

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Report, Published Version

Förster, Walter; Gründer, Dieter; Henn, Rupert; List, Sven

Untersuchung der See-, Manövrier- und Leistungsfähigkeit des Semi-Katamarans für den Containertransport im durchgehenden Fluss-See-Verkehr

DST-Bericht

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/107240>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

DST - Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme e.V. (Hg.) (2007):
Untersuchung der See-, Manövrier- und Leistungsfähigkeit des Semi-Katamarans für den
Containertransport im durchgehenden Fluss-See-Verkehr. Duisburg: DST -
Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme e.V. (DST-Bericht, 1860).

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.

Verwertungsrechte: Alle Rechte vorbehalten

DST, Duisburg
Name der Forschungsstelle(n)

14033 N / 4
AiF-Vorhaben-Nr. / GAG

01.07.2004 - 31.12.2006
Bewilligungszeitraum

Schlussbericht für den Zeitraum : 01.07.2004 - 31.12.2006

zu dem aus Haushaltsmitteln des BMWA über die



geförderten IGF-Forschungsvorhaben

- Normalverfahren
 Fördervariante ZUTECH

Forschungsthema :

Untersuchung der See-, Manövrier- und Leistungsfähigkeit des Semi-Katamarans für den Containertransport im durchgehenden Fluss-See-Verkehr

Für ein ZUTECH-Vorhaben sind folgende zusätzliche Angaben zu machen:

Der fortgeschriebene Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

- ist beigelegt
 liegt bereits vor
 wird fristgerecht nachgereicht

Duisburg, den 27.04.2007

Ort, Datum

Unterschrift der/des Projektleiter(s)



Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme e.V.
DST - Development Centre for Ship Technology and Transport Systems

**Untersuchung der See-, Manövrier- und Leistungsfähigkeit des
Semi-Katamarans
für den Containertransport im durchgehenden Fluss-See-Verkehr**

Bericht 1860 – April 2007

von
Dipl.-Ing. Walter Förster
Dipl.-Oec. Dieter Gründer
Dipl.-Ing. Rupert Henn
Dipl.-Ing. Sven List

Projektleiter:
Dr.-Ing. Tao Jiang

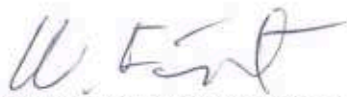
Direktor:
Prof. Dr. Paul Engelkamp

Untersuchung der See-, Manövrier- und Leistungsfähigkeit des Semi-Katamarans für den Containertransport im durchgehenden Fluss-See-Verkehr

Duisburg, im April 2007

Fachbereiche Schiffshydrodynamik und Verkehrswesen


Bearbeiter:




.....
(Dipl.-Ing. Walter Förster)



.....
(Dipl.-Oec. Dieter Gründer)




.....
(Dipl.-Ing. Rupert Henn)




.....
(Dipl.-Ing. Sven List)

Projektleiter:



.....
(Dr.-Ing. T. Jiang)

DST - Entwicklungszentrum für
Schiffstechnik und Transportsysteme e.V.



.....
(Prof. Dr. P. Engelkamp)

Kurzfassung

Zur Reduzierung der Umschlagzeiten wurde ein neuer Schiffstyp „Semikatamaran-See“ für den durchgehenden Verkehr zwischen Duisburg und England entwickelt.

In vorangegangenen Untersuchungen hat sich der unkonventionelle Schiffstyp „Semikatamaran“ als viel versprechendes Transportmittel auf Wasserstraßen mit niedrigen Wasserständen gezeigt. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde deshalb untersucht, inwieweit sich ein Semikatamaran als Transportmittel für den durchgehenden Binnen-See-Verkehr eignet.

Der Semikatamaran-See wurde sowohl in technischer als auch in wirtschaftlicher Hinsicht mit einem konventionellen Küstenmotorschiff bzw. seegehenden Binnenschiff verglichen. Es war das Ziel der Entwicklung, ein Schiff mit gleicher Tragfähigkeit und Seetauglichkeit wie ein konventionelles Fluss-See-Schiff zu entwickeln.

Die schiffstechnischen Untersuchungen umfassten das Propulsionsverhalten im Glattwasser und im Seegang, die Manövriereigenschaften und das Seeverhalten.

Die Untersuchung der Propulsionseigenschaften dieses neuen Schiffstyps wurde sowohl mit numerischen (CFD) als auch experimentellen (EFD) Methoden durchgeführt. Zur Untersuchung der Propulsionseigenschaften wurden verschiedene Hinterschiffsformen zuerst mit dem RANSE-Löser (ANSYS-CFX5) und anschließend im Modellversuch untersucht. Die Strömung am Modell wurde mittels Stromfäden visualisiert und mit einer Hochgeschwindigkeitskamera gefilmt. Insgesamt wurden 6 Formvarianten untersucht.

Durch die Verringerung der Breite gegenüber dem Binnen-Semikatamaran auf 13 m wurde ein gutes Seeverhalten erreicht. Die Untersuchung des Seeverhaltens erfolgte mit einem neu entwickelten potentialtheoretischen numerischen Verfahren und im Modellversuch. Im Rahmen des Projektes wurde ein Steuercontroller entwickelt, mit dessen Hilfe Wellen eines beliebigen Seegangsspektrums erzeugt werden können. Zur Beobachtung der Hinterschiffsströmung bei Fahrt in Wellen dienten ebenfalls Unterwasseraufnahmen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera.

Im Modellversuch konnte die Manövrierfähigkeit nach der Erfordernissen der Rheinschiffsuntersuchungsordnung nachgewiesen werden.

Die umfangreichen Untersuchungen der Hinterschiffsumströmung haben gezeigt, dass die numerischen Berechnungen eine zuverlässige Prognose des Strömungsbilds liefern. Darüber hinaus können die Erkenntnisse über die Formgebung des Hinterschiffs, die im Rahmen dieses Projekts gewonnen wurden, auch für den Entwurf konventioneller Binnenschiffe verwendet werden. Durch eine veränderte Gestaltung der Tunnel kann beispielsweise bei konventionellen Hinterschiffsformen die Gefahr des Lufteinbruchs verringert und eine bessere Zuströmung zum Propeller bei niedrigen Wasserständen erzielt werden.

Auf Basis der in den Versuchen ermittelten Leistungsdaten wurde dann die Wirtschaftlichkeitsanalyse durchgeführt. Die Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für eine Beladung bis zu einem Tiefgang von drei Metern zeigten, dass kein Vorteil des Semikatamarans bei den untersuchten Relationen und Parameter-Konstellationen gegenüber dem konventionellen Vergleichsschiff zu finden ist. Im Vergleich zum konventionellen Schiff hat der Semikatamaran eine größere benetzte Oberfläche und damit einen erhöhten Reibungswiderstand. Entsprechend fallen auch die Betriebskosten höher aus. Hinzu kommen die zu erwartenden höheren Baukosten, die sich unter anderem aus der komplizierteren Stahlstruktur ergeben. Der Semikatamaran bietet somit aus der Wirtschaftlichkeitsanalyse für den kombinierten Fluss-See-Verkehr, bei dem ein großer Teil der Fahrtstrecke in relativ tiefem Wasser liegt, keinen wirtschaftlichen Vorteil. Ein Grund hierfür ist die Verringerung der Breite, die für die Erfüllung der Seefähigkeit erforderlich war. Weiterhin lassen sich Probleme, die die Vorschiffsform bei Fahrt gegen die Wellen hervorruft, ohne grundlegende Änderung des Semikatamaran-Konzepts nicht abstellen.

Neben der systematischen Untersuchung des See-, Manövrier- und Leistungsfähigkeit des Semi-Katamarans wurden auch geeignete Verfahren entwickelt bzw. angewandt, insbesondere die numerische Berechnung der Hinterschiffsumströmung in Kombination mit Unterwasser-Hochgeschwindigkeitsaufnahmen zur Visualisierung der Strömung. Die Unterwasservideografie hat ihren Nutzen auch bei der experimentellen Untersuchung des Seeverhaltens gezeigt.

Darüber hinaus lassen die im Rahmen des Forschungsvorhabens erzielten Ergebnisse erkennen, dass ein seegehendes Binnenschiff im Durchgangsverkehr generell wie folgt konzipiert werden soll, nämlich im Vorschiff ein klassischer Einrumpfbug zur Gewährung der Seefähigkeit und im Hinterschiff eine moderne Hinterschiffsform zur Gewährung einer günstigen Zuströmung zum Propeller. Bei der Entwicklung einer solchen angepassten Hinterschiffsform müssten allerdings die Wirbelablösungen am Hinterschiff detailliert untersucht werden.

Das Ziel des Forschungsvorhabens, einen Entwurf für einen seegängigen Semikatamaran bereitzustellen und diese in allen technischen und wirtschaftlichen Aspekten zu untersuchen, wurde erreicht. Die Vorteile des Semikatamaran-See gegenüber vergleichbaren konventionellen Schiffen zeigen sich allerdings nur unter speziellen Einsatzbedingungen, nämlich bei durchgehendem Verkehr mit längeren Fahrstrecken mit sehr flachem Wasser.

Inhalt

1	Einführung	7
2	Schiffstechnische Untersuchungen	8
2.1	Formgebung	8
2.1.1	Variante 1	9
2.1.2	Variante 2	10
2.1.3	Variante 3	12
2.1.4	Variante 4	14
2.1.5	Variante 5	15
2.1.6	Variante 6	15
2.2	Modellbau	16
2.3	Untersuchung der Propulsionseigenschaften	17
2.3.1	Numerische Untersuchungen	18
2.3.2	Modellversuche	46
2.4	Untersuchungen zur Seefähigkeit	54
2.4.1	Numerische Untersuchung	54
2.4.2	Modellversuche	61
2.5	Untersuchungen zum Manövrieren	65
2.5.1	Stoppmanöver	65
2.5.2	R-Manöver	67
3	Wirtschaftlichkeitsanalyse	71
3.1	Technische Rahmenbedingungen	71
3.1.1	Unterschiede Binnenschiff vs. Fluss-Seeschiff / Seeschiff	71
3.1.2	Kostenaspekte	73
3.1.3	Transportdauer	74
3.1.4	Sicherheit des Transports	76
3.1.5	Zuverlässigkeit des Transports	76
3.1.6	Sonstige Aspekte	77
3.2	Relationsbezogene Rahmenbedingungen – Navigatorische und infrastrukturelle Einflussfaktoren auf dem Rhein	77
3.2.1	Infrastruktur des Rheins	77
3.2.2	Sonstige Randbedingungen für das Befahren des Rheins	92
3.2.3	Navigatorische und infrastrukturelle Einflussfaktoren auf der Nordsee – Bedingungen für den Seeverkehr	93
3.3	Analyse der Kosten- und Zeitstrukturen	95
3.3.1	Vorgehensweise	95
3.3.2	Kenndaten der verglichenen Schiffe	96
3.3.3	Kalkulationsgrundlagen	97
3.3.4	Wichtigste zu variierende Parameter	100
3.3.5	Relationen	101

3.3.6	Berechnungsergebnisse	103
4	Zusammenfassung	105
5	Literatur	107
6	Anhänge	108
6.1	Propeller P259	108
6.2	Freifahrtprogramm des Propellers P259	109
6.3	Düse D342	110
6.4	Ruder R847	111
6.5	Apzipod-Antrieb	112
6.6	Versuchsergebnisse	113
6.7	Berechnete Übertragungsfunktionen	139

1 Einführung

Im innereuropäischen Güterverkehr spielen die Be- und Entladezeiten im Vergleich zu den relativ kurzen Transportstrecken eine große Rolle. Während die Umschläge an den Endhäfen unvermeidbar sind, kommen beim Transport über die Nordsee zwischen Kontinentaleuropa und England oder Skandinavien bis zu zwei weitere Umschlagvorgänge hinzu, nämlich zwischen den Binnenschiffen und dem zwischengliederten seegehenden Schiff. Dies gewinnt besonders an Bedeutung im Hinblick auf den stetig wachsenden Markt der Containerschifffahrt, wo in der Regel höherwertige Güter transportiert werden.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde der neue Schiffstyp „Semikatamaran-See“ für den durchgehenden Verkehr entwickelt. Er basiert auf dem unkonventionellen Schiffstyp „Semikatamaran“, der in vorhergegangenen Untersuchungen am DST Vorteile bei Fahrt im flachen Wasser gegenüber konventionellen Binnenschiffen gezeigt hat; die Rumpfform führt vor allem bei geringem Flottwasser zu besseren Propulsionseigenschaften. Es war das Ziel dieses Projekts die guten Fahreigenschaften des Semikatamarans in Binnengewässern mit einer guten Seegängigkeit zu vereinen.

Der Semikatamaran-See wurde sowohl in technischer als auch in wirtschaftlicher Hinsicht mit einem konventionellen Küstenmotorschiff bzw. seegehenden Binnenschiff verglichen. Die schiffstechnischen Untersuchungen umfassten das Propulsionsverhalten im Glattwasser und im Seegang, die Manövriereigenschaften und das Seeverhalten. Für die Wirtschaftlichkeitsanalyse wurde das im DST vorhandene datenbankbasierte Kalkulationsprogramm um die hier untersuchten Schiffe und Relationen erweitert.

Im Rahmen dieses Projektes wurden neue Untersuchungsverfahren erarbeitet: Für den Wellengenerator wurde ein Steuercontroller entwickelt, mit dessen Hilfe Wellen eines beliebigen Seegangsspektrums erzeugt werden können. Zur Beobachtung der Hinterschiffsströmung wurden Unterwasseraufnahmen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera gemacht, die zusammen mit den numerischen Strömungsuntersuchungen ein tiefes Verständnis des lokalen Strömungsfeldes ermöglichen.

2 Schiffstechnische Untersuchungen

Die schiffstechnischen Untersuchungen umfassten drei Gebiete:

- Propulsionseigenschaften
- Seeverhalten
- Manövrierbarkeit

Diese drei Gebiete wurden mit verschiedenen Methoden untersucht. Die Propulsionsleistung, die eine maßgebende Größe für die Wirtschaftlichkeit darstellt, wurde experimentell ermittelt. Dabei wurde zur Optimierung der Formgebung der RANSE-Löser Ansys-CFX verwendet. Die Seefähigkeit wurde numerisch mit einem potentialtheoretischen Paneelverfahren untersucht. Das dynamische Verhalten und die Propulsionsleistung bei Fahrt gegen Wellen wurden darüber hinaus experimentell untersucht. Die zum Nachweis der Manövrierbarkeit erforderlichen R- und Stopp-Manöver wurden im Modellversuch durchgeführt.

2.1 Formgebung

Der Semi-Katamaran-See orientiert sich in seiner Formgebung an dem binnengehenden Rumpf. Der eintauchende Mittelrumpf wird von zwei Seitenrümpfen begrenzt, die einen rechteckigen Hauptspant mit kleinem Kimmradius haben. Im Vorschiff hat der Mittelrumpf einen Pontonbug, während sich bei den Seitenrümpfen asymmetrische V-Spantformen finden. Der Mittelrumpf selbst hat eine negative V-Spant-Form.

Es wurden sechs Hinterschiffsvarianten experimentell untersucht, die sich z. T. deutlich voneinander unterscheiden und in den folgenden Abschnitten detailliert vorgestellt werden.

Die Hauptabmessungen wurden so gewählt, dass die Tragfähigkeit der eines konventionellen Küstenmotorschiffs bzw. eines seegehenden Binnenschiffs vergleichbar ist. Andere Untersuchungen am DST haben gezeigt, dass eine Breite von 17 m für seegehende Binnenschiffe ein Maximum darstellt. Bei einer gewählten Länge von 110 m wurde bei einer Breite von 13 m die geplante Tragfähigkeit erreicht. Aufgrund des geringen Tiefgangs liegt der Schwerpunkt der Containerladung sehr hoch. Die durch die Breite bestimmte Stabilität muss deshalb ausreichend hoch sein. Auf der anderen Seite darf sich das Schiff bei Leerfahrt auch nicht zu steif verhalten. Im Gegensatz zu Seeschiffen ist es bei den geringen Seitenhöhen von Binnenschiffen nicht möglich Wingtanks zu Steuerung der Schwerpunktlage anzuordnen. Die Seegangsuntersuchungen zeigen, dass die o. g. Forderungen mit der gewählten Breite gut erreicht wurden.

Der so entworfene Semikatamaran-See hat eine Verdrängung von 3245 m³ bei einem Tiefgang von 3 m und 1565 m³ bei einem Tiefgang von 1,5 m. Auf der Decksfläche können in jeder Lage 4 Container nebeneinander und 13 hintereinander stehen,

also insgesamt 52 TEU. Die Anzahl der Containerlagen wird von der zur Verfügung stehenden Durchfahrtshöhe und dem Wasserstand (Abladung) bestimmt. Unter Berücksichtigung der Höhe des Mittelrumpfs kann der Semikatamaran-See im Regelbetrieb 4 Containerlagen fahren.

2.1.1 Variante 1

Die Seitenrumpfe des Hinterschiffs der ersten Variante (Modell-Nr. M1772) haben U-Spannten; der Mittelrumpf hat ein Pontonheck. Das Schiff wird von Azipods angetrieben, die unter dem Heck des Mittelrumpfs befestigt sind. Diese können mit Zug- oder Druckpropellern arbeiten und dienen gleichzeitig zum Manövrieren. Abb. 1 zeigt den Spantenriss und Abb. 2 die Anordnung der Azipodantriebe im Hinterschiff. Eine Detailzeichnung der Azipodantriebe findet sich im Anhang. Die Propeller sind zwischen den Seitenrumpfen gut gegen Luftfeinbruch von der Seite geschützt und liegen direkt im Zustrom des Wassers hinter dem erhöhten Mittelrumpf bei Fahrt im flachen Wasser. Nachteilig ist bei dieser Anordnung, dass sie sehr eng nebeneinander stehen und sich dadurch beim Manövrieren negativ beeinflussen.

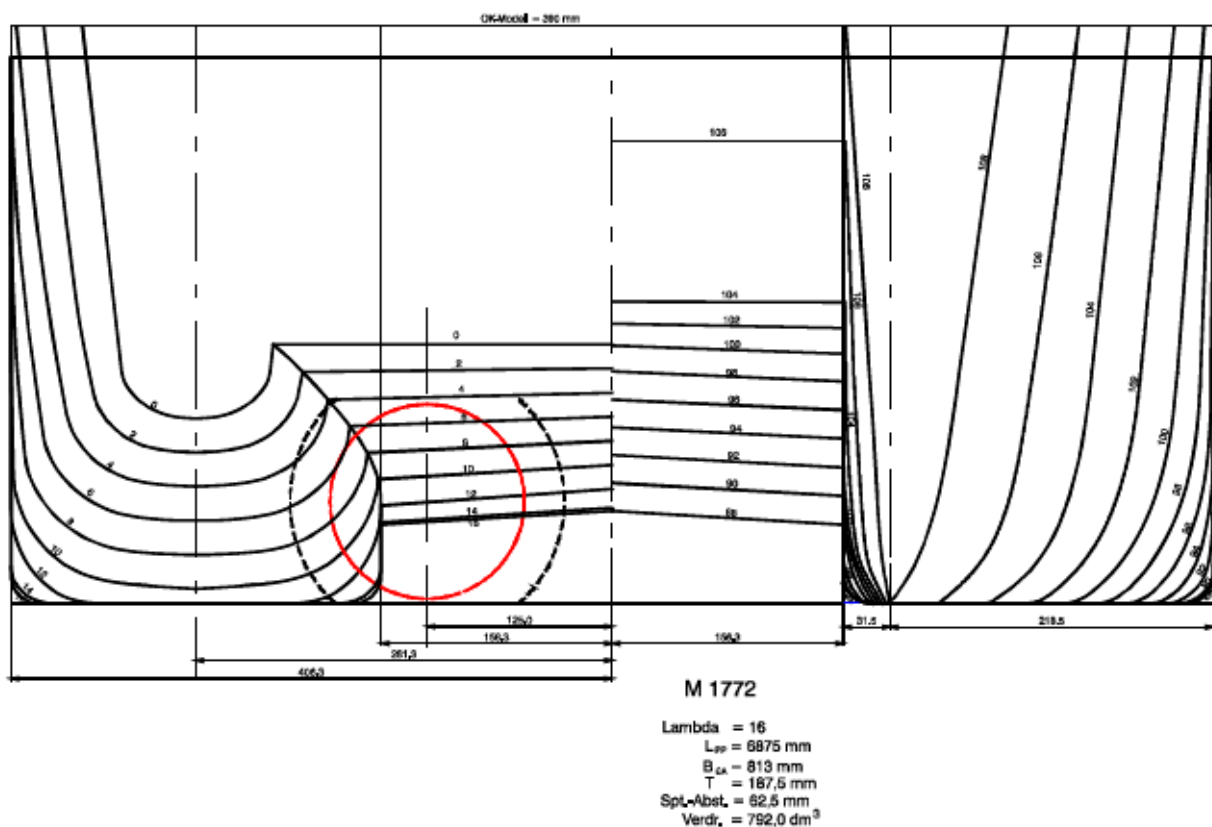


Abb. 1 Spantenriss der Variante 1

Das Propulsionsverhalten wurde sowohl mit Zugpropellern (Propeller vor dem Azipod) als auch mit Druckpropellern (Propeller hinter dem Azipod) untersucht. Die Azipodantriebe waren im Modell drehbar montiert und wurden bei den Manövrierversu-

chen mit einer Rudermaschine angesteuert. Abb. 3 zeigt die Heckansicht des gebauten Modells.

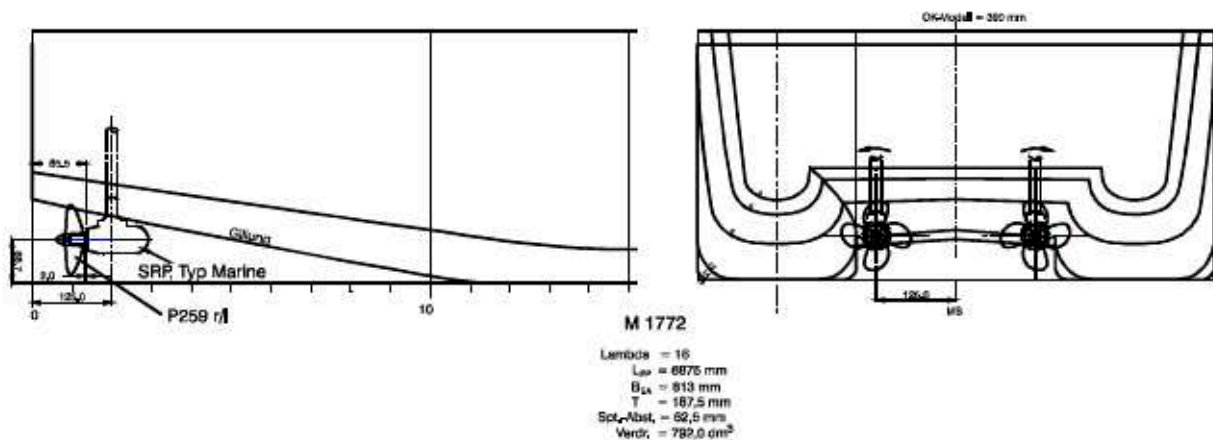


Abb. 2 Anordnung der Azipodantriebe an der Variante 1



Abb. 3 Heckansicht des Modells M1772

2.1.2 Variante 2

In der zweiten Variante (Modell-Nr. M1793A) haben die Seitenrumpfe Tunnel, in denen Propeller mit konventionellen Wellenanlagen und Rudern angeordnet sind. Der Mittelrumpf hat ebenfalls ein Pontonheck. Abb. 4 zeigt den Spantenriss und Abb. 5 die Anordnung der Propeller und Ruder im Hinterschiff. Abb. 6 zeigt die Heckansicht des gebauten Modells.

Diese Form wurde in Anlehnung an moderne Hinterschiffsformen konventioneller Binnenschiffe gewählt. Der Propeller erhält nun die Zuströmung nicht mehr alleine unter dem Mittelrumpf sondern auch von außen, dadurch sollte die Propelleranströmung im Tiefwasser verbessert werden.

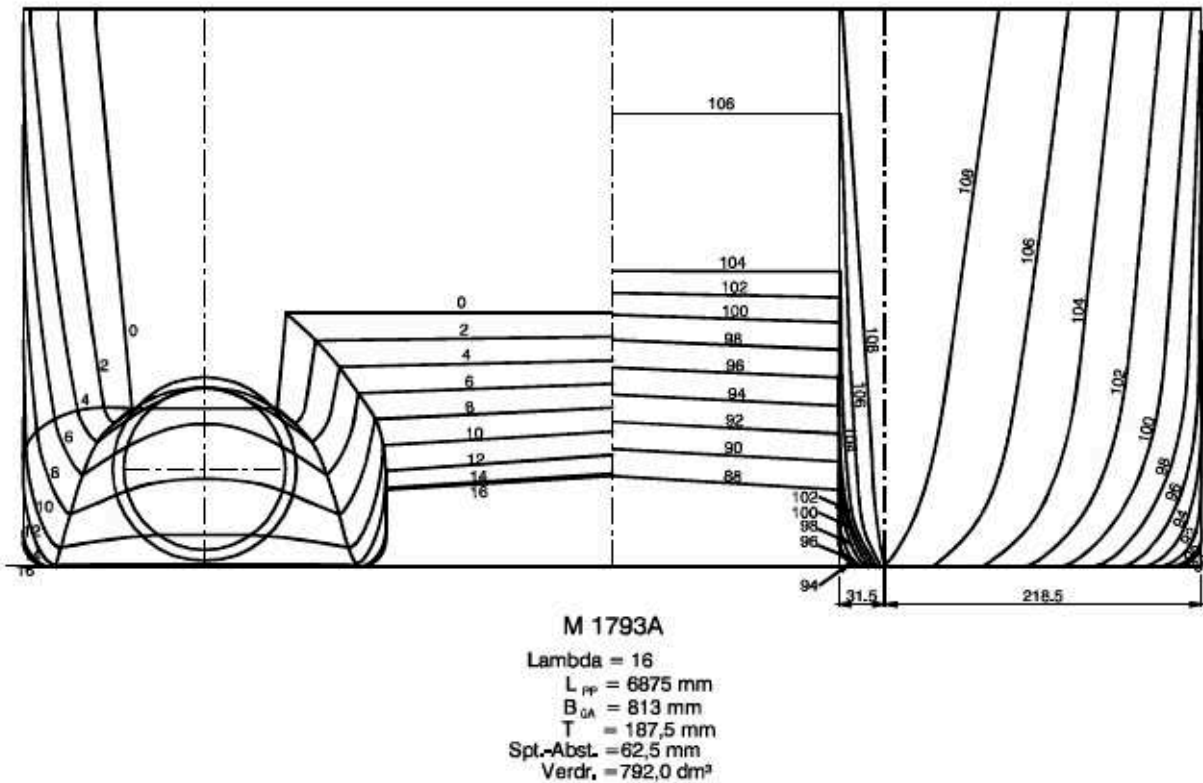


Abb. 4 Spantenriss der Variante 2

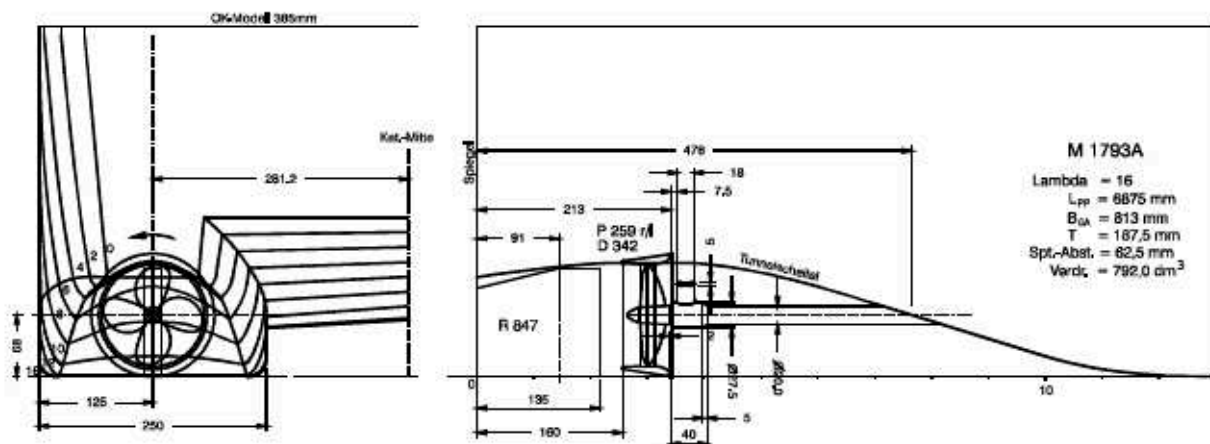


Abb. 5 Anordnung der Propeller und Ruder an der Variante 2

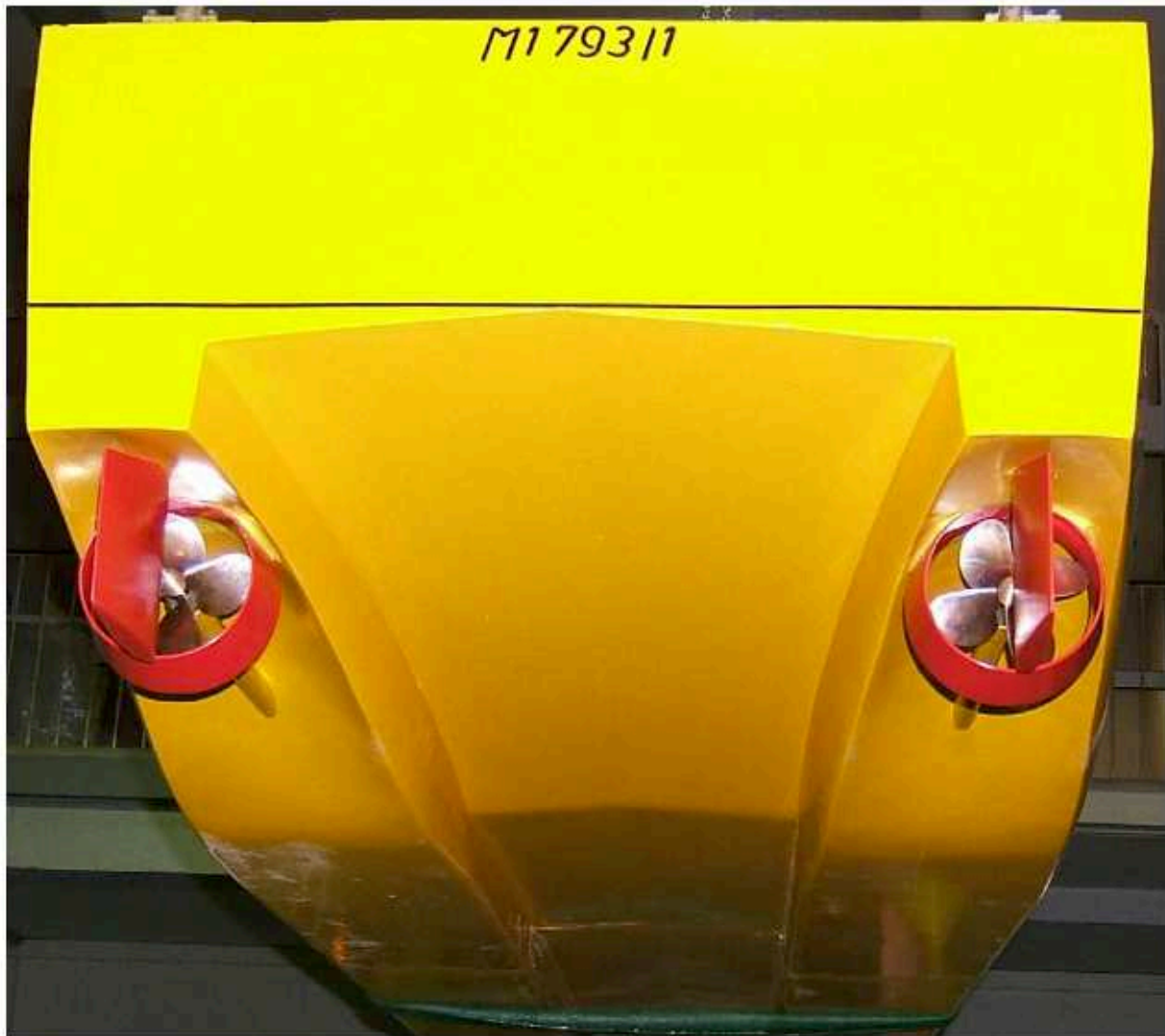


Abb. 6 Modell M1793A

2.1.3 Variante 3

Die Tunnel der zweiten Variante wurden bei der dritten Variante (Modell-Nr. M1793B) asymmetrisch abgeschrägt, um doch eine bessere Zuströmung zu den Propellern von der Schiffsmitte zu erzielen. Der Mittelrumpf bleibt unverändert; Abb. 7 zeigt den Spantenriss. Abb. 8 zeigt die Heckansicht des gebauten Modells.

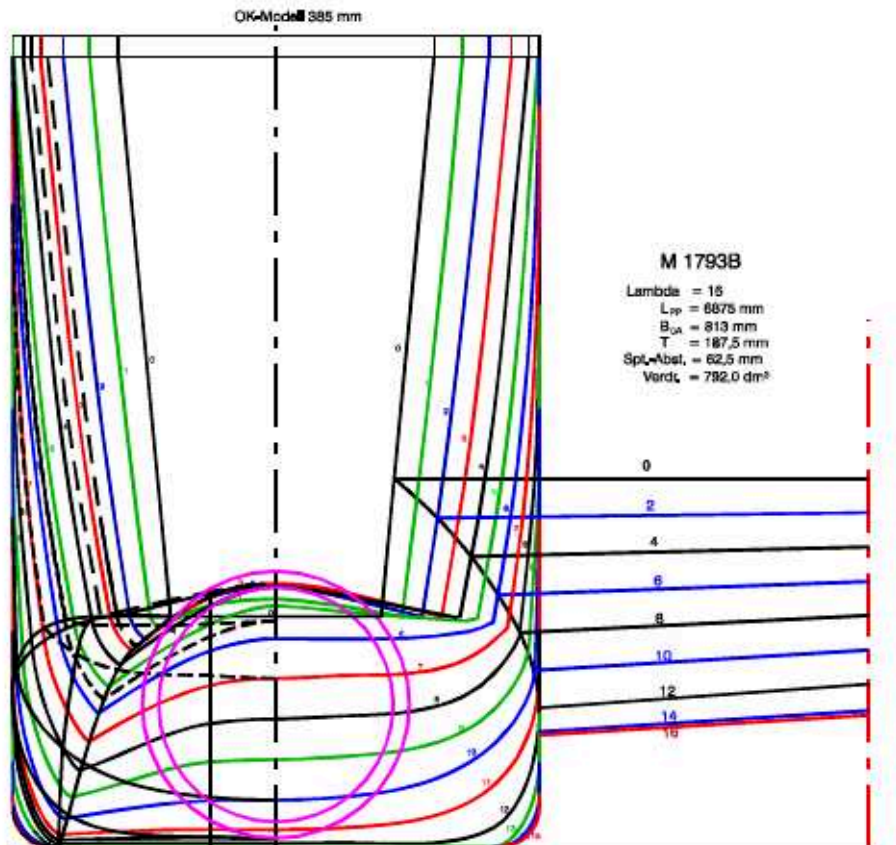


Abb. 7 Spantenriss der Variante 3



Abb. 8 Modell M1793B

2.1.4 Variante 4

Das Hinterschiff der vierten Variante (M1816) ist vollkommen neuartig gestaltet. Diese Variante entstand nach CFD-Berechnungen als letzte aus der Modellreihe 1793C – 1793E.

Mittel- und Seitenrumpfe verschmelzen im Hinterschiff. Im Versuch mit der zweiten und dritten Variante wurde beobachtet, dass ein Großteil des unter dem Mittelrumpf strömenden Wassers nicht die Propeller erreicht. Deswegen wurden unter den Seiten Tunnel ausgebildet, deren Innenschürzen bei Fahrt im flachen Wasser den Propellerzustrom aus dem Kanal unter dem Schiff verbessern sollen. Gleichzeitig sind die Tunnel an der Außenseite eingeschnitten, um den Propellerzustrom bei Fahrt im tiefen Wasser zu verbessern. Abb. 9 zeigt den Spantenriss des Hinterschiffs. In Abb. 10 ist die Heckansicht des Modells abgebildet.

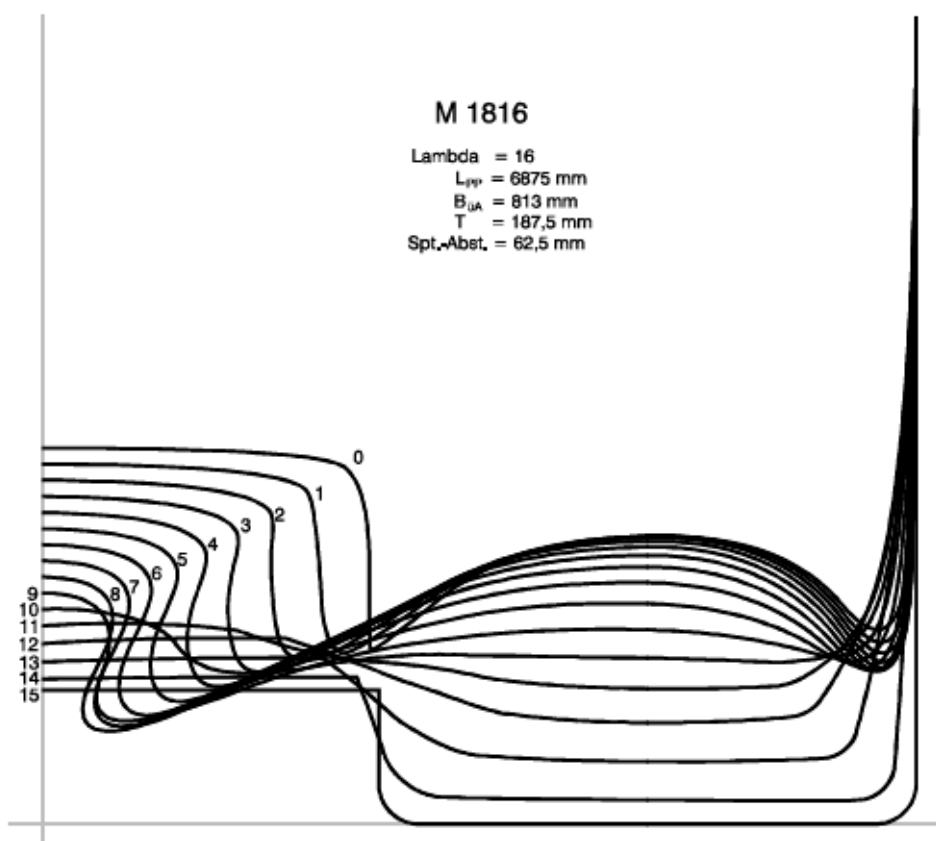


Abb. 9 Spantenriss der Variante 4



Abb. 10 Modell M1816

2.1.5 Variante 5

Im Modellversuch konnte beobachtet werden, dass die Tunnelwülste der Variante 4 zu einer deutlichen Wirbelbildung führten. In der fünften Variante wurden die Innenwülste verkleinert und der Zwischenraum aufgefüllt. Es entsteht dadurch ein fast konventionelles Spiegelheck. Das Wasser, das durch den Kanal unter dem Mittelrumpf strömt, wird zwangsläufig zu den Propellern geführt. Abb. 11 zeigt die Heckansicht des modifizierten Modells M1816B.

2.1.6 Variante 6

Ausgehend von der Variante 5 wurde der Zwischenraum zwischen den Tunneln unter den Seitenrümpfen wieder geöffnet. Dies entspricht der Variante 4 mit verkleinerten Innenwülsten an den Tunneln. Abb. 12 zeigt die Heckansicht des Modells M1816C.



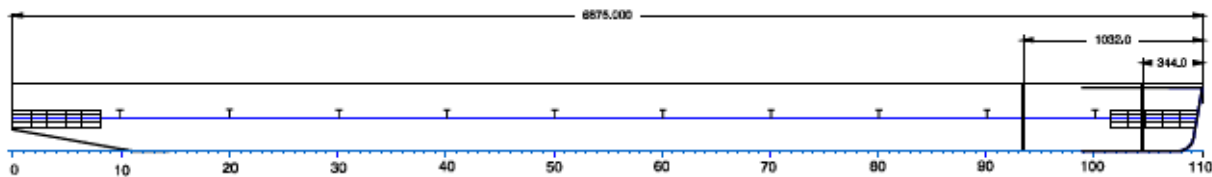
Abb. 11 Modell M1816B



Abb. 12 Modell M1816C

2.2 Modellbau

Alle experimentellen Untersuchungen wurden im Maßstab 1:16 durchgeführt. Dazu wurden Modelle aus Holz in zwei Teilen gebaut: Das Vor- und Mittelschiff war bei allen Varianten gleich und wurde als eine Einheit gebaut. Es endete hinter dem parallelen Mittelschiff mit dem Hauptspant als Querschnitt. Die verschiedenen Hinterschiffe schlossen sich strakend an den Hauptspant an. Alle Hinterschiffe waren 15 m lang, der vordere Teil entsprechend 95 m. Abb. 13 zeigt die Seitenansicht und den Anrissplan.

**Tubulenzzeuger**

Art : Sandstreifen

Lage : siehe Zeichnung

Fotonetz an Bug und Heck

Höhe = 4x25 mm

Länge = 5x100 mm

M 1772

Lambda = 16

L_{pp} = 6875 mmB_{DA} = 813 mm

T = 187,5 mm

Spt.-Abst. = 62,5 mm

Verdr. = 792,0 dm³

Abb. 13 Seitenansicht und Anrissplan

Die Azipodantriebe der Variante 1 wurden als feste Einheit auf dem Boden des Mittelrumpfes befestigt. Diese Antriebe beinhalten bereits Dynamometer. Bei allen anderen Varianten wurde in die Seitenrumpfe der Heckteile eine komplette Wellenanlage mit Antriebsmotoren und Dynamometern eingebaut. Für die Manövierversuche wurden auf die Azipods der Variante 1 bzw. die Ruder der anderen Varianten fernsteuerbare Ruderanlagen montiert.

2.3 Untersuchung der Propulsionseigenschaften

Unter der Voraussetzung, dass die Seetüchtigkeit und die erforderlichen Manöviereigenschaften gewährleistet sind, ist die Propulsionsleistung das wichtigste Maß für die Wirtschaftlichkeit im Betrieb. Deswegen stellen die experimentellen Untersuchungen der Propulsionseigenschaften einen Schwerpunkt dar.

Die Idee, die hinter dem Konzept des Semikatamaran-See steckt, ist es, eine ausreichende Zuströmung des Propellers auch bei extrem flachem Wasser zu gewährleisten. Die Seitenrumpfe schirmen die in der Mitte liegenden Propeller nach außen ab und verhindern einen Lufteinbruch von der Seite, die Zuströmung des Propellers erfolgt unter dem hochgezogenen Mittelrumpf.

Im tiefen Wasser erfährt diese Rumpfform aufgrund ihrer vergrößerten benetzten Oberfläche einen größeren Reibungswiderstand als konventionelle Einrumpfschiffe. Gleichzeitig erfolgt kein Gewinn beim Wellenwiderstand wie bei einem richtigen Katamaran, weil sich hier keine Wellen zwischen den Seitenrumpfen ausbilden können und deswegen auch kein Interferenzgewinn auftritt.

Um wirtschaftlicher als ein vergleichbares konventionelles Binnenschiff fahren zu können, darf der Semikatamaran-See einerseits im tiefen Wasser keinen deutlich höheren Leistungsbedarf aufweisen und muss andererseits Vorteile bei Fahrt im flachen Wasser haben.

Die Untersuchungen wurden mit kombinierten Methoden aus der experimentellen Versuchstechnik und der numerischen Fluidodynamik durchgeführt. Es wurden zuerst die drei Varianten M1772, M1793A und M1793B im Modellversuch untersucht, die aus den Erkenntnissen des Vorläuferprojekts entworfen wurden. Mit den in den Versuchen gewonnenen Informationen wurden Modifikationen der Rumpfform mit dem RANSE-Löser Ansys-CFX numerisch untersucht. Die daraus entwickelte Rumpfform wurde dann wiederum im Modellversuch getestet.

2.3.1 Numerische Untersuchungen

2.3.1.1 Aufgabenstellung

Die rasante Weiterentwicklung der Computertechnik in Bezug auf die Rechengeschwindigkeit und die Bereitstellung von Hauptspeicherkapazitäten, sowie die Weiterentwicklung der Verfahren zur Strömungssimulation haben dazu geführt, dass die Methoden zur Berechnung der Schiffsumströmung bereits in der Planungsphase eines Schiffes effektiv angewendet werden können. Der Entwurfsingenieur erstellt auf Basis der geforderten Hauptabmessungen, des Einsatzgebietes, der gewünschten Geschwindigkeit, der Tragfähigkeit, des gewählten Antriebsorgans und unter Beachtung von Sicherheitsvorschriften einen ersten Linienriss, mit der Zielstellung einen höchsten ökonomischen Nutzeffekt zu erreichen. Wesentliche Eigenschaften eines Schiffes wie der Leistungsbedarf, die Tragfähigkeit, die Manöviereigenschaften und das Verhalten im Seegang werden durch die Formgebung des Unterwasserschiffes bestimmt. In der Vergangenheit wurde der Entwurf durch experimentelle Untersuchungen überprüft und durch Auswertung der Messdaten mit weiteren leicht veränderten Modellvarianten iterativ optimiert. Durch CFD-Verfahren (Computational Fluid Dynamic) erhält der Projektingenieur ein Werkzeug, welches ihm ermöglicht die entworfenen Schiffslinien qualitativ zu beurteilen und notwendige Maßnahmen zur hydrodynamischen Optimierung zu treffen, bevor durch zeit- und kostenaufwendige Modellversuche das Erreichen des Entwurfszieles überprüft wird. Durch diese Vorgehensweise kann die Anzahl der Modellversuche wesentlich reduziert werden und die Entwicklungszeit bis zum „optimalen Schiff“ verkürzt werden.

Durch numerische Berechnungen werden Detailinformationen bereitgestellt, die durch die herkömmliche Messtechnik nicht mit vertretbarem Aufwand erfasst werden können. Die CFD-Berechnungen stellen das Geschwindigkeits- und Druckfeld am Schiffskörper und im interessierenden schiffsnahen Fluid bereit. So lassen sich mögliche Ablösezone der Strömung am Hinterschiff erkennen und die dreidimensionale Zuströmung zum Propeller kann optimiert werden. Die Berechnung der integralen Größen, wie Reibungs- und Formwiderstand macht eine qualitative Beurteilung der unterschiedlichen Schiffsformvarianten möglich. Für die experimentelle Ermittlung der Druckverteilung am Schiff müsste eine Vielzahl von Druckdosen am Schiffskörper verteilt und ausgewertet werden. Die Messung des Geschwindigkeitsfeldes im Nahfeld des Schiffes ist nur mit moderner Lasertechnik mit sehr hohem Zeitaufwand

möglich, da die Komponenten der Geschwindigkeit für jeden Raumpunkt einzeln gemessen werden.

Ausgehend von einer experimentell untersuchten Schiffsform des Semikatamaran-See sollten Modifikationen der Rumpfform unter Flachwasserbedingungen mit numerischen Methoden berechnet werden. Ziel dieser Berechnungen ist die hydrodynamische Optimierung der Hinterschiffsform, um eine möglichst gleichmäßige Anströmung des Antriebsorgans zu erreichen. Die sich bei der Fahrt eines Schiffes durch das Wasser einstellenden Strömungsverhältnisse am Heck werden wesentlich von viskosen Effekten beeinflusst. Für reibungsbehaftete Strömungen wird im DST zur Optimierung der Schiffslinien der kommerzielle RANSE-Löser ANSYS-CFX eingesetzt.

2.3.1.2 Verfahren

2.3.1.2.1 Erhaltungsgleichungen und Turbulenzmodellierung

Mit den Erhaltungsgleichungen für Masse und den Impulsgleichungen (Navier-Stokes-Gleichungen) können die Bewegungen von Flüssigkeiten unter Berücksichtigung der Reibung und unter der Voraussetzung, dass das Fluid inkompressibel ist, beschrieben werden. Bei Strömungsberechnungen mit geringen Geschwindigkeiten kann die Kompressibilität vernachlässigt werden. Für die meisten in der Technik auftretenden Problemstellungen gilt, dass sie turbulent sind. Durch die Navier-Stokes-Gleichungen werden die Turbulenzen in der Strömung ebenfalls vollständig erfasst. Eine analytische Lösung für dieses Gleichungssystem ist für praxisrelevante Fälle jedoch nicht möglich. Das Gleichungssystem muss mit numerischen Verfahren gelöst werden.

Turbulente Strömungen sind gekennzeichnet durch zeitliche und örtliche Schwankungen im Fluid. Im Strömungsgebiet können sehr große und kleine Turbulenzballen vorhanden sein. Um auch die kleinsten Turbulenzballen zu erfassen, muss die numerische Auflösung bei derartigen Strömungen die kleinsten Turbulenzen auflösen können. Bei der vorhandenen Speicherkapazität ist dies für Berechnungen im Schiffbau auch in naher Zukunft nicht möglich. Eine Lösung dieser Problematik ist die Einführung der Reynolds-Gemittelten-Navier-Stokes-Gleichungen (RANSE). Für turbulente Strömungen gilt, dass sich der Druck und die Geschwindigkeit im Lösungsgebiet unregelmäßig ändern. Um diese Erscheinungen näherungsweise zu beschreiben, werden statistische Modelle eingesetzt. Druck und Geschwindigkeit werden aufgespalten in einen Mittelwert und in einen stochastischen Schwankungsanteil. Die Reynolds-Gemittelten-Navier-Stokes-Gleichungen (RANSE) ergeben sich dann durch das Einsetzen dieser Größen in die Navier-Stokes-Gleichungen. Die dabei entstehenden Zusatzterme werden Reynoldsspannungen genannt. Zur Schließung des Differentialgleichungssystems müssen Turbulenzmodelle eingeführt werden, die einen Zusammenhang zwischen den Reynoldsspannungen und den zeitlich gemittelten Unbekannten herstellen. Turbulenzmodelle können nicht die Turbulenzballen wiederge-

ben, sie modellieren ausschließlich die Auswirkungen der turbulenten Erscheinungen auf die Strömung im Fluid.

Für die Modellierung der turbulenten Erscheinungen wurden in diesem Projekt das $k-\varepsilon$ -Modell und das $k-\omega$ -SST (Shear-Stress-Transport) eingesetzt. Das $k-\varepsilon$ -Modell ist bei industriellen Berechnungen sehr weit verbreitet, hat aber einige Nachteile im wandnahen Bereich. Die Strömung an den Wänden muss bei diesem Modell durch Wandfunktionen beschrieben werden. Für die Lokalisierung von druckbedingten Ablösegebieten scheint das $k-\omega$ -SST-Modell besser geeignet zu sein als das $k-\varepsilon$ -Modell. Aus diesem Grund wird im DST zur Hinterschiffsoptimierung überwiegend das $k-\omega$ -SST-Modell eingesetzt.

2.3.1.2.2 Diskretisierung der Erhaltungsgleichungen

Da die analytische Lösung des Differentialgleichungssystems zur Beschreibung von bewegten Strömungen nur für ausgewählte Fälle möglich ist, müssen die Transportgleichungen in algebraische Gleichungen überführt werden. Dadurch kann die analytische Lösung durch die numerische Berechnung angenähert werden. Durch den ANSYS-CFX RANSE-Solver werden die Erhaltungsgleichungen nach der Finite-Volumen-Methode diskretisiert. Für dieses Verfahren muss der gesamte Berechnungsraum in Volumenelemente unterteilt werden, deren Anordnung im Raum nicht orthogonal und randangepasst sein kann. Die Erhaltungsgleichungen werden über die einzelnen Kontrollvolumen integriert. Die Berechnung von Druck und Geschwindigkeit für jeden diskreten Rechenpunkt erfolgt gekoppelt mit einem Mehrgitterverfahren.

2.3.1.2.3 Randbedingungen

Zur Beschreibung der Fahrt eines Schiffes durch das Wasser muss die physikalische Problemstellung für die Berechnung aufbereitet werden. Der Berechnungsraum muss örtlich begrenzt werden und an den Rändern müssen geeignete Randbedingungen vorgegeben werden, die die Problemstellung eindeutig wiedergeben. Die Berandungen ergeben sich zum Teil aus den geometrischen Abgrenzungen, wie Gewässerboden, Kanalwände, freie Wasseroberfläche und Schiffskörper. Als Vereinfachung wird das „stehende Schiff“ mit einer vorgegebenen Geschwindigkeit (Schiffsgeschwindigkeit) angeströmt, dies ist möglich, da die Strömung als eine Bewegung des Fluids gegenüber einem anderen Medium definiert ist. Die Ränder für den Eintritt und den Austritt des Fluids müssen so gewählt werden, dass ihre Lage keinen Einfluss auf die Strömungsverhältnisse in der Nähe des Schiffskörpers haben. Für die meisten Berechnungsfälle wird der Eintrittsrand ca. 0,5 bis eine Schiffslänge vor dem Schiff und der Austrittsrand 1,5 bis 2 Schiffslängen hinter dem Schiff positioniert. Folgende Randbedingungen gelten für alle durchgeführten Berechnungen:

Einströmrand – Der Einstromrand ist eine Dirichlet-Randbedingung, an dem eine homogene Anströmung vorgegeben wird, mit der der Schiffskörper angeströmt wer-

den soll. Diese Geschwindigkeit entspricht der Geschwindigkeit des Schiffes durch das Wasser. Für die Turbulenzintensität wird ein Wert von 3% gewählt.

Ausströmrand – Als Ausströmrand wird die stromabwärts, senkrecht zur Mittellängsachse liegende Fläche definiert. Die Änderung des Druckes wird an dieser Fläche zu Null gesetzt. Die hier verwendete OPENING-Randbedingung ermöglicht ein ungehindertes Ein- bzw. Ausströmen des Fluids.

Schiffskörper – Alle äußeren Begrenzungen des Schiffes mit Anhängen werden als reibungsbehaftete Wände definiert, an denen die Haftbedingung erfüllt ist (WALL NO SLIP).

Wasseroberfläche (für Doppelmodellberechnungen) – Die Bildung von Wellen an der Wasseroberfläche wird vernachlässigt. Die Begrenzung wird als reibungsfreie Ebene definiert. Es werden nur Geschwindigkeiten parallel zur Wand zugelassen. Es existieren keine Gradienten senkrecht zur Wand (WALL FREE SLIP).

Kanalwand – An der Kanalwand (seitliche Begrenzung) gilt ebenfalls die Haftbedingung. Sie wird als reibungsbehaftete Wand (WALL NO SLIP) definiert. Zur Realisierung der Relativgeschwindigkeit zwischen Kanalwand und Schiff wird die Kanalwand als bewegte Wand definiert. Das heißt, dass sich die Wand mit der Schiffsgeschwindigkeit bewegt.

Gewässerboden – Am Gewässerboden gelten die gleichen Randbedingungen wie an der Kanalwand (WALL NO SLIP).

Obere Begrenzung des Lösungsgebietes bei Free Surface Berechnungen – Die Begrenzung des Lösungsgebietes bei 2-Phasenberechnungen (Wasser-Luft) wird als OPENING-Bedingung definiert. Dadurch konnte das beste Konvergenzverhalten erzielt werden.

Symmetrieebene – Da die Geometrie der untersuchten Schiffe symmetrisch zur Längsachse ist, wurde das Lösungsgebiet an dieser Ebene geteilt, so dass sich die Anzahl der Berechnungspunkte halbiert. Die Begrenzung wird als reibungsfreie Wand definiert. Es werden nur Geschwindigkeiten parallel zur Wand zugelassen. Es existieren keine Gradienten senkrecht zur Wand (WALL FREE SLIP).

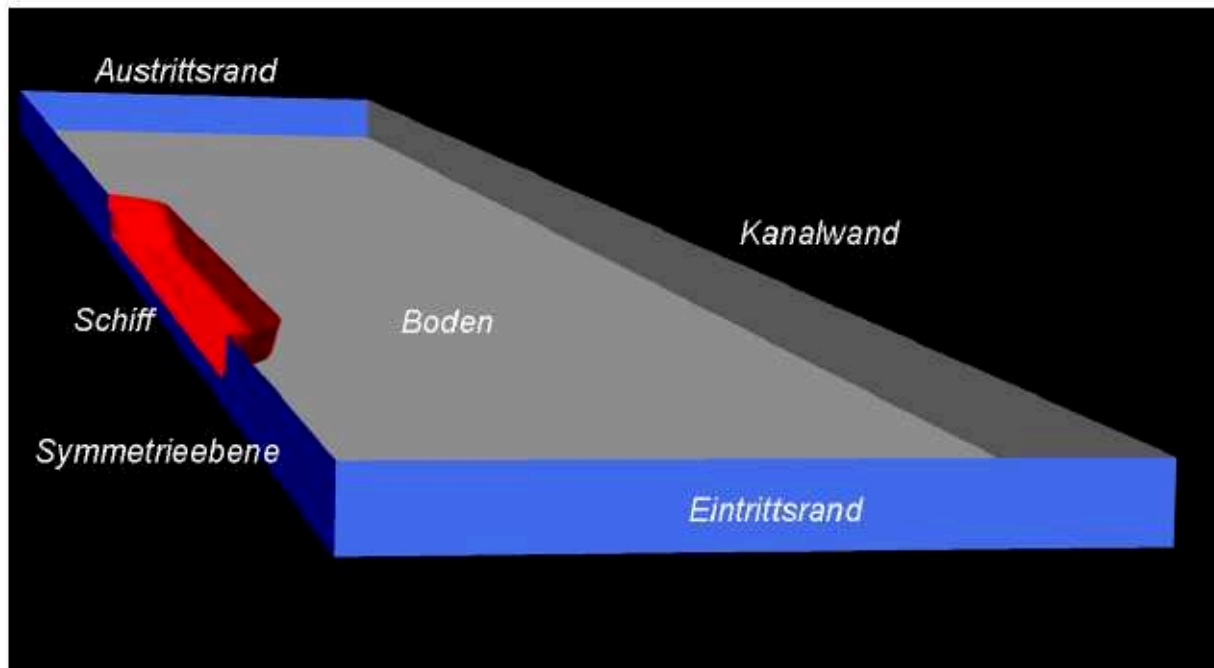


Abb. 14 Schematische Darstellung der Randbedingungen

2.3.1.2.4 Gittergenerierung

Für die Durchführung der Berechnungen nach dem oben beschriebenen Verfahren muss das Strömungsgebiet mit einem numerischen Gitter diskretisiert werden. Dabei wird das Lösungsgebiet in endlich viele Volumenelemente unterteilt, wobei die Randelemente die Geometrie wiedergeben müssen. Um die Strömung um den Schiffskörper möglichst genau zu erfassen, muss das Gitter in den Bereichen, wo hohe Druck- und Geschwindigkeitsgradienten zu erwarten sind, feiner aufgelöst werden. Die Anordnung der Volumenelemente im Raum kann durch unterschiedliche Strukturen erfolgen, die das Ziel haben ein qualitativ hochwertiges Gitter mit möglichst wenig Zeitaufwand zu erzeugen. Qualitativ schlechte Gitter, bedingt durch die geometrischen Randbedingungen, können einen wesentlichen Einfluss auf die Genauigkeit der Lösung bzw. auf das Konvergenzverhalten der Rechnung haben. Zwei wichtige Kriterien der Gitterqualität sind die Verzerrung und das Seitenverhältnis der Volumenelemente. Bei Hexaederelementen sollte der maximale Kantenwinkel der einzelnen Kontrollvolumen den Wert von 20 Grad nicht unterschreiten bzw. 160 Grad nicht überschreiten. Ungünstige Seitenverhältnisse ergeben sich häufig aus der Forderung, dass die Anzahl der Volumenelemente im gesamten Lösungsgebiet so gering wie möglich gehalten werden soll, um die Rechenzeit und den Speicherbedarf zu reduzieren. Die Elementgröße am Schiffskörper wird dadurch bestimmt, dass alle vorhandenen Strömungserscheinungen aufgelöst werden müssen. In diesem Bereich wird die Ausdehnung der Zellen in alle 3 Koordinatenrichtungen so gewählt, dass die Grenzschicht an der Wand aufgelöst wird.

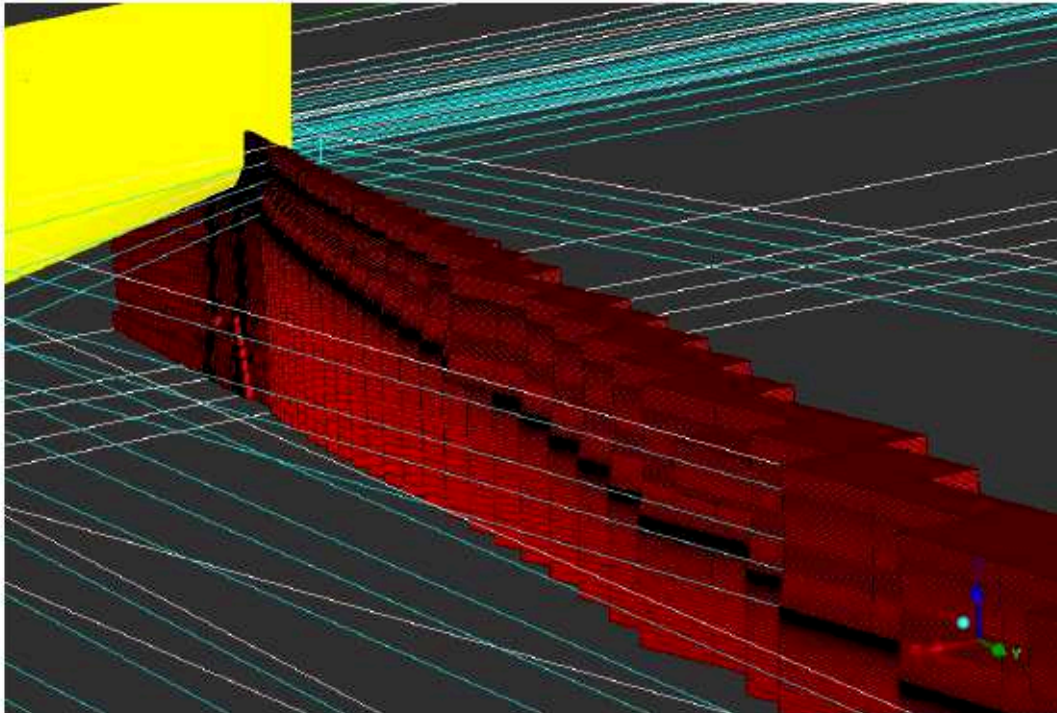


Abb. 15 Seitenverhältnis Volumenelemente

In den Teilen des Lösungsgebietes, die weit entfernt sind vom Schiff, kann die Elementaufteilung in X- und Y-Richtung allmählich vergrößert werden, um Berechnungszellen und damit verbunden auch Rechenzeit zu sparen. Die Gitterauflösung in Z-Richtung ist durch die Verfeinerung am Schiffskörper vorgegeben (Abb. 15). Das daraus resultierende Seitenverhältnis der Elemente sollte nicht größer als 100 sein.

Für die Erstellung der Volumenelemente im Lösungsgitter für das Finite-Volumenverfahren werden hauptsächlich blockstrukturierte und unstrukturierte Gitter verwendet. Beide Gittertopologien haben Vor- bzw. Nachteile. Blockstrukturierte Gitter zeichnen sich dadurch aus, dass bei entsprechender Gitterqualität die Genauigkeit des Ergebnisses sehr hoch ist und die Rechenzeit bedeutend kürzer ist gegenüber unstrukturierten Gittern. Des Weiteren ist häufig ein sehr gutes Konvergenzverhalten zu beobachten. Ein großer Nachteil dieser Topologie ist der große Zeitaufwand, der benötigt wird um ein qualitativ hochwertiges Gitter für komplexe Geometrien zu erstellen. Im Gegensatz zum unstrukturierten Gitter muss die Blockstruktur manuell erzeugt werden, wobei die Qualität einer solchen Struktur stark vom Bearbeiter abhängig ist (Abb. 16).

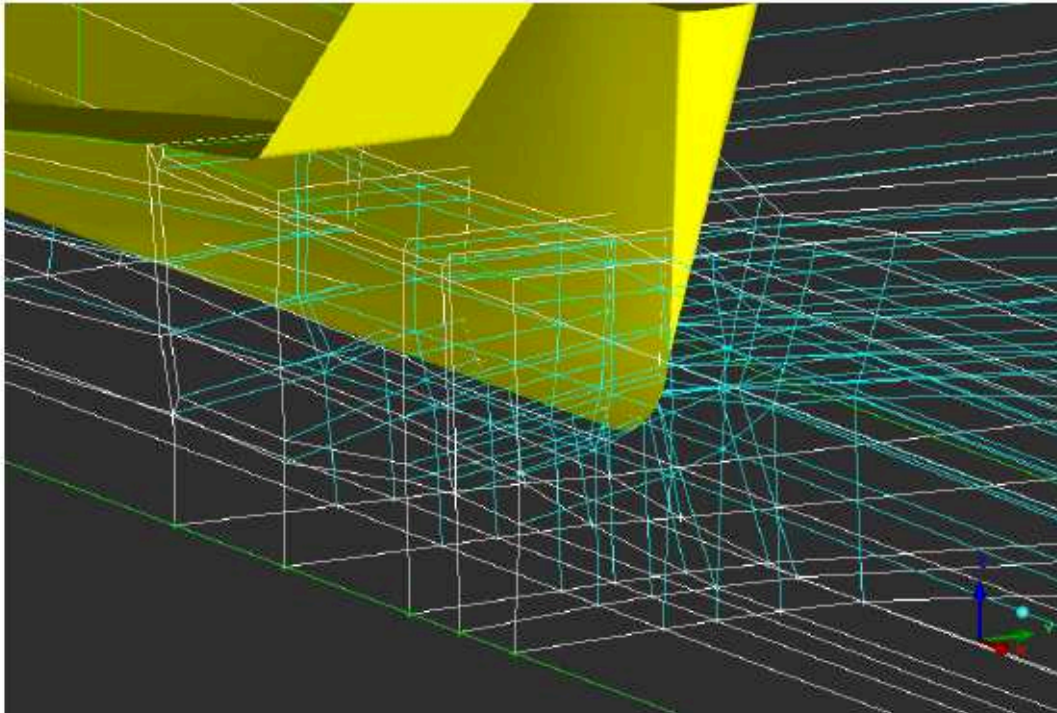


Abb. 16 Blockstruktur am Vorschiff des Semi-Katamarans

In Abb. 16 ist die Blockstruktur für ein Vorschiff des Semi-Katamarans bestehend aus einer Kombination aus H-Gittern und O-Gittern dargestellt. Die manuell erzeugten Blöcke werden nach einer gewählten Knotenaufteilung mit Hexaedern gefüllt. Für unstrukturierte Gitter kann der halbautomatische Gittergenerator ICEM-CFD genutzt werden. Bei dieser Gitterart müssen nur die Grenzen des Lösungsgebietes definiert und die Verteilung der Knoten im Lösungsgebiet angegeben werden. Das so definierte Volumen wird mit Tetraedern gefüllt. Diese Gitterart wird häufig bei sehr komplexen Geometrien eingesetzt. Gerade für Problemstellungen im flachen Wasser wird durch die große Ausdehnung der X- und Y-Richtung gegenüber der Z-Richtung eine hohe Anzahl von Knoten generiert, die die Berechnungszeit für derartige Gitter unnötig ansteigen lässt. Im Rahmen dieses Projektes sind überwiegend blockstrukturierte Hexaedergitter für die Berechnungen generiert worden. In Berechnungsfällen bei denen auf Grund des geringen Flottwassers unter dem Schiff keine qualitativ gute Blockstruktur erstellt werden konnte, wurden Hybridgitter erstellt, bei denen der Nahbereich am Schiff mit Tetraedern und die weit vom Schiff entfernten Gebiete mit Hexaedern vernetzt wurden. Dadurch entstanden drei Gitterblöcke, die durch General Grid Interfaces (GGI) gekoppelt wurden. Die Auflösung der Grenzschicht erfolgte bei dieser Gitterart durch die Einführung von Prismenschichten am Schiffskörper. Es wurde eine Vielzahl von Lösungsgittern erzeugt, deren Größe zwischen 2,8 Millionen bis 7,2 Millionen Knoten schwankte. Die Tabelle 1 zeigt eine Übersicht der generierten Gitter für die Berechnungsfälle.

Tabelle 1: Übersicht über die erzeugten Gitter

Modellvariante	Gitterart	Prismen	Tetraeder	Hexaeder	Knotenanzahl
M1772 h = 5 m (A)	Hexa			3.379.286	3.483.982
M1772 h = 5 m (B)	Hexa			4.250.246	4.364.882
M1772 h = 5 m (C)	Hexa			2.801.466	2.893.422
M1772 h = 4 m (D)	Hexa			3.911.866	4.024.372
M1772 Free Surface (A)	Hexa			4.789.641	4.910.526
M1772 Free Surface (B)	Hexa			3.682.918	3.682.918
M1793B h = 5 m (A)	Hexa			3.931.270	4.041.222
M1793B h = 5 m (B)	Hexa			4.938.590	5.062.322
M1793B h = 5 m (C)	Hexa			6.226.888	6.379.104
M1793B h = 4 m (A)	Hexa			3.188.680	3.291.562
M1793C h = 5 m	Hexa			6.627.164	6.787.012
M1793E h = 5 m (A)	Hexa			7.363.677	7.195.874
M1793E h = 1,8 m (B)	Hybrid	1.428.193	9.570.850	307.764	2.847.578

Um eine Gitterabhängigkeit der Lösung auszuschließen, wurden für einige Modellvarianten Gitter mit unterschiedlichen Strukturen und Verfeinerungen der Elemente erzeugt. Die Abhängigkeit von der Knotenanzahl wurde bei den Berechnungsfällen untersucht, bei denen die Gitterstruktur auf Grund geometrischer Vorgaben wesentlich gegenüber der Vorvariante geändert wurde. Die folgenden Abbildungen zeigen beispielhaft die Gitterstruktur für Hexaedergitter (Abb. 17 und Abb. 18) und Hybridgitter (Abb. 19). In Abbildung 6 sind die 3 Teilgitter schematisch dargestellt (HexaVS, HexaHS, Tetra). Eine weitere Unterteilung des Tetranetzes in Y-Richtung hätte die Knotenanzahl des Gesamtnetzes noch wesentlich reduzieren können, führte aber zu Konvergenz- und Speicherproblemen und wurde deshalb nicht weiter untersucht. Mit Hilfe der GGI-Schnittstelle zwischen den Gitterblöcken ist es möglich beliebige Gitter miteinander zu koppeln (Abb. 20), ohne dass die Knoten der Teilgitter eine 1:1 Verbindung bilden müssen. Zu beachten ist, dass gerade im Bereich dieser Verbindungen das Aspect-Ratio der Zellen nicht zu groß gewählt wird (schlechtes Konvergenzverhalten).

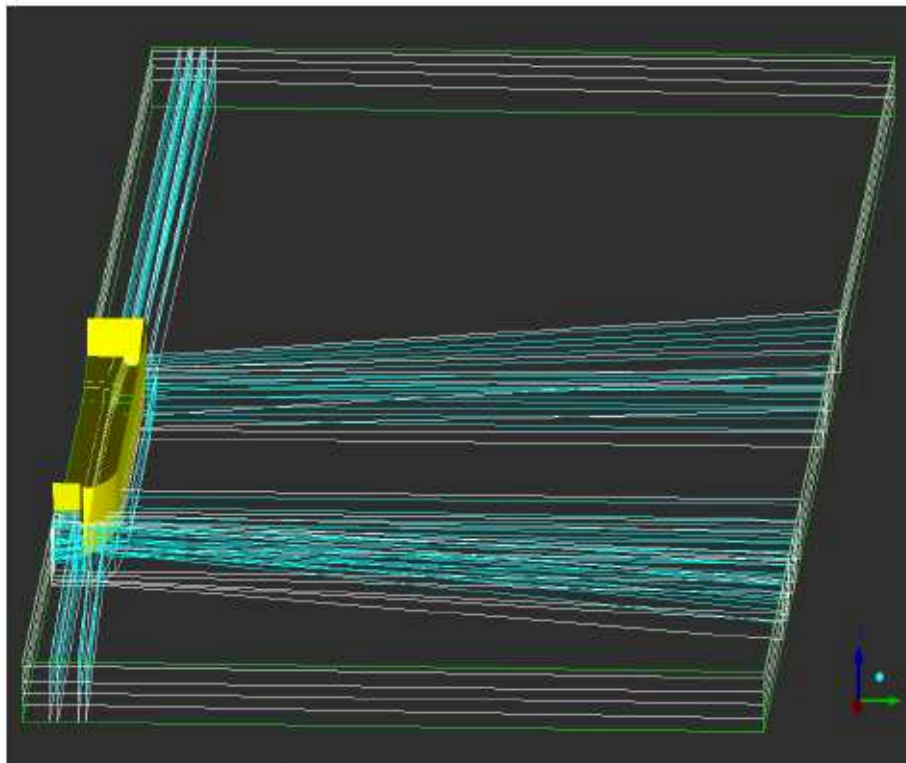


Abb. 17 Blockstruktur des Semi-Katamarans

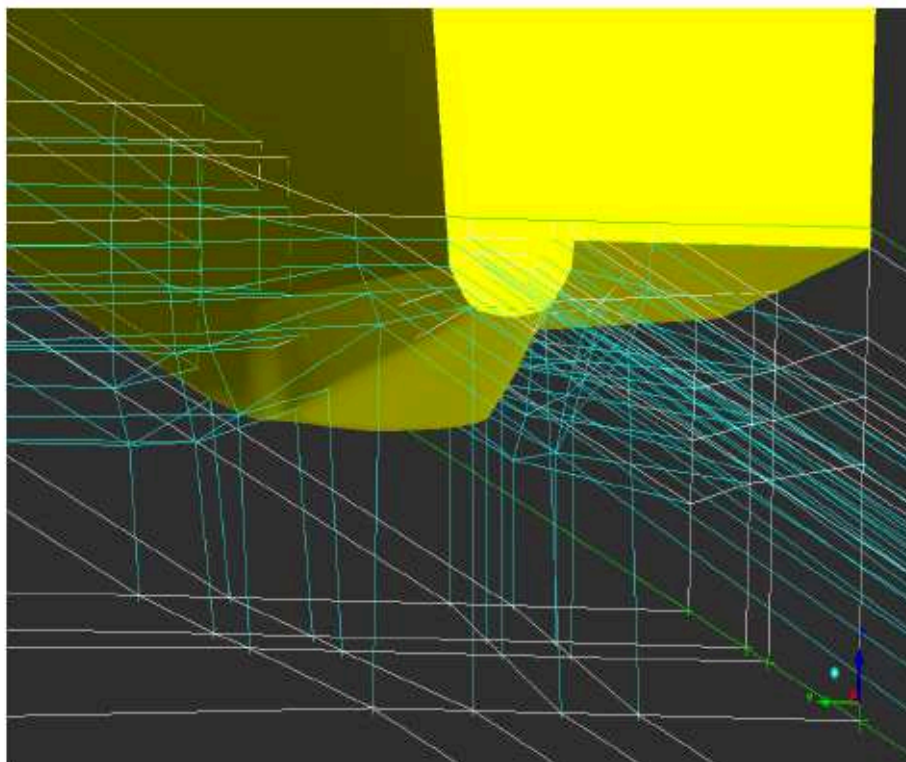


Abb. 18 Blockstruktur am Hinterschiff des Semi-Katamarans

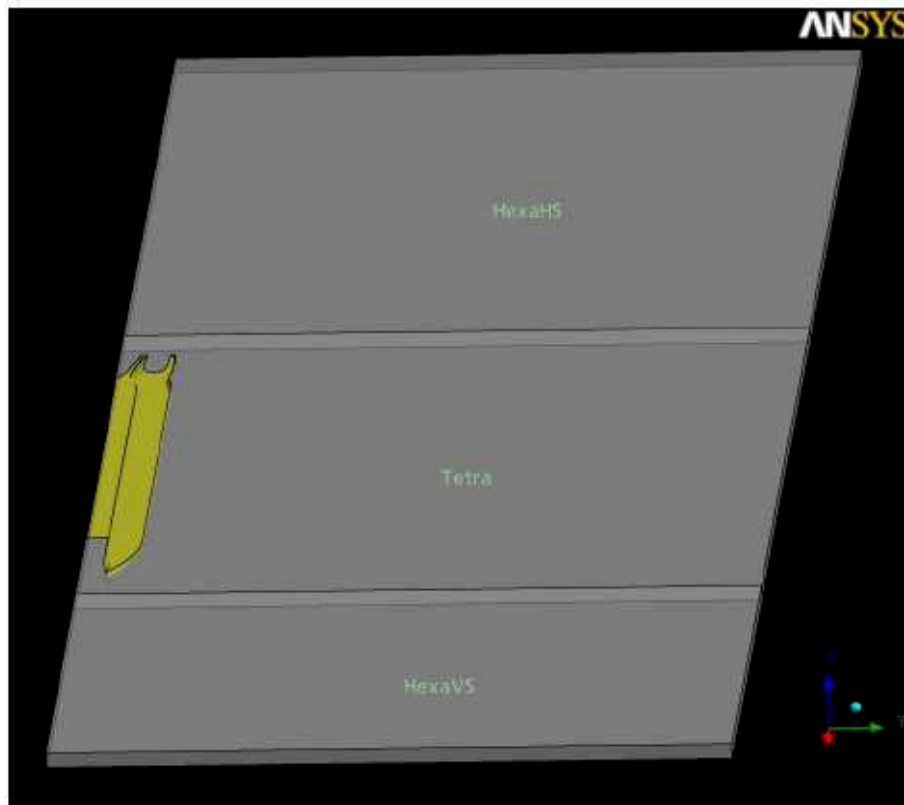


Abb. 19 Struktur Hybridgitter

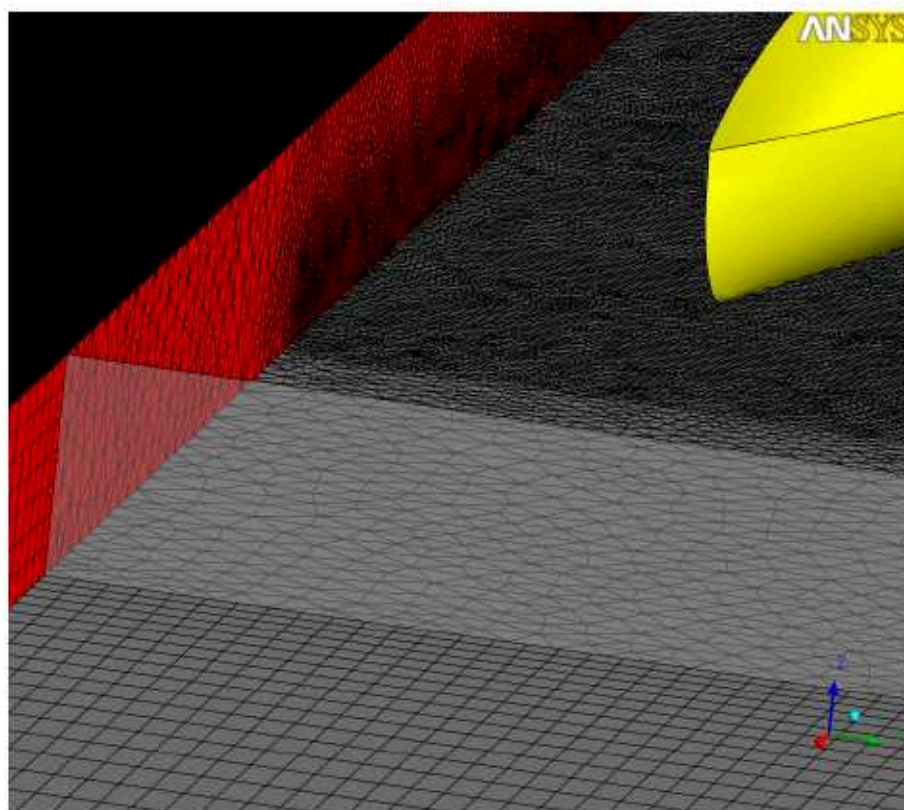


Abb. 20 Kopplung Hybridgitter

2.3.1.3 CFD-Optimierung

2.3.1.3.1 Allgemeines zu den Berechnungsfällen

Um die Qualität eines Schiffsentwurfs mit CFD-Methoden aus hydrodynamischer Sicht zu beurteilen bietet sich eine Vielzahl von Verfahren an, die Informationen über das erzeugte Wellenbild des Schiffes, die Druckverteilung am Schiffsrumpf, den Widerstand des Schiffes und die Zuströmung zum Propeller liefern können. Zur Optimierung der Vorschiffsform wird das Wellenbild in den meisten Fällen mit potentialtheoretischen Verfahren berechnet, da diese Verfahren schnell und leicht einsetzbar sind. Auf Grund des Einflusses der Viskosität auf die Umströmung des Hinterschiffes sind diese Berechnungsprogramme für die Optimierung der Hinterschiffsform nicht oder nur bedingt einsetzbar.

Durch RANSE-Verfahren (viskose Strömung) werden für jeden diskreten Punkt des Berechnungsraumes der Druck und die Komponenten der Geschwindigkeit ermittelt. Diese Informationen sind durch herkömmliche Modellversuche nicht oder nur mit sehr hohem Kosten- und Zeitaufwand zu erhalten. Für die experimentelle Ermittlung der Druckverteilung am Schiff muss eine Vielzahl von Druckdosen am Schiffskörper verteilt und ausgewertet werden. Die Messung des Geschwindigkeitsfeldes im Nahfeld des Schiffes ist nur mit moderner Lasertechnik mit sehr hohem Zeitaufwand möglich, da die Geschwindigkeitskomponenten für jeden Raumpunkt einzeln gemessen werden.

Aus den berechneten Drücken an der Außenhaut des Schiffes wird der viskose Widerstand des Modells ermittelt, der sich aus dem Reibungswiderstand und dem viskosen Druckwiderstand zusammensetzt. Die Integration der Wandschubspannungen am Rumpf in Fahrtrichtung des Schiffes liefert den Reibungswiderstand. Der viskose Druckwiderstand wird ermittelt aus der Summe aller am Schiff auftretenden Drücke bezogen auf die in Fahrtrichtung projizierte Fläche. Die Berechnungen der integralen Größen können nur bedingt zur Optimierung herangezogen werden, da die Genauigkeit hinsichtlich der Kraftgrößen noch nicht ausreichend ist, um eine Leistungsprognose für die untersuchte Schiffsförm zu liefern. Bei vergleichenden Betrachtungen unterschiedlicher Schiffsförm oder geringen Formänderungen können die berechneten integralen Größen jedoch wichtige Hinweise geben, ob eine Schiffsförm einen höheren oder einen geringeren Widerstand erzeugt.

Das Ziel der CFD Optimierung in diesem Projekt ist, die Zuströmung des Propellers für eine vorgegebene Schiffsförm zu verbessern. Durch geeignete Maßnahmen soll verhindert werden, dass unter extremen Flachwasserbedingungen ein Lutfeinbruch zum Propeller möglich ist. Zur qualitativen Bewertung der Güte des Hinterschiffes können zum Beispiel die Geschwindigkeitsverteilungen (Betrag und Richtung) in verschiedenen Ebenen (quer zur Fahrtrichtung) vor dem Propeller, die Auswertung der Druckverteilung (Drucksprünge) bzw. die Wandschubspannungen am Schiff als ein Indiz für mögliche Ablösezonen herangezogen werden. Sehr geringe Wandschubspannungen und Rückstromgebiete in Wandnähe können auf lokale Strömungablö-

sungen hindeuten. Weitere Informationen über Wirbelbildung, Totwassergebiete und Ablösezonen liefern die Stromlinien im Fluid, deren Tangentenrichtung in jedem Punkt mit der Richtung der Geschwindigkeitsvektoren in diesen Punkten zusammenfällt.

Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse der numerischen Untersuchungen mit den Messwerten und den Visualisierungen (High-Speed-Camera) der Hinterschiffsumströmung aus dem Experiment (Fadenversuch) ohne Maßstabseinflüsse zu ermöglichen, wurden alle Berechnungen bei einem Modellmaßstab von $\lambda = 16$ durchgeführt. Die Strömungsverhältnisse wurden numerisch für eine Wassertiefe, einen Tiefgang des Modells und eine Schiffsgeschwindigkeit für jede Formvariante ermittelt (in Klammern die Modellwerte).

Wassertiefe	h	= 5,00 m	(0,3125 m)
Tiefgang	T	= 3,00 m	(0,1875 m)
Schiffsgeschwindigkeitsbereich (GA)	V_{Schiff}	= 16,0 km/h	(1,111 m/s)
Wassertiefen-Tiefgangsverhältnis	h/T	= 1,666	

Mit der für diese Parameter optimierten Hinterschiffsform wurden weitere numerische Untersuchungen bei extremen Flachwasserverhältnissen ($h/T = 1,2$) realisiert. Im Unterschied zum Experiment wurde das Modell bei den numerischen Untersuchungen fest eingespannt. Dadurch sind keine dynamischen Schwimmlagenveränderungen (Trimm und Absenkung) infolge der Anströmung des Schiffes möglich. Die Berücksichtigung von Trimm und Absenkung infolge der Fahrt des Schiffes ist rechnerisch nur mit einer Gitterbewegung bzw. Verzerrung des Gitters realisierbar. Infolge der iterativen bzw. instationären Herangehensweise (Rechnung-Gitteradaption-Rechnung) sind solche Berechnungen sehr zeitaufwendig und für einen Optimierungsprozess derzeit nicht geeignet.

Als Abbruchkriterium einer Rechnung wurden die RMS-Residien ($RMS \leq 10^{-6}$) und das Einstellen eines konstanten Wertes für den Widerstand des Schiffes gewählt. Abb. 21 zeigt das Konvergenzverhalten einer ausgewählten Berechnung. Für den Reibungswiderstand und den viskosen Druckwiderstand haben sich konstante Werte eingestellt.

2.3.1.3.2 Berechnungsfall Ausgangsvariante M1772

Die experimentellen Untersuchungen der Ausgangsform des Semi-Katamarans (M1772) haben gezeigt, dass es bei der Fahrt des Schiffes unter extremen Flachwasserbedingungen zu Lufteinbrüchen am Propeller kommen kann. Im flachen Wasser reduziert sich die Wassermenge unter dem Schiffsrumpf so stark, dass dem Propeller nicht mehr genügend Wasser zugeführt wird. Die Zufuhr der für den optimalen Propellerbetrieb notwendigen Wassermenge muss über die Seiten des Schiffes erfolgen. Dadurch erhöht sich die Gefahr, dass Luft in den Propellerzustrom gelangt, die zur Folge hat, dass sich der Wirkungsgrad des Antriebsorgans erheblich reduziert (Schubabfall).

Durch numerische Berechnungen sollte das Strömungsfeld im Hinterschiff visualisiert werden, um mögliche Ursachen für den Lufteinbruch zu erkennen und geeignete geometrische Veränderungen zu empfehlen, die die Zuströmung zum Propeller verbessern.

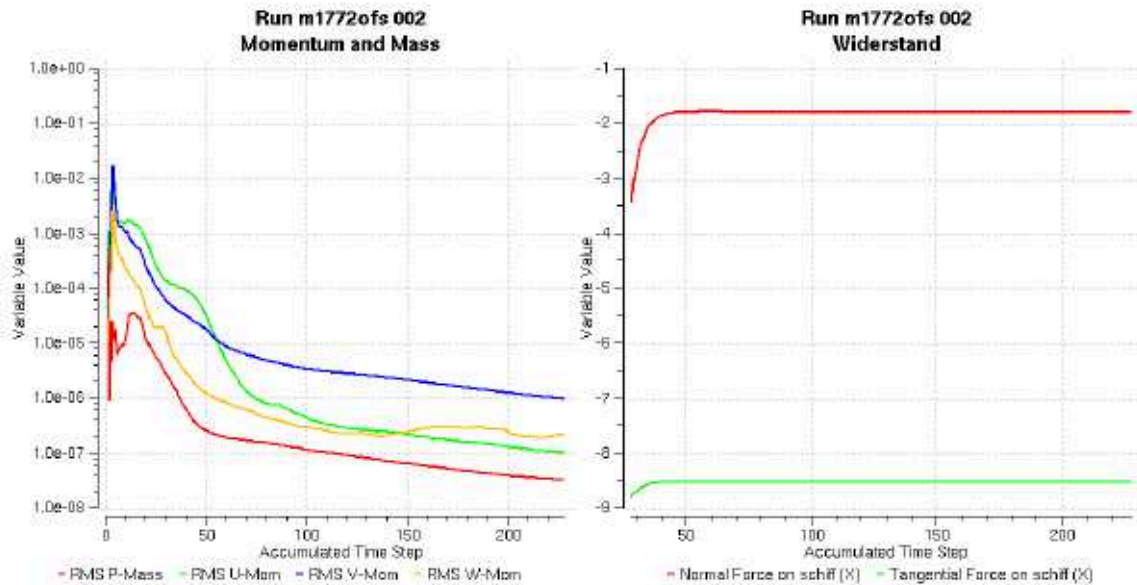


Abb. 21 Konvergenzverhalten

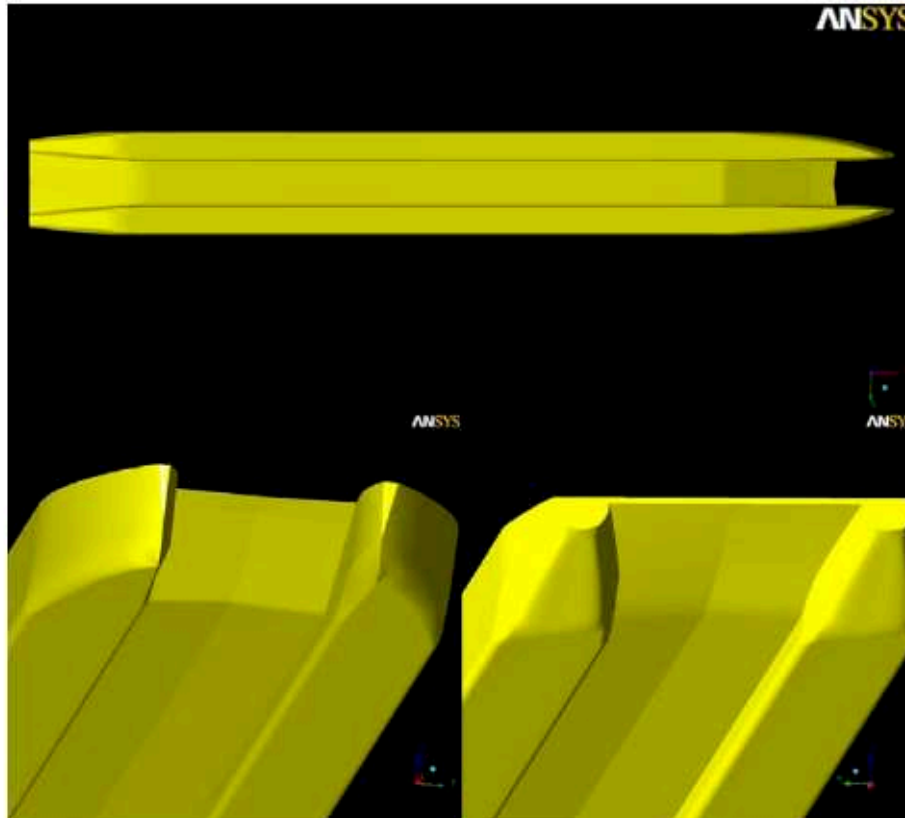


Abb. 22 Geometrie M1772

In der Abb. 22 wird die Geometrie der Ausgangsform in 3-dimensionaler Darstellung bis zur Ruhewasserlinie beschrieben. Die rechte untere Ansicht zeigt das Hinterschiff des Katamarans, welches durch die Berechnungen optimiert werden soll. Die genaue Beschreibung der Schiffsform kann dem Kapitel 2.1 entnommen werden.

Eine messtechnische Methode zur Visualisierung der Strömungen am Hinterschiff sind Farbanstrichversuche (Tiefwassertanks) bzw. Stromfadenversuche. Bei Modellversuchen mit auf dem Schiffskörper befestigten Wollfäden muss die Möglichkeit bestehen, das Verhalten der Stromfäden während der Fahrt des Modells fotografisch oder als Video (High-Speed-Camera) festzuhalten. Diese Möglichkeit besteht üblicherweise nur in Flachwassertanks die mit einem so genannten Fototunnel ausgestattet sind. Der Vorteil der Aufnahmen mit High-Speed-Cameras ist, dass instationäre Vorgänge wie sie häufig an Hinterschiffen auftreten, sichtbar gemacht werden können. In Abb. 23 sind die Ergebnisse aus dem Modellversuch und den numerischen Berechnungen dargestellt.



Abb. 23 Vergleich Stromfadenversuch mit numerischen Ergebnissen für M1772

Der Unterwasseraufnahme des fahrenden Katamarans ($V_{\text{Schiff}} = 1,111 \text{ m/s}$; $h = 5,0 \text{ m}$; $T = 3,0 \text{ m}$) wurden die Druckverteilung (Isolinien) und die Geschwindigkeitsvektoren (Tangentialer Vektor - Pfeile) im wandnahen Bereich überlagert. Für alle Berechnungen gilt, dass die am Modell auftretenden Drücke, infolge der „Fahrt“ des Schiffes, mit dem Staudruck der ungestörten Anströmung $\rho/2 \cdot (V_{\text{Schiff}})^2$ normiert werden. Am Übergang vom parallelen Mittelschiff zum Hinterschiff im Bereich des Anstieges der

Schnitte (Spanten) sind, wie erwartet, Unterdruckgebiete (blaue Isolinien) zu erkennen. Insgesamt wurde durch die Umströmung des Hinterschiffes ein gleichmäßiger Verlauf der Druckbeiwerte erzeugt.

Beim Vergleich der berechneten Vektoren der Geschwindigkeit in der Nähe des Schiffskörpers mit der Ausrichtung der Wollfäden ist eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung zu erkennen. Nur die Fäden in den blauen Kreisen zeigen Unterschiede. Beobachtungen im Fototunnel haben gezeigt, dass sich nicht bei allen Stromfäden ein stationärer Zustand einstellte. Die blauen Kreise (1 und 2) zeigen Gebiete am Hinterschiff, in denen die Stromfäden während der Aufnahme des Unterwasserfotos flatterten.

Im Bereich 3 (roter Kreis) zeigt die Richtung der Vektoren deutlich, dass hier die Strömungen aus dem Tunnelbereich mit der Umströmung der Rumpfe zusammenfallen. Es ist zu vermuten, dass in diesem Bereich mit Wirbelbildung bzw. Ablösung zu rechnen ist. Genaueren Aufschluss darüber können die Darstellung der Wandschubspannungen am Schiffsrumpf und die Visualisierung der Rückstromgebiete im Hinterschiff geben. Abb. 24 und Abb. 25 zeigen die kritischen Bereiche (grün markiert) am Hinterschiff des Modells M1772. In den gekennzeichneten Bereichen erreicht die Wandschubspannung sehr geringe Werte und es kommt zu Rückströmungen im Fluid. Beide Informationen können ein wichtiges Indiz für mögliche Ablösungen der Strömung sein.



Abb. 24 Wandschubspannungen, (Isolinien)

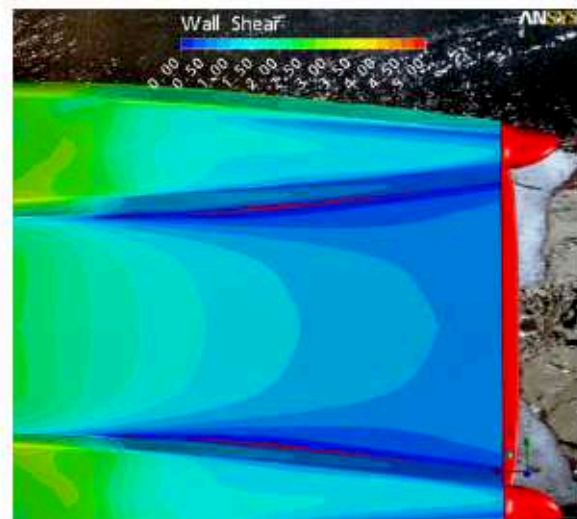


Abb. 25 Wandschubspannungen (Isoflächen)

Die Rückstromgebiete sind in Abb. 24 und Abb. 25 durch rote Isoflächen dargestellt. Sie treten an den Innenseiten der Rumpfe auf. Am Spiegel des Katamarans stellen sich Totwassergebiete ein. Die Stromliniendarstellung am Hinterschiff liefert Informationen darüber, wie sich die Zuströmung zum Propeller ausbildet. In den beiden folgenden Abbildungen sind die Stromlinien zum Propeller (rote Scheibe) dargestellt.

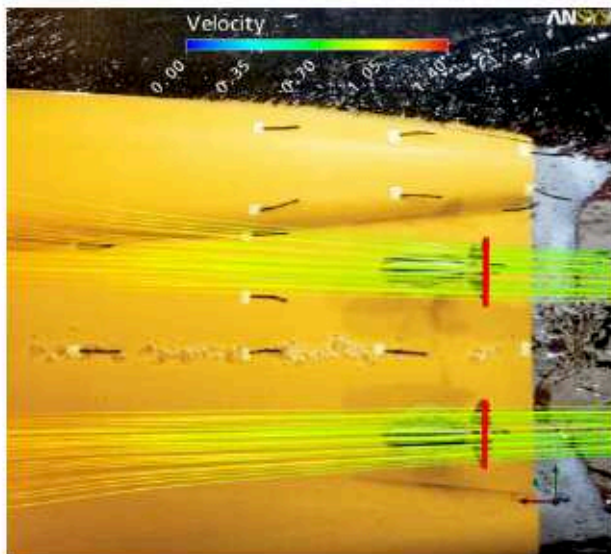


Abb. 26 Stromlinien zum Propeller (Blick von unten)

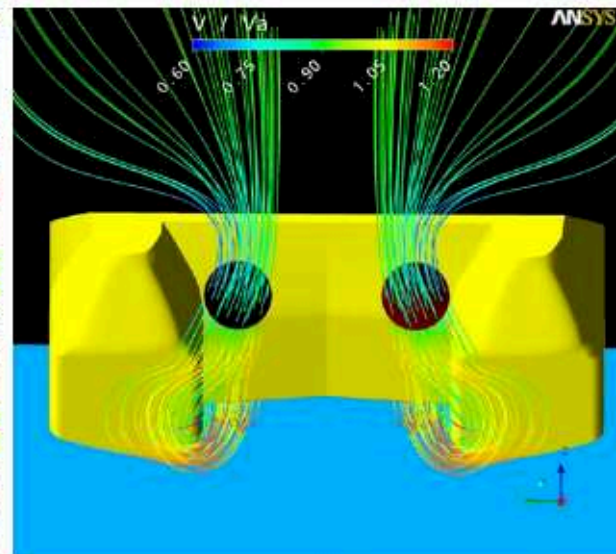


Abb. 27 Stromlinien (Blick von hinten)

Die Darstellung des Verhältnisses der lokalen Geschwindigkeit zur Anströmgeschwindigkeit in ausgewählten Schnittebenen vor dem Propeller zeigt die Ausbildung der örtlichen Strömungszustände durch die Fahrt des Schiffes (Abb. 28).

Unter dem Rumpf des Schiffes bilden sich Übergeschwindigkeiten von bis zu 20 % der Anströmgeschwindigkeit. Mit dem Anstieg der Spantlinien im Hinterschiff reduzieren sich die Übergeschwindigkeiten und es bildet sich eine verzögerte Strömung aus. In allen Schnittebenen ist an der Richtung der Geschwindigkeitsvektoren zu erkennen, dass die Strömung das Bestreben hat den Bereich zwischen den Rümpfen zu füllen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die CFD-Berechnungen mit der Ausgangsform M1772 keine gravierenden negativen Druck- und Geschwindigkeitserscheinungen offenbart haben.

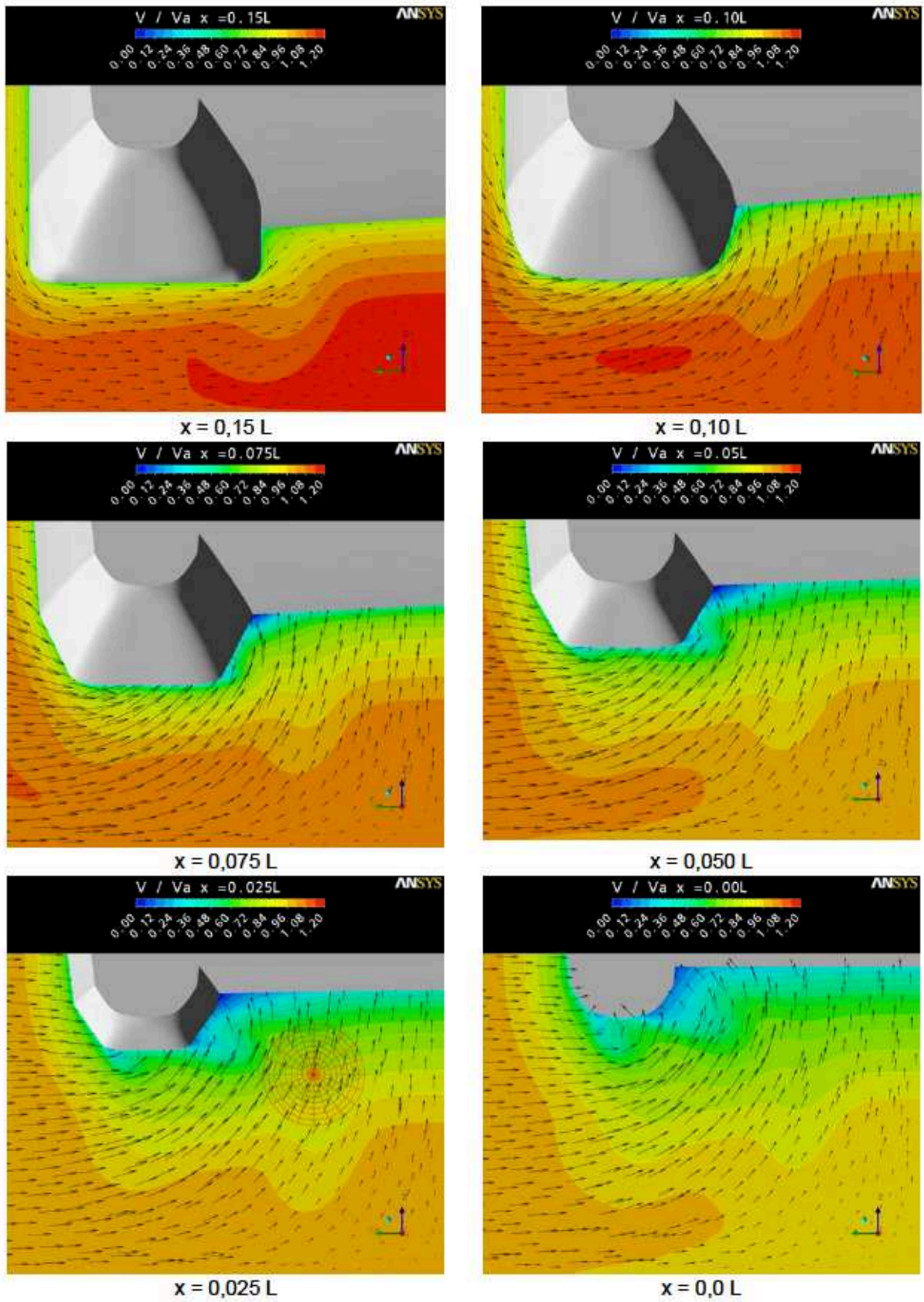


Abb. 28 v/v_{Schiff} an verschiedenen x-Koordinaten

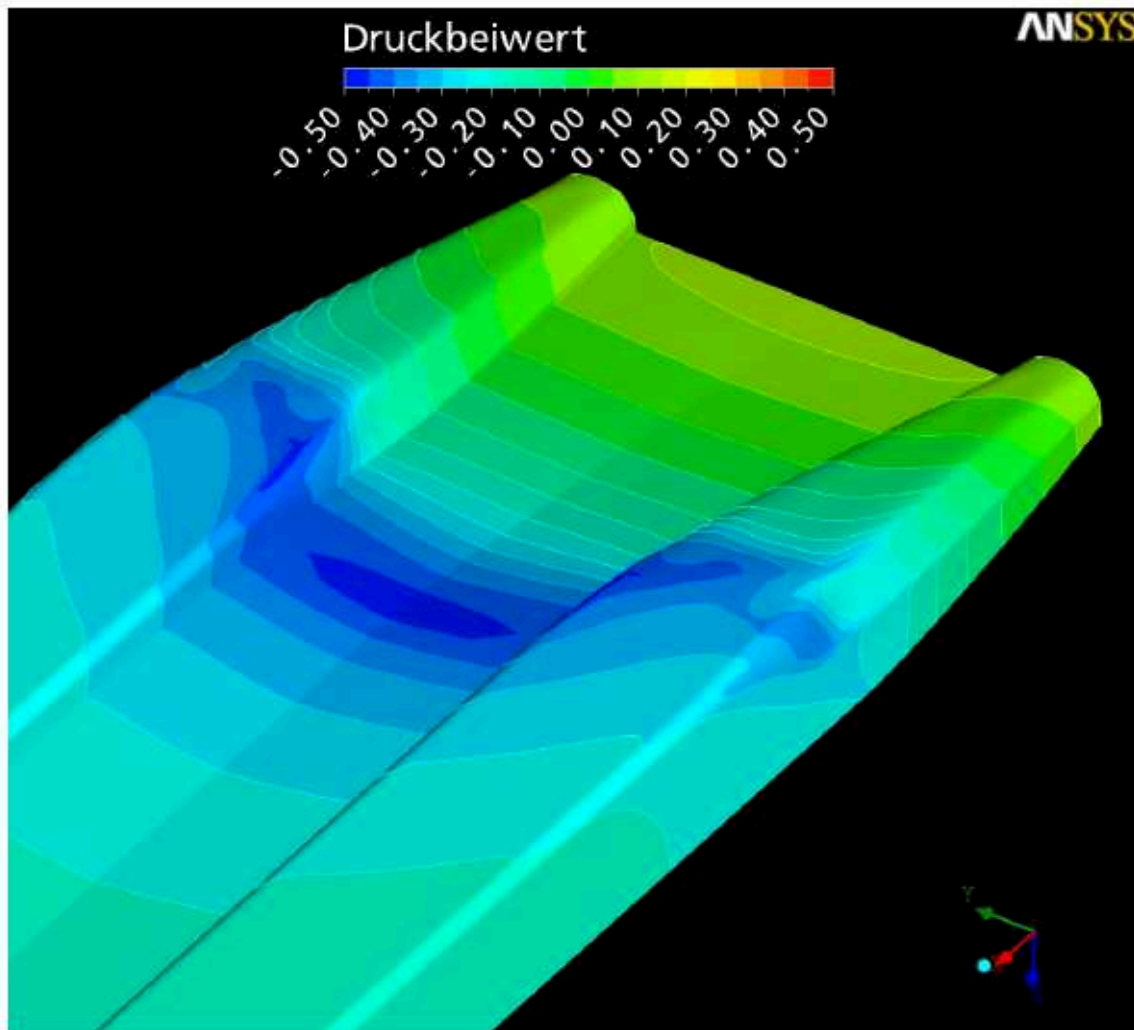


Abb. 29 Druckbeiwerte am Hinterschiff M1772

Eine hydrodynamische Optimierung hinsichtlich des Widerstandes könnte durch eine Reduzierung des Unterdruckgebietes (Abb. 29) am Übergang zum Hinterschiff erzielt werden. Dazu müsste der Anstieg der Linien in diesem Bereich flacher gestaltet werden. Ein Vergleich der berechneten Widerstände aller Formvarianten bestätigt die Güte des Entwurfes unter dem Aspekt des Leistungsbedarfes (Tabelle 2).

Tabelle 2: Berechnete Widerstandsanteile

Formvariante	Reibungswiderstand [N]	Viskoser Druckwiderstand [N]	Gesamtwiderstand [N]
M1772	8.7476	1.8385	10.5861
M1793B	8.6386	2.9732	11.6118
M1793C	8.7660	4.3738	13.1398
M1793E	8.8217	5.2328	14.0545

Die Ausgangsform M1772 erzeugt bei der Fahrt durch das Wasser den geringsten viskosen Druckwiderstand. Die Berechnung der Reibungswiderstände ergibt kaum Unterschiede, da die benetzte Oberfläche bei allen 4 Varianten nur geringfügig ab-

weicht. Ziel dieser Optimierung ist jedoch nicht die Widerstandsreduzierung, sondern die Optimierung des Zustromes zum Propeller, um die Fahrt des Schiffes auch unter extremen Flachwasserbedingungen zu garantieren. Mit dem Schiffslinienprogramm MultiSurf wurden unter Auswertung der Versuchsergebnisse weitere Formvarianten entworfen und für die numerische Untersuchung bereitgestellt.

2.3.1.3.3 Berechnungsfall Variante M1793B

In der Binnenschifffahrt werden zur Verbesserung des Zustromes zum Propeller und zur Verhinderung des Lufteinbruchs bei geringen h/T -Werten häufig getunnelte Hinterschiffsformen mit einer seitlich angeordneten Schürze eingesetzt. Bei der Modellvariante M1793B (Abb. 30) wurden die Propeller im Gegensatz zur Variante M1772 unter den seitlichen Rümpfen angeordnet. Die Rumpfformen wurden zur Verbesserung der Propellerzuströmung leicht getunnelt und zur Schiffsmitte asymmetrisch angeschrägt um die Zuströmung des Wassers aus der Schiffsmitte zu ermöglichen.

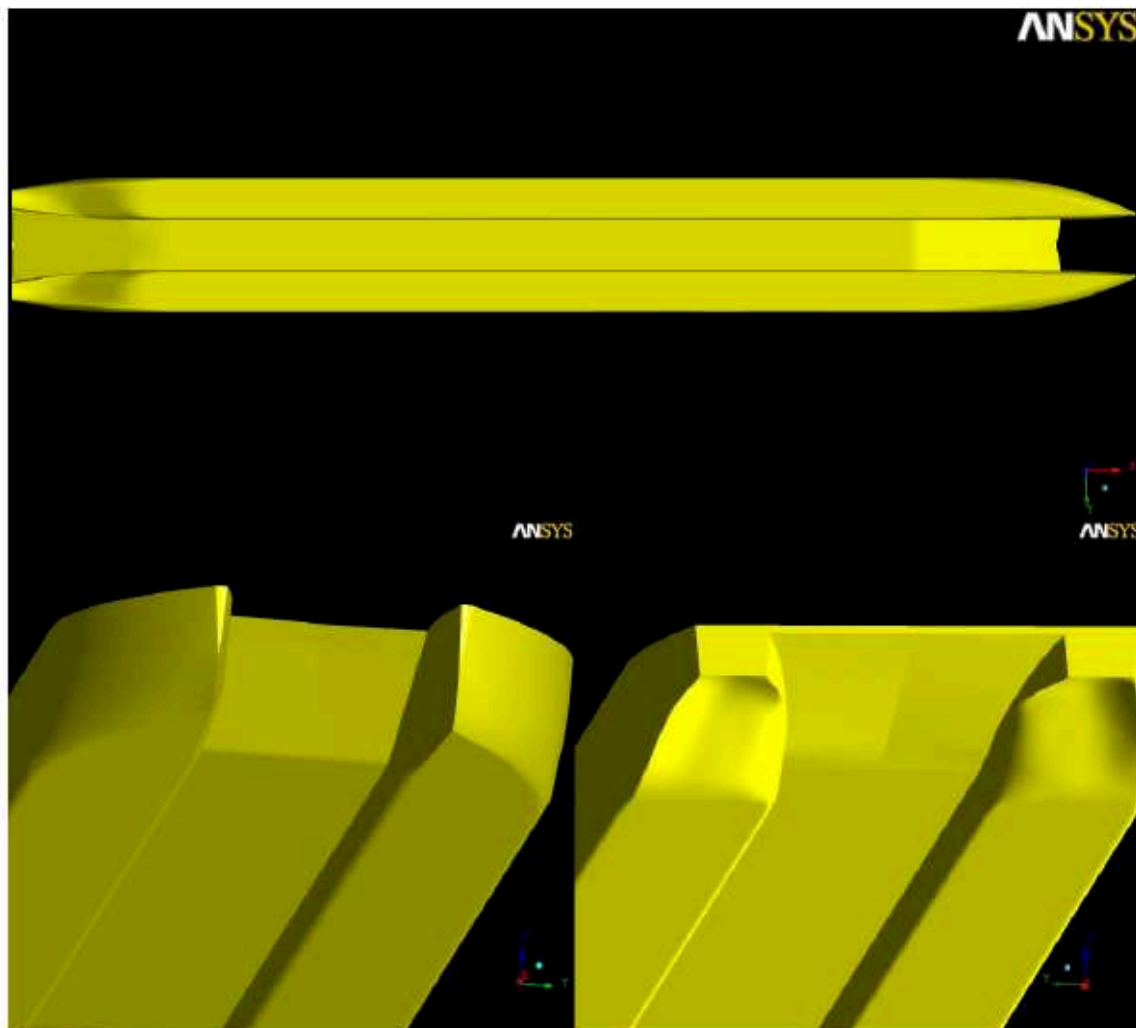


Abb. 30 Geometrie M1793B

Die sich aus der Umströmung des Schiffes ergebene Verteilung der Druckbeiwerte (Abb. 31) am Rumpf zeigt starke Unstetigkeitsstellen beim Übergang vom parallelen

Mittelschiff in die getunnelten Einzelrumpfe. Die Ursache dafür ist darin zu sehen, dass die Linien in diesem Bereich stark ansteigen, um den Propeller geometrisch zu integrieren. Diese Unterdruckgebiete und die in Abb. 32 dargestellten möglichen Ablösezonen (rote Isosurfaces) können eine Ursache für den Anstieg des Gesamtwiderstandes (ohne Wellenwiderstand) sein. Eine Auswertung der vektoriellen Darstellung der Geschwindigkeiten in Schiffsnähe (Abb. 32) zeigt, dass die Zuströmung zum Propeller durch die asymmetrische Gestaltung der Katamaranrümpfe nicht optimal realisiert wird. Schon in den Bereichen vor dem Propeller sind Rückstromgebiete zu erkennen, die den Propellerzustrom negativ beeinflussen. Das Ziel, das Wasser aus dem Bereich zwischen den Rümpfen dem Propeller zuzuführen, konnte durch diesen Entwurf nicht erreicht werden.

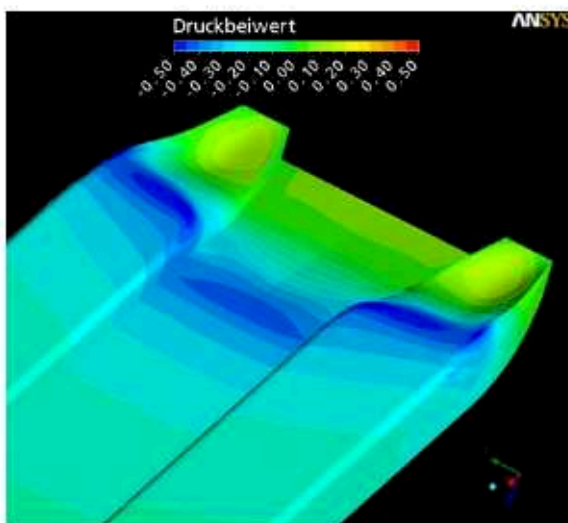


Abb. 31 Druckbeiwerte M1793B

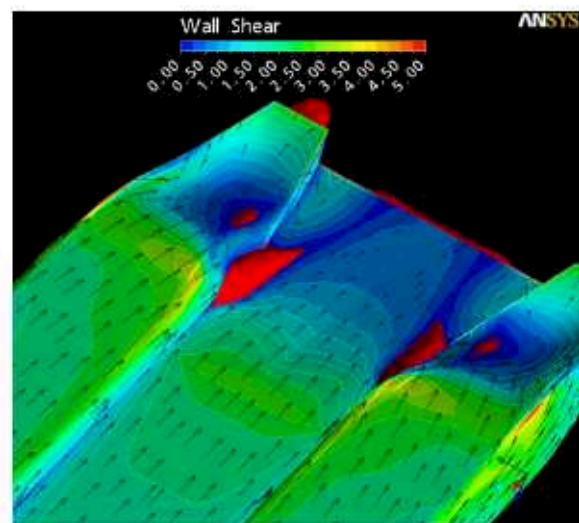


Abb. 32 Mögliche Ablösegebiete M1793B

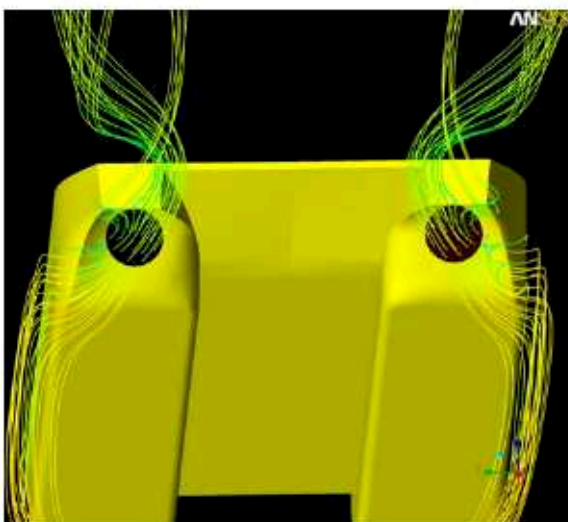


Abb. 33 Stromlinien vor und hinter dem Propeller

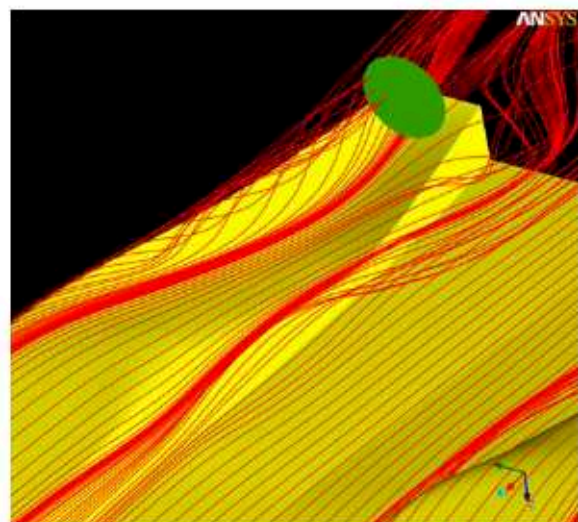
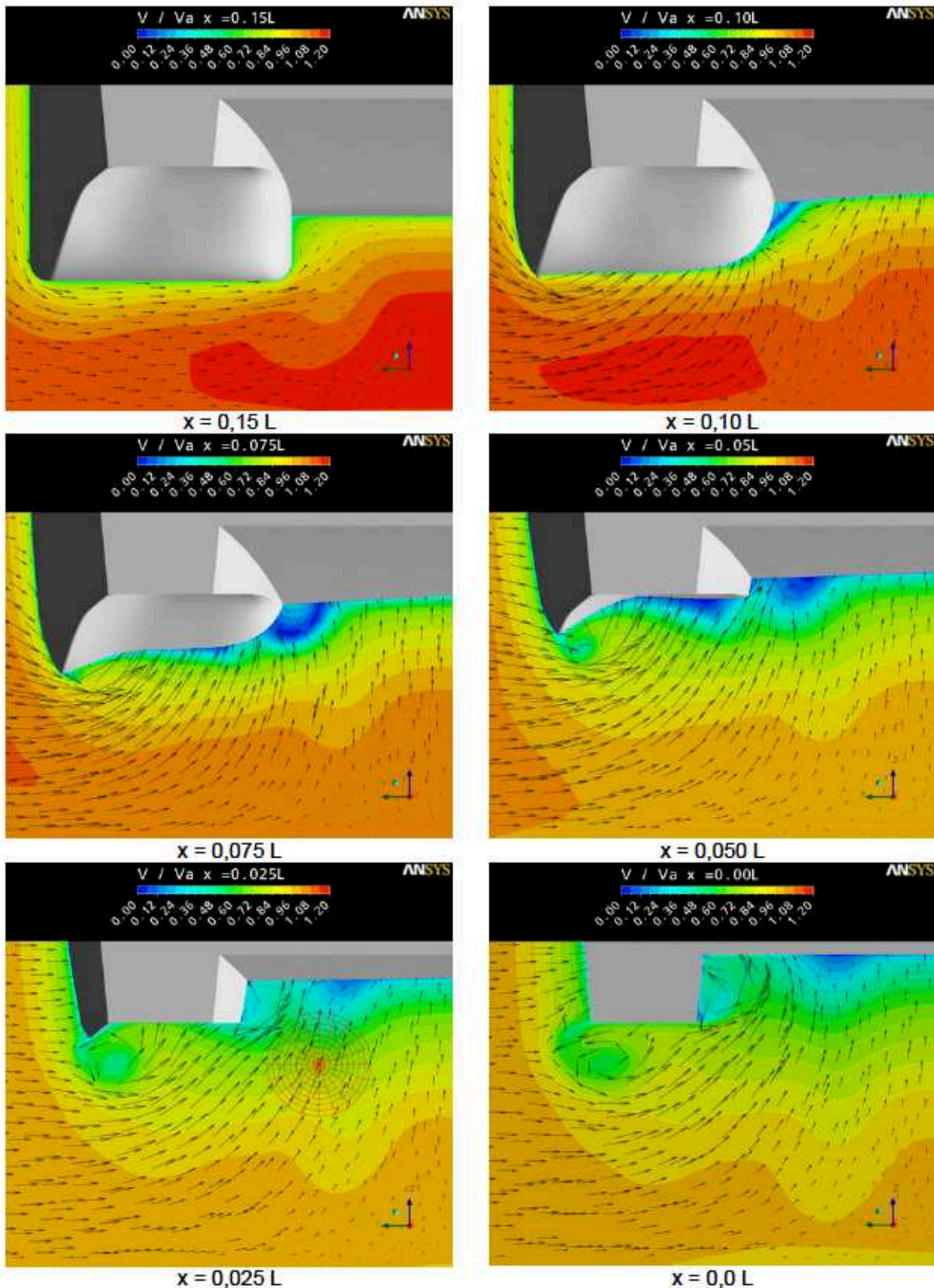


Abb. 34 Stromlinien am Schiffsrumpf

Abb. 35 v/v_{Schiff} an verschiedenen x-Koordinaten

Die Stromlinien in Abb. 33 und Abb. 34 zeigen sehr deutlich, dass das Wasser von der Schiffsseite dem Propeller zugeführt wird, so dass die Gefahr eines Luftein-

bruchs noch verstärkt wird. Die Isolinien aus dem Bereich zwischen den Rümpfen, die bei stationären Untersuchungen den Teilchenbahnen des Fluids entsprechen, verbleiben in diesem Bereich und verbessern die Anströmung des Propellers nicht. An der Tunnelkante entstehen Wirbel, die die Zuströmung zum Propeller zusätzlich negativ beeinflussen.

Die Geschwindigkeitsverteilung im Lösungsgebiet wird für 6 Schnittebenen als Isolinien (Betrag der Geschwindigkeit) und als Vektoren (Richtung der Geschwindigkeit) in Abb. 35 wiedergegeben. Die Position der Ebenen ist auf die Gesamtlänge des Schiffes bezogen. Alle Abbildungen bestätigen die Erkenntnisse über die schlechte Zuströmung zum Propeller. In den Ebenen $x = 0,0 L$ bis $0,05 L$ ist die Position und die Ausdehnung des durch die Tunnelkante erzeugten Wirbels zu erkennen.

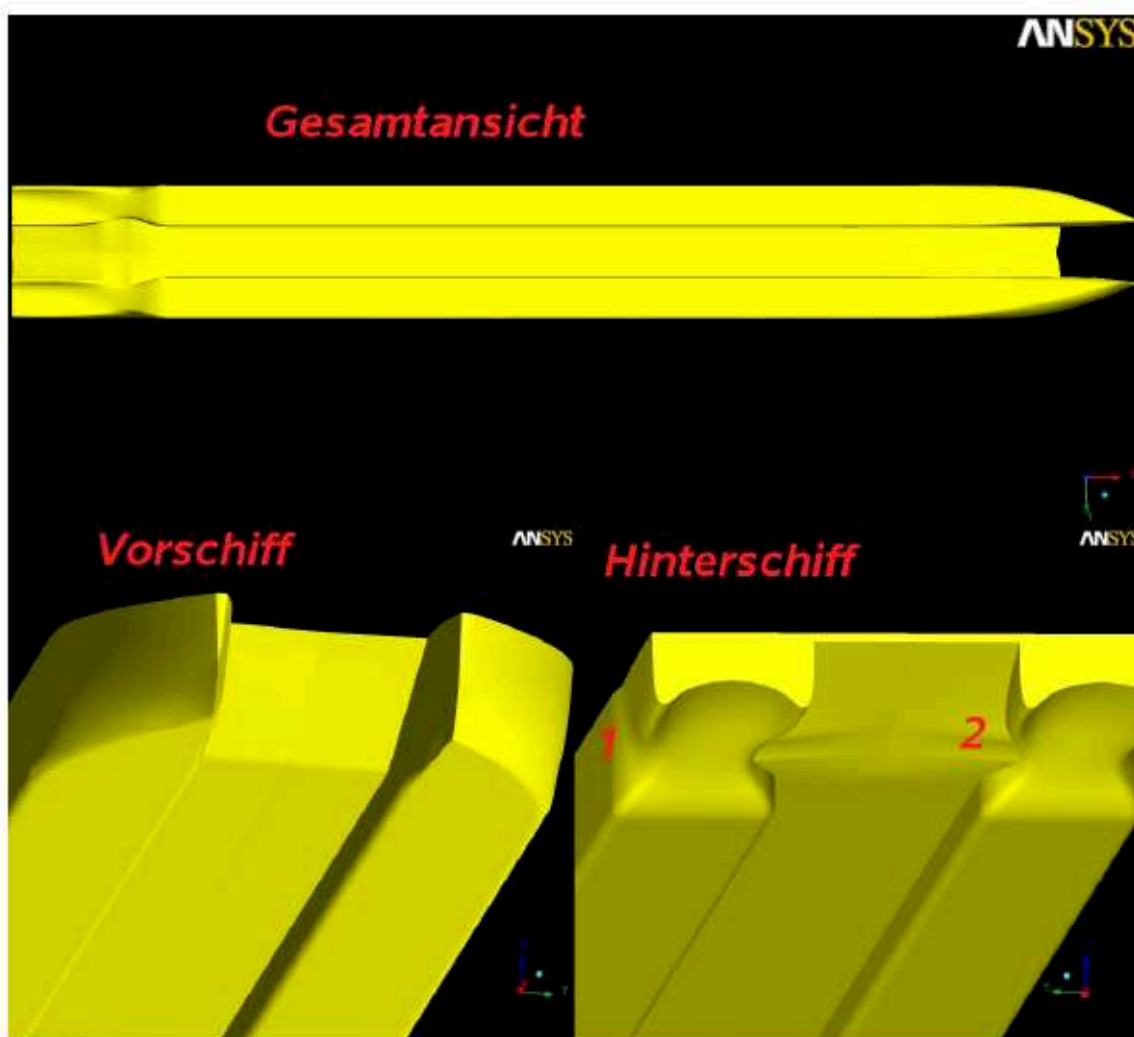


Abb. 36 Geometrie M1793C

2.3.1.3.4 Berechnungsfall Variante M1793C

Die Auswertung der Ergebnisse der CFD-Berechnungen für die Variante M1793B hat gezeigt, dass eine einfache Modifikation der Ausgangsform nicht ausreichend ist.

Das Hinterschiff wurde aus diesem Grund vollkommen neu gestaltet und wurde vor der Durchführung der Modellversuche mit CFD-Methoden analysiert. In Abb. 36 sind die geometrischen Veränderungen dargestellt.

Bei diesem Entwurf wurden die Hinterschiffslinien an der Außenseite der Rumpfe (siehe Position 1 in Abb. 36) eingeschnitten um den Propellerzustrom von der Seite zu verbessern. Die Einzelrumpfe wurden im Propellerbereich noch mehr getunnelt um zu verhindern, dass das seitlich zugeführte Wasser vor dem Propeller in den Bereich zwischen den Seitenkörpern abfließt. Die Gestaltung der Innenschürzen des Tunnels (siehe Position 2 in Abb. 36) soll einen Zufluss des Wassers aus dem Kanal zwischen den seitlichen Rümpfen des Katamarans ermöglichen.

Der Vergleich der mit der Schiffsgeschwindigkeit normierten Beiwerte des Druckes für die Variante M1793B (Abb. 38) und die Variante M1793C (Abb. 37) zeigt, dass durch die leicht veränderten Linien im Kanal zwischen den Rümpfen eine verbesserte Verteilung der Druckbeiwerte in diesem Bereich (siehe Position 2 in Abb. 37 und Abb. 38) erzielt werden konnte. Jedoch ist auch zu erkennen, dass die Ausprägung des Unterdruckgebietes beim Übergang vom Mittelteil des Schiffes zum Heck (siehe Position 1 in Abb. 37 und Abb. 38) nicht verbessert werden konnte.

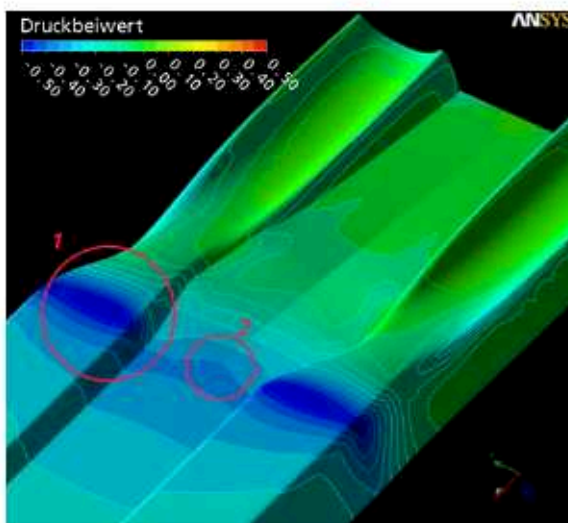


Abb. 37 Druckbeiwerte M1793C

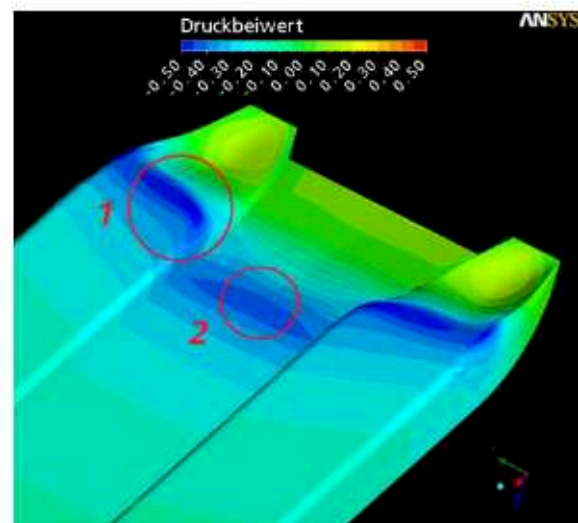


Abb. 38 Druckbeiwerte M1793B

Die Lokalisierung möglicher Ablösezonen durch die Wandschubspannungen und die Rückstromgebiete ist in Abb. 39 und Abb. 40 vergleichend dargestellt. Die Ausdehnung der Ablösezone an der inneren Tunnelkante (siehe Position 2 in Abb. 39 und Abb. 40) konnte zwar bei der Version 1793C verringert werden, jedoch ist zu vermuten, dass ein sanfterer Einlauf der Linien von der Innenseite zum Tunnel der Seitenkörper eine Verbesserung der Zuströmung erzielen wird. Die Vektordarstellung der Geschwindigkeit in der Nähe am Schiffskörper zeigt, dass durch die stärkere Ausprägung der Tunnelkanten das im Tunnel vorhandene Wasser nicht zwischen die Außenkörper abfließt (siehe Position 1 in Abb. 39 und Abb. 40). Das Einziehen der

Schiffslinien an der Außenseite der Rumpfe hat eine gleichmäßigere Zuströmung (siehe Position 3 in Abb. 39 und Abb. 40) in den Propellertunnel zur Folge.

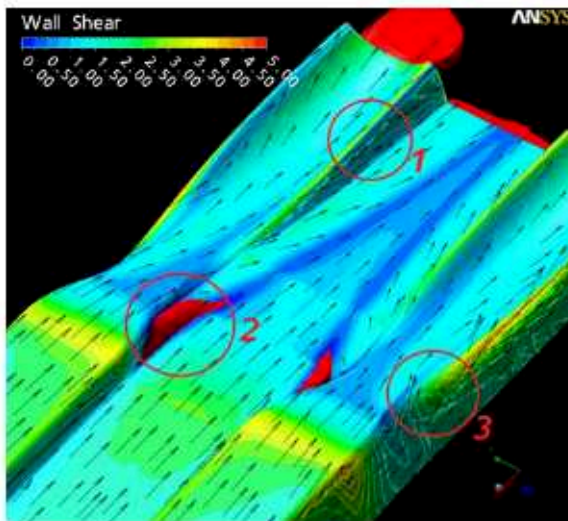


Abb. 39 Mögliche Ablösegebiete M1793C

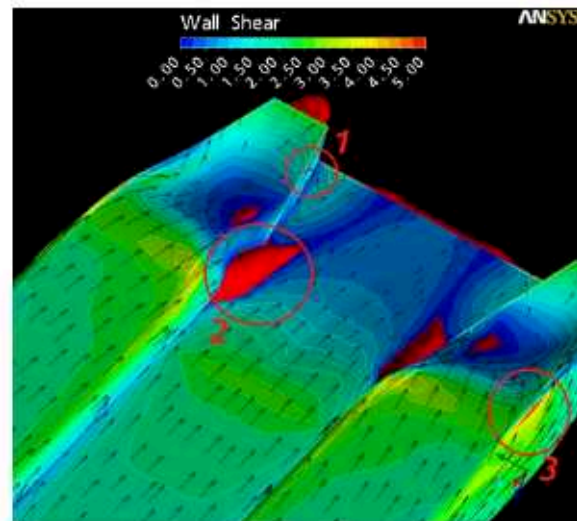


Abb. 40 Mögliche Ablösegebiete M1793B

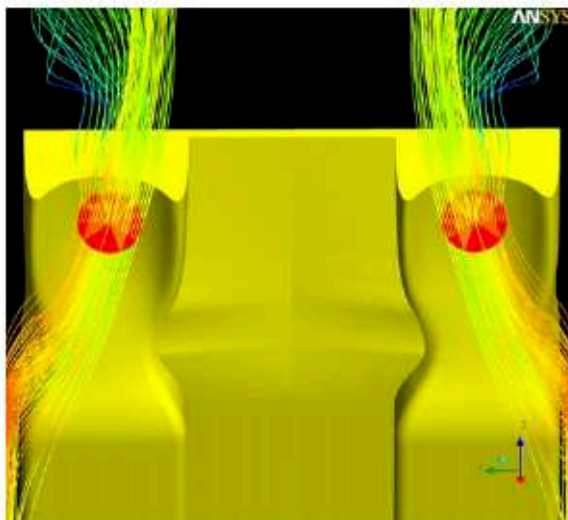


Abb. 41 Stromlinien vor und hinter dem Propeller

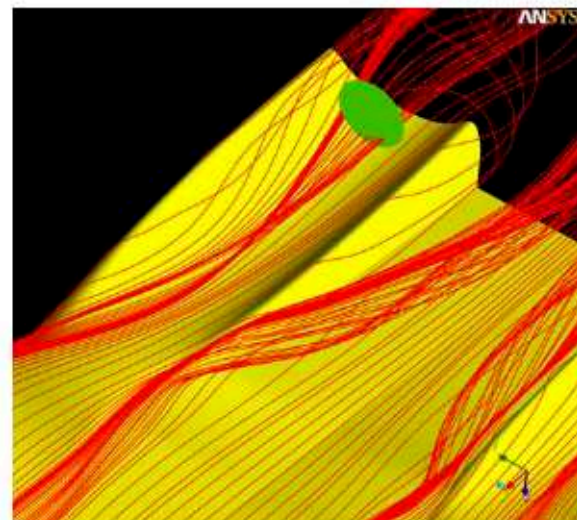


Abb. 42 Stromlinien am Schiffsrumpf

Die Stromlinien zum Propeller (Abb. 41) zeigen, dass der überwiegende Teil des Wassers in der Propellerebene (rote Kreisscheibe) von der Seite zugeführt wird. Jedoch ist bei der Interpretation der Ergebnisse zu beachten, dass bei den CFD-Berechnungen kein Propulsor implementiert wurde. Die Sogwirkung des Propellers kann also noch zu einer geringen Veränderung des Zustromes führen. Die Wirbelbildung an der Außenkante des Tunnels konnte durch den seitlichen Einzug der Linien verringert werden, ist aber teilweise noch vorhanden. Die Stromlinien in Abb. 42 zeigen, dass es nicht gelungen ist, das Wasser aus dem mittleren Bereich dem Propeller zuzuführen. Der Abfluss des Wassers aus dem Tunnel wurde jedoch größtenteils verhindert. Die Darstellung der Schnittebenen lässt eine Wirbelbildung durch die Tunnelkante erst sehr weit hinten am Heck erkennen (Abb. 43).

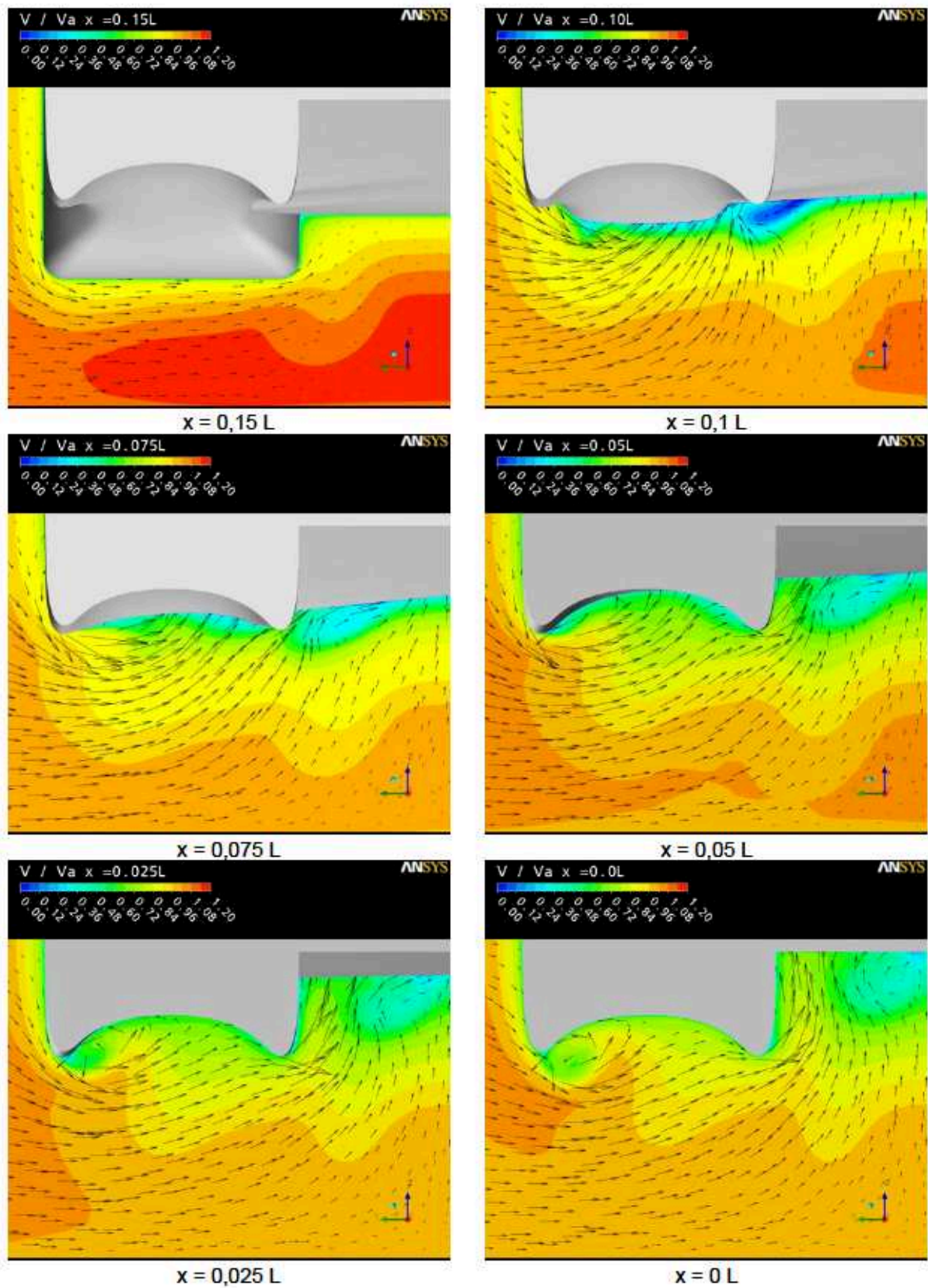


Abb. 43 v/v_{Schiff} an verschiedenen x-Koordinaten

2.3.1.3.5 Berechnungsfall Variante M1793E

Die geometrischen Veränderungen der Variante M1793E konzentrierten sich auf eine bessere Anpassung der inneren Tunnelschürze. Die Tunnelkante an der Innenseite (Position 1 in Abb. 44) wurde weiter in die Schiffsmitte verlagert um eine ungehinderte Zuströmung zur Propellerebene zu erhalten. Der seitliche Einzug aus der Variante M1793C wurde beibehalten, da sich diese geometrische Anpassung zur Verbesserung der Umströmung in diesem Bereich als geeignet erwiesen hat.

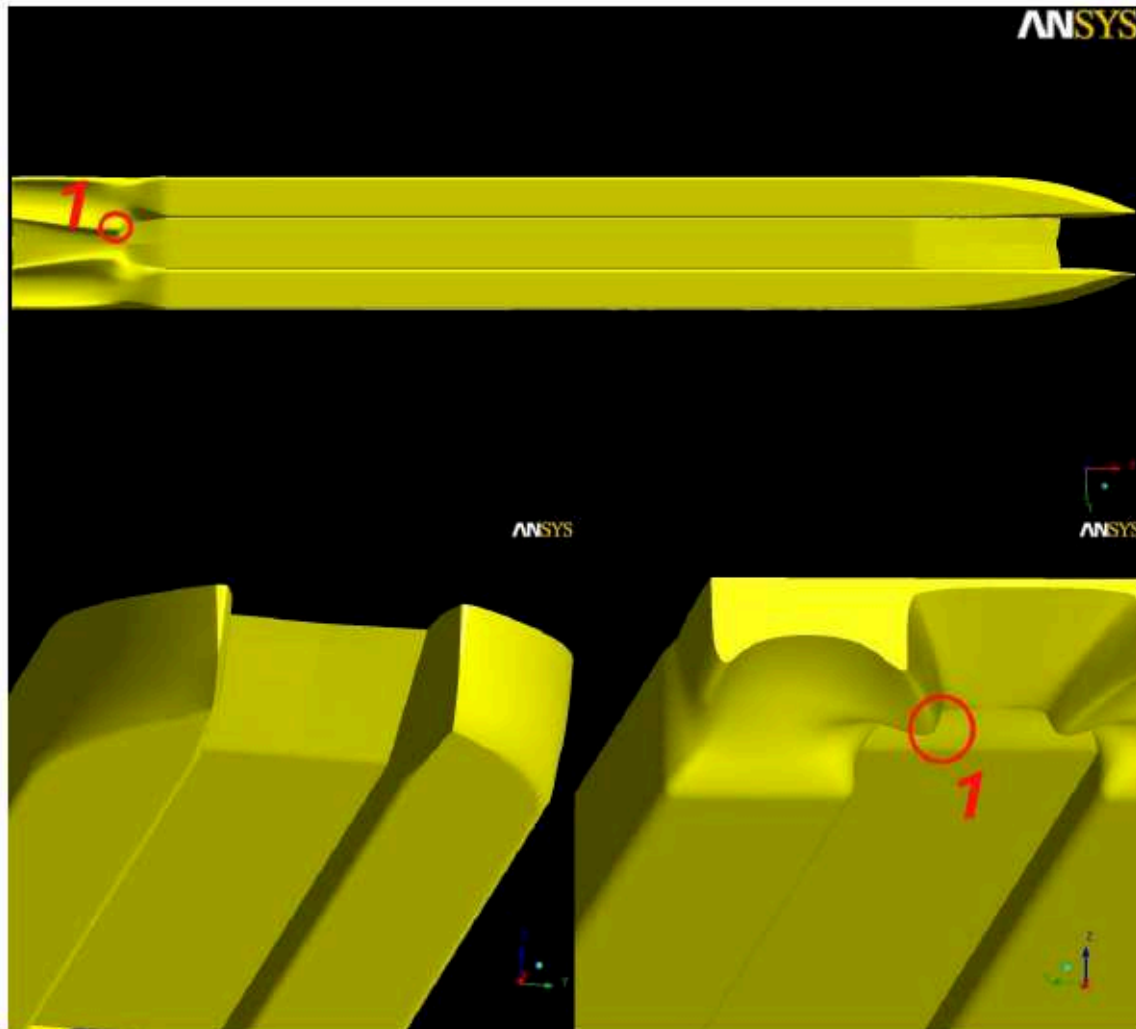


Abb. 44 Geometrie M1793E

Die Druckbeiwerte am Hinterschiff lassen eine Unstetigkeit am Rumpfboden im Bereich der hinteren Schulter des Katamarans (Position 1 in Abb. 45) erkennen. Zusätzlich entsteht gegenüber der Vorversion ein kleines Unterdruckgebiet am Eintritt der inneren Tunnelkanten (Position 2 der Abb. 46). Die weitere Öffnung des inneren Tunnelbereiches zur Mitte des Schiffes hat nicht dazu geführt, dass das Ablösegebiet (Position 1 in Abb. 46) vollständig verschwindet.

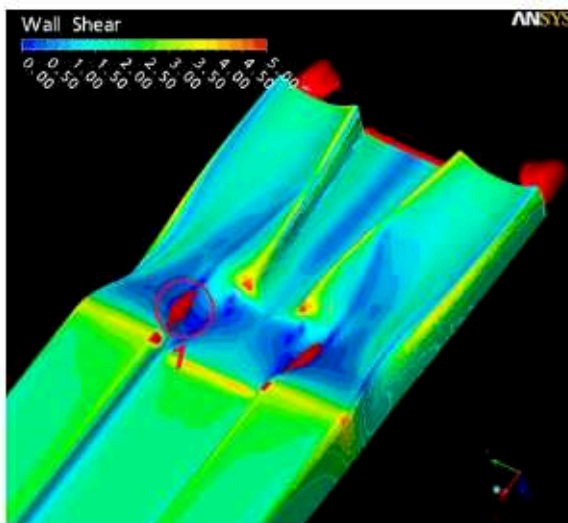


Abb. 45 Druckbeiwerte M1793E

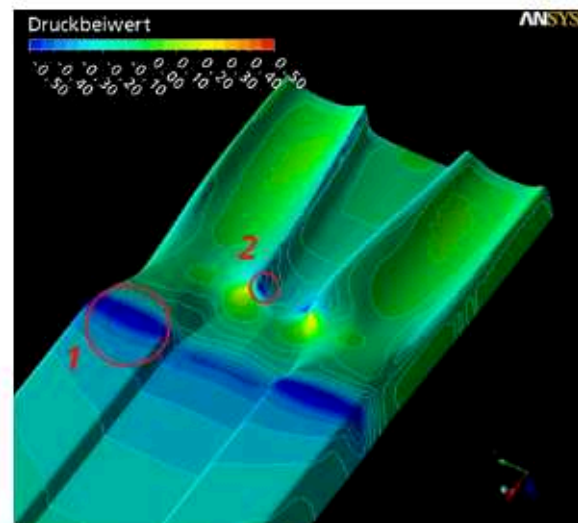


Abb. 46 Mögliche Ablösegebiete M1793E

Die Visualisierung der Isolinien im geringen Abstand zum Schiffskörper (Abb. 48) zeigt, dass es gelungen ist, durch die konstruktiven Veränderungen, Teile des Wassers aus dem Kanal zwischen den Rümpfen zum Propellertunnel zu führen. Insbesondere bei extremem Flachwasser wirkt sich diese Maßnahme positiv auf die Zuströmung zum Propeller aus. Die Isolinien zur angenommenen Propellerkreisfläche bestätigen, dass der Hauptteil, der dem Propeller zugeführten Wassermenge von der Seite des Schiffes kommt.

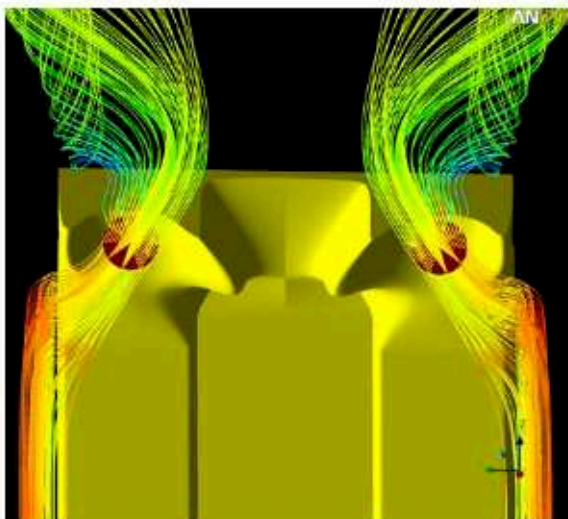


Abb. 47 Stromlinien vor und hinter dem Propeller

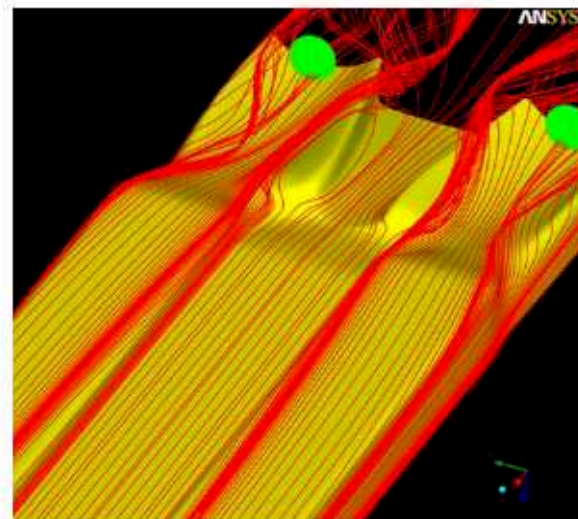
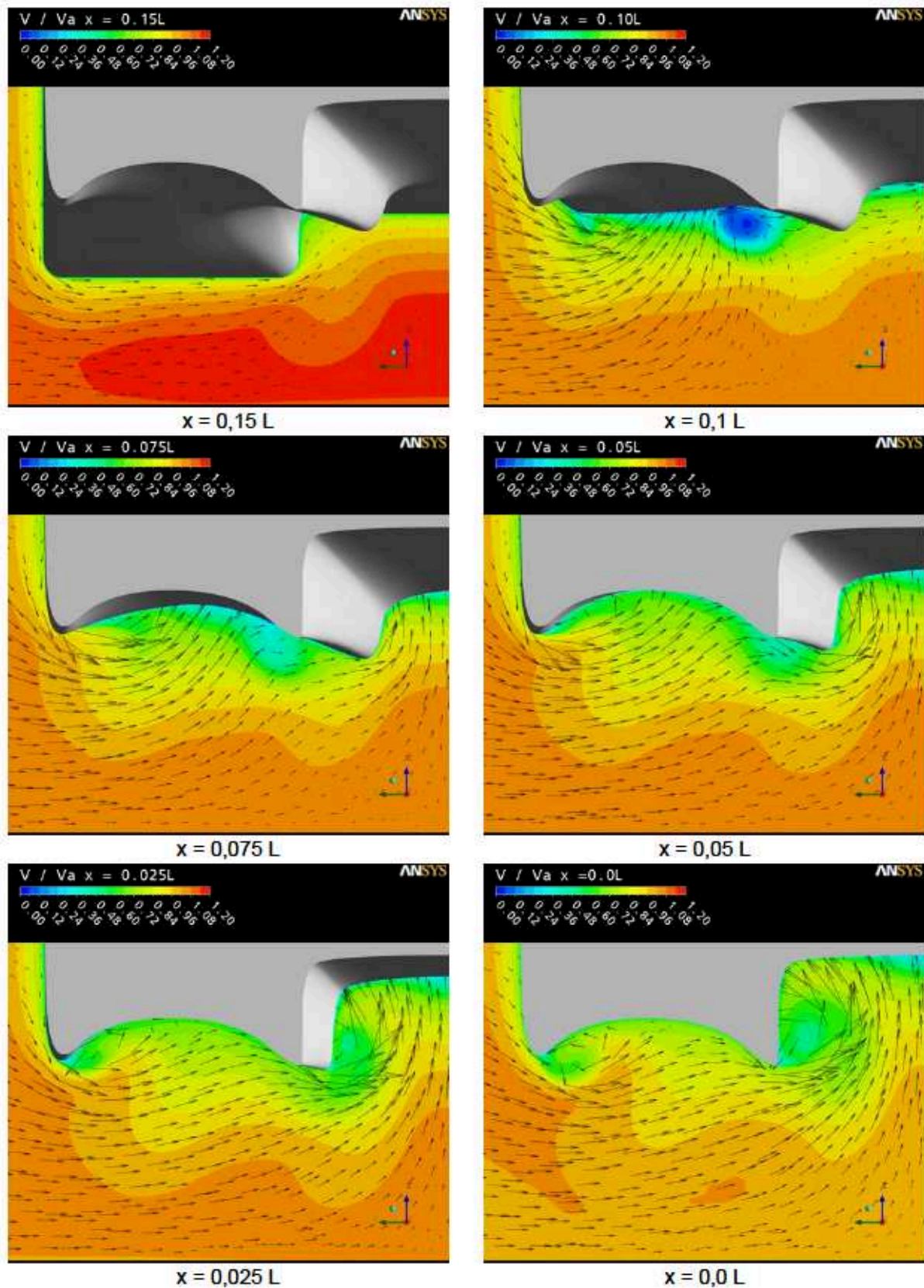


Abb. 48 Stromlinien am Schiffsrumpf

Abb. 49 zeigt eine vergleichbare Charakteristik der Strömungsverteilung am Hinterschiff, wie die der Variante M1773C. Im Bereich der Propellerebene entsteht durch die Tunnelkantenumströmung ein Wirbel, der die Zuströmung zum Propeller negativ beeinflussen kann.

Abb. 49 v/v_{Schiff} an verschiedenen x -Koordinaten

Numerische Untersuchungen dieser Modellvariante M1793E bei extremen Flachwasserbedingungen ($h/T = 1,2$) zeigen, dass es durch die Änderung der Schiffslinien

am Heck gelungen ist, das Wasser aus dem Tunnel zwischen den Teilrümpfen dem Propeller zu zuführen (Abb. 50).

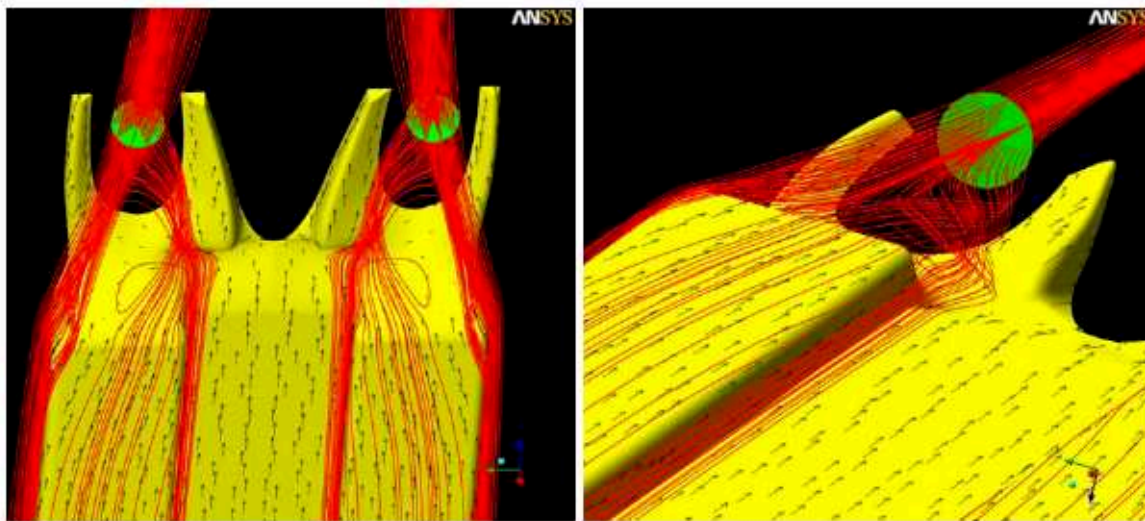


Abb. 50 Stromlinien zur Propellerebene

2.3.2 Modellversuche

Zur quantitativen Bestimmung der Propulsionsleistung wurde eine große Zahl von Modellversuchen für die verschiedenen Formvarianten für unterschiedliche Kombinationen von Tiefgang und Wassertiefe im großen Schlepptank des DST (Länge = 190 m, Breite = 9,8 m) durchgeführt. Tabelle 3 gibt eine Übersicht über die Modellversuche.

Zunächst wurden für die ersten drei Varianten (M1772, M1793A und M1793B) Widerstands- und Propulsionsversuche bei Wassertiefen von 5 m und 17,6 m durchgeführt. Die Wassertiefe 17,6 m entspricht bei dem gewählten Modellmaßstab ($\lambda = 16$) einem Wasserstand von 1,1 m im Versuchstank; dies ist auch der regulär maximale Wasserstand für Modellversuche. In dem untersuchten Geschwindigkeitsbereich bleibt die Tiefenfroudezahl allerdings unter 0,5. Flachwassereffekte können deshalb vernachlässigt werden. Die Wassertiefe von 5 m entspricht den typischen Fahrtbedingungen auf dem Rhein bis Duisburg. In den weiteren Varianten M1816A-C wurde der Schwerpunkt der Untersuchungen auf geringe Wassertiefen gelegt. Der Semikatamaran-See könnte seine Vorteile im Durchgangsverkehr vor allem dann ausspielen, wenn damit ein Verkehr rheinaufwärts hinter Köln möglich wäre, wo konventionelle Küstenmotorschiffe nur sehr eingeschränkt eingesetzt werden könnten.

Tabelle 3: Übersicht über die Modellversuche

Variante	Wassertiefe [m]	Tiefgang [m]	Propeller (P259)	Düse
1	5	3	Druckpropeller	ohne
1	17,6	3	Druckpropeller	ohne
1	17,6	3	Zugpropeller	ohne
2	5	3	Druckpropeller	D342
2	17,6	3	Druckpropeller	D342
2	4	3	Druckpropeller	D342
2	17,6	3	Druckpropeller	ohne
2	5	3	Druckpropeller	ohne
2	5	1,75	Druckpropeller	ohne
2	4	1,75	Druckpropeller	ohne
3	5	3	Druckpropeller	D342
3	4	3	Druckpropeller	D342
3	4	1,75	Druckpropeller	D342
3	17,6	3	Druckpropeller	D342
3	17,6	3	Druckpropeller	ohne
3	5	3	Druckpropeller	ohne
4	5	3	Druckpropeller	D342
4	2,1	1,84	Druckpropeller	D342
4	5	1,84	Druckpropeller	D342
5	5	3	Druckpropeller	D342
5	2,5	1,84	Druckpropeller	D342
5	5	4	Druckpropeller	D342
5	4	3,5	Druckpropeller	D342
6	2,5	1,84	Druckpropeller	D342
6	5	3	Druckpropeller	D342

2.3.2.1 Prognoseverfahren

Im Rahmen der Modellversuche wurde versucht, den Formfaktor für das 3D-Prognoseverfahren der ITTC nach der Hughes-Prohaska-Methode zu bestimmen. Wie in vorangegangenen Untersuchungen am DST, zeigte sich dies als kaum durchführbar, weil der Formfaktor sehr stark von der Wassertiefe und dem Tiefgang abhängt. Die Prognose der Großausführungsergebnisse wurde deshalb schließlich anhand des im DST bewährten 2D-Verfahrens durchgeführt.

Zur Bestimmung des Selbstpropulsionspunktes wurden während einer Versuchsfahrt drei verschiedene Drehzahlen eingestellt, so dass sich Restkräfte (Schleppkräfte) etwas kleiner und etwas größer null einstellten. Aus diesen Werten wurde der Selbstpropulsionspunkt interpoliert. Die Reynoldsähnlichkeit im Propulsionsversuch wurde durch den Reibungsabzug

$$F_D = \frac{1}{2} \rho V_M^2 S_M (c_{FM} - c_{FS} - c_A)$$

mit

$$c_F = \frac{0,075}{(\log \text{Re} - 2)^2} \quad (\text{Reibungsbeiwert})$$

$$\text{Re} = \frac{V L_{\text{WL}}}{\nu} \quad (\text{Reynoldszahl})$$

$$c_A = 0,0002 \quad (\text{Korrelationsbeiwert})$$

sichergestellt (Der Index M steht für das Modell und S für das Schiff). Aus dem im Selbstpropulsionspunkt ermittelten Moment kann direkt die Propulsionsleistung für die Großausführung prognostiziert werden:

$$P_{\text{DS}} = 2\pi Q_M n_M \lambda^{3,5} \frac{\rho_S}{\rho_M} m_P m_D$$

Hierin sind m_P und m_D Maßstabsfaktoren für den Propeller und die Düse.

2.3.2.2 Ergebnisse

Die aus den Modellversuchen prognostizierten Propulsionsleistungen werden in den folgenden Diagrammen nach Wassertiefe gegliedert dargestellt.

Die Versuche bei 17,6 m Wassertiefe entsprechen Versuchen im Tiefwasser. Der Flachwassereffekt ist hier so klein, dass er vernachlässigt werden kann. Die Tiefenfroudezahl wird nicht größer als 0,5. Zudem ist im vorgesehenen Fahrtgebiet im Englischen Kanal und in der Nordsee kein echtes Tiefwasser anzufinden. Die Ergebnisse zeigt Abb. 51.

Es zeigt sich hier, dass die Leistungswerte für die Versionen 1, 2 und 3 sehr dicht aneinander liegen. Auch wenn die interpolierten Kurven u. U. einen Unterschied suggerieren, kann hier im direkten Vergleich der einzelnen Messpunkte kein signifikanter Vorteil bei einer Variante gefunden werden. Ein deutlich höherer Leistungsbedarf ist dagegen bei der Variante 1 zu finden, wenn der Propeller als Zugpropeller gefahren wird, d. h. der Propeller vor dem Azipod sitzt. Dies kann dadurch erklärt werden, dass der vorne liegende Propeller das lokale Nachstromfeld des Azipodantriebs nicht nutzen kann.

Bei den Varianten 2 und 3 ohne Düse ist ebenfalls ein deutlich höherer Leistungsbedarf festzustellen. Während bei Seeschiffen i.d.R. keine Düsen Verwendung finden, bringen die Düsen bei dieser Hinterschiffsform auch im Tiefwasser einen Gewinn.

Propulsionsversuche

Wassertiefe $h = 17,60$ m
Tiefgang $T = 3,00$ m

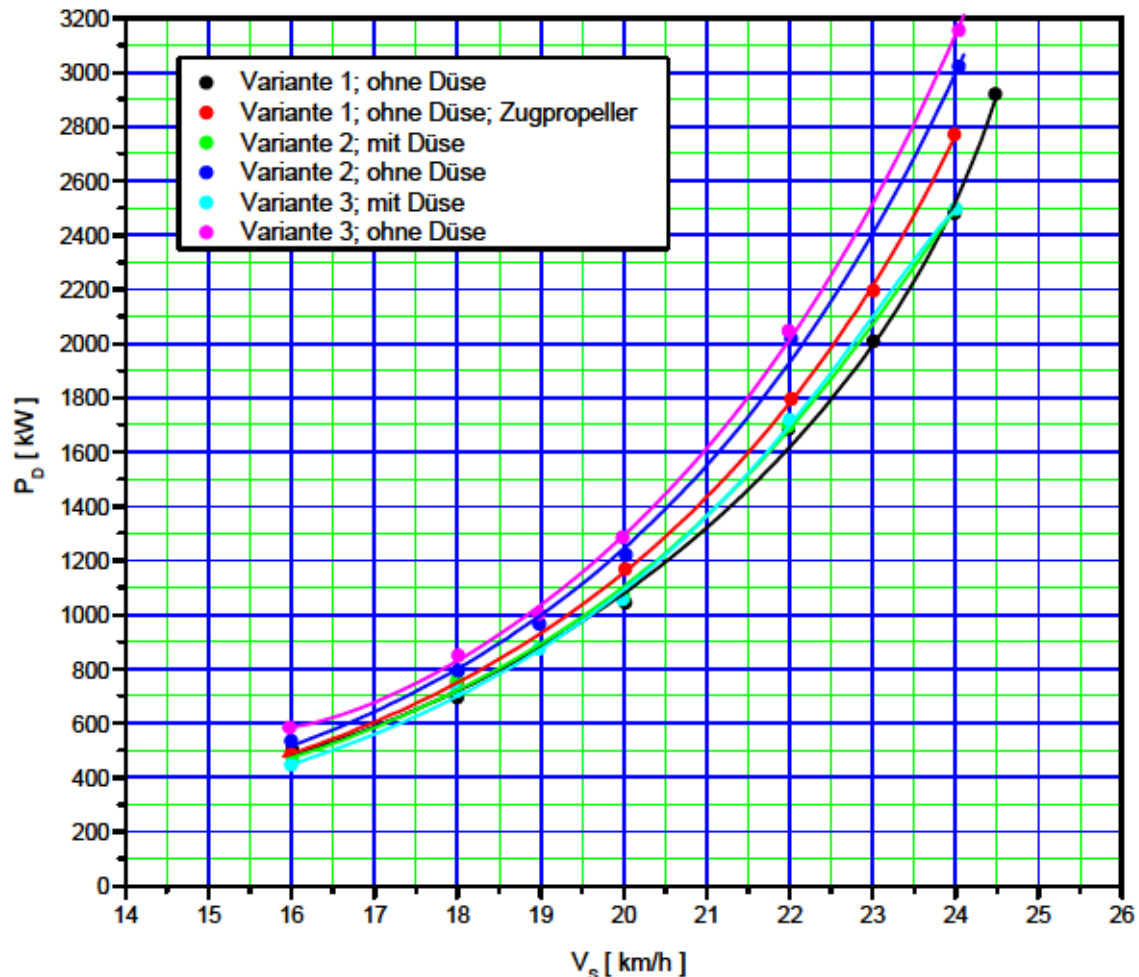


Abb. 51 Prognostizierter Leistungsbedarf bei einer Wassertiefe von 17,6 m.

In Abb. 52 sind die prognostizierten Propulsionsleistungen für 5 m Wassertiefe aufgetragen. Dabei gibt es drei Gruppen für unterschiedliche Tiefgänge (1,75 m, 3 m und 4 m). Im Rhein kann ganzjährig mit einer Wassertiefe von 5 m bis Duisburg gerechnet werden, zeitweise auch bis Köln. Diese Wassertiefe ist also charakteristisch für die Rheinschifffahrt bis Duisburg. Für einen Tiefgang von 3 m zeigen sich, v. a. bei höheren Geschwindigkeiten, Vorteile der Variante 3 (mit Düse) gegenüber den Varianten 1 und 2. Die Varianten 4 bis 6 zeigen bei 5 m Wassertiefe einen deutlich höheren Leistungsbedarf. Sie wurden speziell entwickelt, um eine Fahrt bei extrem wenig Tiefgang zu ermöglichen. Es zeigt sich, dass damit kein guter Kompromiss hinsichtlich der Verwendbarkeit bei mäßiger Wassertiefe und größerem Tiefgang gefunden wurde. Zwei weitere ergänzende Messungen für die Tiefgänge 4 m und 1,75 m sind ebenfalls dokumentiert.

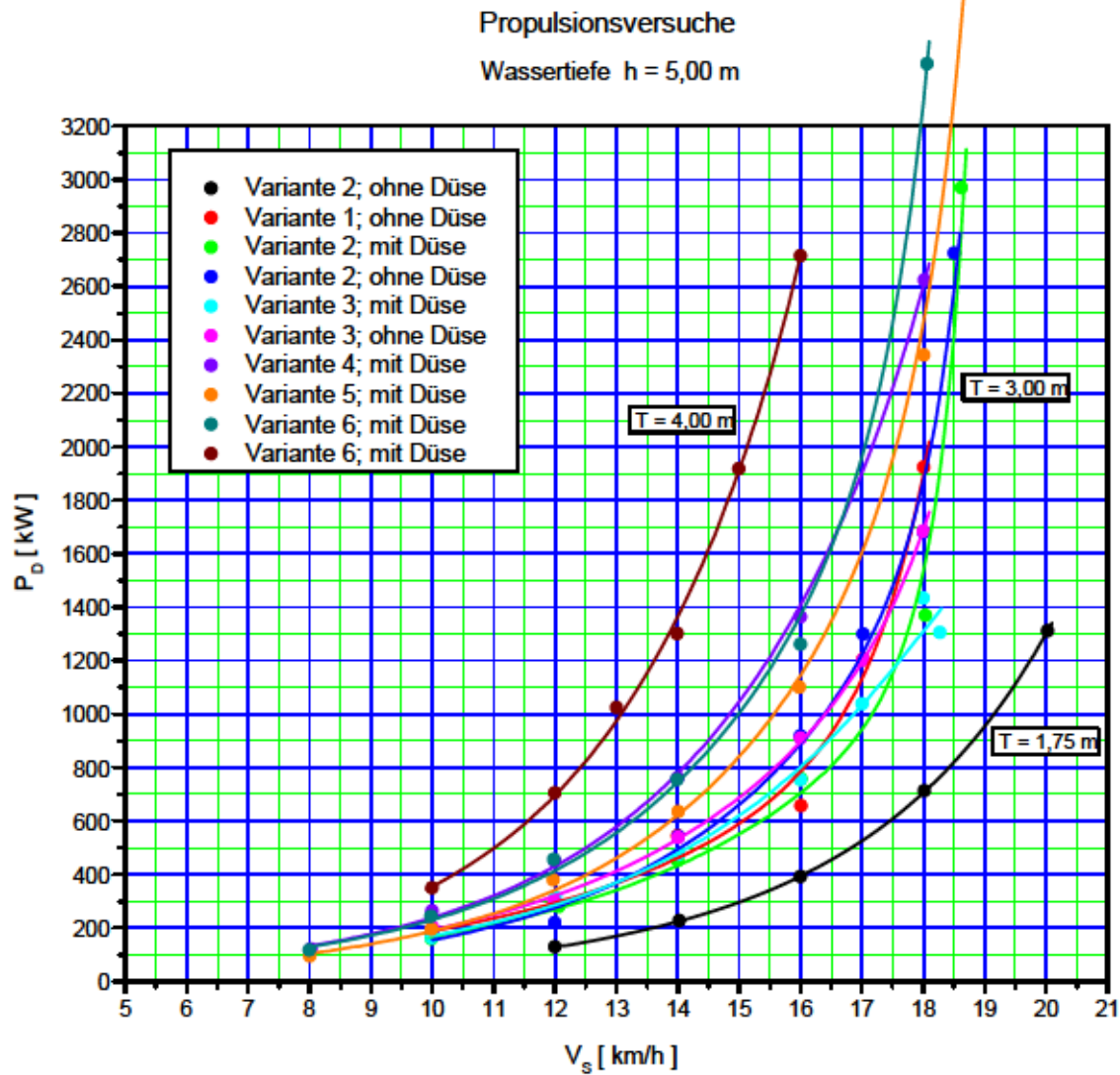


Abb. 52 Prognostizierter Leistungsbedarf bei einer Wassertiefe von 5 m.

In weiteren Untersuchungen wurde die Wassertiefe nochmals reduziert. Abb. 53 zeigt die prognostizierte Propulsionsleistung für eine Wassertiefe von 4 m. Bei einem Tiefgang von 3 m wurden zunächst die Varianten 2 und 3 untersucht. Mit Variante 3 konnte eine Geschwindigkeit von knapp 15,5 km/h erreicht werden, bevor es zu einer kritischen Vertrimmung kurz vor Grundberührung kam. Dies entspricht einer Tiefenroudezahl von 0,69. Bei einem Tiefgang von 1,75 m wird sogar eine Geschwindigkeit von 17 km/h ($Fr_h = 0,75$) erreicht.

Propulsionsversuche

Wassertiefe $h = 4,00 \text{ m}$

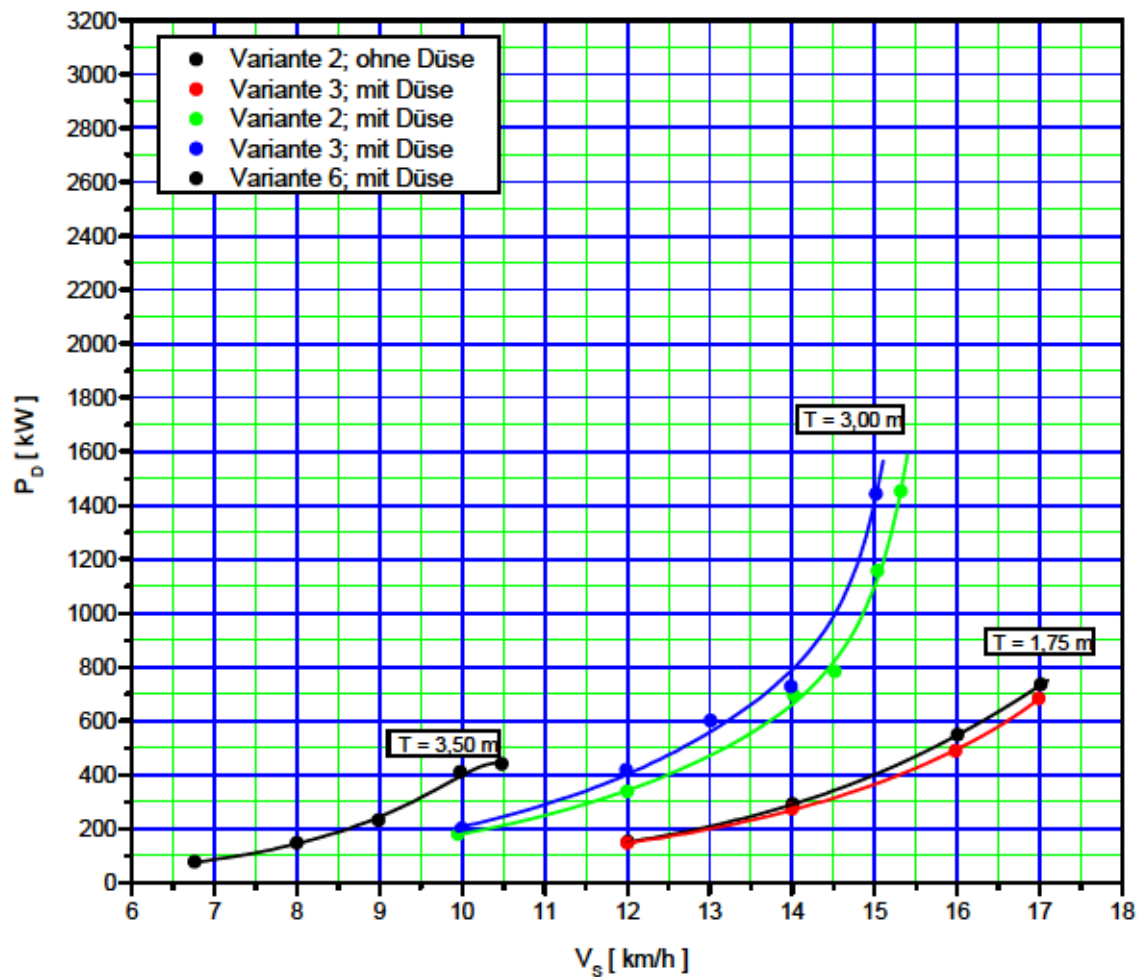


Abb. 53 Prognostizierter Leistungsbedarf bei einer Wassertiefe von 4 m.

Abb. 54 und Abb. 55 zeigen schließlich die Ergebnisse für extrem flaches Wasser. Bei der geringen Abladung, die bei dieser Wassertiefe möglich war, versagten die Varianten 1 bis 3. Der Propeller lief teilbelüftet und erzeugte keinen ausreichenden Schub. Hier kamen die speziell für diese geringe Wassertiefe – und damit verbundenem geringen Tiefgang – speziell entwickelten Varianten 4 bis 6 zum Einsatz. Die Versuche wurden immer bei der maximalen Geschwindigkeit abgebrochen, bei der eine Grundberührung kurz bevor stand. Strömungsbilder vom Pfahlzugversuch zeigt Abb. 56. Bei diesem Tiefgang ist der Tunnel nur teilweise mit Wasser gefüllt. Bei kleiner Drehzahl (links) reicht der Propellersog nicht aus, um den Tunnel zu füllen. Der Propeller arbeitet teilweise in Luft und erzeugt eine Wirbelströmung um die Düse. Bei höherer Drehzahl vermag der Propeller dann den Tunnel zu füllen. Nur die obere hintere Kante des Ruders ist dann noch in der Luft.

Bei den Varianten 4 bis 6 ist die Propulsion auch bei sehr niedrigem Wasserstand sichergestellt. Das Schiff kann bis an den transkritischen Geschwindigkeitsbereich fahren.

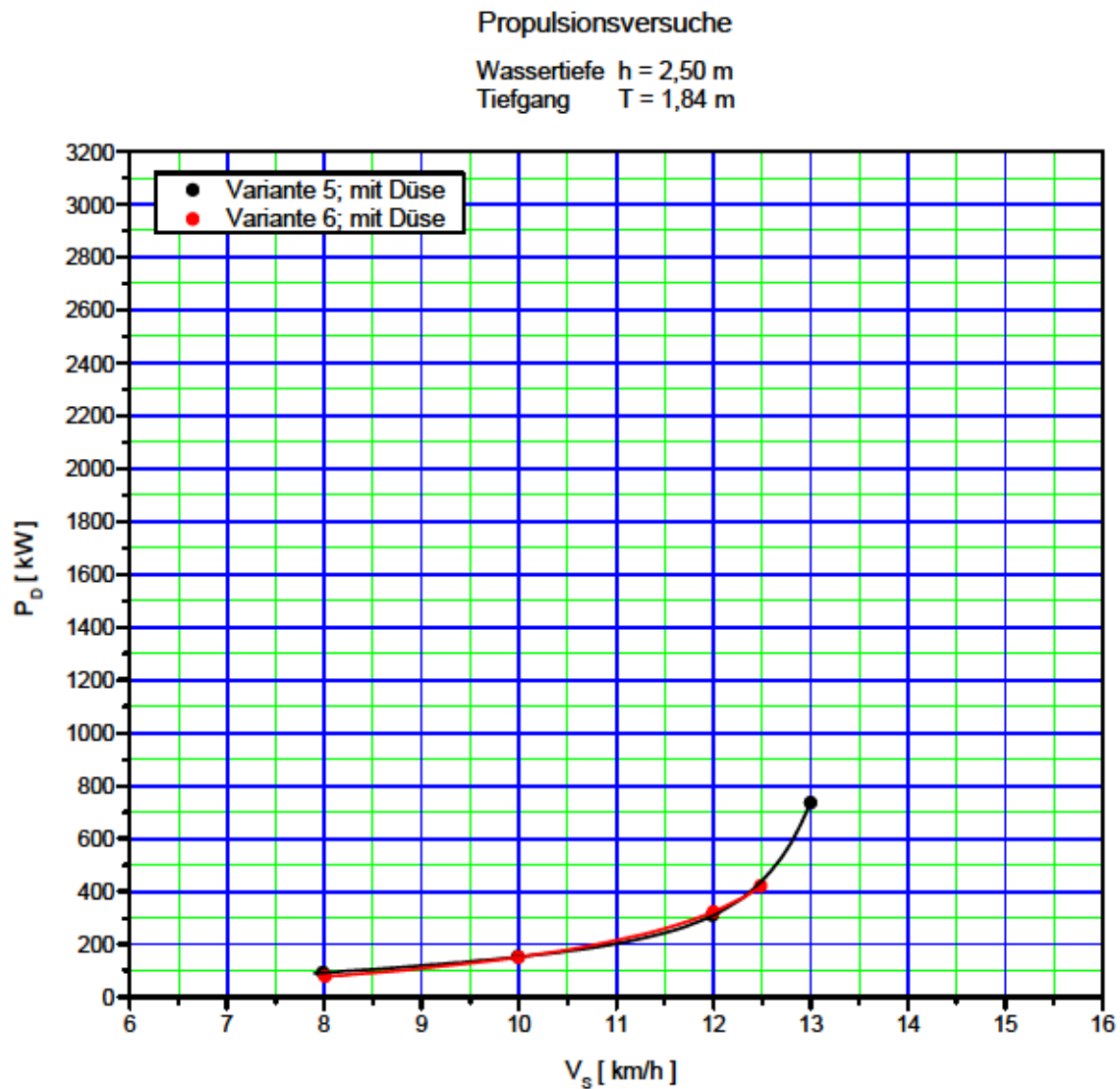


Abb. 54 Prognostizierter Leistungsbedarf bei einer Wassertiefe von 2,5 m.

Propulsionsversuche

Wassertiefe $h = 2,10$ m
Tiefgang $T = 1,84$ m

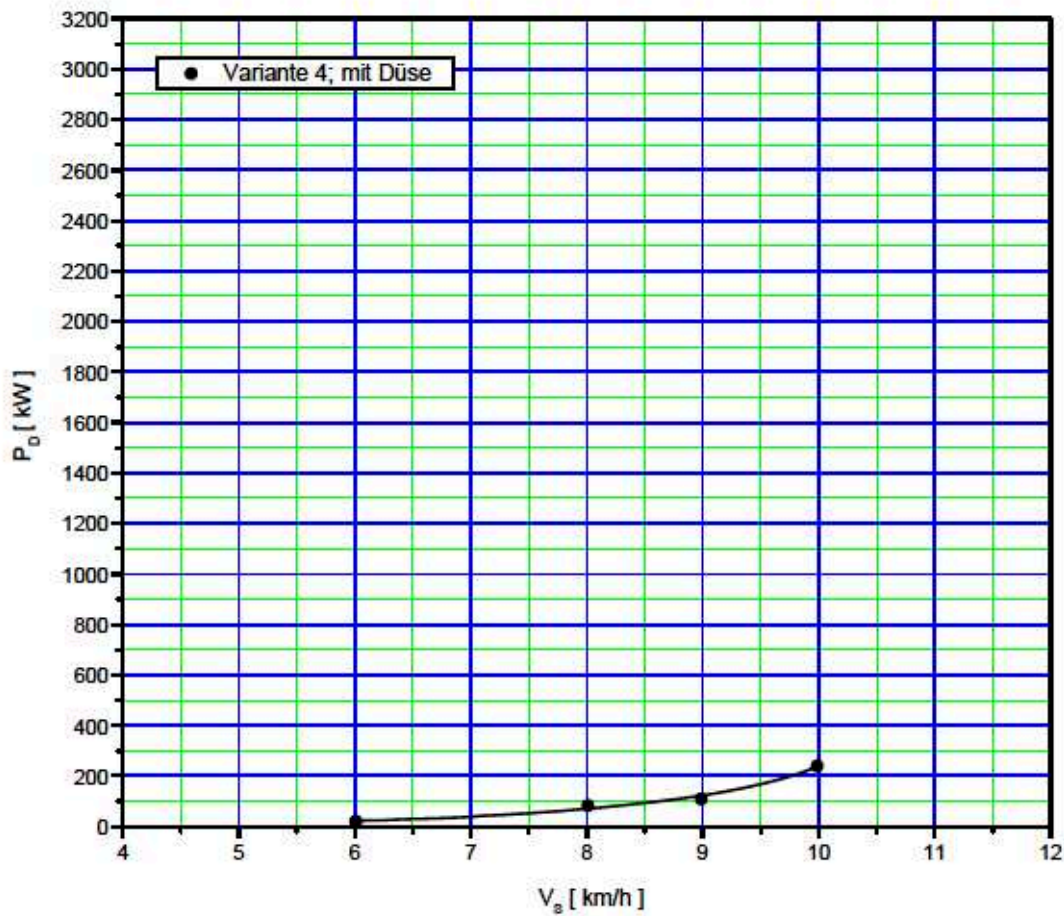


Abb. 55 Prognostizierter Leistungsbedarf bei einer Wassertiefe von 2,1 m.

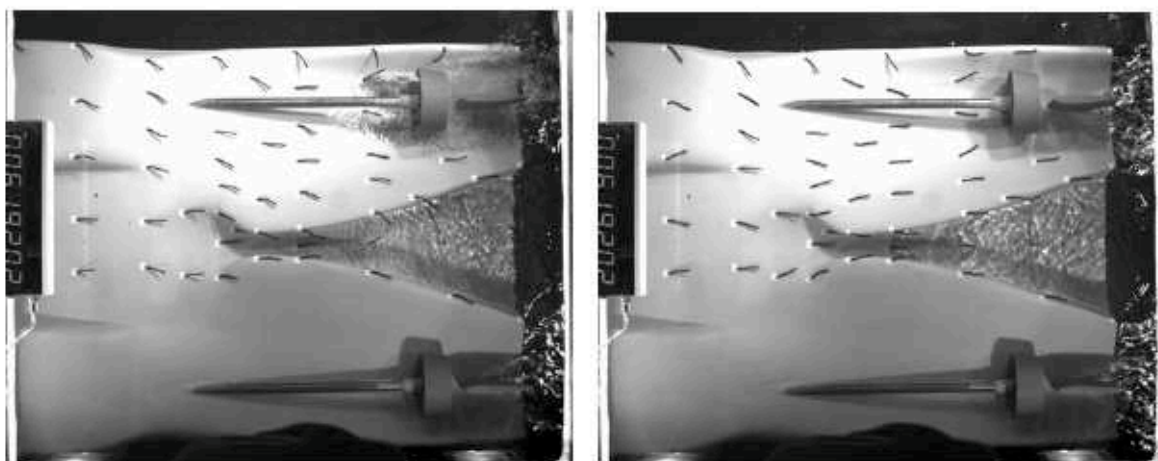


Abb. 56 Pfahzugversuch bei einer Wassertiefe von 2,1 m und einem Tiefgang von 1,84 m. Bei kleiner Drehzahl läuft der Propeller teilweise in Luft, der Tunnel ist nicht vollständig geflutet (links). Erst bei größerer Drehzahl wird der Tunnel durch die Sogwirkung des Propellers geflutet (rechts). An der Kimm neben der Düse sind Wirbel zu erkennen.

2.4 Untersuchungen zur Seefähigkeit

Die Untersuchung des Seeverhaltens wurde mit einem potentialtheoretischen Paneeilverfahren durchgeführt. Die Berechnungen wurden sowohl für den Semikatamaran-See als auch für ein vergleichbares Küstenmotorschiff durchgeführt.

In ergänzenden Modellversuchen wurde der zusätzliche Leistungsbedarf bei Fahrt gegen die Wellen ermittelt und geprüft, ob eine einwandfreie Propulsion gewährleistet ist, d.h. die Propeller keine Luft ziehen.

2.4.1 Numerische Untersuchung

Potentialtheoretische Verfahren haben sich für Schiffsrümpfe ohne ausgeprägte Anhänge (z. B. Schlingerkiel) im Schiffbau und in der Offshore-Technik bewährt und sind bei Schiffsentwurf stand der Technik. Das eingesetzte Verfahren berücksichtigt sogar die Voraugengeschwindigkeit des Schiffes.

Die Rumpfform wird für die Berechnung mit einer endlichen Zahl von Paneelen diskretisiert. Abb. 57 zeigt die diskretisierte Oberfläche des Semikatamaran-See und Abb. 58 die diskretisierte Oberfläche des vergleichbaren Küstenmotorschiffs.

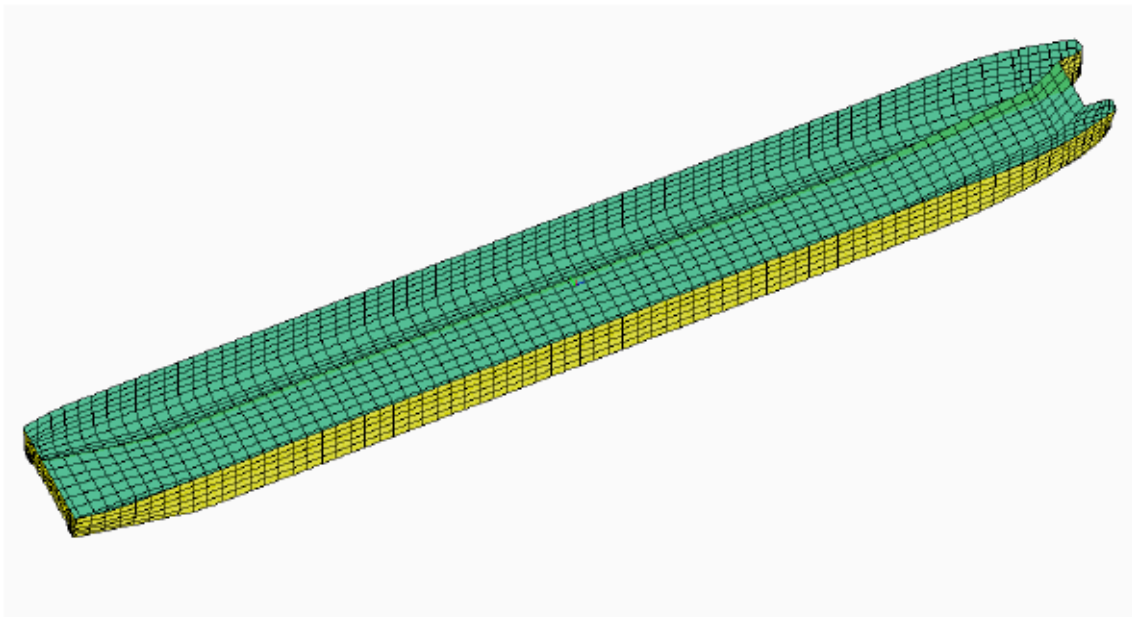


Abb. 57 Diskretisierte Rumpfoberfläche des Semikatamaran-See für die numerischen Seegangsrechnungen

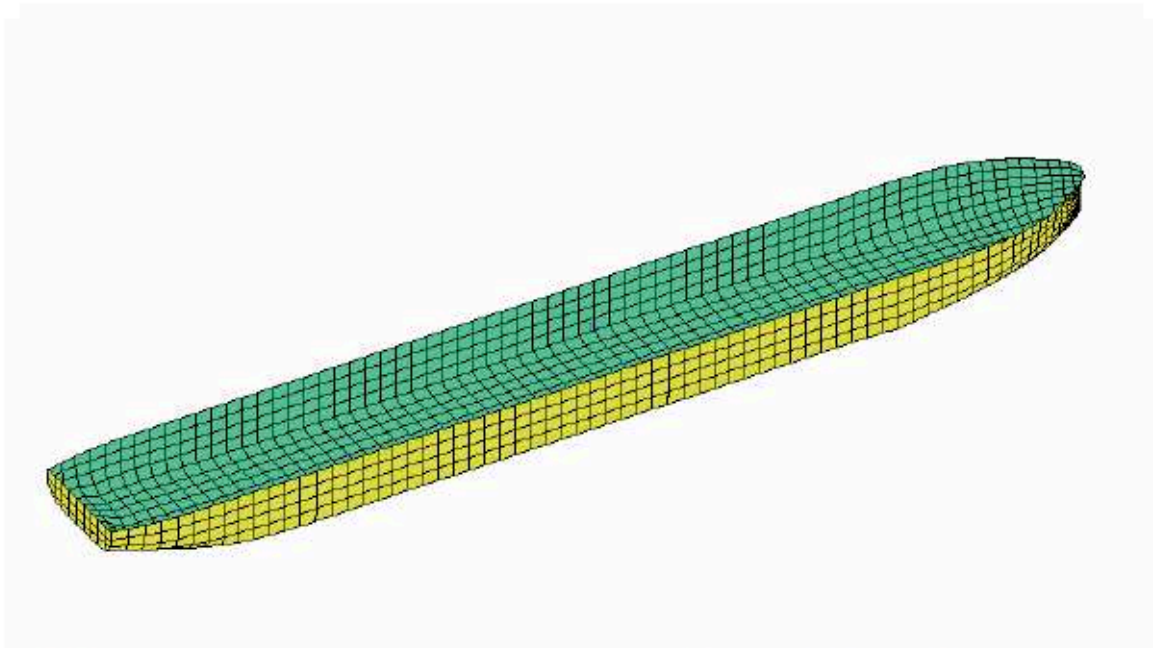


Abb. 58 Diskretisierte Rumpfoberfläche des Küstenmotorschiffs für die numerischen Seegangsberechnungen

Als Seegangsspektrum wurden JONSWAP-Spektren für Windgeschwindigkeiten von 10 m/s und 12 m/s verwendet:

Windgeschwindigkeit	m/s	10	12
Signifikante Wellenhöhe H_s	m	2,14	3,07
Signifikante Wellenperiode T_s	s	6,04	7,1

In Abb. 59 und Abb. 60 sind die Spektren grafisch dargestellt. Obwohl sich die Windgeschwindigkeiten nur um 20% unterscheiden, ist die Energiedichte bei der Modalfrequenz doppelt so groß. Das drückt sich auch in der signifikanten Wellenhöhe aus.

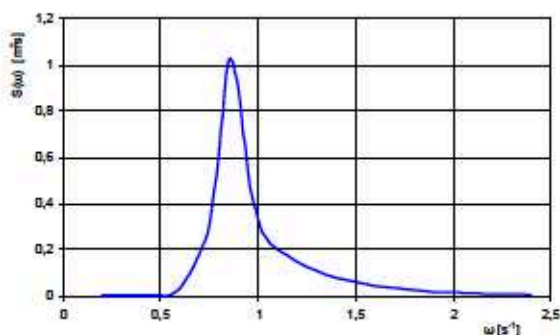


Abb. 59 JONSWAP-Spektrum für eine Windgeschwindigkeit von 10 m/s.

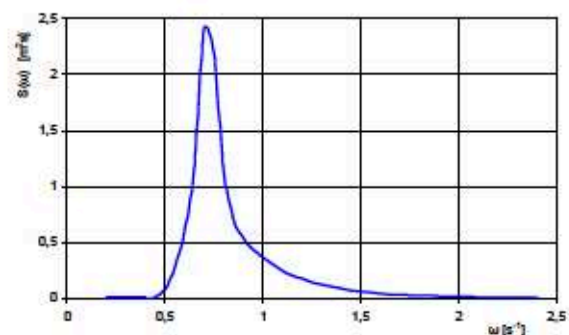


Abb. 60 JONSWAP-Spektrum für eine Windgeschwindigkeit von 12 m/s.

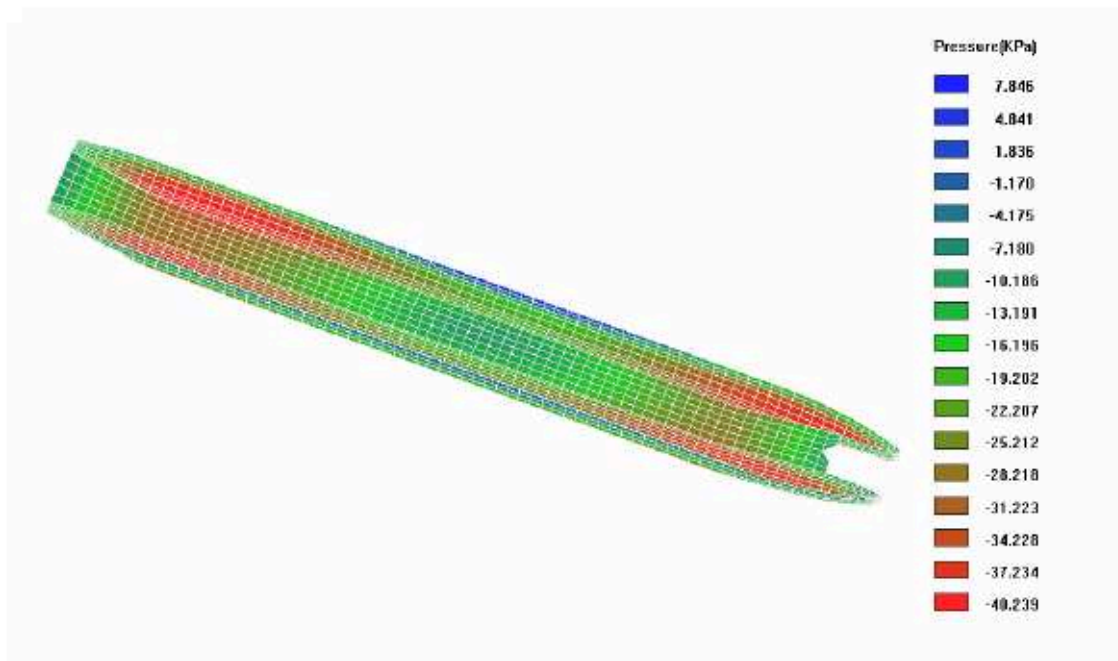


Abb. 61 Beispielhafte Druckverteilung auf dem Rumpf des Semikatamaran-See, (Verdrängung 3282 m³, Geschwindigkeit = 5,6m/s, Welleneinfallswinkel = 135°, Wellenfrequenz = 1,0 s⁻¹, Wellenphase = 180°)

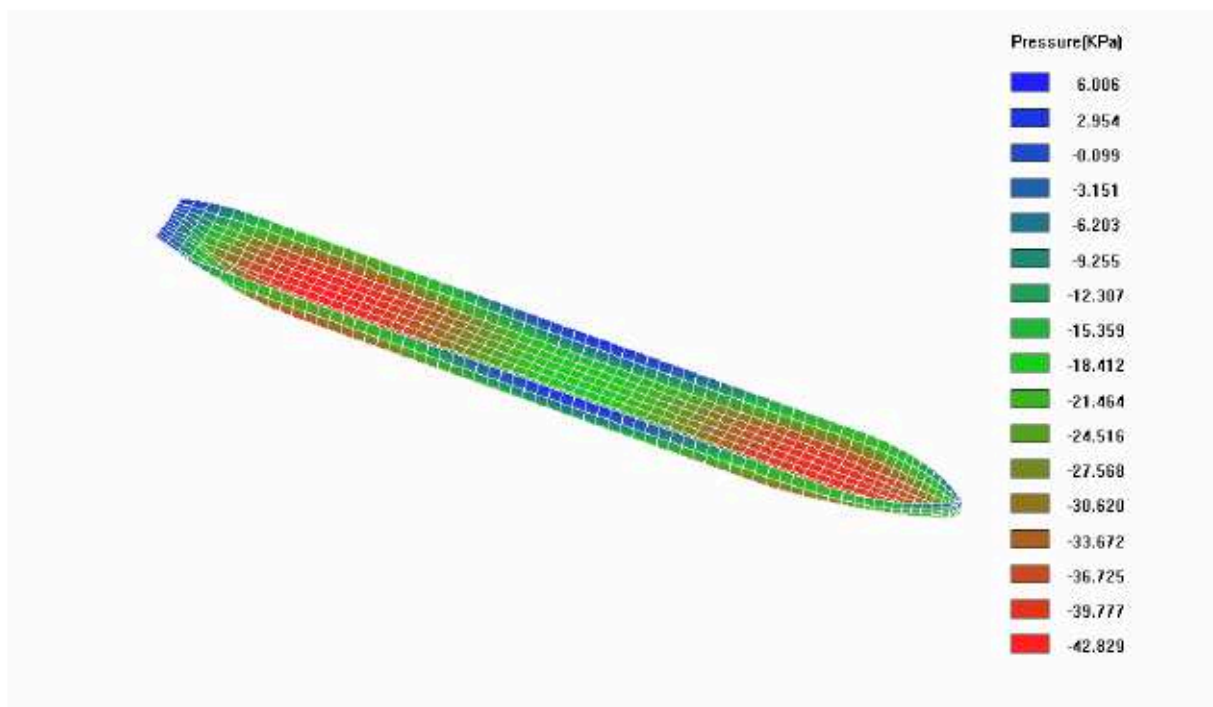


Abb. 62 Beispielhafte Druckverteilung auf dem Küstenmotorschiff, (Verdrängung 3282 m³, Geschwindigkeit = 5,6m/s, Welleneinfallswinkel = 135°, Wellenfrequenz = 1,0 s⁻¹, Wellenphase = 180°)

Als Lösung des Berechnungsverfahrens erhält man die Druckverteilung auf der Rumpfoberfläche, aus der die Kräfte und Moment integriert werden. Abb. 61 und Abb. 62 zeigen beispielhaft die Druckverteilung auf dem Semikatamaran-See und dem Küstenmotorschiff.

Die Berechnungen wurden für den Semikatamaran-See (Variante 1) und ein vergleichbares Küstenmotorschiff durchgeführt. Für beide Schiffe wurden zwei Beladungsfälle (Verdrängungen 1565 m³ und 3282 m³), drei Geschwindigkeiten (2,8 m/s = 10 km/h, 4,2 m/s = 15,1 km/h und 5,6 m/s = 20,1 km/h) und fünf Welleneinfallswinkels berechnet. In Abb. 63 – Abb. 66 sind die signifikanten Bewegungsamplituden als Funktion des Welleneinfallswinkels aufgetragen. Die blauen Symbol markieren die Werte für den Semikatamaran-See, die roten die des Küstenmotorschiffs. Die Form der Symbol steht für die Geschwindigkeit: □ = 2,8 m/s, Δ = 4,2 m/s und ◇ = 5,6 m/s.

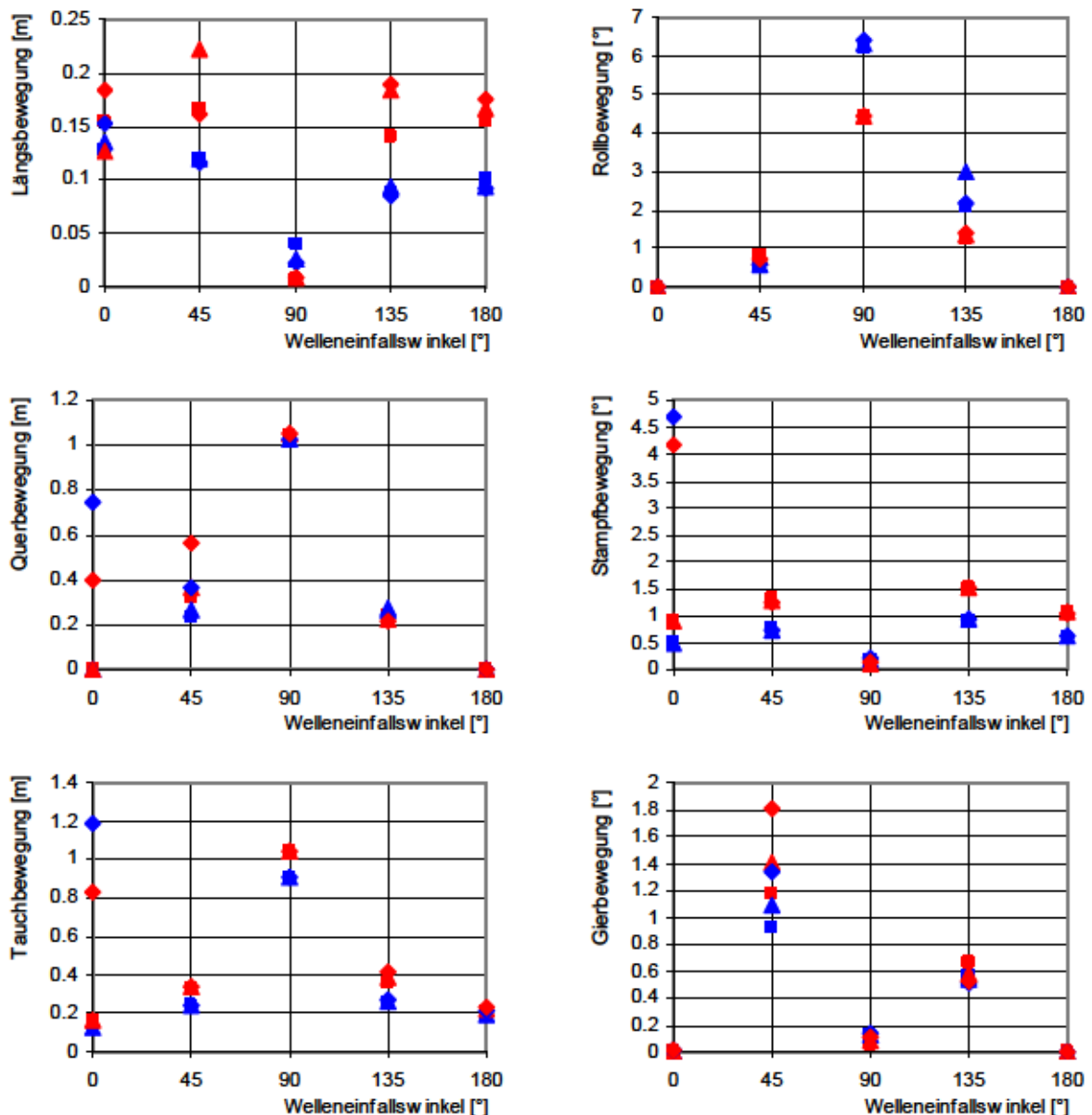


Abb. 63 Berechnete signifikante Bewegungen für den Semikatamaran-See und eine vergleichbares Küstenmotorschiff bei einer Verdrängung von 1565 m³ und einer Windgeschwindigkeit von 10 m/s. Die Ergebnisse für den Semikatamaran-See sind blau dargestellt, die für ein vergleichbares Küstenmotorschiff rot; Geschwindigkeiten: □ = 2,8 m/s, Δ = 4,2 m/s und ◇ = 5,6 m/s.

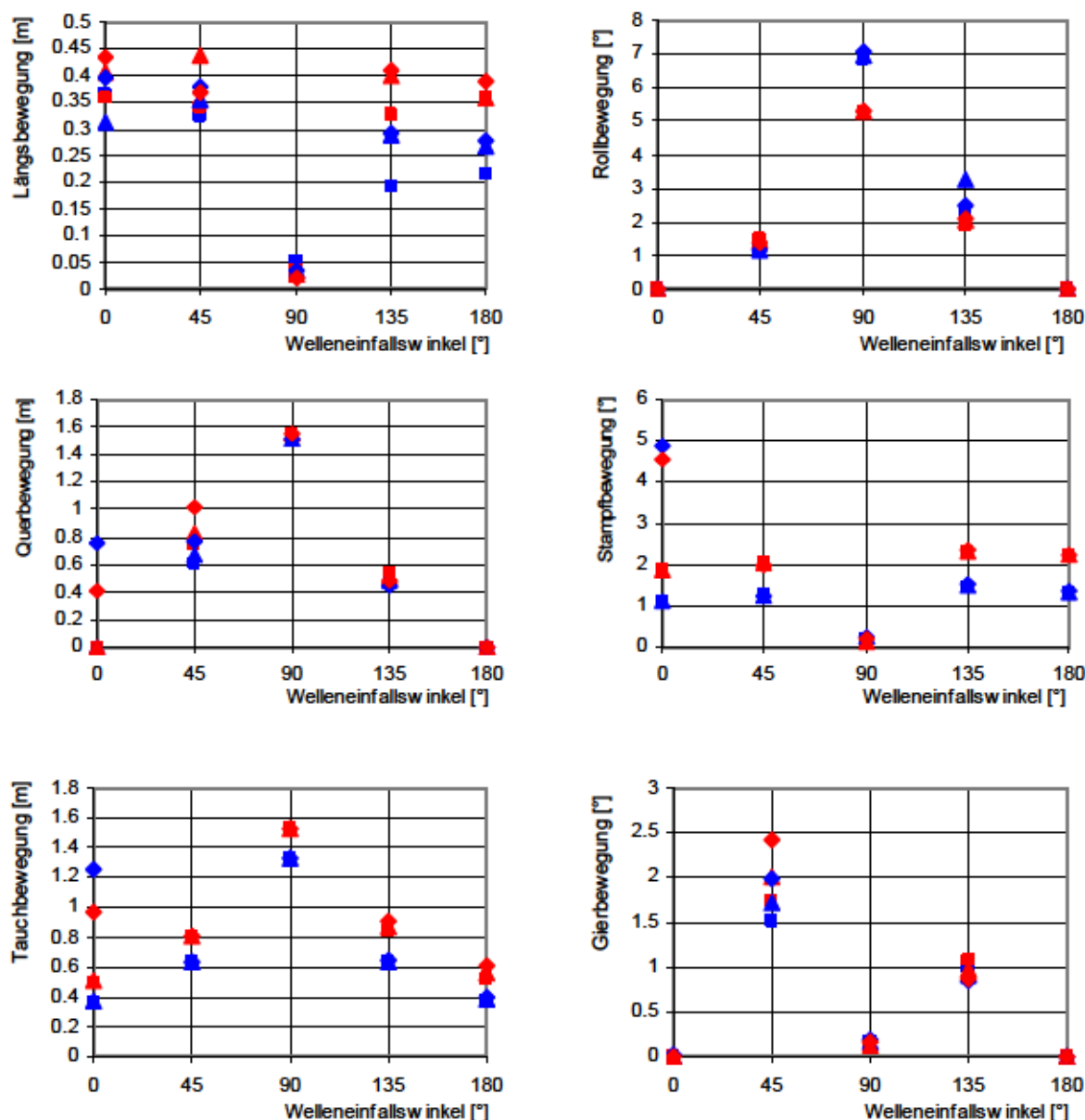


Abb. 64 Berechnete signifikante Bewegungen für den Semikatamaran-See und eine vergleichbares Küstenmotorschiff bei einer Verdrängung von 1565 m³ und einer Windgeschwindigkeit von 12 m/s. Die Ergebnisse für den Semikatamaran-See sind blau dargestellt, die für ein vergleichbares Küstenmotorschiff rot; Geschwindigkeiten: □ = 2,8 m/s, Δ = 4,2 m/s und ◇ = 5,6 m/s.

Beide Schiffe zeigen ein ähnliches Seeverhalten im ersten Beladungsfall (Abb. 63 und Abb. 64) für beide Windstärken. Die signifikanten Rollbewegungen des Semikatamaran-See sind etwas stärker, die Stampf- und Tauchbewegungen dagegen etwas schwächer als beim Küstenmotorschiff.

Auch beim zweiten Beladungsfall zeigen beide Schiffe ein ähnliches Verhalten. Hier hat der Semikatamaran-See bei Wellen querab eine größere Rollamplitude als das Küstenmotorschiff, bei schräg einfallenden Wellen dagegen eine kleinere. In den anderen Bewegungsfällen zeigt der Semikatamaran-See etwas kleine Bewegungsamplituden. Insgesamt zeigen die Untersuchungen, dass die Seetüchtigkeit des Semikatamaran-See in gleicher Weise gegeben ist, wie die eines Küstenmotorschiffs.

Es bleibt hinzuweisen, dass hier keine Untersuchung der Festigkeit der Stahlstruktur auch hinsichtlich der Belastungen im Seegang durchgeführt wurde.

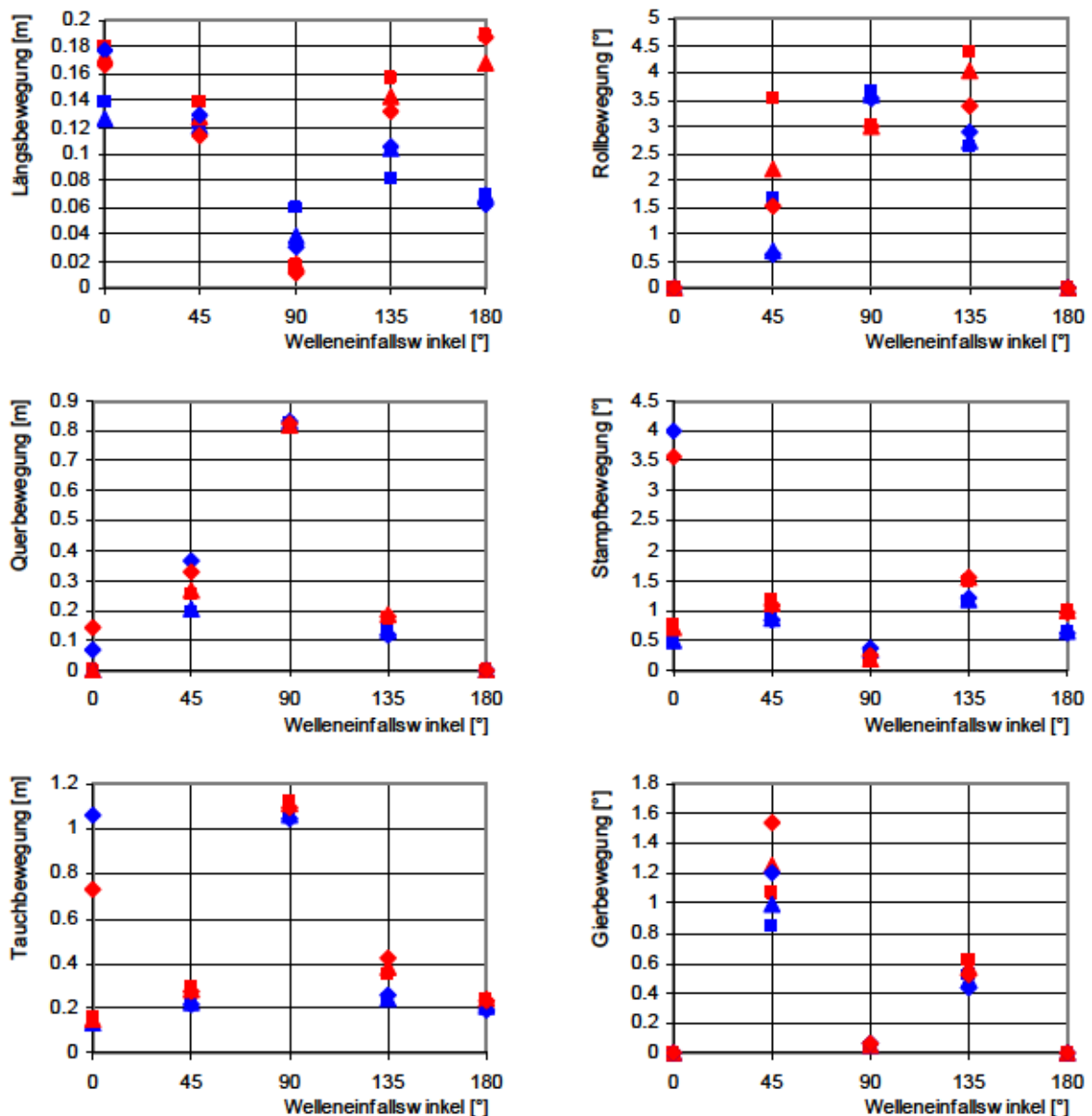


Abb. 65 Berechnete signifikante Bewegungen für den Semikatamaran-See und ein vergleichbares Küstenmotorschiff bei einer Verdrängung von 3282 m³ und einer Windgeschwindigkeit von 10 m/s. Die Ergebnisse für den Semikatamaran-See sind blau dargestellt, die für ein vergleichbares Küstenmotorschiff rot, Geschwindigkeiten: □ = 2,8 m/s, △ = 4,2 m/s und ◇ = 5,6 m/s.

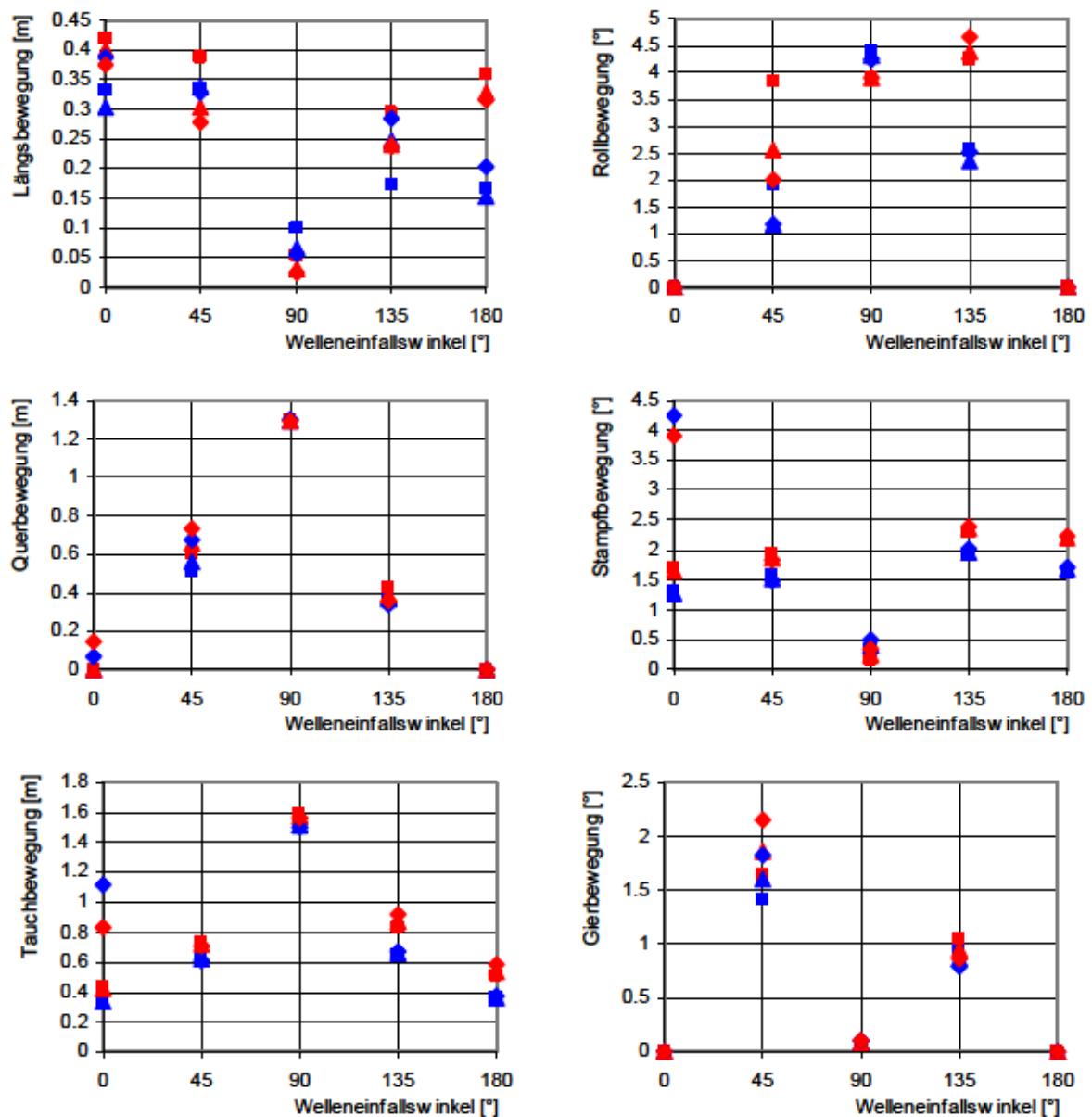


Abb. 66 Berechnete signifikante Bewegungen für den Semikatamaran-See und eine vergleichbares Küstenmotorschiff bei einer Verdrängung von 3282 m³ und einer Windgeschwindigkeit von 12 m/s. Die Ergebnisse für den Semikatamaran-See sind blau dargestellt, die für ein vergleichbares Küstenmotorschiff rot, Geschwindigkeiten: □ = 2,8 m/s, △ = 4,2 m/s und ◇ = 5,6 m/s.

Im Anhang 6.7 sind die berechneten Übertragungsfunktionen für alle Freiheitsgrade als Funktionen der Wellenfrequenz dargestellt. Auch hier zeigen sich im Vergleich zwischen dem Semikatamaran-See und dem Küstenmotorschiff keine großen Unterschiede. Auffällig sind allerdings unterschiedliche Resonanzen zwischen den beiden Schiffstypen bei den Freiheitsgraden Rollen und Driften.

2.4.2 Modellversuche

Die Propulsionsversuche in Wellen wurden ebenfalls im großen Schlepptank des DST durchgeführt. Am Ende des Tanks befindet sich ein hydraulisch angetriebener Wellenerzeuger. Dieser besteht aus drei von je einem Kolben bewegten Klappen, deren Position durch ein elektrisches Signal gesteuert werden kann. Die Klappen können, über ein einstellbares Getriebe angetrieben, eine rein rotatorische, eine rein translatorische Bewegung oder eine Mischbewegung ausführen. Bei großen Wassertiefen wird der rein rotatorische Modus verwendet.

Zur Ansteuerung der Hydraulikkolben wurde ein Steuercontroller entwickelt, der von einem PC eine Zeitreihe des Steuersignals übernehmen und diese wiederholt an die Regelelektronik übertragen kann. Dadurch ist es möglich ein beliebiges Wellenspektrum im Versuchstank zu erzeugen.

Im Laufe der Versuchsdurchführung hat sich gezeigt, dass ein Einstellen des Selbstpropulsionspunkts in der relativ kurzen Messzeit im unregelmäßigen Seegang eines realistischen Spektrums nicht möglich ist. Die Seegangsversuche wurden schließlich in regelmäßigen Wellen bei einer Wassertiefe von 1 m durchgeführt – entsprechend 16 m in der Großausführung; dies ist die höchste zulässige Wassertiefe bei Wellenversuchen im DST-Schlepptank.

Zur Untersuchung wurden Wellen erzeugt, deren Wellenlängen der Schiffslänge, der halben Schiffslänge und ein Viertel der Schiffslänge entsprach; die Wellenhöhen waren 1 m und 0,5 m. Abb. 67 zeigt die prognostizierten Propulsionsleistungen bei Fahrt gegen die Wellen bei einer Wassertiefe von 16 m und bei Fahrt im Glattwasser bei einer Wassertiefe von 17,6 m. Der Unterschied in der Wassertiefe spielt hier allerdings keine Rolle.

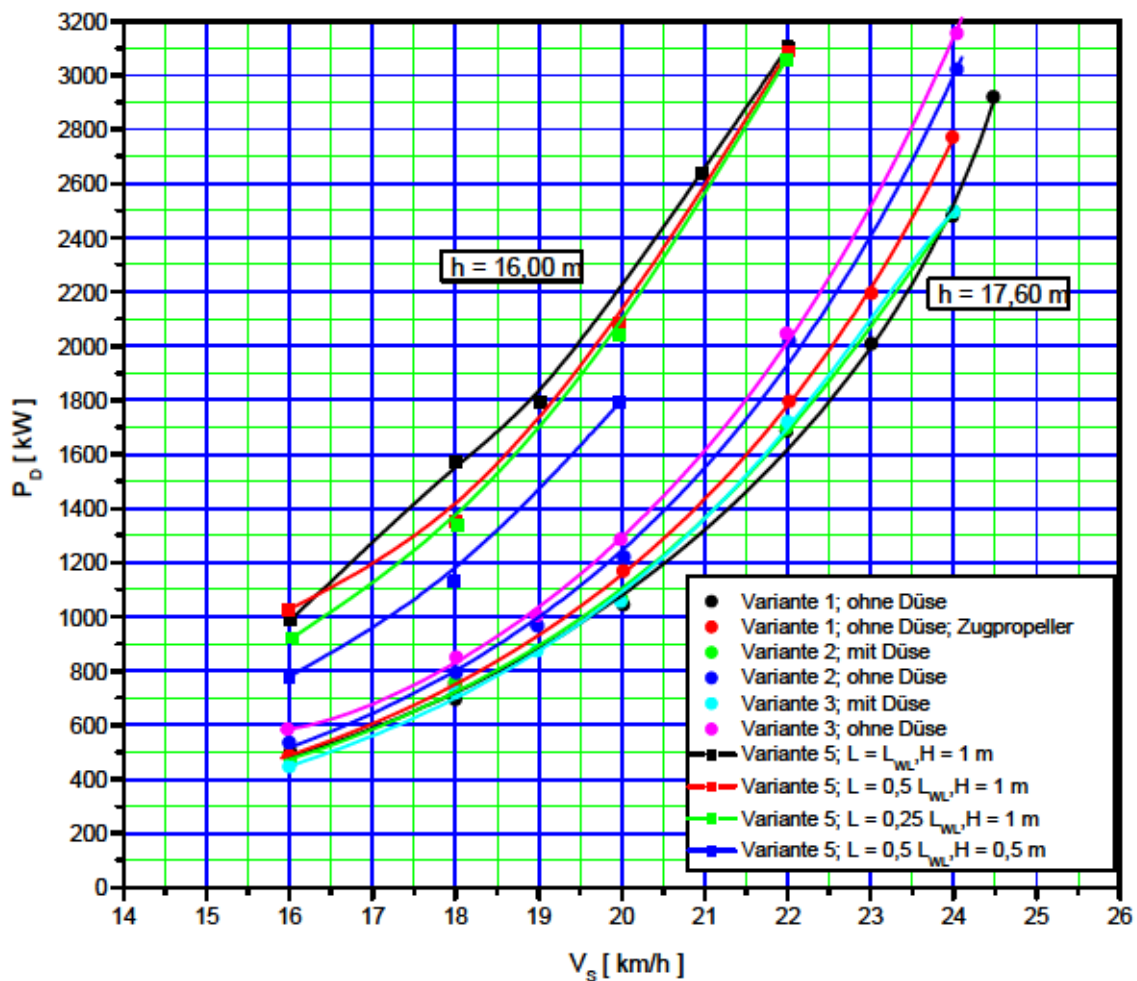


Abb. 67 Prognostizierte Propulsionsleistung bei Fahrt gegen die Wellen

Der Vergleich zwischen den Glattwasserkurven und den Kurven im Seegang zeigt, dass selbst wenn die Wellenlänge gleich der Schiffslänge ist, sich die Schiffsgeschwindigkeit bei gleicher Leistung nur um etwa 3 km/h reduziert. Allerdings treten im Vorschiff erhebliche Belastungen durch Seeschlag auf. Ist die Wellenlänge gleich der Schiffslänge wird eine sehr große Wassermenge vom Mittelrumpf wieder nach vorne gedrückt, ähnlich einer brechenden Welle (Abb. 68). Auch bei kleineren und kürzeren Wellen (Abb. 69) ist dies noch deutlich erkennbar. Die Wirkung auf den Rumpf könnte mit einer Bugform ähnlich der eines Wave-Piercing-Katamarans zwar gemildert werden, allerdings bleibt das Problem im Wesentlichen systembedingt erhalten, weil das Wasser der Wellenberge keine Möglichkeit hat zu den Seiten zu strömen; es muss deshalb nach vorne gedrückt werden.

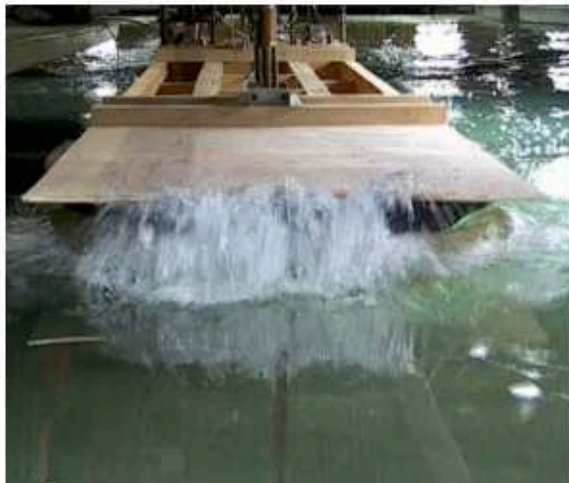


Abb. 68 Seeschlag am Vorschiff
($L = L_{WL}$, $H = 1$ m)



Abb. 69 Seeschlag am Vorschiff
($L = 0,5L_{WL}$, $H = 0,5$ m)

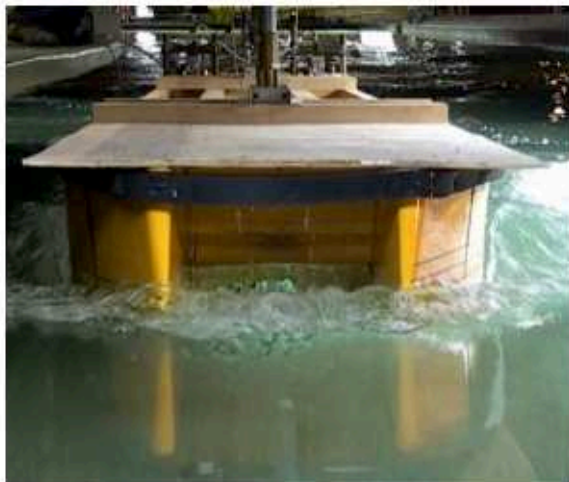


Abb. 70 Lufteinbruch unter den Mittelrumpf

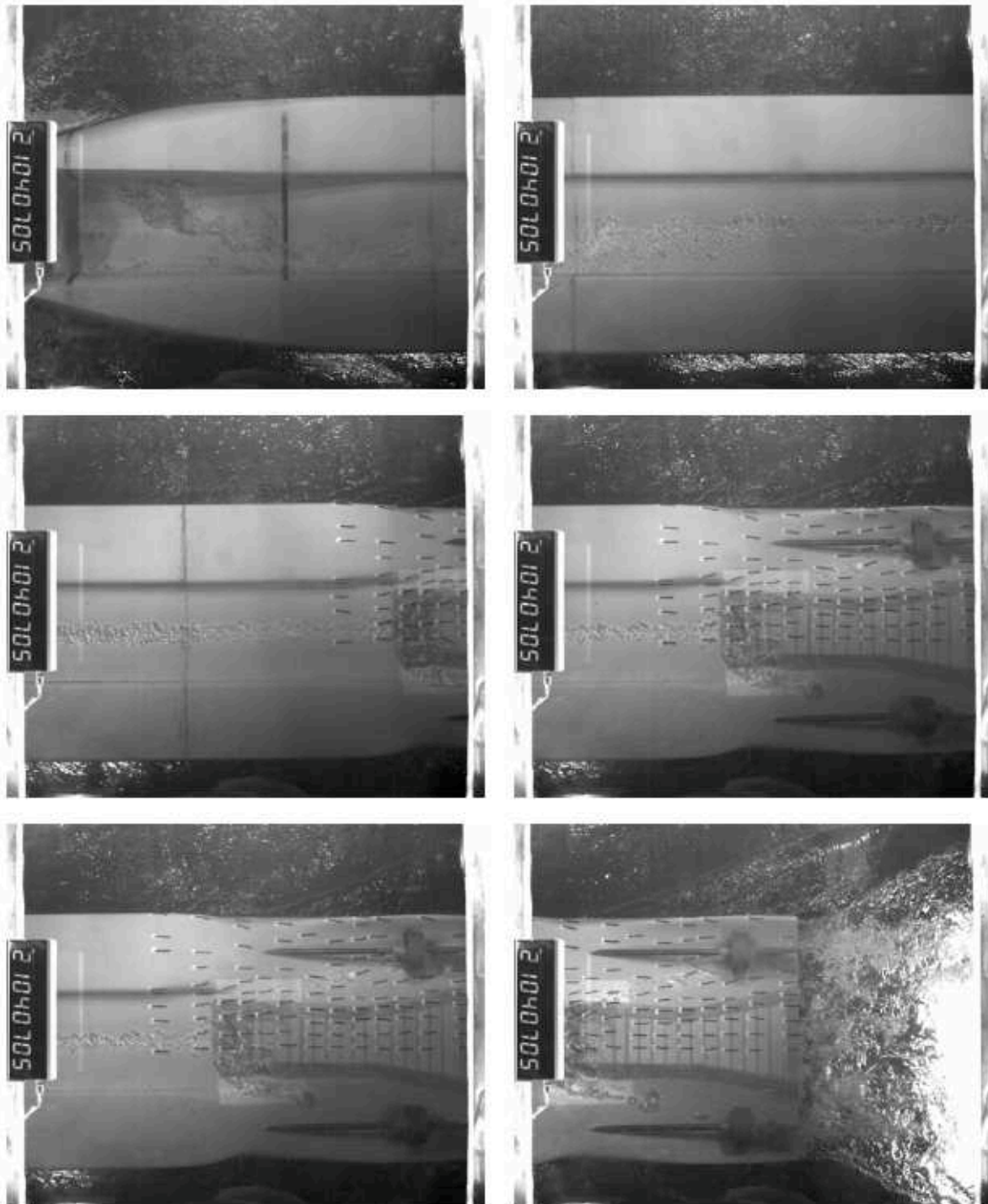


Abb. 71 Transport der Luft unter dem Rumpf

Ein weiteres Problem verdeutlicht Abb. 70: Während der anlaufende Wellenberg zu großen Seeschlagsbelastungen führt, wird mit dem nachfolgenden Wellental Luft unter den Mittelrumpf gebracht, die unter dem Boden nach hinten durchläuft und teilweise in die Propeller gerät. Der Mittelrumpf hat deswegen auch eine negative V-
Spantform, damit sich die Luft in der Mitte am höchsten Punkt sammelt. Hier sind auch für die Variante Nachteile zu erwarten, deren Propeller in der Mitte noch stärker

der Luftströmung ausgesetzt sind. Der Transport der Luft wird in der Bilderreihe aus den Unterwasserfilmen in Abb. 71 deutlich sichtbar. Hier strömen die Luftblasen direkt in die Propeller.

2.5 Untersuchungen zum Manövrieren

Die zum Nachweis der Manövrierfähigkeit erforderlichen Stopp- und R-Manöver wurden mit den Varianten 1 und 2 experimentell durchgeführt.

2.5.1 Stoppmanöver

Die für alle Rheinanliegerstaaten gültige Rheinschiffsuntersuchungsordnung (Rhein-SchUO) schreibt für Neubauten den Nachweis ausreichender Fahr- und Manövrier-eigenschaften vor. § 5.07 besagt bezüglich der Stoppfähigkeit, dass Fahrzeuge und Verbände über 86,0 m Länge in der Lage sein müssen, rechtzeitig Bug zu Tal anzuhalten und dabei ausreichend manövrierfähig zu bleiben. In der Richtlinie Nr. 2 für die Untersuchungskommissionen werden die Mindestanforderungen für die Stoppeigenschaften quantifiziert.

Die Stoppversuche wurden einheitlich für alle Varianten bei einer Wassertiefe von $h = 5$ m und einem Tiefgang von $T = 3$ m durchgeführt. Das Modell wurde hierbei gefesselt auf eine Geschwindigkeit von $v_s = 13$ km/h geschleppt und dann in Längsrichtung freigegeben.

Bei den Stoppversuchen wurden Wagenweg und Wagengeschwindigkeit über den zeitlichen Verlauf aufgezeichnet. An Hand der Daten können dann Stoppweg und Stoppzeit ermittelt werden.

Die Ergebnisse werden nachfolgend in Tabellenform für die Großausführung dargestellt. Die Werte in der Tabelle wurden aus einmalig wiederholten Versuchen gemittelt.

v_s [km/h]	T [m]	h [m]	Stoppweg [m]	Stoppzeit [s]
13	3	5	204	95
13	3	5	185	92
18	3	5	177	60
18	3	5	189	64
13	2,1	5	330	55
13	2,1	5	331	55
18	2,1	5	476	66
18	2,1	5	541	80

Den Stoppzeiten und Stoppwegen sind weitere Zuschläge zuzuordnen die aus der Reaktionszeit der Schiffsführung und der Umsteuerungszeit für die Antriebe gebildet werden.

Als Response-Zeit für die Interaktion zwischen Mensch und Maschine werden 12 s gerechnet. Diese sind der Stoppzeit bereits zugeschlagen. Der Stoppweg verlängert sich damit wie folgt:

$$v_0 = 13 \text{ km/h} / 18 \text{ km/h}$$

$$S_{\text{stopp}} = 12 \times v_0 = 12 \text{ s} \times 3,61 \text{ m/s} = 43,33 \text{ m}$$

$$S_{\text{stopp}} = 12 \times v_0 = 12 \text{ s} \times 5,00 \text{ m/s} = 60 \text{ m}$$

Im folgenden Diagramm werden beispielhaft die Verläufe von Schiffsgeschwindigkeit und Stoppweg dargestellt.

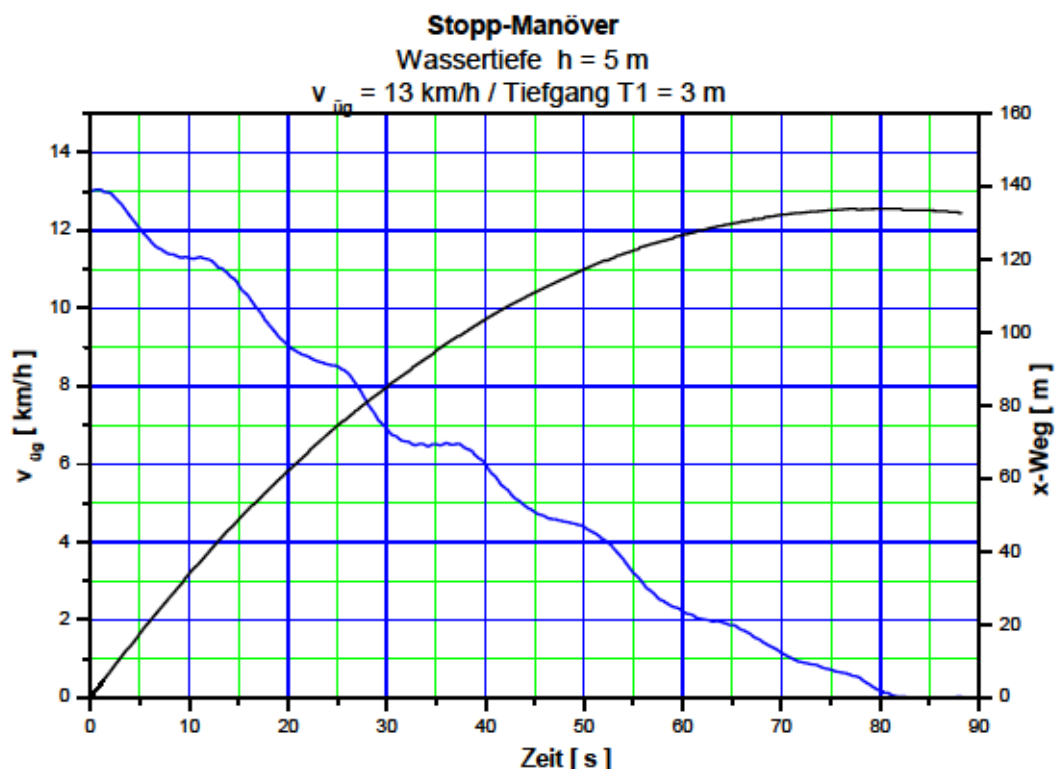


Abb. 72 Beispielhafter Zeitschrieb für ein Stoppmanöver

Alle bei einem Tiefgang von 3 m durchgeführten Stoppversuche unterschreiten den maximal erlaubten Stoppweg von 305 m (Rheinschiffahrtsuntersuchungsordnung).

Auf dem Tiefgang 2,1 m werden die Vorgaben der RheinSchUO nicht erfüllt. Die Versuche auf $T = 2,1 \text{ m}$ haben gezeigt, dass es während des Stoppens zu Luftbrüchen kommt und die Schubwirkung fast vollständig abreißt. Allerdings konnten

diese Versuche aus Zeitgründen nicht mehr mit dem Hinterschiff der Versionen 4 bis 6 wiederholt werden.

2.5.2 R-Manöver

Nach § 5.09 der RheinSchUO müssen Schiffe und Verbände rechtzeitig ausweichen können und die Ausweicheigenschaften sind durch Ausweichmanöver nachzuweisen.

Dies wird im Modellversuch durch simulierte Ausweichmanöver nach Backbord und Steuerbord mit vorgegebenen Größen, bei denen für bestimmte Drehgeschwindigkeiten des Anschwenkens und des Stützens Grenzwerte für den dabei benötigten Zeitbedarf einzuhalten sind, nachgewiesen.

Das Modell wird für die „Freifahrtsituation“ mit einer Funkfernsteuerung ausgerüstet, die es erlaubt, die Rudermaschine und die Antriebsmotoren (siehe Abb. 73) zu steuern.

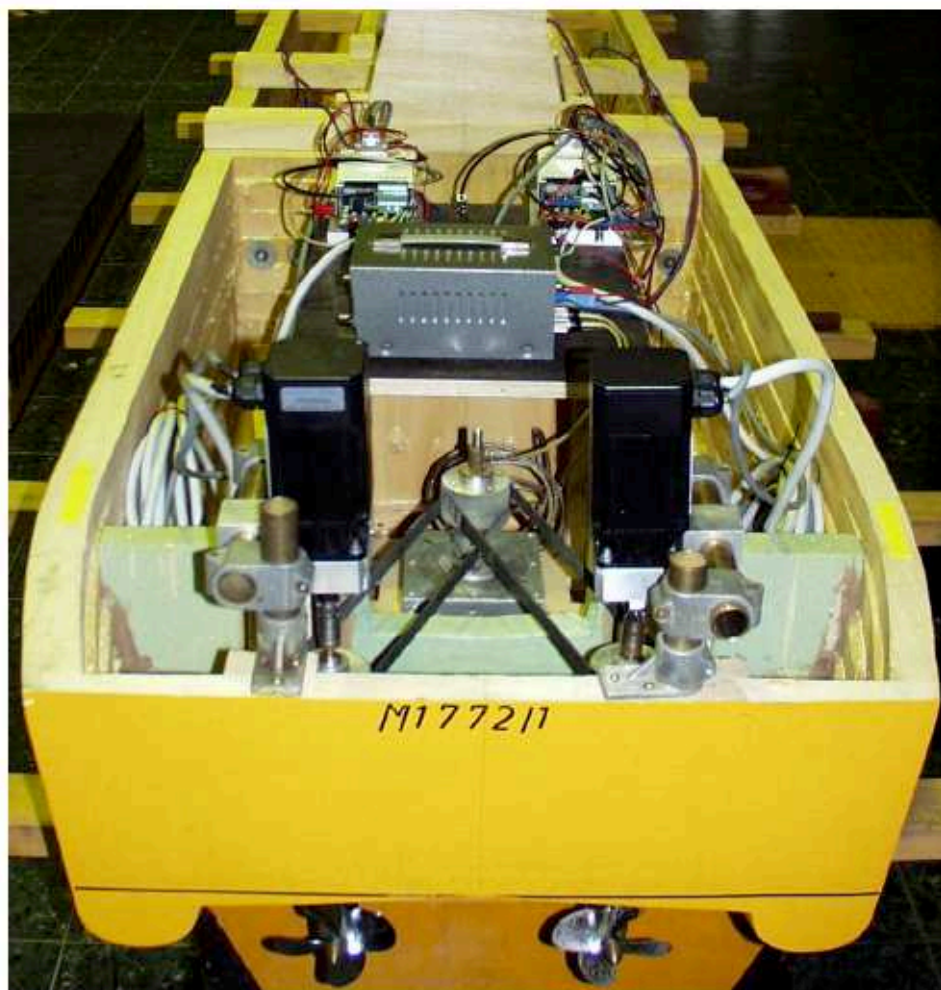


Abb. 73 Ausrüstung des Modells M1772 mit Rudermaschinen und Steuerelektronik



Abb. 74 Modell M1772 vor dem Beginn der Messfahrt; während der Fahrt fährt das Modell frei.

Zu Beginn eines R-Manöver-Versuches wird das Modell vom Schleppwagen (siehe Abb. 74) auf definierte Schiffsgeschwindigkeit gebracht und dann ausgeklinkt. Das Modell bewegt sich nunmehr ungefesselt. Aus der Marschfahrt mit einer konstanten Geschwindigkeit von $v_0 = 13 \text{ km/h}$ (18 km/h) gegen das Wasser wird durch Anstellung des Steuerorgans (hier Ruderpropeller) ein Ausweichen des Schiffes nach Steuerbord eingeleitet. Der eingestellte Winkel wird solange beibehalten, bis ein geforderter Wert für die Drehgeschwindigkeit des Schiffes erreicht ist. Bei Erreichen der Drehgeschwindigkeit ist der Zeitpunkt t_1 aufzunehmen und Gegenruder mit gewähltem Winkel zu geben (Stützen). Die Anschwenkbewegung des Schiffes nach Stb wird dadurch beendet und das Schiff beginnt in die Gegenrichtung anzuschwenken bis erneut die Drehgeschwindigkeit auf den def. Wert angestiegen ist. Der Zeitpunkt t_2 , wenn die Drehgeschwindigkeit erreicht ist, ist aufzunehmen. Bei Erreichen der def. Drehgeschwindigkeit ist Gegenruder mit dem gleichen Ruderwinkel zu geben um die Drehbewegung zu beenden. Der Zeitpunkt t_3 ist aufzunehmen. Wenn die Drehgeschwindigkeit 0 erreicht ist, ist der Zeitpunkt t_4 aufzunehmen und anschließend wird das Schiff mit frei wählbaren Ruderbewegungen auf Ausgangskurs gebracht.

Alle Ruderbefehle wurden als Sequenz programmiert und die Drehbewegung des Schiffes von einem Trägheitskreisler überwacht. Durch diese Automatisierung konnte der Versuch beliebig oft vergleichbar wiederholt werden.

Entscheidend für die Aussage über die R-Manöver-Eigenschaften sind Drehgeschwindigkeit und Zeitbedarf für das Erreichen des Wertes t_4 . Die Abb. 75 zeigt den

schematischen Verlauf eines R-Manövers. Die Versuche werden für 100 % Tiefgang und 70 % Tiefgang durchgeführt.

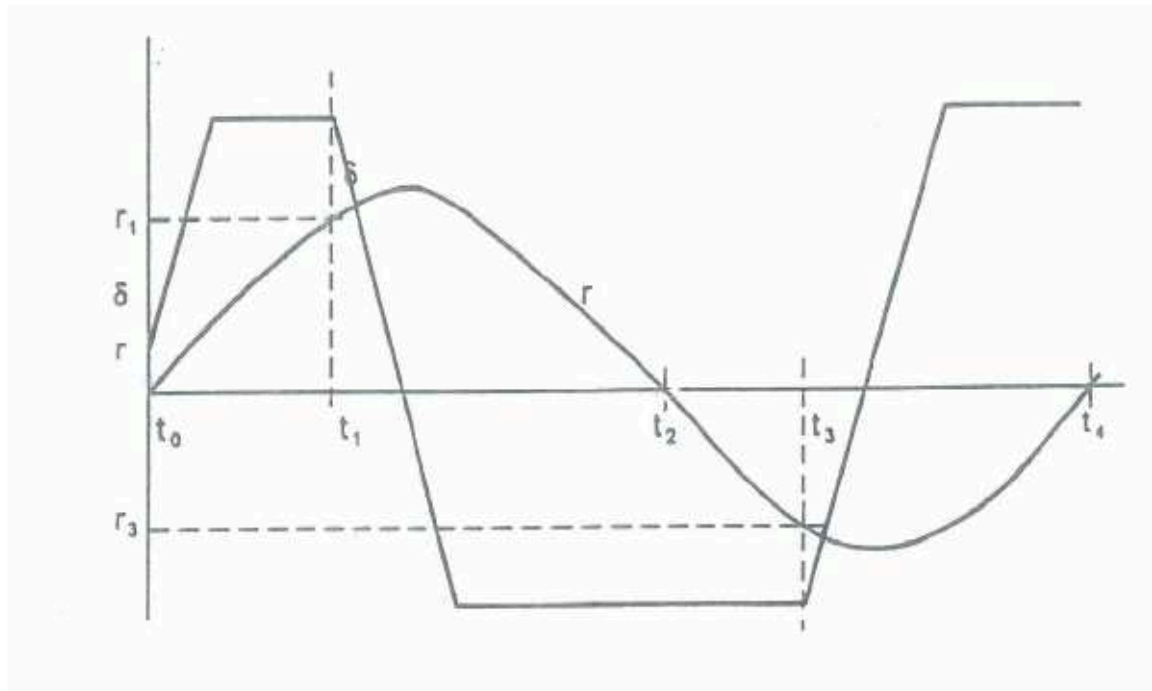


Abb. 75 Schematischer Verlauf eines R-Manövers

Gemäß dem folgenden Vorschlag für die Grenzwerte von R-Manövern in der Rhein-SchUO werden die durchgeführten Versuche bewertet.

Schiffgröße L x B [m]	Drehgeschwindigkeit		Zeitbedarf T4 [s]	
	$\bar{\delta}_R = 20^\circ$	$\bar{\delta}_R = 45^\circ$	$h/T = 1,4 - 2$	$h/T = > 2$
Verbände bis 193,0 x 11,45	12	18	130	110

Insgesamt wurden 33 R-Manöver gefahren, deren Ergebnisse im Folgenden tabellarisch dargestellt werden.

Steuerorgan	vs [km/h]	Ruderwinkel [°]	Winkelgeschw. [°/min.]	h [m]	T [m]	h/T	T4 gemittelt [s]
Ruderpropeller	13	45	18	5	2,1	2,38	95
Ruderpropeller	18	20	12	5	2,1	2,38	75
Ruderpropeller	18	45	18	5	2,1	2,38	90
Ruderpropeller	13	45	18	5	3	1,67	59
Ruder	13	45	18	5	3	1,67	50
Ruderpropeller	13	20	12	5	3	1,67	61
Ruder	13	20	12	5	3	1,67	35
Ruder	18	45	18	5	3	1,67	41
Ruderpropeller	18	45	18	5	3	1,67	54
Ruder	18	20	12	5	3	1,67	44

Der Semikat-See erfüllt in allen gefahrenen R-Manövern die Empfehlungen der Rheinschiffsuntersuchungsordnung. Der maximal empfohlene Zeitbedarf T4 wird von keiner Variante erreicht.

Differenziert man den Zeitbedarf T_4 nach den unterschiedlichen Steuerorganen, dann wird deutlich, dass ein konventionelles Ruder hinter dem Propeller angeordnet dem Ruderpropeller an Wirkung (Ruderkraft) überlegen ist. Aus der Praxis ist bekannt, dass die Ruderwinkel von Ruderblatt und Ruderpropeller erst in ihrer Wirkung vergleichbar sind, wenn der Ruderwinkel des Ruderpropellers ca. 1,5-mal größer ist.

3 Wirtschaftlichkeitsanalyse

3.1 Technische Rahmenbedingungen

3.1.1 Unterschiede Binnenschiff vs. Fluss-Seeschiff / Seeschiff

Grundsätzliche Unterschiede zwischen See- und Binnenschiffen bezüglich der Lebensdauer sind zunächst durch die stark voneinander abweichenden Einsatzbedingungen und die damit verbundenen naturbedingten Einflüsse zu erklären.

Während Seeschiffe im Seegang Beschleunigungen und vergleichsweise extremen Verformungskräften - wie Torsion und Biegung - sowie Seeschlag standhalten müssen, fährt das Binnenschiff auf Wasserstraßen, auf denen sich ein höherer Wellengang nicht aufbaut.

Salzwasser und salzwasserhaltige Luft erfordern bei Seeschiffen einen aufwendigen Korrosionsschutz, dessen Qualität sich mit zunehmendem Alter eines Schiffes immer schwieriger erhalten lässt. Besonders den im Außenbereich installierten Anlagen macht der Salzgehalt des Wassers und der Luft zu schaffen. Durchfährt ein Seeschiff mehrere Klimazonen, erfährt es teilweise extreme Schwankungen der Wasser- und Lufttemperatur sowie der Luftfeuchte. Diese Schwankungen können wiederum die negativen Einflüsse des Salzgehalts in der Luft und im Wasser verstärken.

Binnenschiffe operieren vorwiegend in Gewässern mit niedrigem oder keinem Salzgehalt, welche in der Seefahrt als „Frisch- oder Süßwasser“ bezeichnet werden. Beim Ladungsumschlag in den Seehäfen treffen Binnenschiffe zwar durchaus auf das so genannte „Brackwasser“, d.h. eine Mischung aus See- und Frischwasser, aber die Verweildauer ist hier kurz.

Insgesamt und einsatzbedingt beanspruchen die Einflüsse des Wetters und die des umgebenden Wassers Seeschiffe erheblich stärker als Binnenschiffe.

Die zum Einsatz kommenden Schiffe müssen somit den besonderen Anforderungen und Einsatzbedingungen der sehr unterschiedlichen Fahrtgebiete gerecht werden. In der folgenden Tabelle sind einige Beispiele für die besonderen Anforderungen aufgrund des Befahrens von Binnen- und Seewasserstraßen dargestellt.

Tabelle 4: Besondere Anforderungen an die Binnen-See-Flotte

Besondere Anforderungen aufgrund des Befahrens von Binnenwasserstraßen		Besondere Anforderungen aufgrund des Befahrens von Seeschiffahrtsstraßen
Einschränkungen von Länge Breite Höhe Tiefgang Zusatzausrüstung wie z.B. Heckanker Flussradar Wendeanzeiger Blaue Flagge erhöhte Manövrierfähigkeit Stoppvermögen zu Tal absenkbares Steuerhaus klappbare Masten Außen-Schallwerte regionale Vorschriften	Binnen- ⇒ See- ← Schiff	Festigkeit Stabilität Seeverhalten Freibord Vermessung Besatzung Ausrüstung und Einrichtung wie z.B. Rettungseinrichtung Nautik Hospital Zurrvorrichtung Reserveteile Verwendung von getesteten und abgenommenen Materialien internationale Vorschriften

Wie aus Tabelle 4 deutlich wird, handelt es sich bei den Anforderungen im Binnenland - neben Zusatzausrüstungen und speziellen Manövriereigenschaften - im wesentlichen um Einschränkungen der Schiffsgröße, die aus den Abmessungen und der Infrastruktur der zu befahrenden Wasserstraßen resultieren.

Im Gegensatz hierzu gibt es im Seegebiet diese Größeneinschränkungen nicht. Hier sind die sicherheitsrelevanten Aspekte, die aus den Wetter- und Seegangsverhältnissen der zu befahrenden Seegebiete resultieren, von relevanter Bedeutung. Sie beeinflussen vor allem die Festigkeit, Stabilität und das Seeverhalten der Fahrzeuge. Demzufolge werden Binnen-See-Schiffe grundsätzlich nach den international gültigen "Klassifikationsvorschriften für Seeschiffe" gebaut, ausgerüstet und klassifiziert. Zuständig für die Bauüberwachung, Abnahme und Klassifikation sind die "Klassifikationsgesellschaften". Die überwiegende Zahl der Länder mit einer eigenen Schiffbauindustrie verfügen über eine eigene Klassifikationsgesellschaft.

Aufbauend auf den Klassifizierungsvorschriften sind dann die für das Befahren der Binnenwasserstraßen erforderlichen Eigenschaften und Zusatzausrüstungen gemäß den jeweiligen regionalen Vorschriften zusätzlich zu berücksichtigen.

3.1.2 Kostenaspekte

Wie die anderen wassergebundenen Verkehrsarten auch weist die Fluss-See-Schifffahrt gegenüber den landgebundenen Verkehren insgesamt niedrige entfernungsabhängige Transportkosten auf. Zudem entfallen im Vergleich zu den gebrochenen Binnen-See-Verkehren die Kostenbelastungen durch den zusätzlichen Umschlag im Seehafen. Gleichwohl hat das Fluss-See-Schiff Kostennachteile gegenüber den anderen Varianten des wassergebundenen Verkehrs. Diese schlagen sich vor allem in höheren entfernungsabhängigen Kosten auf See und auf der Binnenwasserstraße nieder. Ein wesentlicher Grund hierfür ist darin zu sehen, dass das Fluss-See-Schiff als Hybrid sowohl den Seeweg als auch die Binnenwasserstraße befahren und damit den Anforderungen beider Fahrtgebiete gerecht werden muß.

Betrachtet man zunächst die Baukosten, so ist zu berücksichtigen, dass es sich bei den Schiffen dem Prinzip nach um Seeschiffe handelt, die für die Fahrt auf dem Fluss auch den dort geltenden infrastrukturellen Voraussetzungen und teilweise weitergehenden Vorschriften entsprechen müssen. Hieraus resultieren zum einen Beschränkungen in den Abmessungen, die sich an dem möglichen Tiefgang auf den zu befahrenden Flüssen, den Durchfahrtshöhen der Brücken sowie den Schleusenabmessungen der relevanten Fahrtgebiete zu orientieren haben und deshalb neben einer allgemeinen Größenbeschränkung eine unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten optimierte Auslegung der Schiffe beeinträchtigen. Hinzu kommen Zusatzaufwendungen, um beispielsweise ein Absenken des Steuerhauses bei der Durchfahrt unter Brücken zu ermöglichen oder den auf Binnenwasserstraßen erhöhten Anforderungen an das Manövrier- und Stoppverhalten zu genügen. Auch müssen die Fluss-See-Schiffe für die Fahrt auf dem Rhein mit einem höher auflösenden Radar sowie einem Heckanker ausgerüstet sein.

Die Personalkosten hängen von der vorgeschriebenen Besatzungsstärke ab, die sich aufgrund der Befahrung unterschiedlicher Fahrtgebiete an den weitestgehenden Personalanforderungen orientieren muss.

Bei Seeschiffen werden Besatzungsstärke und -zusammensetzung durch die See-Berufsgenossenschaft festgelegt, die ein entsprechendes Schiffsbesatzungszeugnis erteilt. Bei den hier in Frage kommenden Schiffen ist für die Seefahrt von einer Besatzung von sieben bis 10 Mann auszugehen. In der Binnenschifffahrt fordert die Rheinschiffsuntersuchungsordnung (RheinSchUO) hingegen lediglich fünf Mann Besatzung, wenn der Steuermann das Rheinschifferpatent besitzt, sogar nur vier Mann. Ein Fluss-See-Schiff wird deshalb, da es seine Besatzung auf dem Flussteil der Reise nur schwer ändern kann, im Vergleich zum konkurrierenden Binnenschiff mit zu großer Besatzung fahren. Zusätzliche Kosten können entstehen, wenn der Schiffsführer nicht das für die Binnenschifffahrt vorgeschriebene Rheinschifferpatent besitzt, da in diesem Fall noch die Kosten für einen Hilfsschiffsführer hinzukommen.

Fluss-See-Schiffe sind aufgrund der zu beachtenden Restriktionen in ihrer Kapazität beschränkt, so dass vor allem im Vergleich zu den reinen Seeschiffen allein aus technischen Gründen Größenvorteile nur begrenzt realisiert werden können.

Unabhängig von der Tragfähigkeit der eingesetzten Schiffe ist im Containerverkehr darüber hinaus eine weitere Einschränkung zu beachten, da die Durchfahrtshöhe der Brücken – je nach Relation und den dortigen Bedingungen – nur den Transport von zwei bis fünf Containerlagen gestattet. Dieser Einschränkung unterliegen natürlich auch die Binnenschiffe; hier wird diese Beschränkung jedoch im Rahmen der normalen Transportkette mit dem Umschlag im Seehafen aufgehoben. Zwar besteht auch für das Fluss-See-Schiff grundsätzlich die Möglichkeit, bei entsprechender technischer Ausstattung auf See eine weitere Lage Container an Bord zu nehmen, dies würde jedoch von vornherein ein Anlaufen des Seehafens beinhalten und damit den eigentlichen Vorteilen des durchgehenden Verkehrs entgegenwirken.

Ein weiterer Kostennachteil der Fluss-See-Schifffahrt ist nachfragebedingt. Während bei den gebrochenen Seeverkehren die Möglichkeiten zur Bündelung des Aufkommens sowohl auf dem Seeweg als auch auf der Binnenwasserstraße gegeben sind, ist das Fluss-See-Schiff auf das Aufkommen zwischen den Einzugsbereichen der angelaufenen Binnen- und Seehäfen beschränkt. Lässt man an dieser Stelle die Möglichkeiten einer Anpassung durch eine Verminderung der Abfahrtsfrequenzen außer acht, so resultiert hieraus der Einsatz kleinerer Einheiten bzw. ein geringerer Auslastungsgrad der Fahrzeuge, was wiederum mit Kostennachteilen für die Fluss-See-Schifffahrt verbunden ist.

3.1.3 Transportdauer

Die für die gesamte Transportkette benötigte Zustellzeit lässt sich in verschiedene Zeitblöcke unterteilen, die folgende Phasen betreffen

- den Vor- und Nachlauf
- den Aufenthalt in den Häfen sowie
- den eigentlichen Transport der Ladung.

Die Anteile der einzelnen Phasen hängen nicht nur von den eingesetzten Verkehrsmitteln ab, sondern variieren auch mit der zurückzulegenden Entfernung, so dass allgemeine Aussagen nicht möglich sind. Lediglich als grobe Orientierung mag ein Richtwert aus der Praxis gelten, wonach sich die Schiffe in etwa 50 % der Gesamtzeit in Fahrt befinden.

Zeitliche Vorteile der Fluss-See-Schifffahrt bestehen im Vergleich zu den gebrochenen Seeverkehren mit Vor- bzw. Nachlauf Binnenschiff, da ein Umschlagsvorgang entfällt. Der Zeitgewinn beträgt etwa ein bis zwei Tage und wird mit der zunehmenden Abwicklungsproblematik von Binnenschiffs-Containertransporten in den Rheinmündungs-Seehäfen eher größer.

Dafür jedoch hat ein herkömmliches Fluss-See-Schiff auf beiden Teilstrecken Einbußen bei der Fahrtgeschwindigkeit hinzunehmen. Während diese Einbußen bei der Fahrt auf dem Rhein wegen der relativ geringen Geschwindigkeitsdifferenz und der relativ kurzen Entfernung kaum ins Gewicht fallen, können sich auf der Seereise beträchtliche Unterschiede ergeben. Während für ein großes Küstenmotorschiff Geschwindigkeiten um 18 kn angesetzt werden können, bewegt sich die Geschwindigkeit gängiger Fluss-See-Schiffe auf See im Bereich zwischen 10 und 12 kn, so dass grundsätzlich festgehalten werden kann, dass die zeitliche Wettbewerbsfähigkeit der Fluss-See-Schifffahrt mit zunehmender Entfernung über See abnimmt. Spürbare Zeitnachteile bestehen vor allem gegenüber dem gebrochenen Seeverkehr mit Vor- bzw. Nachlauf Lkw, da in diesem Fall der Fluss- See-Verkehr keine Vorteile aus einem eingesparten Umschlagsvorgang erzielen kann.

Geringfügige Erhöhungen der Geschwindigkeit dürften die Wettbewerbsfähigkeit der Fluss-See-Schifffahrt im Regelfall kaum nachhaltig steigern, da sich die Kunden bei der Entscheidung für eine seegebundene Variante in der Regel in erster Linie an den Kosten orientieren dürften. Gleichwohl mag in einzelnen Fällen ein auch gering erscheinender Zeitvorteil überhaupt erst die Einbindung der Schifffahrt in die Logistikkonzepte der verladenden Wirtschaft ermöglichen. Auswirkungen größeren Ausmaßes könnten sich jedoch dann ergeben, wenn schnelle Fluss-See Schiffe zur Verfügung stünden, mit denen Ladung erreicht werden könnte, die heute eine hohe Affinität zum Lkw aufweist.

Betrachtet man die Zeiten, die für den Vor- und Nachlauf der Waren sowie in den Häfen benötigt werden, so sind diese für die Fluss-See-Schifffahrt auch im Punkt-Punkt-Verkehr mit mindestens zwei Tagen zu kalkulieren. Bei diesem durch die in der Regel notwendige Brechung der nassen Verkehre verursachten Zeitbedarf handelt es sich jedoch zunächst um einen allgemeinen Nachteil aller seegebundenen Varianten gegenüber dem Lkw. Anzustrebende zeitliche Einsparungen, etwa durch organisatorische Verbesserungen, würden daher nicht allein auf die Fluss-See-Schifffahrt beschränkt bleiben. Speziell für die Fluss-See-Schifffahrt (wie auch für die Transportkette Kümo/Binnenschiff) von Bedeutung sind allerdings Verbesserungen im Bereich der Binnenhäfen einschließlich des Vor- und Nachlaufs, da damit die zeitlichen Nachteile gegenüber der Kombination Kümo/Lkw abgebaut werden.

Bezüglich der Zustellzeiten kann damit festgehalten werden, dass es sich bei den zeitlichen Hemmnissen der Fluss-See-Schifffahrt überwiegend um allgemeine Nachteile handelt, die alle Formen der seegebundenen Verkehre in ähnlicher Weise betreffen und die damit in erster Linie für die grundsätzliche Wahl zwischen land- und seegebundenen Verkehren relevant sein dürften.

Spezifische Nachteile der Fluss-See-Schifffahrt bestehen jedoch, wenn man auf die Abfahrtsfrequenzen abstellt. Denn die Bündelungsmöglichkeiten sind bei einem durchgehenden Transport geringer als bei einer Brechung im Seehafen, so dass ins-

gesamt – vor allem bei aufkommensschwachen Relationen – nur deutlich weniger Abfahrten angeboten werden können.

3.1.4 Sicherheit des Transports

Generell ist davon auszugehen, dass alle Transporte auf den Binnenwasserstraßen und auf dem Seeweg ein ausgesprochen hohes Maß an Sicherheit garantieren. Dies gilt auch für die Fluss-See-Schifffahrt. Einschränkungen in der Seetauglichkeit dieser Fahrzeuge beeinträchtigen allenfalls die Zuverlässigkeit, nicht jedoch die Sicherheit. Allerdings kann die Fracht bei Ladung an Deck dem Seewassereinfluss ausgesetzt sein, womit eventuell aufgrund der im Allgemeinen geringeren Größe Nachteile des Fluss-See-Schiffs gegenüber dem Kümo verbunden sein können.

Sicherheitsrisiken bei den wassergebundenen Verkehren resultieren in erster Linie aus dem Umschlag der Waren. Da jeder Umschlagsvorgang das Beschädigungsrisiko der Ladung erhöht, weist das Fluss-See-Schiff hier jedoch Vorteile auf gegenüber der Kombination Kümo/Binnenschiff, da hier ein Umschlag weniger anfällt. Dieser Vorteil wächst mit der Umschlagsempfindlichkeit der Ladung und kann in bestimmten Fällen zu einem entscheidenden Auswahlkriterium bei der Wahl des Verkehrsträgers werden. Dies gilt beispielsweise für den Transport von Pkws, aber auch der Transport von Stahlrohren oder Schwergutladungen ist hier zu nennen.

Außerdem ist zu beachten, dass bei Fluss-See-Verkehren der gesamte wassergebundene Transport mit einem Verkehrsmittel durchgeführt wird. Im Gegensatz zur Kombination Kümo/Binnenschiff liegt die Verantwortung für den Transport in einer Hand, so dass sich im Falle von Beschädigungen Regressansprüche leichter abwickeln lassen dürften.

Unter Sicherheitsaspekten weist das Fluss-See-Schiff damit zwar im Vergleich zum direkten Lkw-Verkehr aufgrund der in der Regel erforderlichen zusätzlichen Umschlagsvorgänge Nachteile auf; innerhalb der verschiedenen seegebundenen Varianten jedoch überwiegen eindeutig die Vorteile des durchgehenden Binnen-See-Verkehrs.

3.1.5 Zuverlässigkeit des Transports

Auswirkungen auf die Zuverlässigkeit der Fluss-See-Verkehre resultieren vor allem aus dem schwankenden Wasserstand des Rheins. Die hierdurch ggf. notwendigen Leichterungen bzw. Zuladungen in den ARA-Häfen können gewisse Beeinträchtigungen im Transportablauf nach sich ziehen, die eine exakte Planung erschweren. Die Organisation von Ersatzverkehren ist Aufgabe der Reedereien.

Auch die im Vergleich zu den reinen Seeschiffen geringere Seetauglichkeit kann unvorhergesehene Verzögerungen nach sich ziehen. Jedoch handelt es sich hierbei um vergleichsweise selten auftretende Fälle, so dass diesem Aspekt bei der Beurteilung der Zuverlässigkeit nur eine untergeordnete Bedeutung beizumessen ist.

Die Anforderungen an die Zuverlässigkeit der Verkehre beinhalten auch die Möglichkeit zur Sendungsverfolgung. Allerdings ist eine solche Forderung bei den einzelnen Auftraggebern unterschiedlich stark ausgeprägt. Während sich in manchen Fällen das Interesse an der Sendungsverfolgung auf die Information über Störungen des planmäßigen Ablaufs konzentriert, wollen andere Auftraggeber regelmäßig über den Verlauf des Transports unterrichtet sein. Grundsätzlich sind die Möglichkeiten zur Sendungsverfolgung beim Fluss-See-Schiff günstiger einzuschätzen als beim reinen Seeschiff, da es sich in der Regel um kleinere Fahrzeuge handelt und die Bündelung bzw. Verteilung der Ladung im Seehafen mit Wechsel des Verkehrsträgers entfällt. Damit ist über weite Strecken der Reise die Sendungsverfolgung identisch mit der von der Reederei vorgenommenen Schiffsverfolgung.

3.1.6 Sonstige Aspekte

Im Zusammenhang mit den allgemeinen Hemmnissen der wassergebundenen Transporte wurde bereits auf die in der verladenden Wirtschaft bestehenden Informationsdefizite hingewiesen. Gerade für die Fluss-See-Schifffahrt, die aufgrund ihres Wertigkeitsprofils an bestimmte Voraussetzungen der zu befahrenden Relationen gebunden ist und deshalb nur über einen relativ geringen Marktanteil verfügt, muss mit besonders ausgeprägten Informationsdefiziten gerechnet werden. Dies gilt umso mehr, da die Versandabteilungen der versendenden bzw. empfangenden Unternehmen zunehmend verkleinert werden (Auslagerungen), so dass die Kapazitäten zur Prüfung alternativer Transportmöglichkeiten vielfach nicht mehr gegeben sind.

3.2 Relationsbezogene Rahmenbedingungen – Navigatorische und infrastrukturelle Einflussfaktoren auf dem Rhein

Bezogen auf den Seeverkehr sind hier vor allem die Bedingungen auf der Nordsee von Relevanz, im Hinblick auf den Binnenwasserstraßenverkehr ist hier schwerpunktmäßig auf den Rhein einzugehen.

3.2.1 Infrastruktur des Rheins

In der europäischen Binnen-See-Schifffahrt hat der Rhein mit seinem bevölkerungsreichen und stark industrialisierten Hinterland eine starke Bedeutung. Trotz seiner im Vergleich zu anderen europäischen Binnenwasserstraßen gut ausgebauten Infrastruktur darf nicht außer Acht gelassen werden, dass er ein Gebiet durchfließt, welches sich durch ein ausgeprägtes Fernstraßen- und Schienennetz auszeichnet. Somit steht das Binnen-See-Schiff, während es den Rhein befährt, jederzeit im Wettbewerb zum Binnenschiff wie auch zu den Landverkehrsträgern Lkw und Bahn.

3.2.1.1 Maximale Abmessungen der Fahrzeuge im Rheingebiet

Die zulässigen Abmessungen (Länge und Breite) der im Rheingebiet operierenden Fahrzeuge werden für den deutschen Bereich in der Rheinschifffahrts-Polizei-

Verordnung festgelegt. Für den holländischen Bereich gilt eine gleichlautende Verordnung.

Gemäß § 11.01 betragen die Höchstabmessungen eines einzeln fahrenden Fahrzeugs 135 m in der Länge und 22,80 m in der Breite. Wenn bestimmte Wasserstände unter- oder überschritten werden, greifen in Bezug auf die maximal zulässige Länge jedoch Einschränkungen, so dass u. U. nur Schiffe bis maximal 110 m Länge fahren dürfen.

Aufgrund des teilweise recht stark schwankenden Wasserstands auf dem Rhein sind die Aspekte Tiefgang (im Falle von Niedrigwasser) und Brückendurchfahrtshöhen (bei Hochwasser) von großer Bedeutung.

3.2.1.2 Einschränkungen durch Niedrigwasser

3.2.1.2.1 Zusammenhang zwischen Pegelstand, Fahrwassertiefe und Abladetiefe

Die Leistungsfähigkeit einer Binnenwasserstraße - und dies trifft besonders für frei fließende Gewässer mit schwankenden Wasserständen zu - hängt, neben Brückendurchfahrtshöhen, in erster Linie von dem für die Schifffahrt zur Verfügung stehenden Fahrwasserquerschnitt (Fahrrinne) ab. Der Fahrwasserquerschnitt wird gebildet aus der Fahrwasserbreite und der Fahrwassertiefe.

Fahrwassertiefe des Rheins

Bei der Festlegung des Fahrwasserquerschnitts geht man zunächst von einem "minimalen Fahrwasserquerschnitt" aus, für dessen Festlegung die engste Stelle innerhalb eines betrachteten Wasserstraßenabschnitts bei Niedrigwasser herangezogen wird. Die Fahrwassertiefe, die diesem minimalen Fahrwasserquerschnitt zugrunde liegt, ist im Falle des Rheins der amtlich festgelegte "gleichwertige Wasserstand" (Gl.W), ein Wasserstand, der langfristig durchschnittlich an nur 20 Tagen im Jahr unterschritten wird. Auf der Basis dieser Fahrwassertiefe ergibt sich die jeweilige Fahrwasserbreite im betrachteten Wasserstraßenabschnitt. Für den deutschen Rhein lag die Wassertiefe des Gl.W im Jahre 2000 je nach Flussabschnitt zwischen 1,90m und 2,50m.

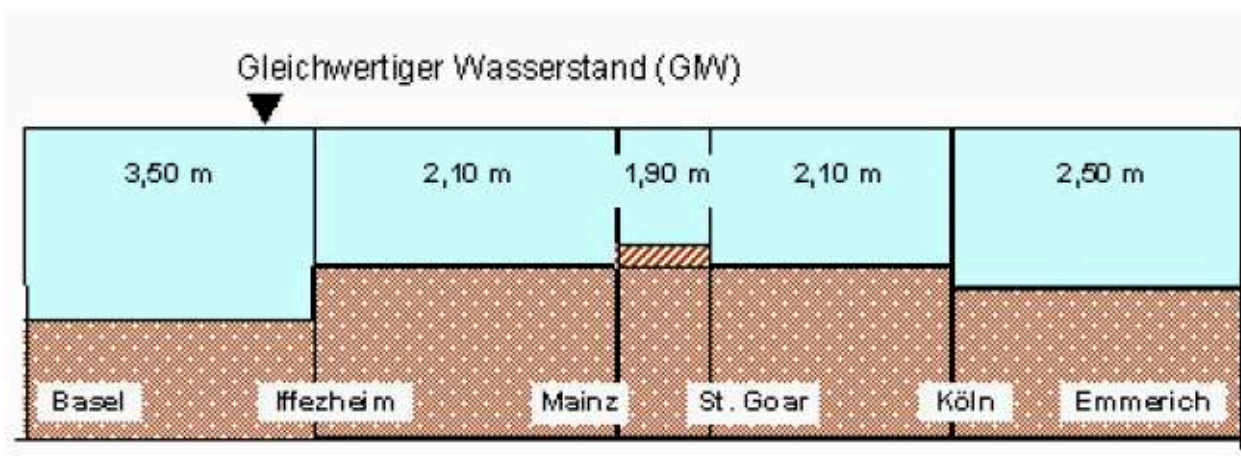


Abb. 76 Fahrrinntiefen des Rheins (Quelle: www.elwis.de – Jan. 2005)

Die von Köln bis zur Bundesgrenze zu den Niederlanden gegebene Wassertiefe des Gl.W von 2,50 m ist auch in den Niederlanden sichergestellt. Im Herbst 2006 wurde für den Bereich zwischen Duisburg und Rotterdam die Fertigstellung der Fahrrinnenvertiefung auf 2,80 m bekannt gegeben. Oberhalb der Schleuse Iffezheim ist der Rhein kanalisiert, hier ist von einer ganzjährigen Mindestwassertiefe von 3,50 m auszugehen.

Die für den maximalen Tiefgang maßgebliche Wassertiefe innerhalb des durch die Fahrwasserbreite festgelegten Fahrwasserquerschnitts hängt vom jeweiligen Wasserstand ab und ergibt sich aus dem Pegelmesswert und dem dazugehörigen Gl.W. Der Zusammenhang zwischen Gl.W, Pegelanzeige, Fahrwassertiefe und Schiffstiefgang wird in Abb. 77 dargestellt.

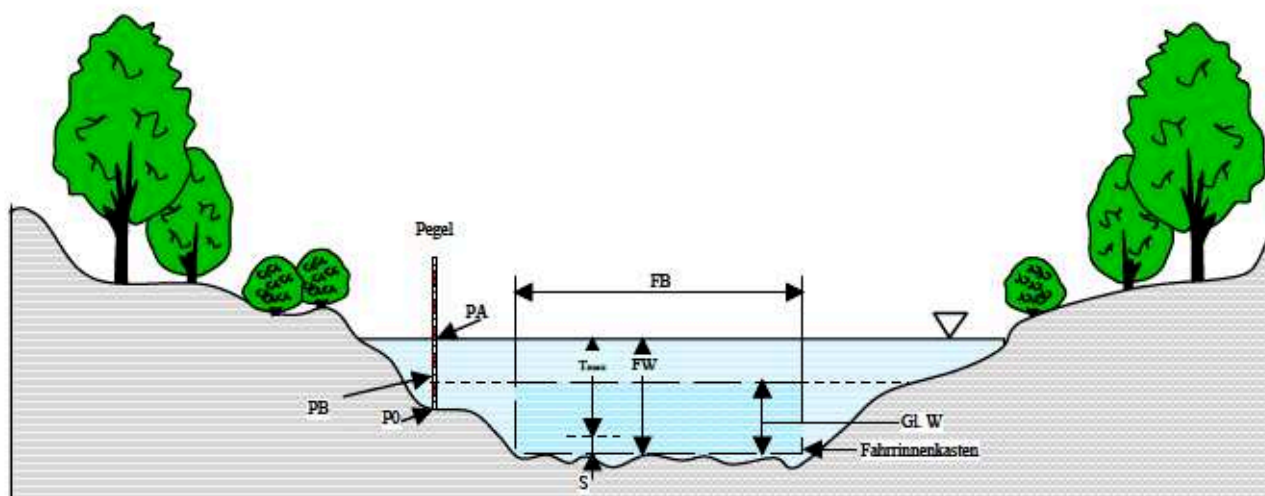


Abb. 77 Zusammenhang zwischen Gl.W, Pegelanzeige, Fahrwassertiefe und Schiffstiefgang

Hierin bedeuten:

- FW = Fahrwassertiefe
- FB = Fahrwasserbreite
- Gl.W = Gleichwertiger Wasserstand
- PA = Pegelanzeige
- PB = Pegelbezugswert zum Gl.W
- PO = Pegelnull
- T_{max} = maximaler Schiffstiefgang
- S = Abstand zwischen Schiffsboden und Fahrinnenboden (Flottwasser)

Die Pegelbezugswerte (PB) werden aufgrund möglicher, langfristig auftretender Veränderungen des Flussbetts im Bereich des Rheins regelmäßig überprüft und ca. alle 10 Jahre amtlich neu festgelegt.

Mit den Angaben zu Pegelbezugswerten und Gl.W sowie der jeweiligen Pegelanzeige kann die Fahrwassertiefe ermittelt werden:

$$FW = PA - PB + Gl.W$$

Da der Pegelbezugswert und der Gl.W für den betrachteten Pegelort als konstant anzusehen sind, ist die Fahrwassertiefe vereinfachend aus Pegelanzeige plus Zuschlagswert (ZW) zu errechnen:

$$FW = PA + ZW$$

Beispiel für Emmerich:

Emmerich wird in diesem Fall als Beispiel herangezogen, um deutlich zu machen, dass Pegelanzeige und Fahrwassertiefe deutlich auseinander liegen können.

PA (Pegelanzeige)	+ 3,00 m
ZW (Zuschlagswert)	<u>+ 1,70 m</u>
FW (Fahrwassertiefe)	4,70 m

Die Pegelstände des Rheins werden täglich bekannt gegeben und aufgezeichnet. Wie sich die stark schwankenden Wasserstände, exemplarisch bezogen auf Emmerich, z. B. über das Jahr 2004 verteilen, wird in Abb. 77 verdeutlicht.

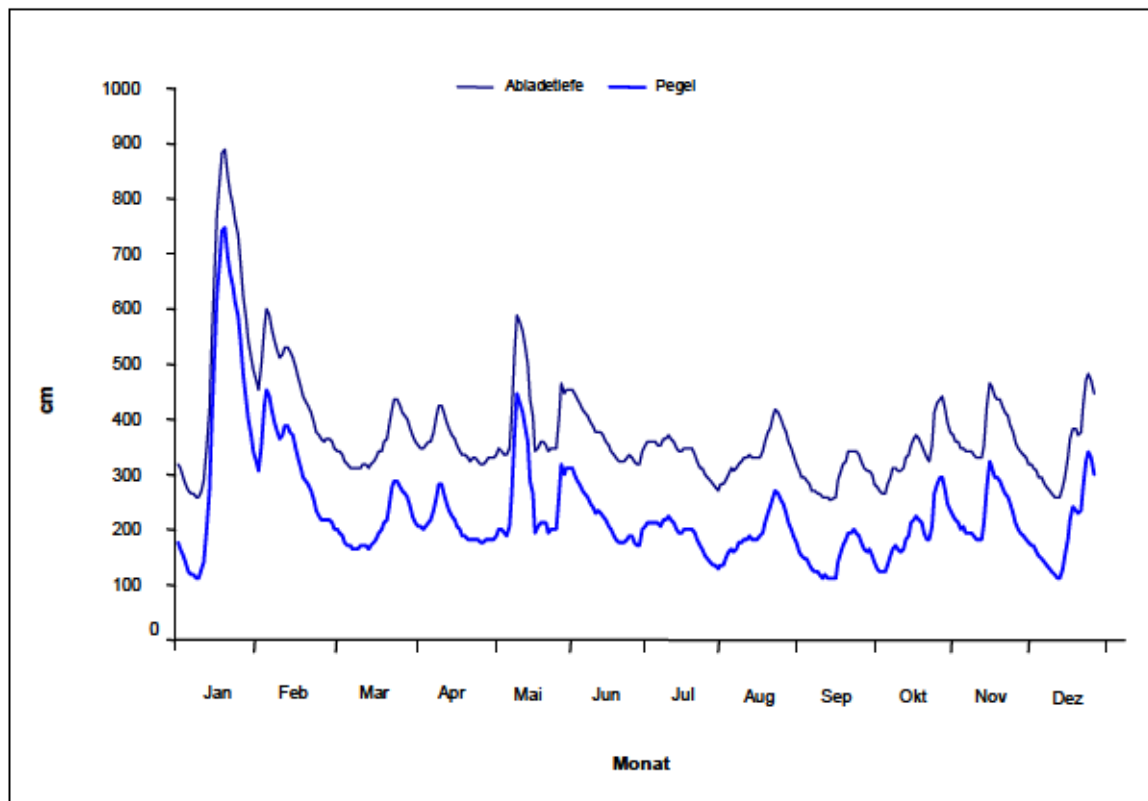


Abb. 78 Verlauf des Pegels Emmerich und die sich ergebende maximale Abladetiefe für 2004

Der Verlauf der maximalen Abladetiefe folgt dem Verlauf des Pegels, jedoch um den konstanten Betrag nach oben verschoben, der sich aus dem Zuschlagswert ZW und Flottwasser S errechnet.

Da für die Beurteilung des Einflusses von Wasserstandsschwankungen nicht die Fahrwassertiefe, sondern der sich hieraus ergebende maximale Schiffstiefgang ausschlaggebend ist, wird nachfolgend nur noch auf den Tiefgang bzw. die Abladetiefe Bezug genommen, wobei in allen Fällen ein Flottwasser von 0,25 m zugrunde gelegt wurde.

Der Wasserstand in den Häfen

Der Wasserstand in den Rheinhäfen folgt dem Wasserstand des Rheins. Zur Errechnung der Fahrwassertiefe sind deshalb auch hier zum jeweiligen Ortspegel die entsprechenden Zuschläge zu addieren.

Die Daten zeigen, dass die Unterschiede zwischen den Wasserständen des Rheins und in den Häfen nur geringfügig sind, so dass bei den folgenden Analysen i. W. von den Wasserständen des Rheins ausgegangen wird.

Tabelle 5: Zuschlagswerte zum Ortspegel für ausgewählte Rheinhäfen zwischen Emmerich und Köln

Hafen	Zuschlagswert zum Ortspegel [m]
Ludwigshafen	Stromhäfen: +0,55 ¹⁾ Übrige Häfen: +1,05 ¹⁾
Köln	+ 1,05 / +1,10
Düsseldorf	+ 1,35
Duisburg-Ruhrort	+ 0,40
Wesel	+ 0,70
Emmerich	+ 1,45

1) Bezugspegel: Mannheim

3.2.1.2.2 Einfluss des Niedrigwassers auf den Tiefgang

Zur Beurteilung des Einflusses von Niedrigwasser auf den Tiefgang und damit auf die Wirtschaftlichkeit der eingesetzten Schiffe ist es erforderlich festzustellen, an wie vielen Tagen pro Jahr ein bestimmter Tiefgang nicht überschritten werden darf. Da die Höhe der Wasserstandsschwankungen und auch ihr zeitlicher Verlauf sich von Jahr zu Jahr ändern, ist es nicht ratsam, sich nur auf ein bestimmtes Bezugsjahr zu konzentrieren. Vielmehr ist es bei der Ermittlung des Niedrigwassereinflusses sinnvoll, sich auf einen Mittelwert zu beziehen, der sich aus einem längeren Betrachtungszeitraum ergibt.

Nachfolgend sind die Regelverläufe von Emmerich für einen Betrachtungszeitraum zwischen 1990 und 2004 ausgewertet und in Abb. 79 den sich ergebenden maximalen Abladetiefen die Anzahl der Tage pro Jahr zugeordnet, an denen diese Abladetiefe zur Verfügung steht. In dieser Darstellung kommen die großen Unterschiede zwischen den verschiedenen Jahren deutlich zum Ausdruck.

Das sich für diese Zeitspanne ergebende arithmetische Mittel ist in Abb. 80 dargestellt.

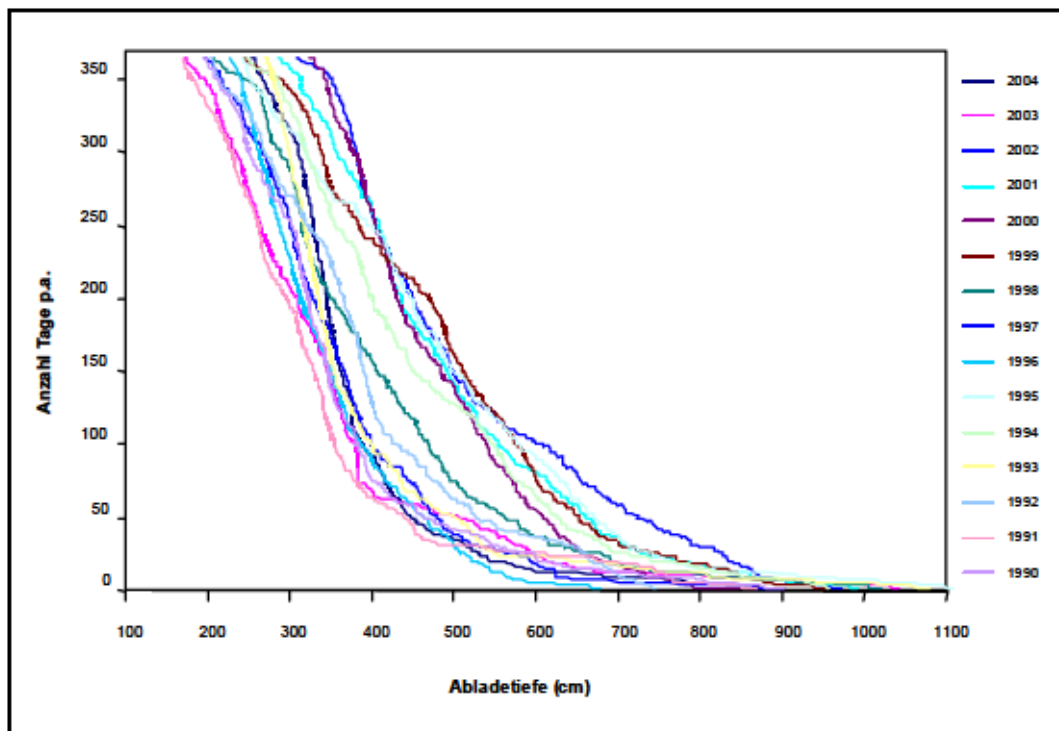


Abb. 79 Abladetiefe und Anzahl der Tage pro Jahr, an denen diese Abladetiefe zur Verfügung steht - Pegel Emmerich für die Jahre 1990 - 2004

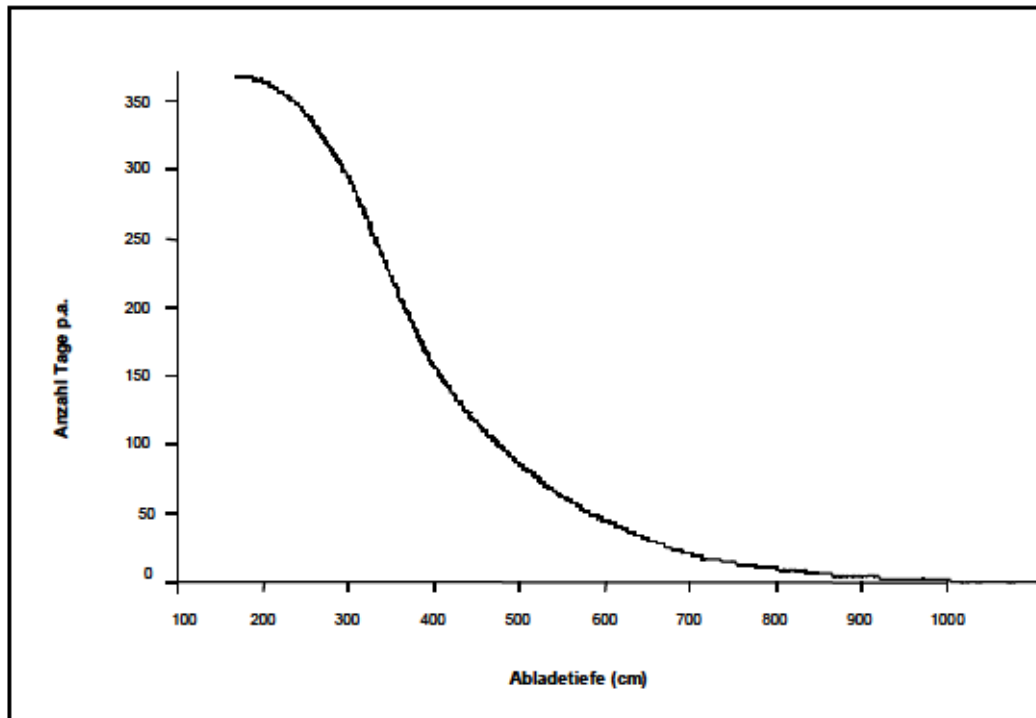


Abb. 80 Abladetiefe und Anzahl der Tage pro Jahr, an denen diese Abladetiefe zur Verfügung steht - Pegel Emmerich, gemittelt über den Beobachtungszeitraum 1990 - 2004

Für spätere Kostenanalysen ist es erforderlich, den Bereich innerhalb des vorgesehenen Fahrtgebietes herauszuarbeiten, der aufgrund besonders großer Tiefgangseinschränkungen maßgeblich ist für den maximalen Tiefgang auf der gesamten Fahrstrecke. Für die zu betrachtenden Relationen von Rotterdam bis

- (a) Duisburg
- (b) Köln und
- (c) Ludwigshafen

wurden die relevanten Daten der Pegel Lobith (NL), Emmerich, Ruhrort, Düsseldorf, Köln, Koblenz, Bingen / Oestrich und Mannheim zusätzlich ermittelt und relationsbezogen in Abb. 81 bis Abb. 83 dargestellt.

Relation Rotterdam – Duisburg

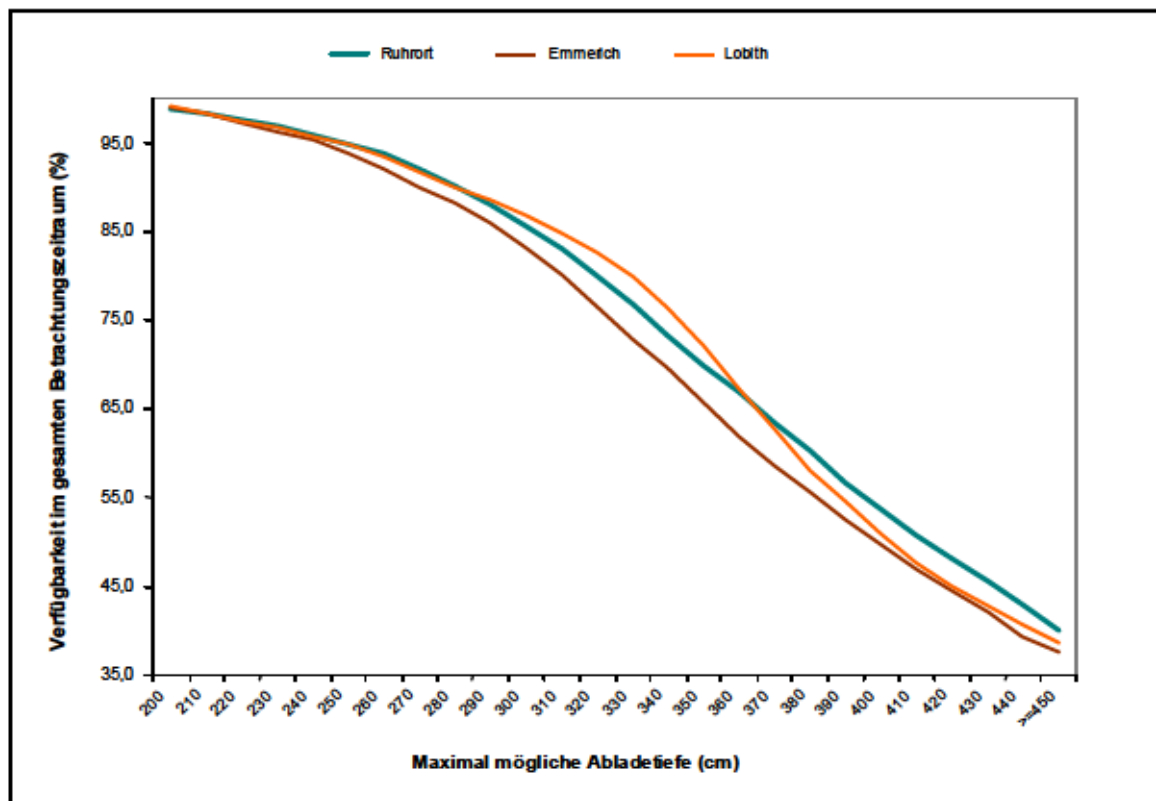


Abb. 81 Relation Rotterdam – Duisburg: Anteil der Tage über den Gesamtzeitraum 1981 bis 2005, an denen eine bestimmte Abladetiefe zur Verfügung stand - verschiedene Pegelorte

Es wird deutlich, dass innerhalb der für die Binnen-See-Schifffahrt relevanten Abladetiefen zwischen 3 und 4,5 m der Pegelort Emmerich unterhalb dem von Ruhrort liegt und damit ein nach Duisburg gehendes Schiff die größere Abladetiefe am Pegel Ruhrort nicht ausnutzen kann, da es Emmerich mit einer geringeren Abladetiefe passieren muss. So steht z. B. eine Abladetiefe von 3 m am Pegelort Ruhrort an 86%

aller Tage und am Pegelort Emmerich nur an 82% aller Tage zur Verfügung. Der von Emmerich Flussabwärts liegende Pegel Lobith zeigt Abladewerte, die über denen von Emmerich liegen. D. h., dass die Schifffahrt unterhalb Emmerichs wieder weniger stark durch Niedrigwasser beeinflusst wird. Generell ist in Bezug auf den niederländischen Streckenabschnitt davon auszugehen, dass die Tiefgangsbedingungen hier nicht schlechter als am ungünstigsten Pegel Emmerich sind.

Relation Rotterdam – Köln

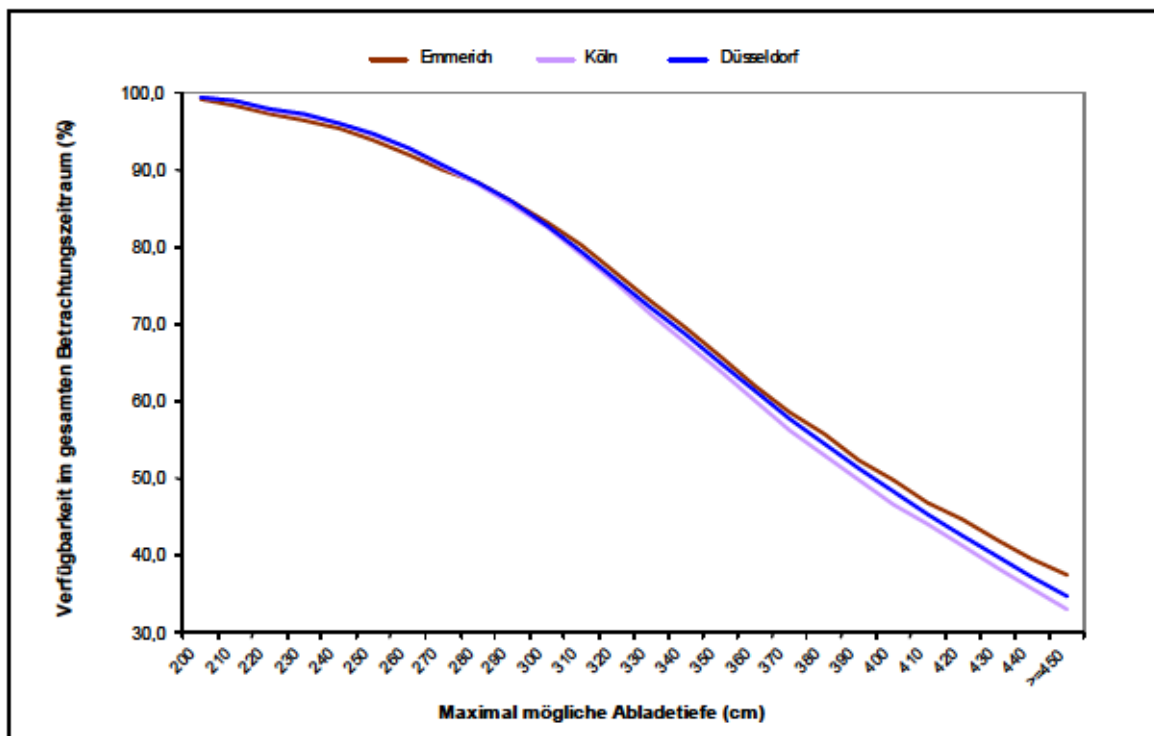


Abb. 82 Relation Rotterdam – Köln: Anteil der Tage über den Gesamtzeitraum 1981 bis 2005, an denen eine bestimmte Abladetiefe zur Verfügung stand - verschiedene Pegelorte

Der Engpass auf diesem Abschnitt ist der Pegel Köln, wobei hier aber nur geringe Unterschiede zwischen den Pegelorten zu konstatieren sind.

Relation Rotterdam – Ludwigshafen

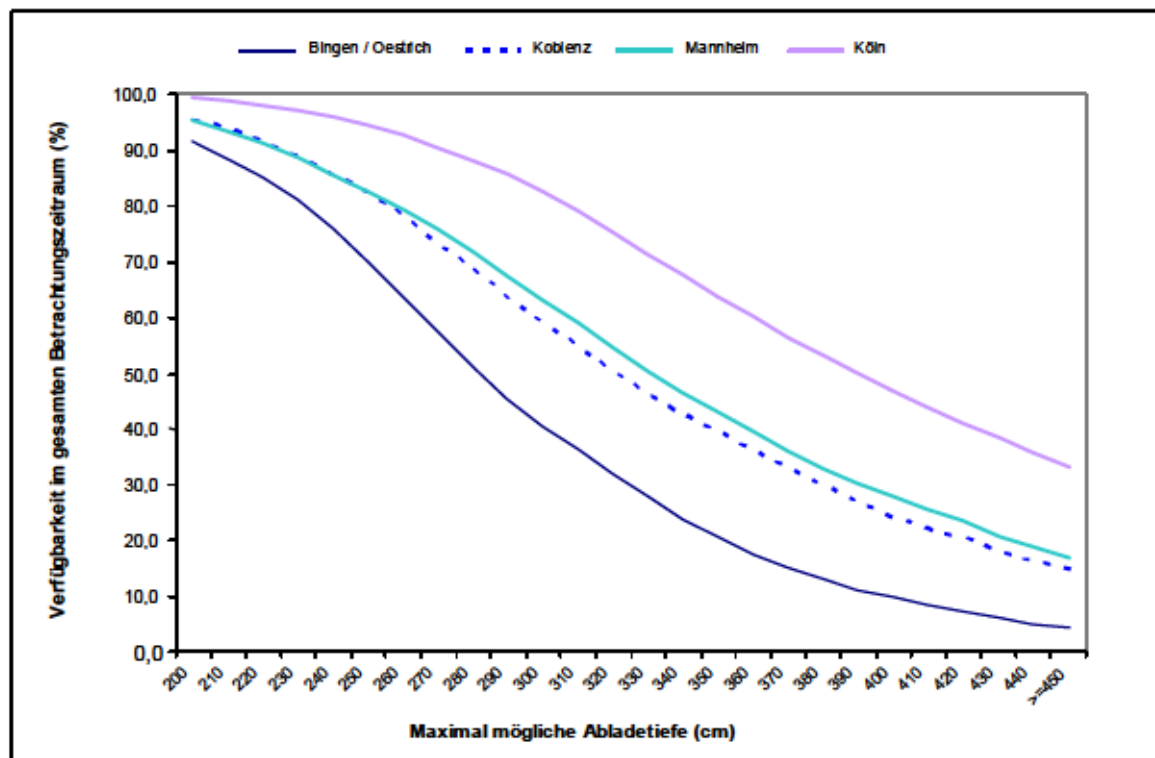


Abb. 83 Relation Rotterdam – Ludwigshafen: Anteil der Tage über den Gesamtzeitraum 1981 bis 2005, an denen eine bestimmte Abladetiefe zur Verfügung stand - verschiedene Pegelorte

Der Pegel Bingen / Oestrich ist hier ganz deutlich der maßgebende Engpaß. Während am Pegel Köln an rund 85% aller Tage eine Abladetiefe von 3,00 m gegeben ist, steht eine solche Abladetiefe im Bereich Bingen / Oestrich lediglich an knapp 45% aller Tage des Beobachtungszeitraums zur Verfügung. Aus dieser Darstellung wird deutlich, dass bei Fahrten oberhalb Kölns, und insbesondere im Engstellenbereich zwischen St. Goar und Budenheim-Niederwalluf, deutlich größere Abladebeschränkungen bestehen als unterhalb Kölns.

An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass es sich bei den zuvor ermittelten Ergebnissen um langfristige Durchschnittswerte handelt, die später den Kostenanalysen zugrunde gelegt werden. Im täglichen Betrieb sind für den maximalen Tiefgang allein die tatsächlich vorhandenen Wasserstände an den verschiedenen Pegelorten maßgeblich.

3.2.1.3 Einschränkungen durch Hochwasser

3.2.1.3.1 Zusammenhang zwischen Pegelstand und Hochwassermarke

Auf dem Rhein gibt es zwei Hochwassermarken, die die Schifffahrt beeinflussen. Bei Erreichen der Hochwassermarke I unterliegen die Schiffe Einschränkungen in Bezug auf die maximale Geschwindigkeit. Ist die Hochwassermarke II (höchster schiffbarer Wasserstand HSW) erreicht, wird die Schifffahrt im entsprechenden Was-

serstraßenabschnitt eingestellt. Beispielhaft sind für den Rheinabschnitt zwischen Emmerich und Mannheim die Pegelwerte der Hochwassermarken II in Tabelle 6 aufgeführt.

Tabelle 6: Pegelwerte der Hochwassermarken II an verschiedenen Pegelorten (Quelle: WESKA 2004)

Pegelort	Pegelwerte der Hochwassermarken II [m]
Mannheim	7,60
Koblenz	6,50
Köln	8,30
Düsseldorf	8,80
Ruhrort	11,30
Wesel	10,60
Emmerich	8,70

Eine Auswertung längerfristiger Zeitreihen – beispielsweise für die Rheinstrecke zwischen Emmerich und Köln für den Zeitraum von 1990 bis 2005 – zeigt, dass eine hochwasserbedingte Einstellung der Schifffahrt an den verschiedenen Pegelorten zwar in recht unterschiedlicher Häufigkeit, insgesamt jedoch an nur sehr wenigen Tagen pro Jahr auftrat.

3.2.1.3.2 Durchfahrtshöhen

Deutscher Bereich des Rheins

Ebenfalls eng mit dem Pegelstand verbunden ist die Durchfahrtshöhe unter den Rheinbrücken. Maßgeblich ist hier die lichte Höhe über dem höchsten schiffbaren Wasserstand (HSW), der sich bei Erreichen der Hochwassermarken II einstellt. Wie oben beschrieben, wird bei Erreichen der Hochwassermarken II die Schifffahrt eingestellt, so dass die Brücken auch nicht mehr unterfahren werden.

Da oberhalb von Köln die Binnen-See-Schifffahrt nur noch in einem verhältnismäßig geringen Umfang stattfindet, liegt der Schwerpunkt der folgenden Betrachtungen auf den lichten Durchfahrtshöhen der Rheinbrücken zwischen Köln und Emmerich. Wie Tabelle 7 zeigt, sind die niedrigsten Brücken im betrachteten Stromabschnitt die Düsseldorfer Südbrücke mit 8,61 m, die Düsseldorfer Kniebrücke mit 8,82 m und die Brücke Rheinhausen-Hochfeld mit 8,88 m Durchfahrtshöhe. Die restlichen Brücken weisen eine Durchfahrtshöhe von mindestens 9,10 m auf. Hierbei beziehen sich alle Höhenmaße auf den HSW. D. h., dass entsprechend dem gegenüber HSW (Hochwassermarken II) niedrigeren Pegelstand die Rheinbrücken von Schiffen mit größeren Fixpunkthöhen, als in Tabelle 7 dargestellt, passiert werden können.

Tabelle 7: Durchfahrtshöhen der Rheinbrücken zwischen Köln und Emmerich

	Brückenbezeichnung	Rhein- km	S = Straßenbrücke; E = Eisenbahnbrücke	Lichte Höhe über HSW [m]
Köln	Rodenkirchen, Autobahn	683,37	S	9,10
	Köln –Bayerthal-Brücke	685,71	E	9,10
	Severinsbrücke	687,28	S	9,10
	Köln-Deutzer Brücke	687,93	S	9,10
	Hohenzollernbrücke	688,48	E	9,10
	Zoobrücke	690,16	S	9,10
	Köln-Mülheim	691,95	S	9,10
	Leverkusen	Autobahnbrücke	701,45	S
Düsseldorf	Flehe Autobahnbrücke	732,45	S	9,10
	Südbrücke	737,10	S	8,61
	Neuß-D´dorf	738,19	E	9,10
	Kniebrücke	743,57	S	8,82
	Oberkasseler Brücke	744,84	S	9,10
	Düsseldorf Nord	746,70	S	9,10
	Flughafenbrücke	752,50	S	9,10
	Krefeld	Uerdingen-Mündelheim	764,04	S
Duisburg	Rheinhausen-Duisburg	774,38	E	9,10
	Rheinhausen-Hochfeld	775,29	S	8,88
	Neuenkamp	778,36	S	9,10
	Friedrich-Ebert-Brücke	780,70	S	9,10
	Duisburg-Baerl	785,02	E	9,10
	Emscherschnellweg	785,26	S	9,10
Wesel	Büderich	813,85	S	9,10
Rees	Rees-Kalkar	838,65	S	9,10
Emmerich	Emmerich-Kleve	853,23	S	9,10

Bei den Brückenhöhen handelt es sich um Mindesthöhen.

Für die niedrigste Brücke im betrachteten Streckenabschnitt, die Düsseldorfer Südbrücke, ist in der nachfolgenden Abb. 84 für den Beobachtungszeitraum 1990 - 2005 die lichte Durchfahrtshöhe der Anzahl der Tage pro Jahr zugeordnet, an denen diese Höhe gegeben ist. Hier zeigt sich, dass Schiffe mit einer Fixpunkthöhe von 11 m an durchschnittlich 340 Tagen pro Jahr die Brücke passieren können.

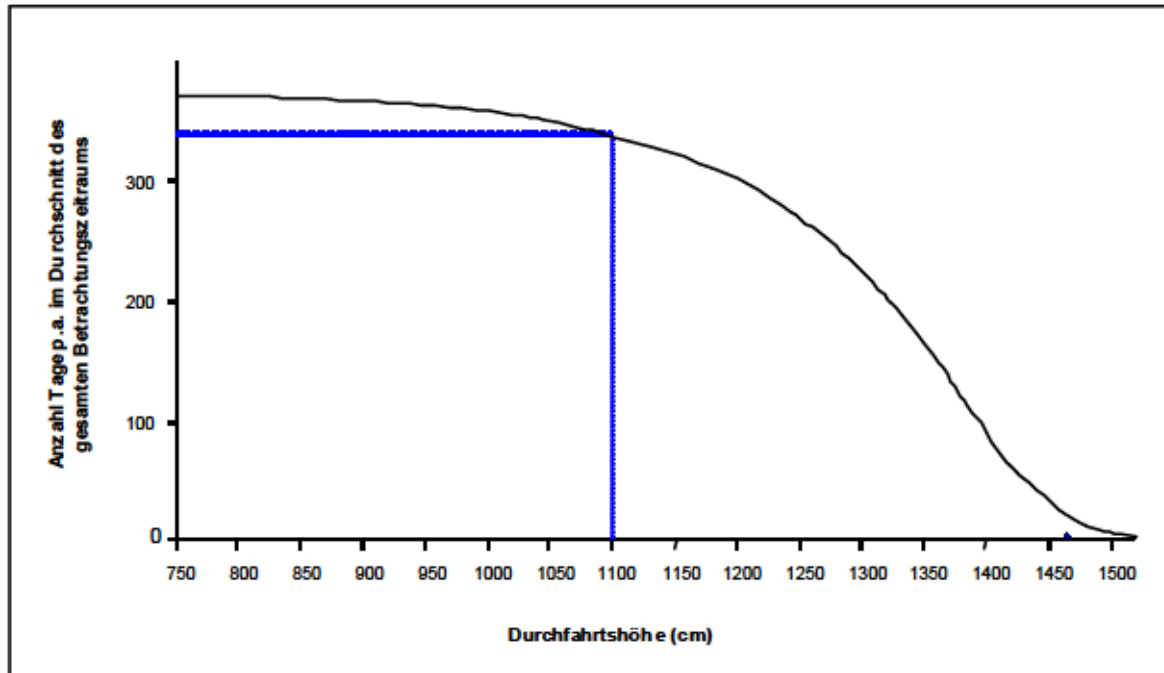


Abb. 84 Lichte Durchfahrtshöhe und Anzahl der Tage pro Jahr, an denen diese Durchfahrtshöhe an der Düsseldorfer Südbrücke gewährleistet wird - gemittelt über den Beobachtungszeitraum 1990 – 2005

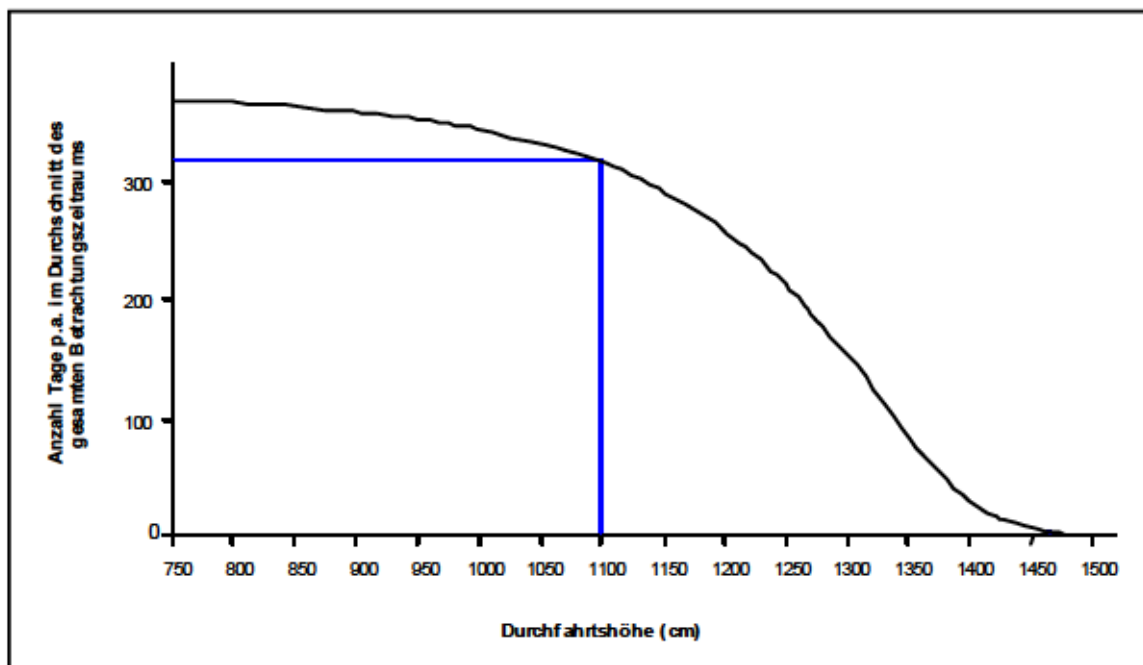


Abb. 85 Durchfahrtshöhe und Anzahl der Tage pro Jahr, an denen diese Durchfahrtshöhe an der Vinckekanalbrücke, Hafen Duisburg, gewährleistet wird - gemittelt über den Beobachtungszeitraum 1990 - 2005

Niederländischer Bereich des Rheins und Wasserstraßen nach Antwerpen

Im Vergleich zu den niedrigsten Brückendurchfahrtshöhen zwischen Köln und Emmerich verfügen die Brücken unterhalb von Emmerich und auch auf dem Schifffahrtsweg zwischen Rotterdam und Antwerpen entweder von vornherein über größere Durchfahrtshöhen oder können durch besondere Ausstattungen (Klappbrücke, Hebebrücke) eine ausreichende Durchfahrtshöhe gewährleisten.

Durchfahrtshöhen der Hafенbrücken

Um die Be- und Entladestellen in den Binnenhäfen zu erreichen, sind neben den Rheinbrücken auch die Brücken innerhalb der Häfen zu passieren. Als Beispiel sind die Brücken der Häfen Köln und Duisburg in Tabelle 8 aufgeführt.

Tabelle 8: Durchfahrtshöhen der Brücken in den Häfen Köln und Duisburg

Ort	Hafen	Bezeichnung	Lichte Höhe über HSW [m]
Köln	Deutzer Hafen	Drehbrücke	-0,10/∞
	Rheinauhafen	Drehbrücke	-0,10/∞
	Mülheimer Hafen	Fußgängerbrücke	8,60
	Niehl-Hafen	Fußgängerbrücke	9,10
Duisburg Ruhrort	Eisenbahnhafen		8,71
	Hafenmund		6,81
	Vinckekanalbrücke		5,71 ¹⁾
	Kaiserhafenbrücke		5,21
	Hafenkanalbrücke		6,41
	Becken C		10,81
Duisburg	Außenhafen	Leitungsbrücke	9,00
	Außenhafen	Straßenbrücke	8,20
	Marientorbrücke	Klappbrücke	0,5/∞ ²⁾
	Schwanentorbrücke	Hubbrücke	-2,00/6,10

1) Einfahrt zum Containerterminal

2) Bei einem Pegelstand von ca. 8,40 m ist die Marientorschleuse geschlossen und die Brücke nicht durchfahrbar.

Im Bereich der Duisburg-Ruhrorter Häfen sind die Vinckekanalbrücke mit einer Durchfahrtshöhe von 5,71 m und die Kaiserhafenbrücke mit 5,21 m die niedrigsten. Zur Vinckekanalbrücke ist zu bemerken, dass sie in der Einfahrt zum Containerterminal liegt und somit auch bei Wasserständen, die geringer als der HSW sind, eine Beeinträchtigung in der Containerschifffahrt auftreten kann. Für diese Brücke sind in Abb. 85 die durchschnittliche Anzahl der Tage pro Jahr, an denen eine bestimmte

Durchfahrtshöhe erreicht wird, für den Beobachtungszeitraum 1990 bis 2005 dargestellt. So ist z. B. für diese Brücke eine Durchfahrtshöhe von 11 m im Mittel an ca. 320 Tagen pro Jahr vorhanden.

Durchfahrtshöhen der Brücken oberhalb Kölns

In nachfolgender Tabelle 9 sind die lichten Durchfahrtshöhen über dem höchsten schiffbaren Wasserstand (HSW) der Rheinbrücken von Mannheim an rheinabwärts bis oberhalb Kölns angegeben.

Tabelle 9: Lichte Durchfahrtshöhen der Brücken zwischen Iffezheim und Bonn/Köln

	Brückenbezeichnung	Rhein- km	S = Straßenbrücke; E = Eisenbahnbrücke	Lichte Höhe über HSW [m]
Mannheim	Konrad Adenauer Brücke	424,43	S/E	9,10
	Kurt Schuhmacher Brücke	425,68	S	9,10
	Theodor Heuss Brücke	432,60	S	9,10
Worms		443,26	S	9,10
		445,45	E	9,10
Mainz		493,65	S	9,10
		496,40	E	9,10
	Theodor Heuss Brücke	498,47	S	9,10
	Kaiserbrücke	500,90	E	9,10
Wiesbaden	Schierstein	504,45	S	9,10
Koblenz		588,44	S	9,10
	Horchheim	588,52	E	9,10
	Pfaffendorf	590,87	S	9,10
	Autobahn	598,42	S	9,10
Neuwied	Urmitz-Engers	602,10	E	9,10
	Weißenthurm	607,73	S	9,10
Bonn	Konrad Adenauer Brücke	651,38	S	9,10
	Kennedy Brücke	654,94	S	9,10
	Nordbrücke	657,15	S	9,10

Auf diesem Rheinabschnitt erreichen alle Brücken die auf dem Rhein übliche Durchfahrtshöhe von mindestens 9,10 m, so dass bezüglich der Durchfahrtshöhe in diesem Fahrtbereich keine zusätzlichen Beeinträchtigungen bestehen.

3.2.2 Sonstige Randbedingungen für das Befahren des Rheins

3.2.2.1 Besatzungsvorschriften für Binnenschiffe

Die Besetzung der im Rheingebiet operierenden Fahrzeuge wird in der Rheinschiffsuntersuchungsordnung (RheinSchUO) festgelegt. Beispielsweise gilt gemäß § 23.10 für ein einzelfahrendes motorisiertes Fahrzeug mit einer Länge > 86 m:

Tabelle 10: Besatzungsvorschriften für die Binnenschifffahrt im Rheingebiet

Schiffslänge L [m]		Besatzungsmitglieder	Betriebsformen				
			A ₁	A ₂	B		
3	L > 86	Schiffsführer	1	2	2	oder	2
		Steuermann	1	-	1		1 ¹⁾
		Bootsmann	-	-	-		-
		Matrose	1	1	2		1 ¹⁾
		Leichtmatrose	-	1	-		-

1) In diesem Fall muß der Steuermann neben den Schiffsführern das Rheinschifferpatent besitzen.

Die Betriebsformen sind nach § 23.05 folgendermaßen definiert:

A₁: Tagesfahrt (bis zu 14 Stunden pro Tag)

A₂: halbständige Fahrt (bis zu 18 Stunden pro Tag)

B: ständige Fahrt (bis zu 24 Stunden pro Tag)

Für Rhein-See-Schiffe, die den Rhein befahren, gilt darüber hinaus Anlage G der RheinSchUO. Hiernach heißt es auszugsweise:

1. Es können die für die Binnenschifffahrt geltenden Besatzungsvorschriften, Kapitel 23 der RheinSchUO, Anwendung finden.
2. Es kommen die Besatzungsregeln nach den Grundsätzen der Internationalen Seeschiffahrtsorganisation (IMO) zur Anwendung. Die Besatzungsstärke muß mindestens der aus Kapitel 23, Betriebsform B, der RheinSchUO entsprechen.

Für ein Rhein-See-Schiff könnte demzufolge die Betriebsform "B" angewendet werden. Hiernach benötigt ein Binnen-See-Schiff, während es sich im Rheingebiet befindet, 5 bzw. 4 Besatzungsmitglieder. Da jedoch die Rhein-See-Schiffe gemäß den Vorschriften für die Seefahrt mit einer deutlich größeren Mannschaft besetzt werden, haben sie, sofern sie mit dieser größeren Mannschaft auch die Binnenwasserstraßen befahren, bezüglich der Besatzungsstärke auf der Binnenstrecke Nachteile gegenüber den Binnenschiffen.

3.2.2.2 Lotsenpflicht auf dem Rhein

Gemäß Artikel 26(1) und (2) der Zusatzprotokolle der Mannheimer Akte von 1868 besteht auf dem Rhein keine Lotsenpflicht. Jedoch darf ein Fahrzeug auf dem Rhein nur von Personal geführt werden, das im Besitz des Rheinschifferpatents ist. Ist dies

nicht der Fall, muss die Hilfe eines Hilfsschiffsführers bzw. eines Rheinlotsen in Anspruch genommen werden.

Da die Rhein-See-Schiffe größtenteils außerhalb der Binnenwasserstraßen in internationalen Seegebieten operieren, verfügt die Besatzung grundsätzlich über sämtliche Patente, die in internationalen Seegebieten erforderlich sind. Dagegen besitzt die Schiffsführung nur in wenigen Ausnahmefällen ein Rheinpatent, so dass während der Fahrt im Rheingebiet größtenteils zusätzlich ein Lotse an Bord genommen werden muss.

3.2.3 Navigatorische und infrastrukturelle Einflussfaktoren auf der Nordsee – Bedingungen für den Seeverkehr

3.2.3.1 Wetterbedingungen im Seegebiet

Wie bereits in Abschnitt 2.1 angemerkt, werden die Anforderungen an ein Binnen-See-Schiff durch das jeweilige Fahrtgebiet beeinflusst. In dem von uns betrachteten Fahrtgebiet handelt es sich - neben dem Rheingebiet - um das Seegebiet zwischen Rotterdam und Großbritannien sowie der west- und ostfriesischen Küstenregion. In der Nordsee herrschen häufig schlechte Wetterbedingungen, was an die Seefähigkeit der hier operierenden Schiffe hohe Anforderungen stellt.

Als Beispiel für die unterschiedlichen Wetterbedingungen in den Seegebieten sollen die relevanten Daten der Nordsee, gemittelt über den Zeitraum zwischen 1982 und 1990, in nachfolgenden Tabellen dargestellt werden.

Tabelle 11: Verteilung der Windstärke in der Nordsee

Windstärke		Durchschnittliche Häufigkeit
Bezeichnung	[Bft]	[%]
Orkan	12	≤0,1
Schwerer Sturm	10-11	0,5
Sturm	8-9	4,5
Starkwind	6-7	17,5
mäßiger Wind	4-5	37
Schwachwind	1-3	38
Windstille	0	2,5

Tabelle 12: Verteilung des Seegangs in der Nordsee

Seegang		Durchschnittliche Häufigkeit
Bezeichnung	Wellenhöhe [m]	[%]
sehr hoch	≥5	3
Hoch	3,5-4,5	7
Grob	2-3	25
Mäßig	1-1,5	39
Ruhig	0-0,5	31

Tabelle 13: Verteilung der Sicht in der Nordsee

Sicht		Durchschnittliche Häufigkeit
Bezeichnung	Sichtweite [Km]	[%]
Nebel	<1	2,5
Dunst	1-4	3,5
Mäßig	4-10	12
sehr gut	≥10	82

3.2.3.2 Besatzungsvorschriften für Seeschiffe

In der Binnenschifffahrt richtet sich die Besatzungsstärke eines Binnenschiffs nach der Länge bzw. Tragfähigkeit des Schiffs sowie der Betriebsform.

Die Größe und Zusammensetzung der Schiffsbesatzung eines Seeschiffs richtete sich bis vor einigen Jahren zum einen nach der Bruttoreaumzahl des Schiffs und zum anderen nach der installierten Leistung der Hauptmaschine.

Im Zuge der Marktliberalisierung wurde diese Praxis geändert [1]:

Nach der geltenden Schiffsbesetzungsverordnung (SchBesV) ist „der Reeder verpflichtet, das Schiff nach Anzahl, Qualifikation und Eignung der Besatzungsmitglieder so zu besetzen, dass die Schiffssicherheit, der sichere Wachdienst, die Einhaltung der Vorschriften des Arbeitsschutzes und des maritimen Umweltschutzes, die Erhaltung der öffentlichen Ordnung und Sicherheit an Bord sowie die sprachliche Verständigung der Besatzung untereinander gewährleistet sind.“

Auf Antrag des Reeders erteilt die See-Berufsgenossenschaft „ein Schiffsbesatzungszeugnis ... Reeder und Kapitän haben dafür zu sorgen, dass das Schiff entsprechend dem Schiffsbesatzungszeugnis besetzt ist. Das Zeugnis ist an Bord mitzuführen.“ [3].

3.3 Analyse der Kosten- und Zeitstrukturen

3.3.1 Vorgehensweise

Für die Analyse der Kosten- und Zeitstrukturen wird ein im DST entwickeltes Kostenberechnungsmodell angewendet, das für die einzelnen Projekte jeweils auf deren spezifische Anforderungen hin angepasst wird. Dies bedeutet beispielsweise, dass neu entwickelte Schiffe mit ihren Kenn- und Versuchsdaten sowie neue Fahrwasser-Verhältnisse eingepflegt werden.

Im Hinblick auf die zu untersuchenden Relationen werden deren spezifische Rahmenbedingungen – wie etwa Streckenlängen und Fahrwassertiefen – ermittelt und in die Berechnungen einbezogen. Ebenso werden bestimmte Berechnungsparameter wie etwa die Kraftstoffkosten, Anschaffungskosten und Zinssätze an die aktuelle Marktsituation angepasst.

Die Berechnungen erfolgen für das hier zu untersuchende Semikat-Konzeptschiff und ein gängiges konventionelles Vergleichsschiff, für das aufgrund früherer Projekte im Hause bereits Propulsionsdaten vorliegen.

Im Rahmen der Projektvorgaben werden relevante Berechnungsparameter wie u.a.

- Geschwindigkeiten (auf See, auf dem Rhein)
- durchschnittliches Containergewicht
- Auslastungsgrade

in vielfältiger Weise variiert, um Stärken und Schwächen des neuen Schiffskonzeptes im Vergleich zum konventionellen Schiff herauszuarbeiten.

Für die Berechnungen werden Containertransporte auf Fluss-See-Relationen (ein kompletter Umlauf) zugrunde gelegt. Die zentrale Vergleichsgröße sind die Kosten pro TEU-Kilometer. Dabei wird vorausgesetzt, dass genügend Ladung zur Verfügung steht, um die Schiffe sowohl auf der Hin- als auch auf der Rückreise entsprechend dem zugrunde gelegten Tiefgang zu beladen.

Die spezifischen Transportkosten in Cent/TEU-km ergeben sich durch Division der jährlichen Gesamtkosten [€/a] durch die Transportleistung pro Jahr [TEU-km/a].

3.3.1.1 Transportkosten

Das im DST verwendete Rechenmodell zur Ermittlung der spezifischen Transportkosten simuliert den Schiffstransport auf Binnen- und Binnen-See-Relationen. Dabei werden die geographischen und nautischen Gegebenheiten der jeweiligen Wasserstraße ebenso berücksichtigt wie die einzelnen Kostenblöcke, die durch den Betrieb und während der Liegezeit des Schiffes sowie auch durch etwaige Umbaumaßnahmen verursacht werden.

Das Modell beinhaltet sämtliche, auch kalkulatorische Kosten; Einnahmen und Gewinne sind in den nachfolgenden Betrachtungen nicht enthalten:

- wegeabhängige Kosten; hier werden die durch das Fahren des Schiffes verursachten Kosten ausgewiesen. Darunter fallen z.B. die Treibstoff- und Schmierstoffkosten sowie Reparaturkosten.
- wegeunabhängige Kosten; hierunter fallen z.B.:
 - Personalkosten
 - Versicherung
 - Abschreibung
 - Zinsen.

Ein Bestandteil der Kostenbetrachtung ist die Ermittlung der Reisezeit. Da sich im strömenden Gewässer die Reisezeiten der Hin- und Rückreise deutlich unterscheiden, wird jeweils ein Umlauf, d.h. eine Hin- und eine Rückreise, getrennt betrachtet. Darauf aufbauend erfolgt unter Berücksichtigung von Ausfallzeiten, z.B. für Reparaturen, die Ermittlung der Anzahl der Umläufe pro Jahr.

Auf dieser Basis lassen sich unter Berücksichtigung der zugrunde gelegten Geschwindigkeiten, des spezifischen Brennstoff- und Schmierölverbrauchs sowie der Brennstoff- und Schmierölkosten die jährlichen wegeabhängigen Kosten ermitteln. Die Addition der jährlichen wegeabhängigen Kosten, der Personal- und der fixen Kosten ergibt

- die jährlichen Gesamtkosten.

Diese lassen sich nun unter Berücksichtigung der Fahr- und Ausfallzeiten aufteilen in die

- Kosten pro Tag während der Fahrzeit bzw.
- Kosten pro Umlauf bzw. pro Reise und
- Kosten pro Tag während Ausfallzeiten.

3.3.1.2 Transportleistung

In dieser Untersuchung bezieht sich die Transportleistung auf den Transport von Containern. Die Transportleistung pro Jahr ergibt sich aus der

- a) Transportentfernung pro Umlauf
- b) Durchschnittliche Reisedauer pro Umlauf. Diese ist wesentlich abhängig von den gefahrenen Geschwindigkeiten und determiniert in Verbindung mit a) entscheidend die Anzahl der Umläufe bzw. Reisen pro Jahr
- c) Transportmenge in Abhängigkeit des möglichen Tiefgangs oder des möglichen Auslastungsgrades

3.3.2 Kenndaten der verglichenen Schiffe

Für die Vergleichsrechnungen wurden die Daten des Semikat-Schiffs mit denen eines typischen konventionellen Fluss-See-Schiffs verglichen. Die folgende Tabelle 14 stellt die wichtigsten Kennwerte der Schiffe gegenüber.

Tabelle 14: Übersicht der Kenndaten des Semikat-Seeschiffs und des konventionellen Vergleichsschiffs

		Konvent. Fluss-See-Schiff (KFSS)	Semikat-Seeschiff
Länge	m	100	110
Breite	m	15	13
Verdrängung	t	3300	3244
Maximale Container-Stellplatzkapazität	TEU	220	208
- Anzahl Lagen max.	TEU	4	4
- Anzahl TEU längs in einer Reihe	TEU	11	13
- Anzahl TEU nebeneinander	TEU	5	4
Max. Tragfähigkeit	t	2100	2044

Von den verschiedenen im Rahmen des Projektes entworfenen und in Modellversuchen getesteteten Semikat-Versionen wurde für die folgenden Analysen und Berechnungen die Version 3 mit Düse (M1793B) ausgewählt und zugrunde gelegt¹.

Die Daten (Abmessungen, Leistungsbedarfswerte) zum konventionellen Fluss-See-Schiff stammen weitgehend aus dem VBD-Bericht 1559 bzw. sind auf dessen Basis ermittelt worden und beziehen sich auf das Modell M1658. Der Entwurf für dieses Modell entspricht in seinen Hauptdaten den üblichen Abmessungen von Küstenmotorschiffen. Aufgrund der etwas größeren Containerstellplatz-Kapazität hat dieses Schiff gegenüber dem Semikat-Seeschiff von vornherein gewisse Größenvorteile, da die auf einer Reise anfallenden Gesamttransportkosten auf eine etwas größere Anzahl von Einheiten (TEU-Anzahl) verteilt werden können. Dennoch sind Dimensionen und Kapazität dieses Schiffs denen des Semikat-Seeschiffs noch ausreichend ähnlich, um es als Vergleichsgrundlage heranziehen zu können.

3.3.3 Kalkulationsgrundlagen

Für die Kostenberechnungen sind Fahrt- und Einsatzdauer eines Schiffs sowie bestimmte Kostenfaktoren entscheidend. Im Folgenden werden die wichtigsten Größen dargestellt und beschrieben.

3.3.3.1 Reisezeit und Einsatzdauer der Schiffe

Aus der Reisezeit und der Einsatzdauer pro Jahr ergeben sich die Anzahl der Reisen und hieraus die Anzahl der Umläufe pro Jahr.

Die Reisezeit setzt sich zusammen aus

- Fahrzeit zwischen Be- und Entladehafen

¹ Diese Version lieferte zusammen mit der Version 2 mit Düse (M1793A) unter allen Versionen insgesamt die besten Ergebnisse.

- Lade- und Löschzeit im Hafen
- Dispositionszeit sowie
- Zeitbedarf für eventuelle Schleusungen.

Die Fahrzeit ist abhängig von der Schiffsgeschwindigkeit. Diese ergibt sich aus dem jeweiligen Leistungs-Geschwindigkeitsprofil der unterschiedlichen Schiffstypen auf den verschiedenen Fahrtstrecken bei unterschiedlichen Tiefgängen. Die Daten stammen aus den im Rahmen des Projektes durchgeführten Versuchen oder aus dem DST-Archiv.

Die Lade- und Löschzeit wird bestimmt durch die Größe der im Hafen umzuschlagenden Ladung des Schiffes und die Umschlagkapazität der Verladeanlagen. Als Umschlagkapazität je Containerbrücke oder -kran werden 2 Minuten pro Box zugrunde gelegt. Der sich hieraus ergebende Zeitbedarf tritt sowohl beim Laden als auch beim Löschen auf.

Eng verbunden mit der Lade- und Löschzeit sind Puffer-, Warte- und Navigationszeiten. Diese sind als Zeiten zu verstehen, die im Hafen neben der reinen Be- und Entladezeit anfallen (z.B. für Anfahrten zu verschiedenen Terminals). Diese Zeiten sind bei größeren Schiffen tendenziell höher als bei kleineren und werden berücksichtigt, indem auf die reinen Umschlagszeiten pauschal weitere 30 % aufgeschlagen werden.

Auch die Zeit der Schleusungen beeinflusst die Reisezeit. Sie wird grundsätzlich mit je 1 Stunde pro Schleusung veranschlagt, ist aber aufgrund der hier zu untersuchenden Relationen nicht von Bedeutung.

Als Einsatzzeit werden 350 Tage pro Jahr zugrunde gelegt.

3.3.3.2 Brennstoff- und Schmierölkosten

Der Brennstoffpreis hat einen wesentlichen Einfluss auf die Transportkosten.

Abb. 86 zeigt die Entwicklung des Brennstoffpreises von Juni 2004 bis Juni 2006 in Rotterdam. Insgesamt ist eine deutliche Steigerung festzustellen.

Der in dieser Untersuchung verwendete Brennstoffpreis orientiert sich – auch aufgrund des für die Zukunft erwarteten langfristigen Preistrends – am oberen Bereich der dargestellten Preiskurve und wird mit 400 € pro Kubikmeter angesetzt.

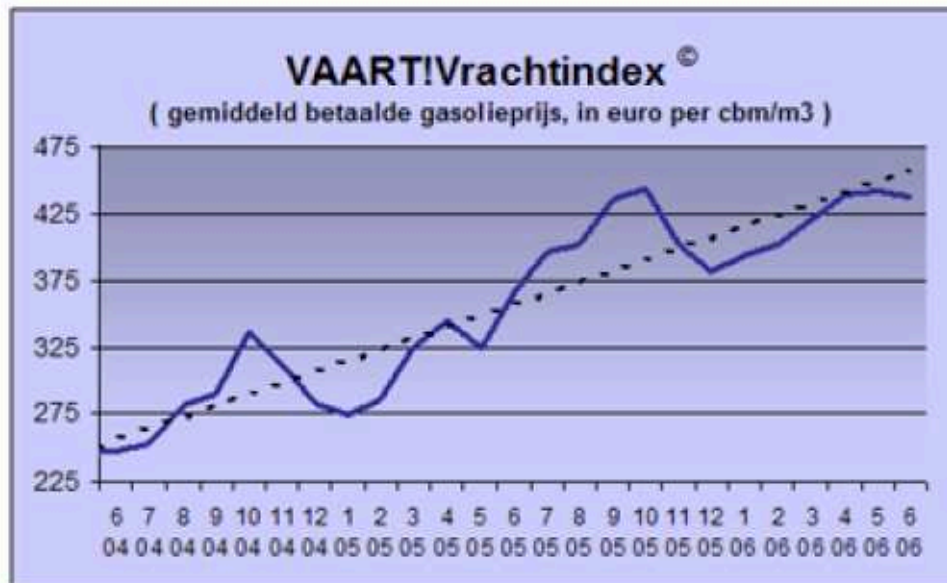


Abb. 86 Entwicklung des Brennstoffpreises in Rotterdam von Juni 2004 bis Juni 2006 [2]

Als Ansatz für die Schmierstoffkosten werden 3 % der Treibstoffkosten zugrunde gelegt.

3.3.3.3 Personalkosten

Die Personalkosten eines Schiffes richten sich nach den Gehältern der Besatzung sowie der Besatzungsstärke und -struktur.

a) Gehälter

Bei den Personalkosten erfolgt eine Orientierung an den in der Planco-Studie „Potenziale und Zukunft der deutschen Binnenschifffahrt“ [4] dargestellten Angaben. Diese wurden zunächst mit der allgemeinen Einkommensentwicklung fortgeschrieben; auf der so ermittelten Basis wurden Zuschläge für Urlaubs- und Weihnachtsgeld, Sozialabgaben und Springermannschaft eingerechnet.

b) Besatzungsstärke

Da sich die Besatzungsstärke in der Fluss-See-Schifffahrt nach dem Fahrtgebiet mit den strengeren Anforderungen richten muss, sind hier die Anforderungen für die Seeschifffahrt entscheidend.

Wie bereits im Abschnitt „Besatzungsvorschriften für Seeschiffe“ beschrieben, richtet sich die Besatzungsstärke und -zusammensetzung nach dem von der See-Berufsgenossenschaft erteilten Schiffsbesatzungszeugnis.

Für die im Rahmen dieser Untersuchung durchzuführenden Kalkulationen wurde auf eine Anfrage bei der See-Berufsgenossenschaft verzichtet. Da die beiden Vergleichsschiffe in etwa die gleiche Größe und BRZ haben, wird bei beiden von gleichen Anforderungen an Besatzungsstärke und -zusammensetzung ausgegangen und hierfür eine Besatzung von 8 Mann gemäß den früher geltenden Vorschriften

zugrunde gelegt. Selbst wenn diese Zahl von den tatsächlich von der See-Berufsgenossenschaft geforderten Werten abweichen würde, hätte dies auf den Schiffsvergleich keinen Einfluss, da der Fehler bei beiden Schiffen in gleicher Höhe gegeben wäre.

Bei den Berechnungen wird als Betriebsform die ständige Fahrt (24 Stunden/Tag) zugrunde gelegt.

3.3.3.4 Anschaffungskosten, Nutzungsdauer, Abschreibung, Zinssatz

Die Höhe der Abschreibungssumme ist abhängig von den Anschaffungskosten des Schiffes und dem Abschreibungszeitraum, der von der voraussichtlichen Nutzungsdauer des Schiffes abhängig ist.

Als Anschaffungskosten werden für den Semikat 8 Mio. Euro und für das konventionelle Fluss-Seeschiff 7 Mio. Euro zugrunde gelegt.

Die Nutzungsdauer wird mit 30 Jahren veranschlagt. Aus den Anschaffungskosten werden unter Ansatz der erwarteten Preissteigerungsrate die Wiederbeschaffungskosten nach Ablauf der Nutzungsdauer errechnet. Der jährliche Abschreibungsbetrag wird dann auf Basis der Wiederbeschaffungskosten und der Nutzungsdauer ermittelt.

Der zugrundegelegte Zinssatz beträgt 6 %.

3.3.3.5 Versicherungskosten

Bei den Versicherungskosten, die mit 12 €/max. Tragfähigkeitstonne angesetzt werden, handelt es sich ebenfalls um einen Richtwert, der auf den Kalkulationsrichtlinien von [5] basiert.

3.3.4 Wichtigste zu variierende Parameter

Aufgrund der vielen denkbaren Einsatzsituationen gibt es nicht „das“ optimale Schiff bzw. Schiffskonzept, sondern allenfalls Schiffe, die auf dem einen oder anderen Feld ihre Vorteile, auf anderen jedoch Nachteile gegenüber anderen Schiffen haben. Aus diesem Grund wurden für die Berechnungen die Parameter, die in aller Regel im Hinblick auf Kostenunterschiede ausschlaggebend sind, in vielfältiger Weise variiert, um Anhaltspunkte für etwaige Vorteile des Semikat-Schiffes gegenüber herkömmlichen Schiffen ermitteln zu können.

Neben und in Verbindung mit den zu untersuchenden Relationen mit ihren spezifischen Rahmenbedingungen, auf die im nächsten Punkt eingegangen wird, sind die folgenden die wichtigsten kostenbeeinflussenden Parameter:

Durchschnittliches Containergewicht und Auslastungsgrade

Für die Berechnungen wurden alternativ 10,0 bzw. 12,7 Tonnen pro TEU zugrunde gelegt. Der erste Wert ermöglicht in etwa eine vollständige Stellplatzauslastung bei der Vergleichsschiffe.

Letzterer Wert entspricht in etwa den bei Fluss-See-Verkehren üblichen Größenordnungen². Bei vorgegebenem Tiefgang ergeben sich auf Basis dieser Containergewichte für die Schiffe entsprechend unterschiedliche Auslastungsgrade.

Der Großteil der Modellversuche basierte auf einem Schiffstiefgang von 3,0 m. Zwar sind auch andere Tiefgänge Gegenstand der Versuche gewesen und es wären demzufolge auch Modellrechnungen für diese Tiefgänge sowie per Interpolation ermittelte Zwischenwerte möglich. Die auf dieser Basis ermittelten Versuchsdaten führten jedoch nicht zu grundsätzlich anderen Erkenntnissen als bei den Versuchen mit 3,0 m Tiefgang. Denn testweise Modellrechnungen auf der Grundlage bestimmter Auslastungsgrade (z.B. 70%) führten zu ganz ähnlichen Ergebnissen wie die Berechnungen, die von einer Beladung bis zu einem Tiefgang von 3,0 Metern ausgehen. Daher wird aus Gründen besserer Übersichtlichkeit und zur Redundanzvermeidung bei den unten dargestellten Berechnungsergebnissen ausschließlich auf einen Tiefgang von 3,0 m abgestellt.

Fahrtgeschwindigkeiten (Differenzierung nach Teilstrecken / Relationsabschnitten)

Für die einzelnen Streckenabschnitte wurde von folgenden Geschwindigkeiten ausgegangen, die dann in unterschiedlichen Kombinationen bei den Berechnungen Eingang fanden:

- Niederrhein: 16 oder 18 km/h
- Mittelrhein: 15 km/h
- See: 16, 18, 20 oder 22 km/h

Darüber hinaus gibt es eine Vielzahl weiterer kostenbeeinflussender Faktoren wie z.B. die Betriebsform, die Anzahl der jährlichen Einsatztage, Reparaturkosten, Versicherungskosten etc. Aufgrund des hier vorgenommenen Vergleichs zweier ähnlich großer und gleich alter Schiffe kann jedoch davon ausgegangen werden, dass eine Variation dieser Faktoren nicht zu signifikanten Ergebnisunterschieden führen wird, so dass diese Größen unter Zugrundelegung üblicher Werte hier als konstant angenommen werden.

3.3.5 Relationen

Im Kapitel „Relationsbezogene Rahmenbedingungen“ sind die auf Rhein und Nordsee herrschenden Fahrtbedingungen ausführlich beschrieben worden. Für die hier durchgeführten Berechnungen wurden bei Fahrwassertiefen und Brückendurchfahrtshöhen deren langjährige Durchschnittswerte zugrunde gelegt.

Darüber hinaus war vorgesehen, Berechnungen für Sondersituationen wie etwa Niedrigwasserperioden durchzuführen, wenn sich in den Versuchsreihen entsprechende Vorteile des Semikat gegenüber dem konventionellen Schiff herauskristalli-

² Lt. Sitzung des Projektbegleitenden Ausschusses vom 30.8.2006

sieren würden wie etwa eine bessere Gängigkeit in Niedrigwasser. Da solche Vorteile jedoch nicht ermittelt werden konnten, wurde auf derartige Berechnungen verzichtet.

Gemäß der Projektbeschreibung waren für die folgenden Fluss-See-Relationen vorgesehen:

- Duisburg – Felixstowe
- Duisburg – Wilhelmshaven
- Ludwigshafen – Duisburg – Felixstowe
- Ludwigshafen – Duisburg – Bremerhaven
- Duisburg – Felixstowe – Wilhelmshaven (Dreiecksverkehr)

Letztendlich liegen die Unterschiede zwischen diesen Relationen vor allem in unterschiedlich großen Anteilen von Rhein- und Seestrecke. Bei den Berechnungen zeigten sich zwischen diesen Relationen keine erheblichen Ergebnisunterschiede, so dass in diesem Bericht zur Vermeidung unnötiger Redundanzen darauf verzichtet wird, die Ergebnisse zu allen Relationen wiederzugeben. Stattdessen werden exemplarisch die Berechnungsergebnisse zu den Relationen

- Ludwigshafen – Duisburg – Felixstowe (hoher Rhein-, relativ niedriger Seestreckenanteil) und
- Duisburg – Felixstowe – Wilhelmshaven (hoher Seestreckenanteil)

dargestellt.

Werden die o. a. Hauptparameter in verschiedenen Ausprägungen mit den Merkmalen dieser beiden tatsächlich in die Untersuchung einbezogenen Relationen verknüpft, ergeben sich die folgenden Konstellationen, für die Modellrechnungen durchgeführt wurden (Tabelle 15 und Tabelle 16):

Tabelle 15: Haupt-Berechnungsparameter auf der Relation Duisburg – Felixstowe – Wilhelmshaven (hoher Seestrecken-Anteil)

Berechnungs-Variante	Geschwindigkeit auf dem Rhein (km/h)	Geschwindigkeit auf See (km/h)	Durchschnittliches Containergewicht (t/Container)	Tiefgang (m)	Auslastungsgrad konv. Schiff (%)	Auslastungsgrad Semikat (%)
A	16	16	12,7	3,0	75	77
B	16	18	12,7	3,0	75	77
C	18	16	12,7	3,0	75	77
D	18	18	12,7	3,0	75	77
E	18	20	12,7	3,0	75	77
F	18	22	12,7	3,0	75	77
G	16	16	10,0	3,0	96	98
H	16	18	10,0	3,0	96	98
I	18	16	10,0	3,0	96	98
J	18	18	10,0	3,0	96	98

Tabelle 16: Haupt-Berechnungsparameter auf der Relation Ludwigshafen – Duisburg – Felixstowe (hoher Rheinstrecken-Anteil)

Berechnungs-Variante	Geschwindigkeit auf dem Rhein (km/h)	Geschwindigkeit auf See (km/h)	Durchschnittliches Containergewicht (t/TEU)	Tiefgang (m)	Auslastungsgrad konv. Schiff (%)	Auslastungsgrad Semikat (%)
R	16	16	12,7	3,0	75	77
S	16	18	12,7	3,0	75	77
T	18	16	12,7	3,0	75	77
U	18	18	12,7	3,0	75	77
V	18	16	10,0	3,0	96	98
W	18	18	10,0	3,0	96	98

3.3.6 Berechnungsergebnisse

Für jede der beiden Modell-Relationen wurden mehrere Berechnungen unter Variation der o.a. Parameter durchgeführt. Von Variante zu Variante wurde i.d.R. nur ein Merkmal, z.B. die Geschwindigkeit auf dem Rhein oder die Geschwindigkeit auf See oder das Containergewicht etc. verändert.

Die Ergebnisse der einzelnen Berechnungsvarianten stellen sich im Überblick wie folgt dar (Tabelle 17 und Tabelle 18):

Tabelle 17: Berechnungsergebnisse für die Relation Duisburg – Felixstowe – Wilhelmshaven

Variante	Geschw. auf dem Nieder-Rhein km/h	Geschw. auf See km/h	Cont.-gewicht t/TEU	KFSS: Ausl.- Grad %	SSK: Ausl.- Grad %	KFSS: Kosten pro TEU-km €	Semikat: Kosten pro TEU-km €	Kosten Semikat i.V. zu KFSS %
A	16	16	12,7	75,0	77,0	0,144	0,158	+10
B	16	18	12,7	75,0	77,0	0,140	0,156	+11
C	18	16	12,7	75,0	77,0	0,147	0,159	+8
D	18	18	12,7	75,0	77,0	0,143	0,157	+9
E	18	20	12,7	75,0	77,0	0,141	0,158	+12
F	18	22	12,7	75,0	77,0	0,137	0,164	+20
G (wie A mit leichteren Containern)	16	16	10	96,0	98,0	0,121	0,133	+9
H (wie B mit leichteren Containern)	16	18	10	96,0	98,0	0,119	0,131	+10
I (wie C mit leichteren Containern)	18	16	10	96,0	98,0	0,124	0,133	+8
J (wie D mit leichteren Containern)	18	18	10	96,0	98,0	0,121	0,132	+9

Tabelle 18: Berechnungsergebnisse für die Relation Ludwigshafen – Duisburg – Felixstowe

Variante	Geschw. auf dem Nieder-Rhein	Geschw. auf See	Cont.-gewicht	KFSS: Ausl.-Grad	SSK: Ausl.-Grad	KFSS: Kosten pro TEU-km	Semikat: Kosten pro TEU-km	Kosten Semikat i.V. zu KFSS
	km/h	km/h	t/TEU	%	%	€	€	%
R (wie A)	16	16	12,7	75,0	77,0	0,153	0,168	+10
S (wie B)	16	18	12,7	75,0	77,0	0,152	0,168	+10
T (wie C)	18	16	12,7	75,0	77,0	0,158	0,170	+8
U (wie D)	18	18	12,7	75,0	77,0	0,157	0,169	+8
V (wie I)	18	16	10	96,0	98,0	0,134	0,144	+7
W (wie J)	18	18	10	96,0	98,0	0,133	0,143	+8

KFSS: Konventionelles Fluss-Seeschiff

Semikat: See-Semikat Version 3 mit Düse (M1793B)

Die Ergebnisse sind eindeutig, eine separate Kommentierung der Ergebnisse zu einzelnen Relationen oder Konstellationen ist nicht erforderlich: Denn das Semikat-Seeschiff schneidet bei allen Parameter-Konstellationen deutlich schlechter – im Schwerpunkt um 8 bis 10 Prozent – als das konventionelle Vergleichsschiff ab. Mit zunehmender Geschwindigkeit auf der Seestrecke werden die Kostenunterschiede noch deutlich größer und können im Rahmen der hier untersuchten Bereiche Werte von 20% erreichen.

An dieser Stelle soll aber noch einmal darauf hingewiesen werden, dass das konventionelle Schiff eine um 12 TEU (entsprechend ca. 6%) größere Stellplatz-Kapazität als das Semikatschiff aufweist und deshalb ohnehin gewisse Größenvorteile im Hinblick auf die spezifischen Transportkosten hat.

4 Zusammenfassung

In vorangegangenen Untersuchungen hat sich der unkonventionelle Schiffstyp „Semikatamaran“ als viel versprechendes Transportmittel auf Wasserstraßen mit niedrigen Wasserständen gezeigt. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde deshalb untersucht, inwieweit sich ein Semikatamaran als Transportmittel für den durchgehenden Binnen-See-Verkehr eignet.

Dazu galt es als erstes, die Seefähigkeit des angepassten Semikatamaran-See sicherzustellen. Im zweiten Schritt wurden dann die Propulsionseigenschaften und die Wirtschaftlichkeit untersucht. Es war das Ziel der Entwicklung, ein Schiff mit gleicher Tragfähigkeit und Seetauglichkeit wie ein konventionelles Fluss-See-Schiff zu entwickeln.

Durch die Verringerung der Breite gegenüber dem Binnen-Semikatamaran auf 13 m wurde ein gutes Seeverhalten erreicht. Die Untersuchung des Seeverhaltens erfolgte mit einem neu entwickelten potentialtheoretischen numerischen Verfahren. Der hochgezogene Boden im Mittelteil führt dazu, dass der Ladungsschwerpunkt nach oben wandert und sich die Stabilität auf ein akzeptables Maß verringert. Ebenfalls weist auch das unbeladene Schiff keine zu große metazentrische Höhe auf.

Die Untersuchung der Propulsionseigenschaften und des Seeverhaltens dieses neuen Schiffstyps wurde sowohl mit numerischen (CFD) als auch experimentellen (EFD) Methoden durchgeführt. Dazu wurden verschiedene Hinterschiffsformen zuerst mit dem RANSE-Löser (ANSYS-CFX5) und anschließend im Modellversuch untersucht. Die Strömung am Modell wurde mittels Stromfäden visualisiert und mit einer Hochgeschwindigkeitskamera gefilmt.

Die umfangreichen Untersuchungen der Hinterschiffsumströmung haben gezeigt, dass die numerischen Berechnungen eine zuverlässige Prognose des Strömungsbilds liefern. Darüber hinaus können die Erkenntnisse über die Formgebung des Hinterschiffs, die im Rahmen dieses Projekts gewonnen wurden, auch für den Entwurf konventioneller Binnenschiffe verwendet werden können. Durch eine veränderte Gestaltung der Tunnel kann beispielsweise bei konventionellen Hinterschiffsformen die Gefahr des Lufteinbruchs verringert und eine bessere Zuströmung zum Propeller bei niedrigen Wasserständen erzielt werden.

Auf Basis der in den Versuchen ermittelten Leistungsdaten wurde dann die Wirtschaftlichkeitsanalyse durchgeführt. Die Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für eine Beladung bis zu einem Tiefgang von drei Metern zeigten, dass der Semikatamaran-See bei den untersuchten Relationen und Parameter-Konstellationen gegenüber dem konventionellen Vergleichsschiff keinen Vorteil aufweisen kann. Im Vergleich zum konventionellen Schiff hat der Semikatamaran eine größere benetzte Oberfläche und damit einen erhöhten Reibungswiderstand. Entsprechend fallen auch die Betriebskosten höher aus. Hinzu kommen die zu erwartenden höheren Baukosten,

die sich unter anderem aus der komplizierteren Stahlstruktur ergeben. Der Semikatamaran bietet somit aus der Wirtschaftlichkeitsanalyse für den kombinierten Fluss-See-Verkehr, bei dem ein großer Teil der Fahrtstrecke in relativ tiefem Wasser liegt, keinen wirtschaftlichen Vorteil. Ein Grund hierfür ist die Verringerung der Breite, die für die Erfüllung der Seefähigkeit erforderlich war. Weiterhin lassen sich Probleme, die die Vorschiffsform bei Fahrt gegen die Wellen hervorruft (Lufteinbruch und Seeschlag), ohne grundlegende Änderung des Semikatamaran-Konzepts nicht abstellen.

Wenngleich der Semikatamaran-See nicht die anfänglichen Erwartungen hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit erfüllt, hat dieses Projekt doch viele neue Erkenntnisse erbracht. Dazu zählt zunächst die Erarbeitung einer neuen Untersuchungsmethode, nämlich die numerische Untersuchung der Hinterschiffsumströmung in Kombination mit Unterwasser-Hochgeschwindigkeitsaufnahmen zur Visualisierung der Strömung. Die Unterwasservideografie hat ihren Nutzen darüber hinaus auch bei der experimentellen Untersuchung des Seeverhaltens gezeigt.

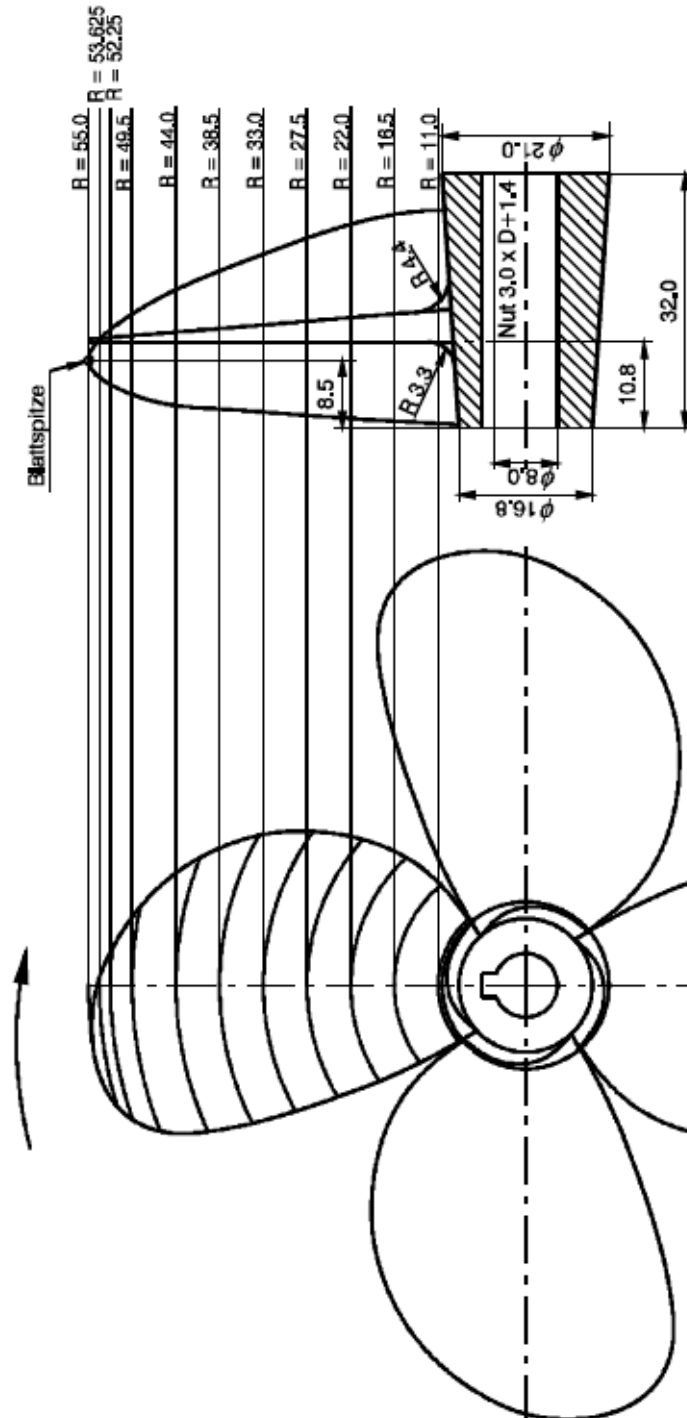
Schließlich lassen die im Rahmen des Forschungsvorhabens erzielten Ergebnisse erkennen, dass ein seegehendes Binnenschiff im Durchgangsverkehr generell wie folgt konzipiert werden soll, nämlich im Vorschiff ein klassischer Einrumpfbug zur Gewährung der Seefähigkeit und im Hinterschiff eine moderne Hinterschiffsform zur Gewährung einer günstigen Zuströmung zum Propeller. Bei der Entwicklung einer solchen angepassten Hinterschiffsform müssten allerdings die Wirbelablösungen am Hinterschiff detailliert untersucht werden.

5 Literatur

- [1] Pawellek, Günther: Wirtschaftlichkeit von Containerschiffen, 2004
- [2] www.bonapart.de
- [3] Schiffsbesetzungsverordnung (SchBesV)
- [4] Binnenschiffahrtsverlag Duisburg zitiert nach: Planco, Potenziale und Zukunft der deutschen Binnenschiffahrt, Erläuterungsbericht für das Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, 2003
- [5] Kostenkalkulationshilfen des BdB

6 Anhänge

6.1 Propeller P259



P 259 r/l

Propellertyp : Wag. B 4.70

D = 110.00 mm

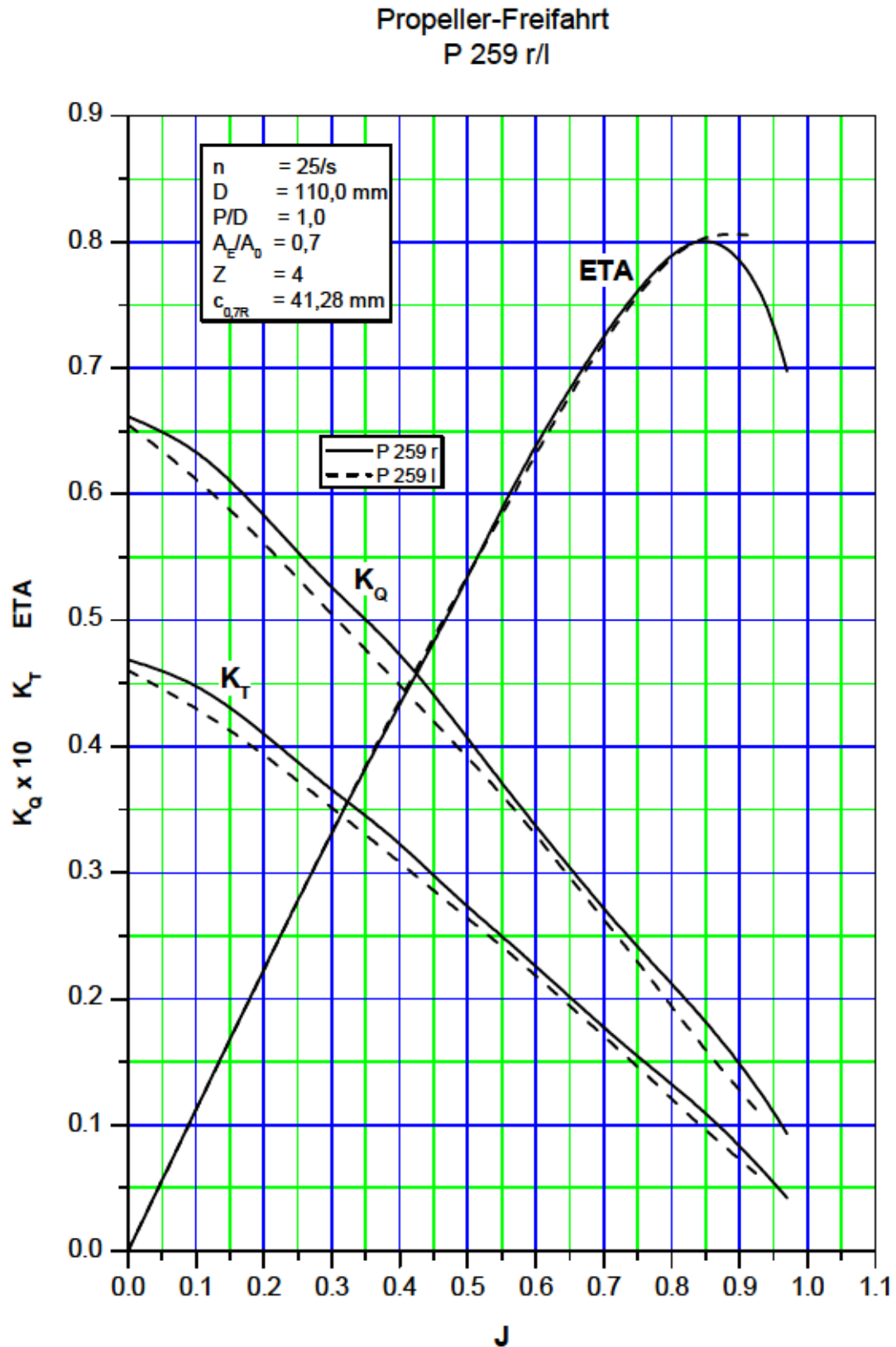
P/D = 1.00

$A_E/A_0 = 0.70$

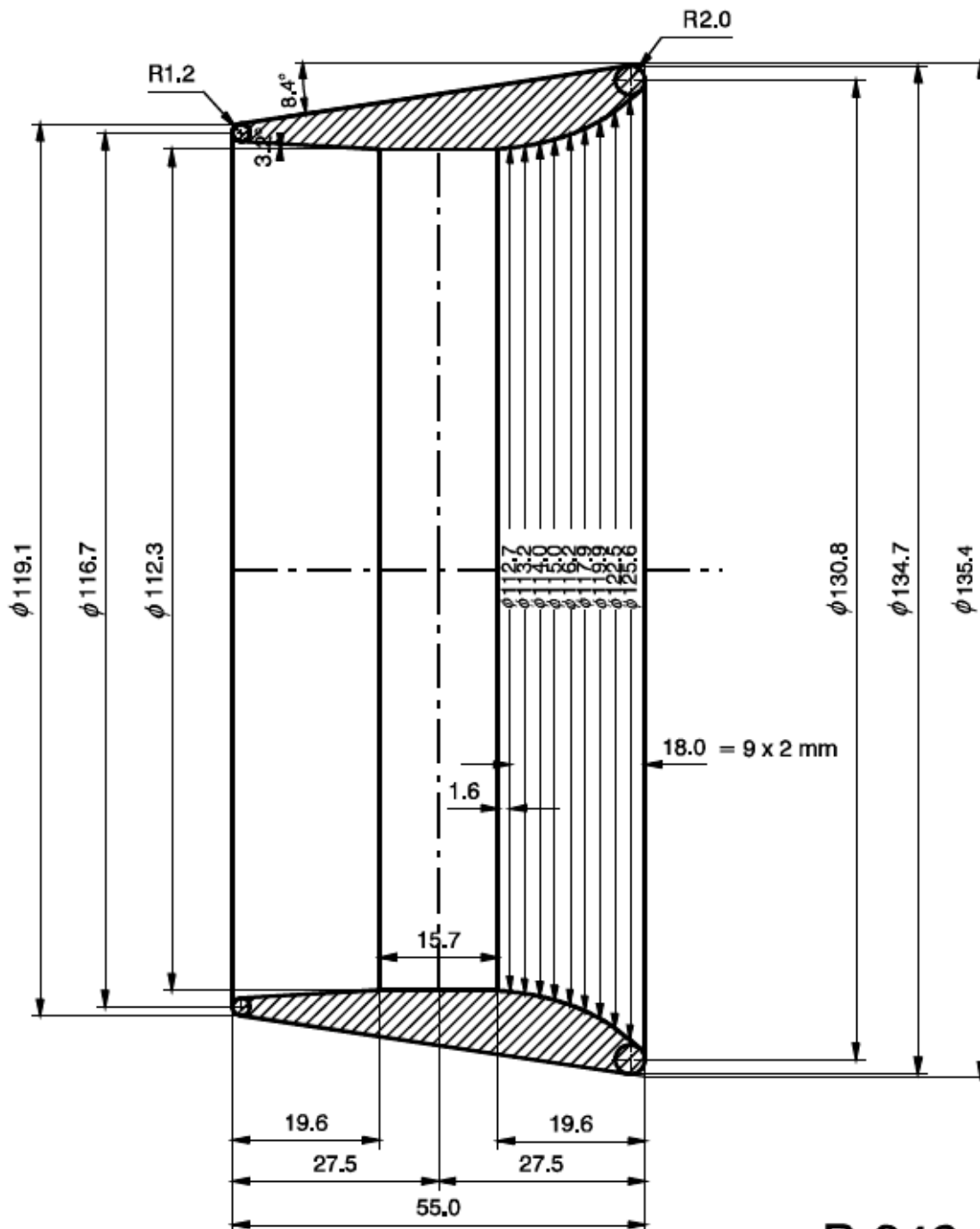
Z = 4

$C_{0.70 R} = 41.28$ mm

6.2 Freifahrt diagramm des Propellers P259



6.3 Düse D342

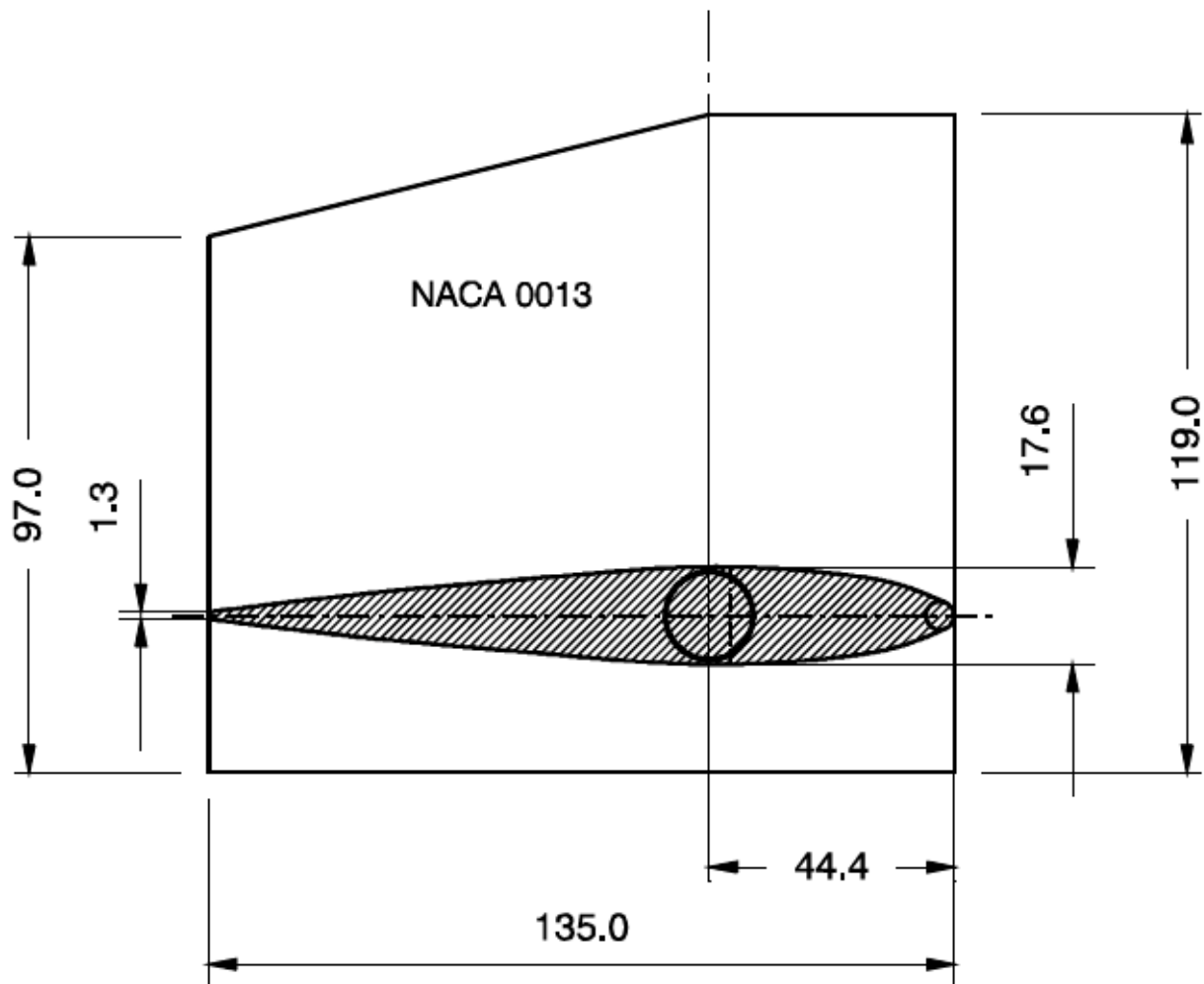


D 342

2 Düsen für M 1793

Lambda = 16

6.4 Ruder R847

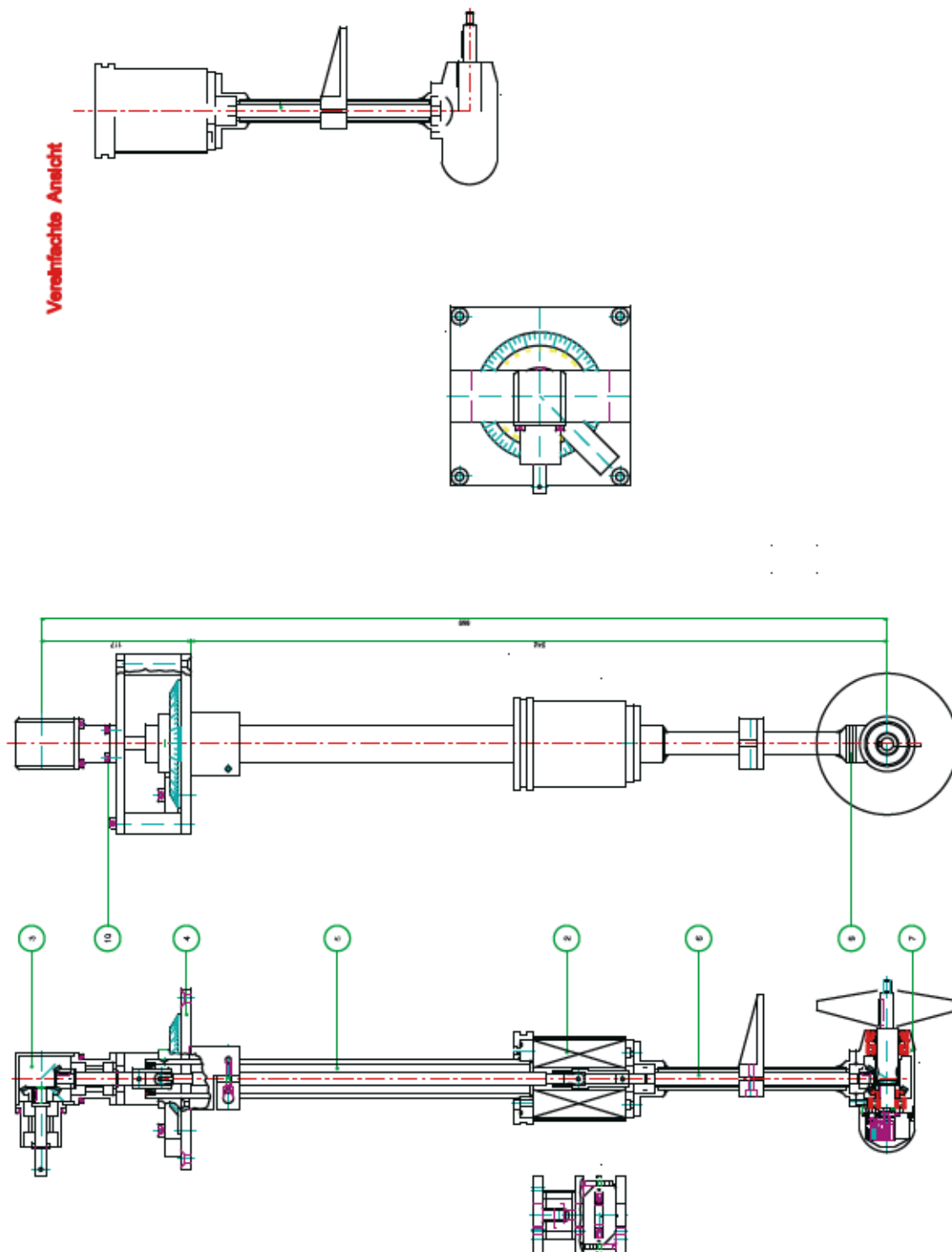


R 847

2 Ruder für M 1793

$\Lambda = 16$

6.5 Apzipod-Antrieb



6.6 Versuchsergebnisse

Versuchsergebnisse:

Auftrag-Nummer	2396
Kennwort	Semikat See
Modell-Nummer	1772
Datum	02.02.2006
Versuchs-Nr	6033

Propulsionsversuch

Maßstab	λ		16
Länge	Lwl	m	6,875
Breite	B	m	0,813
Tiefgang	T	m	0,188
Verdrängung	Δ	dm ³	0,792
Oberfläche	S	m ²	8,348
Wassertiefe	h	m	0,313
	h / T		1,667

			Backbord	Steuerbord
Propeller Nr.			259	259
Prop.durchmesser.	Dp'	m	0,110	0,110
Profillänge	C07R'	m	0,041	0,041
Drehrichtung			rechts	links
Ruder Nr.			847	847

Besondere Merkmale

Reibungsabzug nach ITTC-1957

Zusatzwiderstandsbeiwert	CA		0,0002
Wassertemperatur	tw	°C	16,7
Dichte Wasser	ρ	kg/m ³	999,0
kin. Zähigkeit	ν	m ² /s	1,138E-06
Propellermaßstabseffekt	mP		1,0000

Ergebnisse des Modellversuchs

V	Fn	Fnh	PD ohne Maßstabs- Effekt	ohne Düse	Düse	T gesamt	n mittlere	Trimm positiv: nach hinten	Abs. positiv: nach unten
[m/s]	[-]	[-]	[W]			[N]	[1/s]	[1/60°]	[mm]
0,694	0,085	0,396	10,95			9,6	10,6	0,23	6,6
0,833	0,102	0,476	18,00			12,9	12,7	0,09	7,3
0,972	0,119	0,555	33,21			19,7	15,5	0,60	12,8
1,112	0,136	0,635	40,05			21,4	17,1	0,28	8,6
1,182	0,144	0,675	73,46			32,8	20,7	1,80	23,6
1,251	0,153	0,715	117,34			45,8	23,7	5,01	28,3

V	PD	V _{an}	PT	ohne Düse	w	t	η_D	η_E	η_O	η_H	η_R
[m/s]	[W]	[m/s]	[W]		0,107 gemittelt	-0,086 gemittelt	0,612 gemittelt	0,502 gemittelt	0,535 gemittelt	0,887 gemittelt	0,938 gemittelt
[-]	[-]	[-]	[-]		[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
0,694	11,0	0,536	5,125		0,228	0,195	0,487	0,468	0,498	0,960	0,940
0,833	18,0	0,692	8,941		0,170	0,162	0,501	0,497	0,534	0,991	0,930
0,972	33,2	0,811	15,956		0,165	0,050	0,547	0,480	0,516	0,878	0,931
1,112	40,1	1,027	21,972		0,076	-0,762	1,046	0,549	0,583	0,524	0,940
1,182	73,5	1,178	38,669		0,004	0,182	0,432	0,526	0,557	1,218	0,946
1,251	117,3	1,256	57,529		-0,004	-0,343	0,656	0,490	0,521	0,748	0,940

Versuchsergebnisse:

Auftrag-Nummer	2396
Kennwort	Semikat See
Modell-Nummer	1772
Datum	06.02.2006
Versuchs-Nr	6034

Propulsionsversuch

Maßstab	λ		16
Länge	Lwl	m	6,875
Breite	B	m	0,813
Tiefgang	T	m	0,188
Verdrängung	Δ	dm ³	0,792
Oberfläche	S	m ²	8,348
Wassertiefe	h	m	1,100
	h / T		5,867

			Backbord	Steuerbord
Propeller Nr.			259	259
Prop.durchmesser.	Dp'	m	0,110	0,110
Profillänge	C07R'	m	0,041	0,041
Drehrichtung			rechts	links
Ruder Nr.			847	847

Besondere Merkmale

Reibungsabzug nach ITTC-1957

Zusatzwiderstandsbeiwert	CA		0,0002
Wassertemperatur	tw	°C	16,8
Dichte Wasser	ρ	kg/m ³	999,0
kin. Zähigkeit	ν	m ² /s	1,138E-06
Propellermaßstabseffekt	mP		1,0000

Ergebnisse des Modellversuchs

V	Fn	Fnh	PD ohne Maßstabs- Effekt	ohne Düse	T gesamt	n mittlere	Trim positiv: nach hinten	Abs. positiv: nach unten
[m/s]	[-]	[-]	[W]		[N]	[1/s]	[1/60°]	[mm]
1,112	0,136	0,339	30,44		17,5	15,9	0,18	5,7
1,250	0,153	0,381	42,34		21,7	17,7	0,18	7,2
1,390	0,170	0,423	63,75		28,9	20,2	1,20	7,4
1,527	0,186	0,465	102,79		40,5	23,4	1,59	8,5
1,598	0,195	0,487	122,49		45,8	24,7	1,05	9,5
1,666	0,203	0,507	151,29		53,0	26,3	0,38	11,7
1,700	0,208	0,518	178,16		57,4	27,7	-2,41	17,6

V	PD	V _m	PT	ohne Düse	w 0,094 gemittelt	t 0,090 gemittelt	η_D 0,551 gemittelt	η_B 0,548 gemittelt	η_P 0,584 gemittelt	η_H 1,019 gemittelt	η_R 0,939 gemittelt
[m/s]	[W]	[m/s]	[W]		[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
1,112	30,4	0,995	17,448		0,105	0,145	0,547	0,573	0,607	1,047	0,945
1,250	42,3	1,112	24,164		0,111	0,182	0,525	0,571	0,608	1,088	0,939
1,390	63,8	1,243	35,849		0,106	0,158	0,529	0,562	0,597	1,062	0,941
1,527	102,8	1,382	55,895		0,095	0,095	0,544	0,544	0,576	0,999	0,944
1,598	122,5	1,439	65,853		0,099	-0,282	0,765	0,538	0,569	0,703	0,946
1,666	151,3	1,502	79,625		0,099	0,137	0,504	0,526	0,558	1,045	0,943
1,700	178,2	1,623	93,105		0,046	0,196	0,440	0,523	0,571	1,187	0,915

Versuchsergebnisse:

Auftrag-Nummer	2396
Kennwort	Semikat See
Modell-Nummer	1772
Datum	06.02.2006
Versuchs-Nr	6038

Propulsionsversuch

Maßstab	λ		16
Länge	Lwl	m	6,875
Breite	B	m	0,813
Tiefgang	T	m	0,188
Verdrängung	Δ	dm ³	0,792
Oberfläche	S	m ²	8,348
Wassertiefe	h	m	1,100
	h / T		5,867

		Backbord	Steuerbord
Propeller Nr.		259	259
Prop.durchmesser.	Dp'	m	0,110
Profillänge	C07R'	m	0,041
Drehrichtung		rechts	links
Ruder Nr.		847	847

Besondere Merkmale

Reibungsabzug nach ITTC-1957

Zusatzwiderstandsbeiwert	CA		0,0002
Wassertemperatur	tw	°C	16,7
Dichte Wasser	ρ	kg/m ³	999,0
kin. Zähigkeit	ν	m ² /s	1,138E-06
Propellermaßstabseffekt	mP		1,0000

Ergebnisse des Modellversuchs

V	Fn	Fnh	PD ohne Maßstabs- Effekt	ohne Düse	T gesamt	n mittlere	Trimm positiv: nach hinten	Abs. positiv: nach unten
[m/s]	[-]	[-]	[W]		[N]	[1/s]	[1/60°]	[mm]
1,111	0,136	0,338	29,63		17,2	15,5	0,26	4,6
1,250	0,153	0,381	45,80		23,2	17,8	0,62	5,4
1,390	0,170	0,423	71,34		32,1	20,5	1,51	7,0
1,529	0,187	0,466	109,49		43,7	23,5	2,35	8,5
1,598	0,195	0,486	133,90		49,9	25,0	1,19	9,6
1,666	0,203	0,507	169,02		59,1	26,9	1,13	11,6

V	PD	V _{an}	PT	ohne Düse	w 0,154 gemittelt	t -0,999 gemittelt	η_D 1,236 gemittelt	η_B 0,520 gemittelt	η_0 0,553 gemittelt	η_H 0,467 gemittelt	η_R 0,942 gemittelt
[m/s]	[W]	[m/s]	[W]		[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
1,111	29,6	0,935	16,112		0,158	-0,793	1,159	0,544	0,588	0,469	0,924
1,250	45,8	1,065	24,691		0,148	-1,762	1,747	0,539	0,583	0,309	0,925
1,390	71,3	1,173	37,588		0,156	-1,532	1,581	0,527	0,559	0,333	0,942
1,529	109,5	1,282	55,972		0,162	-1,022	1,233	0,511	0,537	0,415	0,953
1,598	133,9	1,361	67,926		0,148	-0,047	0,623	0,507	0,534	0,814	0,950
1,666	169,0	1,413	83,547		0,152	-0,840	1,073	0,494	0,518	0,461	0,955

Versuchsergebnisse:

Auftrag-Nummer	2396
Kennwort	Semikat See
Modell-Nummer	1793A
Datum	20.03.2006
Versuchs-Nr	6061

Propulsionsversuch

Maßstab	λ		16
Länge	Lwl	m	6,875
Breite	B	m	0,813
Tiefgang	T	m	0,188
Verdrängung	Δ	dm ³	0,792
Oberfläche	S	m ²	8,348
Wassertiefe	h	m	0,313
	h / T		1,667

		Backbord	Steuerbord
Propeller Nr.		259	259
Prop.durchmesser.	Dp'	m	0,110
Profillänge	C07R'	m	0,041
Drehrichtung		rechts	links
Ruder Nr.		847	847
Düse Nr.		342	342

Besondere Merkmale

Reibungsabzug nach ITTC-1957

Zusatzwiderstandsbeiwert	CA	0,0002
Wassertemperatur	tw	°C 17,8
Dichte Wasser	ρ	kg/m ³ 999,0
kin. Zähigkeit	ν	m ² /s 1,138E-06
Propellermaßstabseffekt	mP	1,0000

Ergebnisse des Modellversuchs

V	Fn	Fnh	PD ohne Maßstabs- Effekt	ohne Düse	Düse	T gesamt	n mittlere	Trimm positiv: nach hinten	Abs. positiv: nach unten
[m/s]	[-]	[-]	[W]			[N]	[1/s]	[1/60°]	[mm]
0,694	0,085	0,396	9,72			8,0	10,9	1,45	5,7
0,837	0,102	0,478	16,98			11,9	13,3	1,90	8,7
0,972	0,119	0,555	27,50			16,8	15,0	1,95	12,8
1,112	0,136	0,635	46,16			23,9	17,9	-0,40	22,7
1,253	0,153	0,716	83,57			35,3	21,7	-0,45	37,5
1,293	0,158	0,739	181,08			59,8	27,8	25,19	44,3

V	PD	V _{an}	PT	ohne Düse	w	t	η_D	η_S	η_0	η_H	η_R
[m/s]	[W]	[m/s]	[W]		-0,016 gemittelt	-0,058 gemittelt	0,587 gemittelt	0,551 gemittelt	0,584 gemittelt	0,999 gemittelt	0,943 gemittelt
[-]	[-]	[-]	[-]		[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
0,694	9,7	0,706	5,627		-0,017	-0,180	0,672	0,579	0,624	0,862	0,929
0,837	17,0	0,860	10,230		-0,027	-0,189	0,698	0,603	0,623	0,864	0,968
0,972	27,5	0,875	14,712		0,100	-0,186	0,705	0,535	0,571	0,759	0,937
1,112	46,2	1,046	24,992		0,059	-0,112	0,640	0,541	0,570	0,846	0,949
1,253	83,6	1,254	44,252		0,000	0,101	0,476	0,530	0,566	1,113	0,936
1,293	181,1	1,562	93,382		-0,208	0,221	0,333	0,516	0,551	1,551	0,937

Versuchsergebnisse:

Auftrag-Nummer	2396
Kennwort	Semikat See
Modell-Nummer	1793A
Datum	21.03.2006
Versuchs-Nr	6062

Propulsionsversuch

Maßstab	λ		16
Länge	Lwl	m	6,875
Breite	B	m	0,813
Tiefgang	T	m	0,188
Verdrängung	Δ	dm ³	0,792
Oberfläche	S	m ²	8,348
Wassertiefe	h	m	1,100
	h / T		5,867

			Backbord	Steuerbord
Propeller Nr.			259	259
Prop.durchmesser.	Dp'	m	0,110	0,110
Profilänge	C07R'	m	0,041	0,041
Drehrichtung			rechts	links
Ruder Nr.			847	847
Düse Nr.			342	342

Besondere Merkmale

Reibungsabzug nach ITTC-1957

Zusatzwiderstandsbeiwert	CA		0,0002
Wassertemperatur	tw	°C	17,8
Dichte Wasser	ρ	kg/m ³	999,0
kin. Zähigkeit	ν	m ² /s	1,138E-06
Propellermaßstabseffekt	mP		1,0000

Ergebnisse des Modellversuchs

V	Fn	Fnh	PD ohne Maßstabs- Effekt	ohne Düse	Düse	T gesamt	n mittlere	Trimm positiv: nach hinten	Abs. positiv: nach unten
[m/s]	[-]	[-]	[W]			[N]	[1/s]	[1/60°]	[mm]
1,112	0,136	0,339	28,35			16,5	15,8	1,77	4,5
1,250	0,153	0,381	46,25			22,8	18,5	1,21	6,3
1,389	0,170	0,423	64,94			28,6	20,7	2,90	6,9
1,527	0,186	0,465	103,43			39,1	24,0	1,86	9,0
1,667	0,203	0,507	152,23			50,7	27,1	1,34	12,8

V	PD	V _{an}	PT	ohne Düse	w 0,023 gemittelt	t -0,260 gemittelt	η_D 0,757 gemittelt	η_S 0,586 gemittelt	η_0 0,622 gemittelt	η_H 0,779 gemittelt	η_R 0,942 gemittelt
[m/s]	[W]	[m/s]	[W]		[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
1,112	28,4	1,036	17,065		0,068	-0,202	0,777	0,602	0,631	0,775	0,955
1,250	46,3	1,204	27,417		0,037	-0,394	0,858	0,593	0,627	0,691	0,945
1,389	64,9	1,345	38,427		0,032	-0,246	0,761	0,592	0,626	0,777	0,945
1,527	103,4	1,527	59,622		0,000	-0,170	0,674	0,576	0,616	0,855	0,936
1,667	152,2	1,705	86,397		-0,023	-0,288	0,714	0,568	0,609	0,795	0,931

Versuchsergebnisse:

Auftrag-Nummer	2396
Kennwort	Semikat See
Modell-Nummer	1793A
Datum	22.03.2006
Versuchs-Nr	6064

Propulsionsversuch

Maßstab	λ		16
Länge	Lwl	m	6,875
Breite	B	m	0,813
Tiefgang	T	m	0,188
Verdrängung	Δ	dm ³	0,792
Oberfläche	S	m ²	8,348
Wassertiefe	h	m	0,250
	h / T		1,333

			Backbord	Steuerbord
Propeller Nr.			259	259
Prop.durchmesser.	Dp'	m	0,110	0,110
Profilänge	C07R'	m	0,041	0,041
Drehrichtung			rechts	links
Ruder Nr.			847	847
Düse Nr.			342	342

Besondere Merkmale

Reibungsabzug nach ITTC-1957			
Zusatzwiderstandsbeiwert	CA		0,0002
Wassertemperatur	tw	°C	17,3
Dichte Wasser	ρ	kg/m ³	999,0
kin. Zähigkeit	ν	m ² /s	1,138E-06
Propellermaßstabseffekt	mP		1,0000

Ergebnisse des Modellversuchs

V	Fn	Fnh	PD ohne Maßstabs- Effekt	ohne Düse	Düse	T gesamt	n mittlere	Trimm positiv: nach hinten	Abs. positiv: nach unten
[m/s]	[-]	[-]	[W]			[N]	[1/s]	[1/60°]	[mm]
0,691	0,084	0,441	10,89			9,9	10,8	2,36	9,6
0,833	0,102	0,532	20,60			14,8	13,3	0,78	13,9
0,973	0,119	0,622	42,44			23,8	16,7	2,27	21,4
1,008	0,123	0,644	47,82			25,6	17,4	2,13	24,6
1,045	0,128	0,667	70,53			33,9	19,5	6,61	29,3
1,064	0,130	0,680	88,58			39,6	20,9	8,72	33,8

V	PD	V _{an}	PT	ohne Düse	w	t	η_D	η_E	η_0	η_H	η_R
[m/s]	[W]	[m/s]	[W]		0,147 gemittelt	-0,057 gemittelt	0,586 gemittelt	0,466 gemittelt	0,486 gemittelt	0,824 gemittelt	0,958 gemittelt
[-]	[-]	[-]	[-]		[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
0,691	10,9	0,551	5,444		0,203	-0,121	0,704	0,500	0,501	0,711	0,998
0,833	20,6	0,682	10,088		0,182	-0,233	0,738	0,490	0,505	0,663	0,969
0,973	42,4	0,831	19,800		0,146	-0,046	0,572	0,467	0,492	0,816	0,949
1,008	47,8	0,876	22,448		0,132	-0,145	0,619	0,469	0,497	0,758	0,944
1,045	70,5	0,921	31,166		0,119	0,037	0,483	0,442	0,467	0,915	0,946
1,064	88,6	0,960	37,984		0,097	0,164	0,397	0,429	0,455	1,080	0,941

Versuchsergebnisse:

Auftrag-Nummer	2396
Kennwort	Semikat See
Modell-Nummer	1793A
Datum	23.03.2006
Versuchs-Nr	6068

Propulsionsversuch

Maßstab	λ		16
Länge	Lwl	m	6,875
Breite	B	m	0,813
Tiefgang	T	m	0,188
Verdrängung	Δ	dm ³	0,792
Oberfläche	S	m ²	8,348
Wassertiefe	h	m	1,100
	h / T		5,867

			Backbord	Steuerbord
Propeller Nr.			259	259
Prop.durchmesser.	Dp'	m	0,110	0,110
Profilänge	C07R'	m	0,041	0,041
Drehrichtung			rechts	links
Ruder Nr.			847	847

Besondere Merkmale

Reibungsabzug nach ITTC-1957			
Zusatzwiderstandsbeiwert	CA		0,0002
Wassertemperatur	tw	°C	17,7
Dichte Wasser	ρ	kg/m ³	999,0
kin. Zähigkeit	ν	m ² /s	1,138E-06
Propellermaßstabseffekt	mP		1,0000

Ergebnisse des Modellversuchs

V	Fn	Fnh	PD ohne Maßstabs- Effekt	ohne Düse	T gesamt	n mittlere	Trimm positiv: nach hinten	Abs. positiv: nach unten
[m/s]	[-]	[-]	[W]		[N]	[1/s]	[1/60°]	[mm]
1,111	0,136	0,338	32,56		20,9	15,2	0,71	5,0
1,251	0,153	0,381	48,32		26,9	17,4	-5,68	5,4
1,319	0,161	0,401	58,95		30,9	18,6	-0,76	7,2
1,391	0,170	0,424	74,47		36,0	20,0	0,87	7,9
1,529	0,187	0,466	123,04		50,8	23,4	1,06	9,8
1,669	0,204	0,508	184,28		66,9	26,6	-0,54	11,2

V	PD	V _{an}	PT	ohne Düse	w 0,344 gemittelt	t 0,158 gemittelt	η_D 0,562 gemittelt	η_B 0,438 gemittelt	η_0 0,449 gemittelt	η_H 0,783 gemittelt	η_R 0,976 gemittelt
[m/s]	[W]	[m/s]	[W]		[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
1,111	32,6	0,700	14,605		0,370	0,217	0,557	0,448	0,456	0,805	0,983
1,251	48,3	0,813	21,897		0,350	0,103	0,625	0,453	0,464	0,725	0,977
1,319	59,0	0,864	26,642		0,345	0,157	0,582	0,452	0,461	0,777	0,980
1,391	74,5	0,918	33,063		0,340	0,211	0,531	0,444	0,456	0,836	0,974
1,529	123,0	1,019	51,816		0,333	0,208	0,500	0,421	0,434	0,842	0,971
1,669	184,3	1,124	75,207		0,327	0,052	0,575	0,408	0,421	0,710	0,970

Versuchsergebnisse:

Auftrag-Nummer	2396
Kennwort	Semikat See
Modell-Nummer	1793A
Datum	28.03.2006
Versuchs-Nr	6069

Propulsionsversuch

Maßstab	λ		16
Länge	Lwl	m	6,875
Breite	B	m	0,813
Tiefgang	T	m	0,188
Verdrängung	Δ	dm ³	0,792
Oberfläche	S	m ²	8,348
Wassertiefe	h	m	0,313
	h / T		1,667

			Backbord	Steuerbord
Propeller Nr.			259	259
Prop.durchmesser.	Dp'	m	0,110	0,110
Profilänge	C07R'	m	0,041	0,041
Drehrichtung			rechts	links
Ruder Nr.			847	847

Besondere Merkmale

Reibungsabzug nach ITTC-1957

Zusatzwiderstandsbeiwert	CA		0,0002
Wassertemperatur	tw	°C	17,7
Dichte Wasser	ρ	kg/m ³	999,0
kin. Zähigkeit	ν	m ² /s	1,138E-06
Propellermaßstabseffekt	mP		1,0000

Ergebnisse des Modellversuchs

V	Fn	Fnh	PD ohne Maßstabs- Effekt	ohne Düse	Düse	T gesamt	n mittlere	Trimm positiv: nach hinten	Abs. positiv: nach unten
[m/s]	[-]	[-]	[W]			[N]	[1/s]	[1/60°]	[mm]
0,695	0,085	0,397	10,59			10,5	9,9	1,43	6,6
0,833	0,102	0,476	13,32			12,3	11,0	1,48	9,4
0,973	0,119	0,556	33,07			22,4	14,7	1,19	13,4
1,111	0,136	0,635	55,99			31,5	17,5	2,12	21,5
1,182	0,144	0,675	79,27			39,6	19,6	3,72	26,4
1,251	0,153	0,714	102,56			47,0	21,3	3,48	33,7
1,285	0,157	0,734	166,20			65,5	24,8	23,37	50,3

V	PD	V _{an}	PT	ohne Düse	w 0,458 gemittelt	t 0,273 gemittelt	η_D 0,463 gemittelt	η_S 0,338 gemittelt	η_D 0,343 gemittelt	η_H 0,758 gemittelt	η_R 0,986 gemittelt
[m/s]	[W]	[m/s]	[W]		[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
0,695	10,6	0,311	3,280		0,552	0,270	0,505	0,310	0,316	0,613	0,982
0,833	13,3	0,406	5,008		0,512	0,157	0,651	0,376	0,368	0,578	1,022
0,973	33,1	0,509	11,419		0,476	0,311	0,454	0,345	0,347	0,760	0,995
1,111	56,0	0,615	19,363		0,447	0,204	0,498	0,346	0,352	0,695	0,982
1,182	79,3	0,681	26,973		0,424	0,286	0,421	0,340	0,349	0,808	0,975
1,251	102,6	0,737	34,647		0,411	0,301	0,401	0,338	0,347	0,842	0,974
1,285	166,2	0,796	52,092		0,381	0,385	0,311	0,313	0,322	1,007	0,972

Versuchsergebnisse:

Auftrag-Nummer	2396
Kennwort	Semikat See
Modell-Nummer	1793A
Datum	28.03.2006
Versuchs-Nr	6072

Propulsionsversuch

Maßstab	λ		16
Länge	Lwl	m	6,875
Breite	B	m	0,813
Tiefgang	T	m	0,109
Verdrängung	Δ	dm ³	0,382
Oberfläche	S	m ²	6,785
Wassertiefe	h	m	0,313
	h / T		2,856

			Backbord	Steuerbord
Propeller Nr.			259	259
Prop.durchmesser.	Dp'	m	0,110	0,110
Profilänge	C07R'	m	0,041	0,041
Drehrichtung			rechts	links
Ruder Nr.			847	847

Besondere Merkmale

Reibungsabzug nach ITTC-1957

Zusatzwiderstandsbeiwert	CA		0,0002
Wassertemperatur	tw	°C	17,7
Dichte Wasser	ρ	kg/m ³	999,0
kin. Zähigkeit	ν	m ² /s	1,138E-06
Propellermaßstabseffekt	mP		1,0000

Ergebnisse des Modellversuchs

V	Fn	Fnh	PD ohne Maßstabs- Effekt	ohne Düse	T gesamt	n mittlere	Trimm positiv: nach hinten	Abs. positiv: nach unten
[m/s]	[-]	[-]	[W]		[N]	[1/s]	[1/60°]	[mm]
0,833	0,102	0,476	7,80		8,5	9,5	0,96	5,2
0,974	0,119	0,556	13,84		12,2	11,4	1,60	7,2
1,111	0,136	0,635	23,84		17,3	13,6	-0,09	10,3
1,252	0,153	0,715	43,46		25,8	16,5	2,86	15,0
1,391	0,170	0,795	80,04		38,8	20,0	6,02	27,3

V	PD	V _{an}	PT	ohne Düse	w 0,466 gemittelt	t 0,182 gemittelt	η_D 0,658 gemittelt	η_S 0,423 gemittelt	η_D 0,423 gemittelt	η_R 0,663 gemittelt	η_R 1,001 gemittelt
[m/s]	[W]	[m/s]	[W]		[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
0,833	7,8	0,402	3,416		0,517	0,163	0,760	0,438	0,423	0,576	1,036
0,974	13,8	0,498	6,081		0,489	0,124	0,753	0,439	0,432	0,583	1,015
1,111	23,8	0,595	10,306		0,464	0,105	0,722	0,432	0,434	0,599	0,996
1,252	43,5	0,693	17,865		0,447	0,180	0,609	0,411	0,419	0,675	0,982
1,391	80,0	0,816	31,648		0,413	0,336	0,447	0,395	0,406	0,884	0,974

Versuchsergebnisse:

Auftrag-Nummer	2396
Kennwort	Semikat See
Modell-Nummer	1793A
Datum	30.03.2006
Versuchs-Nr	6074

Propulsionsversuch

Maßstab	λ		16
Länge	Lwl	m	6,875
Breite	B	m	0,813
Tiefgang	T	m	0,109
Verdrängung	Δ	dm ³	0,382
Oberfläche	S	m ²	6,785
Wassertiefe	h	m	0,250
	h / T		2,285

			Backbord	Steuerbord
Propeller Nr.			259	259
Prop.durchmesser.	Dp'	m	0,110	0,110
Profilänge	C07R'	m	0,041	0,041
Drehrichtung			rechts	links
Ruder Nr.			847	847

Besondere Merkmale

Reibungsabzug nach ITTC-1957

Zusatzwiderstandsbeiwert	CA		0,0002
Wassertemperatur	tw	°C	17,7
Dichte Wasser	ρ	kg/m ³	999,0
kin. Zähigkeit	ν	m ² /s	1,138E-06
Propellermaßstabseffekt	mP		1,0000

Ergebnisse des Modellversuchs

V	F _n	F _{nh}	PD ohne Maßstabs- Effekt	ohne Düse	Düse	T gesamt	n mittlere	Trimm positiv: nach hinten	Abs. positiv: nach unten
[m/s]	[-]	[-]	[W]			[N]	[1/s]	[1/60°]	[mm]
0,834	0,102	0,533	9,15			9,7	9,9	2,49	6,2
0,973	0,119	0,621	17,71			14,8	12,2	-0,26	10,8
1,112	0,136	0,710	33,48			22,4	14,9	3,14	15,4
1,182	0,144	0,755	44,78			27,1	16,3	4,73	21,4

V	PD	V _{an}	PT	ohne Düse	w	t	η_D	η_S	η_0	η_H	η_R
[m/s]	[W]	[m/s]	[W]		0,514 gemittelt	0,210 gemittelt	0,627 gemittelt	0,382 gemittelt	0,377 gemittelt	0,621 gemittelt	1,013 gemittelt
[-]	[-]	[-]	[-]		[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
0,834	9,2	0,377	3,659		0,548	0,160	0,743	0,400	0,381	0,538	1,048
0,973	17,7	0,474	7,002		0,512	0,142	0,696	0,395	0,388	0,568	1,020
1,112	33,5	0,558	12,506		0,498	0,258	0,552	0,373	0,374	0,677	0,999
1,182	44,8	0,596	16,136		0,496	0,279	0,515	0,360	0,365	0,699	0,986

Versuchsergebnisse:

Auftrag-Nummer	2396
Kennwort	Semikat See
Modell-Nummer	1793B
Datum	17.03.2006
Versuchs-Nr	6082

Propulsionsversuch

Maßstab	λ		16
Länge	Lwl	m	6,875
Breite	B	m	0,813
Tiefgang	T	m	0,188
Verdrängung	Δ	dm ³	0,792
Oberfläche	S	m ²	8,348
Wassertiefe	h	m	0,313
	h / T		1,667

			Backbord	Steuerbord
Propeller Nr.			259	259
Prop.durchmesser.	Dp'	m	0,110	0,110
Profilänge	C07R'	m	0,041	0,041
Drehrichtung			rechts	links
Ruder Nr.			847	847
Düse Nr.			342	342

Besondere Merkmale

Reibungsabzug nach ITTC-1957

Zusatzwiderstandsbeiwert	CA		0,0002
Wassertemperatur	tw	°C	17,6
Dichte Wasser	ρ	kg/m ³	999,0
kin. Zähigkeit	ν	m ² /s	1,138E-06
Propellermaßstabseffekt	mP		1,0000

Ergebnisse des Modellversuchs

V	Fn	Fnh	PD ohne Maßstabs- Effekt	ohne Düse	Düse	T gesamt	n mittlere	Trimm positiv: nach hinten	Abs. positiv: nach unten
[m/s]	[-]	[-]	[W]			[N]	[1/s]	[1/60°]	[mm]
0,694	0,085	0,396	9,88			7,7	11,5	0,31	5,6
0,834	0,102	0,476	19,15			12,0	14,3	0,86	8,6
0,973	0,119	0,556	28,85			15,8	16,4	0,97	12,3
1,111	0,136	0,635	46,02			22,0	19,1	3,54	17,8
1,181	0,144	0,675	63,31			27,5	21,2	5,20	25,8
1,250	0,153	0,714	87,50			34,5	23,4	4,47	32,9
1,269	0,155	0,725	79,60			32,3	22,7	-3,00	37,9

V	PD	V _{an}	PT	ohne Düse	w	t	η_D	η_S	η_0	η_R	η_R
[m/s]	[W]	[m/s]	[W]		-0,217 gemittelt	-0,069 gemittelt	0,558 gemittelt	0,633 gemittelt	0,665 gemittelt	1,162 gemittelt	0,953 gemittelt
[-]	[-]	[-]	[-]		[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
0,694	9,9	0,822	6,307		-0,186	-0,190	0,641	0,638	0,679	0,996	0,940
0,834	19,2	1,017	12,223		-0,219	0,094	0,474	0,638	0,676	1,347	0,945
0,973	28,9	1,161	18,357		-0,193	-0,194	0,637	0,637	0,674	1,000	0,944
1,111	46,0	1,338	29,376		-0,205	-0,250	0,662	0,638	0,667	0,964	0,956
1,181	63,3	1,465	40,222		-0,240	-0,121	0,574	0,635	0,661	1,106	0,962
1,250	87,5	1,573	54,223		-0,258	0,052	0,467	0,620	0,647	1,327	0,959
1,269	79,6	1,544	49,846		-0,217	0,128	0,449	0,626	0,651	1,395	0,962

Versuchsergebnisse:

Auftrag-Nummer	2396
Kennwort	Semikat See
Modell-Nummer	1793B
Datum	17.03.2006
Versuchs-Nr	6085

Propulsionsversuch

Maßstab	λ		16
Länge	Lwl	m	6,875
Breite	B	m	0,813
Tiefgang	T	m	0,188
Verdrängung	Δ	dm ³	0,792
Oberfläche	S	m ²	8,348
Wassertiefe	h	m	0,250
	h / T		1,333

			Backbord	Steuerbord
Propeller Nr.			259	259
Prop.durchmesser.	Dp'	m	0,110	0,110
Profilänge	C07R'	m	0,041	0,041
Drehrichtung			rechts	links
Ruder Nr.			847	847
Düse Nr.			342	342

Besondere Merkmale

Reibungsabzug nach ITTC-1957

Zusatzwiderstandsbeiwert	CA		0,0002
Wassertemperatur	tw	°C	17,6
Dichte Wasser	ρ	kg/m ³	999,0
kin. Zähigkeit	ν	m ² /s	1,138E-06
Propellermaßstabseffekt	mP		1,0000

Ergebnisse des Modellversuchs

V	F _n	F _{nh}	PD ohne Maßstabs- Effekt	ohne Düse	Düse	T gesamt	n mittlere	Trimm positiv: nach hinten [1/60°]	Abs. positiv: nach unten [mm]
[m/s]	[-]	[-]	[W]			[N]	[1/s]		
0,694	0,085	0,444	12,21			9,1	12,8	0,41	8,2
0,833	0,102	0,532	25,47			14,7	16,2	1,65	14,1
0,903	0,110	0,577	36,63			18,7	18,2	2,36	17,3
0,972	0,119	0,621	44,34			21,1	19,5	3,32	19,8
1,043	0,127	0,666	87,98			33,4	24,0	8,07	30,4

V	PD	V _{an}	PT	ohne Düse	w	t	η_D	η_S	η_0	η_R	η_{R1}
[m/s]	[W]	[m/s]	[W]		-0,471 gemittelt	-0,111 gemittelt	0,521 gemittelt	0,678 gemittelt	0,690 gemittelt	1,366 gemittelt	0,983 gemittelt
[-]	[-]	[-]	[-]		[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
0,694	12,2	0,942	8,546		-0,357	-0,379	0,711	0,700	0,695	0,984	1,007
0,833	25,5	1,188	17,434		-0,427	-0,165	0,559	0,684	0,693	1,224	0,988
0,903	36,6	1,325	24,811		-0,467	-0,049	0,484	0,677	0,689	1,398	0,983
0,972	44,3	1,420	29,978		-0,461	-0,090	0,504	0,676	0,692	1,341	0,978
1,043	88,0	1,714	57,312		-0,644	0,126	0,346	0,651	0,679	1,881	0,959

Versuchsergebnisse:

Auftrag-Nummer	2396
Kennwort	Semikat See
Modell-Nummer	1793B
Datum	17.03.2006
Versuchs-Nr	6087

Propulsionsversuch

Maßstab	λ		16
Länge	Lwl	m	6,875
Breite	B	m	0,813
Tiefgang	T	m	0,109
Verdrängung	Δ	dm ³	0,382
Oberfläche	S	m ²	6,785
Wassertiefe	h	m	0,250
	h / T		2,285

			Backbord	Steuerbord
Propeller Nr.			259	259
Prop.durchmesser.	Dp'	m	0,110	0,110
Profilänge	C07R'	m	0,041	0,041
Drehrichtung			rechts	links
Ruder Nr.			847	847
Düse Nr.			342	342

Besondere Merkmale

Reibungsabzug nach ITTC-1957

Zusatzwiderstandsbeiwert	CA		0,0002
Wassertemperatur	tw	°C	17,6
Dichte Wasser	ρ	kg/m ³	999,0
kin. Zähigkeit	ν	m ² /s	1,138E-06
Propellermaßstabseffekt	mP		1,0000

Ergebnisse des Modellversuchs

V	F _n	F _{nh}	PD ohne Maßstabs- Effekt	ohne Düse	Düse	T gesamt	n mittlere	Trimm positiv: nach hinten	Abs. positiv: nach unten
[m/s]	[-]	[-]	[W]			[N]	[1/s]	[1/60°]	[mm]
0,834	0,102	0,532	8,89			7,8	11,4	0,95	5,5
0,972	0,119	0,621	16,69			11,7	13,9	2,37	8,8
1,110	0,135	0,709	29,79			17,2	16,6	5,05	14,3
1,180	0,144	0,754	41,61			21,5	18,3	8,30	20,3

V	PD	V _{an}	PT	ohne Düse	w 0,000 gemittelt	t -0,134 gemittelt	η_D 0,758 gemittelt	η_S 0,663 gemittelt	η_D 0,656 gemittelt	η_R 0,891 gemittelt	η_R 1,010 gemittelt
[m/s]	[W]	[m/s]	[W]		[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
0,834	8,9	0,805	6,247		0,034	-0,231	0,896	0,703	0,671	0,784	1,047
0,972	16,7	0,962	11,208		0,010	-0,181	0,802	0,672	0,663	0,838	1,013
1,110	29,8	1,123	19,335		-0,012	-0,155	0,741	0,649	0,650	0,876	0,998
1,180	41,6	1,217	26,188		-0,031	0,032	0,591	0,629	0,640	1,066	0,983

Versuchsergebnisse:

Auftrag-Nummer	2396
Kennwort	Semikat See
Modell-Nummer	1793B
Datum	18.03.2006
Versuchs-Nr	6090

Propulsionsversuch

Maßstab	λ		16
Länge	Lwl	m	6,875
Breite	B	m	0,813
Tiefgang	T	m	0,188
Verdrängung	Δ	dm ³	0,792
Oberfläche	S	m ²	8,348
Wassertiefe	h	m	1,100
	h / T		5,867

			Backbord	Steuerbord
Propeller Nr.			259	259
Prop.durchmesser.	Dp'	m	0,110	0,110
Profilänge	C07R'	m	0,041	0,041
Drehrichtung			rechts	links
Ruder Nr.			847	847
Düse Nr.			342	342

Besondere Merkmale

Reibungsabzug nach ITTC-1957

Zusatzwiderstandsbeiwert	CA		0,0002
Wassertemperatur	tw	°C	18,2
Dichte Wasser	ρ	kg/m ³	999,0
kin. Zähigkeit	ν	m ² /s	1,138E-06
Propellermaßstabseffekt	mP		1,0000

Ergebnisse des Modellversuchs

V	Fn	Fnh	PD ohne Maßstabs- Effekt	ohne Düse	Düse	T gesamt	n mittlere	Trimm positiv: nach hinten	Abs. positiv: nach unten
[m/s]	[-]	[-]	[W]			[N]	[1/s]	[1/60°]	[mm]
1,111	0,136	0,338	27,15			15,5	16,5	-1,92	9,0
1,250	0,153	0,381	43,80			21,3	19,1	0,08	6,2
1,318	0,161	0,401	53,25			24,3	20,3	-0,09	6,9
1,388	0,169	0,423	64,45			27,5	21,6	-0,06	6,7
1,528	0,187	0,465	104,86			38,2	25,0	1,51	8,9
1,667	0,203	0,507	152,23			49,3	28,1	0,22	12,2

V	PD	V _{an}	PT	ohne Düse	w	t	η_D	η_S	η_0	η_R	η_R
[m/s]	[W]	[m/s]	[W]		-0,102 gemittelt	-0,415 gemittelt	0,847 gemittelt	0,648 gemittelt	0,669 gemittelt	0,869 gemittelt	0,968 gemittelt
[-]	[-]	[-]	[-]		[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
1,111	27,2	1,181	18,347		-0,062	-1,733	1,739	0,676	0,682	0,389	0,991
1,250	43,8	1,361	28,987		-0,089	-0,209	0,735	0,662	0,677	0,901	0,977
1,318	53,3	1,436	34,837		-0,089	-0,184	0,711	0,654	0,674	0,920	0,971
1,388	64,5	1,521	41,794		-0,096	-0,117	0,661	0,649	0,672	0,981	0,965
1,528	104,9	1,727	65,994		-0,130	-0,111	0,619	0,629	0,660	1,017	0,954
1,667	152,2	1,907	93,952		-0,144	-0,138	0,614	0,617	0,651	1,005	0,948

Versuchsergebnisse:

Auftrag-Nummer	2396
Kennwort	Semikat See
Modell-Nummer	1793B
Datum	19.04.2006
Versuchs-Nr	6093

Propulsionsversuch

Maßstab	λ		16
Länge	Lwl	m	6,875
Breite	B	m	0,813
Tiefgang	T	m	0,188
Verdrängung	Δ	dm ³	0,792
Oberfläche	S	m ²	8,348
Wassertiefe	h	m	1,100
	h / T		5,867

			Backbord	Steuerbord
Propeller Nr.			259	259
Prop.durchmesser.	Dp'	m	0,110	0,110
Profilänge	C07R'	m	0,041	0,041
Drehrichtung			rechts	links
Ruder Nr.			847	847

Besondere Merkmale

Reibungsabzug nach ITTC-1957

Zusatzwiderstandsbeiwert	CA		0,0002
Wassertemperatur	tw	°C	17,2
Dichte Wasser	ρ	kg/m ³	999,0
kin. Zähigkeit	ν	m ² /s	1,138E-06
Propellermaßstabseffekt	mP		1,0000

Ergebnisse des Modellversuchs

V	Fn	Fnh	PD ohne Maßstabs- Effekt	ohne Düse	T gesamt	n mittlere	Trimm positiv: nach hinten	Abs. positiv: nach unten
[m/s]	[-]	[-]	[W]		[N]	[1/s]	[1/60°]	[mm]
1,110	0,135	0,338	35,68		21,0	16,4	0,40	5,1
1,251	0,153	0,381	51,86		26,9	18,4	0,43	5,4
1,318	0,161	0,401	61,24		29,9	19,4	0,01	6,5
1,388	0,169	0,423	78,38		35,4	20,9	0,41	7,0
1,527	0,186	0,465	124,81		48,0	24,0	-1,81	8,9
1,670	0,204	0,508	192,38		65,6	27,6	0,89	11,7

V	PD	V _{an}	PT	ohne Düse	w 0,191 gemittelt	t 0,202 gemittelt	η_D 0,496 gemittelt	η_E 0,503 gemittelt	η_D 0,523 gemittelt	η_R 1,016 gemittelt	η_R 0,961 gemittelt
[m/s]	[W]	[m/s]	[W]		[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
1,110	35,7	0,906	19,008		0,184	0,147	0,557	0,533	0,543	0,957	0,981
1,251	51,9	1,008	27,090		0,194	0,187	0,527	0,522	0,537	0,992	0,972
1,318	61,2	1,056	31,602		0,199	0,192	0,520	0,516	0,535	0,991	0,965
1,388	78,4	1,119	39,638		0,194	0,253	0,468	0,506	0,526	1,080	0,961
1,527	124,8	1,238	59,414		0,189	0,227	0,454	0,476	0,508	1,048	0,936
1,670	192,4	1,356	86,954		0,188	0,208	0,451	0,462	0,486	1,026	0,951

Versuchsergebnisse:

Auftrag-Nummer	2396
Kennwort	Semikat
Modell-Nummer	1793B
Datum	20.04.2006
Versuchs-Nr	6097

Propulsionsversuch

Maßstab	λ		16
Länge	Lwl	m	6,875
Breite	B	m	0,813
Tiefgang	T	m	0,188
Verdrängung	Δ	dm ³	0,792
Oberfläche	S	m ²	8,348
Wassertiefe	h	m	0,313
	h / T		1,667

			Backbord	Steuerbord
Propeller Nr.			259	259
Prop.durchmesser.	Dp'	m	0,110	0,110
Profilänge	C07R'	m	0,041	0,041
Drehrichtung			rechts	links
Ruder Nr.			847	847

Besondere Merkmale

Reibungsabzug nach ITTC-1957

Zusatzwiderstandsbeiwert	CA		0,0002
Wassertemperatur	tw	°C	18,2
Dichte Wasser	ρ	kg/m ³	999,0
kin. Zähigkeit	ν	m ² /s	1,138E-06
Propellermaßstabseffekt	mP		1,0000

Ergebnisse des Modellversuchs

V	Fn	Fnh	PD ohne Maßstabs- Effekt	ohne Düse	T gesamt	n mittlere	Trimm positiv: nach hinten	Abs. positiv: nach unten
[m/s]	[-]	[-]	[W]		[N]	[1/s]	[1/60°]	[mm]
0,695	0,085	0,397	12,27		11,1	11,6	1,68	6,7
0,833	0,102	0,476	18,26		14,3	13,3	2,01	8,9
0,973	0,119	0,556	32,81		20,7	15,9	3,60	12,6
1,111	0,136	0,635	55,42		29,1	18,6	2,53	19,1
1,182	0,144	0,675	73,42		35,1	20,3	4,45	25,7
1,250	0,153	0,714	102,74		44,4	22,5	5,69	31,8

V	PD	V _{an}	PT	ohne Düse	w 0,138 gemittelt	t 0,190 gemittelt	η_D 0,485 gemittelt	η_E 0,515 gemittelt	η_0 0,506 gemittelt	η_R 1,069 gemittelt	η_R 1,017 gemittelt
[m/s]	[W]	[m/s]	[W]		[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
0,695	12,3	0,604	6,699		0,132	0,214	0,494	0,546	0,513	1,105	1,064
0,833	18,3	0,714	10,213		0,142	0,171	0,540	0,559	0,527	1,035	1,060
0,973	32,8	0,839	17,376		0,137	0,175	0,506	0,530	0,519	1,046	1,020
1,111	55,4	0,954	27,754		0,141	0,150	0,495	0,501	0,505	1,011	0,992
1,182	73,4	1,021	35,861		0,136	0,125	0,495	0,488	0,496	0,987	0,985
1,250	102,7	1,072	47,638		0,142	0,303	0,377	0,464	0,473	1,230	0,981

Versuchsergebnisse:

Auftrag-Nummer	A2396
Kennwort	Semikat
Modell-Nummer	1816A
Datum	11.10.2006
Versuchs-Nr	6.189

Propulsionsversuch

Maßstab	λ		16
Länge	Lwl	m	6.875
Breite	B	m	0.813
Tiefgang	T	m	0.188
Verdrängung	∇	dm ³	0.792
Oberfläche	S	m ²	8.348
Wassertiefe	h	m	0.313
	h / T		1.667

			Backbord	Steuerbord
Propeller Nr.			259	259
Prop.durchmesser.	Dp'	m	0.110	0.110
Profilänge	C07R'	m	0.041	0.041
Drehrichtung			rechts	links
Ruder Nr.			847	847
Düse Nr.			342	342

Besondere Merkmale

Reibungsabzug nach ITTC-1957

Zusatzwiderstandsbeiwert	CA		0.0002
Wassertemperatur	tw	°C	18.6
Dichte Wasser	ρ	kg/m ³	999.0
kin. Zähigkeit	ν	m ² /s	1.138E-06
Propellemaßstabseffekt	mP		1.0000

Ergebnisse des Modellversuchs

V	Fn	Fnh	PD ohne Maßstabs- Effekt	ohne Düse	Düse	T gesamt	n mittlere	Trimm positiv: nach hinten	Abs. positiv: nach unten
[m/s]	[-]	[-]	[W]			[N]	[1/s]	[1/60°]	[mm]
0.556	0.068	0.318	7.52			6.6	11.0	0.70	3.3
0.694	0.085	0.397	14.46			10.3	13.7	1.30	5.1
0.832	0.102	0.475	27.54			15.5	16.7	2.23	8.2
0.972	0.119	0.555	46.43			21.5	19.6	3.34	11.5
1.111	0.136	0.635	87.36			32.3	23.7	5.81	19.0

V	PD	V _{an}	PT	ohne Düse	w	t	η_D	η_B	η_E	η_H	η_R
[m/s]	[W]	[m/s]	[W]		-0.474 gemittelt	-0.253 gemittelt	0.579 gemittelt	0.680 gemittelt	0.692 gemittelt	1.179 gemittelt	0.983 gemittelt
[-]	[-]	[-]	[-]		[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
0.556	7.5	0.813	5.373		-0.461	-0.214	0.593	0.714	0.698	1.204	1.023
0.694	14.5	1.007	10.376		-0.451	-0.217	0.602	0.717	0.696	1.193	1.030
0.832	27.5	1.218	18.848		-0.463	-0.341	0.627	0.685	0.692	1.091	0.989
0.972	46.4	1.423	30.542		-0.465	-0.282	0.576	0.658	0.691	1.143	0.952
1.111	87.4	1.700	54.853		-0.530	-0.211	0.497	0.628	0.682	1.263	0.921

Versuchsergebnisse:

Auftrag-Nummer	A2396
Kennwort	Semikal-See
Modell-Nummer	1816A
Datum	11.10.2006
Versuchs-Nr	6.191

Propulsionsversuch

Maßstab	λ		16
Länge	Lwl	m	6.875
Breite	B	m	0.813
Tiefgang	T	m	0.188
Verdrängung	∇	dm ³	0.792
Oberfläche	S	m ²	8.348
Wassertiefe	h	m	0.313
	h / T		1.667

			Backbord	Steuerbord
Propeller Nr.			259	259
Prop.durchmesser.	Dp'	m	0.110	0.000
Profilänge	C07R'	m	0.041	0.000
Drehrichtung			rechts	links
Ruder Nr.			847	847
Düse Nr.			342	342

Besondere Merkmale

Reibungsabzug nach ITTC-1957

Zusatzwiderstandsbeiwert	CA		0.0002
Wassertemperatur	tw	°C	18.6
Dichte Wasser	ρ	kg/m ³	999.0
kin. Zähigkeit	ν	m ² /s	1.138E-06
Propellemaßstabseffekt	mP		1.0000

Ergebnisse des Modellversuchs

V	Fn	Fnh	PD ohne Maßstabs- Effekt	ohne Düse	T gesamt	n mittlere	Trimm positiv: nach hinten	Abs. positiv: nach unten
[m/s]	[-]	[-]	[W]		[N]	[1/s]	[1/60°]	[mm]
0.557	0.068	0.318	7.38		6.5	10.5	0.40	2.8
0.695	0.085	0.397	16.09		10.6	13.3	0.89	6.0
0.833	0.102	0.476	27.48		15.5	16.0	1.69	7.7
0.972	0.119	0.555	46.36		21.7	18.9	2.75	11.9
1.111	0.136	0.635	83.10		32.1	22.7	4.71	18.9
1.252	0.153	0.715	160.03		50.9	27.8	9.82	35.7

V	PD	V _{an}	PT	ohne Düse	w	t	η_D	η_B	η_P	η_H	η_R
[m/s]	[W]	[m/s]	[W]		-0.361 gemittelt	-0.186 gemittelt	0.535 gemittelt	0.612 gemittelt	0.657 gemittelt	1.151 gemittelt	0.931 gemittelt
[m/s]	[W]	[m/s]	[W]		[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
0.557	7.4	0.740	4.810		-0.328	-0.302	0.638	0.651	0.672	1.020	0.968
0.695	16.1	0.932	9.902		-0.342	-0.200	0.550	0.615	0.668	1.118	0.921
0.833	27.5	1.107	17.155		-0.328	-0.133	0.533	0.624	0.662	1.173	0.943
0.972	46.4	1.301	28.275		-0.339	-0.183	0.539	0.610	0.660	1.132	0.924
1.111	83.1	1.535	49.335		-0.381	-0.141	0.491	0.594	0.650	1.210	0.913
1.252	160.0	1.812	92.216		-0.448	-0.154	0.459	0.576	0.629	1.254	0.916

Versuchsergebnisse:

Auftrag-Nummer	A2396
Kennwort	Semikal-See
Modell-Nummer	1816A
Datum	12.10.2006
Versuchs-Nr	6.192

Propulsionsversuch

Maßstab	λ		16
Länge	Lwl	m	6.875
Breite	B	m	0.813
Tiefgang	T	m	0.115
Verdrängung	∇	dm ³	0.381
Oberfläche	S	m ²	7.000
Wassertiefe	h	m	0.132
	h / T		1.148

			Backbord	Steuerbord
Propeller Nr.			259	259
Prop.durchmesser.	Dp'	m	0.110	0.110
Profilänge	C07R'	m	0.041	0.041
Drehrichtung			rechts	links
Ruder Nr.			847	847
Düse Nr.			342	342

Besondere Merkmale

Reibungsabzug nach ITTC-1957

Zusatzwiderstandsbeiwert	CA		0.0002
Wassertemperatur	tw	°C	18.6
Dichte Wasser	ρ	kg/m ³	999.0
kin. Zähigkeit	ν	m ² /s	1.138E-06
Propellemaßstabseffekt	mP		1.0000

Ergebnisse des Modellversuchs

V	F _n	F _{nh}	PD ohne Maßstabs- Effekt	ohne Düse	T gesamt	n mittlere	Trimm positiv: nach hinten	Abs. positiv: nach unten
[m/s]	[-]	[-]	[W]		[N]	[1/s]	[1/60°]	[mm]
0.418	0.051	0.367	1.28		2.7	7.1	0.48	0.7
0.556	0.068	0.489	5.06		5.8	9.1	2.41	5.2
0.624	0.076	0.549	6.64		6.6	9.8	2.42	8.1
0.694	0.085	0.610	14.52		10.9	12.4	2.71	9.3

V	PD	V _{an}	PT	ohne Düse	w	t	η_D	η_B	η_E	η_H	η_R
[m/s]	[W]	[m/s]	[W]		-0.097 gemittelt	-0.144 gemittelt	0.759 gemittelt	0.733 gemittelt	0.631 gemittelt	0.964 gemittelt	1.145 gemittelt
[-]	[-]	[-]	[-]		[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
0.418	1.3	0.532	1.408		-0.273	-0.189	1.026	1.098	0.708	1.070	1.551
0.556	5.1	0.573	3.316		-0.030	-0.096	0.698	0.656	0.607	0.940	1.081
0.624	6.6	0.619	4.056		0.008	-0.262	0.777	0.611	0.613	0.786	0.997
0.694	14.5	0.758	8.229		-0.092	-0.030	0.534	0.567	0.595	1.061	0.952

Versuchsergebnisse:

Auftrag-Nummer	A2396
Kennwort	Semnikat-See
Modell-Nummer	1816A
Datum	13.10.2006
Versuchs-Nr	6.193

Propulsionsversuch

Maßstab	λ		16
Länge	Lwl	m	6.875
Breite	B	m	0.813
Tiefgang	T	m	0.115
Verdrängung	Ψ	dm ³	0.381
Oberfläche	S	m ²	7.000
Wassertiefe	h	m	0.313
	h / T		2.717

			Backbord	Steuerbord
Propeller Nr.			259	259
Prop.durchmesser	Dp'	m	0.110	0.110
Profillänge	C07R'	m	0.041	0.041
Drehrichtung			rechts	links
Ruder Nr.			847	847
Düse Nr.			342	342

Besondere Merkmale

Reibungsabzug nach ITTC-1957				
Zusatzwiderstandsbeiwert	CA			0.0002
Wassertemperatur	tw	°C		18.6
Dichte Wasser	ρ	kg/m ³		999.0
kin. Zähigkeit	ν	m ² /s		1.138E-06
Propellermaßstabseffekt	mP			1.0000

Ergebnisse des Modellversuchs

V	Fn	Fnh	PD ohne Maßstabs- Effekt	ohne	Düse	T gesamt	n mittlere	Trimm positiv: nach hinten	Abs. positiv: nach unten
[m/s]	[-]	[-]	[W]			[N]	[1/s]	[1/60°]	[mm]
0.694	0.085	0.397	8.30			7.1	10.8	1.97	8.4
0.832	0.102	0.475	18.47			12.0	13.7	3.69	12.5

Versuchsergebnisse:

Modell-Nummer	1816B
Datum	17.10.2006
Versuchs-Nr	6.195

Propulsionsversuch

Maßstab	λ		16
Länge	Lwl	m	6.875
Breite	B	m	0.813
Tiefgang	T	m	0.188
Verdrängung	V	dm ³	0.792
Oberfläche	S	m ²	8.348
Wassertiefe	h	m	0.312
	h / T		1.664

			Backbord	Steuerbord
Propeller Nr.			259	259
Prop.durchmesser.	Dp'	m	0.110	0.000
Profillänge	C07R'	m	0.041	0.000
Drehrichtung			links	rechts

Besondere Merkmale

Ruder Nr.	847	847
Düse Nr.	342	342

Reibungsabzug nach ITTC-1957

Zusatzwiderstandsbeiwert	CA	0.0002
Wassertemperatur	tw	°C 18.7
Dichte Wasser	ρ	kg/m ³ 999.0
kin. Zähigkeit	ν	m ² /s 1.138E-06
Propellermaßstabseffekt	mP	1.0000

Ergebnisse des Modellversuchs

V	Fn	Fnh	PD ohne Maßstabs- Effekt	ohne Düse	T gesamt	n mittlere	Trimm positiv: nach hinten [1/60°]	Abs. positiv: nach unten [mm]
[m/s]	[-]	[-]	[W]		[N]	[1/s]		
0.556	0.068	0.318	5.74		5.4	9.7	0.11	4.6
0.694	0.085	0.397	11.89		8.5	12.1	-0.03	4.4
0.832	0.101	0.475	23.16		13.2	15.0	0.30	8.7
0.973	0.119	0.556	38.70		18.5	17.6	0.25	11.2
1.110	0.135	0.635	67.12		27.1	21.0	0.57	19.6
1.251	0.153	0.715	142.89		46.6	26.7	6.30	34.2
1.317	0.161	0.753	293.81		76.1	33.9	41.83	40.1

V	PD	V _{an}	PT	ohne Düse	w	t	η_p	η_e	η_o	η_H	η_R
[m/s]	[W]	[m/s]	[W]		[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
0.556	5.7	0.702	3.792		-0.263	-0.274	0.666	0.660	0.685	0.991	0.964
0.694	11.9	0.866	7.324		-0.248	-0.172	0.578	0.616	0.680	1.065	0.905
0.832	23.2	1.057	13.933		-0.271	-0.167	0.552	0.602	0.673	1.090	0.894
0.973	38.7	1.235	22.895		-0.270	-0.087	0.506	0.592	0.667	1.168	0.888
1.110	67.1	1.448	39.241		-0.304	-0.209	0.542	0.585	0.659	1.079	0.888
1.251	142.9	1.759	82.021		-0.406	0.044	0.390	0.574	0.634	1.470	0.906
1.317	293.8	2.199	167.380		-0.670	-2.153	1.076	0.570	0.626	0.530	0.910

Versuchsergebnisse:

Auftrag-Nummer	A2396
Kennwort	Semikat-See
Modell-Nummer	1793C
Datum	17.10.2006
Versuchs-Nr	6.197

Propulsionsversuch

Maßstab	λ		16
Länge	Lwl	m	6.875
Breite	B	m	0.813
Tiefgang	T	m	0.115
Verdrängung	Δ	dm ³	0.381
Oberfläche	S	m ²	7.000
Wassertiefe	h	m	0.156
	h / T		1.357

			Backbord	Steuerbord
Propeller Nr.			259	259
Prop.durchmesser.	Dp'	m	0.110	0.110
Profillänge	C07R'	m	0.041	0.041
Drehrichtung			rechts	links
Ruder Nr.			847	847
Düse Nr.			342	342

Besondere Merkmale

Reibungsabzug nach ITTC-1957

Zusatzwiderstandsbeiwert	CA		0.0002
Wassertemperatur	tw	°C	18.7
Dichte Wasser	ρ	kg/m ³	999.0
kin. Zähigkeit	ν	m ² /s	1.138E-06
Propellermaßstabseffekt	mP		1.0000

Ergebnisse des Modellversuchs

V	Fn	Fnh	PD ohne Maßstabs- Effekt	ohne Düse	Düse	T gesamt	n mittlere	Trimm positiv: nach hinten	Abs. positiv: nach unten
[m/s]	[-]	[-]	[W]			[N]	[1/s]	[1/60°]	[mm]
0.555	0.068	0.449	5.65			4.6	10.1	-0.24	5.6
0.694	0.085	0.561	9.24			7.1	10.8	0.57	6.6
0.833	0.102	0.673	18.82			11.8	13.5	0.88	13.3
0.903	0.110	0.730	44.78			22.1	17.6	-0.26	22.6

V	PD	V _{an}	PT	ohne Düse	w	t	η_b	η_a	η_e	η_H	η_R
[m/s]	[W]	[m/s]	[W]		gemittelt	gemittelt	gemittelt	gemittelt	gemittelt	gemittelt	gemittelt
0.555	5.7	0.814	3.753		-0.201	-0.007	0.497	0.582	0.660	1.277	0.882
0.694	9.2	0.745	5.290		-0.466	-0.136	0.514	0.664	0.747	1.291	0.889
0.833	18.8	0.900	10.606		-0.074	-0.194	0.636	0.572	0.661	0.899	0.865
0.903	44.8	1.069	23.612		-0.080	-0.083	0.565	0.564	0.639	0.997	0.882
					-0.185	0.384	0.274	0.527	0.592	1.922	0.891

Versuchsergebnisse:

Auftrag-Nummer	A2396
Kennwort	Semikal-See
Modell-Nummer	1816C
Datum	18.10.2006
Versuchs-Nr	6.201

Propulsionsversuch

Maßstab	λ		16
Länge	Lwl	m	6.875
Breite	B	m	0.813
Tiefgang	T	m	0.115
Verdrängung	∇	dm ³	0.381
Oberfläche	S	m ²	7.000
Wassertiefe	h	m	0.156
	h / T		1.357

			Backbord	Steuerbord
Propeller Nr.			259	259
Prop.durchmesser.	Dp'	m	0.110	0.110
Profilänge	C07R'	m	0.041	0.041
Drehrichtung			rechts	links
Ruder Nr.			847	847
Düse Nr.			342	342

Besondere Merkmale

Reibungsabzug nach ITTC-1957

Zusatzwiderstandsbeiwert	CA		0.0002
Wassertemperatur	tw	°C	18.7
Dichte Wasser	ρ	kg/m ³	999.0
kin. Zähigkeit	ν	m ² /s	1.138E-06
Propellemaßstabseffekt	mP		1.0000

Ergebnisse des Modellversuchs

V	Fn	Fnh	PD ohne Maßstabs- Effekt	ohne Düse	Düse	T gesamt	n mittlere	Trimm positiv: nach hinten	Abs. positiv: nach unten
[m/s]	[-]	[-]	[W]			[N]	[1/s]	[1/60°]	[mm]
0.556	0.068	0.450	4.75			4.5	8.6	0.99	5.0
0.694	0.085	0.561	9.22			7.1	10.7	1.61	7.1
0.833	0.102	0.674	19.66			12.1	13.6	2.95	12.5
0.868	0.106	0.702	25.58			14.8	14.7	3.26	17.6

V	PD	V _{an}	PT	ohne Düse	w	t	η_D	η_B	η_E	η_H	η_R
[m/s]	[W]	[m/s]	[W]		gemittelt	gemittelt	gemittelt	gemittelt	gemittelt	gemittelt	gemittelt
0.556	4.8	0.594	2.678		-0.070	-0.174	0.611	0.556	0.641	0.917	0.867
0.694	9.2	0.738	5.235		-0.067	-0.209	0.639	0.564	0.660	0.883	0.854
0.833	19.7	0.893	10.841		-0.064	-0.257	0.671	0.568	0.658	0.846	0.863
0.868	25.6	0.933	13.796		-0.072	-0.185	0.610	0.552	0.632	0.905	0.873
					-0.076	-0.043	0.523	0.539	0.614	1.032	0.879

Versuchsergebnisse:

Auftrag-Nummer	A2396
Kennwort	Semikal-See
Modell-Nummer	1816C
Datum	19.10.2006
Versuchs-Nr	6.203

Propulsionsversuch

Maßstab	λ		16
Länge	Lwl	m	6.875
Breite	B	m	0.813
Tiefgang	T	m	0.188
Verdrängung	∇	dm ³	0.792
Oberfläche	S	m ²	8.348
Wassertiefe	h	m	0.313
	h / T		1.667

			Backbord	Steuerbord
Propeller Nr.			259	259
Prop.durchmesser.	Dp'	m	0.110	0.110
Profilänge	C07R'	m	0.041	0.041
Drehrichtung			rechts	links
Ruder Nr.			847	847
Düse Nr.			342	342

Besondere Merkmale

Reibungsabzug nach ITTC-1957

Zusatzwiderstandsbeiwert	CA		0.0002
Wassertemperatur	tw	°C	18.7
Dichte Wasser	ρ	kg/m ³	999.0
kin. Zähigkeit	ν	m ² /s	1.138E-06
Propellemaßstabseffekt	mP		1.0000

Ergebnisse des Modellversuchs

V	Fn	Fnh	PD ohne Maßstabs- Effekt	ohne Düse	Düse	T gesamt	n mittlere	Trimm positiv: nach hinten	Abs. positiv: nach unten
[m/s]	[-]	[-]	[W]			[N]	[1/s]	[1/60°]	[mm]
0.556	0.068	0.317	7.12			5.9	10.1	0.21	1.9
0.693	0.085	0.396	14.78			9.7	12.8	0.63	5.0
0.832	0.102	0.475	27.78			14.9	15.7	1.28	9.3
0.971	0.119	0.555	46.10			21.1	18.6	1.91	14.0
1.111	0.136	0.635	76.89			30.0	21.9	3.31	19.2
1.254	0.153	0.716	209.39			61.5	30.0	-2.21	36.7

V	PD	V _{an}	PT	ohne Düse	w	t	η_o	η_B	η_S	η_H	η_K
[m/s]	[W]	[m/s]	[W]		-0.345 gemittelt	-0.104 gemittelt	0.486 gemittelt	0.583 gemittelt	0.656 gemittelt	1.266 gemittelt	0.889 gemittelt
[-]	[-]	[-]	[-]		[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
0.556	7.1	0.716	4.254		-0.289	-0.210	0.561	0.598	0.676	1.065	0.884
0.693	14.8	0.899	8.756		-0.297	-0.218	0.557	0.593	0.670	1.065	0.884
0.832	27.8	1.091	16.218		-0.311	-0.215	0.541	0.584	0.664	1.080	0.879
0.971	46.1	1.280	26.950		-0.318	-0.182	0.524	0.585	0.660	1.115	0.886
1.111	76.9	1.489	44.661		-0.340	-0.101	0.477	0.581	0.651	1.218	0.892
1.254	209.4	1.898	116.657		-0.514	0.303	0.256	0.557	0.613	2.173	0.909

Versuchsergebnisse:

Modell-Nummer	1816C
Datum	09.01.2007
Versuchs-Nr	7.004

Propulsionsversuch

Maßstab	λ		16
Länge	Lwl	m	6.875
Breite	B	m	0.813
Tiefgang	T	m	0.250
Verdrängung	V	dm ³	1.109
Oberfläche	S	m ²	9.131
Wassertiefe	h	m	0.313
	h / T		1.250

			Backbord	Steuerbord
Propeller Nr.			259	259
Prop.durchmesser.	Dp'	m	0.110	0.110
Profillänge	C07R'	m	0.046	0.046
Drehrichtung			rechts	links
Ruder Nr.			847	847
Düse Nr.			342	342

Besondere Merkmale

Reibungsabzug nach ITTC-1957			
Zusatzwiderstandsbeiwert	CA		0.0002
Wassertemperatur	tw	°C	17.6
Dichte Wasser	ρ	kg/m ³	999.0
kin. Zähigkeit	ν	m ² /s	1.138E-06
Propellermaßstabseffekt	mP		1.0000

Ergebnisse des Modellversuchs

V	Fn	Fnh	PD ohne Maßstabs- Effekt	ohne Düse	Düse	T gesamt	n mittlere	Trimm positiv: nach hinten	Abs. positiv: nach unten
[m/s]	[-]	[-]	[W]			[N]	[1/s]	[1/60°]	[mm]
0.694	0.085	0.397	21.28			14.3	14.9	0.26	7.8
0.833	0.102	0.476	42.93			22.0	18.4	0.83	11.8
0.903	0.110	0.516	62.46			28.2	20.6	1.49	15.5
0.971	0.119	0.555	79.35			33.1	22.2	1.93	18.9
1.042	0.127	0.595	116.93			43.0	25.0	3.79	26.9
1.111	0.136	0.635	165.64			54.7	27.7	6.75	31.4

V	PD	V _{an}	PT	ohne Düse	w	t	η_p	η_s	η_e	η_H	η_R
[m/s]	[W]	[m/s]	[W]		[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
0.694	21.3	0.576	8.221		0.170	-0.183	0.551	0.386	0.477	0.702	0.811
0.833	42.9	0.693	15.253		0.169	-0.244	0.532	0.355	0.467	0.668	0.761
0.903	62.5	0.759	21.357		0.159	-0.024	0.417	0.342	0.458	0.821	0.747
0.971	79.4	0.801	26.518		0.175	-0.212	0.491	0.334	0.450	0.681	0.742
1.042	116.9	0.850	36.601		0.184	-0.080	0.414	0.313	0.429	0.755	0.729
1.111	165.6	0.889	48.571		0.200	0.010	0.363	0.293	0.407	0.808	0.720

6.7 Berechnete Übertragungsfunktionen

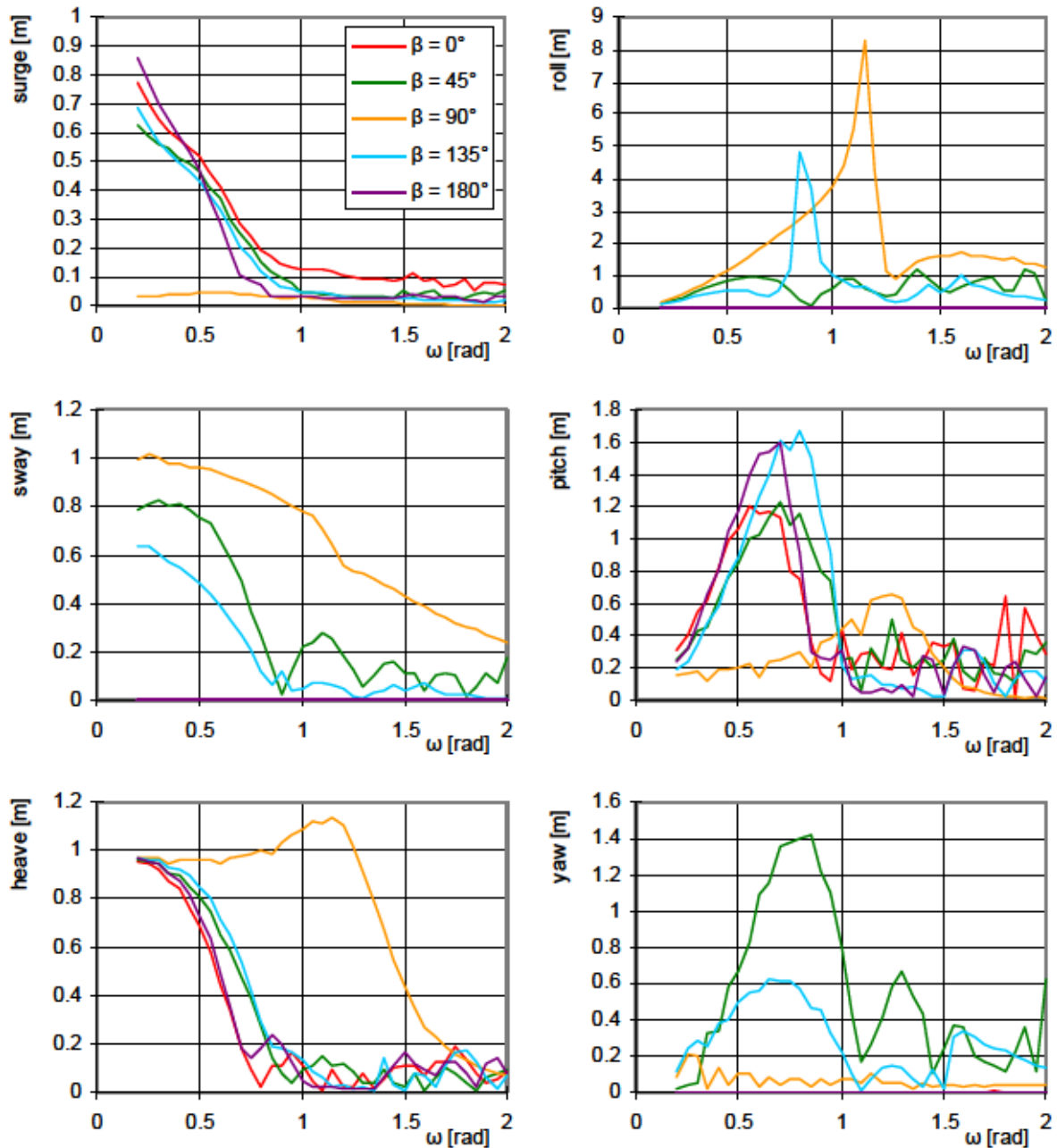


Abb. 87 Übertragungsfunktionen für den Semikatamaran-See bei einer Verdrängung von 3282 m³ und einer Geschwindigkeit von 5,6 m/s.

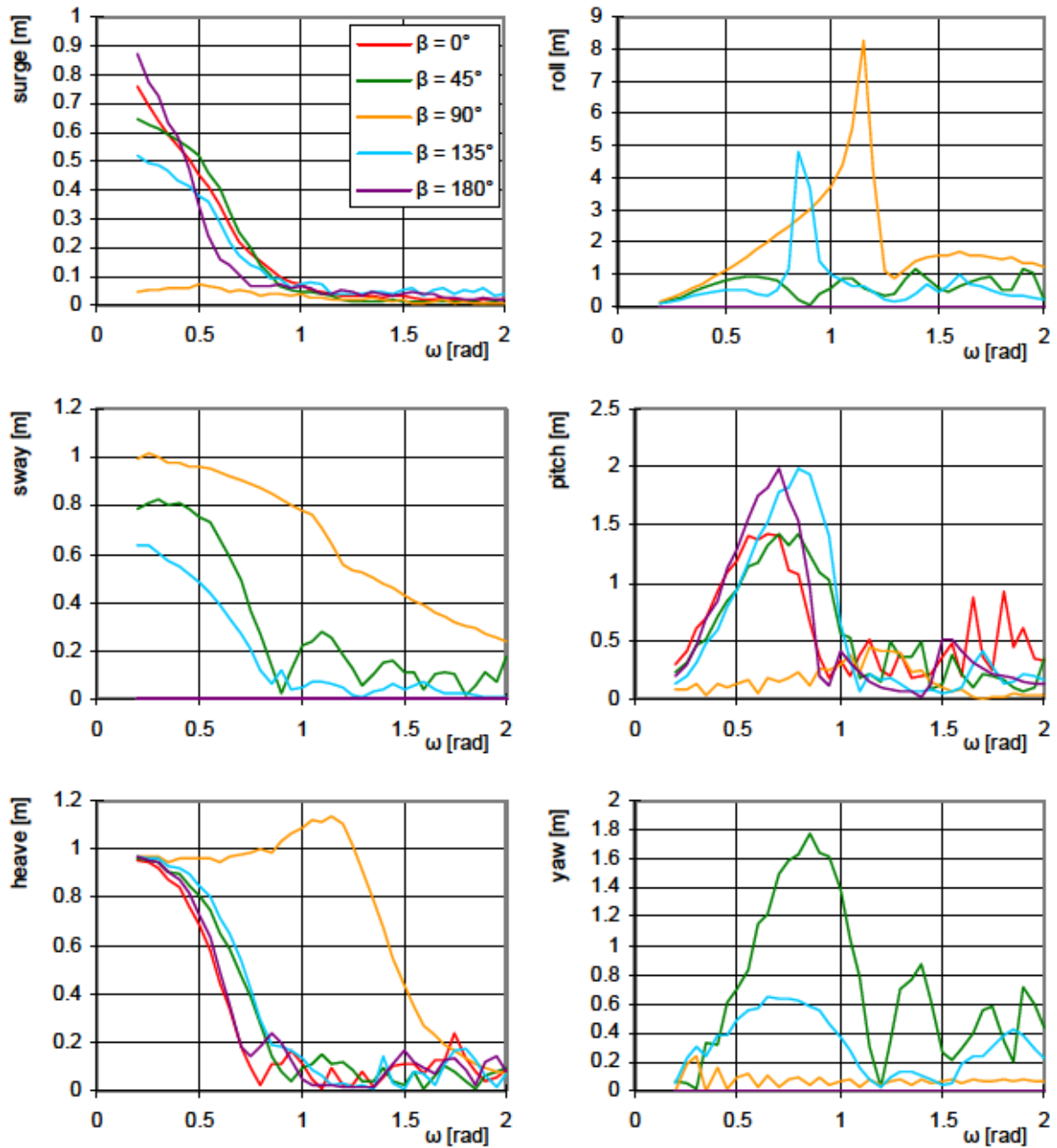


Abb. 88 Übertragungsfunktionen für ein vergleichbares Küstenmotorschiff bei einer Verdrängung von 3282 m³ und einer Geschwindigkeit von 5,6 m/s.

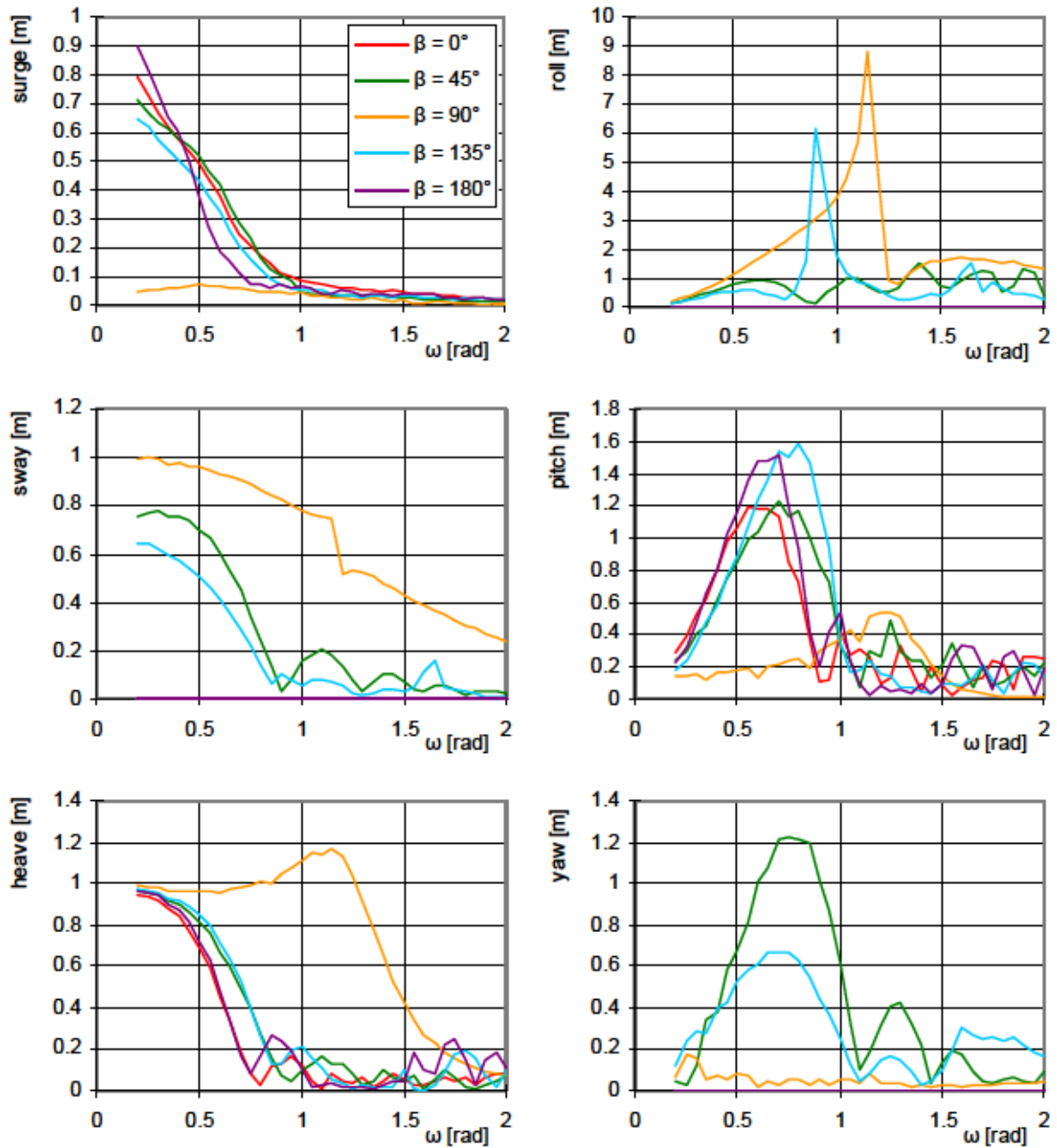


Abb. 89 Übertragungsfunktionen für den Semikatamaran-See bei einer Verdrängung von 3282 m³ und einer Geschwindigkeit von 4,2 m/s.

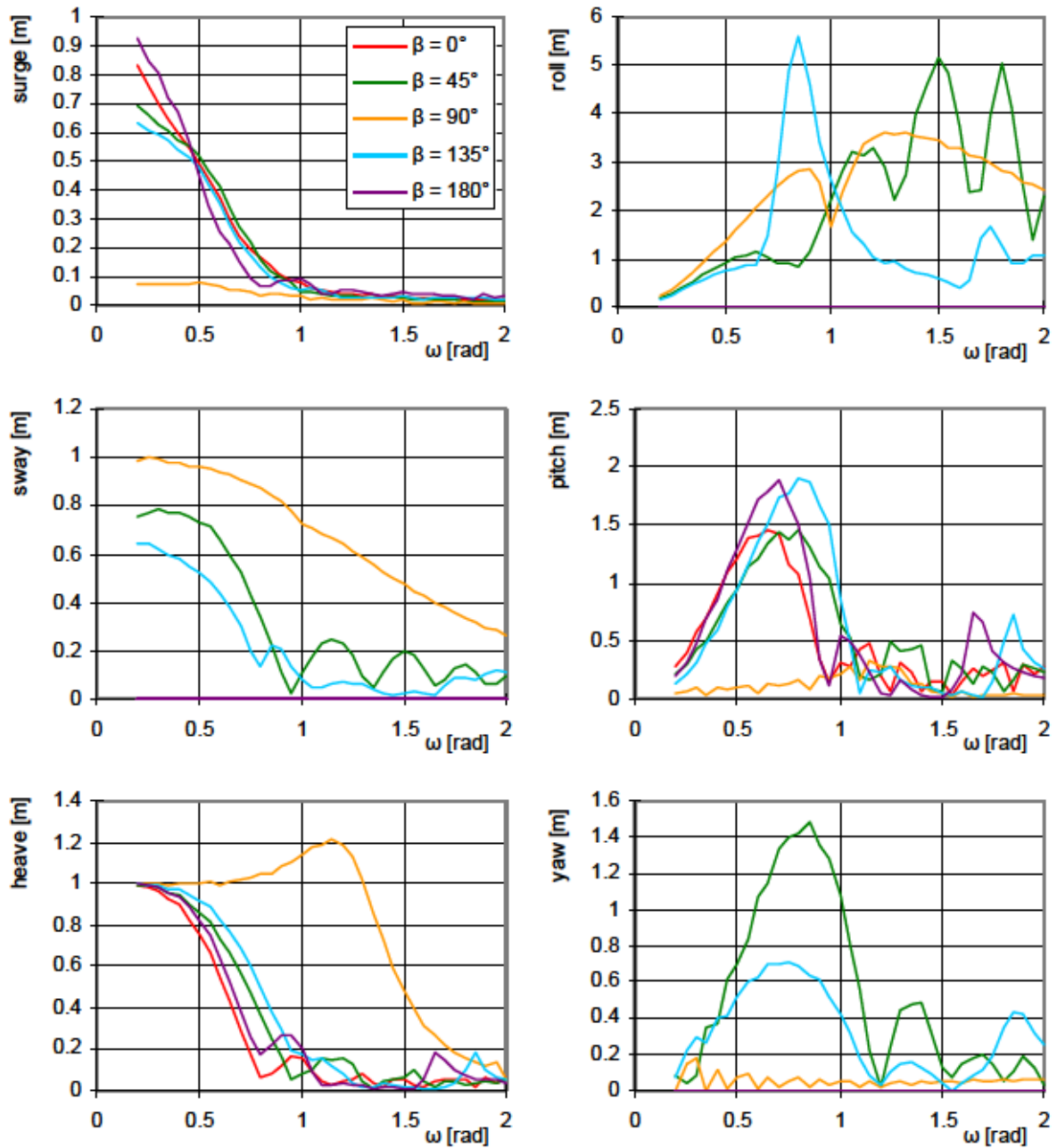


Abb. 90 Übertragungsfunktionen für ein vergleichbares Küstenmotorschiff bei einer Verdrängung von 3282 m³ und einer Geschwindigkeit von 4,2 m/s.

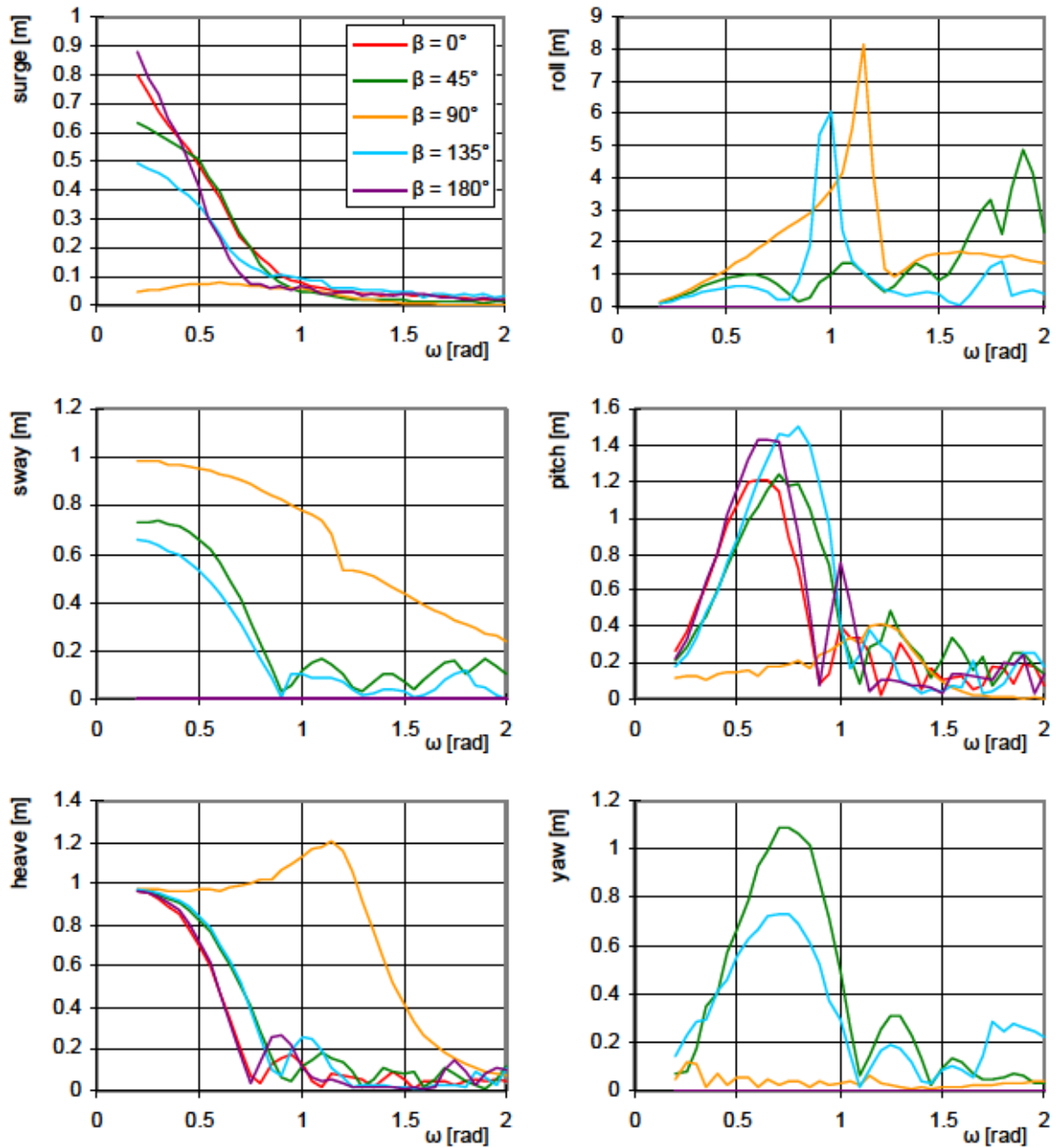


Abb. 91 Übertragungsfunktionen für den Semikatamaran-See bei einer Verdrängung von 3282 m³ und einer Geschwindigkeit von 2,8 m/s.

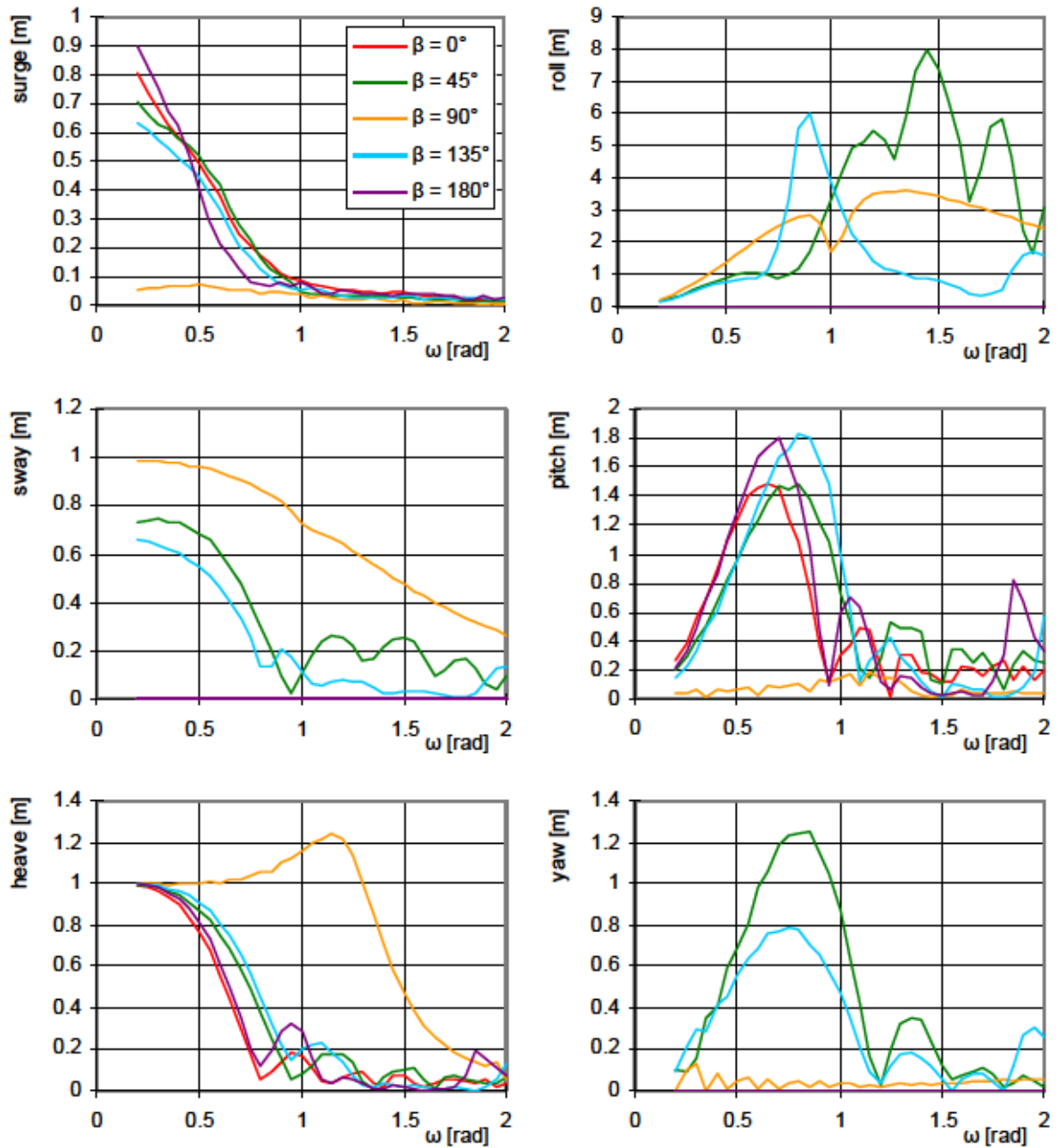


Abb. 92 Übertragungsfunktionen für ein vergleichbares Küstenmotorschiff bei einer Verdrängung von 3282 m³ und einer Geschwindigkeit von 2,8 m/s.

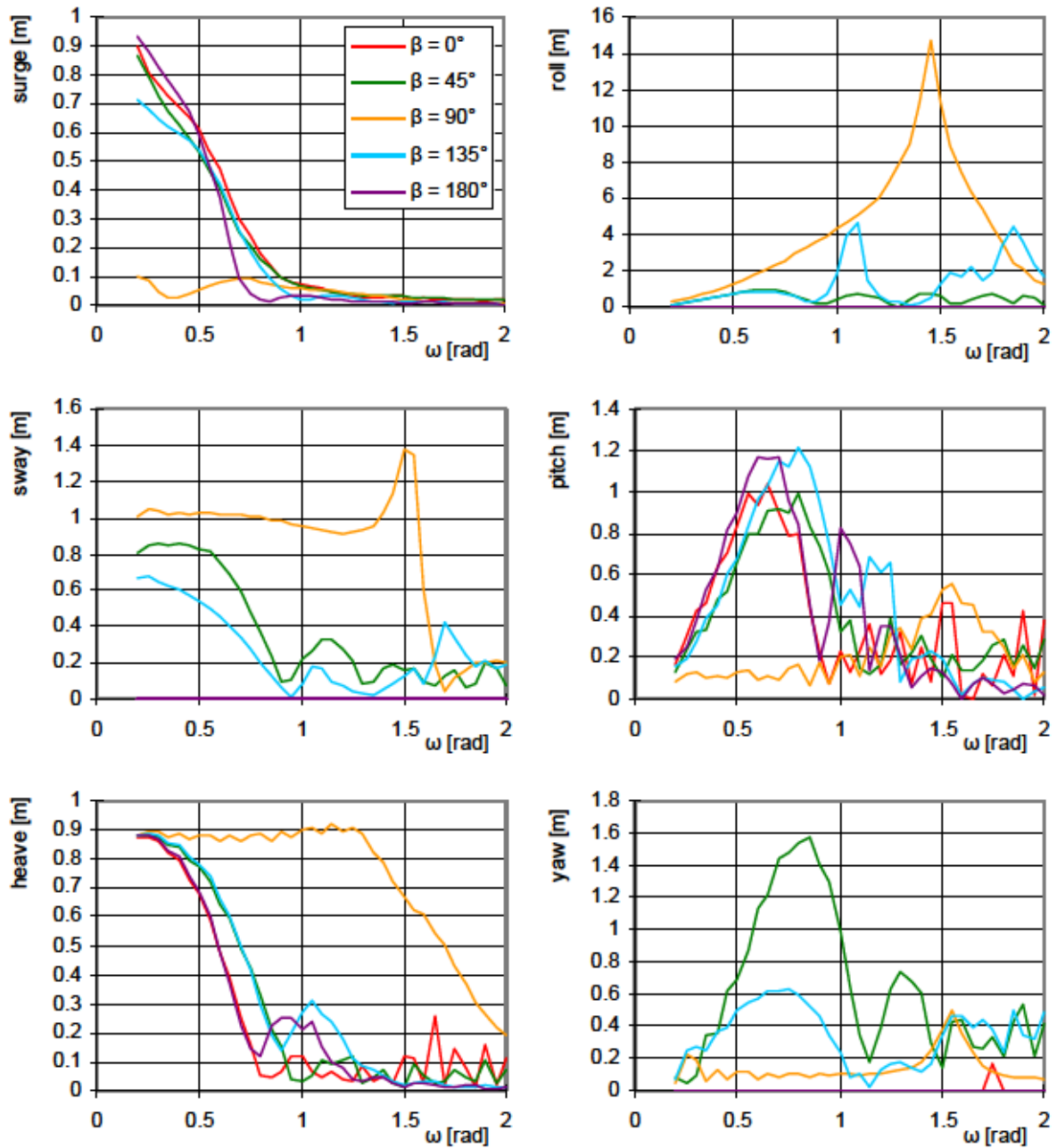


Abb. 93 Übertragungsfunktionen für den Semikatamaran-See bei einer Verdrängung von 1565 m³ und einer Geschwindigkeit von 5,6 m/s.

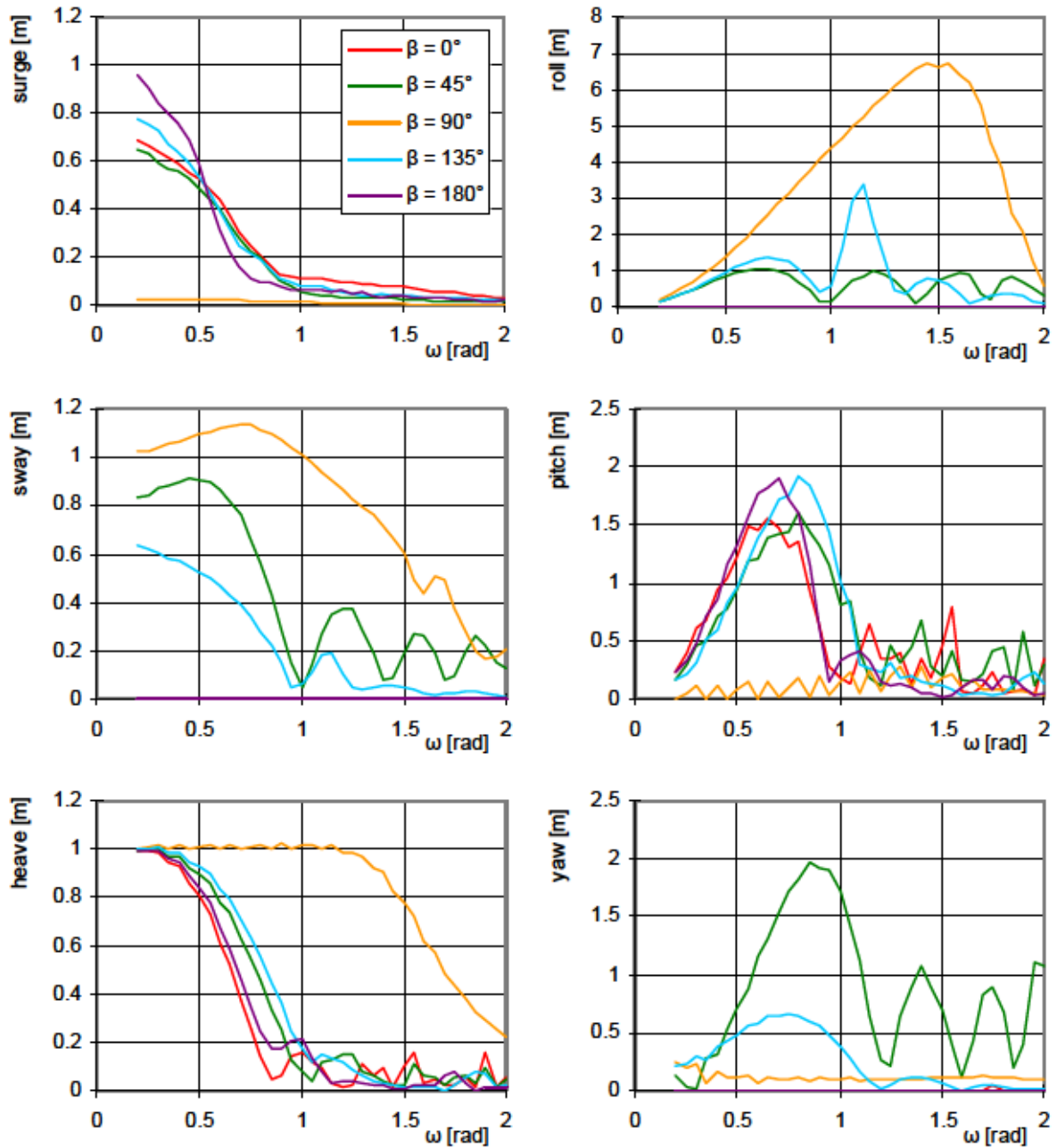


Abb. 94 Übertragungsfunktionen für ein vergleichbares Küstenmotorschiff bei einer Verdrängung von 1565 m^3 und einer Geschwindigkeit von $5,6 \text{ m/s}$.

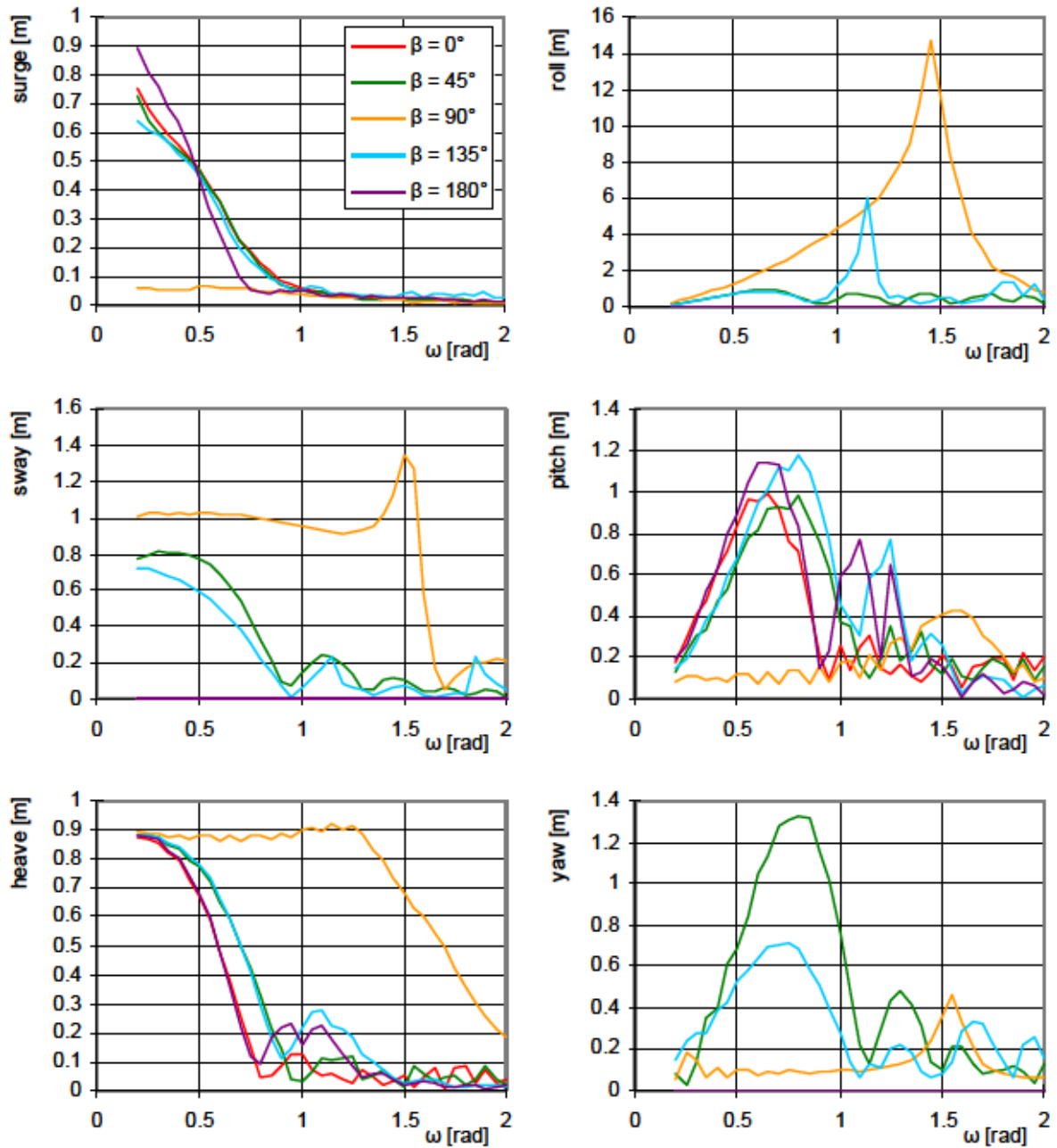


Abb. 95 Übertragungsfunktionen für den Semikatamaran-See bei einer Verdrängung von 1565 m³ und einer Geschwindigkeit von 4,2 m/s.

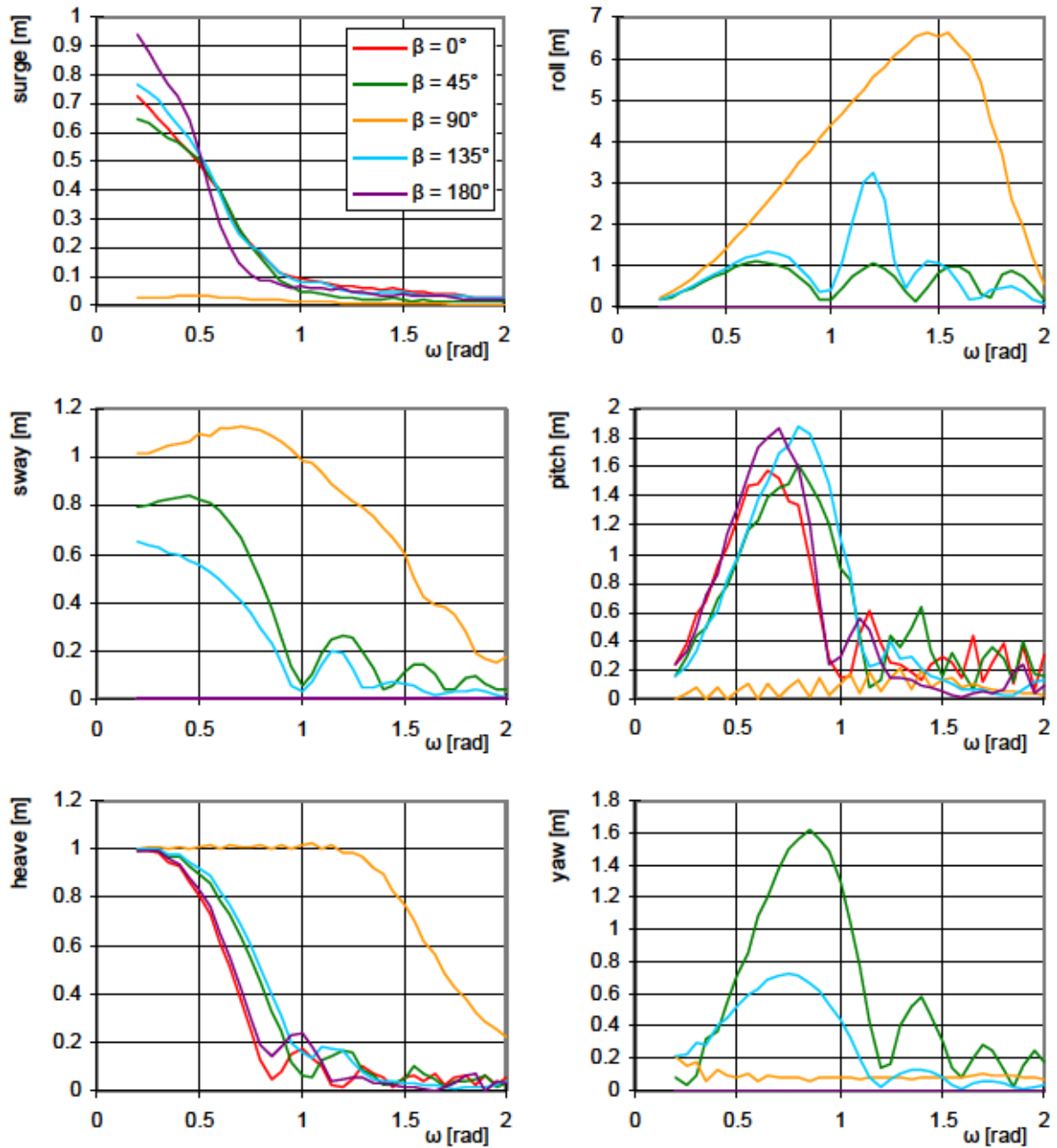


Abb. 96 Übertragungsfunktionen für ein vergleichbares Küstenmotorschiff bei einer Verdrängung von 1565 m^3 und einer Geschwindigkeit von $4,2 \text{ m/s}$.

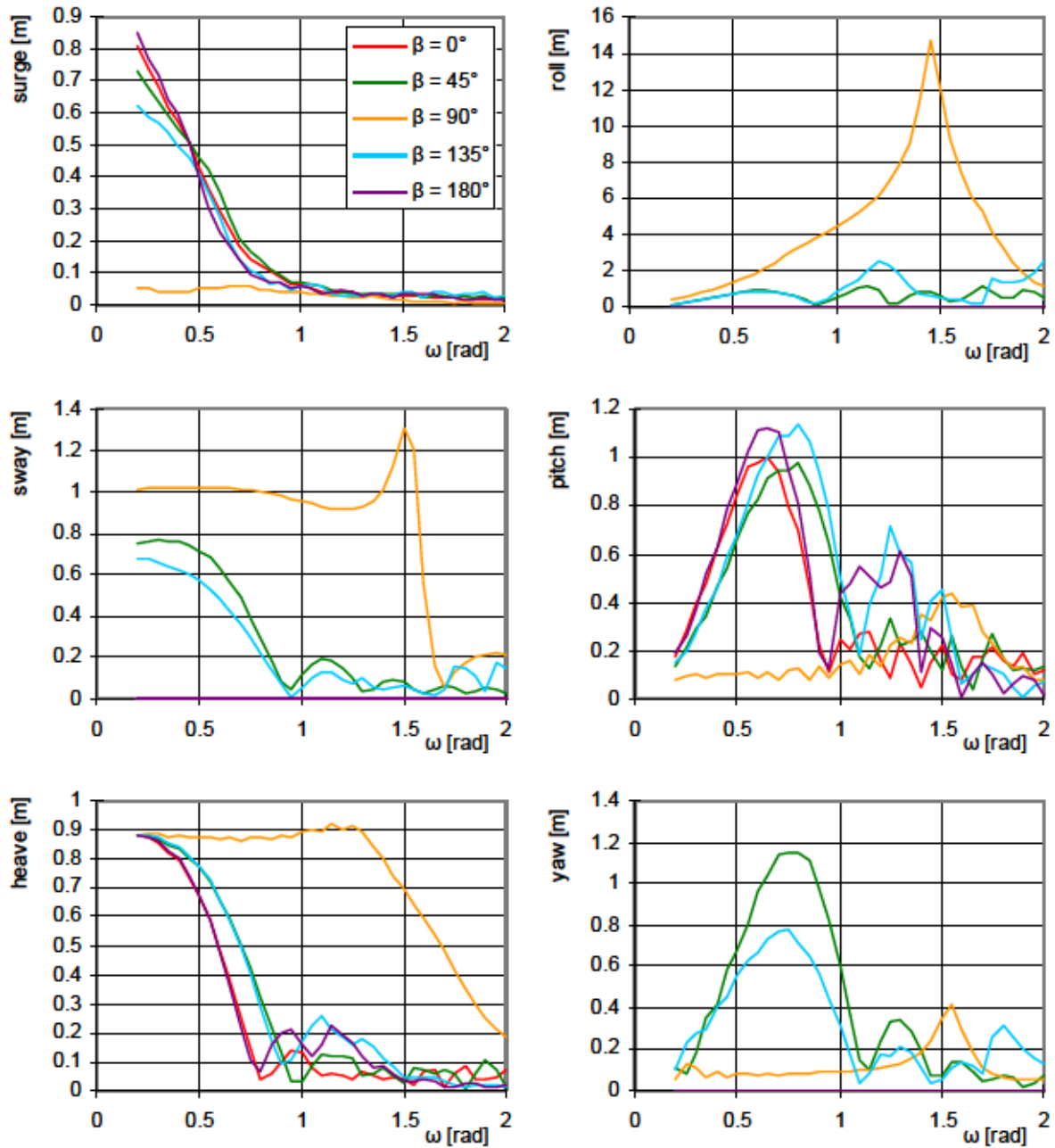


Abb. 97 Übertragungsfunktionen für den Semikatamaran-See bei einer Verdrängung von 1565 m³ und einer Geschwindigkeit von 2,8 m/s.

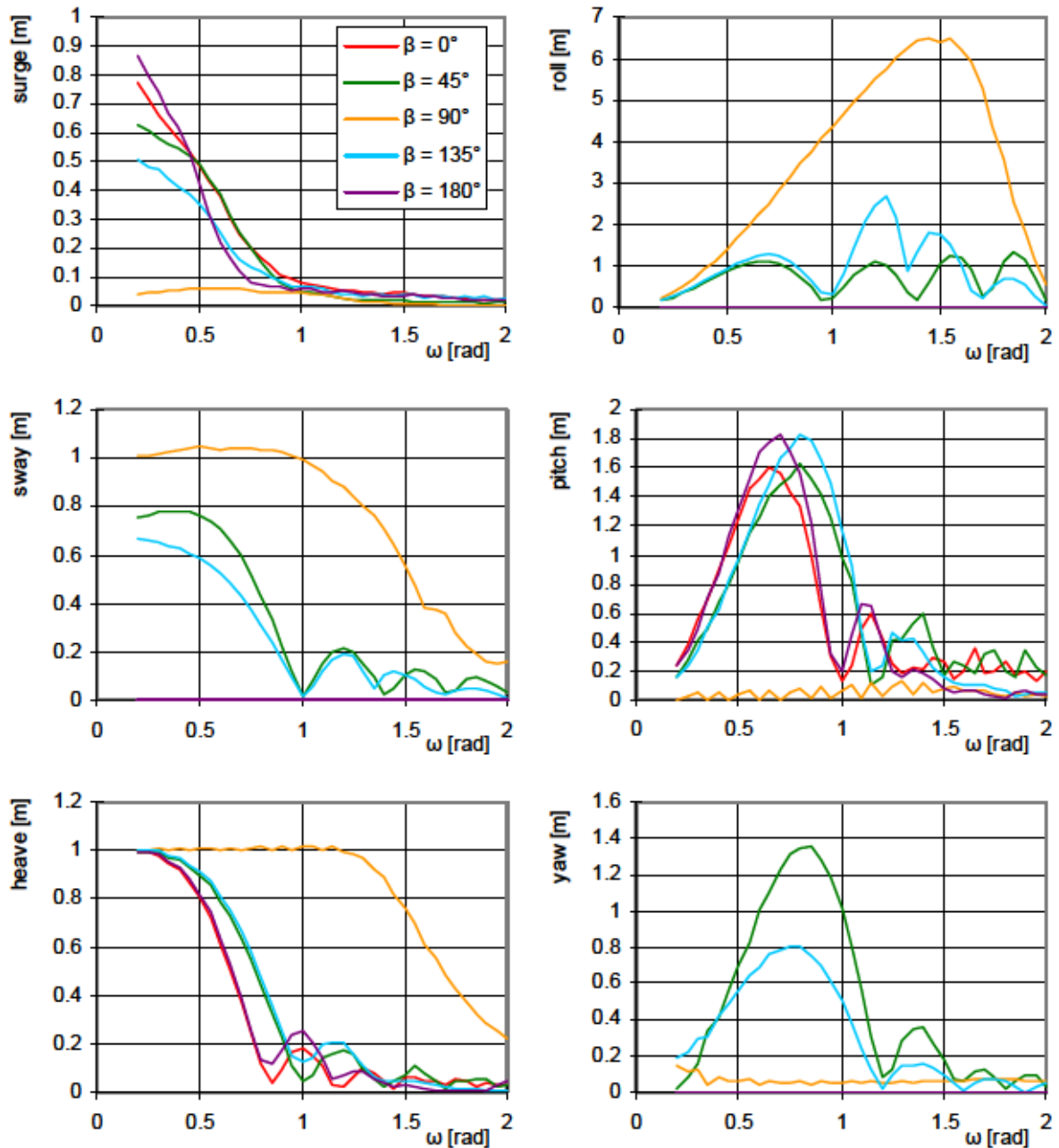


Abb. 98 Übertragungsfunktionen für ein vergleichbares Küstenmotorschiff bei einer Verdrängung von 1565 m^3 und einer Geschwindigkeit von $2,8 \text{ m/s}$.