraufbereitung [9].

Bis in die 70er Jahre des vergangenen Jahrhunderts wurde auf der Oberwarnow Schifffahrt zwischen Rostock und Schwaan, siehe Abb. 2.1, betrieben; Anlegestellen<sup>3</sup> existierten in

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Siehe hierzu auch Abschnitt 2.4.4

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>Siehe auch Abb. 2.13

Papendorf und Huckstorf. Eine Wiederbelebung dieser ca. 21 Kilometer langen Strecke würde Interessierten einen Einblick in die Ökologie des Warnowtales geben sowie zur Entwicklung des strukturschwachen ländlichen Raumes beitragen.

Dieses Einsatzgebiet stellt hohe Anforderungen an die Konzeption des Fahrzeuges. Das begrenzte, nicht markierte Fahrwasser erfordert eine hohe Manövrierfähigkeit sowie präzise Navigation. Da das Fahrzeug die Schleuse in Rostock passieren soll, ist die maximale Schleusenbreite von 6.5 Meter zu berücksichtigen. Dies beschränkt die Breite des WaKat auf ca. 5.5 Metern. Das in Abb. 2.2 und Abb. 2.3 aufgeführte Bodenprofil der Warnow zeigt das für einen mäandernden Rinnsee typische Flussbett. Die Fahrwasserrinne ist an den flachsten Stellen maximal 1.8 Meter tief. Diverse die Warnow überquerende Eisenbahnund Autobrücken begrenzen die maximale Durchfahrthöhe auf ca. 3.5 Meter<sup>4</sup>.

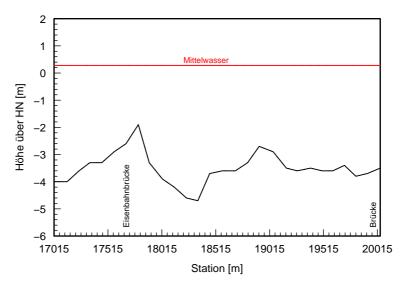


Abb. 2.2: Längsprofil der Warnow zwischen km 17 und km 20 [10]

Der Wasserstand der Warnow unterliegt saisonalen Gegebenheiten; durch kurzfristige Gegebenheiten wie starke Regenfälle treten weitere Schwankungen auf. Abb. 2.4 zeigt exemplarisch für den Zeitraum vom 10.5.1999 bis zum 17.5.1999 die Entwicklung des Wasserstands wie auch der Durchflussmenge bei Schwaan. Es ist zu erkennen, dass während dieser Zeitraum eine Schwankung des Wasserstands um  $\pm 10$  Zentimeter zu verzeichnen ist. Während der Sommermonate ist auf Grund der stabilen Wetterlage wie auch der geringen Niederschlägen eine im Vergleich zu Abb 2.4 geringere Variation des Wasserstandes zu erwarten. Der Wasserstand wird durch die Schleuse Rostock-Mühlendamm sowie ein Stauwehr weitgehend konstant gehalten.

Während von Schwaan an in Richtung Quelle eine signifikante Strömungsgeschwindigkeit zu verzeichnen ist, verringert sich diese auf dem Abschnitt von Rostock bis Schwaan infolge der Staueinrichtungen in Rostock-Mühlendamm deutlich. So beträgt die mittlere Strömungsgeschwindigkeit in Schwaan ca. 0.1 - 0.2 m/s entsprechend 0.36 - 0.72 km/h

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup>Schätzungen des Autors

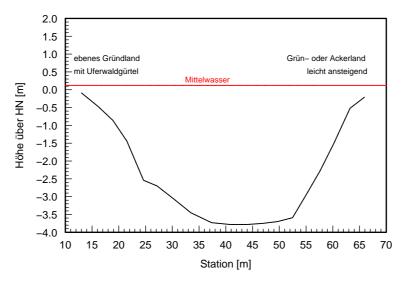


Abb. 2.3: Querprofil der Warnow bei km $20.5\ [10]$ 

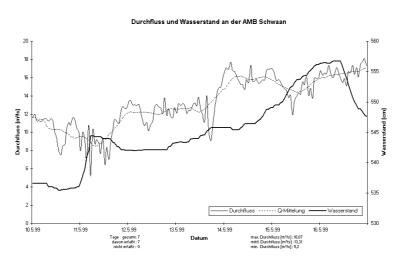


Abb. 2.4: Durchflussmenge und Wasserstand der Oberwarnow bei Schwaan [11]

[10] [12]. Derartige Strömungsgeschwindigkeiten sind häufig auch auf offener See und in Hafengewässern vorhanden bzw. werden übertroffen, so dass hieraus keine besonderen Anforderungen an die Auslegung und Konstruktion des Fahrzeuges abzuleiten sind.

#### 2.3 Klima

Das Klima in Norddeutschland ist von maritimen Einflüssen bestimmt. Häufige Wetterwechsel treten auf. Es herrschen milde Winter und vorwiegend Nordwestwinde [1]. In Mecklenburg-Vorpommern sind in Richtung Westen zunehmend kontinental-gemäßigte Einflüsse bemerkbar. Die Insellagen, insbesondere Rügen, zeichnen sich im Sommer durch eine im Vergleich zum gesamten Bundesgebiet überdurchschnittlich hohe monatliche Sonnenscheindauer aus<sup>5</sup>. Vorherrschende Windrichtungen im Küstenbereich Mecklenburg-Vorpommerns sind West bzw. Süd.

Im Folgenden wird ein Überblick über die für dieses Projekt relevanten Klimaparameter im deutschen Ostseeraum gegeben. Hierbei können aus Platzgründen nur Durchschnittswerte angegeben werden. Eine Variation bzw. Fluktuation bedingt durch das Kurzzeitwettergeschehen ist zu erwarten.

## 2.3.1 Sonnenschein und solare Einstrahlung

Die solare Einstrahlung an der deutschen Ostseeküste wird begünstigt durch die vergleichsweise lange Sonnenscheindauer und die während der Sommermonate im allgemeinen vorherrschenden wolkenarmen Wetterlagen.

Dies führt, wie aus Abb. 2.5 zu ersehen, zu einer mittleren täglichen Einstrahlung von 2.8 -  $3 \, kWh/m^2$ . Verglichen mit der "Solarhochburg" Kaiserstuhl in Baden-Württemberg, die mittlere tägliche Einstrahlung beträgt dort ca. 3.25  $kWh/m^2$ , ist der Unterschied gering.

In den Sommermonaten beträgt die monatlich gemittelte mittlere Sonneneinstrahlung im Bereich der deutschen Ostseeküste ca. 5.6 -  $5.9 \ kWh/m^2$ , siehe Abb. 2.6. Dies ist einer der höchsten Werte, die in Deutschland für diesen Zeitraum gemessen werden und zeigt das Potential, das durch die Solarenergie genutzt werden könnte [13].

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup>Z. B. 414 Stunden/Monat am Kap Arkona (Juli 1995) [1]

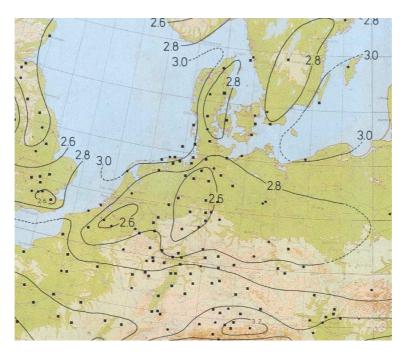


Abb. 2.5: Mittlere tägliche Einstrahlung in  $kWh/m^2\cdot Tag$  (Jahresdurchschnitt) [13] Abbildung basierend auf Messungen durchgeführt von 1966 bis 1975

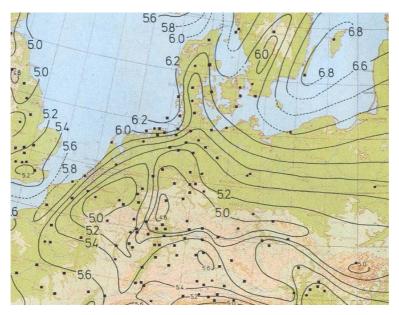


Abb. 2.6: Mittlere tägliche solare Einstrahlung für den Monat Juni in  $kWh/m^2\cdot Tag$  [13] Abbildung basierend auf Messungen durchgeführt von 1966 bis 1975

Nach einer Langzeitmessung in Lübeck für den Zeitraum von 1991 bis 2000 beträgt die jährliche Energieeinstrahlung durch die Sonne (Globalstrahlung) 1014  $kWh/m^2$  [14]. Die Schwankungsbreite beträgt 14%. Die Verteilung der Energieeinstrahlung über die Hauptsaison, d. h. von Mai bis September, ist in Abb. 2.7 dargestellt.

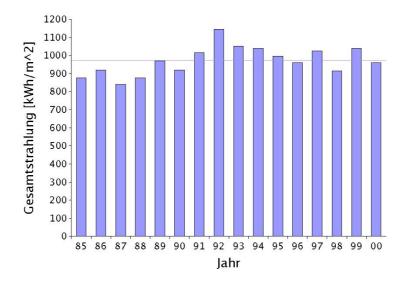


Abb. 2.7: Langjährige Entwicklung der Jahresgesamtstrahlung [14] Der Mittelwert der solaren Einstrahlung für den Zeitraum von 1985 bis 2000 beträgt 971.5  $kWh/m^2$ . Für den Zeitraum von 1991 - 2000 beträgt der Mittelwert 1014  $kWh/m^2 \cdot Jahr$ . Gemessen wurde die horizontale Einstrahlung, d. h. die Strahlungsmenge, welche mit Hilfe eines horizontal angeordneten Messgeräts bestimmt werden kann.

Tabelle 2.1 zeigt die gemittelten täglichen Sonnenstunden der Hauptsaison für den Standort Heiligendamm [13].

Monat	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep
Sonnenstunden [h]	7.7	9.1	7.8	8.2	5.3

Tab. 2.1: Gemittelte Sonnenstunden pro Tag in Heiligendamm [13] Daten basierend auf Messwerten aus dem Zeitraum 1966 bis 1975

### 2.3.2 Temperatur

Die monatlich gemittelten Tageshöchst- bzw. nächtlichen Tiefsttemperaturen sind in Abb. 2.8 dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass von Juni bis September die Temperaturen im Durchschnitt in einem Bereich liegen, der den Betrieb ohne zusätzliche Heizungseinrichtungen ermöglicht. Der Monat Mai zeichnet sich durch kühle Nächte sowie bereits verhältnismäßig warme Nachmittage aus. Vormittags kann unter Umständen das Wetter empfindlich kühl sein.

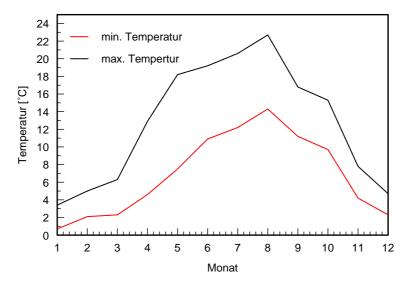


Abb. 2.8: Monatlich gemittelte mittlere Temperatur in Warnemünde, [15] Diagramm basierend auf Messwerten aus dem Zeitraum 1996 bis 2001

In den Monaten Januar bis April sowie September bis zum Jahresende sinkt die Temperatur derart, dass ein Betrieb des WaKat nur mit zusätzlichem Wetterschutz und Heizungsmöglichkeiten sinnvoll zu gewährleisten ist.

#### 2.3.3 Wind

Wind bewirkt, neben einem gesteigerten Kälteempfinden beim Menschen<sup>6</sup>, den Aufbau und die Ausprägung des Seegangs. Wie in Abschnitt 2.3.4 beschrieben, ist es daher möglich, an Hand der vorliegenden Windsituation und den gegebenen geographischen Faktoren Aussagen über die Seegangsverhältnisse zu geben.

Für den Standort Lübeck sind in Abb. 2.9 monatlich gemittelte Windgeschwindigkeiten aufgeführt. Es ist zu erkennen, dass im Sommer im Mittel geringfügig geringere Windgeschwindigkeiten vorliegen als in den anderen Jahreszeiten. Länger anhaltende Stürme bzw. starke Winde, deren Existenz sich aus den aufgeführten Mittelwerten erkennen ließe, sind nicht zu verzeichnen. Die Schwankungsbreite der Windgeschwindigkeiten ist groß. Das lokale Wettergeschehen beeinflusst sowie verändert die vorherrschenden Windgeschwindigkeiten innerhalb kurzer Zeiträume. In Abb. 2.10 ist dies deutlich zu erkennen.

Nach Tab. 2.2 bestimmen Winde aus Süd bis West das Wettergeschehen an der deutschen Ostseeküste [15].

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup>Bekannt unter dem Terminus "windchill factor"

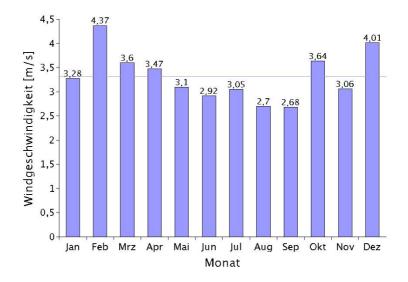


Abb. 2.9: Monatlich gemittelte mittlere Windgeschwindigkeit in Lübeck [15] Für diese Abbildung wurden Messwerte aus dem Zeitraum 1985 bis 2000 ausgewertet. Der Jahresmittelwert beträgt 3.32 m/s

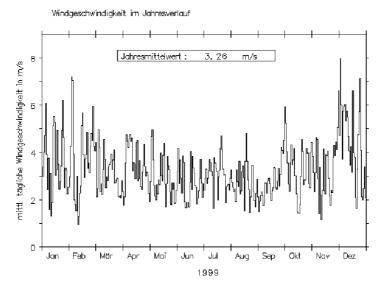


Abb. 2.10: Jahresgang der mittleren täglichen Windgeschwindigkeiten in Lübeck 1999 [14]

Windrichtung	N	NO	О	SO	S	$\mathbf{SW}$	W	NW
Häufigkeit [%]	7	3	6	11	20	19	21	13

Tab. 2.2: Häufigkeit der Windrichtungen [15] Die Statistik wurde aus Messwerten berechnet, die im Zeitraum von 1996 bis 2001 aufgenommen wurden

Hierdurch ist im küstennahen Bereich im Allgemeinen mit ablandigem Wind bzw. Winden parallel zur Küstenlinie zu rechnen. Dies wird allerdings durch die lokalen geographischen Gegebenheiten beeinflusst.

#### 2.3.4 Seegang

Für die Projektierung wie auch für den Betrieb eines Schiffes sind die zu erwartenden Seegangsverhältnisse zu beachten. Während auf geschützten Gewässern wie z. B. dem Saaler Bodden und Flüssen nur geringe Wellenhöhen zu beobachten sind, ist auf der Ostsee gegebenenfalls mit starkem Seegang zu rechnen.

Ein im küstennahen Bereich der Ostsee eingesetztes Fahrzeug ist dementsprechend derart auszulegen, dass der Betrieb nur in Ausnahmefällen durch ungewöhnlich schlechte Wetterund Seegangssituationen behindert wird oder gar eingestellt werden muss.

Eine belastbare Aussage über die zu einem bestimmten Zeitpunkt vorherrschenden Seegangsverhältnisse ist nur schwer möglich. Die Ausprägung des Seeganges wird durch geographische Gegebenheiten wie z. B. Wassertiefe, Windwirklänge, Windgeschwindigkeit und Windwirkzeit sowie durch Strömungsverhältnisse beeinflusst.

Flächendeckende, über einen längeren Zeitraum durchgeführte Messungen der Seegangsverhältnisse in der Ostsee während der Hauptsaison liegen nicht vor. Durch das Bundesamt für Seehydrographie (BSH) werden ab 2002 ganzjährige Messungen an einer Messboje westlich von Rügen durchgeführt.

Die durch den Seehydrogaphischen Dienst der Deutschen Demokratischen Republik für die südliche Ostsee veröffentlichten Karten<sup>7</sup> geben für gegebene Windgeschwindigkeiten Auskunft über die bei vollständig ausgeprägtem Seegang zu erwartenden Seegangsverhältnisse, d. h. Wellenhöhe, Wellenperiode und Wellenlänge [16].

Auswertungen von Statistiken zeigen, dass es in der westlichen Ostsee nur in 5 bis 10 % der Fälle zur Entwicklung eines voll ausgeprägten Seegangs kommt. Die Mindestwirkzeit  $t_{min}$ , d. h. die minimal benötigte Zeit konstanter Windstärke und Richtung zur Ausbildung von voll ausgeprägtem Seegang, ist in Abhängigkeit von Wellenhöhe und Windstärke auszugsweise in Tab. 2.3 aufgeführt.

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup>Die auf den Karten dargestellten Wellenhöhen wurden auf mathematischem Wege gewonnen.

$\mathbf{WS} \setminus \mathbf{H}$	0.5 m	1.0 m	1.5 m	2.0 m
4 Bft	1.7	8.2	20.8	-
5 Bft	0.7	3.4	8.4	16.4
6 Bft	0.1	1.2	3.0	5.8

Tab. 2.3: Mindestwirkzeit  $t_{min}$  [h] in Abhängigkeit von Wellenhöhe H und Windstärke<sup>8</sup>WS [16]

Mit Hilfe von Approximationen kann für den Fall, dass kein voll ausgeprägter Seegang vorliegt, auf die Seegangsverhältnisse geschlossen werden. Hierbei berechnet sich, ausgehend von den in [16] aufgeführten Wellenhöhen H, die real zum Zeitpunkt  $t_{real}$  vorliegende Wellenhöhe  $H_{real}$  wie folgt:

$$H_{real} = k_t \cdot H \tag{2.1}$$

Der Koeffizient  $k_t$  kann Tab. 2.4 entnommen werden.

ſ	$t_{real}/t_{min}$	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.60	0.80	1.00
ſ	$k_t$	0.27	0.36	0.49	0.59	0.67	0.80	0.91	1.00

Tab. 2.4: Koeffizient  $k_t$  zur Berücksichtigung der realen Windwirkezeit bei der Ausbildung von voll ausgeprägtem Seegang [16]

Die Wellenhöhe im küstennahen Bereich, für die häufig keine expliziten Angaben vorliegen, kann mittels Interpolation bestimmt werden. Beträgt die Entfernung zwischen Leeküste und der zu betrachtenden Position X Seemeilen so berechnet sich die Wellenhöhe  $H_x$  an diesem Ort über:

$$H_x = k_x \cdot H_{ISO} \tag{2.2}$$

 $H_{ISO}$  bezeichnet die Wellenhöhe an der Isounde, welche der Küste am nächsten ist,  $X_{ISO}$  den Abstand zwischen Isounde und Leeküste. Der Interpolationsfaktor  $k_x$  kann mit Hilfe von Tab. 2.5 bestimmt werden.

ĺ	$X/X_{ISO}$	0.10	0.20	0.30	0.40	0.60	0.80	1.00
	$k_x$	0.44	0.57	0.65	0.72	0.84	0.92	1.00

Tab. 2.5: Interpolationsfaktor  $k_x$  zur Bestimmung der Wellenhöhe zwischen Leeküste und 1. Isounde [16]

Wie in Abschnitt 2.3.3 beschrieben herrschen im Sommer geringe Windgeschwindigkeiten vor. Nach Abbildung 2.10 überschritt die mittlere tägliche Windgeschwindigkeit<sup>9</sup> in der Hauptsaison 6 m/s, entsprechend 4 Bft, nicht.

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup>Für eine Definition der Beaufort-Skala siehe Kap. A.1 im Anhang

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup>Messungen für den Zeitraum Mai bis September 1999

Für eine Windgeschwindigkeit von 5 Bft ist in Abb. 2.11 und Abb. 2.12 die sich in voll ausgeprägtem Seegang einstellende Wellenhöhe<sup>10</sup> dargestellt. Es ist zu erkennen, dass im küstennahen Bereich bei Westwind, einer der dominierenden Windrichtungen, die Wellenhöhe 1.00 bis 1.25 Meter nicht übersteigt. Nördliche Winde, die nur sehr selten vorherrschen, führen zu sehr starker Wellenbildung; die maximale Wellenhöhe im Küstenbereich beträgt 1.50 Meter.

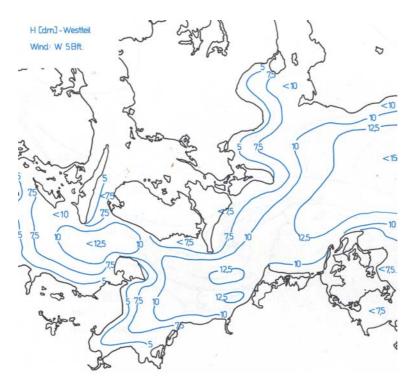


Abb. 2.11: Wellenhöhe für voll ausgeprägtem Seegang bei Wind aus West mit 5 Bft [16]

## 2.4 Umweltschutz

Eine begründete, umfassende und stichhaltige Definition von Umweltschutz, die von großen Teilen der Weltbevölkerung als konsensfähig angesehen wird, ist schwierig. Die individuelle Einstellung zu und Auffassung von Umweltschutz ist sehr unterschiedlich und wird durch die persönliche Lebensweise, die soziale wie auch politische Umgebung sowie den entsprechenden Kulturkreis geprägt.

Eine ausführliche Untersuchung und Beschreibung der Problematik Umweltschutz sowie der hierfür notwendigen Definition von Umwelt würde den Umfang dieser Arbeit stark vergrößern, ohne einen substantiellen Beitrag zur Ergebnisfindung zu liefern. Daher wird

 $<sup>^{10}\</sup>mathrm{Es}$  wird ein Wellenhöhenmaß benutzt, das als die Wellenhöhe an der Untergrenze der 3%höchsten Wellen definiert ist

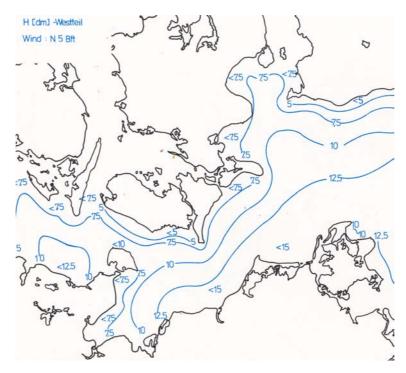


Abb. 2.12: Wellenhöhen für voll ausgeprägtem Seegang bei Wind aus Nord mit 5 Bft [16]

im folgenden nur eine für den Inhalt der Arbeit erforderliche kurze Definition gegeben. Es wird davon ausgegangen, dass der Leser Grundwissen über Umwelt und Umweltschutz besitzt.

## 2.4.1 Einordnung des Begriffs "Umweltschutz"

Die im Zuge der fortschreitenden Industrialisierung angewachsenen bzw. entstandenen Umweltprobleme sind auf zwei Bereiche zurückzuführen [17]:

- Verbauch von ökologisch knappen Ressourcen (z. B. Erdöl, Grundwasser, Boden)
- Abgabe von stofflichen bzw. energetischen umweltschädigenden Emissionen an die Umwelt (z. B. toxische Substanzen, Kohlenstoffdioxid, Lärm)

Der Begriff Umweltschutz wird häufig herangezogen, wenn eine Verfahrensweise zur Vermeidung dieser Umweltprobleme beschrieben wird. Im allgemeinen Sprachgebrauch wird allerdings häufig von Umweltschutz gesprochen, ohne eine ausreichende Definition dieses Begriffes zu liefern, so dass es auf Grund von unterschiedlichen Auffassungen zu Missverständnissen kommen kann.

Alternativ wird die Problematik auch mit Hilfe der eindeutigeren Termini Umweltverträglichkeit bzw. Nachhaltigkeit umschrieben. Der im zentraleuropäischen Raum vorherr-

schende weitgehende Konsens über die Bedeutung dieser beiden, weitestgehend äquivalenten Begriffe wird im folgenden wiedergegeben:

"Nachhaltige Entwicklung oder Nachhaltigkeit wird definiert als wirtschaftliche Tätigkeit, die die Bedürfnisse der gegenwärtigen Generation erfüllt, ohne die Fähigkeit zukünftiger Generationen zu beeinträchtigen, deren Bedürfnisse zu erfüllen. Nachhaltigkeit basiert auf drei Komponenten: Wirtschaft, Sozialwesen und Umweltschutz. Zu den wirtschaftlichen Aspekten der Nachhaltigkeit gehören unter anderem finanzielle Ergebnisse, Bezahlung der Mitarbeiter und Beiträge zum Gemeinwesen. Beispiele sozialer Aspekte sind der Öffentlichkeit bekannte Richtlinien, faire Arbeitsnormen und gleiche Behandlung aller Mitarbeiter. Zu den Umweltschutzaspekten gehören Auswirkungen auf Luft, Wasser, Erde und natürliche Rohstoffe sowie auf die menschliche Gesundheit." [18]

#### 2.4.2 Internationale Abkommen und lokale Initiativen

Um die in Abschnitt 2.4.1 beschriebenen Ziele zu erreichen, wurden von der Bundesregierung, wie auch von anderen Staaten, Institutionen und Einrichtungen, Maßnahmen auf internationaler wie lokaler Ebene ergriffen.

Auf dem Klimagipfel von 1992 in Rio wurde eine globale Klimarahmenkonvention mit dem Ziel verabschiedet, die Konzentration der Treibhausgase zu stabilisieren und eine Störung des Klimasystems zu verhindern. Ziel war es:

" ... die Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen auf einem Niveau zu erreichen, ... dass sich die Ökosysteme auf natürliche Weise den Klimaänderungen anpassen können, die Nahrungsmittelerzeugung nicht bedroht wird und die wirtschaftliche Entwicklung auf nachhaltige Weise fortgeführt werden kann." [19]

Diese wurde auf der Klimakonferenz 1997 in Kyoto weiter konkretisiert. Hierbei verpflichteten sich die für den Treibhauseffekt primär verantwortlichen Industrieländer zu konkreten Minderungszielen [20]. Dieses sog. Kyoto-Protokoll wurde auf den Folgekonferenzen<sup>11</sup> weiter präzisiert und in Marrakesch 2001 rechtlich verbindlich verabschiedet.

Während auf internationaler Ebene der Klimaschutz im Fokus der Entscheidungsfindung steht, wird auf lokaler Ebene eine umfassende Einführung von nachhaltiger Entwicklung angestrebt, d. h. die Einführung einer ökologisch, sozial wie auch wirtschaftlich tragfähigen Handlungsweise. Zu diesem Zweck wurde in Rostock, wie in vielen anderen Städten, die Lokale Agenda 21 [21] eingerichtet. Ziel dieses Gremiums ist es, die globalen Ziele für eine nachhaltige und zukunftsfähige Entwicklung auf die konkreten Bedingungen und Bedürfnisse der Stadt Rostock umzusetzen und somit dazu beizutragen, die anstehenden Probleme zu bewältigen. Dies bedeutet konkret [22]:

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup>U. a. in Genf (1996) und Bonn (1999)

- Erarbeitung eines Handlungsprogramms durch die Stadt Rostock für eine nachhaltige Entwicklung
- Stärkung des Umweltbewusstseins der Bürger durch Öffentlichkeitsarbeit sowie Anregung und Förderung des Gedankens der Nachhaltigkeit in der Bürgerschaft.
- Einrichtung eines Forums mit dem Ziel der Konsensfindung zwischen den gesellschaftlichen Akteuren
- Systematische Umsetzung der Ziele in konkreten Vorhaben und Projekte

Als Teil des Prozesses der Lokalen Agenda 21 könnte das Projekt WaKat einen Präzedenzfall für den ökologisch sinnvollen, nachhaltigen Betrieb eines touristischen Angebotes dienen. Weiterhin ist denkbar, dass die Verwirklichung dieses Konzeptes nicht nur zu einer nachhaltigen Entwicklung in Umweltschutzbelangen führt, sondern ebenfalls die wirtschaftliche Nachhaltigkeit für die Region Mecklenburg-Vorpommern fördert, indem hierdurch der Aufbau einer technologischen Kernkompetenz wie z. B. die Entwicklung eines Wasserstoffkreislaufes o. ä. initiiert wird, die langfristig und umweltverträglich betrieben werden kann.

#### 2.4.3 Zu berücksichtigende Umweltaspekte

In Abschnitt 2.4.2 sind die allgemeinen Bemühungen der Bundesregierung und der Stadt Rostock aufgezeigt.

Für den Betrieb eines umweltverträglichen Fahrzeuges auf den in Kapitel 2.2 genannten Strecken sind folgende Aspekte zu berücksichtigen [23]:

- Schadstoffemissionen sind so gering wie möglich zu halten.
- Geringer Uberwasser- wie Unterwassergeräuschpegel im Betrieb wie in Ruhe. Dies schließt durch die Passagiere verursachten Lärm mit ein.
- Im Havariefall ist zu vermeiden, dass über das Niveau bei ordnungsgemäßem Betrieb hinausgehend Schadstoffe an die Umwelt abgegeben werden.
- Geringe Wellenbildung. Ansonsten kann eine Beschädigung von Schilfgürteln und Uferzonen hervorgerufen werden; eine unerwünschte Beeinflussung der Fauna ist nicht auszuschließen.
- Durch Propulsionsorgane, Wirbelbildung etc. kann eine unerwünschte Aufwirbelung des Sediments am Gewässerboden herbeigeführt werden. Dies kann eine vermehrte Eutrophierung sowie die Freisetzung von zuvor gebundenen Schadstoffen bewirken und ist daher zu vermeiden bzw. zu minimieren.
- Geringe Scheuchwirkung, da durch den Scheucheffekt ungewünschter sowie unnötigen Stress bei der Tierwelt verursacht wird.

Die Festlegung von akzeptablen Grenzwerten bzw. Maximalbelastungen ist sehr schwierig; zu vielfältig und komplex sind die Zusammenhänge, die den Naturhaushalt beeinflussen bzw. das Verhalten von Flora und Fauna bestimmen.

Insofern kann in dieser Arbeit keine konkrete Aussage über zu tolerierende Belastungen gegeben werden. Es wird vielmehr versucht, das Potential von modernen, integrierten, umwelteffizienten Technologien aufzuzeigen und Einsatzszenarien zu beschreiben.

Ob der Einsatz derartiger Technologien schädlich bzw. förderlich in den Naturkreislauf eingreift, kann auf Grund der Komplexität der Problematik nur schwer beurteilt werden [24]. Es ist allerdings zu vermerken, dass oftmals positiv gemeinte Veränderungen der Natur bzw. Versuche der Steuerung von Ökosystemen gravierende negative Auswirkungen zur Folge hatten, deren Auftreten vorher nicht absehbar waren, siehe [25]. Eine Entscheidung, ob die eventuell zu erzielenden "Umweltverbesserungen" die Inkaufnahme des Risikos eines Fehlschlages inklusive aller hiermit verbundenen Konsequenzen rechtfertigen, sollte erst nach Durchführung einer umfangreichen Untersuchung verbunden mit einem Gesellschaftsgrenzen überschreitenden Risikodiskurs getroffen werden [26]. Ist diese ausführliche Untersuchung der Problematik nicht durchführbar bzw. führt zu unklaren Ergebnissen, so sollte nicht von positiven Wirkungen auf die Umwelt ausgegangen werden.

#### 2.4.4 Auswirkungen auf das Projekt WaKat

Die Auswirkungen der in Abschnitt 2.4.3 beschriebenen Aspekte sind, abhängig von der jeweiligen Einsatzroute, unterschiedlich.

- a) Ostsee und Unterwarnow Für den Einsatz auf der Ostsee sowie im Bereich der Unterwarnow sind keine besonderen Einschränkungen gesetzlich vorgeschrieben; energiesparende bzw. konsequent resourcenschonende Fahrzeuge werden z. Zt. nicht eingesetzt. Daher würde eine Auslegung als Niedrigenergieschiff bereits ein Novum in diesen Gewässern darstellen.
- b) Boddengewässer Beim Betrieb auf den Boddengewässern mit ihren begrenzten Gewässertiefen ist darauf zu achten, dass die durch das Fahrzeug verursachten Wirbelbildungen keine nachteiligen Beeinflussungen des Meeresgrundes hervorrufen. Verbindliche gesetzliche Vorschriften existieren nach Kenntnisstand zur Zeit der Drucklegung aber nicht.
- c) Sonderfall Oberwarnow Ein Einsatz auf der Oberwarnow im Bereich zwischen Rostock und Schwaan ist vielfältigen und weitgreifenden Einschränkungen und Auflagen unterworfen.

So dient die Warnow der Stadt Rostock als Trinkwasserlieferant; eine Verschmutzung des Wassers mit Schadstoffen sowie die Störung des natürlichen Selbstreinigungsvermögens kann gravierende Folgen haben und ist daher durch geeignete konzeptionelle Lösungen auszuschließen. Dies wird u. a. durch die Trinkwasserschutzzonen-Verordnung geregelt.

Vermoorte jungeiszeitliche Abflussrinnen, wie sie u. a. das Warnowtal darstellt, gibt es europaweit fast nur in Mecklenburg-Vorpommern. Eine artenreiche Tierwelt und die weitgehend ungestörte Naturlandschaft der Warnow betonen die Notwendigkeit, diesen ökologisch wichtigen Bereich zu erhalten [10].

Seit 1967 sind Teile der Warnow als Naturschutzgebiet ausgewiesen worden, siehe Abb. 2.13. Weiterhin unterliegt das gesamte Warnoweinzugsgebiet als FFH-Gebiet<sup>12</sup> weitreichenden Umweltschutzauflagen.

Bewertung Zusammenfassend ist eine Bewertung der in Abschnitt 2.4.3 genannten Aspekte in Hinblick auf den jeweiligen Einsatzort in Tabelle 2.6 aufgeführt. Der besondere Schutzstatus der Oberwarnow ist deutlich zu erkennen.

Aspekt \ Variante	Ostsee, Unterwarnow	Boddengew.	Oberwarnow
Schadstoffemission	+	+	+
Geräuschpegel	-	O	++
Havariefall <sup>13</sup>	О	O	++
Wellenbildung	-	-	++
Aufwirbelung	О	+	++

Tab. 2.6: Bewertung der Umweltschutzproblematik der Einsatzrouten -: unwichtig, o: bedingt wichtig , +: wichtig, ++: sehr wichtig

# 2.5 Vorschriften der Klassifikationsgesellschaften

Die küstennahe Ostsee, die Boddengewässer wie auch der Hafenbereich der Unterwarnow sind Küstengewässer. Auf diesen Gewässern operierende Fahrzeuge unterliegen daher den Regelungen und Gesetzen der Küstenfahrt. Im Gegensatz dazu ist die Oberwarnow ein Binnengewässer. Der Abschnitt zwischen Rostock und Schwaan wurde früher als Binnenschifffahrtsstraße genutzt.

Kommerziell operierende Fahrzeuge, wie u. a. auch der WaKat, müssen die Vorschriften und Regelungen der für das jeweilige Fahrtgebiet zuständigen Organisationen, Behörden und Gremien erfüllen. Diese sind u. a.:

- Die Klassifikationsgesellschaften (u. a. Germanischer Lloyd, Det Norske Veritas)
- Die Binnenschifffahrts-Untersuchungsordnung (für den Betrieb auf Binnengewässern)

<sup>&</sup>lt;sup>12</sup>Flauna und Flora Habitat - eine EU-weit gültige Richtlinie zur Erhaltung der natürlichen Lebensräume sowie der wildlebenden Tiere und Pflanzen [27], [28]

<sup>&</sup>lt;sup>13</sup>Unter dem Aspekt "Havariefall" werden die Auswirkungen eines Havariefalls auf die Umwelt begutachtet. So bedeutet "++", dass gravierende Folgen zu erwarten sind.

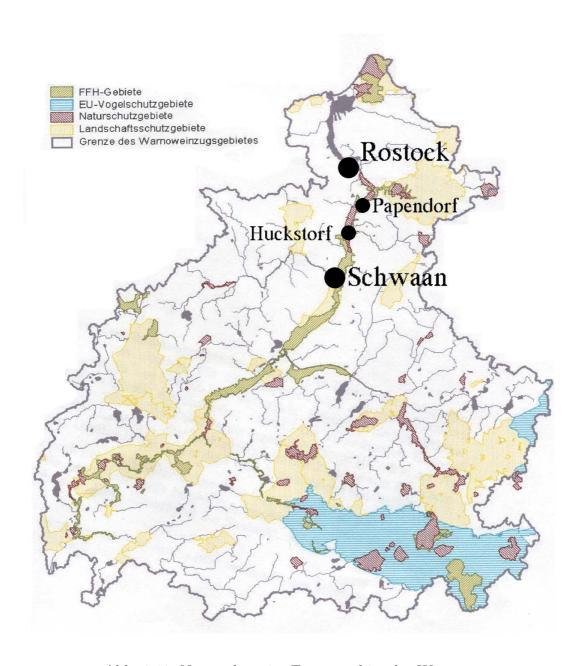


Abb. 2.13: Naturschutz im Einzugsgebiet der Warnow

- Die Seeberufsgenossenschaft
- Die für das jeweilige Gewässer zuständigen Gewässeraufsichtsämter

Eine befristete bzw. bedingte Erweiterung des Fahrtgebietes ist auf Antrag möglich [29].

Ziel dieser Verordnungen ist es, den Entwurf von Fahrzeugen derart zu gestalten, dass eine akzeptabel hohe Sicherheit im Betrieb erreicht wird wie auch notwendige Anforderungen an Ladung, Passagiere bzw. Besatzung erfüllt werden. Regelmäßige Kontrollen stellen sicher, dass die in den Vorschriften festgeschrieben Standards durch die Fahrzeuge bis zum Betriebsende eingehalten werden. Eine besonders wichtige Aufgabe fällt hierbei den Klassifikationgesellschaften zu. Deren Aufgabe kann wie folgt beschrieben werden:

"Die Konstruktion der Schiffe wird von Klassifikationsgesellschaften überprüft und überwacht. Dies sind hochspezialisierte private Gesellschaften mit langjähriger Erfahrung in der Schifffahrt, die Hunderte, in einigen Fällen sogar Tausende von Fachleuten beschäftigen und von mächtigen Forschungs- und Rechenzentren unterstützt werden. Die Klassifikationsgesellschaften prüfen den Zustand eines Schiffes anhand der technischen Normen, die jede Gesellschaft für die Ausstellung des Klassifikationszeugnisses festgelegt hat. Zudem sind sie häufig befugt, im Namen des Flaggenstaates zu prüfen, ob die Sicherheits- und Umweltschutzvorschriften der internationalen Übereinkommen erfüllt werden, und die vorgeschriebenen Zeugnisse auszustellen." [30]

Durch die Klassifikationsvorschriften werden u. a. geregelt:

- Eingesetzte Materialien und Festigkeitsanforderungen
- Intakt- und Leckstabilität
- Seegangstauglichkeit und -verhalten
- Ausfallsicherheit, Redundanzanforderungen, Unfallverhütung
- Schwingungsamplituden und Geräuschniveaus
- Rettungsmittel
- Qualifikation der Besatzung

Beispielhaft werden im folgenden drei dem WaKat ähnliche Fahrzeuge sowie deren Klassifikation beschrieben<sup>14</sup>:

**Hydra** Das Fahrzeug "Hydra" ist ein mit Brennstoffzellen betriebenes Passagierschiff für den Transport von 22 Passagieren, welches für den Einsatz auf stehenden oder langsam fließenden Gewässern konzipiert ist. Die Sicherheitseinrichtungen wurden in enger Zusammenarbeit mit dem Germanischen Lloyd entwickelt [31].

<sup>&</sup>lt;sup>14</sup>Abbildungen dieser Fahrzeuge sind in Anhang C zu finden

La Becassine Bei "La Becassine" handelt es sich um ein schlankes Fahrgastschiff von ca. 21 Meter Länge aus dem Jahre 1920, welches auf dem Genfer See eingesetzt wird. Dieses wurde 2000 auf Elektroantrieb umgerüstet; die Energieversorgung erfolgt photovoltaisch. Das Fahrzeug erfüllt die Schiffbauverordnung der Schweiz, Stand 1994 [32].

Solarschiff "Alsterbus" Durch das Institut für Solarschiffbau [33] wurde ein solar betriebenes Passagierschiff für den Transport von ca. 60 bis 80 Passagieren konzipiert. Die für den Entwurf herangezogenen Vorschriften bzw. kontaktierten Institutionen sind:

- Germanischer Lloyd: Klassifikations- und Bauvorschriften für Binnenschiffe, speziell Personenschifffahrt
- die Binnenschiffs-Untersuchungsordnung
- die Rheinschiffs-Untersuchungsordnung

# Teil 3

# Schiffbau / Entwurf

Ausgehend von einer Zusammenfassung der in Teil 2 beschriebenen Rahmenbedingungen werden in diesem Teil der Arbeit Varianten zur Gestaltung des Schiffsrumpfes vorgestellt und bewertet. In Kapitel 3.3 werden die Hauptabmessungen erarbeitet; eine überschlägige Massenabschätzung wird durchgeführt. Anschließend werden, von dieser Spezifikation ausgehend, Details der Gestaltung des Schiffskörpers, wie z. B. Spantenriss und Baumaterial, erläutert sowie einige näher zu untersuchende Aspekte benannt. Abschließend werden stabilitätsrelevante Kriterien beschrieben wie auch eine Abschätzung des Schiffswiderstandes durchgeführt.

# 3.1 Allgemeine Bemerkungen

In Teil 2 wurden verschiedene mögliche Einsatzszenarien beschrieben. Um optimale Einsatzbedingungen zu gewährleisten, ist für die entsprechende Einsatzroute eine individuelle Optimierung in Hinblick auf die für das jeweilige Szenario wichtigen Aspekte notwendig. Dies ist im Rahmen dieser Arbeit nicht für jedes der beschriebene Einsatzgebiete möglich.

Stattdessen wird im folgenden die Konzeption des Fahrzeuges wie auch die hierfür notwendige Betrachtung der Propulsion und Energiebereitstellung<sup>1</sup> für den Einsatz auf der Oberwarnow durchgeführt. Ein kombinierter Einsatz auf der Unter- und Oberwarnow wird berücksichtigt.

Zusammenfassend bedeutet dies, dass der WaKat folgende Bedingungen zu erfüllen hat:

- Transportkapazität für ca. 60 Passagiere
- Fahrtdauer maximal 3 Stunden pro Fahrt
- Maximale Länge 30 Meter
- Passieren der Schleuse in Rostock-Mühlendamm Breite 6.5 Meter möglich

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Siehe Teil 4 und Teil 5

- Maximaler Tiefgang 1.8 Meter
- Minimaler Energieverbrauch sowie minimale bzw. keine Schadstoffemissionen
- Keine Trinkwassergefährdung im Betrieb, in Ruhe sowie im Havariefall
- Minimale Wellenbildung
- Minimale Beeinflussung der grundnahen Strömungsverhältnisse; Aufwirbelung des Sediments ist auszuschließen
- Gute Manövrierfähigkeit auch bei geringen Geschwindigkeiten

# 3.2 Gestaltung des Schiffsrumpfes

Die allgemeine Gestaltung des Schiffsrumpfes schafft die essentiellen Rahmenbedingungen für die Auslegung wie auch den späteren Betrieb des Fahrzeuges und ist insofern ein Schwerpunkt der Untersuchungen. Anschließend ist eine Optimierung der Detailgestaltung möglich. Diese Optimierung beeinflusst im Vergleich zur geeigneten Wahl des Rumpfkonzeptes die erzielbare Leistungsfähigkeit des Schiffes allerdings gering.

### 3.2.1 Rumpftypen

Als mögliche Gestaltungsvarianten für den Schiffsrumpf stehen, abgesehen von ungeeigneten bzw. nicht erprobten Sonderformen, drei mögliche Optionen zur Verfügung, nämlich:

- Einrumpffahrzeug
- Katamaran
- Trimaran

Einrumpffahrzeug Einrumpffahrzeuge haben sich bewährt und werden vielfältig eingesetzt. Der Großteil aller Wasserfahrzeuge basiert auf diesem Prinzip. Als Nachteil für den avisierten Einsatzzweck ist zu nennen, dass bei derartigen Fahrzeugen im allgemeinen eine für die erforderliche Decksfläche hohe Verdrängung benötigt wird und hierdurch bedingt ein hoher reibungswWiderstand wie auch starke Wellenbildung vorhanden ist. Eine Minimierung dieser Faktoren ist nur in Grenzen möglich. Eine effiziente Gestaltung der Antriebsanlage ist bei geringen Fahrtgeschwindigkeiten nur durch die Verwendung tiefgetauchter Propulsionsorgane möglich. Diese Art der Gestaltung führt zu einem unerwünscht ausgeprägten Nachstromfeld, das zu eventuell schädlicher Beeinflussung der Strömungsverhältnisse im Grundbereich, d. h. Aufwirbelung von auf dem Flussgrund abgesetztem Sediment, führen kann.

Katamaran Katamarane ermöglichen es, große Decksflächen bei im Vergleich zu Einrumpfschiffen geringer Verdrängung zu realisieren. Durch entsprechende Gestlatung der schlanken Rümpfe ist es möglich, einen geringen Wellenwiderstand zu erzielen. Die Stabilität wird, im Gegensatz zu den Einrumpfschiffen, die eine ausreichend hohe Stabilität durch eine große Wasserlinienfläche erreichen, durch das geringe Längen-Breiten-Verhältnis in Kombination mit vergleichsweise geringen Wasserlinienflächen erreicht. Katamarane bieten vielfältige Möglichkeiten, die zu einer effektiven Propulsion führen, ohne die bei Einrumpfschiffen eventuell vorhandene Sedimentaufwirbelung hervorzurufen<sup>2</sup>.

Trimaran Trimarane bestehen aus einem mittig angeordneten Hauptrumpf, der primär als Auftriebskörper dient, sowie aus zwei vergleichsweise kleinen und schlanken Schwimmkörpern, die die notwendige Stabilität garantieren. Wie bei Einrumpfschiffen ist auch hier die Gestaltung einer effizienten Antriebsanlage unter Vermeidung von Sedimentaufwirbelung problematisch. Weiterhin erfordern Trimarane zum Erreichen der geforderten Stabilitätskriterien ein sehr geringes Längen-Breiten-Verhältnis. Dies ist in Anbetracht der begrenzten Breite der Schleusenkammer Rostock-Mühlendamm nur schwer zu realisieren.

Bewertung Zusammenfassend ist in Tabelle 3.1 eine Bewertung der verschiedenen Gestaltungsmöglichkeiten aufgeführt. Es ist zu erkennen, dass der Katamaran die besten Ausgangsvoraussetzungen bietet, um ein Fahrzeug mit geringem Widerstand und akzeptabler Wellenbildung zu konzipieren, welches eine effiziente Propulsion zulässt, ohne die Möglichkeit der Sedimentaufwirbelung in Kauf zu nehmen.

Aspekt \ Variante	Mono	Kat	Tri
bewährt	+	О	-
Widerstand	-	+	+
Wellenbildung	О	+	+
Propulsion	-	+	О

Tab. 3.1: Bewertung der Rumpfvarianten -: schlecht, o<br/>: akzeptabel, +: gut

### 3.2.2 Katamaran - Varianten

Katamarane lassen sich, basierend auf dem Design der Rümpfe, in drei Kategorien einordnen. Diese sind:

- Low-Wash-Katamaran
- Swath<sup>3</sup>

 $<sup>^2 \</sup>mathrm{Siehe}$ hierzu Teil5

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>Small Waterplane Area Twin Hull

#### • Proa

Low-Wash-Katamaran Als Low-Wash-Katamaran werden herkömmliche Katamaran bezeichnet, bei deren Konstruktion konsequent eine geringe Wellenbildung angestrebt wird. Dies wird durch eine geringe Breite der Einzelrümpfe sowie kleine Ein- und Auslaufwinkel erreicht; ausgeprägte Schultern werden vermieden. Allerdings sind dieser Optimierung Grenzen gesetzt, da z. B. eine Verringerung der Rumpfbreite eine geringere Verdrängung nach sich zieht.

Swath Swaths zeichnen sich durch zwei tiefgetauchte Auftriebskörper aus, die durch Stützen mit kleinen Wasserlinienflächen mit den oberhalb der Wasserlinie angeordneten Decks verbunden sind [34]. Hierdurch wird eine Reduzierung des Wellenwiderstandes erreicht, was sich insbesondere bei schnellen Schiffen positiv bemerkbar macht. Durch die kleinen Wasserlinienflächen und eine geeignete strömungsgünstige Formgebung wird eine sehr geringe Wellenbildung erzielt; die Auftriebskörper beeinflussen das Wellenbild aufgrund des Abstandes zur Wasseroberfläche nur gering. Eine ausreichend große Stabilität kann durch Wahl einer ausreichenden Breite erreicht werden, ohne die Stützen nennenswert zu vergrößern.

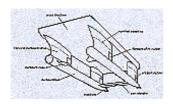


Abb. 3.1: Das Swath-Konzept Abbildung veröffentlicht 1968 durch Dr. Tom Lang in einer Patentschrift

Proa Der Begriff Proa beschreibt Katamarane, die asymmetrisch zur Schiffslängsachse, aber symmetrisch zur Querachse sind, siehe Abb. 3.2. Diese bestehen aus einem Hauptrumpf, genannt Waka, und dem Ama, einem kleineren Rumpf, welcher zur geforderten Stabilität beiträgt [35]. Auf Grund der Symmetrie zur Querachse eignen sich Proas für Einsatzrouten, auf denen Wendemanöver nur schwer durchzuführen sind und daher als Alternative im Betrieb Bug und Heck je nach Fahrtrichtung wechseln. Eine Optimierung der Rumpfform in Hinblick auf den Schiffswiderstand wird allerdings durch die Existenz einer Hauptfahrtrichtung erleichtert, so dass bei Proas, verglichen mit anderen Katamaranformen vergleichbarer Abmessungen, mit einem höheren Widerstand zu rechnen ist.

**Bewertung** Eine Bewertung der vorgestellten Katamaranvarianten ist in Tab. 3.2 aufgeführt.



Abb. 3.2: Beispiel einer Proa-Konfiguration Proas werden z. Zt. nicht bzw. nur in Einzelfällen in der Passagierschifffahrt eingesetzt. Exemplarisch ist daher eine "pacific sailing proa" dargestellt. Deutlich ist die Asymmetrie zur Schiffslängsachse zu erkennen.

Aspekt/Variante	Low-Wash	Swath	Proa
bewährt	+	0	-
Widerstand	О	+	-
Wellenbildung	0	+	О

Tab. 3.2: Katamaranvarianten - eine Bewertung (-: schlecht, o: akzeptabel, +: gut)

Es ist zu erkennen, dass die Swath-Bauweise den anderen Varianten in den meisten betrachteten Kategorien überlegen ist. Die fehlende Erfahrung beim Bau von Swaths im Vergleich zu Low-Wash-Katamaranen ist kein unüberwindlicher Nachteil, so eine umfassende und ausführliche Konstruktion durchgeführt wird.

Insbesondere die Möglichkeit, ein Swath auf vielfältige Weise auf die Umweltbedingungen und -erfordernisse abzustimmen und hierdurch einen optimalen Kompromiss zwischen u. a. Wellenbildung und Widerstand zu erreichen, sprechen für diesen Fahrzeugtyp.

Während Low-Wash-Katamarane herkömmlichen Katamaranen ähneln und daher auf das vorhandene Wissen über den Entwurf von derartigen Zweirumpfschiffen zurückgegriffen werden kann, werden Proas bis heute primär als neuartige Lösung für die Konzeption von Segelschiffen diskutiert. Erfahrungen über den Einsatz einer Proa auf den in Kap. 2.2 beschriebenen Routen bzw. in vergleichbaren Gewässern sind nicht verfügbar.

# 3.3 Hauptabmessungen

### 3.3.1 Vergleichsschiffe

Ein Großteil der z. Zt. gebauten und betriebenen Swaths sind Schiffe mit einer Verdrängung kleiner 500 Tonnen. Hiervon wiederum verdrängen ca. 60 % weniger als 100 Tonnen [34]. Eingesetzt werden diese Fahrzeuge hauptsächlich zum Personentransport, zur Durchführung von Messaufgaben und für Aufgaben, die ein gutes Seegangsverhalten sowie geringe Schiffsbewegungen erfordern.

Der Tiefgang eines Fahrzeuges wird durch vielfältige Bedingungen und Forderungen bestimmt. Abb. 3.3 zeigt für einige Swaths den Konstruktionstiefgang in Abhängigkeit von der Verdrängung. Es ist zu erkennen, dass kleine Fahrzeuge einen vergleichsweise großen Konstruktionstiefgang aufweisen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass diese Fahrzeuge ähnliche Seegangsbedingungen erfahren wie die größeren Schiffe. Der Konstruktionstiefgang kleiner Swaths<sup>4</sup> variiert, von Ausnahmen abgesehen, zwischen 1.5 und 3.5 Metern. Insofern ist der für die Oberwarnow geforderte maximale Tiefgang von 1.8 Metern realistisch.

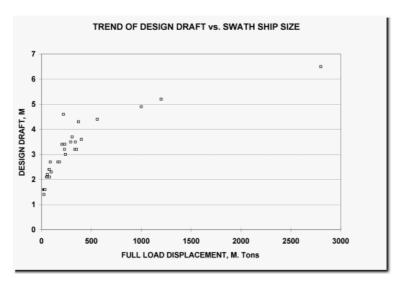


Abb. 3.3: Konstruktionstiefgang in Abhängigkeit von der Verdrängung [34]

Das Längen-Breiten-Verhältnis von Swaths mit geringer Verdrängung, siehe Abb. 3.4, ist, wie bei Mehrrumpfschiffen üblich, groß und liegt zwischen 1.75 und 2.8 mit einem gehäuftem Auftreten im Bereich von 2.0 bis 2.5.

Ausgehend von einer Schiffsdatenbank<sup>5</sup> [36] des Instituts für Schiffbau, TU Hamburg-Harburg, sind in Tab. 3.3 Schiffe vergleichbarer Abmessungen aufgeführt. Schiff No. 715

 $<sup>^4\</sup>mathrm{Deplacement}$ kleiner 250 t

 $<sup>^5\</sup>mathrm{Die}$  Schiffsnummer, hier in der Spalte "No.", Tab. 3.3 aufgeführt, entspricht der Schiffsnummer in einer Datenbank

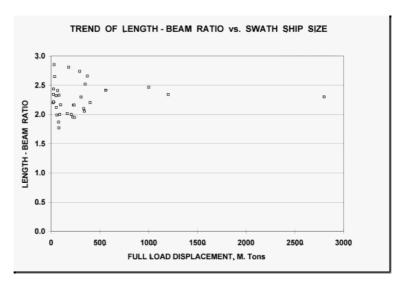


Abb. 3.4: Längen/Breiten-Verhältnis in Abhängigkeit von der Verdrängung [34]

ist ein herkömmliches Einrumpffahrzeug, ein Fischkutter; No. 708 und 710 sind in Katamaranbauweise gefertigt und für den Betrieb mit hoher Geschwindigkeiten ausgelegt.

Das Längen-Breiten-Verhältnis der Katamarane beträgt 3.1 (No. 708) bzw. 2.6 (No. 710), ist also im Vergleich zu den aus Abb. 3.4 abgeleiteten Aussagen groß. Die Verdrängung von No. 715 ist wesentlich größer als die der beiden Katamarane. Dies resultiert zum einen aus den unterschiedlichen Rumpftypen, zum anderen aus der Tatsache, dass für den Fischkutter zum Transport von Waren eine große Tragfähigkeit notwendig ist, während beim Entwurf dieser Katamarane die Anforderungen an die zu erzielende Tragfähigkeit gering waren.

No.	Länge [m]	Breite [m]	Deplacement [t]
708	18.6	6.0	26
710	16.5	6.4	27
715	16.0	5.1	76

Tab. 3.3: Vergleichsschiffe [36]

# 3.3.2 Länge und Breite

Da zur Vermeidung einer unerwünscht starken Wellenbildung die Verwendung schlanker Strukturen mit geringer Wasserlinienfläche in der Konstruktionswasserline gewünscht ist, kann die durch die Vorschriften der Klassifikationsgesellschaften geforderte Krängungsstabilität durch eine Vergrößerung der Schiffsbreite, und hiermit durch eine Vergrößerung des Abstandes der Wasserlinienfläche von der Drehachse, erreicht werden. Insofern wird, unter Berücksichtigung der Schleusenbreite Rostock-Mühlendamm von 6.5 Meter, die Breite des

WaKat auf 5.5 Meter festgelegt. Dies ermöglicht ein problemloses Befahren der Schleuse; Fender können zum Schutz des Rumpfes eingesetzt werden.

Für eine Breite von 5.5 Metern sowie einen Tiefgang von 1.8 Metern ist in Abb. 3.5 exemplarisch für einen Querschnitt der Oberwarnow die Querschnittsversperrung durch den WaKat dargestellt. Es ist zu erkennen, dass im Vergleich zum Flussquerschnitt die Querschnittsfläche des Fahrzeuges vernachlässigbar gering ist. Daher sind die bei stärkerer Querschnittsversperrung zu beobachtenden Effekte<sup>6</sup> auszuschließen bzw. nur in stark abgeschwächter Form vorhanden. Die Fahrwasserbreite ist ausreichend für den Betrieb eines Fahrzeugs von genannter Breite, ohne besondere Anforderungen an die Exaktheit der Navigation zu stellen. Auch in den Bereichen mit besonders geringer Wassertiefe ist dies gegeben.

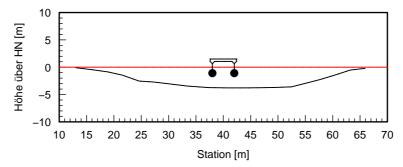


Abb. 3.5: Querschnittsversperrung durch den WaKat am Beispiel eines typischen Querprofils der Oberwarnow Querschnitt der Oberwarnow bei km 20.5

Untersuchungen des Betriebs von Ausflugsschiffen auf dem Vierwaldstädtersee zeigen, dass eine Belegungszahl von 0.8 Personen pro Quadratmeter Decksfläche als komfortabel empfunden wird, während viele eingesetzte Passagierschiffe eine Belegungszahl von 1.3 Passagieren pro Quadratmeter Decksfläche aufweisen [6].

Ausgehend von einer Belegungszahl von 0.9 Personen pro Quadratmeter ergibt sich der in Tab. 3.4 aufgeführte Flächenbedarf. Unter Berücksichtung eines Mittelganges der Breite b=0.7m ergibt sich hieraus, mit der Decksbreite  $B_D$ , Deckslänge  $L_D$  sowie dem Gesamt-flächenbedarf  $A_{ges}$ , nach

$$A_{ges} + b \cdot L_D = B_D \cdot L \tag{3.1}$$

eine minimal erforderliche Deckslänge  $L_D$  von 16.25 Metern für den Fall, dass eine Decksstruktur in Rechteckform zum Einsatz kommt.

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup>Z. B. die im Vergleich zur Fahrt in tiefem Wasser auftretenden Veränderungen des Wellenbildes, Auswirkungen durch die Fahrwasserbegrenzungen sowie die Absenkung des Wasserspiegels im Umfeld des Fahrzeuges, genannt Sqat[37].

Zweck	Fläche $[m^2]$
Passagiere	67
Kombüse	4
Steuerstand	3
Waschraum	4
Gesamt	78

Tab. 3.4: Bedarf an Decksfläche (ohne Mittelgang)

### 3.3.3 Geschwindigkeit

Die Entfernung auf dem Wasserweg zwischen der Schleuse Rostock-Mühlendamm und Schwaan beträgt ca. 21 Kilometer<sup>7</sup>. Die Fahrtstrecke vom Gelände der IGA 2003 in Rostock-Schmarl bis zur Schleuse ist ca. 7 Kilometer lang. Mögliche Haltepunkte auf der Route sind Rostock-Stadthafen sowie Papendorf und Huckstorf, wobei nur die erste Möglichkeit als ökologisch unproblematisch<sup>8</sup> zu bewerten ist.

Soll eine Fahrt nicht länger als 3 Stunden dauern, und wenn für das Passieren der Schleuse sowie die 3 Haltepunkte auf der Route jeweils ein Zeitraum von 10 Minuten veranschlagt wird, so steht, bei Abfahrt in Rostock-Schmarl, für die insgesamt 28 Kilometer lange Strecke eine reine Fahrtzeit von maximal 2 Stunden 20 Minuten zur Verfügung. Dies entspricht einer mittleren Geschwindigkeit von ca. 12 km/h (3.3 m/s).

Wird, wie aus Umweltschutzgründen gefordert, für die Oberwarnow eine Geschwindigkeitsbegrenzung von 10 km/h (2.8 m/s) angesetzt [12], so ist für diesen Abschnitt eine reine Fahrzeit von ca. 2 Stunden zu veranschlagen. Die Fahrzeit von Rostock-Stadthafen nach Schwaan inklusive Schleusung und Halt in Huckstorf sowie Papendorf beträgt hiermit 2 Stunden 30 Minuten, überschreitet also die geforderte maximale Fahrtzeit von 3 Stunden nicht.

Die Geschwindigkeitsbegrenzung auf der Unterwarnow beträgt 7 kn entsprechend 13 km/h (3.6 m/s). Ausgehend von diesem Wert beträgt die Fahrtzeit von Rostock-Schmarl nach Rostock-Stadthafen inklusive der Zeiten für An- und Ablegemanöver ca. 50 Minuten.

Es ist zu erkennen, dass die geforderte maximale Fahrtdauer von 3 Stunden nur erreicht werden kann, wenn ein Teilstück der Fahrtstrecke betrachtet wird. Allerdings bietet sich hierdurch für die Passagiere die Möglichkeit, den individuellen Ansprüchen entsprechend Fahrtstrecke und Fahrtdauer auszuwählen.

Der Beiwert für den Wellenwiderstand von Swath-Fahrzeugen hat für Froude-Zahlen<sup>9</sup>von  $F_n = 0.3$  und  $F_n = 0.5$  Maxima; Minima sind bei  $F_n = 0.38$  und  $F_n = 0.65$  vorhanden.

 $<sup>^{7}</sup>$ Da es sich hierbei um ein Binnengewässer handelt, wird die auf Binnenschifffahrtsstraßen übliche Einheit Kilometer bzw. Kilometer pro Stunde [km/h], und nicht die maritime Notation Seemeilen bzw. Knoten, verwendet.

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup>Siehe Abschnitt 2.4.4

 $<sup>{}^{9}</sup>F_{n} = v_{s}/\sqrt{g \cdot L_{AK}}$ 

Für die oben bestimmten Geschwindigkeiten sind in Tabelle 3.5 günstige und ungünstige Längenmaße für die Auftriebskörper aufgeführt [38].

$v_s$ [m/s]	$F_n = 0.38$	$F_n = 0.65$
2.8	5.53	1.89
3.6	9.15	3.12

Tab. 3.5: Länge  $L_{AK}$  der Auftriebskörper in Metern für einen günstigen Wellenwiderstandskoeffizienten

Es ist zu erkennen, dass für die vorgeschriebenen Maximalgeschwindigkeiten nur eine unrealistisch kleine Länge der Auftriebskörper zu einem günstigen Widerstandsbeiwert führt. Um dennoch eine Verringerung des Wellenwiderstandes zu erzielen, ist für  $F_n \approx 0.3$  eine Konzentration der Verdrängung im Mitschiffsbereich anzustreben [39]. Allerdings ist zu bedenken, dass für eine Froude-Zahl von  $F_n \leq 0.3$  der Wellenwiderstand nur einen sehr geringen Anteil am Gesamtwiderstand beiträgt. Insofern ist einer Optimierung des Widerstands in Hinblick auf die weiteren Widerstandsanteile, z. B. Reibungswiderstand und Luftwiderstand, höhere Priorität einzuräumen.

### 3.3.4 Abschätzung von Masse und Verdrängung

Eine exakte Abschätzung der Schiffsmasse ist in dieser Phase des Entwurfsprozesses schwierig. Für viele Probleme ist noch keine technische Lösung gefunden bzw. Entscheidung gefällt worden; die technischen Daten diverser Geräte sind, insbesondere da auf diesem Fahrzeug z. T. neuartige, sich in der Entwicklung befindliche Technik zum Einsatz kommt, nicht vollständig bekannt.

Um eine Aussage über erst im weiteren Ablauf des Konstruktionsprozesses zu klärende, zu diesem Zeitpunkt noch offene Fragen treffen zu können, wurde auf Daten vergleichbarer Schiffe zurückgegriffen. Es ist allerdings zu vermerken, dass es sich bei dem WaKat um ein Fahrzeug handelt, auf welchem neuartige, z. T. dem Stand der Forschung entsprechende Technik eingesetzt wird. Eine dem Stand der Technik entsprechende Umsetzung ist nicht immer vorhanden bzw. die bei anderen Fahrzeugen angewandten Lösungsstrategien sind nur bedingt übertragbar.

In Tab. 3.6 ist daher eine grobe Abschätzung der Masse einzelner Komponenten bzw. Aspekte aufgeführt; die Schiffsmasse wird berechnet. Hierfür wird angenommen, dass zur Energieerzeugung eine Brennstoffzelle eingesetzt wird; die Speicherung des Wasserstoffs erfolgt in Hochdruckspeichern.

Da der Widerstand von Swath-Fahrzeugen geringer Geschwindigkeit primär reibungsbedingt ist, ist eine signifikante Minimierung des Gesamtwiderstandes nur durch Minimierung der benetzten Oberflächen zu erreichen. Eine Minimierung der benetzten Oberfläche

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup>Die durchschnittliche Körpermasse eines Fahrgastes wird, wie allgemein üblich, mit 75 kg angenommen.

 $<sup>^{11}\</sup>mathrm{Rumpf}$ inkl. Aufbauten

<sup>&</sup>lt;sup>12</sup>Siehe [33]

Objekt	Masse [kg]
$60 \text{ Passagiere} + 2 \text{ Crew}^{10}$	4650
Kasko <sup>11</sup>	8000
Ausrüstung	1000
Brennstoffzelle	400
Motoren, Regelung, Zubehör <sup>12</sup>	300
Brennstoff inkl. Tank(s)	1200
Frisch- und Abwasser	300
Proviant & Verpflegung	200
Reserve	200
Summe	16250

Tab. 3.6: Massenabschätzung [33]

kann durch geeignete Gestaltung der Rumpfform sowie durch eine Verringerung des verdrängten Volumens, also durch eine Verringerung der Schiffsmasse, erreicht werden.

Während Passagiergewicht, Ausrüstung usw. keine bzw. nur geringe Optimierungsmöglichkeiten bieten, ist, um das Ziel einer geringen Schiffsmasse zu erreichen, nur durch Leichtbau eine Gewichtsverringerung möglich.

Daher wurde, verglichen zu anderen, konventionell gebauten Schiffen vergleichbarer Abmessungen und Einsatzgebiete [40], die Masse des Rumpfkaskos mit 8000 Kilogramm gering angesetzt. Durch die Verwendung leichter Materialien<sup>13</sup> wie z. B. Aluminium oder GFK sowie sorgfältiger Dimensionierung der Struktur<sup>14</sup> ist es möglich, eine Kaskomasse von 8000 Kilogramm nicht zu überschreiten<sup>15</sup>. Die Verwendung exotischer und kostenintensiver Materialien ist zum Erreichen dieser Anforderung allerdings nicht notwendig.

Da es sich bei den Einsatzgebieten des WaKat, nämlich Unter- und Oberwarnow, um Binnengewässer bzw. Brackwassergewässer handelt, kann eine Dichte des Wassers von  $\rho=1000kg/m^3$  angenommen werden, so dass eine Verdrängung von ca. 16  $m^3$  zu erwarten ist.

# 3.4 Rumpfgestaltung

Die Rumpfform eines Swaths wird, ausgehend von den Hauptabmessungen<sup>16</sup>, insbesondere durch die Wahl der Spantform und die Gestaltung der Stützen bestimmt.

 $<sup>^{13}\</sup>mathrm{Stoffleichtbau}$ 

<sup>&</sup>lt;sup>14</sup>Strukturleichtbau

<sup>&</sup>lt;sup>15</sup>Eine weitere Verringerung der Kaskomasse ist möglich. So hat ein durch das "Institut für Solarschiffbau" entworfener Katamaran von 17 Metern Länge eine Kaskomasse von nur 4 Tonnen, siehe [33].

<sup>&</sup>lt;sup>16</sup>Z. B. Länge, Breite, Verdrängung

### 3.4.1 Spantformen

Die Spantformen, die bei Konzeption und Entwurf von Swath-Fahrzeugen primär eingesetzt werden, sind, wie in Abb. 3.6 dargestellt, auf drei Grundformen zurückzuführen, nämlich [41]:

- 1. Kreis
- 2. Flasche
- 3. Golfschläger

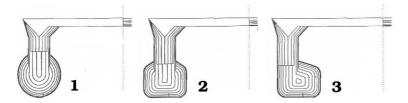


Abb. 3.6: Mögliche Spantformen für Swath-Fahrzeuge [41]

Bei allen drei Varianten ist zu erkennen, dass die Spantformen über der Konstruktionswasserlinie ausfallend gestaltet sind. Hierdurch wird bereits bei geringen Krängungswinkeln eine deutliche Zunahme des aufrichtenden Momentes, wenn auch verbunden mit einer signifikaten Zunahme des Widerstands, erreicht, so dass das Fahrzeug eine große Formstabilität aufweist. Weiterhin sprechen Festigkeitsgründe für die Wahl dieses Designs, da hierdurch der Übergang zwischen Deck und Stützen mechanisch günstiger gestaltet werden kann.

Allerdings bestimmt eine Vielzahl von Bedingungen und Anforderungen die Wahl der für den jeweiligen Einsatzzweck am besten geeigneten Grundform.

So ist der Einbau von Geräten mit großen Abmessungen im Allgmeinen bei kreisförmigen Spantformen mit größeren Problemen verbunden als bei der Spantform "Flasche" bzw. "Golfschläger".

Bei schnellen Swath-Schiffen mit rotationssymmetrischen Verdrängungskörpern sind ab einer Froude-Zahl von  $F_n=0.5$  Instabilitäten zu beobachten; ein hydrodynamisch bedingtes buglastiges Trimmmoment, das sog. Muncksche Nickmoment, tritt auf, welches bei voller Fahrt zu einem plötzlichem Abtauchen des Fahrzeuges über den Bug führen kann. Abhilfe schaffen die Anbringung von Kontrollflächen im Bereich von Vor- und Achterschiff der Auftriebskörper [42] bzw. die Verwendung von speziellen nickmomentenfreien Bugformen [43]. Da die projektierte Dienstgeschwindigkeit des WaKat vergleichsweise gering ist, besteht keine Notwendigkeit, diese den Schiffswiderstand vergrößernden Maßnahmen anzuwenden.

Die Belastungen durch Seegang und Manöver sind bei Konfiguration 3) am höchsten; kreisförmige Spantquerschnitte führen zu den geringsten Belastungen [41].

Die Betrachtung des Seegangsverhaltens liefert ein uneinheitliches Ergebnis. Während eine flaschenförmige Spantform die geringsten kennzeichnenden Amplituden der Tauchbewegung aufweißt, ist die Spantform "Kreis" in Hinblick auf die Amplituden der Stampfbewegung überlegen.

Da das in dieser Arbeit beschriebene Fahrzeug bei Einsatz auf den genannten Gewässern nicht für den Einsatz in rauher See auszulegen ist, sind das Seegangsverhalten sowie die hierdurch hervorgerufenen Belastungen von untergeordneter Bedeutung. Kreisförmige Spantformen, Konfiguration 1), haben die geringste benetzte Oberfläche für ein gegebenes Volumen, so dass hierfür der geringste Reibungswiderstand zu erwarten ist. Ein wichtiges Merkmal der Optimierung des WaKat ist ein geringer Schiffswiderstand. Insofern werden kreisförmige Spantformen für dieses Fahrzeug verwendet.

### 3.4.2 Gestaltung der Stützen

Die Stützen eines Swaths sind derart auszulegen, dass sowohl geringer Widerstand und geringe Wellenbildung erreicht werden, wie auch eine ausreichende Stabilität<sup>17</sup> gegeben ist; das Seegangsverhalten, also Frequenz und Amplitude von Tauch- und Stampfbewegung, werden wesentlich durch die Form der Stützen beeinflusst. Zugangsmöglichkeiten zu den in den Auftriebskörpern installierten Geräten sind, abgesehen von bei Arbeiten im Dock bzw. an Land zugänglichen Öffnungen in den Auftriebskörpern, nur über Öffnungen in den Stützen gegeben.

Allgemein sind für die Gestaltung der Stützen von Swaths zwei Lösungen gebräuchlich:

- Je eine, sich über die ganze Schiffslänge erstreckende Stütze auf der Backbord- und Steuerbordseite
- Je zwei kurze Stützen pro Seite, welche im Bereich von Vor- und Achterschiffbereich angeordnet sind<sup>18</sup>

Eine qualitative Beschreibung der Leistungsfähigkeit der zwei genannten Konfigurationen ist in Tab. 3.7 aufgeführt.

Aspekt	herkömml. Swath	Slice
Stabilität	+	-
Widerstand	=	=
Wellenbildung	X	X
Seegangsverhalten	-	+
Zugangsmöglichkeiten	+	-

Tab. 3.7: Beurteilung der Stützenformen +: besser; -: schlechter; =: vergleichbar; x: keine Aussage; Eine Beurteilung des sich ausprägenden Wellenbildes beider Konfigurationen ist nicht ohne umfangreiche Simulationen bzw. Berechnungen möglich; eine Bewertung ist deshab nicht aufgeführt.

 $<sup>^{17}\</sup>mathrm{Dies}$  wird durch die Anordnung der Stützen weit entfernt von der Mittschiffsebene erreicht.

<sup>&</sup>lt;sup>18</sup>Zur Beschreibung dieser Fahrzeuge wird häufig der Begriff "Slice" verwendet.

Es ist zu erkennen, dass die herkömmliche Swath-Konfiguration Slice-Fahrzeugen in Hinblick auf Stabilität<sup>19</sup> sowie Zugangs- und Wartungsmöglichkeiten überlegen ist.

Insbesondere die Stabilität ist ein wichtiges Kriterium für den Entwurf eines kleinen Passagierschiffes, da hierdurch die Bewegung von Passagieren mit, bezogen auf die Schiffsmasse, hohen Krängungs- und Trimmmomenten zu rechnen ist.

Der Widerstand von Slice-Fahrzeugen ist, wie in Abb. 3.7 gezeigt, bei hohen bis sehr hohen Geschwindigkeiten auf Grund des geringeren Wellenwiderstands deutlich geringer als der Widerstand konventioneller Swaths. Bei niedrigen Geschwindigkeiten, d. h. bei Geschwindigkeiten kleiner als 10 kn, ist der Reibungswiderstand dominierend, so dass hier keine eindeutigen Vorteile für Swath bzw. Slice zu nennen sind.

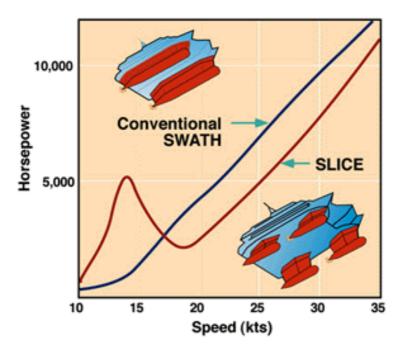


Abb. 3.7: Widerstand von Swath und Slice in Abhängigkeit von der Schiffsgeschwindigkeit [44]

Durch kleine Wasserlinienflächen wird bei konventionellen Swath- wie auch Slice-Fahrzeugen ein angenehmes Seegangsverhalten erzielt. Insofern ist das Seegangsverhalten von konventionellen Swaths, die eine größere Wasserlinienfläche als Slice-Fahrzeuge haben, der Konfiguration mit je zwei Stützen pro Seite unterlegen. Die Slice-Konfiguration ermöglicht es weiterhin, durch Variation der Stützenflächen und der Positionierung der Stützen eine weitere Optimierung für und Anpassung an das jeweilige Seegebiet zu erreichen. Dennoch ist auch das Verhalten von konventionellen Swaths dem von Einrumpfschiffen weit überlegen.

Untersuchungen des Widerstands von konventionellen Swaths [38] haben gezeigt, dass für

 $<sup>^{19}\</sup>mathrm{Gr\"{o}}$ ßere Wasserlinienflächen resultieren bei ansonsten identischen Bedingungen in einer gr\"{o}ßeren Stabilität

mäßige und hohe Geschwindigkeiten der Länge nach zentral angeordnete Stützen empfehlenswert sind. Für geringe Geschwindigkeiten, also auch für den WaKat, liefert eine nach achtern verschobene, überhängende Stütze bessere Ergebnisse.

Für das Projekt WaKat wird eine herkömmliche Swath-Konfiguration, d. h. mit je einer Stütze pro Seite, als geeignete Lösung angesehen. Insbesondere die hohe Krängungsstabilität wie auch die besseren Zugangsmöglichkeiten zu den Auftriebskörpern<sup>20</sup> sprechen für diese Lösung.

### 3.4.3 Raumaufteilung

Der Raum auf kleinen Swath-Fahrzeugen wie dem WaKat lässt sich in zwei Bereiche unterteilen, nämlich:

- die zwei Auftriebskörper inklusive der Stützen
- den Decksbereich

Der Passagierbereich, Sanitäreinrichtungen sowie der Steuerstand sind in den meisten Fällen auf dem die beiden Auftriebskörper verbindenden, offen oder geschlossen ausgeführten Deck angeordnet. Für die Installation von Geräten, Tanks etc. stehen die Auftriebskörper sowie bedingt die Stützen zur Verfügung.

Auftriebskörper und Stützen Für die Unterbringung von Geräten, Tanks sowie weiterer Technik bieten sich die Auftriebskörper an, da auf diese Weise ein niedriger Gewichtsschwerpunkt erzielt sowie das Deck frei von störenden Apparaten gehalten wird.

Abb. 3.8 zeigt, wie die für den Betrieb notwendigen Bauteile in den Rümpfen angeordnet werden können.

Die Brennstofftanks sind mittschiffs angeordnet. Hierdurch wird verhindert, dass variierende Füllstände dieser Tanks zu einem substantiellen Trimm des Fahrzeugs führen.

Swath-Fahrzeuge reagieren empfindlich auf Veränderungen von Tiefgang und Trimm; Abweichungen von der Konstruktionswasserlinie haben negative Auswirkungen auf das Wellenbild und den Schiffswiderstand zur Folge. Daher sind in den Spitzen und Enden der Auftriebskörper Ballastwassertanks vorgesehen, welche die Einhaltung der projektierten Schwimmlage auch dann ermöglichen, wenn z. B. durch An- und Vonbordgehen der Passagiere sich die Masse des Swaths deutlich ändert. Auch während der Fahrt operierende Regeleinrichtungen würden es ermöglichen, durch dynamische Ballastierung Bewegungen von Passagieren auszugleichen. Allerings ist fraglich, ob eine derartige Regeleinrichtung nicht einen hohen Energieaufwand erfordern würde und somit die Gesamtenergiebilanz verschlechtern würde.

 $<sup>^{20}\</sup>mathrm{Da}$ es sich bei diesem Schiff um ein innovatives Fahrzeug handelt, auf dem neue Technik zum Einsatz kommt, ist nicht auszuschließen, dass in der Anfangsphase des Betriebs Wartungs-, Optimierungs- und Reparaturarbeiten durchgeführt werden müssen.

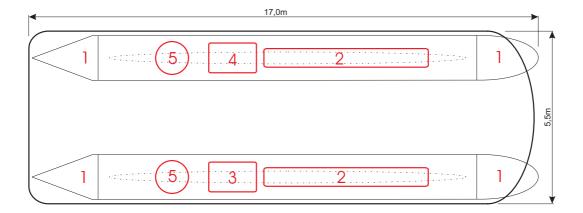


Abb. 3.8: Ausrüstung der Auftriebskörper Dargestellt wird beispielhaft eine Ausführung mit Brennstoffzellenantrieb. Numerieung: 1) Ballasttanks; 2) Brennstofftanks; 3) Brennstoffzelle; 4) Hilfsaggregate; 5) Frisch- und Abwassertanks

**Der Decksbereich** Um ein Vertrimmen des Fahrzeugs durch Bewegungen von Passagieren zu minimieren, ist eine Lösung zu finden, die die Mobilität der Passagiere minimiert, ohne hierdurch subjektiv den Eindruck zu erwecken, dass der Bewegungsspielraum stark eingeschränkt wird.

Dies kann u. a. durch eine Konzeption erreicht werden, welche den Passagieren den Eindruck vermittelt, dass sie von ihrem jeweiligen Platz alle wichtigen Geschehnisse miterleben können und daher zusätzliche, nicht die menschlichen Grundbedürfnisse erfüllende Ortsveränderungen unnötig sind. Ein wichtiges Kriterium hierfür ist eine gute, unverbaute Sicht in Fahrtrichtung sowie zu den Seiten.

Herkömmliche Fahrzeuge sind in den meisten Fällen mit einem Steuerstand im Vorschiffbereich ausgestattet. Ein derart angeordneter Steuerstand behindert die Sicht der Passagiere, wirkt also konträr zu den oben beschriebenen Zielen. Wird eine Lösung gewählt, die einen achtern angeordneten Steuerstand verwendet, so ist für die Passagiere eine sehr gute Sicht gegeben. Der Fahrzeugführer hat durch diese Anordnung weiterhin die Möglichkeit, die Aktivitäten der Passagiere zu überblicken; die Interaktion zwischen Crew und Passagieren wird verbessert.

Abb. 3.9 zeigt exemplarisch ein mögliches Deckslayout. Steuerstand, sanitäre Einrichtungen sowie die Pantry sind im Achterschiff angeordnet. Den Passagieren steht der verbleibende, nach vorne offen gestaltete Bereich zur Verfügung. Bänke und Tische sorgen für eine komfortable Atmosphäre. Im Bugbereich sind keine freien Flächen, die einladen, die Aussicht von dieser Position stehend zu genießen, vorhanden, so dass Passagiere immer einen ungestörten Blick nach vorne genießen können. Ein Mittelgang sowie je zwei Bereiche an Back- und Steuerbord stehen für das An- und Vonbord-Gehen zur Verfügung.

Sollte es sich zeigen, dass während der Hochsaison die zur Verfügung stehende Sitzplatzkapazität nicht ausreicht, so wäre eine Erhöhung der Transportkapazität möglich, indem ein Teil der Tischgarnituren durch Sitzreihen ersetzt wird. Dies ist in Abb. 3.10 dargestellt.

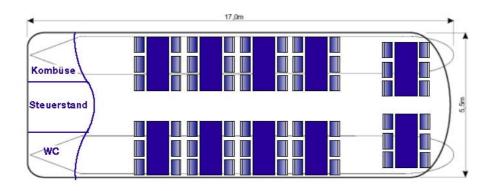


Abb. 3.9: Deckslayout 60 Sitzplätze

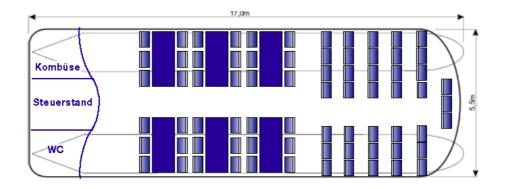


Abb. 3.10: Deckslayout II 74 Sitzplätze, davon 36 an Tischen

# 3.5 Design

Der Ausdruck "Design", wie er in dieser Arbeit verwendet wird, bezeichnet die Gestaltung eines Objektes aus primär ästhetischer Sicht unter Berücksichtung der gegebenen funktionellen Bedingungen sowie der menschlichen Psychologie bzw. Mentalität.

Der WaKat, wie u. a. in Teil 2 erläutert, ist ein innovatives Fahrzeug, welches neuartige Technologien mit dem Gedanken der Nachhaltigkeit in Einklang bringt. Abgesehen von der Suche nach und Umsetzung von geeigneten technischen Lösungen ist es nicht minder wichtig, diese zukunftsfähige Entwicklung einem großem Publikum bekanntzumachen, um hierdurch eine Förderung der Akzeptanz von nachhaltigem Wirtschaften zu bewirken.

Eine Kommunikation dieses Gedankens an die Umgebung ist nur zu erreichen, wenn die technologische Konzeption durch ein ansprechendes und inspirierendes Äußeres visuell ergänzt wird. Hierbei ist darauf zu achten, dass die gewünschte Funktion durch das Design nicht eingeschränkt wird, sondern statt dessen nach dem Grundsatz "form follows function" vorgegangen wird. Weiterhin sollten die besonderen Bedingungen auf Grund des strengen Umweltschutzes auf der Oberwarnow bedacht werden, d. h. das Erscheinungsbild des Fahrzeuges soll sich unauffällig in den Naturhaushalt eingliedern; Störungen z. B. durch die Bewegung von Passagieren werden so durch die Gestaltung abgemildert und weisen daher ein geringes Störpotential auf die Umwelt auf.

Eine Umsetzung der beschriebenen Überlegungen zu einem Designentwurf bedingt eine nähere Spezifikation des schiffbaulichen Entwurfs sowie eindeutige Informationen über Scheuchwirkung und Störverhalten technischer Objekte in der Natur. Diese weitergehenden Informationen wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht erarbeitet; eine Designstudie wurde nicht erarbeitet<sup>21</sup>

### 3.6 Stabilität

Da Passagierschiffe für den Transport von Menschen, des nach Meinung der Gesellschaft höchsten "Gutes", benutzt werden, gelten für diese Fahrzeuge stringente Stabilitätsauflagen, sowohl für den Intakt- wie auch den Leckzustand. Ziel ist es, eine Gefährdung von Menschenleben, soweit technisch machbar und vertretbar, auszuschließen. Situationen, die zu Panik unter den Fahrgästen führen könnten, wie z. B. übermäßige Krängung, sind zu vermeiden. Verantwortlich für die Ausarbeitung der entsprechenden Regelwerke sind u. a. international gültige Gremien wie z. B. die IMO<sup>22</sup>, so dass hierdurch eine weltweit weitgehend einheitliche Rechtslage erreicht wird.

Die Intaktstabilität von Swath-Fahrzeugen ist vereinfacht auf folgende Aspekte zurückzuführen:

• Größe und Position der Wasserlinienflächen

 $<sup>^{21}\</sup>mathrm{F\ddot{u}r}$  die Entwicklung einer Designstudie ist es sinnvoll, externen Rat einzuholen.

<sup>&</sup>lt;sup>22</sup>International Maritime Organisation

- Spantkonturen
- Gewichtsschwerpunkt

Durch die Installation von Geräten großer Masse in den Auftriebskörpern wird ein niedriger Gewichtsschwerpunkt erzielt. Die Masse der Passagiere ist auf dem Deck konzentriert. Da der WaKat nicht in Gewässern mit starkem Seegang eingesetzt wird, ist es möglich, das Deck in geringem Abstand zur Wasseroberfläche<sup>23</sup> anzuordnen, so dass negative Auswirkungen auf die Lage des Gewichtsschwerpunkts gering sind. Eine seitliche Verlagerung des Gewichtsschwerpunkts durch Passagierbewegungen ist, so die in Abschnitt 3.4.3 beschriebenen Maßnahmen angewendet werden, minimal.

Um eine möglichst große Stabilität zu erreichen ohne die Wasserlinienflächen unnötig zu vergrößern<sup>24</sup>, werden die Stützen in großem Abstand zur Mittschiffsebene angeordnet. Dies ist, wie in Abschnitt 3.4.2 erwähnt, für den WaKat gegeben. Die Größe der Wasserlinienflächen wird durch die Stabilitätsanforderungen wie auch durch die notwendigen Abmessungen der Wartungsöffnungen bestimmt.

Wird eine oberhalb der Wasserlinie auskragende Spantform gewählt, so ist bereits bei geringen Krängungswinkeln ein substantieller Anstieg der Stabilität zu verzeichnen; Tauchund Stampfbewegungen werden hierdurch minimiert.

Eine wasserdichte Unterteilung der schlanken Auftriebskörper ist möglich. Hierdurch wird eine Verbesserung der Stabilität im Havariefall, also der Leckstabilität, erreicht [40]. Durch Auspumpen der Ballasttanks im Havariefall ist es möglich, die Auswirkung von gefluteten Abteilungen weiter zu minimieren.

# 3.7 Widerstandsabschätzung

Eine Widerstandsabschätzung in dieser Phase des Entwurf gestaltet sich schwierig. Herkömmliche Verfahren, die für die Widerstandsbestimmung in der Entwurfsphase herangezogen werden könnten, basieren auf Näherungsverfahren, entwickelt durch Serienversuche und Auswertungen von Statistiken, bzw. auf verallgemeinerten theoretischen Untersuchungen. Modellversuche und die anschließende Umrechnung auf die Großversion werden in einer weiteren Phase des Entwurfs angewandt, um die Genauigkeit der Prognose zu verbessern.

Diese Verfahren können allerdings ohne Einschränkungen nur für die Widerstandsabschätzung von größeren Einrumpffahrzeugen angewendet werden; sie sind für Swath-Fahrzeuge nur bedingt anwendbar, da hierbei die Interaktion der Schiffsrümpfe sowie die gänzlich andere Geometrie das Ergebnis wesentlich beeinflussen.

Existierende Näherungsverfahren zur Widerstandsabschätzung von Swaths sind in den meisten Fällen nur für schnelle Fahrzeuge anwendbar. Für die ebenfalls erarbeiteten, auch für geringe Geschwindigkeiten geeigneten numerischen Verfahren ist die Eingabe

 $<sup>^{23}\</sup>mathrm{Ca.}$ 0.5 bis 1 Meter

<sup>&</sup>lt;sup>24</sup>Dies würde den Widerstand des Fahrzeugs unerwünscht vergrößern

der Schiffsform notwendig, die in dieser Phase der Entwicklung noch nicht ausreichend genau definiert ist.

Dennoch, auch wenn es sich hierbei nur um eine sehr grobe Näherung der real vorherrschenden Verhältnisse handeln kann, soll in dieser Arbeit eine Abschätzung des Schiffswiderstandes durchgeführt werden, um hieraus auf die zu installierende Antriebsleistung, siehe Teil 4, schließen zu können.

Ausgehend von Näherungsverfahren der ITTC<sup>25</sup> lässt sich der Reibungswiderstand eines Fahrzeugs nach folgender Näherung abschätzen [45]:

$$R_F = c_F \cdot \frac{\rho}{2} \cdot V^2 \cdot S \tag{3.2}$$

 $R_F$ : Reibungsbedingter Widerstand in kN;  $c_F$ : Reibungsbeiwert;  $\rho$ : Dichte von Wasser in  $kg/m^3$ ; S: benetzte Oberfläche in  $m^2$ ; V: Geschwindigkeit in m/s

mit

$$c_F = \frac{0.075}{\left(\log_{10} Rn - 2\right)^2} \tag{3.3}$$

Legt man, vorgreifend auf Kapitel 6.1, die dort beschriebenen Abmessungen zugrunde, so ergibt sich hieraus für eine Geschwindigkeit von sieben Knoten ein reibungsbedingter Widerstand von  $R_F \approx 1.9 kN$ . Da das hier angewendete Näherungsverfahren zur Abschätzung des Widerstands in Tiefwasser entwickelt wurde, ist durch weitere Untersuchungen der tatsächliche Schiffswiderstand in Flachwasser, d. h. beim Einsatz auf der Warnow, zu bestimmen.

Der Wellenwiderstand eines Swath-Fahrzeugs in diesem Geschwindigkeitsbereich beträgt nach Aussagen von Professor Söding, Technische Universität Hamburg-Harburg, ca. 15 % des Reibungswiderstands, d. h.  $R_W \approx 0.3kN$ .

Eine Abschätzung des Luftwiderstands ist mit Hilfe eines von D. W. Taylor 1943 entwickelten Verfahrens möglich:

$$R_{AA} = 0.64 \cdot \rho \cdot A_T \cdot V_R^2 \tag{3.4}$$

 $R_{AA}$ : Luftwiderstand in N;  $A_T$ : projizierte Querschnittsfläche in  $m^2$ ;  $V_R$ : scheinbare Windgeschwindigkeit in m/s

Unter Annahme einer projizierten Querschnittsfläche<sup>26</sup> von  $A_T \approx 17m^2$  sowie mit der Luftdichte  $\rho = 1.2kg/m^3$  ergibt sich für eine Geschwindigkeit von sieben Knoten, entsprechend 3.6 m/s, ein Luftwiderstand von  $R_{AA} \approx 0.2kN$  bei Windstille bzw.  $R_{AA} \approx 1.7kN$  bei einem Gegenwind mit der Stärke 4 Bft.

Zwar ist ohne ausreichend genaue Kenntnis der Geometrie des WaKat nur eine sehr vage Abschätzung des Luftwidertstandes nach Formel 3.4 möglich, dennoch ist aber deutlich der Einfluss der Windgeschwindigkeit und Windrichtung auf den Gesamtwiderstand zu erkennen. Dies betont die Notwendigkeit, eine günstige Form des Überwasserschiffes zu finden.

<sup>&</sup>lt;sup>25</sup>International Towing Tank Conference, 1957

 $<sup>^{26}</sup>$ Die maximale Breite ist auf 5.5 Metern begrenzt. Die Höhe des Fahrzeugs darf 3.5 Meter nicht überschreiten.

Ein Überblick über die Widerstandsanteile sowie den zu erwartende Gesamtwiderstand ist in Tab. 3.8 gegeben.

Anteil	Widerstand [kN]
Reibungsbedingter Widerstand	1.9
Wellenwiderstand	0.3
Luftwiderstand	0.2 (1.7)
Summe	2.4 (3.9)

Tab. 3.8: Abschätzung des Widerstands In Klammern ist der zu erwartende Widerstand für einen Gegenwind von 4 Bft angegeben.

Deutlich ist der signifikante Anteil des Luftwiderstandes zu erkennen. Daher ist beim Entwurf darauf zu achten, den Luftwiderstand durch geeignete Maßnahmen wie eine aerodynamisch günstige Form sowie eine Minimierung der projizierten Querschnittsfläche zu erreichen. Der durch Schiffsanhänge wie Propulsionsgondeln etc. verursachte Widerstand sowie der Zusatzwiderstand im Seegang [46] ist gering und wurde daher in dieser Abschätzung nicht betrachtet.

# 3.8 Seegangsverhalten

Die Gewässer, auf denen das in dieser Arbeit vorgestellte Fahrzeug primär eingesetzt wird, sind die Ober- und Unterwarnow.

Erstere ist ein Fliesgewässer, welches zu großen Teilen auf beiden Seiten einen dichten Baum- und Buschbestand aufweist. Insofern ist auf diesem Gewässer nicht mit hohen Windgeschwindigkeiten zu rechnen, so dass sich keine signifikante Wellenbildung ausprägen kann.

Die Unterwarnow, auch wenn dort die Windabschattung im Vergleich zur Oberwarnow geringer ist, ist in den Abmessungen begrenzt. Daher ist hier ebenfalls nicht mit stärkerem Seegang zu rechnen, da die zur Ausbildung von größeren Wellen notwendige Windwirklänge nicht gegeben ist.

Aus diesen Gründen ist das Seegangsverhalten wie auch die maximale Wellenhöhe, bei der ein uneingeschränkter Betrieb möglich ist, bei der Konzeption nur mit niedriger Priorität zu berücksichtigen.

# Teil 4

# Antrieb und Energiebereitstellung

In Kapitel 4.1 wird eine Definition der Begriffe Antrieb und Energiebereitstellung gegeben. Funktion und Aufgabe der zugehörigen Komponenten werden benannt sowie auf Rahmenbedingungen, siehe auch Teil 2, eingegangen. Basierend auf dieser Spezifikation werden in Kap. 4.2 Varianten zur Energiespeicherung benannt und erörtert. Kap. 4.3 beschreibt Möglichkeiten für die Energieumwandlung. Die für den WaKat möglichen Antriebskonzepte werden in Kap. 4.4 aufgeführt; eine zusammenfassende Bewertung ist in Kap. 4.5 zu finden.

# 4.1 Definition und allgemeine Bemerkungen

Aufgabe der Antriebsanlage ist es, den Vortrieb des Fahrzeugs sicherzustellen. Hierfür muss Energie bereitgestellt werden, die über geeignete Propulsionsorgane, siehe Teil 5, in Bewegungsenergie umgewandelt wird und so die Kommandos der Besatzung in die gewünschten Manöver umsetzt. Weiterhin ist die für einen ordnungsgemäßen Betrieb benötigte zusätzliche Energie bereitzustellen. Diese Hilfsenergie wird u. a. benötigt für:

- Beleuchtung, Belüftung
- Navigationselektrik und -elektronik
- Wärme
- Hydraulikaggregate

Die zum Betrieb erforderliche Energie kann entweder an Bord durch Umwandlung "gewonnen"<sup>1</sup> oder in ausreichender Menge lokal zwischengespeichert werden.

In Teil 2 wurden Aspekte benannt, die ein Fahrzeug bei Einsatz auf der Unter- und Oberwarnow zu erfüllen hat. Von diesen Rahmenbedingungen sind folgende Punkte für die Wahl, Gestaltung und Auslegung des Antriebssystems relevant:

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Die Energie wird nicht gewonnen, sondern durch Umwandlungsprozesse, dies sind im allgmeinen chemische Reaktionen, von einer Energieform in eine andere, höherwertige Energieform überführt.

- Hohe Effizienz
- Gefährdung von Passagieren, Crew und Umwelt ist auch bei Versagen bzw. Fehlfunktion einzelner oder mehrerer Komponenten ausgeschlossen
- Keine bzw. minimale Schadstoffemissionen im Betrieb wie im Havariefall
- Wasserverschmutzung ist auch im Schadensfall ausgeschlossen<sup>2</sup>
- Keine Vibrationen und keine Geräuschentwicklung, die das Komfortempfinden der Passagiere beeinträchtigen
- Störungsfreier Betrieb auch bei schlechtem Wetter bzw. sonstigen ungewöhnlichen Einsatzbedingungen

# 4.2 Energiespeicherung

Aufgabe der Energiespeicherung ist, die für den Betrieb benötigte Energie in ausreichender Menge zur Verfügung zu stellen. Hierfür stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung. Es gibt:

- Wasserstoff
- Erdgas
- Benzin und Diesel
- "Biodiesel"
- Akkumulatoren

#### 4.2.1 Wasserstoff

Der massebezogene obere Heizwert von Wasserstoff, dem leichtesten Element des Periodensystems, ist größer als die Heizwerte anderer üblicher Brennstoffe wie z. B. Erdgas, Benzin oder Schweröl. Es ist geruchlos und, insbesondere in elementarer Form, leicht entflammbar, in Verbrennungsmotoren einsetzbar und kann in Brennstoffzellen umgesetzt werden [47].

Gemische aus Wasserstoff und Sauerstoff sind explosiv. Daher ist beim Umgang mit wie auch der Verwendung von Wasserstoff ein unbeabsichtigtes Entweichen auszuschließen. Die hierfür notwendige Sicherheitstechnik ist verfügbar. Sollte dennoch z. B. im Havariefall Wasserstoff entweichen, so ist auf Grund der ungiftigen Natur von Wasserstoff keine Wasserverschmutzung zu erwarten [48]. Es besteht in diesem Fall Explosionsgefahr.

 $<sup>^2{\</sup>rm Die}$  Hansestadt Rostock gewinnt ihr Trinkwasser aus der Oberwarnow. Eine Verschmutzung des Gewässers durch Öle, Fette etc. hat gravierende Folgen.

Die Herstellung von Wasserstoff kann mittels Elektrolyse aus Wasser, durch Reformationsprozesse aus Erdgas bzw. Methanol sowie durch biochemische Reaktionen erfolgen. Eine umfassende Energiebilanz, d. h. eine Energiebilanz, welche auch die Verluste bei der Wasserstofferzeugung miteinbezieht, wird bei den zwei letztgenannten Möglichkeiten durch den Energieaufwand für die Herstellung von Wasserstoff wie auch den hiermit verbundenen Verlusten verschlechtert. Dies ist unter dem Gesichtspunkt, ein nachhaltiges und energieeffizientes Fahrzeug zu konzipieren, negativ zu bewerten.

Die für die Wasserstoff-Elektrolyse notwendige elektrische Energie kann sowohl aus regenerativer wie konventioneller Energieerzeugung stammen. Um die Energiebilanz nicht durch Verluste bei Produktion und Kraftwerken zu verschlechtern, ist die Elektrolyse mit Hilfe regenerativ erzeugter elektrischer Energie empfehlenswert. Diese ist allerdings z. Zt. noch kostenintensiver als andere Verfahren zur Wasserstofferzeugung [49].

Für die Speicherung von Wasserstoff an Bord stehen drei Möglichkeiten zur Verfügung, nämlich [48]:

- unter hohem Druck in Tanks
- verflüssigt
- chemisch gebunden in Metallhydridspeichern

Bei der Speicherung in Metallhydridspeichern wird der Wasserstoff in das Kristallgitter eingelagert oder chemisch gebunden. Unter Wärmezufuhr wird das gespeicherte Gas wieder abgegeben; während des Betankens wird Wärme freigesetzt. Da Wasserstoff in derartigen Tanks chemisch inert ist, ist diese Lösung unter sicherheitstechnischen Aspekten unproblematisch. Ein sehr hohes Gewicht<sup>3</sup>, die nur begrenzte Lebensdauer der Tanks sowie langwierige Betankungsvorgänge sind als Nachteile zu nennen. Die für die Freisetzung des Wasserstoffs erforderliche Zufuhr von Wärme verschlechtert die Energiebilanz des Fahrzeugs [50].

Flüssigwasserstoff, d. h. Wasserstoff, der mit vergleichsweise hohem Energiebedarf auf eine Temperatur von unter 20 Kelvin abgekühlt wurde, zeichnet sich durch eine hohe volumenspezifische Energiedichte aus. An Bord erfolgt die Speicherung des kryogenen Wasserstoffs in stark isolierten Tanks. Dennoch ist ein ständiges Abdampfen zu beobachten, so dass ein Teil des Wasserstoffs nicht genutzt wird; die ungefährliche Entlüftung des entweichenden Wasserstoffes muss gewährleistet sein. Kommt es im Havariefall zum Bersten eines oder mehrerer Tanks, so besteht ein hohes Gefährdungspotential [51].

Bei der Speicherung von Wasserstoff in Drucktanks<sup>4</sup> sind z. Zt. Drücke von ca. 200 bis 300 bar gebräuchlich. Es werden aber Untersuchungen durchgeführt, welche die Möglichkeit der Wasserstoffspeicherung bei noch höheren Drücken<sup>5</sup> in Tanks aus Faserverbundwerkstoffen untersuchen. Durch die äußerst niedrige Dichte und die kleine Molekularstruktur von Wasserstoff weist gasförmiger Wasserstoff ein hohes Diffusionspotential auf. Es müssen

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>Und damit eine unerwünschte Zunahme der Schiffsmasse

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup>Diese bestehen meistens aus Stahl bzw. Aluminium

 $<sup>^5</sup>$ Bis 700 bar

daher bei der Entwicklung der Tanks besondere Maßnahmen getroffen werden, um die Diffusion von Wasserstoff zu verhindern. Dies wird durch die Verwendung spezieller Folien erreicht.

### **4.2.2** Erdgas

Erdgas ist ein fossiler Energieträger, der kostengünstig in ausreichender Menge zur Verfügung steht. Eine Umstellung konventioneller Diesel- oder Benzinmotoren auf Erdgas ist unproblematisch.

Da die Verbrennung von Erdgas im Vergleich zu Benzin und Diesel zu geringeren Emissionen führt, wird in Gebieten mit hoher Luftverschmutzung häufig die Substitution von Diesel- oder Benzinantrieb durch Erdgasmotoren durchgeführt. Die Speicherung erfolgt hierbei in den meisten Fällen in Drucktanks.

### 4.2.3 Benzin und Diesel

Die dominierende Lösung, die Energieversorgung relativ kleiner mobiler Einheiten sicherzustellen, stellt die Energiespeicherung mit Hilfe von Benzin bzw. Diesel und die anschließende Umwandlung in einer Verbrennungskraftmaschine dar.

Für diese beiden Brennstoffe existiert ein gut ausgebautes Versorgungsnetz; die Handhabung und Speicherung ist einfach und relativ ungefährlich. Die z. Zt. geringen Kosten sprechen ebenfalls für diese Lösung.

Allerdings ist ein hohes Schädigungspotential vorhanden, falls diese Stoffe in den Naturkreislauf gelangen sollten. Eine schwer zu beseitigende Verschmutzung des Gewässers wäre die Folge. Der auf natürlichen Selbstreinigungskräften beruhende, biologische Abbau solcher Verschmutzungen findet nur sehr langsam statt.

# 4.2.4 "Biodiesel"

Der im Allgemeindeutsch gebräuchliche Begriff "Biodiesel" wird für zwei unterschiedliche Brennstoffe benutzt, nämlich:

- Unbehandeltes Pflanzenöl
- Rhapsmethylester (RME)

Ausgangsstoff für die Herstellung beider Stoffe sind pflanzliche Öle, insbesondere Rapsöl. Es handelt sich also um weitgehend regenerative Brennstoffe, da die bei der chemischen Umsetzung freigesetzten Kohlenstoffdioxidemissionen<sup>6</sup> zuvor durch das Wachstum der Pflanzen der Umwelt entzogen und in die Pflanzen eingelagert wurden. Allerdings ist

 $<sup>^6</sup>$ In dieser Arbeit wird, auch wenn z. T. gegensätzliche Argumentationen existieren, durch zivilisatorisch bedingte Prozesse erzeugtes Kohlenstoffdioxid als Luftschadstoff eingeordnet

ein Anbau von "Biodiesel" in größeren Mengen auf Grund der hierfür erforderlichen Monokulturen und dem damit verbundenen hohen Eintrag von Düngemitteln etc. in den Naturkreislauf kritisch zu hinterfragen.

Unbehandeltes Pflanzenöl ist, sollte es mit Wasser in Kontakt kommen, ungefährlich. Eine Trinkwassergefährdung ist daher auszuschließen. Die Verbrennung von unbehandeltem Pflanzenöl ist in einigen Vielstoffmotoren oder in speziell konzipierten Aggregaten möglich.

RME wird, ausgehend von unbehandeltem Pflanzenöl, durch chemische Umsetzung verestert, wodurch ein günstigeres Brennverhalten erreicht wird. Dadurch ist der Einsatz von RME als Treibstoff für herkömmliche, nur geringfügig modifizierte Dieselmotoren<sup>7</sup> möglich. Durch die im Vergleich zu unbehandeltem Pflanzenöl zwischengeschaltete chemische Umwandlung ist eine Verschlechterung der Ökobilanz zu verzeichnen. Das Endprodukt, also RME, ist nicht mehr neutral gegenüber Wasser; sollte RME in ein Gewässer gelangen, so ist eine Gefährdung des Ökosystems wahrscheinlich [52] [53].

### 4.2.5 Akkumulatoren

Akkumulatoren werden häufig zur kurzzeitigen Zwischenspeicherung geringerer Energiemengen verwendet. Eine Langzeitspeicherung ist auf Grund der prinzipbedingten Selbstentladung<sup>8</sup> mit hohen Verlusten verbunden und daher nicht praktikabel [54].

Die im Vergleich zu flüssigen Energieträgern wie Benzin bzw. auch Erdgas oder "Biodiesel" geringe massebezogenen Speicherdichte von Akkumulatoren ist problematisch. Werden z. B. in einem Fahrzeug Akkumulatoren zur Energiespeicherung verwendet, so ist eine substantielle Masse für die Energiespeicheraggregate vorzuhalten. Eine höhere Schiffsmasse ist die Folge. Insofern stellt die Verwendung von Akkumulatoren zur Versorgung mobiler Einheiten über einen längeren Zeitraum ohne Lademöglichkeiten keine günstige Lösung dar.

Werden Akkumulatoren mit Elektromotoren gekoppelt, so ist ein Betrieb mit lokaler Nullemission gegeben. Dies wird z. B. für den Antrieb von Fahrzeugen in Lagerhallen etc. angewandt, da hier eine Luftverschmutzung ausgeschlossen werden muss. Globale Nullemission kann nur schwer erreicht werden, da die für Ladevorgänge benötigte Energie zur Verfügung gestellt werden muss. Weiterhin belasten giftige Inhaltsstoffe sowie eine begrenzte Lebendauer<sup>9</sup> die Umweltbilanz.

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup>Da viele eingebaute Schläuche und Dichtungen nicht gegen RME resistent sind, müssen diese durch Exemplare aus RME-resistentem Material ersetzt werden.

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup>Die Selbstentladungsrate ist abhängig vom Akkumulatorentyp.

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup>Dies bedeutet außerdem einen nicht unbeträchtlichen Wartungsaufwand

# 4.3 Energieumwandlung

Die gespeicherte Energie, siehe Kapitel 4.2, wird durch Umwandlungprozesse für die Propulsion verfügbar gemacht und an die entsprechenden Propulsionsorgane weitergeleitet. Die geforderte Hilfsenergie wird zur Verfügung gestellt. Im folgenden sind einige Lösungen dargestellt, deren Einsatz auf einem kleinen Passagierschiff realistisch erscheint.

### 4.3.1 Verbrennungskraftmaschine

Eine überwiegende Mehrheit der z. Zt. eingesetzten Fahrzeuge nutzt Verbrennungsmotoren zur Energieumwandlung. Insbesondere der Einsatz von Diesel oder Benzin dominiert; Biodiesel, aber auch Erdgas und Wasserstoff können ebenfalls als Brennstoffe verwendet werden. Das bei Verbrennungskraftmaschinen vorhandene Vibrations- und Lärmproblem kann bei sorgfältiger Wahl und Gestaltung des Einbauortes sowie ausreichender Dämmung auf ein akzeptables Niveau abgesenkt werden.

Unabhängig vom verwendeten Brennstoff ist der Wirkungsgrad von Verbrennungsmaschinen, verglichen mit der im folgenden beschriebenen Brennstoffzelle, insbesondere im Teillastbetrieb gering. Negativ zu vermerken ist auch, dass im Havariefall eine Umweltbelastung durch austretende Schmierstoffe etc. nicht ausgeschlossen werden kann.

Der Verbrennungsmotor, betrieben mit Benzin oder Diesel, bietet eine kostengünstige und erprobte Lösung. Reichhaltige Erfahrung in Bau, Entwicklung und Betrieb derartiger Aggregate liegen vor. Bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe entstehen allerdings Schadstoffe<sup>10</sup> in beträchtlichen Mengen, so dass ein Betrieb in ökologisch sensiblen Gebieten problematisch erscheint. Weiterhin können beträchtliche Schäden des Ökosystems durch unbeabsichtigten Eintrag von Diesel bzw. Benzin in die Gewässer hervorgerufen werden.

Für unbehandeltes Pflanzenöl, RME und Erdgas gelten identische, verfahrensbedingte Einschränkungen wie bei der Verwendung flüssiger fossiler Brennstoffe. Der Einsatz von "Biodiesel" führt insgesamt zu einer Verringerung der Schadstoffemissionen, da bei der Verbrennung durch den Pflanzenwuchs gebundenes Kohlenstoffdioxid wieder freigesetzt wird. Eine Verringerung der ortsbezogenen Schadstoffmengen tritt aber nicht bzw. nur unwesentlich auf. Die Emissionswerte bei der Verbrennung von Erdgas, dieses wird seit Beginn der 90er Jahre vermehrt für den Antrieb von Bussen und Lastkraftwagen eingesetzt, sind im Vergleich zur Verbrennung von Benzin oder Diesel niedrig. Die im Fahrzeugbau vorhandenen Erfahrungen sind auf den Schiffbau übertragbar, so dass die Entwicklung oder Anpassung eines geeigneten Verbrennungsmotors als unproblematisch erscheint.

Weiterhin ist es möglich, Wasserstoff in Verbrennungsmotoren einzusetzen. Die hierfür notwendige Motortechnik ist entwickelt bzw. angepasst worden. Untersuchungen zeigen, dass ein Langzeiteinsatz dieser Motoren möglich ist. Allerdings ist, zum Teil auch durch die kurze Zeit aktiver Entwicklung von Wasserstoffmotoren und dem hierdurch begründeten Mangel an Erfahrung erklärt, der Wirkungsgrad geringer als bei Benzin- und Diesel-

 $<sup>^{10}\</sup>mbox{Haupts\"{a}chlich}$   $CO_2,\,NO_x,$ unverbrannte Kohlenwasserstoffe und (bei Dieselmotoren) Ruß

motoren. Insbesondere das Teillastverhalten ist kritisch und bedarf noch weitreichender Optimierungen. Beim Verbrennungsprozess, d. h. bei der Reaktion von  $H_2$  mit Luftsauerstoff, entstehen nur sehr geringe Schadstoffemissionen. So betragen die  $CO_2$ -Emissionen nur ca. 2 Prozent des Ausstoßes von Benzin- und Dieselmotoren. Ein Betrieb als lokales Nullemissionsfahrzeug ist dennoch nicht möglich [55].

### 4.3.2 Brennstoffzelle

In direkten Brennstoffzellen wird der zugeführte Wasserstoff und Sauerstoff<sup>11</sup> auf elektrochemischem Wege in elektrische Energie umgewandelt. Direkte Brennstoffzellen lassen sich anhand ihrer Betriebstemperatur einordnen in:<sup>12</sup>:

- Niedertemperaturzellen (AFC, PEFC)
- Mitteltemperaturzellen (PAFC)
- Hochtemperaturzellen (MCFC, SOFC)

Für den Betrieb von Mittel- und Hochtemperaturzellen ist ein komplexes Steuerungssystem sowie eine Vielzahl von Hilfsaggregaten notwendig. Insofern eignet sich dieser Zellentyp nur für den Einsatz in größeren Installationen wie z. B. für den Kraftwerksbetrieb. AFCs können nicht mit Luftsauerstoff betrieben werden, so dass diese sich ebenfalls nicht für den Einsatz als kleine mobile Energie-"Erzeuger" eignen [47].

PEFCs zeichnen sich durch folgende Eigenschaften aus [56]:

- hohe Effizienz
- äußerst geringe Schadstoffemissionen
- vibrationsfreier und weitgehend lärmarmer Betrieb
- günstiges Überlastverhalten
- polymerer Elektrolyt
- Keine Umweltverschmutzung durch Öle, Fette oder flüssige Elektroyte im Havariefall

Die hohe Überlastfähigkeit erlaubt es, die Energieumwandlung auf den Betriebszustand auszulegen. In Notsituationen wird die Brennstoffzelle über die Nennleistung hinaus beansprucht und hierdurch eine größere Energiemenge zur Verfügung gestellt.

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup>Bei einigen Brennstoffzellentypen kann neben reinem Sauerstoff auch Luftsauerstoff eingesetzt werden.

<sup>&</sup>lt;sup>12</sup>AFC: alkaline fuel cell; PEFC: polymer electrolyte fuel cell; PAFC: phosphoric acid fuel cell; MCFC: molten carbonate fuel cell; SOFC: solid oxide fuel cell

Forschungsvorhaben befassen sich z. Zt. intensiv mit indirekten Brennstoffzellen. Insbesondere wird die Direktmethanol-Brennstoffzelle weiterentwickelt. Dies ist eine Brennstoffzelle, bei welcher Methanol und Luftsauerstoff direkt an den Elektroden der Brennstoffzelle elektrochemisch umgesetzt wird. Die problembehaftete Speicherung sowie Verwendung von Wasserstoff entfällt [57]. Da es sich hierbei großenteils aber um noch nicht abgeschlossene Forschungen handelt, können keine Aussagen gemacht werden, ob ein Einsatz auf dem WaKat möglich und sinnvoll ist.

### 4.3.3 Photovoltaik

Sonnenenergie ist ein "Energiequelle", welche mengenmäßig nahezu unbegrenzt zur Verfügung steht. Mit Hilfe von photovoltaischen Zellen, im Volksmund auch Solarzellen genannt, wird die eingestrahlte Energie in elektrische Energie umgewandelt. Da hierbei keine Emissionen entstehen, ist ein globaler Nullemissionsbetrieb möglich. Die für die Produktion der Solarzellen eingesetzte Energie wird durch die Photovoltaikzellen innerhalb weniger Jahre erzeugt.

Auf Grund des geringen Wirkungsgrades<sup>13</sup> benötigen Solarzellen im Vergleich zu anderen Varianten eine große Installationsfläche. Diese ist bei Schiffen nur sehr schwer zu erreichen bzw. in den meisten Fällen nicht möglich. Alternativ ist eine Auslagerung eines Teils der Photovoltaikanlage an Land möglich; die an Land erzeugte Energie wird für den Schiffsbetrieb mit Hilfe von Akkumulatoren<sup>14</sup> bereitgehalten [58].

# 4.4 Antriebskonzepte

Aufbauend auf den genannten Möglichkeiten der Energiespeicherung, siehe Kap. 4.2, und den in Kap. 4.3 aufgeführten Verfahren der Energieumwandlung sind diverse Antriebskonzepte denkbar. Dieses Kapitel stellt verschiedene Konzepte vor; Vor- und Nachteile werden benannt. Eine vergleichende Bewertung ist in Kap. 4.5 zu finden.

#### 4.4.1 Direktantrieb

Ein Großteil aller in Betrieb befindlichen Schiffe wird über einen Direktantrieb angetrieben. Hierbei treibt ein Verbrennungsmotor über eventuell zwischengeschaltete Getriebe und die Wellenanlage den Propeller direkt an, siehe Abb. 4.1. Da die Antriebsmaschine bei längerem Stillstand des Fahrzeugs nicht in Betrieb ist, ist für die Versorgung mit Hilfsenergie ein externer Generator notwendig.

Um hohe Getriebeverluste zu vermeiden, hat die Antriebsanlage geradlinig angeordnet zu sein. Eine starke, eventuell mehrfache Umlenkung des Kraftflusses ist zu vermeiden.

 $<sup>^{13}</sup>$ Der theoretische maximale Wirkungsgrad von Photovoltaik beträgt ca. 40 %. Der Wirkungsgrad von im Handel erhältichen Solarzellen liegt im allgemeinen unter 20 %.

<sup>&</sup>lt;sup>14</sup>Siehe Abschnitt 4.2.5

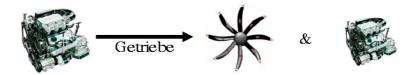


Abb. 4.1: Direktantrieb durch einen Verbrennungsmotor

Eine geeignete Lösung ist hierfür bei Swath-Fahrzeugen die Anordnung je eines Motors in den Auftriebskörpern. Wellenanlagen verbinden diese mit den achtern angeordneten, tiefgetauchten Propellern. Die Installation der in Teil 5 beschriebenen Antriebsgondeln ist nicht realisierbar.

Als Brennstoffe können Benzin, Diesel, "Biodiesel", Erdgas sowie Wasserstoff eingesetzt werden.

Der Einsatz von Verbrennungsmotoren ist unweigerlich, wie beschrieben, mit der Gefahr der Trinkwasserverschmutzung durch Austreten von Schmierstoffen etc. im Havariefall, aber eventuell auch im normalen Betrieb verbunden. Relativ hohe Schadstoffemissionen bei Betrieb mit Benzin oder Diesel sowie die Schwingungs- und Lärmproblematik sind weitere zu nennende Kritikpunkte. Wird Wasserstoff als Energieträger eingesetzt, so ist diese Problematik nur noch in abgeschwächter Form vorhanden; ein schlechterer Gesamtwirkungsgrad als beim Einsatz fossiler Brennstoffe ist allerdings in Kauf zu nehmen.

Der schlechte Wirkungsgrad von Verbrennungsmotoren unter Teillast macht sich insbesondere bei langsamer Fahrt bemerkbar. Der zusätzlich erforderliche Generator erhöht die Anschaffungs- sowie Betriebskosten, führt zu einer ungewollten Erhöhung der Verdrängung und verschlechtert die Ökobilanz.

### 4.4.2 Verbrennunsmotor-E-Antrieb

Eine weitere mögliche Lösung stellt der Verbrennungsmotor-E-Antrieb dar, Abb. 4.2. Hierbei wird ein durch eine Verbrennungskraftmaschine betriebener Generator zur Erzeugung elektrischer Energie herangezogen. Elektromotoren treiben die Propeller an; die Versorgung mit Hilfsenergie ist ebenfalls gewährleistet.



Abb. 4.2: Verbrennungsmotor und E-Antrieb

Die Verwendung von Akkumulatoren als Energiezwischenspeicher ist möglich. Hierdurch

kann eine Steigerung des Gesamtwirkungsgrades bei zugleich geringerer installierter Maschinenleistung erreicht werden, da Spitzenlasten durch die Akkumulatoren abgepuffert werden. Der Verbrennungsmotor wird mit idealem Wirkungsgrad betrieben; ein wirkungsgradmindernder Teillastbetrieb wird vermieden. Geringe Wirkungsgradminderungen auf Grund von Lade- und Entladeverlusten sind vorhanden; diese werden allerdings durch den Betrieb der Verbrennungsmaschine im Bestpunkt mindestens ausgeglichen.

Für den Einsatz eines Verbrennungsmotors gelten die oben gemachten Aussagen. Im Vergleich zum Direktantrieb entfällt bei dieser Anordnung, so die Vorschriften der Klassifikationsvorschriften es erlauben, die Notwendigkeit für einen separaten Stromerzeuger. Die Verbrennungsmotor-Generator-Einheit und der Elektromotor für den Antrieb der Propeller können räumlich getrennt aufgestellt werden, so dass eine flexible Gestaltung und Anordnung des Antriebssystems möglich ist.

### 4.4.3 Antrieb durch eine Brennstoffzelle und Elektromotoren

Eine Nutzung von Brennstoffzellen zur Energieumwandlung, siehe Abb. 4.3, ermöglicht es, Energieumwandlung und Propulsionsorgane räumlich getrennt zu installieren. Ein lokaler Nullemissionsbetrieb, <sup>15</sup> keine bzw. vernachlässigbare Lärm- und Schwingungserscheinungen sowie der exzellente Wirkungsgrad sprechen für den Einsatz von Brennstoffzellen auf umweltsensiblen Gewässern wie der Oberwarnow. Allerdings sind Brennstoffzellen

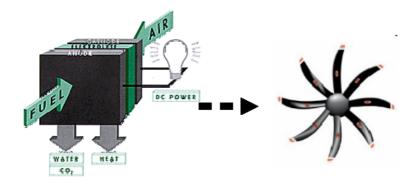


Abb. 4.3: Energieumwandlung durch eine Brennstoffzelle

nach wie vor Gegenstand intensiver Forschungen. Die Anschaffungskosten bezogen auf die Nennleistung sind, auch wenn seit den 90er Jahren ein drastischer Preisverfall zu beobachten ist, um ein Vielfaches höher als bei der Installation konventioneller Verbrennungskraftmaschinen.

 $<sup>^{15} \</sup>rm Wird$  die Wasserstoffgewinnung mit Hilfe regenerativer Energien durchgeführt, so ist auch ein globaler Nullemissionsbetrieb möglich.

#### 4.4.4 Batteriebetrieb

Ausschließlicher Batteriebetrieb des Fahrzeuges ist nur bedingt möglich [54]. Die für den Betrieb notwendige zu speichernde Energiemenge führt zu unerwünscht hohen Batteriegewichten. Die Problematik des Aufladens, wirkungsgradveringernde Ladeverluste sowie die begrenzte Lebensdauer der Akkumulatoren sind weitere negative Aspekte, die einen Einsatz als nicht sinnvoll erscheinen lassen.

#### 4.4.5 Solarantrieb

Zwar ist die solare Einstrahlung im deutschen Ostseeraum verglichen mit anderen Gebieten Mitteleuropas verhältnismäßig hoch, siehe Abschnitt 2.3.1, dennoch ist eine Auslegung des WaKat als Solarschiff, wie in Abb. 4.4 gezeigt, problematisch.



Abb. 4.4: Solarantrieb

Insbesondere in der Vor- und Nachsaison ist mit schlechtem Wetter zu rechnen, so dass über längere Zeiträume niedrige Einstrahlungswerte dominieren. Um auch hier einen solaren Deckungsgrad <sup>16</sup> nahe 1 zu erreichen <sup>17</sup>, ist entweder eine für die üblicherweise vorherrschenden Umweltbedingungen überdimensionierte und dementsprechend kostenintensive Photovoltaikanlage oder die Bereitstellung einer großen Speicherkapazität in Form von Akkumulatoren<sup>18</sup> erforderlich [59].

Dies führt in beiden Fällen zu einer Verringerung des Wirkungsgrads sowie hohen Kosten. Zwar ist es denkbar, bei ungünstigen Witterungsbedingungen nicht photovoltaisch erzeugte Energie heranzuziehen, dies würde aber eine Verschlechterung der Ökobilanz zur Folge haben. Weiterhin ist, da nur eine begrenzte Fläche zur Installation genutzt werden

$$\eta_{sol} = \frac{E_{erf} - E_{fehl}}{E_{erf}} \tag{4.1}$$

 $<sup>^{16}</sup>$ Unter dem Begriff "Solarer Deckungsgrad"  $\eta_{sol}$  ist, normiert auf die benötigte Energie  $E_{erf}$ , die Differenz zwischen benötigter Energie und der Energie  $E_{fehl}$ , die nicht photovoltaisch erzeugt werden kann, zu verstehen.

 $<sup>^{17}\</sup>mathrm{Ein}$ solarer Deckungsgrad von 1 ist nahezu unerreichbar, da für diesen Fall immer, also auch bei Jahrhundert-Schlechtwetterphasen ausreichend Energie durch die Photovoltaikanlage zur Verfügung gestellt werden müsste.

<sup>&</sup>lt;sup>18</sup>Eine Langzeitspeicherung ist bei dieser Speicherform nur mit beträchtlichen Verlusten bedingt durch Selbstentladevorgängen möglich.

kann, ohne das Komfortempfinden der Passagiere zu stören, die Montage von Solarzellen auf dem Fahrzeug nur eingeschränkt möglich. Weitere Solarzellen sind an Land zu installieren, wodurch sich die Notwendigkeit zusätzlicher, langwieriger und eventuell verlustbehafteter Ladevorgänge ergibt. Auf der Oberwarnow führt ein dichter Bewuchs und z. T. hoher Baumbestand dazu, dass auf diesem Streckenabschnitt die Energiegewinnung eingeschränkt wird.

#### 4.5 Bewertung der Antriebskonzepte

Eine umfassende Bewertung der vorgestellten Antriebskonzepte nach verschiedenen Kriterien ist in Tab. 4.1 aufgeführt.

$\textbf{Konzept} \Rightarrow$	VM direkt			VM-E			BZ	AKK	SOL		
	BD	EG	H2	BioD	BD	EG	H2	BioD	DZ	AIXIX	
Effizienz	-	-	-	-	О	О	О	О	++		$x^{19}$
Ökobilanz <sup>20</sup>		-	+/-	+		-	+/-	+	+	0/	++
Schadst-Em.		О	+	-		О	+	-	+	++/-21	++
Vibr., Lärm	-	-	-	-	О	О	О	О	+	++	++
Umweltgef. <sup>22</sup>		О	-	-		О	-	-	++	$x^{23}$	++
Sicherheit	О	-	-	О	О	-	-	О	-	+	++
Umsetzbarkeit	++	+	+	++	++	+	+	++	+	-	-
Kosten	++	+	О	++	+	О	О	+		-	-

Tab. 4.1: Bewertung der Antriebskonzepte

**Abkürzungen:** VM-direkt: Direktantrieb mit Verbrennungsmaschine; VM-E: Verbrennungsmotor-E-Antrieb; BD: Benzin und Diesel; EG: Erdgas; H2: Wasserstoff; BioD: "Biodiesel"; BZ: Brennstoffzelle; AKK: Akkumulatorbetrieb; SOL: Solarantrieb

Wertung: ++: sehr gut; +: gut; o: akzeptabel; -: schlecht; - -: sehr schlecht; x: keine Wertung

 $<sup>^{19}\</sup>mathrm{Da}$  Sonnenenergie unbeschränkt und kostenfrei zur Verfügung steht, ist eine Effizienzbewertung nicht sinnvoll.

<sup>&</sup>lt;sup>20</sup>Die Ökobilanz bei Verwendung von Wasserstoff sowie Akkubetrieb ist stark abhängig von den für die Wasserstoffproduktion angewandten Verfahren bzw. ob die in Akkumulatorren eingespeicherte Energie regenerativ erzeugt wurde.

<sup>&</sup>lt;sup>21</sup>Wird die in Akkumulatoren gespeicherte Energie regenerativ gewonnen, so wird ein globaler Nullemissionsbetrieb erreicht. Werden konventionelle Energie-"Quellen, verwendetet, so sind die kraftwerksseitig auftretenden Schadstoffemissionen mit in die Betrachtung einzubeziehen. Die Bilanz verschlechtert sich entsprechend.

<sup>&</sup>lt;sup>22</sup>Umweltgefährdung beschreibt die möglichen Folgen auf den Naturkreislauf bei einem Havariefall. Wird eine Alternative mit - oder - - bewertet, so ist z. B. ist eine empfindliche Störung nicht auszuschließen; ein Einsatz auf der Warnow ist nicht empfehlenswert.

<sup>&</sup>lt;sup>23</sup>Die Umweltgefährdung durch Akkumulatoren ist stark abhängig von der jeweiligen Bauweise, so dass eine Bewertung ohne vorherige Auswahl eines geeigneten Batterietyps nicht möglich ist.

Die hohen Schadstoffemissionen sowie die latente Gefahr von starken Eingriffen in den Ökohaushalt im Schadensfall machen deutlich, dass ein Einsatz der herkömmlichen fossilen Energieträger Benzin und Diesel auf ökologisch sensiblen Gewässern nicht praktikabel ist.

Die Umweltgefährdung ist beim Einsatz von "Biodiesel" geringer. Dennoch ist ein vergleichbares Bewertungsbild abzulesen. Schlechte Emissionswerte vor Ort sowie die Lärmund Vibrationsproblematik sprechen gegen diesen regenerativen Brennstoff.

Verbrennungsmotor-E-Antriebe sind sowohl in der Anschaffung wie im Betrieb kostengünstig. Da die Verbrennungsmaschine im Bestpunkt betrieben wird sowie ein externer Generator entfallen kann zeichnet sich eine solche Lösung durch eine höhere Effizienz als Direktantriebe aus. Aufgrung der räumlichen Trennung von Energieerzeugung und Propulsionsorganen ist eine Installation auch unter beengten Bedingungen möglich. Erprobte und bewährte Diesel- bzw. Benzinmotoren bedeuten geringen Wartungsaufwand. Wird Wasserstoff bzw. Erdgas als Brennstoff eingesetzt, so lässt sich, insbesondere bei Einsatz von regenerativ erzeugtem Wasserstoff, eine Minimierung der Emissionen erreichen. Allerdings ist auch in diesem Fall eine Umweltgefährung im Havariefall wahrscheinlich; die Speicherung von Wasserstoff bzw. Erdgas erfordert spezielle Sicherheitseinrichtungen.

Werden nur ökologische Aspekte berücksichtigt, so ist die Brennstoffzelle sehr positiv zu bewerten. Beim Betrieb entstehen äußerst geringe Schadstoffmengen; eine Umweltgefährung im Havariefall ist nicht vorhanden. Geringe Geräschpegel und so gut wie keine Vibrationen sorgen für ein hohes Komfortempfinden der Passagiere. Allerdings sind die Kosten für Brennstoffzellen immer noch immens hoch, auch da für die Speicherung und Handhabung von Wasserstoff weitgreifende, aber beherschbare Sicherheitsmaßnahmen ergriffen werden müssen.

Akkumulatoren als ausschließlicher Energiespeicher sind für den Dauereinsatz auf einem kleinen Passagierschiff nicht geeignet. Hohe Ladeverluste verschlechtern die Effizienz; schlechte massebezogene Speichereigenschaften bedeuten ein hohes Akkumulatorengewicht und damit eine widerstandsvergrößernde Erhöhung der Schiffsmasse. Da die Fertigung von Akkumulatoren energieaufwendig ist und häufig hierbei giftige Substanzen zum Einsatz kommen, ist die Ökobilanz, so man den Produktlebenszyklus betrachtet, nicht optimal.

Auch wenn ein solarer Betrieb des WaKat nach Tab. 4.1 aus ökologischer Sichtweise sehr positiv zu bewerten ist, so stellt dies dennoch keine optimale Lösung dar. Insbesondere durch die Abschattung auf der Oberwarnow verringert sich die an Bord gewonnene Energiemenge. Dies erfordert für einen störungsfreien Betrieb daher die Vorhaltung großer Akkumulatoren. Hierdurch wird die Verdrängung, und damit der Widerstand des Schiffsrumpfes vergrößert. Weiterhin ist eine Installation von Solarzellen auf Schiffen immer mit einer Einschränkung oder Behinderung der freien Sicht verbunden, siehe Kap. 3.5. Die freie Sicht ist jedoch eine Eigenschaft, die so weit wie möglich erhalten bleiben sollte, da sie das Naturerlebnis entscheidend mitprägt.

### Teil 5

## **Propulsion**

Um ein nachhaltiges, ökologisch verträgliches Fahrzeug wie den WaKat realisieren zu können, ist es notwendig, neben Verwendung einer optimierten Rumpfform auch für die Frage der Propulsion eine die festgelegten Kriterien erfüllende Lösung zu finden.

In Kapitel 5.1 wird ein Überblick über die für dieses Fahrzeug näher zu untersuchenden Propulsionskonzepte gegeben. In den folgenden Kapiteln werden diese technischen Lösungen präzisiert, beschrieben und deren Eignung für den Einsatz auf der Warnow untersucht. Eine Bewertung dieser Konzepte ist in Kapitel 5.4 zu finden.

#### 5.1 Propulsionskonzepte

Für die Propulsion eines kleinen Passagierschiffes, d. h. für die Erzeugung des zum Erreichen der projektierte Geschwindigkeit notwendigen Schubs, sind zwei Lösungen gebräuchlich, nämlich:

- Propeller
- Waterjet

Der Einsatz unkonventioneller Propulsionsorgane wie Schaufelradantrieb bzw. Antrieb per Luftschraube oder durch elektromagnetische Effekte ist, da diese eine im Vergleich zu Alternativen schlechtere Effizienz aufweisen bzw. große Einbauräume erfordern, bei Fahrzeugen dieser Größenordnung und bei Einsatz auf den beschriebenen Fahrtgebieten nicht sinnvoll.

Waterjets kommen primär bei schnellen Fahrzeugen mit hoher Leistung zum Einsatz. Bei geringen Geschwindigkeiten verschlechtert sich der Wirkungsgrad, und damit die Effizienz des Antriebssystems deutlich. Weiterhin ist bei Waterjets eine signifikante Beeinflussung der Strömungsverhältnisse in Schiffsnähe, verursacht durch den Ansaugstutzen und die über der Wasserlinie angeordnete Auslassöffnung, zu beobachten. Die Anwendung von Waterjets auf dem WaKat ist daher abzulehnen.

Kommen als Propulsionsorgane Propeller zum Einsatz, so lassen sich die denkbaren Lösungen - bezogen auf die Lage und Gestaltung des Propellers - wie folgt klassifizieren. Es werden eingesetzt:

- konventionelle tiefgetauchte Propeller
- Oberflächenpropeller

Abb. 5.1 zeigt verschiedene, für den WaKat denkbare Konzepte zur Gestaltung der Propulsion mittels Propellern. Diese sind:

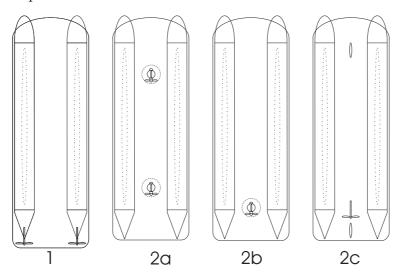


Abb. 5.1: Mögliche Varianten der Anordnung von Oberflächenpropellern

- 1. Installation je eines tiefgetauchten Propellers in den Auftriebskörpern.
- 2. Verwendung von in der Mittschiffsebene angeordneten Oberflächenpropeller(n). Die Installation des Motors erfolgt in einer hydrodynamisch günstig geformten Gondel, die geeignet in der Decksstruktur verankert ist.
  - (a) Eine achtern angeordnete, schwenkbare Gondel
  - (b) Je eine im Vorschiff und achtern, mittschiffs angeordnete Gondel. Beide Gondeln schwenkbar
  - (c) Eine achtern angeordnete, nicht schwenkbare Gondel. Das Fahrzeug wird über ein oder mehrere Ruder gesteuert

### 5.2 Propulsion durch tiefgetauchte Propeller

Die am häufigsten eingesetzte Lösung für die Propulsion eines Schiffes sind tiefgetauchte Propeller. Diese zeichnen sich durch einen hohen Wirkungsgrad aus. Wird eine konventionelle Antriebsanlage eingesetzt, d. h. ist ein Verbrennungsmotor direkt oder mittels

Getriebe über eine Welle an den Propeller gekoppelt, so ist eine günstige, geradlinige Anordnung des Antriebsstrangs bei dieser Konfiguration anzustreben. Diese Problematik ist bei gekoppelten Antrieben wie z. B. Diesel-E- und Brennstoffzelle-E-Antrieben nur in stark abgeschwächter Form vorhanden, da in diesem Fall eine geradlinige Anordnung nicht notwendig ist. Eine räumlich getrennte Aufstellung von Elektromotor und Verbrennungsmotor bzw. Brennstoffzelle ist hier problemlos möglich.

Als Nachteil ist zu nennen, dass derartige Propelleranordnungen zu einem Propellerstrahl führen, welcher auch weit unterhalb der Wasserlinie substantielle Übergeschwindigkeiten aufweist. In flachen Gewässern wie der Oberwarnow ist eine Sedimentaufwirbelung nicht auszuschließen; ökologisch nachteilige Auswirkungen können die Folge sein.

#### 5.3 Propulsion durch Oberflächenpropeller

Oberflächenpropeller sind Propeller, die dicht unter der Oberfläche angeordnet sind bzw. deren Blätter die Wasserlinie schneiden. Der Teiltauchungsparameter  $h_P/D_P$ , d. h. das Verhältnis aus dem Abstand zwischen Wellenmitte und Wasseroberfläche  $h_P$  und dem Propellerdurchmesser  $D_P$ , gibt Auskunft über die Lage des Propellers.

- $h_P/D_P = 0$ : halbausgetauchter Propeller<sup>1</sup>
- $h_P/D_P = 0.5$ : Propellerspitze an der Wasseroberfläche
- $h_P/D_P \ge 1$ : tiefgetauchter Propeller

Im Gegensatz zu tiefgetauchten Propellern treten bei Oberflächenpropellern Belüftungserscheinungen auf. Die Stärke und das Ausmaß der Belüftungserscheinungen ist u. a. abhängig vom Schubbelastungsgrad, den Anströmverhältnissen, der Propellerdrehzahl und dem Propellerdesign sowie der Tauchung des Propellers. Ob bzw. inwiefern der durch die Belüftungserscheinungen zusätzlich in das Gewässer eingetragene Sauerstoff eine ökologisch positiv zu bewertende Wirkung hat, soll in dieser Arbeit nicht betrachtet werden, siehe Abschnitt 2.4.3.

Für die Auslegung derartiger Propeller sind u. a. folgende Punkte zu beachten [60]:

- Bei Marschfahrt keine wesentliche Belüftung der Saugseite
- Möglichst geringe Belüftung bei Manövrierfahrt
- Reduzierung der Spritzwasserbildung
- Minimierung der Schwingungen beim Ein- und Austauchen der Propellerblätter

Untersuchungen, durchgeführt durch die Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam, haben gezeigt, dass ein optimierter Oberflächenpropeller Wirkungsgrade erreichen kann, die nur

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Wellenmitte in der Wasserlinie

geringfügig unter denen von tiefgetauchten Propellern liegen. Ein Teiltauchungsparameter von  $h_P/D_P \approx 0$  resultierte in besonders hohen Wirkungsgraden; die weiteren, oben genannten Forderungen konnten zufriedenstellend erfüllt werden [60].

Im folgenden wird daher in dieser Arbeit der Begriff Oberflächenpropeller verwendet, um Propeller mit einem Teiltauchungsparameter von  $h_P/D_P \approx 0$  zu beschreiben.

Für einen Kanalquerschnitt, der die typischen Charakteristika der Oberwarnow vereinfacht darstellt, sowie eine Schiffsgeschwindigkeit von 3 m/s ist in Abb. 5.2 die Geschwindigkeitsverteilung des Propellerstrahls dargestellt. Diese Ergebnisse wurden durch die AIR Fertigung-Technologie GmbH, Hohen Luckow bei Rostock, mit Hilfe von CFD-Verfahren gewonnen. Der Propeller wurde hierbei durch eine kreisförmige Druckscheibe simuliert; die Interaktion zwischen Rümpfen und Propeller wurden als vernachlässigbar gering angesehen und daher nicht berücksichtigt. Ausgehend von der in Kapitel 3.7 durchgeführten Widerstandsabschätzung wurde hierzu der durch den Propeller aufzubringende Impuls bestimmt. Aus der erforderlichen Leistungsumsetzung bei einer Geschwindigkeit von 3 m/s wurde die Übergeschwindigkeit im Propellerstrahl bestimmt.

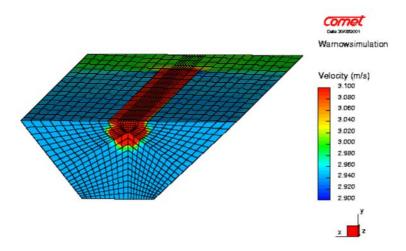


Abb. 5.2: Geschwindigkeitsverteilung für stationäre Rechnung 3-D Ansicht

Es ist zu erkennen, dass der Propellerstrahl von Oberflächenpropellern gemäß der genannten Definition geringe Ausmaße hat. Die Auswirkungen des Propellerstrahls sind auf die Oberflächenregion beschränkt. Eine Beeinflussung des Flussgrundes sowie die Gefahr von Sedimentaufwirbelung in flachen Gewässern besteht nicht.

Vergleichbar mit dem Radeffekt von tiefgetauchten Propellern bei Rückwärtsfahrt ist auf Grund des teilgetauchten Betriebs bei Vor- und Rückwärtsfahrt eine Querkraft zu beobachten. Werden zwei querab zueinander angeordnete Oberflächenpropeller<sup>2</sup> installiert,
deren Querkraft und Schub über Propellerdrehzahl und Steigung geregelt werden können,
so kann auf eine separate Ruderanlage verzichtet werden. Hierdurch ist eine Verringerung

 $<sup>^2</sup>$ Diese Konfiguration ist beim WaKat nicht einsetzbar, da hierfür die verfügbare Breite zwischen den Rümpfen nicht ausreichend ist bzw. der Abstand zwischen Propulsionsgondeln und Rümpfen zu klein werden würde. Unerwünschte Interaktionseffekte wären die Folge.

der benetzten Oberfläche möglich; der Gesamtwiderstand wird verringert [60].

Die aufgeführten Eigenschaften von Oberflächenpropellern sind allgemein gültig. Im folgenden wird auf die oben genannten und in Abb. 5.1 dargestellten Lösungen 2a bis 2c näher eingegangen.

2a) Eine achtern angeordnete, schwenkbare Gondel Dies stellt eine einfache Lösung dar, den Antrieb eines Fahrzeugs mit Hilfe von Oberflächenpropellern zu erreichen. Der Oberflächenpropeller erzeugt den für den Vortrieb notwendigen Schub. Durch Schwenken der Antriebsanlage werden Manöver gefahren.

Als negativ ist zu vermerken, dass die bei Oberflächenpropellern vorhandene Querkraft ein hydrodynamisch ungünstiges seitliches Driften des Fahrzeugs zur Folge hat.

2b) Je eine im Vorschiff und achtern, mittschiffs angeordnete Gondel. Beide Gondeln schwenkbar Diese Konfiguration eignet sich insbesondere für räumlich stark beschränkte Gewässer, auf denen für einen sicheren Betrieb eine hohe Manövrierfähigkeit notwendig ist. Durch das Schwenken der beiden Antriebsgondeln sind schnelle Kursänderungen möglich; ein "Drehen auf dem Teller" ist möglich.

Der achtern angeordnete Propeller befindet sich im Propellerstrahl des im Vorschiff angeordneten Propulsionsorgans. Die Folge ist eine Wirkungsgradverringerung. Durch eine geeignete Auslegung, d. h. wird der achtere Propeller daraufhin optimiert, im Propellerstrahl des zweiten Propellers zu arbeiten, ist es möglich, diese nachteiligen Wirkungen gering zu halten.

2c) Eine achtern angeordnete, nicht schwenkbare Gondel. Das Fahrzeug wird über ein oder mehrere Ruder gesteuert Dies stellt eine sehr einfache Lösung dar. Die Antriebsgondel wird achtern mittschiffs fest in der Decksstruktur verankert. Ein konstruktiv aufwendiger Schwenkmechanismus ist nicht notwendig.

Allerdings ist, insbesondere bei geringen Geschwindigkeiten, eine vergleichsweise schlechte Manövrierfähigkeit zu verzeichnen. Dies ist insbesondere auf der Oberwarnow als problematisch anzusehen.

#### 5.4 Bewertung der Propulsionskonzepte

In Tab. 5.1 ist zusammenfassend eine Bewertung der vorgestellten Lösungen aufgeführt.

Aspekt / Variante	1	<b>2</b> a	<b>2</b> b	<b>2</b> c
Wirkungsgrad	++	+	О	+
Manövrierfähigkeit	+	+	++	-
$\mathbf{Aufwand}^3$	+	О	-	+
Sedimentaufwirbelung	О	+	+	+

Tab. 5.1: Bewertung der Propulsionsvarianten

1) tiefgetauchter Propeller; 2a) eine achtern angeordnete, schwenkbare Gondel; 2b) Je eine schwenkbare Gondel vorne und achtern; 2c) eine achtern angeordnete Gondel mit separater Ruderanlage

Die Verwendung konventioneller, tiefgetauchter Propeller bietet einen guten Wirkungsgrad. Allerdings kann, wie in Abschnitt 2.4.3 erläutert, eine unerwünschte Form des Propellerstrahls die Folge sein.

Lösung 2c ist auf Grund der schlechten Manövriereigenschaften nur bedingt für den Einsatz auf der Oberwarnow geeignet. Die Verwendung von schwenkbaren Oberflächenpropellern führt zu guten Manövriereigenschaften und schließt eine Beeinflussung des Flussgrundes durch den Propellerstrahl aus. Insofern sind die Lösungen 2a sowie 2b für den WaKat näher zu untersuchen. Für Lösung 2b, d. h. für die Installation von zwei schwenkbaren Antriebsgondeln, spricht das sehr gute Manövrierverhalten sowie eine Verteilung des Schubs auf zwei Propeller mit einem dementsprecht geringeren Schubbelastungsgrad.

Als mögliche Propulsionskonzepte kommen daher Lösung 1 und Lösung 2a und 2b in Betracht. Da keine detaillierten Angaben über die Auswirkungen des Propellerstrahls tiefgetauchter Propeller auf das Sediment zur Verfügung stehen, kann keine definitive Entscheidung für ein bestimmtes Konzept getroffen werden. Hierzu bedarf es weiterer umfassender Untersuchungen.

<sup>-:</sup> schlecht, o: akzeptabel, +: gut, ++: sehr gut

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>Der für die Umsetzung der jeweiligen Lösung notwendige konstruktive Aufwand wie auch die hierfür zu lösenden technischen Probleme sind unter dem Aspekt Aufwand zusammengefasst. "Schlecht" bedeutet in diesem Fall, dass eine Umsetzung des Konzeptes vergleichsweise schwierig zu erreichen ist. Mit "Gut" werden Konzepte bewertet, die einfach zu realisieren sind.

#### Teil 6

## Das Fahrzeug WaKat

Ausgehend von den in Teil 2 ausführlich beschriebenen Rahmenbedingungen sind in Teil 3 (Schiffbau / Entwurf), Teil 4 (Antrieb und Energiebereitstellung) und Teil 5 (Propulsion) Varianten beschrieben. Es sind Vor- und Nachteile der dargestellten Lösungen genannt. Eine zusammenfassende Bewertung gibt jeweils Aufschluss darüber, welche Lösungen sich für den Einsatz auf dem WaKat eignen.

Dieser Teil fasst die Aussagen der vorhergehenden Teile zusammen. Das Fahrzeug WaKat wird vorgestellt.

Bei der Auswahl der geeigneten Lösungen liegt auf Grund des Einsatzes auf ökologisch sehr sensiblen Gewässern<sup>1</sup> ein Augenmerk auf umweltfreundlichen nachhaltigen Technologien. Alternativen werden benannt für den Fall, dass aus wirtschaftlichen Gründen etc. der Einsatz dieser Lösungen nicht möglich ist.

#### 6.1 Schiffbau / Entwurf

Die Auslegung als Swath-Fahrzeug resultiert in einem geringen Gesamtwiderstand, einer sehr geringen Wellenbildung sowie einer geringen Querschnittsversperrung. Eine ungünstige Ausprägung des Nachstromfelds, und damit eine Sedimentaufwirbelung, sind weitestgehend ausgeschlossen. Signifikante Erosionserscheinungen im Uferbereich sind nur bei substantieller Wellenbildung realistisch und daher bei Einsatz eines Swath-Fahrzeugs nicht bzw. nur in sehr geringen Maße zu erwarten.

Der Tiefgang des WaKat ist auf maximal 1.8 Meter beschränkt. Basierend auf einer maximal möglichen Breite von 5.50 Metern sowie der für eine Kapazität von 60 Passagieren notwendigen Fläche² wurde eine Deckslänge von ca. 16.25 Metern bestimmt. Diese Fläche steht den Passagieren zur Verfügung; Kombüse, Steuerstand und sanitäre Einrichtungen sind ebenfalls dort installiert. Die technische Ausrüstung wird, soweit möglich, in den Auftriebskörpern und Stützen installiert.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Für eine Darstellung der Umweltrelevanz siehe Kap. 2.4

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Eine mögliche Raumeinteilung ist in Abb. 3.9 dargestellt.

Die durch eine Massenabschätzung, siehe Abschnitt 3.3.4, bestimmte Verdrängung von ca.  $16m^3$  wird durch zwei sehr schlanke, zylinderförmige Auftriebskörper sowie die beiden Stützen aufgebracht. Die hierfür relevanten Parameter sind für eine exemplarische Rumpfgeometrie in Tab. 6.1 aufgeführt.

	Länge	D / B	$c_B$
Auftriebskörper	15 m	1	0.48
Stützen	12 m	0.3	0.4

Tab. 6.1: Abmessungen der Auftriebskörper und Stützen D/B: Durchmesser der Auftriebskörper bzw. Breite der Stützen in der Wasserlinie

Die sehr geringe Breite der Stützen wurde aus Gründen der Widerstandsminimierung gewählt. Hierdurch ist allerdings der Zugang zu den Auftriebskörpern stark eingeschränkt, so dass umfangreiche Wartungsarbeiten etc. nur direkt durch Wartungsöffnungen in den Auftriebskörpern möglich sind. Dies erfordert, das Schiff aus dem Wasser zu nehmen; die dauerhafte Dichtigkeit der Wartungsöffnung ist sicherzustellen.

Es ist zu klären, ob diese Konfiguration eine ausreichende Stabilität aufweist. Ansonsten bzw. wenn ein Zugang durch die Stützen gefordert wird, sind, wie in Kap. 3.6 beschrieben, Formänderungen erforderlich.

#### 6.2 Antrieb und Energiebereitstellung

Aus Gründen der ökologischen Verträglichkeit, des nachhaltigen Wirtschaftens sowie unter Komfortaspekten kommt eine Brennstoffzelle zur Energieumwandlung zum Einsatz. Geringe Betriebsgeräusche sowie minimale Schadstoffemissionen sind besondere Vorteile dieser Lösung. Die Speicherung des Wasserstoffs erfolgt in Hochdruckspeichern. Eine ausgereifte und umfassende Sicherheitseinrichtung gewährleistet eine weitgehende Sicherheit.

Ist aus ökonomischen Gründen der Einsatz von kostspieliger Brennstoffzellentechnologie nicht möglich, so kann als Alternative der Einsatz eines erdgasbetriebenen Verbrennungsmotors angedacht werden. Da hierfür bewährte Technik zur Verfügung steht, die z. T. in Massenfertigung produziert wird, ist eine deutliche Kostenreduktion, wenn auch zu Lasten des umweltfreundlichen Betriebs, möglich. Eine umfassende Umweltverträglichkeitsprüfung hat festzustellen, ob diese Antriebsvariante für den längerfristigen Einsatz auf der Oberwarnow geeignet ist.

#### 6.3 Propulsion

Als Propulsionsorgane können entweder tiefgetauchte Propeller oder Oberflächenpropeller zum Einsatz kommen. Es kann bei derzeitigem Kenntnisstand nicht eindeutig entschieden

werden, welche Variante eingesetzt werden sollte. Daher sind weitere Untersuchungen durchzuführen, um zu klären, welche Lösung für den angedachten Einsatzzweck optimal ist.

So ist insbesondere für tiefgetauchte Propeller die Form des Propellerstrahls und dessen Auswirkungen auf den Flussgrund zu bestimmen. Oberflächenpropeller, die bei schwenkbarer Ausführung eine gute Manövrierfähigkeit bewirken, sind auf den Wirkungsgrad, ihre Schwingungscharakteristik sowie die Betriebsgeräusche zu untersuchen.

### Teil 7

### **Fazit**

In dieser Arbeit ist ein Konzept für ein Niedrigenergie-Passagierschiff beschrieben. Dieses eignet sich für den Einsatz auf ökologisch sehr sensiblen Gewässern wie z. B. der Oberwarnow. Dabei ist der Warnowkatamaran, kurz WaKat, darauf ausgelegt, den Passagieren ein Naturerlebnis besonderer Art zu bieten, ohne hierbei tiefgreifende Änderungen des Naturhaushalts hervorzurufen.

Basierend auf einer weitreichenden Analyse und Beschreibung der Einsatz- und Betriebsbedingungen wurden die sich hieraus ergebenden Konsequenzen für die Rumpfgestaltung, die Energiespeicherung und -umwandlung sowie die Propulsion erarbeitet. Es ist zu erkennen, dass nicht in jedem Fall eine optimale Lösung zu finden ist. Eine Abwägung der zu klärenden Probleme wurde durchgeführt; Kompromisse wurden vorgestellt, diskutiert und die am besten geeignete Lösung benannt. Es wurde gezeigt, dass durch den Einsatz von verfügbaren, innovativen und umwelteffizienten Technologien ein Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung erbracht werden kann, ohne die Lebensqualität einzuschränken.

Ausgehend von in dieser Arbeit benannten Lösungskonzepten sind auf dem Weg zur Verwirklichung des WaKat weitere umfassende Untersuchungen erforderlich. So sind insbesondere die Auswirkungen auf die Umwelt, die Rumpfform sowie die technische Realisierung der Antriebsanlage zu klären. Die Propulsion ist näher zu untersuchen und eine geeignete Lösung zu wählen.

74 TEIL 7. FAZIT

### Literaturverzeichnis

- [1] Statistisches Landesamt Schleswig-Holstein. http://www.statistik-sh.de/. Angaben aus dem Jahre 1998.
- [2] Statistisches Landesamt Mecklenburg-Vorpommern. Statistisches Jahrbuch Mecklenburg-Vorpommern 2001. 2001.
- [3] Dr. Wolfgang Methling. Tourismus und Naturschutz. Ostseeforum der Herder-Gesellschaft, August 2000. Rede.
- [4] SUT Governance. Country Framework Assessment Report. http://sut.itas.fzk.de/, 2001. Part A: National Profiles And Comparative Synopsis.
- [5] Industrie und Handelskammer Rostock. http://www.rostock.ihk.de/. Gespräch im September 2001.
- [6] Werner Schäfer. Entwurf eines Fahrgastschiffes für den Vierwaldstättersee. Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft, 1995.
- [7] D. Gildenhaar. Erster Weltkrieg beendete Blütezeit der Seebäder-Schifffahrt. Nordkurier: Unabhängige Tageszeitung für Mecklenburg-Vorpommern, 1999.
- [8] H. G. Zibell, H. Lochte-Holtgreven, and C. Masilge. Entwicklung eines Low-Wash-Katamarans für den Einsatz auf Binnenwasserstraßen. *Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft*, 1998.
- [9] Ingbert Gans et al. Ökologische Untersuchungen im Warnow-Einzugsgebiet II. Landesamt für Umwelt und Natur Mecklenburg-Vorpommern, 1994.
- [10] Staatliches Amt für Umwelt und Natur Rostock. http://www.mv-regierung.de/staeun/rostock/. (Stand: September 2001).
- [11] Bernd Ballschmiter. Durchflussmessungen in Fließgewässern, Viskositätsmessungen. http://www.agr.uni-rostock.de/siedlung/ballschmiter/AMBauto.html. (Stand: September 2001).
- [12] Umweltplan GmbH Stralsund. Widerbelebung der Personenschifffahrt auf der Oberwarnow Umwelterheblichkeitsuntersuchung, 2001. Untersuchung durchgeführt im Auftrag der Stadt Schwaan.

- [13] W. Palz and J. Greif. European Solar Radiation Atlas. Springer Verlag, 3rd edition, 1996.
- [14] Fachhochschule Lübeck. Labor für Solartechnik. http://www.fh-luebeck.de/an/pt/solar/wstats/soldat.htm. (Stand: Oktober 2001).
- [15] Wetter Online. Meteorologische Dienstleistungen GmbH, Bonn. http://www.wetter-online.de/. (Stand: November 2001).
- [16] Seehydrographischer Dienst der Deutschen Demokratischen Republik. Atlas zur Ermittlung der Wellenhöhen in der südlichen Ostsee. 1979.
- [17] Martin Jänicke, Philip Kunig, and Michael Stizel. *Umweltpolitik*. Bundeszentrale für politische Bildung, 2000.
- [18] Bristl-Myers. Squibb 2001 sustainability report. http://www.bms.com/static/ehs/langua/data/deuts2.html, 2001.
- [19] Klimarahmenkonvention 1992. http://www.learn-line.nrw.de/angebote/agenda21/thema/cop6.htm. (Stand: Dezember 2001).
- [20] Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Klimaschutz Die größte umweltpolitische Herausforderung der Menscheit. (Stand: November 2001).
- [21] Rostocker Agenda 21. http://www.rostock.de/stadtverwaltung/STADT/ag21.asp. (Stand: November 2001).
- [22] Ministerium für Umwelt Naturschutz und Reaktorsicherheit. Die Lokale Agenda 21 in Deutschland Förderung einer nachhatligen Entwicklung in den Kommunen. 2001.
- [23] UK Marine Special Areas of Conservation. Ports and Harbours. http://www.ukmarinesac.org.uk/ports-and-harbours.htm, 1999. (Stand: November 2001).
- [24] M. Wackernagel and W. Rees. *Unser ökologischer Fußabdruck*. Birkhäuser Verlag, 1997.
- [25] Edward Tenner. Die Tücken der Technik. Fischer Taschenbuch Verlag, 1999.
- [26] B. Kleinwellfonder. Der Risikodiskurs. Westdeutscher Verlag, 1996.
- [27] M. Paar, I. Oberleitner, and H. Kutzenberger. Fachliche Grundlagen zur Umsetzung der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie - Zusammenfassung. http://www.ubavie.gv.at/publikationen/reports/R146z.htm, 1998.
- [28] Der Rat der Europäischen Gemeinschaft. Richtlinie R 92/43/EWG. http://europa.eu.int/comm/environment/nature/habdirde.htm, 1992.

- [29] Germanischer Lloyd. Klassifikationvorschriften. http://www.germanlloyd.org/. Teil 0, Abschnitt 2, Kapitel 3.1.1.1, (Oktober 2001).
- [30] Kommision der Europäischen Gemeinschaften. KOM(2000) 142 endgültig, 2000. Abschlußbericht.
- [31] Der DWV Wasserstoff Projektführer. Hydra Ein Brennstoffzellen-Passagierschiff. http://www.h2guide.de/projekte/pfs21.html, 2000.
- [32] Solar Water World AG. La Becassine Solar statt Diesel. http://www.solarwaterworld.de/projekte/becassine/becassine.htm. (Stand: Oktober 2001).
- [33] T. Meyer. Solarboote Mit der Sonne in einem Boot. http://www.solarschiff.de/gesch/start.htm, 2001. (Stand: Oktober 2001).
- [34] Swath International Ltd. http://www.swath.com/. (Stand: Juni 2001).
- [35] M. Schacht. Michael Schacht's Proa-File. http://www.schachtdesign.com/proafile/. (Stand: Mai 2001).
- [36] Institut für Schiffbau; Technische Universität Hamburg. Die Odysseus Schiffsdatenbank. http://odysseus.fds.tu-harburg.de. (Stand: September 2001).
- [37] H. Lochte-Holtgreven, S. List, and T. Jiang. Widerstandsprogrnose für Schiffe auf flachem Wasser. Technical report, Europäisches Entwicklungszentrum für Binnen- und Küstenschiffahrt, 2001. BMBF Vorhaben 18 S 0151 7, Bericht 1532.
- [38] V. Bertram. Wellenwiderstandsberechnung für SWATH-Schiffe und Katamarane. Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft, 1992.
- [39] MacGregor et al. Propulsion of small waterplane area twin hull ships. In 6th International Maritime and Shipping Conference, 1991.
- [40] L. H. Seidl, L. J. Wilkie, and S. C. H. Loui. Application of Swath/Fps concept to a passenger excursion vessel design. 1980.
- [41] MTG Marinetechnik GmbH. Grundlagen der Konstruktion für Swath-Schiffe. 1996. Abschlussbericht zum F+E-Vorhaben: Schnelle und unkonventionelle Schiffe.
- [42] A. Kracht. Nickmomentenfreie Swath-Formen. Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft, 1994.
- [43] G. Holbach. Zum Entwurf von Flossensystemen für Swath-Schiffe. PhD thesis, Technische Universität Berlin, 1993.
- [44] Lockheed Martin Naval Electronics and Marine Systems Surveillance Systems. Hullform technology. http://ness.external.lmco.com/nessb/hullform/challenge.htm. (Stand: Juni 2001).

- [45] E. V. Lewis, editor. *Principles of Naval Architecture*. The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1988.
- [46] V. Bertram. Advances in Ship and Offshore Hydrodynamics, Februar 1996. Technische Universität Hamburg-Harburg, Arbeitsbereiche Schiffbau.
- [47] K. Kordesch and G. Simader. Fuel Cells and Their Applications. VCH Verlagsgesellschaft, 1996.
- [48] S. Geitmann. Wasserstoff als Kraftstoff für Fahrzeugantriebe. http://www.planet-interkom.de/home/sven.geitmann/Studienarbeit-Wasserstoff.htm, 1999.
- [49] S. Geitmann. Wasserstoff-Technik Anhang. http://www.plan-interkom.de/home/sven.geitmann/Wasserstoff-Anhang.htm, 1999.
- [50] S. Kubisch, H. Pommer, and G. Sattler. Brennstoffzellenanlangen an Bord einschließlich Speicheurng in Metallhydrid. Jarhbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft, 1994.
- [51] C. Kreuz. Ralisierbarkeitsuntersuchung zur Speicherung von Flüssigwasserstoff auf Unterwasserfahrzeugen. In Studentensprechtag der Schiffbautechnischen Gesellschaft, 2001.
- [52] Union zur Förderung von Oel-und Proteinpflanzen e. V. http://www.ufop.de/. (Stand: Dezember 2001).
- [53] National Biodiesel Board. http://www.biodiesel.org/. (Stand: Dezember 2001).
- [54] H. A. Kiehne et al. Batterien. expert verlag, 2000.
- [55] Prof. Beckmann. Wasserstoff-Verbrennung. Vortrag im Rahmen eines Workshops der ATI Küste GmbH, Okt. 2001.
- [56] K. Straßer. PEM-Entwicklungsstand und Anwendungspotential. Jarhbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft, 1994.
- [57] C. Böhm. Direktmethanol-Brennstoffzelle. In *Taetigkeitsbericht 1999*. Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung, 1999.
- [58] F. Josten. Entwurf eines photovoltaisch angetriebenen Fahrgastschiffes für sonnenreiche Gebiete. Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft, 1995.
- [59] F. Josten. Simulation photovoltaisch angetriebener Schiffe unter Einfluß stochastischer Parameter, Dezember 1999. Technische Universität Hamburg-Harburg, Arbeitsbereiche Schiffbau, Bericht Nr. 603.
- [60] Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam GmbH. Propulsions- und Steuersystem Oberflächenpropeller für Schubboote. Technical report, 1999. Schlussbericht zum gleichnamigen FuE-Vorhaben.

- [61] H.G. Zibell, W. Grollius, and B. Baumgarten. Fast vessels on inland waterways. Technical report, Versuchsanstalt für Binnenschiffbau e. V., Duisburg, 1999. VBD-Bericht 283.
- [62] H. Nowacki, G. Holbach, A. Papanikolaou, and G. Zaraphonitis. Konzept und hydrodynamischer Entwurf einer schnellen SWATH-Fähre für das Mittelmeergebiet. *Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft*, 1990.
- [63] H. Kopka. Latex Einführung, Band 1. Addison-Wesley, 1996.
- [64] CTAN The comprehensive tex archive network. http://www.ctan.org/.

# Anhang A

# Klima

### A.1 Die Beaufort-Skala

Beaufort	m/s	$\mathrm{km/h}$
0	0 - 0.2	0 - 1
1	0.3 - 1.5	1 -5
2	1.6 - 3.3	6 - 11
3	3.4 - 5.4	12 - 19
4	5.5 - 7.9	20 - 28
5	8.0 - 10.7	29 - 38
6	10.8 - 13.8	39 - 49
7	13,9 - 17.1	50 - 61
8	17.2 - 20.7	62 - 74
9	20.8 - 24.4	75 - 88
10	24.5 - 28.4	89 - 102
11	28.5 - 32.6	103 - 117
12	32.7 -	118 -

Tab. A.1: Umrechnung zwischen Beaufort, m/s und km/h

# Anhang B

# Die Warnow



Abb. B.1: Die Oberwarnow bei Schwaan, Blick nach Süden

Aufnahme: November 2001



Abb. B.2: Die Oberwarnow südlich von Rostock  $_{\rm Aufnahme:\ Sommer\ 1997}$ 



Abb. B.3: Die Schleuse Rostock-Mühlendamm  $_{\rm Aufnahme:\ November\ 2001}$ 

# Anhang C

# Vergleichsschiffe



Abb. C.1: Wasserstoffbetriebenes Fahrzeug "Hydra" [31]



Abb. C.2: Solarbetriebenes Passagierschiff für 60 bis 80 Passagiere [33]



Abb. C.3: Das Solarschiff "La Becassine" [32]



Abb. C.4: Die Antriebsanlage von "La Becassine" [32]