



Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
Förderkennzeichen 03SX354B

**Verbundvorhaben BinGas – Entwicklung von
Technologien zum LNG-Transport mit
Binnenschiffen: Tank-Antrieb-Schiff**

Teilvorhaben BinGas.Hydro – Logistische und hydrodynamische
Untersuchungen für den LNG-Transport mit Binnenschiffen

Bericht 2199 - Januar 2017

von
Dipl.-Ing. B. Friedhoff
M.Sc. F. Dahlke
Dipl.-Ing. W. Förster
Dipl.-Ing. T. Guesnet
Dipl.-Math. R. Kaiser
Dipl.-Ing. S. List

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter dem Förderkennzeichen 03SX354B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzdarstellung des Verbundvorhabens	4
1.1	Aufgabenstellung	4
1.2	Voraussetzungen für das Vorhaben	6
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	6
1.4	Stand der Technik	12
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	14
2	Rahmenbedingungen für den LNG-Transport auf Binnenwasserstraßen	15
2.1	Transportaufgabe und Logistikkonzept	15
2.2	Randbedingungen aus den Fahrtgebieten	16
2.3	Technische Rahmenbedingungen	18
3	Ermittlung von Betriebsprofilen	20
3.1	Konkretisierung der Relationen zur Bestimmung von Lastprofilen . . .	21
3.2	Vorbereitungen zur Bestimmung von Lastprofilen	24
3.3	Ergebnisse der Simulation von Lastprofilen	27
3.4	Abschätzung des Kraftstoffverbrauches	33
4	Maschinenkonzepte für LNG-betriebene Schiffe	35
5	Entwicklung von LNG-Binnentankschiffstypen	37
5.1	Entwurf	37
5.2	Spezifikation der BinGas-Tanker	42
5.3	Anpassung bestehender Schiffe	47
6	Optimierung der Rümpfe mit CFD-Methoden	53
6.1	Einleitung	53
6.2	Verfahren	54
6.3	Randbedingungen	56
6.4	Gittergenerierung	58
6.5	Definition und Beschreibung der Optimierungsroutinen	61

6.6	Untersuchungen mit verändertem Kimmradius	62
6.7	Optimierung des Typschiffs Neckar	76
6.8	Untersuchungen zur Koppelstelle am Verband	86
7	Experimentelle Untersuchung der Entwürfe	91
7.1	Modelle und Anordnungen	91
7.2	Modellversuche	94
8	Zusammenfassung und Ausblick	108
8.1	Verwendung der Zuwendung	108
8.2	Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeit	109
8.3	Voraussichtliche Nutzung und Verwertung der Ergebnisse	109
8.4	Bekannt gewordene Fortschritte bei anderen Stellen	110
8.5	Veröffentlichungen	110
	Literaturverzeichnis	111

Abbildungsverzeichnis

3.1	Schema zur Bestimmung von Lastprofilen	20
3.2	LNG-Seeterminal im Hafengebiet Rotterdam-Maasvlakte	22
3.3	Altrheinhafen bei Mannheim	23
3.4	Mögliche Anlegestelle in Stuttgart-Gaisburg	23
3.5	Hafen Kleinhüningen bei Basel	24
3.6	Inter- und extrapolierte Propulsionskurven für das Neckarschiff.	25
3.7	Definition der Segmente auf der Relation Mannheim-Gaisbug.	26
3.8	Lastprofil des Rheinschiffes von Rotterdam nach Basel	28
3.9	Lastprofil des Neckarschiffes von Rotterdam nach Basel	28
3.10	Lastprofil des Neckarschiffes von Rotterdam nach Mannheim	29
3.11	Lastprofil des Rheinschiffes von Rotterdam nach Mannheim	30
3.12	Lastprofil des Koppelverbandes von Rotterdam nach Mannheim	30
3.13	Lastprofil des Neckarschiffes von Mannheim nach Stuttgart-Gaisburg	31
3.14	Lastprofil des Neckarschiffes von Rotterdam nach Stuttgart-Gaisburg	31
3.15	Änderung des Leistungsbedarfes mit der Fahrtdauer	32
5.1	Entwurfsskizze für den Platzbedarf der LNG-Tanks – August 2015.	39
5.2	Entwurfsskizze für den Platzbedarf der LNG-Tanks – November 2015.	39
5.3	Generalplan des 105 m Neckarschiffs – Mai 2015.	40
5.4	Finaler Generalplan des 105 m Neckarschiffs.	41
5.5	3D-Modell des LNG-Tankers für den Neckar.	42
5.6	Konzepte für den Umbau	47
5.7	40 ft Tankcontainer	48
5.8	TMS Greenstream	50
5.9	Antriebslösungen für einen Umbau	51
6.1	Propellerwirkung durch Kraftscheibenmodell (KSM)	55
6.2	Ausdehnung des Lösungsgebietes	56
6.3	Schematische Darstellung des Lösungsgebietes (Zweischrauber)	57
6.4	Tetraedergitter gesamtes Lösungsgebiet (Zweischrauber)	59

6.5	Hexaedergitter gesamtes Lösungsgebiet (Zweischrauber)	60
6.6	Hybridgitter (Zweischrauber)	60
6.7	Seitenansicht über Alles - Varianten Rheintanker (Zweischrauber) . . .	63
6.8	Seitenansicht Heck - Varianten Rheintanker	63
6.9	Ansicht von unten Heck - Varianten Rheintanker	63
6.10	Seitenansicht Bug - Varianten Rheintanker	63
6.11	Vergleich der Spanten Variante Rhein A und B	64
6.12	Implementierte Anhänge am Zweischrauber	65
6.13	Zylinder für Kraftscheibenmodell in Düse	66
6.14	Rheintanker - Verformung der Wasseroberfläche (Rhein 1)	67
6.15	Rheintanker - Stromlinien am Hinterschiff (Rhein 1)	69
6.16	Rheintanker - Rückstrom (3D) am Hinterschiff (Rhein 1)	69
6.17	Rheintanker - Rückstrom (Ansicht Boden) am Hinterschiff (Rhein 1) . .	69
6.18	Rheintanker - Rückstrom (Ansicht Seite) am Hinterschiff (Rhein 1) . . .	70
6.19	Rheintanker - Druckbeiwerte c_p (Rhein 1)	70
6.20	Rheintanker - Druckbeiwerte c_p am Heck - 3D (Rhein 1)	70
6.21	Rheintanker - Druckbeiwerte c_p am Bug - 3D (Rhein 1)	71
6.22	Rheintanker - Verformung der Wasseroberfläche (Rhein 2)	71
6.23	Rheintanker - Druckbeiwerte c_p (Rhein 2)	72
6.24	Rheintanker - Druckbeiwerte c_p am Heck - 3D (Rhein 2)	72
6.25	Rheintanker - Druckbeiwerte c_p am Bug - 3D (Rhein 2)	72
6.26	Rheintanker - Stromlinien am Hinterschiff (Rhein 2)	72
6.27	Rheintanker - Rückstrom am Hinterschiff (Rhein 2)	73
6.28	GA Rheintanker - Verformung der Wasseroberfläche (Rhein 1)	74
6.29	GA Rheintanker - Stromlinien am Hinterschiff (Rhein 1)	74
6.30	GA Rheintanker - Rückstrom (3D) am Hinterschiff (Rhein 1)	75
6.31	GA Rheintanker - Druckbeiwerte c_p (Rhein 1)	75
6.32	GA Rheintanker - Druckbeiwerte c_p am Heck (Rhein 1)	75
6.33	GA Rheintanker - Druckbeiwerte c_p am Bug (Rhein 1)	76
6.34	Geometrie Ausgangsvariante Neckartanker	77
6.35	Variantenvergleich Neckar Geometrie Hinterschiff	77
6.36	Variantenvergleich Neckar Geometrie Hinterschiff (3D)	77
6.37	Linienriss Vergleich Ausgangsvariante Neckar A mit Variante Neckar B	78
6.38	Linienriss Vergleich Ausgangsvariante Neckar A mit Variante Neckar C	78
6.39	Linienriss Vergleich Ausgangsvariante Neckar A mit Variante Neckar D	78
6.40	Anhänge Neckarschiff	80
6.41	Druckverteilung am Bug Ausgangsvariante Neckar A (Neckar 1)	80

6.42	Rückstromgebiete der Neckarschiffsvarianten (Neckar 1)	81
6.43	Vektoren in Rumpfnähe - Neckarschiffsvarianten (Neckar 1)	82
6.44	Druck am Hinterschiff - Neckarschiffsvarianten (Neckar 1)	82
6.45	Druckbeiwerte c_P Neckar A und Neckar D (Neckar 2)	83
6.46	Stromlinien Neckar A und Neckar D (Neckar 2)	84
6.47	Druckbeiwerte c_P Neckar A und Neckar D (Neckar 2)	84
6.48	Wellenbild Neckar A und Neckar D (Neckar 3)	84
6.49	Druckbeiwerte c_P Neckar A und Neckar D (Neckar 3)	85
6.50	Stromlinien Neckar A und Neckar D (Neckar 3)	85
6.51	Rückstromgebiete Neckar A und Neckar D (Neckar 3)	85
6.52	Seitenansicht der Verbände	86
6.53	Geometrie Koppelstelle	87
6.54	Wellenbild Verband mit/ohne Koppelstelle	87
6.55	Rückstromgebiete an den Koppelstellen	87
6.56	Druckbeiwerte c_P an den Koppelstellen	88
6.57	Stromlinien Ebene 1 an den Koppelstellen	88
6.58	Stromlinien Ebene 2 an den Koppelstellen	89
6.59	Stromlinien Ebene 3 an den Koppelstellen	89
7.1	Fotonetz Modell Neckarschiff	92
7.2	Fotonetz Modell Rheinschiff	92
7.3	Propeller, Düse und Ruder Neckarschiff M2041.	93
7.4	Propeller, Düse und Ruder Rheinschiff M2030D	93
7.5	Anordnungszeichnung Modell Neckarschiff	93
7.6	Anordnungszeichnung Modell Rheinschiff	94
7.7	Seitenansicht des Freifahrt-Gerätes	98
7.8	Freifahrt diagramm Propeller 189L in Düse D356	99
7.9	Freifahrt diagramm Propeller P189R in Düse D356	100
7.10	Freifahrt diagramm Propeller P259R in Düse D342	101
7.11	M2030 Vorschiff	103
7.12	M2030D Zweischauber	103
7.13	Modell 2041 Einschrauber	103
7.14	Koppelverband ohne und mit Füllstück	103
7.15	Leistungsbedarf Rheinschiff leer und beladen	104
7.16	Leistungsbedarf Neckarschiff leer und beladen	104
7.17	Leistungsbedarf Koppelverband	105
7.18	Stoppen gemäß RheinSchUO	106

Tabellenverzeichnis

3.1	Relationen zur Bestimmung von Lastprofilen	21
3.2	Länge der Relationen	22
3.3	Kraftstoffverbrauch und Transportleistung von Rotterdam nach Basel	33
3.4	Kraftstoffverbrauch von Rotterdam nach Stuttgart-Gaisburg	33
5.1	Hauptdaten der LNG-Binnentanker	43
5.2	Typische Spezifikationen von LNG-Containern	49
6.1	Einsatzszenarien Neckar	61
6.2	Einsatzszenarien Rhein	61
6.3	Hauptparameter der Rheinschiffe	64
6.4	Vorgaben numerischer Propulsionspunkt	66
6.5	Beiwerte und Koeffizienten	67
6.6	Vergleich der Widerstände der Rheinschiffe	73
6.7	Hauptparameter Neckarschiffe	76
6.8	Vorgaben numerischer Propulsionspunkt Neckarschiff	79
6.9	Vergleich der Widerstände der Neckarschiffe (Neckar 1)	83
6.10	Vergleich der Widerstände Koppelverband	89
7.1	Modellvarianten	91
7.2	Versuchsmatrix Widerstandsversuche	95
7.3	Versuchsmatrix Propulsionsversuche	96
7.4	Versuchsmatrix Stoppversuche	96
7.5	Messgrößen im Widerstandsversuch	97
7.6	Propellerfreifahrt Propeller P189L in Düse D356	99
7.7	Propellerfreifahrt Propeller P189R in Düse D356	100
7.8	Propellerfreifahrt Propeller P259R in Düse D342	101
7.9	Messgrößen im Propulsionsversuch	102
7.10	Versuchsmatrix der Stoppversuche	106

Symbolverzeichnis

Symbol	Beschreibung	Dimension
Lateinische Symbole		
A	Wellenamplitude	m
B	Schiffsbreite	m
C_B	Blockkoeffizient	-
C_M	Hauptspantkoeffizient	-
D	Propellerdurchmesser	m
f	Wellenfrequenz	Hz
Fr	Froudezahl	-
Fr_h	Tiefenfroudezahl	-
g	Erdbeschleunigung	m s^{-2}
h	Wassertiefe	m
H	Wellenhöhe	m
J	Fortschrittsgrad	-
L	Schiffslänge	m
n	Drehzahl	s^{-1}
P_E	Schleppleistung	W
P_D	Drehleistung	W
Q	Drehmoment	N m
r	Radius	m
R_T	Gesamtwiderstand	N
Re	Reynoldszahl	-
T	Schub	N
T	Tiefgang	m
V	Geschwindigkeit	m s^{-1}
V_M	Modellgeschwindigkeit	m s^{-1}
V_S	Schiffsgeschwindigkeit	m s^{-1}
x	Kartesische Koordinate (Länge)	m

y	Kartesische Koordinate (Breite)	m
z	Kartesische Koordinate (Höhe)	m

Griechische Symbole

η_D	Propulsionsgütegrad	-
η_H	Schiffseinflussgrad	-
η_R	Gütegrad der Anordnung	-
Θ	Trimm	°
λ	Maßstabsfaktor	-
ν	Kinematische Viskosität	m ² /s
ρ	Dichte	kg/m ³
ω	Kreisfrequenz	rad/s

Indizes

M	Modell
pp	zwischen den Loten
$\ddot{u}A$	über Alles
$Prop$	Propeller
S	Schiff
s	signifikant
K	Kimm

Abkürzungen

CFD	Computational Fluid Dynamic
DST	Development Centre for Ship Technology and Transport Systems
FVM	Finite-Volumen-Methode
GGI	General Grid Interface
HPC	High performance computing
KSM	Kraftscheibenmodell
RANSE	Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations
VOF	Volume-of-Fluid

1 Kurzdarstellung des Verbundvorhabens

1.1 Aufgabenstellung

Bei der angestrebten Emissionsreduktion zur Verzögerung des Klimawandels liegen große Hoffnungen auf dem verstärkten Einsatz von Liquefied Natural Gas (LNG) als Treibstoff für den Verkehrssektor. Der Ausstoß von Feinstaub, Schwefel- und Stickoxiden sowie Kohlendioxid durch LNG-Motoren ist deutlich geringer als bei herkömmlichen Kraftstoffen [6]. So kann LNG nicht nur zur Erreichung der globalen Klimaziele, sondern auch zur lokalen und regionalen Luftreinhaltung und damit einer Verringerung der Verkehrsbelastung für Menschen und Umwelt beitragen. Laut der Europäischen Umweltagentur (EEA - European Environment Agency) starben im Jahr 2013 ca. 555.000 Menschen allein in Europa in Folge von Luftverschmutzung durch Feinstaub (PM_{2,5}), Stickstoffdioxid (NO₂) und Ozon (O₃) [4].

Zukünftige Gasmotoren werden die strengen Emissionsgrenzwerte nach der ab dem 01. Januar 2020 (bzw. bei einer Motorleistung von weniger als 300 kW ab 2019) für neu inverkehrgebrachte Motoren geltenden EU-Regulation für Non-Road Mobile Machinery (NRMM) auch ohne aufwändige Abgasnachbehandlung erreichen. So kann die Wirtschaftlichkeit im Vergleich zu Dieselmotoren zusätzlich zu den reinen Brennstoffkosten attraktiver werden.

Der Nutzung von Erdgas als Kraftstoff in mobilen Anwendungen stehen der höhere Aufwand für die Lagerung und das benötigte Tankvolumen entgegen. Eine günstige Ausnutzung des Tankvolumens erfolgt im tiefkalten Zustand als LNG oder hochverdichtet als Compressed Natural Gas (CNG). Werden diese Gaszustände aus gasförmigem Erdgas aus dem Pipelinennetz aufbereitet, erfordert dies einen erheblichen Energieaufwand. Somit ist es wirtschaftlich und ökologisch sinnvoll, Erdgas von den Terminals in flüssiger Form ins Hinterland zu transportieren. Spezielle Technik vorausgesetzt, kann LNG effizient umgeschlagen, in Tanks gelagert oder per Lkw, Bahn oder Binnenschiff transportiert werden. Der herkömmliche Weg des LNG führt per

speziellem LNG-Seeschiff zu den Seeterminals, wo eine Regasifizierung und Einspeisung in das Pipelinenetz erfolgt. Eine Lieferung von LNG ins Binnenland erfolgt in kleinen Mengen per Lkw oder Bahn. Für den Transport größerer LNG-Mengen bietet sich in erster Linie das Binnenschiff an. Das LNG kann dabei ohne Änderung des Aggregatzustands verladen und ins Hinterland transportiert werden. In der Küstenschifffahrt erfolgt in manchen Regionen bereits eine Unterverteilung entlang der Küsten mit kleinen Tankschiffen. Bisher existieren jedoch keine LNG-Binnen-Tankschiffe.

Mit der zunehmenden Nutzung von LNG als Kraftstoff ist jedoch mit einem wachsenden Bedarf im Binnenland zu rechnen. Zusätzlich wird eine Gasversorgung ohne Abhängigkeit von Gasimporten per Pipeline angestrebt. Spitzenlasten im Gasverbrauch werden bereits heute durch LNG-Pufferspeicher abgefangen, die durch aufwändige Rückverflüssigung aus dem Pipelinenetz gespeist werden. Beispielsweise kann der unterirdische Flüssiggas-Speicher von ENBW in Stuttgart Gaisburg mit einem Fassungsvermögen von 12.600 Tonnen LNG auch per Binnenschiff über den Neckar versorgt werden.

Die Einführung von Binnen-Tankschiffen für LNG setzt eine umfangreiche wissenschaftliche Untersuchung zahlreicher Aspekte voraus. Diese reichen von der Analyse des Bedarfs, über sicherheitstechnische und rechtliche Rahmenbedingungen, über den Entwurf und Betrieb der Schiffe bis hin zu wirtschaftlichen Betrachtungen. Diese Aufgaben wurden im Verbundvorhaben BinGas unter Koordination des Instituts für Schiffstechnik, Meerestechnik und Transportsysteme der Universität Duisburg-Essen gemeinsam mit der Triton Werft Jacobs Formstahl GmbH, der Klassifikationsgesellschaft DNV GL und dem Motorenhersteller MTU bearbeitet. Im Teilvorhaben BinGas.Hydro wurden am DST exemplarisch verschiedene Binnenschiffe für den LNG-Transport und die gleichzeitige Nutzung von LNG als Treibstoff entworfen. Die geringe Dichte der Ladung erlaubt trotz der relativ aufwändigen Anlagentechnik eine hydrodynamische Optimierung der Schiffslinien. Das Schiffskonzept nutzt Teile seiner Ladung und bevorzugt das Boil-Off Gas als Treibstoff. Der Energiebedarf wurde für exemplarische Relationen mit aufwändigen Simulationen ermittelt, so dass die Partner die Anlagentechnik aus Tank, Motor und Gasanlage entsprechend auslegen konnten.

1.2 Voraussetzungen für das Vorhaben

In der Seeschifffahrt wird bereits seit den 60er Jahren des letzten Jahrhunderts LNG transportiert. Für den Transport von Erdgas von den Förderstätten bzw. zugehörigen landseitigen Aufbereitungsanlagen beispielsweise in den Fernen Osten wären die Kosten per Pipeline wesentlich höher. So liegen hier umfangreiche Erfahrungen mit dem LNG-Transport auf See und klare Vorschriften für Seeschiffe vor. LNG wird zunehmend häufig auch als Treibstoff genutzt. Diese Nutzung war zunächst weitgehend auf Flüssiggastanker beschränkt, wird aber mittlerweile auch mehr und mehr für andere Schiffe eingesetzt. Das DST war beispielsweise im Rahmen des Verbundvorhabens „Maritime Technologien und Innovationen – Modellregion Deutschland/Niederlande (MariTIM)“ an der hydrodynamischen Optimierung der Fähre „Ostfriesland“ beteiligt, die seit 2015 nach umfangreichen Umbaumaßnahmen mit LNG fährt.

In der Binnenschifffahrt fehlen bis heute die Erfahrungen und klaren rechtlichen Rahmenbedingungen. So wurde beispielsweise die LNG-Hybrid-Barge „Hummel“, die im Hamburger Hafen eine netzunabhängige Stromversorgung des Kreuzfahrtschiffes „Aidasol“ bietet und im Winterbetrieb als Blockheizkraftwerk am Erdgasnetz arbeitet, aufgrund der unklaren bzw. fehlenden Vorschriften für Binnenschiffe als Seeschiff bemessen und zugelassen. Auf dem Rhein und seinen Nebenwasserstraßen verkehren mittlerweile einzelne Schiffe mit Ausnahmegenehmigung für die Nutzung von LNG als Treibstoff. Eine umfassende Beschreibung zulassungsfähiger Konzepte für Transport und Nutzung von LNG als Treibstoff wird zwar derzeit entwickelt, ist aber noch lange nicht abgeschlossen. Weitere Informationen dazu findet man in diesem Bericht in Kapitel 1.4 auf Seite 12 beziehungsweise im Abschlussbericht des Verbundkoordinators UDE.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Verbundvorhaben wurde in fünf Teilprojekten bei den geförderten Forschungsstellen bearbeitet. Für das Teilprojekt 1 BinGas.Bau war der Partner Neue Triton Werft GmbH (bzw. nach deren Insolvenz für die Dokumentation die Triton Werft Jacobs Formstahl GmbH) verantwortlich, das Teilprojekt 2 BinGas.Technik bearbeitete als koordinierender Partner das Institut für Schiffstechnik, Meerestechnik und Transportsysteme der Universität Duisburg-Essen, das Teilprojekt 3 BinGas.Hydro

bildet den Kern dieses Abschlussberichts und wurde am DST durchgeführt, Bin-Gas.Power wurde als Teilprojekt 4 bei der MTU Friedrichshafen GmbH und Bin-Gas.Sicherheit als Teilprojekt 5 bei DNV GL bearbeitet. Strukturiert war das stark zwischen den Partnern vernetzte Vorhaben durch sieben Arbeitspakete:

1. AP1 Rahmenbedingungen für den Transport von LNG auf Binnenwasserstraßen
2. AP2 Optimierung von Tanksystemen für den Einsatz in der Binnenschifffahrt
3. AP3 Maschinenkonzepte für LNG-betriebene Schiffe
4. AP4 Entwicklung von LNG-Binnentankschiffstypen
5. AP5 Sicherheitstechnische Bewertung
6. AP6 Entwicklung von Fertigungsverfahren für LNG-Binnentankschiffe
7. AP7 Ausarbeitung von Empfehlungen und Richtlinien

Je nach Bedarf wurden auch laufend die assoziierten Partner aus Industrie und Verwaltung einbezogen.

Das DST war vorrangig in den Arbeitspaketen 1, 3 und 4 beteiligt. Im Teilvorhaben BinGas.Hydro lag der Fokus zunächst auf der Definition repräsentativer Einsatzszenarien, für welche die Entwürfe ausgelegt werden sollten. Nach der Abstimmung mit den Projektpartnern über Transport-Relationen zu den identifizierten Bedarfsträgern in Stuttgart-Gaisburg, Mannheim und Basel wurden die schiffstechnischen und nautischen Randbedingungen auf den einzelnen Routenabschnitten betrachtet. Für den Neckar wurden zusätzliche hydrologische Daten zu Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten beschafft. Eine vorhandene Simulationsumgebung für den Schiffsbetrieb wurde erweitert und angepasst, um erste Annahmen für den Schiffsbetrieb zu erhalten. Darauf basierend wurde mit dem iterativen Entwurfsprozess von drei Tankschiff-Einheiten begonnen. Sobald die Eckdaten des Tanksystems bekannt waren, wurden die Entwürfe gestützt durch CFD-Simulationen optimiert und experimentell validiert. Die präzisierten Propulsions-Kennlinien aus dem Modellversuch kamen wiederum in der finalen Simulation des Betriebs und für eine Abschätzung der Wirtschaftlichkeit zum Einsatz. Im Folgenden werden nun die Arbeitspakete, an denen das DST beteiligt war, näher beschrieben.

AP 1: Rahmenbedingungen für den Transport von LNG auf Binnenwasserstraßen

Auf der Grundlage einer detaillierten Analyse der LNG-Transportkette wurden in diesem Arbeitspaket zunächst die logistischen und technischen Rahmenbedingungen zusammengetragen. Hieraus ließen sich dann die wichtigsten Transportrelationen auf Binnenwasserstraßen und günstige Schiffsabmessungen ableiten. Im Anschluss daran wurden iterativ mit dem jeweils verfügbaren Detaillierungsgrad der verknüpften Arbeitspakete die Lastprofile erarbeitet, die für das LNG-Management wichtig sind.

AP 1.1: Technische und logistische Rahmenbedingungen Zur Bestimmung der technischen Rahmenbedingungen wurden die bereits vorhandenen oder kurzfristig verfügbaren Technologien zur Handhabung und Verarbeitung von LNG zusammengestellt. Dies betraf vor allem den Transport, die Lagerung, die Umwandlung des Aggregatzustandes sowie die Nutzung für den Schiffsantrieb. Die Erhebung beschränkte sich nicht nur auf den Bereich Schiffstechnik, sondern es wurden auch andere Technologiebereiche, in denen LNG verwendet wird, berücksichtigt. Dazu gehören beispielsweise Erkenntnisse aus dem bereits seit langem realisierten LNG-Transport durch Lkw, Züge und Seeschiffe. Durch die Identifikation bereits verfügbarer Techniken und deren Schnittstellen konnten partiell unnötige Neuentwicklungen vermieden werden. Gleichzeitig wurden die technischen Randbedingungen aus dem Bereich der Schiffs- und Schiffsbetriebstechnik zusammengestellt, die bei der Entwicklung für den LNG-Transport auf Binnenwasserstraßen zu berücksichtigen sind. Hierzu zählen die Schnittstellen zu den Umschlaganlagen in den Häfen. Für fest installierte Tanks werden kältefähige Pumpen, isolierte und/oder druckfeste Rohrleitungen und normierte Kupplungen benötigt. Hier sollte möglichst auf Normteile zurückgegriffen werden. Modulare Tanks werden gekrant, daher müssen Schnittstellen so ausgelegt werden, dass sie an Bord, auf den Transportfahrzeugen und beim Endabnehmer leicht getrennt und verbunden werden können. Auch hier sollten möglichst nur Normteile zur Verwendung kommen. Zur Bestimmung der logistischen Rahmenbedingungen wurden alle Glieder der Transportkette (Lieferanten, Verlader, Transporteure und Kunden) zusammengestellt. Zu den Rahmenbedingungen gehörten zunächst Zeit-, Wege- und Kostenvorgaben, aber auch Personalaufwand und -qualifizierung sowie Lade-/Lösch- und Lagerkapazitäten. Gerade bei Tiefsttemperaturtransport spielt der Energieaufwand für die Kühlung wiederum im Zusammenspiel mit der Zeit eine große Rolle. Das Ergebnis dieses Arbeitspakets ist die Zusammenstellung

aller Rahmenbedingungen für die weiteren Entwicklungen in diesem Projekt. Sie waren direkte Voraussetzung für das **AP 1.2** und flossen in Folge auch in viele weitere Arbeitspakete ein.

AP 1.2: Ermittlung von Transportrelationen und Schiffsabmessungen Die Bestimmung marktrelevanter Transportrelationen war entscheidend für die Auslegung der benötigten Schiffe und Hafenskapazitäten und letztendlich auch zur Berechnung der Wirtschaftlichkeit. Die potenziellen LNG-Quellen (Terminals in Seehäfen, Pipelines), LNG-Kunden und die zu transportierenden Mengen wurden ermittelt. Einhergehend mit den vorangestellten Aspekten ergaben sich die Transportrouten. Damit verknüpft sind die Informationen zu den Binnenwasserstraßen (Wasserstand, Ausfalltage usw.). Die Hauptabmessungen wurden neben den Anforderungen aus der Transportaufgabe durch das engste Gewässer beziehungsweise die Abmessungen von Schleusenkammern und Brückenhöhen begrenzt. Die Manövrierfähigkeit musste den zu befahrenden Wasserstraßen und Häfen angepasst sein. Weiterhin gibt es wirtschaftliche und technische Grenzen, die die Schiffsgröße sowohl nach unten als auch nach oben begrenzen. Einfluss auf die Hauptabmessungen haben auch die speziellen LNG-Tanks und die Antriebsanlage. Diese und weitere Randbedingungen dienten als Grundlage für den späteren Schiffsentwurf in **AP 4.1**. Das Ergebnis dieses Arbeitspakets ist eine Zusammenstellung der marktrelevanten Transportrelationen für den LNG-Transport. Diese dienten in der weiteren Projektbearbeitung als Referenz, um marktorientierte Schiffs- und Transportsysteme zu entwickeln.

AP 1.3: Erstellen von Lastprofilen Für die Erarbeitung des Antriebskonzepts sind die geforderten Lastprofile entscheidend. Gerade durch die Tatsache, dass LNG nicht wirtschaftlich an beliebigem Ort gebunkert werden kann, wird ein durchdachtes LNG-Management erforderlich, das zusammen mit einer Routenplanung den LNG-Verbrauch prognostizieren kann. Dies muss mit der Boil-Off Rate, die durch die gewählte Tankart beeinflusst wird, gekoppelt werden. Auch Hybrid-Antriebe (Diesel + LNG) wurden durch den Projektpartner untersucht. Die Lastprofile werden für die vorher ermittelten Transportrelationen unter Verwendung von prognostizierten Leistungsdaten für die projektierten Schiffsgrößen erstellt.

AP 3: Maschinenkonzepte für LNG-betriebene Schiffe Der Transport von LNG mit Binnenschiffen legt auch die Nutzung von LNG als Treibstoff im Schiffsbetrieb

nahe. In enger Zusammenarbeit mit der MTU Friedrichshafen wurden in diesem Arbeitspaket Methoden zur Nutzung von LNG für die Hauptmaschinen und auch für Hilfsaggregate entwickelt. Die Ergebnisse des **AP1** wurden hier einbezogen.

AP 3.6: Systemintegration in den Schiffsbetrieb Ein besonders wichtiger Punkt beim Betrieb der neu entwickelten Schiffe ist das LNG-Management. Dies ist kritisch, da – zumindest kurz- bis mittelfristig – LNG als Treibstoff nicht ohne Weiteres gebunkert werden kann. Die Vorräte und Verbräuche müssen deshalb sehr sorgfältig geplant werden, zumal LNG nur begrenzt lagerfähig ist. In diesem Arbeitspaket wurden deshalb Konzepte zur Routenplanung entwickelt, die die LNG-Bevorratung mit einbeziehen und sicherstellen können, dass das Schiff seine Transportaufgabe (möglichst großer Ladungstransport) erfüllt und gleichzeitig einsatzfähig bleibt (ausreichende Treibstoffreserve). Beantwortet werden musste auch die Frage, wie auf ungeplante Fahrtunterbrechungen (Sperrung von Wasserstraßen, Havarien, Werftfliegezeiten o. ä.) zu reagieren ist. Dies ist vor allem eine Herausforderung, wenn ein reiner LNG-Antrieb vorgesehen wird. Die in diesem Arbeitspaket erarbeiteten Konzepte zum LNG-Management flossen teilweise in das **AP 4.2** ein und sind vor allem als Teil des Gesamtprojektergebnisses für den späteren Betreiber von Bedeutung.

AP 4: Entwicklung von LNG-Binnentankschiffstypen Aus hydrodynamischer Sicht kann LNG grundsätzlich mit allen bekannten Schiffstypen transportiert werden, sofern diese mit entsprechenden Ladungstanks, Kühlanlagen und Lade- sowie Löscheinrichtungen ausgerüstet sind. Allerdings hat LNG eine geringere Dichte ($450...480 \text{ kg/m}^3$) als alle andere flüssige Ladung, so dass hierfür effizientere Schiffsentwürfe möglich werden.

AP 4.1: Hydrodynamik Es wurden speziell für den LNG-Transport angepasste Rumpfformen entwickelt. Hierbei wurden zunächst folgende Ansätze entworfen und geprüft. Aufgrund der geringen Dichte der Ladung kann bei gleichem Ladungsvolumen die Verdrängung verringert und damit ein schlanker Rumpf mit geringerem Leistungsbedarf entworfen werden. Auf der anderen Seite kann, sofern das konstruktiv möglich ist, das Ladungsvolumen bei gleicher Verdrängung vergrößert werden. Bei Membrantanks kann die Tankgeometrie an die Rumpfform angepasst werden, sofern diese schlanker wird. Bei runden Drucktanks kann zumindest der Kimmradius vergrößert werden. Bei konstanter Völligkeit könnte der Tiefgang verringert werden. Dann wäre

der Transport auch bei geringeren Wasserständen möglich. Jedoch ist stets die Durchfahrthöhe an Brücken auf den zu befahrenden Gewässern zu beachten. Bei Tank-Containern unterscheidet sich der Entwurf von konventionellen Containerschiffen in der Ladungsverteilung. Während bei Containerschiffen sowohl volle als auch leere Container gleichzeitig gefahren werden, ist hier zu erwarten, dass nur volle LNG-Container zum Kunden hin und nur leere LNG-Container vom Kunden zurück transportiert werden. Dies verändert die Zuladung und Stabilitätsanforderungen. Das letztendlich gewählte Antriebskonzept kann auch zu einem Neuentwurf des Maschinenraums führen und damit zu einer Umgestaltung des Hinterschiffs. Auch können die erarbeiteten Sicherheitsanforderungen zu höheren Anforderungen an die Manövrierbarkeit führen, sodass auch diese Aspekte bei der Gestaltung der Manövrierorgane am Hinterschiff berücksichtigt werden müssen. Beim Entwurf ist besonders die Eignung für die Fahrt im flachen Wasser zu berücksichtigen. Da die Lagerung von LNG sehr aufwändig ist, ist anzustreben, die Lagerkapazitäten klein zu halten, was bedingt, dass die LNG-Tanker mit möglichst wenigen Ausfalltagen verkehren. Sie müssen also auch während Trockenperioden bei niedrigen Wasserständen fahren können sowie bei hohen Wasserständen die Brücken passieren können. Konkret wurden unter Berücksichtigung aller Randbedingungen aus den vorher abgeschlossenen Arbeitspaketen zwei verschiedene Schiffe entworfen. Zur Optimierung der Entwürfe kamen moderne RANSE-Verfahren zum Einsatz. Der Schwerpunkt der Entwicklung lag aufgrund der relativ schlanken Rumpfformen weniger im Bereich des Vorschiffs, sondern im Hinterschiff. Die abschließende Untersuchung der durch die numerischen Verfahren optimierten Rumpfformen erfolgte im Modellversuch. Die Versuche wurden sowohl bei mäßiger Wassertiefe (4 m) als auch in flachem Wasser (2,8 m) und jeweils für Einzelfahrer als auch für Koppelverbände durchgeführt. Das Ergebnis dieses Arbeitspakets sind zwei Schiffsentwürfe für LNG-Tankschiffe und ein entsprechender Leichter. Der Entwurf erfolgte interaktiv mit der Konstruktion in **AP 4.2**.

AP 4.2: Konstruktion Die Konstruktion des Schiffskörpers musste die Formgebung des Rumpfes wie auch die Gestaltung der Ladungstanks berücksichtigen. Passend zu den zwei Entwürfen wurden zwei Basiskonstruktionen erstellt. Es wurden dabei alle in den vorher behandelten Arbeitspaketen ermittelten Randbedingungen (Rumpfform, Tanks und Tankversorgungssysteme, Antriebs- und Hilfsmaschinen, Lade-/Löscheinrichtungen usw.) berücksichtigt. Dies sind kei-

ne Fertigungskonstruktionen und nicht ausreichend detailliert, um auf einer Werft direkt umgesetzt werden zu können. Sie belegen aber durch den Nachweis der Festigkeit der Schiffsstruktur die Realisierbarkeit des Schiffskonzepts. Jede Konstruktion beschreibt den Hauptspant und die Längsverbände. Sie ist genau genug, um das Schiffsleergewicht zu bestimmen. Außerdem kann sie als Vorlage für eine spätere Realisierung dienen. Das Ergebnis dieses Arbeitspakets sind Stahlkonstruktionen für die im **AP 4.1** entworfenen Schiffe und Leichter. Im DST wurde die Konstruktion nur soweit ausgearbeitet, wie sie für den Entwurf (Gewichtsrechnung) nötig ist.

AP 4.3: Anpassung bestehender Schiffe Wenngleich vorhandene Schiffsrümpfe nicht optimal für den Transport von LNG geeignet sind, kann es doch wirtschaftlicher sein, ein vorhandenes Binnengüterschiff für den LNG-Transport umzurüsten. Die Festigkeit der vorhandenen Schiffsstruktur erscheint dabei im Vorhinein aufgrund der geringen Dichte der Ladung als nicht kritisch. Weiterhin wird geprüft, ob sich die neue Antriebsanlage in den vorhandenen Maschinenraum einbauen lässt, bzw. ob sich die vorhandenen Antriebs- und Hilfsmaschinen entsprechend umbauen lassen. Bei Tankcontainern wurde als Ausgangsbasis ein vorhandenes Binnencontainerschiff gewählt. Im Gegensatz zu konventionellen Containern musste hier berücksichtigt werden, dass LNG-Container entweder alle voll oder leer sind. Die Verdrängung, die Stabilität und die Festigkeit der Schiffsstruktur mussten diesbezüglich geprüft werden. Die evtl. erforderlichen Versorgungssysteme der LNG-Container (elektrische Versorgung, Kühlung) mussten dabei berücksichtigt werden. Das Ergebnis dieses Arbeitspakets ist eine wirtschaftliche Abschätzung, unter welchen Bedingungen sich die Umrüstung bestehender Schiffe lohnt.

1.4 Stand der Technik

Verkehrstechnische Aspekte

Seit den 1960er Jahren wird LNG mit Seeschiffen transportiert. Es gibt verschiedene Angaben zur Rentabilität: Foss (2007) nennt eine Grenze von ca. 1200 km Seeweg ab der der LNG-Transport günstiger ist als der Gastransport in der Pipeline. Die Datenbasis Landolt/Börnstein gibt eine Grenzentfernung von 2000 km auf dem Seeweg und 4000 km auf dem Landweg an, ab der der Transport in verflüssigter Form

(LNG) wirtschaftlicher ist als in Gasform. Der transkontinentale Transport von Erdgas wird also weiterhin in Form von LNG stattfinden. Die dafür benötigten Schiffe und Lade-/Löschanlagen in den Häfen sind vorhanden. Zumindest im europäischen Raum findet bisher kein Weitertransport des in den Seehäfen angelandeten LNG auf Binnenwasserstraßen statt. Dementsprechend sind keine erprobten Techniken und Verfahren zur Handhabung von LNG auf Binnenschiffen und in Binnenhäfen vorhanden. Es bietet sich aber an, entsprechende Erfahrung und Fachwissen aus dem Bereich des Seetransports zu übernehmen. Hier gibt es z. B. genormte und zertifizierte Pumpenanschlüsse, wartungsfreie Pumpen und Rohrleitungssysteme zum Umschlag von LNG. Eine Anzahl von Zulieferern bietet inzwischen auch die Ausrüstung von Binnenschiffen an. Hinsichtlich des Aggregatzustands und der Betriebsbedingungen, wie Temperatur und Druck, muss eine durchgehende Transportkette erst noch entwickelt werden. Wobei zum Beispiel der LNG-Speicher in Stuttgart-Gaisburg gegenüber dem angelieferten Gaszustand relativ tolerant ist. Um eine optimale Volumenreduzierung durch Verflüssigung zu gewährleisten, wird im Seeverkehr LNG durch Kühlung bei etwa -162°C und Normaldruck transportiert. Alternativ kann LNG auch bei höheren Temperaturen und erhöhtem Druck transportiert werden. Hierbei müssen die Lieferbedingungen, evtl. Zwischenlager im Hafen und beim Transporteur, lokale Weiterverteilung mit Lkw und die Abnahmebedingungen beim Endverbraucher berücksichtigt und in Einklang gebracht werden.

Schiffstechnische Aspekte Nach der ARGONON, die im Jahre 2010 in Dienst gestellt wurde [13], gingen weitere LNG-getriebene Binnenschiffe in Fahrt. Die Chemikali-entankschiffe GREENSTREAM und GREENRHINE werden gas-elektrisch betrieben [23]. Das Schubschiff EIGER mit dem Leichter NORDWAND ist ein Umbau [5], der nun mit zwei Dual-Fuel Motoren betrieben wird. Der LNG-Treibstofftank ist Vakuum-isoliert. Die SIROCCO ist ein Binnengastankschiff [17], bei dem ebenfalls eine Antriebslösung mit Dual-Fuel Motoren gewählt wurde. Zudem wurden die Treibstofftanks unter Deck installiert.

Auf dem Binnenchemikali-entankschiff ECOLINER werden zwei reine Gasmotoren für den Hauptantrieb verwendet [12], die in zwei unabhängigen Maschinenräumen stehen, um ein redundantes Antriebssystem zu gewährleisten. Zudem sind Treibstofftanks und Ladungsbereich komplett voneinander getrennt.

Allen bisher in Fahrt gegangenen LNG-Binnenschiffen ist gemeinsam, dass sie das LNG nur als Treibstoff nutzen, nicht aber als Ladung transportieren. Bisher wurden zwei Entwürfe für LNG-Binnentankschiffe bekannt, zum einen die ARGOS-GL, die

einen Membrantank für LNG erhalten sollte [14] und ein Entwurf der *VEKA Gruppe*, der LNG im Drucktank transportieren kann [8].

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Verbundvorhaben wurde eng vernetzt in fünf Teilprojekten bei den entsprechenden Projektpartnern bearbeitet.

TP1: BinGas.Bau Neue Triton Werft bzw. Triton Werft Jacobs Formstahl GmbH

TP2: BinGas.Technik Institut für Schiffstechnik, Meerestechnik und Transportsysteme der Universität Duisburg-Essen

TP3: BinGas.Hydro DST

TP4: BinGas.Power MTU Friedrichshafen GmbH

TP5: BinGas.Sicherheit DNV GL

2 Rahmenbedingungen für den LNG-Transport auf Binnenwasserstraßen

Für den im Projekt angestrebten Entwurf von Typschiffen für den Transport von LNG-Binnentankschiffen, die Teile der Ladung als Treibstoff nutzen, wurde zunächst die LNG-Transport- und Nutzungskette analysiert. Nachdem aussichtsreiche Relationen für einen regelmäßigen LNG-Transport zu bereits heute existierenden Bedarfsträgern identifiziert wurden, folgte eine Betrachtung der logistischen und technischen Rahmenbedingungen. Hierauf basierend wurden dann die für die jeweiligen Wasserstraßen günstigsten Schiffsabmessungen und -konfigurationen ermittelt. Mit dem jeweils verfügbaren Detaillierungsgrad der Entwurfsspirale wurden dann im Projektablauf die Lastprofile erarbeitet, die insbesondere für das LNG-Tank- und BOG-Management grundlegend sind.

2.1 Transportaufgabe und Logistikkonzept

Das LNG-Seeterminal in Rotterdam zählt zu den bedeutendsten in Europa und ist für die Anbindung des Hinterlands über den Rhein und seine Nebenwasserstraßen nahezu ohne Alternative. Daher wurde im Projekt vorrangig der Transport von diesem Terminal aus betrachtet. Das LNG-Terminal (Gate Terminal) in Rotterdam ist in Abbildung 3.2 auf Seite 22 markiert. An diesem Terminal wird das LNG bisher sowohl verdampft und in die Pipeline eingespeist als auch auf kleinere Seeschiffe und Tankwagen geladen [11].

Als Abnehmer für LNG konnten im Rahmen des Projektes drei potentielle Stellen im Hinterland identifiziert werden:

Zum einen sind in Basel viele energieintensive Unternehmen sowie Unternehmen der chemischen Industrie ansässig, die beispielsweise synergetisch die Kälte und den Energieinhalt des LNG nutzen könnten. Auch die Erzeugung von synthetischen

Kraftstoffen im GtL-Verfahren (Gas to Liquid) wäre hier möglich. Im Rahmen des Projektes LNG Masterplan [9] wurde der Standort ebenfalls identifiziert. In Mannheim werden die LNG-getriebenen Binnenschiffe GREENRHINE und GREENSTREAM bisher vom Lkw aus bebunkert [7]. Hier wäre die Errichtung einer permanenten LNG-Bunkerstation naheliegend. Zu einem ähnlichen Ergebnis kam auch das LNG Masterplan-Projekt. Ein dritter Abnehmer von LNG ist der LNG-Spitzenlastspeicher des Energieversorgers ENBW in Stuttgart-Gaisburg. Der Speicher dient dazu, die Spitzenverbräuche in der Region im Winter abzufangen. Bisher wird dieser Speicher mittels einer Rückverflüssigungsanlage aus dem Pipelinennetz gefüllt. Der Betreiber bewertet die Befüllung per Binnenschiff jedoch als gute Alternative.

In manchen Fällen kann der Abnehmer sensibel gegenüber dem Zustand (Temperatur/Druck) des angelieferten LNG sein. Dies müsste in einem konkreten Fall berücksichtigt werden. Dies ist jedoch in der Regel kein Ausschlusskriterium für die Belieferung, sondern vielmehr eine technisch umzusetzende Nebenbedingung.

Für den Transport des LNG von Rotterdam zu den Abnahmestellen in Basel, Mannheim und Stuttgart-Gaisburg sind die Wasserstraßen Rhein und Neckar zu nutzen. Die im Rahmen des Projektes entwickelten Entwürfe der Schiffe, die auf diesen Relationen eingesetzt werden sollen, sind in Abschnitt 5.1 näher beschrieben. Das Schiff für den Rhein wird im Folgenden „Rheinschiff“ genannt. In Analogie dazu wird das Schiff für den Neckar im Folgenden „Neckarschiff“ genannt. Das Neckarschiff kann auf dem Rhein bis Mannheim mit einem vorgespannten Leichter als „Koppelverband“ fahren.

2.2 Randbedingungen aus den Fahrtgebieten

Als marktrelevante Relationen wurden die Relationen Rotterdam – Mannheim, Rotterdam – Basel und Rotterdam – Stuttgart identifiziert, siehe 2.1. Alle drei ausgewählten Relationen beginnen im Hafengebiet Rotterdam. Über die Anbindung des Rotterdamer Hafens an die Merwede und damit die Waal, wird Mannheim über den Rhein erreicht. Den Rhein weiter stromauf, über den staugeregelten Oberrhein, führt die nächste Relation nach Basel. Ausgehend von Mannheim führt die dritte Relation, über die Neckarmündung bei Rheinkilometer 428, den staugeregelten Neckar stromauf bis nach Stuttgart.

Der Rhein ist für die Großschifffahrt zugelassen und die allgemeinen Bestimmungen sind auf deutscher Seite über die Binnenschifffahrtsstraßen-Ordnung [20] geregelt. Demnach sind Einzelfahrer, wie das Rhein- und das Neckarschiff, mit einer Länge von bis zu 135 m und Verbände, wie der Koppelverband, mit einer Länge von 185 m zugelassen. Oberhalb von Mannheim gelten für Schiffe mit einer Gesamtlänge über 110 m zusätzliche Bedingungen, welche in §22a.05 der Binnenschiffsuntersuchungsordnung [21] geregelt sind. Die Kernaussage bzgl. des Antriebes ist dort, dass zwei unabhängige Antriebe vorhanden sein müssen. Dies können entweder zwei unabhängige Hauptantriebe mit Propeller oder ein Hauptantrieb mit Propeller und eine geeignete Bugsteuereinrichtung mit sehr hoher Leistung sein. Die gewählten Relationen beinhalten alle die Strecke von St.Goar (km 557) nach Budenheim-Niederwalluf (km 508), auf der bei Gleichwertigem Wasserstand (GIW) eine Fahrrinntiefe von 1,90 m vorgehalten wird. Diese Fahrrinntiefe ist geringer als auf den restlichen Streckenabschnitten, weshalb dieses Teilstück meist die Einschränkung für den Tiefgang vorgibt.

Ebenso wie der Rhein ist der Neckar für die Großschifffahrt von der Mündung bis Plochingen freigegeben. Allerdings gelten auf dem Neckar neben den allgemeinen Bedingungen der Binnenschifffahrtsstraßen-Ordnung [20] zusätzliche Bestimmungen. Dies betrifft vor allem die maximale Länge der zugelassenen Schiffe. Zugelassen sind Fahrzeuge und Schubverbände bis zu einer Länge von 105,5 m und einer Breite von 11,45 m. Bei einer Länge von mehr als 90 m muss eine aktive Bugsteuereinrichtung, ein Zweischraubenantrieb oder ein in alle Richtungen wirkender Hauptantrieb vorhanden sein. Der Neckar ist staugeregelt und von der Mündung in Mannheim bis Stuttgart-Gaisburg müssen 22 Schleusen überwunden werden. Ab einer Schiffsbreite von über 11,0 m ist die Tiefe in den Schleusen wegen Eckaussteifungen am Kammerboden nicht voll zu nutzen. Für eine Schiffsbreite von über 11,40 m ist die Wassertiefe in der Schleuse Schwabenheim, die zweite Schleuse nach der Mündung, auf 2,30 m beschränkt.

Die Breite der Fahrrinne beträgt mindestens 36 m und für die Tiefe der Fahrrinne werden 2,80 m vorgehalten. Zudem beträgt die maximal zulässige Geschwindigkeit über Grund 16 km/h. Innerhalb von Schleusenkanälen ist die Beschränkung auf 12 km/h reduziert. Die Mindestdurchfahrtshöhe unter Brücken beträgt bei HSW (höchster Schifffahrtswasserstand) auf den Streckenabschnitten von Mannheim nach Heilbronn und stromaufwärts von Stuttgart 6 m. Auf der Strecke von Heilbronn bis Stuttgart sind dagegen bei HSW nur 5,5 m vorhanden. Abweichungen hiervon können zusätzlich durch Wind oder den Kraftwerks- und Schleusungsbe-

trieb entstehen [24]. Hiermit ist die Höhe der Aufbauten eine der wichtigsten Einschränkungen für den Entwurf von Typschiffen für den Transport von Ladung mit geringer Dichte wie LNG.

2.3 Technische Rahmenbedingungen

Wie in der Einleitung bereits erwähnt, wird LNG mit Seeschiffen schon seit rund 50 Jahren transportiert. Daher ist es naheliegend zu prüfen, welche Technik und welche Prozeduren direkt aus der Seeschifffahrt übernommen oder angepasst werden können. Im Folgenden werden nun die Aspekte beschrieben, die direkt oder mit geringer Anpassung übernommen werden können. Eine ausführlichere Darstellung findet sich im Abschlussbericht des Projektpartners UDE [3].

2.3.1 Tanksystem

Ladungstanks für Seeschiffe können, sofern sie für Binnenschiffe zugelassen sind, prinzipiell in skalierter Form übernommen werden. Seeschiffe werden in der Regel mit Kugeltanks oder Membrantanks gebaut. Aus dem beschränkten Bauraum auf Binnenschiffen resultieren jedoch deutlich andere Randbedingungen für eine wirtschaftliche Optimierung. Je Volumeneinheit muss eine größere Tankoberfläche in Kauf genommen werden. Gleichzeitig muss die Dicke der Isolation vergleichsweise gering bleiben, um nicht zu viel Transportvolumen zu verlieren. Beide Faktoren führen zu einem erhöhten Wärmeeintrag, so dass die BinGas-Typschiffe mit Tanks in Bilobe-Bauform entworfen wurden. Auch weitere Zulieferteile, wie Pumpen für kryogene Flüssigkeiten, Rohrleitungssysteme, Armaturen sowie Verdampfer und Kompressoren können aus der Seeschifffahrt (in entsprechend kleiner Ausführung) übernommen werden. Gegebenenfalls kann eine Zertifizierung für den Binnenschiffsbereich notwendig sein, ein rein technisches Problem ist jedoch nicht zu erwarten. Generell ist durch die geringere Transportkapazität ein hoher Kostendruck für die aufwändige Anlagentechnik vorhanden.

2.3.2 LNG-Tankmanagement

Das Fahrprofil eines Binnenschiffes ist mit dem eines Seeschiffes nicht zu vergleichen. Ein Binnenschiff kann unerwartete Liegezeiten (Schleusen, extreme Wasserstände) haben. Auch der Leistungs- und damit der Kraftstoffbedarf eines Binnenschiffes ist, verglichen mit einem Seeschiff, verhältnismäßig gering. Daraus können sich für ein Binnenschiff, das LNG als Treibstoff verwendet, neue Herausforderungen ergeben. Dies gilt besonders im Hinblick auf den Tankzustand, der bestimmte Vorgaben für die Parameter Druck und Temperatur nicht über- oder unterschreiten darf.

2.3.3 Schiffbau

Zunächst kann das gesamte LNG-System als eigenständige Einheit betrachtet werden, die auf dem Schiff installiert, aber nicht zwingend in das Schiff integriert werden muss. Eine ganzheitliche Betrachtung ist jedoch gerade für Neubauten ange raten. Im Zuge des BinGas-Projektes wurde beispielsweise gezeigt, dass sich mit der Ladung LNG hinsichtlich der Rumpfgestaltung interessante Freiheiten ergeben. Vergleiche hierzu das Kapitel 6.

2.3.4 Ladungsumschlag, Kraftstoffbunkern

Eine Studie des DNV GL [19] ergab, dass für das Bunkern von LNG auf Binnenschiffen dieselben Prozeduren und dieselbe Technik verwendet werden können wie auf Seeschiffen. Dies lässt sich prinzipiell auch auf den Ladungsumschlag übertragen. In diesem Zusammenhang ist auch die Aus- oder Weiterbildung der Binnenschiffer in Bezug auf den Transport und den Umschlag von kryogenen und entzündlichen (explosiven) Gefahrstoffen eine wichtige Rahmenbedingung. Diese Ausbildungsthemen sind Gegenstand in verschiedenen Projekten. Eine Schulung für den Bunkervorgang wurde beispielsweise im Projekt LNG Masterplan entwickelt. Im EU-Vorhaben Pro minent ist auch das DST an der Erstellung eines E-Learning Moduls unter anderem zur Erklärung der ADN-Regelwerke ([16]) beteiligt.

3 Ermittlung von Betriebsprofilen

Für die Teilvorhaben der Projektpartner UDE und MTU sind die Randbedingungen aus dem Schiffsbetrieb bezüglich des Leistungsbedarfs mit die wichtigsten Eingabegrößen. Mit diesen Informationen können Tanksystem und Antriebsanlage ausgearbeitet und optimiert werden. Zur Ermittlung der Lastprofile wurde eine am DST in anderen Projekten entwickelte Software angepasst und erweitert. Abbildung 3.1 zeigt, welche Eingangsdaten (blaue Umrandung) benötigt werden, damit eine Simulation (rote Umrandung) durchgeführt werden kann. Die Simulationsergebnisse (gelbe Umrandung) können im Anschluss an die Simulation mit unterschiedlicher Zielsetzung analysiert werden (grüne Umrandung). Eines der Werkzeuge dient der Analyse und Erstellung von Betriebsprofilen. Die schematische Darstellung zeigt die notwendigen Schritte und erforderlichen Daten zur Bestimmung von Lastprofilen.

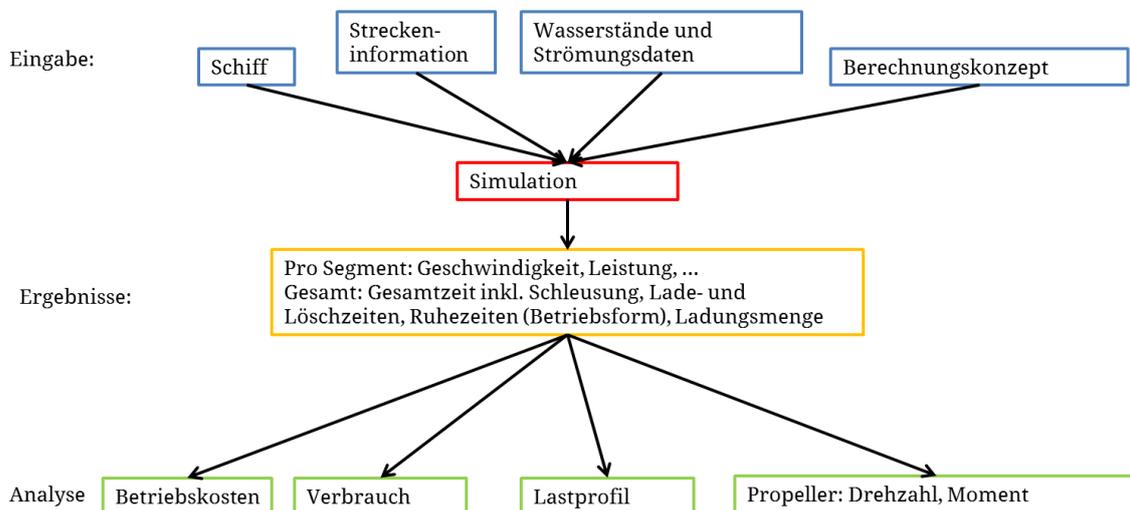


Abb. 3.1: Schematische Darstellung der Software zur Bestimmung von Lastprofilen.

Erste Vorgaben für die Bestimmung der Lastprofile sind die in Tabelle 3.1 aufgeführten Relationen. Des Weiteren wurden die Prognosen zur Beschreibung der Propulsi onseigenschaften der betrachteten Schiffe zur Durchführung der Simulationen benötigt. Zunächst konnten hier als erste Näherung Referenzdaten aus der Datenbank

des DST zugrunde gelegt werden. Im weiteren Projektverlauf wurden die Daten aus den Modellversuchen (siehe Kapitel 7 auf Seite 91) verwendet.

Tab. 3.1: Relationen zur Bestimmung von Lastprofilen

1:	Rotterdam	–	Stuttgart-Gaisburg
2:	Rotterdam	–	Basel
3:	Rotterdam	–	Mannheim
4:	Mannheim	–	Stuttgart-Gaisburg

3.1 Konkretisierung der Relationen zur Bestimmung von Lastprofilen

Für die Simulationen mussten zunächst die Relationen präzise beschrieben und plausible Start- und Zielliegeplätze definiert werden. Im Hafen Rotterdam wurde als Start für die Relationen 1-3 das LNG-Seeterminal gewählt. Es befindet sich im Hafengebiet Maasvlakte 2 (siehe Abbildung 3.2). Die Höchstgeschwindigkeit auf einem Teil des Hartelkanals und der Oude Maas ist zur Verbesserung der Luftreinheit reglementiert und wird mit 13 km/h angegeben. Diese Beschränkung auf 13 km/h gilt für die Fahrt durchs Wasser, bezieht sich also auf die Fließgeschwindigkeit und ist abhängig von den Tide- und Windverhältnissen. Die Geschwindigkeit über Grund variiert entsprechend in Realität. In den Simulationen wurde keine Tide berücksichtigt, weshalb die Grenze mit 13 km/h über Grund festgelegt wurde.

Die dritte Relation endet in Mannheim. Dort wird eine geeignete Position für die Entladung benötigt. Im Rahmen des EU-Forschungsprojektes LNG Masterplan [9] wurden mögliche Standorte für LNG-Terminals untersucht. Für Mannheim wurde im Altrheinhafen (Abzweigung Rheinkilometer 432) ein möglicher Standort für ein LNG-Terminal (siehe Abbildung 3.3) identifiziert. Da dieser rheinabwärts zur Neckarmündung liegt und damit gut zum logistischen Konzept, Abschnitt 2.1 auf Seite 15, des Koppelverbandes passt, wurde dieser Hafen als Zielort der Relation 3 und als Startort der Relation 4 gewählt. Da sich dieser Standort nur 2 km vom Rhein entfernt befindet, wurde auf diesem Teilstück eine maximale Geschwindigkeit von 10 km/h über Grund festgesetzt.

Für die Relation von Rotterdam nach Basel wird zur Maximierung der Transportmenge ein ÜGMS Zweischrauber vorgeschlagen. Für diese Schiffsgröße kommt in

Basel der Hafen Kleinhüningen, wie in Abbildung 3.5 gezeigt, in Betracht. Des Weiteren wurden im LNG Masterplan mehrere mögliche Standorte für LNG-Terminals im Hafen Kleinhüningen vorgeschlagen, weshalb dieser Hafen als Zielort für die Simulationen ausgewählt wurde.

Im Bereich Stuttgart-Gaisburg ist ein Flüssiggas-Speicher der ENBW Stuttgart in Betrieb. Dieser liegt in der Nähe zum Neckar und könnte als Basis für ein LNG-Terminal genutzt werden. Auf der kürzesten Verbindung zwischen Flüssiggas-Speicher und Neckarufer befindet sich am Neckar eine Straßenbrücke mit entsprechenden Zufahrten. Daher wurde eine Anlegestelle (siehe Abbildung 3.4) etwas stromauf ausgewählt.

In Tabelle 3.2 sind die resultierenden Distanzen der Relationen aufgeführt.

Tab. 3.2: Länge der Relationen

1:	Rotterdam	–	Stuttgart-Gaisburg	788,7 km
2:	Rotterdam	–	Basel	858,1 km
3:	Rotterdam	–	Mannheim	587,8 km
4:	Mannheim	–	Stuttgart-Gaisburg	194,5 km



Abb. 3.2: LNG-Seeterminal im Hafengebiet Rotterdam-Maasvlakte und Zufahrt zum Hartelkanal (Quelle: Google Earth).

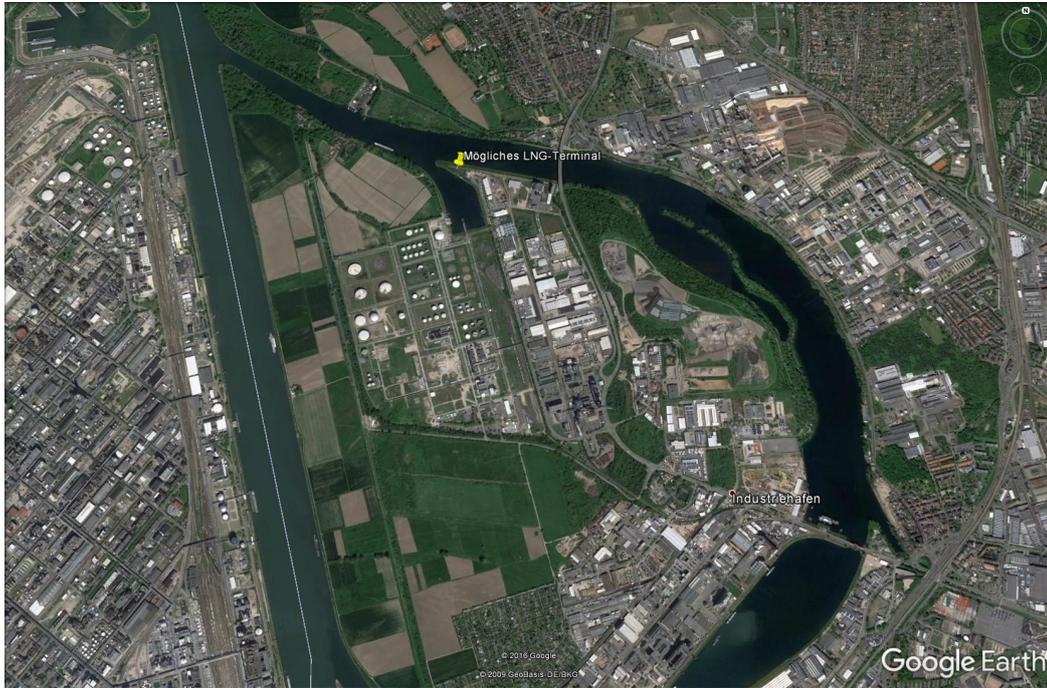


Abb. 3.3: Altrheinhafen bei Mannheim (Quelle: Google Earth).

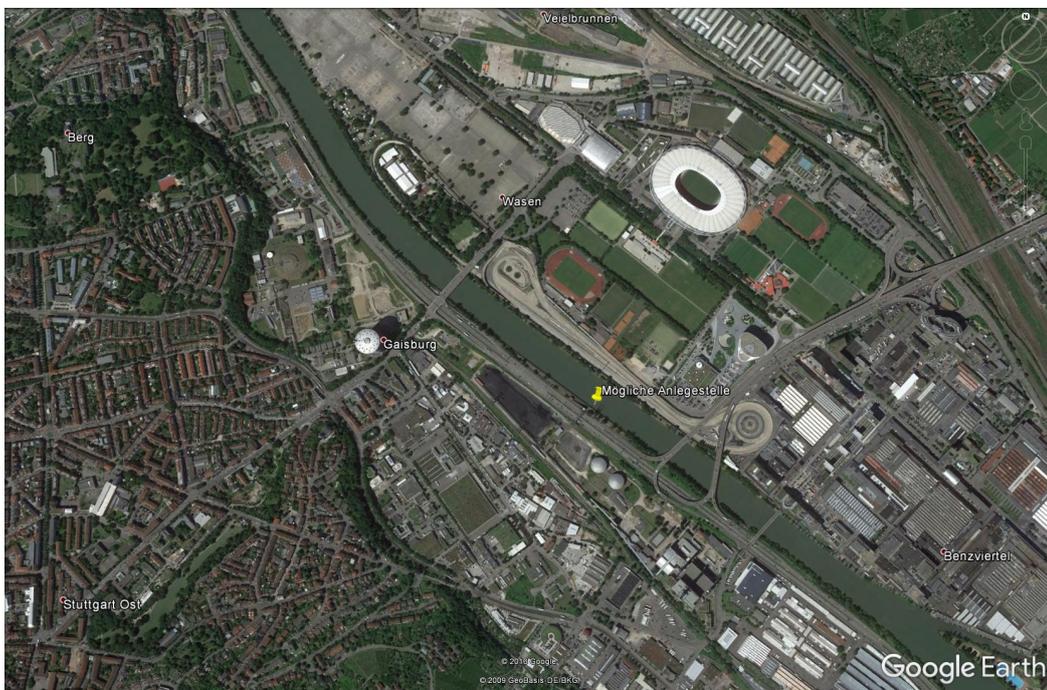


Abb. 3.4: Mögliche Anlegestelle in Stuttgart-Gaisburg (Quelle: Google Earth).



Abb. 3.5: Hafen Kleinhüningen bei Basel (Quelle: Google Earth).

3.2 Vorbereitungen zur Bestimmung von Lastprofilen

Zur Simulation des Schiffsbetriebs auf einer Relation müssen sowohl Daten für das Schiff als auch für die hydrologischen Parameter der Wasserstraßen vorliegen. Die benötigten Daten für ein Schiff sind im Wesentlichen die Propulsionskurven, welche die vorkommenden Wassertiefen und Tiefgänge abdecken sollten. Als Basis dienen Prognosen für die Großausführung aus Modellversuchen. Erste Durchläufe, deren Ergebnisse den Projektpartnern zur Vorauslegung der Teilsysteme dienten, wurden mit Bestandsdaten aus der Datenbank des DST durchgeführt. Im Laufe des Vorhabens wurden die Daten durch die Prognosen für die BinGas-Typschiffe ersetzt (siehe 7 auf Seite 91). Mit unterschiedlichen methodischen Ansätzen und unter Rückgriff auf eine große Datenbasis von Versuchsdaten wurden Prognosen für Propulsionskurven zu weiteren Wassertiefen bestimmt. Diese Methodik musste jeweils für das Rheinschiff, das Neckarschiff und den Koppelverband angewandt werden. Exemplarisch ist dies für das Neckarschiff bei einem Tiefgang von 2,0 m in Abbildung 3.6 dargestellt. Die Propulsionskurven für die Wassertiefen 2,80 m und 4,00 m wurden direkt im Modellversuch ermittelt.

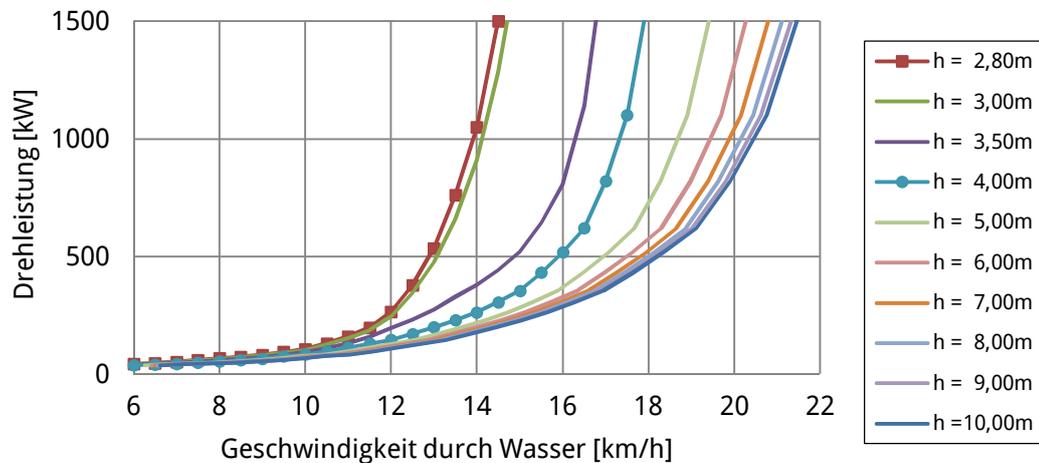
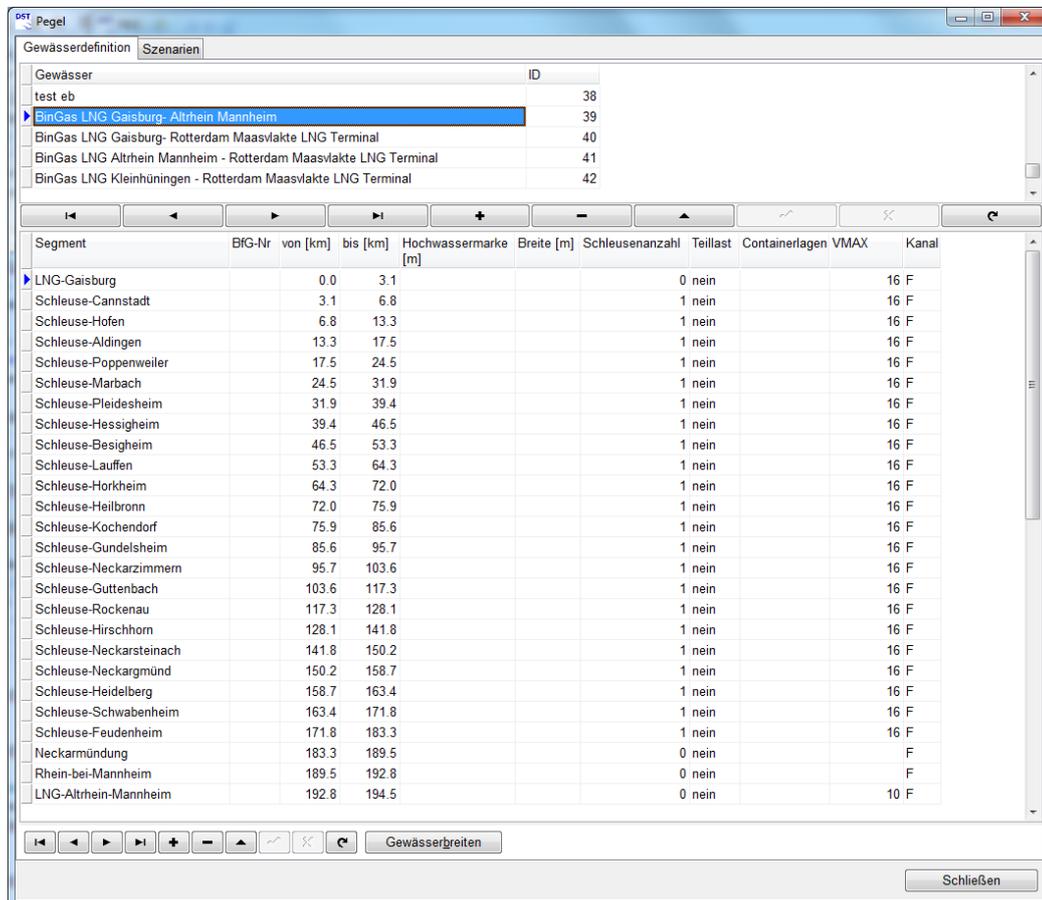


Abb. 3.6: Inter- und extrapolierte Propulsionskurven für das Neckarschiff.

Nach Bereitstellung der Propulsionsdaten für die eingesetzten Schiffe mussten noch die Eigenschaften der befahrenen Gewässer berücksichtigt werden. Zur Simulation von Lastprofilen wird eine Transportrelation in Segmente eingeteilt. Die Unterteilung erfolgt in Abschnitte mit näherungsweise konstanten Werten für die abladerelevante Wassertiefe h_A , die vortriebsrelevante Wassertiefe h_V und die Strömungsgeschwindigkeit des Gewässers. Diese drei Eigenschaften haben den größten Einfluss auf die fahrdynamischen Eigenschaften eines Binnenschiffes. Über die abladerelevante Wassertiefe werden der Tiefgang und die Ladungsmenge des Schiffes bestimmt. Sie gibt die minimale Wassertiefe im Segment an. Die vortriebsrelevante Wassertiefe wird benötigt, um die benötigte Leistung für den Vortrieb des Schiffes innerhalb des Segmentes zu bestimmen. Für Kanäle oder kanalisierte Gewässer ist die abladerelevante Wassertiefe meist gleich der vortriebsrelevanten Wassertiefe. Für naturnahe Fließgewässer ist die abladerelevante Wassertiefe in der Regel kleiner als die vortriebsrelevante Wassertiefe.

Die Strömungsgeschwindigkeit beeinflusst die Geschwindigkeit über Grund. Zu Tal wird die Geschwindigkeit über Grund erhöht, während bei einer Bergfahrt die Geschwindigkeit über Grund reduziert wird. Zusätzlich zu diesen Größen gibt es beispielsweise im Hafengebiet Rotterdam-Maasvlakte oder auf dem Neckar Geschwindigkeitsbegrenzungen, welche in entsprechenden Segmenten berücksichtigt werden. Ebenso wird die Anzahl der Schleusen innerhalb eines Segments berücksichtigt und je Schleuse mit einer durchschnittlichen Schleusungszeit berücksichtigt. Die Schleusungszeit beinhaltet die Zeit für die Schleusung und auch Wartezeiten. In

Abbildung 3.7 ist exemplarisch die Segmentierung für die Relation Gaisburg-Mannheim dargestellt, wie sie für die Simulation festgelegt wurde.



Gewässer	ID
test eb	38
BinGas LNG Gaisburg- Altrhein Mannheim	39
BinGas LNG Gaisburg- Rotterdam Maasvlakte LNG Terminal	40
BinGas LNG Altrhein Mannheim - Rotterdam Maasvlakte LNG Terminal	41
BinGas LNG Kleinhüningen - Rotterdam Maasvlakte LNG Terminal	42

Segment	BFG-Nr	von [km]	bis [km]	Hochwassermarken [m]	Breite [m]	Schleusenanzahl	Teillast	Containerlagen	VMAX	Kanal
LNG-Gaisburg		0.0	3.1				0 nein			16 F
Schleuse-Cannstadt		3.1	6.8				1 nein			16 F
Schleuse-Hofen		6.8	13.3				1 nein			16 F
Schleuse-Aldingen		13.3	17.5				1 nein			16 F
Schleuse-Poppenweiler		17.5	24.5				1 nein			16 F
Schleuse-Marbach		24.5	31.9				1 nein			16 F
Schleuse-Pleidesheim		31.9	39.4				1 nein			16 F
Schleuse-Hessigheim		39.4	46.5				1 nein			16 F
Schleuse-Besigheim		46.5	53.3				1 nein			16 F
Schleuse-Lauffen		53.3	64.3				1 nein			16 F
Schleuse-Horkheim		64.3	72.0				1 nein			16 F
Schleuse-Heilbronn		72.0	75.9				1 nein			16 F
Schleuse-Kochendorf		75.9	85.6				1 nein			16 F
Schleuse-Gundelsheim		85.6	95.7				1 nein			16 F
Schleuse-Neckarzimmern		95.7	103.6				1 nein			16 F
Schleuse-Guttenbach		103.6	117.3				1 nein			16 F
Schleuse-Rockenau		117.3	128.1				1 nein			16 F
Schleuse-Hirschhorn		128.1	141.8				1 nein			16 F
Schleuse-Neckarsteinach		141.8	150.2				1 nein			16 F
Schleuse-Neckargmünd		150.2	158.7				1 nein			16 F
Schleuse-Heidelberg		158.7	163.4				1 nein			16 F
Schleuse-Schwabenheim		163.4	171.8				1 nein			16 F
Schleuse-Feudenheim		171.8	183.3				1 nein			16 F
Neckarmündung		183.3	189.5				0 nein			F
Rhein-bei-Mannheim		189.5	192.8				0 nein			F
LNG-Altrhein-Mannheim		192.8	194.5				0 nein			10 F

Abb. 3.7: Definition der Segmente auf der Relation Mannheim-Gaisbug.

Zusätzlich zur Segmentierung werden die Informationen zu den Wassertiefen h_A und h_v sowie der Strömungsgeschwindigkeit benötigt. Konzeptionell werden in der Simulationsumgebung Tagesdaten berücksichtigt, d. h. über einen Zeitraum werden je Tag und Segment die Daten der Wasserstände und der Strömungsgeschwindigkeit hinterlegt. Für den Rhein innerhalb Deutschlands stehen umfangreiche Daten auf den relevanten Teilstrecken zur Verfügung. Der betrachtete Zeitraum umfasst mehrere Jahrzehnte und beinhaltet damit sowohl Perioden von hohen als auch niedrigen Wasserständen. Für den staugeregelten Rhein oberhalb von Iffezheim und auf niederländischer Seite stehen Jahresmittelwerte zur Verfügung. Vom Karlsruher Institut für Technologie (KIT) wurden Daten für den staugeregelten Neckar generiert.

Die Ergebnisse dieser Simulationen beziehen sich auf einen mittleren Abfluss (MQ) und werden in der Simulation ebenfalls als Jahresmittelwerte verwendet.

3.3 Ergebnisse der Simulation von Lastprofilen

Innerhalb einer Simulation werden viele Fahrten bei wechselnden Wasserständen durchgeführt. Dazu wird an jedem Tag im vorgegebenen Zeitraum eine Fahrt begonnen. Für diese Fahrten wurde die Betriebsform B, d. h. 24 h-Betrieb, gewählt. Berücksichtigt werden Fahrten zu Berg und zu Tal. Die Abbildungen in den folgenden Abschnitten stellen Betriebsprofile der unterschiedlichen Schiffskonzepte auf den relevanten Relationen dar. Eine Gesamtfahrt besteht dabei aus den Anteilen der Bergfahrt mit Ladung (blaue Säulen) und einer Talfahrt (rote Säulen) ohne Ladung bzw. mit Restfüllung im Tank. Die farbliche Darstellung gibt den zeitlichen Anteil der Berg- bzw. Talfahrten bezogen auf die gesamte Dauer der Rundreisen an.

Für die Durchführung der Simulationen mussten noch weitere Annahmen für die betrachteten Schiffe getroffen werden. Bei einer Länge von 105 m wurde für das Neckarschiff eine installierte Leistung von 1200 kW angenommen. Für das Rheinschiff, dessen Länge 135 m beträgt, wurde eine installierte Leistung von 1500 kW gewählt. Neben der Länge unterscheiden sich die Schiffe in der Menge der möglichen Zuladung. Das Neckarschiff wurde für drei LNG-Tanks mit je 300 t Ladung konzipiert. Das Rheinschiff besitzt einen zusätzlichen Tank und kann damit bis zu 33 % mehr LNG transportieren.

3.3.1 Relation von Rotterdam nach Basel

Die Relation von Rotterdam nach Basel ist mit 858 km die längste Relation. Die für diese Relation bestimmten Lastprofile sind für das Rheinschiff in Abbildung 3.8 und für das Neckarschiff in Abbildung 3.9 dargestellt. Da der Transport des LNG nur stromauf erfolgt, wurden die Simulationen der Talfahrten für ein unbeladenes Schiff durchgeführt. In der Bergfahrt wurde soviel Ladung wie möglich berücksichtigt, d. h. der Tiefgang wurde passend zu den Wasserständen bestimmt. Die gewählte Fahrstrategie beinhaltet eine maximal genutzte Leistung von ca. 80 % der installierten Leistung.

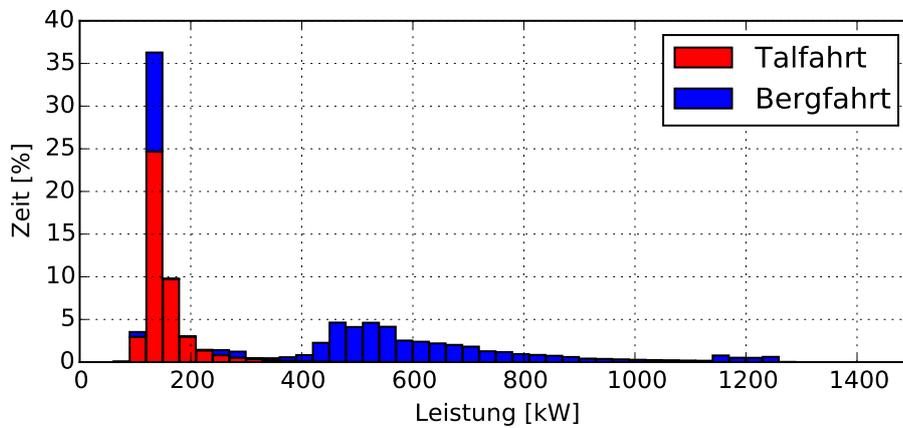


Abb. 3.8: Lastprofil des Rheinschiffes auf der Relation von Rotterdam nach Basel

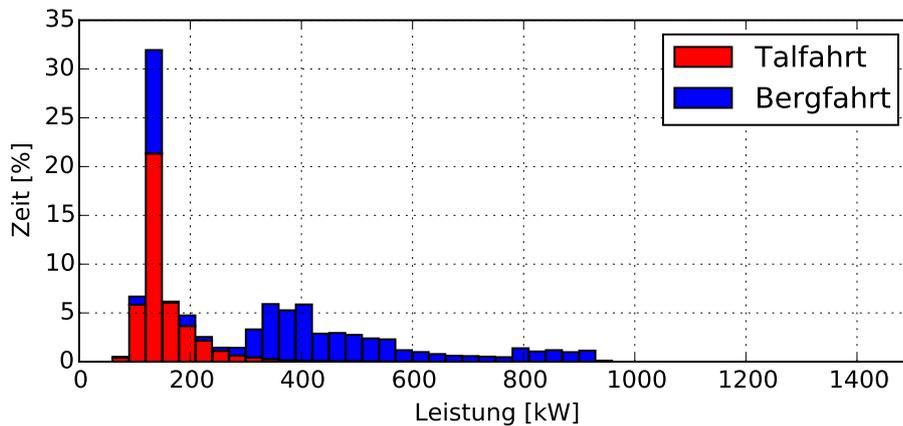


Abb. 3.9: Lastprofil des Neckarschiffes auf der Relation von Rotterdam nach Basel

Für die Talfahrt zeigt sich für beide Schiffe, dass der Leistungsbedarf klein ist. Sowohl für das Rheinschiff als auch für das Neckarschiff weitgehend unter 200 kW. Wie vorausgesetzt, ergibt sich in der Bergfahrt für beide Schiffe, dass eine maximale Last bei ca. 80% der installierten Leistung auftritt. Den größten zeitlichen Anteil verbringt das Rheinschiff im Bereich von 400 bis 800 kW und das Neckarschiff im Bereich von 300 bis 600 kW. Beide Schiffe haben in der Bergfahrt einen großen zeitlichen Anteil in einem Bereich relativ geringer Leistungen. Dieser Anteil entspricht dem staugeregelten Streckenabschnitt am Oberrhein, welcher über Jahresmittelwerte modelliert wurde.

3.3.2 Relation von Rotterdam nach Mannheim

Die Relation von Rotterdam nach Mannheim hat eine Länge von ca. 587 km und ist als Teilstrecke in der Relation von Rotterdam nach Basel enthalten. Der Streckenabschnitt des staugeregelten Rheins entfällt. Die Fahrstrategie für Neckar- und Rheinschiff wurde daher nicht modifiziert. Aus diesem Grund haben die Lastprofile für Neckar- und Rheinschiff, Abbildung 3.10 und Abbildung 3.11, große Ähnlichkeit mit den Lastprofilen auf der Relation von Rotterdam nach Basel. Für den Koppelverband musste die Fahrstrategie angepasst werden, d. h. gegenüber dem Neckarschiff ohne Leichter wurde die maximale Geschwindigkeit durch das Wasser reduziert. Durch den erhöhten Leistungsbedarf des Koppelverbandes in der Bergfahrt würde sonst in sehr großen zeitlichen Bereichen die volle installierte Leistung benötigt werden. Für die Talfahrt zeigt sich dieser erhöhte Leistungsbedarf daran, dass im Lastprofil eine Leistung von 200 kW und darüber benötigt wird, Abbildung 3.12. Trotz Reduzierung der maximalen Geschwindigkeit durch das Wasser zeigt sich eine Erhöhung der Verweilzeit bei höheren Leistungen im Bereich von 400 kW bis 800 kW. Die maximal genutzte Leistung stellte sich bei ca. 90 % der installierten Leistung ein. Gegenüber dem Neckarschiff ohne Leichter stellt sich im Lastprofil des Koppelverbandes die Nutzung eines größeren Leistungsbereiches ein.

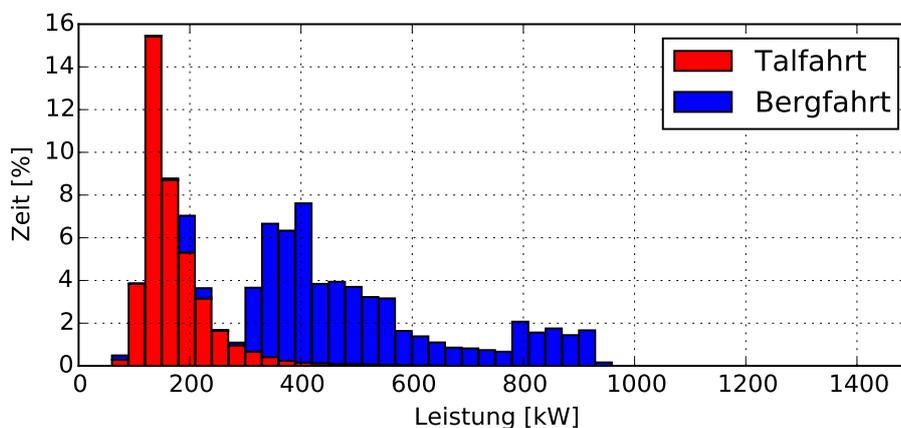


Abb. 3.10: Lastprofil des Neckarschiffes auf der Relation von Rotterdam nach Mannheim.

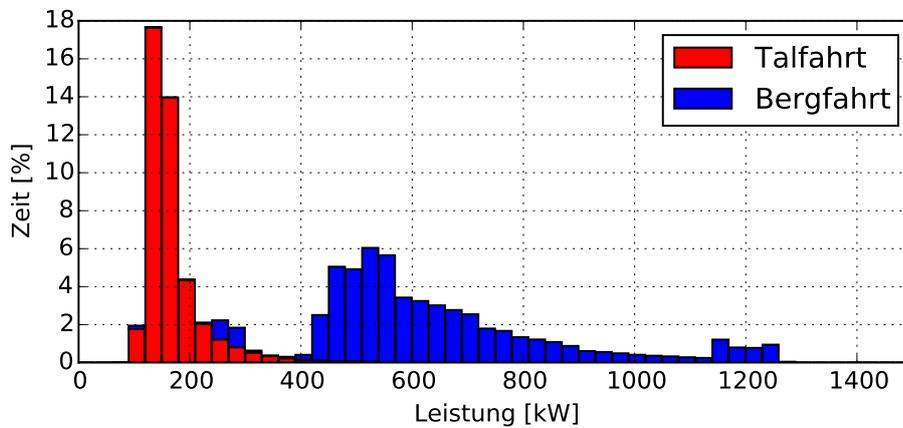


Abb. 3.11: Lastprofil des Rheinschiffes auf der Relation von Rotterdam nach Mannheim.

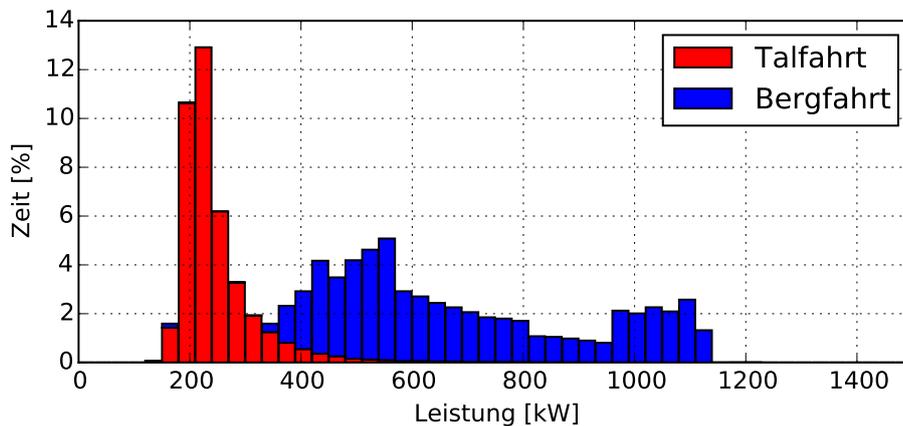


Abb. 3.12: Lastprofil des Koppelverbandes auf der Relation von Rotterdam nach Mannheim.

3.3.3 Relation von Mannheim nach Stuttgart-Gaisburg

Nach dem Transport des LNG von Rotterdam nach Mannheim als Koppelverband, fährt das Neckarschiff ohne Leichter entsprechend dem Logistikkonzept (siehe Kapitel 2.1 auf Seite 15) weiter nach Stuttgart-Gaisburg. Das Lastprofil für das Neckarschiff auf dieser Relation ist in Abbildung 3.13 dargestellt. Auffällig ist der schmale Bereich der benötigten Leistungen. In der Talfahrt mit dem unbeladenen Schiff werden etwas über 100 kW benötigt. Für die Bergfahrt ergibt sich ein Bereich zwischen 300 kW und 420 kW für die benötigten Leistungen. Die jeweils schmale Verteilung der benötigten Leistungen ist der Einschränkung geschuldet, dass für den Neckar einzig Daten für einen mittleren Abfluss vorlagen. Die betrachteten Wassertiefen in den Segmenten liegen zwischen 3,11 m und 4,0 m und entsprechen den Wasser-

tiefen des mittleren Abflusses. Hoch- oder Niedrigwasserstände werden durch die Daten nicht abgedeckt.

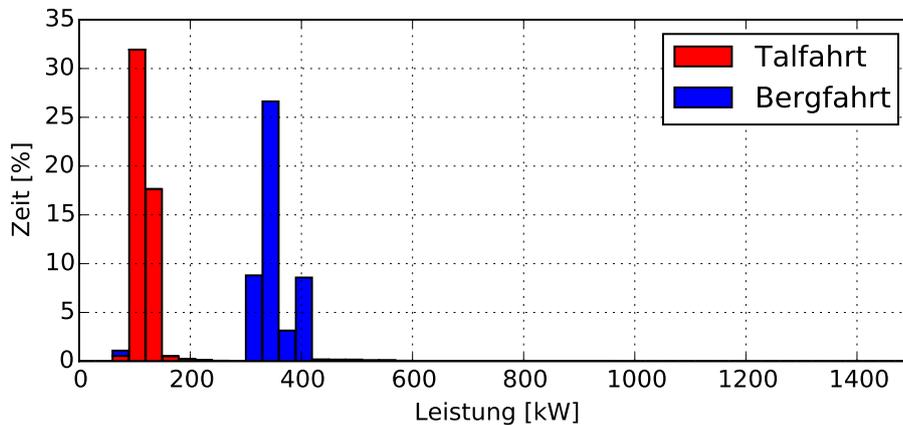


Abb. 3.13: Lastprofil des Neckarschiffes auf der Relation von Mannheim nach Stuttgart-Gaisburg.

3.3.4 Relation von Rotterdam nach Stuttgart-Gaisburg

Als Alternative zum LNG-Transport per Koppelverband von Rotterdam nach Mannheim und im Anschluss per Neckarschiff nach Stuttgart-Gaisburg wird nun das Lastprofil des Neckarschiffes für die Relation von Rotterdam nach Stuttgart-Gaisburg betrachtet, Abbildung 3.14.

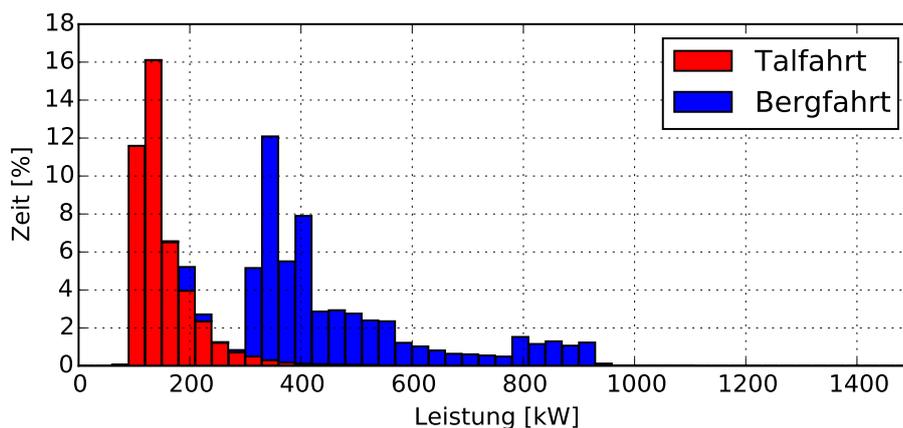


Abb. 3.14: Lastprofil des Neckarschiffes auf der Relation von Rotterdam nach Stuttgart-Gaisburg.

Die betrachtete Relation 1 unterscheidet sich in der Streckenlänge zu der Summe der Relation 3 von Rotterdam nach Mannheim und der Relation 4 von Mannheim nach

Stuttgart-Gaisburg einzig um die Zu- und Ausfahrt zum Altrheinhafen Mannheim, ca. 3,4 km. Damit ergibt sich das Lastprofil dieser Relation als Überlagerung der Relationen 3 und 4. Eine „Addition“ der Säulen aus den Abbildungen 3.10 und 3.13 ist nicht möglich, doch ist in der Klasse von 375 kW gut ersichtlich, dass in diesem Leistungsbereich wesentlich mehr Zeit verbracht wird. Dies entspricht dem Lastprofil des Neckarschiffes auf der Relation 4.

Für eine exemplarische Bergfahrt auf der Relation von Rotterdam nach Stuttgart-Gaisburg ist die Änderung des Leistungsbedarfes über der Fahrtdauer in Abbildung 3.15 aufgetragen. Zu Beginn der Fahrt ist der Leistungsbedarf gering, da in diesem Bereich die Geschwindigkeit reglementiert ist. Anschließend steigt der Leistungsbedarf und bleibt auf einem vergleichbaren Niveau. Die Neckarmündung wird nach ca. 48 h erreicht. Von diesem Zeitpunkt an sinkt der Leistungsbedarf auf ein geringeres Niveau und die Gesamtfahrzeit wird durch die Vielzahl der Schleusungsvorgänge bestimmt. Die Wartezeit vor einer Schleuse, das Einfahren in die Schleuse, das Ausfahren aus der Schleuse und der Schleusungsvorgang wurden pauschal mit einer durchschnittlichen Dauer von einer Stunde berücksichtigt. In Abbildung 3.15 sind diese Wartezeiten durch eine Leistung von 0 kW gekennzeichnet. Damit ergeben sich ständige Lastwechsel zwischen der Fahrgeschwindigkeit und den Schleusungsvorgängen.

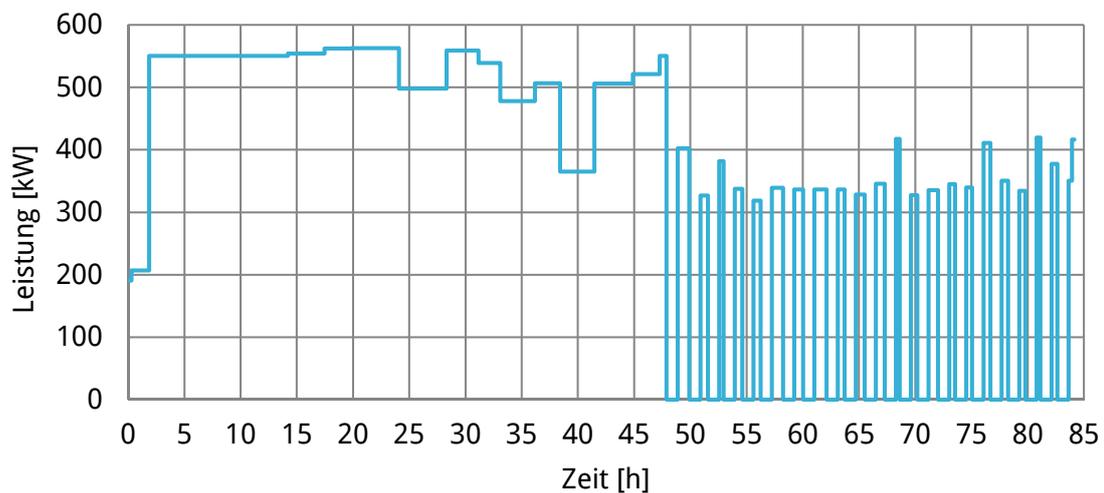


Abb. 3.15: Änderung des Leistungsbedarfes mit der Fahrtdauer während einer exemplarischen Bergfahrt auf der Relation von Rotterdam nach Stuttgart-Gaisburg.

3.4 Abschätzung des Kraftstoffverbrauches

Zur groben Abschätzung des Verbrauches ist eine sehr stark vereinfachte Motorenkennlinie hinterlegt worden. Sowohl für das Rhein- als auch für das Neckarschiff wurde diese stückweise linearisierte Kennlinie verwendet. Hierdurch wird der Kraftstoffverbrauch der Schiffe vergleichbar. Für die Relation von Rotterdam nach Basel ist der Vergleich in Tabelle 3.3 angegeben.

Tab. 3.3: Vergleich von Kraftstoffverbrauch und Transportleistung auf der Relation von Rotterdam nach Basel

Schiff	Anzahl Tanks	Maximale Ladung [t]	Kosten [%]
Neckarschiff	3	900	100,0
Rheinschiff	4	1200	126,9

Obwohl die Ladungskapazität des Rheinschiffes um ein Drittel größer ist als für das Neckarschiff, ist der Kraftstoffverbrauch nur um 26,9 % höher.

Betrachtet sei nun der Transport von LNG auf der Relation von Rotterdam nach Stuttgart-Gaisburg. Dazu wurde als erstes der Kraftstoffverbrauch des Neckarschiffes auf der Gesamrelation bestimmt. Im Anschluss daran wurde der Kraftstoffverbrauch für den Koppelverband auf der Relation von Rotterdam nach Mannheim und der Kraftstoffverbrauch des Neckarschiffes auf der Relation von Mannheim nach Stuttgart bestimmt. Da der Koppelverband mit sechs LNG-Tanks bestückt ist und das Neckarschiff nur mit dreien, muss der Kraftstoffverbrauch des Neckarschiffes im Vergleich doppelt berücksichtigt werden. Damit ist sichergestellt, dass der Kraftstoffverbrauch bei gleicher Transportleistung verglichen wird. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3.4 aufgeführt.

Tab. 3.4: Vergleich des Kraftstoffverbrauches bei gleicher Transportleistung aber unterschiedlichem Logistikkonzept auf der Relation von Rotterdam nach Stuttgart-Gaisburg.

Relation	Schiff	Kraftstoffverbrauch in %
Rotterdam - Stuttgart	Neckarschiff	100,0
Rotterdam - Mannheim	Koppelverband	64,3
Mannheim - Stuttgart-Gaisburg	Neckarschiff	19,7
Rotterdam - Stuttgart-Gaisburg	Koppelverband / Neckarschiff	84,0

Die Kombination des LNG-Transportes mit dem Koppelverband bis Mannheim und von dort aus mit dem Neckarschiff weiter nach Stuttgart-Gaisburg benötigt ca. 16 % weniger Kraftstoff als der Kraftstoffverbrauch für das Neckarschiff auf der Gesamtrelation bei gleicher Transportleistung.

4 Maschinenkonzepte für LNG-betriebene Schiffe

In diesem Arbeitspaket beschränkte sich die Rolle des DST auf einige Zuarbeiten zu den Arbeiten der Projektpartner. Der Schwerpunkt der Bearbeitung lag bei der MTU. Die Verwendung von LNG als Treibstoff für Binnenschiffe bringt einige neue Herausforderungen mit sich. Fragestellungen, die sich im Laufe des Projektes ergaben, werden hier kurz zusammengefasst und die Lösungsansätze für einzelne Aspekte vorgestellt. Eine Fragestellung war die Treibstoffverfügbarkeit während der Fahrt. Ist die mitgenommene Treibstoffmenge ausreichend? Gibt es an der Strecke eine Bunkerstation? Eine andere Frage war der Umgang mit ungeplanten Fahrtunterbrechungen. Was geschieht während dieser Zeit mit dem entstehenden Boil-Off Gas? Wie gut kann die Tankauslegung diesem Problem begegnen?

Insbesondere die Überlegungen zur Treibstoffverfügbarkeit wurden im Rahmen des Ladungstankentwurfs beim Projektpartner UDE umfassend behandelt und sind in dessen Abschlussbericht [3] beschrieben. Zudem sei auf den Abschlussbericht des Projektpartners MTU verwiesen, der sich eingehend mit dem Treibstoffbedarf verschiedener Antriebskonzepte über bestimmte Fahrtstrecken befasst [2]. Im Folgenden werden daher hier nur kurz die Ergebnisse der Zusammenarbeit mit den Projektpartnern beschrieben.

Wird das LNG, wie im Projekt angedacht, für den Motor aus dem Ladungstank entnommen, so ergaben die Berechnungen der UDE, dass auch bei der Leerfahrt zurück zum LNG-Terminal in Rotterdam genügend LNG bzw. BOG im Ladungstank verbleibt um die Treibstoffversorgung sicherzustellen. Die vollständige Leerung der Ladungstanks ist bei LNG-Schiffen nicht üblich; eine gewisse Restmenge (meist etwa 10 %) verbleibt im Tank, um diesen auf Temperatur zu halten. Das BOG-Aufkommen ist nahezu immer ausreichend zur Treibstoffversorgung; einzige Ausnahme kann der Beginn der Reise sein, wenn das kalte LNG am Terminal aufgenommen worden ist und die Verdampfungsrate noch sehr klein ist. Der Schiffsentwurf wird zudem

mit einer Gasaufbereitungsanlage ausgerüstet, die den vom Motor benötigten Gaszustand bereitstellt. Eine kurze Beschreibung befindet sich in Abschnitt 5.2.10 sowie ausführlicher im Abschlussbericht des Projektkoordinators UDE [3].

Die Verwendung von LNG als Treibstoff für Binnenschiffe bringt einige neue Herausforderungen mit sich. Insbesondere die Überlegungen zur Treibstoffverfügbarkeit wurden im Rahmen des Ladungstankentwurfs beim Projektpartner UDE umfassend behandelt und sind in dessen Abschlussbericht [3] beschrieben. Zudem sei auf den Abschlussbericht des Projektpartners MTU verwiesen, der sich eingehend mit dem Treibstoffbedarf verschiedener Antriebskonzepte über ausgewählte Fahrtstrecken befasst [2]. Auf der Reise eines Binnenschiffs kann es zu ungeplanten Fahrtunterbrechungen kommen. Auslöser können Sperrung von Wasserstraßen, Havarien, Werftliegezeiten oder ähnliches sein. Berechnungen an der UDE haben ergeben, dass der Bedarf der Hauptmaschine nahezu immer vom BOG-Aufkommen überschritten wird. Um die geforderte Haltezeit (dreifache Reisedauer, mindestens aber 15 Tage [16]) zu gewährleisten, wurden Rückverflüssigungsanlagen vorgesehen. Im Zuge der Sicherheitsanalyse wurden deren Dimensionen so festgelegt, dass sie auch im Falle einer ungeplanten Fahrtunterbrechung einen sicheren Tankzustand aufrecht erhalten.

Neben diesen allgemeinen Fragestellungen, die im Projektverbund bearbeitet wurden, unterstützte das DST den Projektpartner MTU bei seiner Simulationsumgebung. Entgegen der ursprünglichen Planung wurde davon abgesehen, die Simulationen von DST und MTU vollständig miteinander zu verschmelzen. Stattdessen wurden mit unterschiedlicher Fokussierung zwei parallele Simulationsumgebungen entwickelt. Die Simulationen am DST haben eine grobe zeitliche und räumliche Auflösung und decken stationäre Betriebszustände in Umgebungsbedingungen mehrerer Jahrzehnte ab. Die Simulationen des Projektpartners MTU betrachten verstärkt die instationären Effekte mit hoher zeitlicher Auflösung unter Berücksichtigung der Motordynamik und der trägen Reaktion des Systems Schiff. Die Modellierung des Betriebszustands der Propeller und der Schiffshydrodynamik wurde durch das DST formuliert. Für exemplarische Abflussbedingungen wurden Zeitreihen plausibler Fahrgeschwindigkeiten, Wassertiefen und Strömungsgeschwindigkeiten aus den DST-Simulationen bereitgestellt und verwendet.

5 Entwicklung von LNG-Binnentankschiffstypen

5.1 Entwurf

In Abstimmung mit den Verbundpartnern und den assoziierten Partnern sowie passend zu dem in Kapitel 2.1 auf Seite 15 beschriebenen Logistikkonzept wurden entsprechende Schiffskonzepte entworfen. Die Entwürfe sind für den Einsatz auf dem jeweiligen Fahrtgebiet zugeschnitten und begünstigen einen wirtschaftlichen Transport des LNG von den Seehafenterminals in Rotterdam zu den Abnehmern an Rhein und Neckar. Die Randbedingungen der Relationen sind im Zusammenhang mit den Betriebssimulationen in Kapitel 2 auf Seite 15 aufgeführt. Darauf basierend wurden ein zweischraubiges ÜGMS für die Fahrt auf dem Rhein bis Basel mit einer Länge von 135 m und einer Breite von 11,4 m sowie ein ebenso breites einschraubiges Neckarschiff mit einer Länge von 105 m entworfen. Das Neckarschiff kann auf dem Rhein bis Mannheim mit einem passenden Tankleichter, der ebenfalls entworfen wurde, als Koppelverband fahren. Das unterschiedliche Antriebskonzept der Entwürfe resultiert aus den Redundanzforderungen auf dem Rhein oberhalb von Mannheim bzw. auf dem Neckar. Auch wenn inzwischen mit dem Ausbau der Schleusenkammern auf dem Neckar für 135 m-Schiffe begonnen wurde, wird die Befahrbarkeit noch für Jahrzehnte auf eine Länge von 105 m begrenzt bleiben, so dass der Entwurf auf die heutigen Randbedingungen zugeschnitten wurde.

Die geringe Dichte des Transportguts LNG erlaubt eine hydrodynamische Optimierung der Rumpfform über den üblichen Spielraum hinaus. Dieses Potential wurde in mehreren Entwurfsschleifen iterativ ausgeschöpft. Hierzu wurden beide Entwürfe sowohl numerisch als auch experimentell untersucht. Die einzelnen Stufen sind in den Kapiteln 6 auf Seite 53 und 7 auf Seite 91 beschrieben.

Die Ausarbeitung des Entwurfs hinsichtlich Raumaufteilung und Auslegung des Hauptspants erfolgte im Dialog mit den Projektpartnern. In Zusammenarbeit mit

der Universität Duisburg-Essen wurden die Form und die Größe der LNG-Tanks optimiert, um unter Berücksichtigung der eingeschränkten Abmessungen der Schiffe möglichst große Tankvolumina zu erzielen. Dabei waren auch technische Vorschriften einzuhalten, wie zum Beispiel die Zugänglichkeit der Tanks zur Inspektion und das Regelwerk des ADN. Die nachstehenden Abbildungen zeigen die Entwicklung und das entsprechend maximierte Tankvolumen. Um das Volumen der Tanks zu maximieren, wurden die Seitenzellen in Mindestbreite (800 mm) ausgeführt, wie in der maßgerechten Zeichnung des Hauptspants dargestellt. Konstruktionsdetails, wie zum Beispiel die Bestimmung der Blechstärken und die Auswahl geeigneter Profile zur Aussteifung, waren nicht Gegenstand des Vorhabens. Es ist nicht zu erwarten, dass bei einem Schiff dieser Bauart Probleme in Bezug auf die Festigkeit auftreten, weil die Bauweise mit einem durchgehenden Hauptdeck und längs ausgesteiften Seitenzellen im Querschnitt vergleichsweise hohe Widerstandsmomente erzeugt. Hinzu kommt, dass die Seitenzellen des Schiffes laut ADN in „kollisionssicherer Seitenkonstruktion“¹ auszuführen sind, wodurch eine besonders schwere Konstruktion erforderlich ist. Die entsprechenden Stahlmassen für die Berechnung der Ladefälle und die Planung der benötigten Ballastmenge wurden, basierend auf der Konstruktion am DST bekannter Tankschiffe, abgeschätzt.

¹ „Tankschiffe, deren Ladetanks den höchstzulässigen Inhalt überschreiten oder bei denen der vorgeschriebene Abstand zwischen der Seitenwand des Schiffes und den Ladetanks unterschritten wird, müssen durch eine kollisionssicherere Seitenkonstruktion geschützt sein. Dies ist nachzuweisen, indem das Risiko einer konventionellen Bauweise (Referenzbauweise), die den ADN-Bestimmungen entspricht, mit dem Risiko einer kollisionssichereren Seitenstruktur (alternative Bauweise) verglichen wird.“ (ADN, Ref. 9.3.4.1.1)

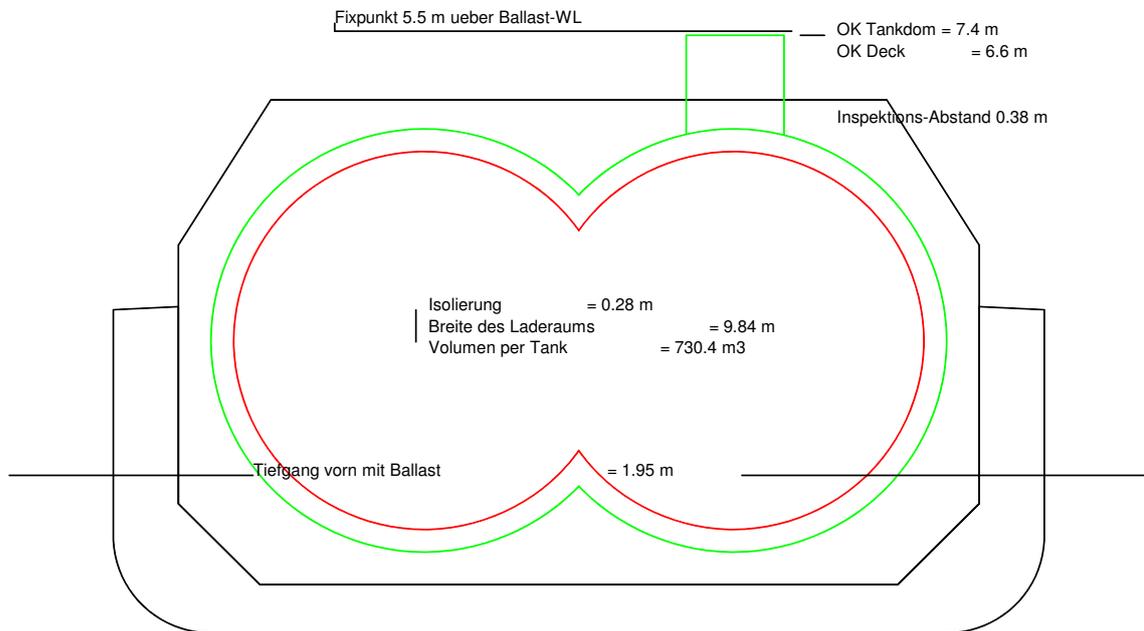


Abb. 5.1: Entwurfsskizze für den Platzbedarf der LNG-Tanks – August 2015.

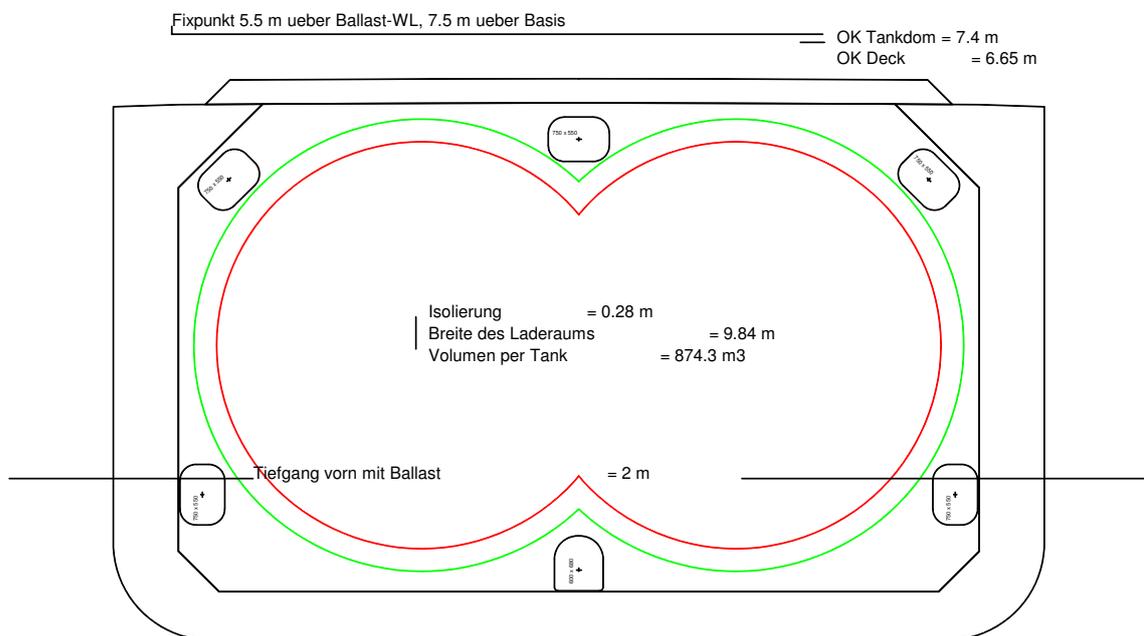


Abb. 5.2: Entwurfsskizze für den Platzbedarf der LNG-Tanks – November 2015.

Die Raumeinteilung der Schiffe wurde ausgearbeitet, um Platz für die im Zusammenhang mit LNG-Ladung erforderliche Ausrüstung zu erhalten und um Aspekte der Sicherheit, des Schiffsbetriebs und der Lade-Lösch-Vorgänge zu berücksichtigen.

Abbildung 5.3 zeigt den entsprechenden Generalplan, bei dessen Erstellung auch die Aspekte der Schiffsfestigkeit und des entsprechenden Stahlbaus berücksichtigt wurden.

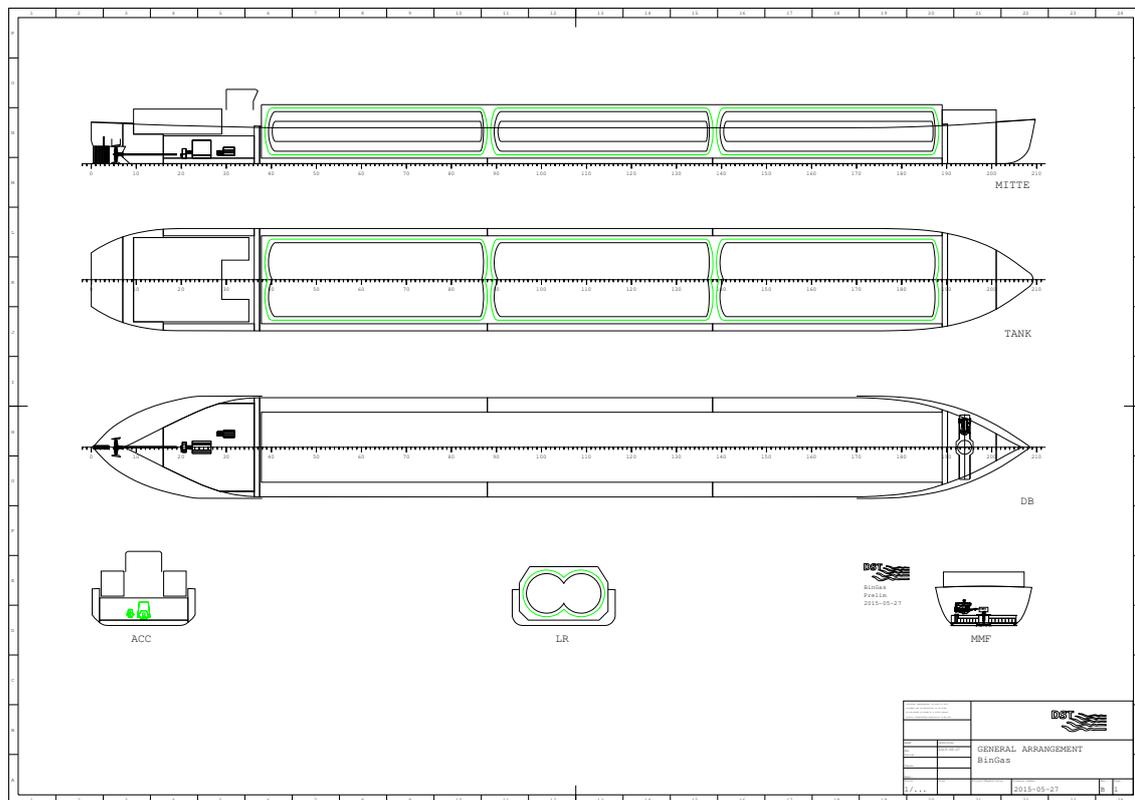


Abb. 5.3: Generalplan des 105 m Neckarschiffs – Mai 2015.

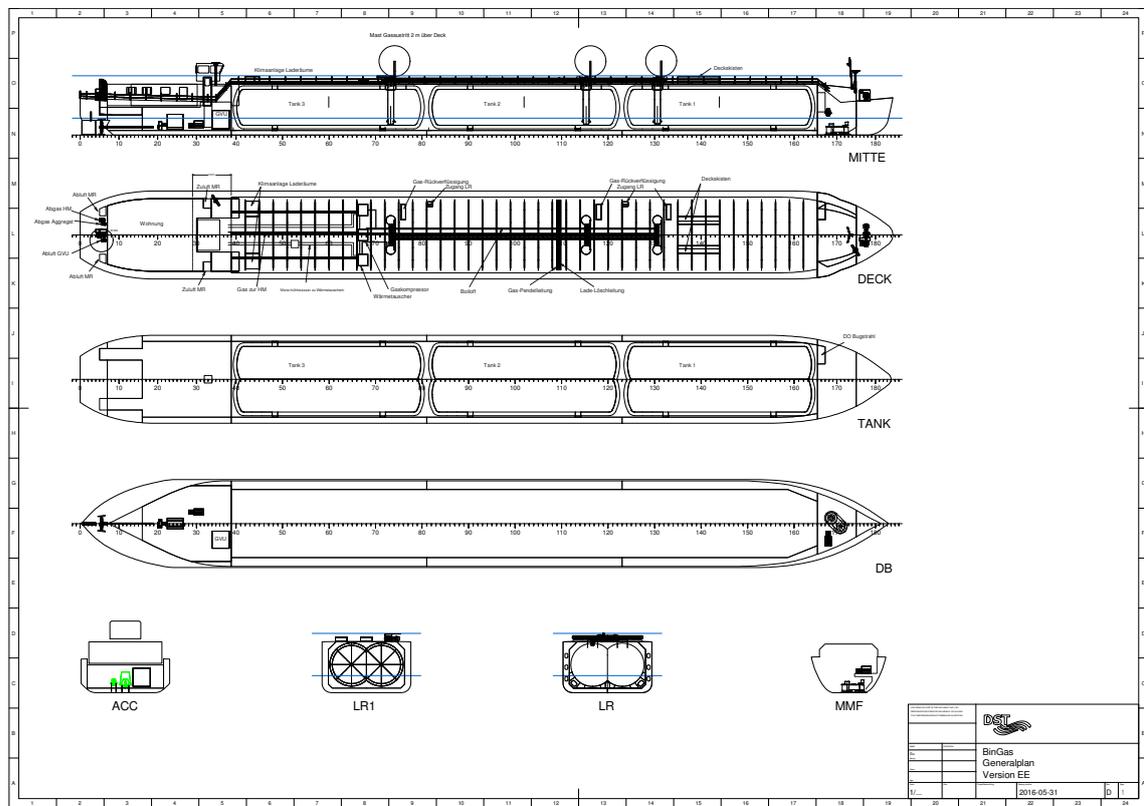


Abb. 5.4: Finaler Generalplan des 105 m Neckarschiffs.

Das in der Schiffsentwurfs-Software NAPA erstellte 3D-Modell des LNG-Tankers, in dem auch Rohrleitungen und Tanks dargestellt wurden, konnte u.a. auch für Sicherheitsanalysen verwendet werden.

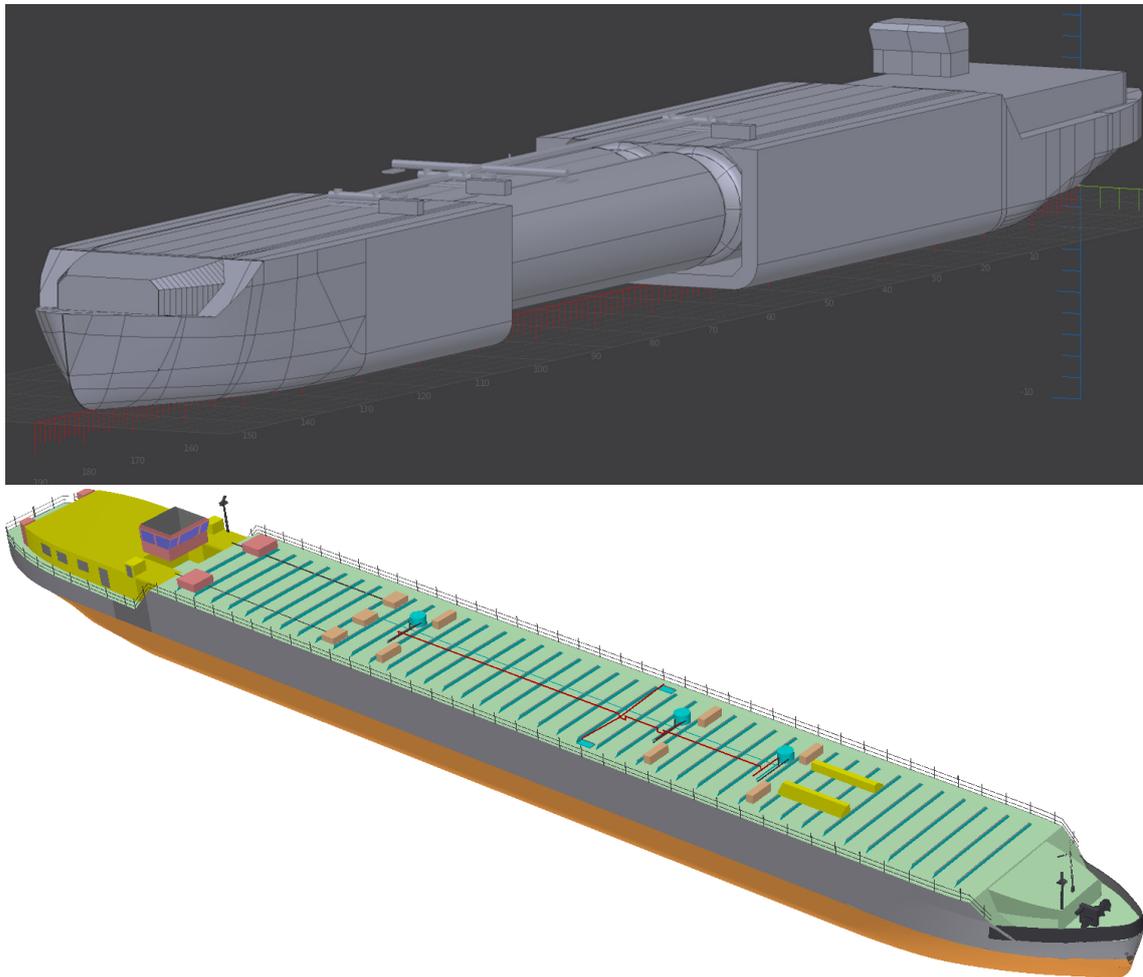


Abb. 5.5: 3D-Modell des LNG-Tankers für den Neckar.

5.2 Spezifikation der BinGas-Tanker

In der nachfolgenden Beschreibung werden die Daten der Schiffe zusammengefasst. Unterschiedliche Daten für die Entwürfe „Neckar“ und „Rhein“ werden tabellarisch dargestellt.

5.2.1 Schiffstyp / Verwendungszweck

Doppelhüllen-Tankschiff Typ G (ADN). Das Schiff ist bestimmt für den Transport von Flüssigerdgas (LNG), das zur einfachen Lagerung oder Beförderung verflüssigt wur-

de. LNG wird als „Methan, tiefgekühlt, flüssig oder Erdgas, tiefgekühlt, flüssig, mit hohem Methangehalt“ mit der UN-Stoffnummer 1972 geführt und ist zur Beförderung in Binnentankschiffen zugelassen.

5.2.2 Einsatzgebiet

Europäische Binnenwasserstraßen, wie z.B. der Rhein, seine Nebenflüsse und Kanäle, die Bundeswasserstraßen der Zonen 1 und 2 sowie im Gebiet der EG die Zonen 2, 3 und 4, sofern die Abmessungen des Schiffes das Befahren dieser Wasserstraßen zulassen.

5.2.3 Hauptdaten, Nutzungsdaten

Tab. 5.1: Hauptdaten der LNG-Binnentanker

		Neckar	Rhein	Leichter
Schiffstyp laut ADN		Typ G	Typ G	Typ G
Länge über Alles	Lü.A.	105,00 m	135,00 m	80,00 m
Breite auf Spant	BSPT	11,40 m	11,40 m	11,40 m
Breite über Alles	Bü.A.	11,45 m	11,45 m	11,45 m
Seitenhöhe Hauptdeck	H	4,80 m	4,80 m	4,80 m
Tiefgang	T	2,05 m	2,05 m	2,05 m
Fixpunkthöhe im Ballastfall	hF	5,40 m	5,40 m	5,40 m
Anzahl Ladetanks		3	4	3
Volumen je Tank		874 m ³	915 m ³	770 m ³
LNG-Ladung je Tank		ca. 380 t	ca. 400 t	ca. 336 t
Tragfähigkeit LNG		ca. 1145 t	ca. 1600 t	ca. 1008 t

5.2.4 Vorschriften

Wesentliche Vorschriften und Regelwerke, die jeweils in der aktuell gültigen Fassung zu berücksichtigen sind:

- Binnenschiffsuntersuchungsordnung (BinSchUO)
- Europäisches Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf Binnenwasserstraßen (ADN)

- Vorschriften der Klassifikationsgesellschaften Klasse: DNV GL +A100 A5

5.2.5 Besatzung

Gemäß den Bemannungsrichtlinien für die Continue-Fahrt wird die Wohnung für 2 Besatzungen eingerichtet. Die für die B-Fahrt erforderliche Besatzung besteht aus: 2 Schiffsführern, 1 Steuermann und 2 Matrosen. Dies ist auch ausreichend für den Betrieb als Koppelverband mit einem Schubleichter.

5.2.6 Schiffskörper

Der Schiffskörper wird durch wasserdichte Schotte in Abteilungen eingeteilt:

- Achterpiek
- Maschinenraum
- Laderaum mit den eingesetzten Ladetanks
- Bugstrahlruderraum
- Vorpiek
- Doppelboden und Seitenzellen als Ballastzellen, unterteilt in 6 Abteilungen. Länge der Abteilungen entsprechend den Anforderungen aus der Leckstabilität.
- Tanks für Schmierstoffe, Trinkwasser und Brauchwasser im Achterschiff, Vorratstank für Dieselöl im Vorschiff
- Vor- und Hinterschiff in Querspantenbauweise, Mittelschiff in kombinierter Längs-/Querspantenbauweise
- Normalspant-Abstand, Mittelschiff: 600 mm
- Rahmenspant-Abstand: 1800 mm
- Spant-Abstand in Vor- u. Hinterschiff: 500 mm

Das Deckshaus ist auf dem Achterschiff über dem Maschinenraum, außerhalb des Bereichs der Ladung, elastisch aufgestellt. Das Steuerhaus aus Stahl ist auf einer Hubsäule hydraulisch absenkbar. Im Dach des Steuerhauses ist eine wasserdichte Luke eingebaut.

5.2.7 Propulsionsanlage und Manövrierorgane

		Neckar	Rhein	Leichter
Anzahl Propeller		1	2	
Propellerdurchmesser	D_P	1,75 m	1,60 m	-
Leistung je Propeller	P_D	ca. 1200 kW	ca. 800 kW	-
Bugstrahlanlage		250 kW	350 kW	250 kW

Ruder werden als Zweiflächenruderanlagen hinter den Düsenpropellern angeordnet.

5.2.8 Decksrüstung

2 Buganker, je 1000 kg, 1 Heckanker, ebenfalls 1000 kg, mit entsprechenden Ankerwinden.

5.2.9 Ladungstanks

Die Ladungstanks sind in den Laderäumen aufgestellt, die von Deck aus zugänglich sind. Bei den Tanks handelt es sich um sogenannte „Bilobe-Tanks“. Bei dieser Bauweise werden zwei zylindrische Körper miteinander verschnitten, um eine möglichst gute Laderaumausnutzung zu erreichen. Zwischen beiden Tankhälften befindet sich ein frei durchflutetes Schott, welches zur Stabilität der Konstruktion beiträgt. Es wurde eine Isolierung aus PU-Schaum gewählt, da diese vergleichsweise einfach auf die Geometrie aufzubringen ist. An ihrem Aufstellungsort sind die Tanks zudem gegen Aufschwimmen im Falle einer Havarie gesichert. Eine genaue Beschreibung der Auslegung hinsichtlich Geometrie und Festigkeit findet sich im Bericht des Projektpartners UDE [3].

5.2.10 Lade-Löschsystem

Neben den Lade- und Löscheinrichtungen wurden die Kraftstoffleitung zum Motor sowie die Kraftstoffaufbereitung integriert. Es wurden insbesondere die Aspekte Sicherheit und der geringe zur Verfügung stehende Raum auf dem Binnenschiff berücksichtigt. Der gesamte Anlagenentwurf wurde vom Projektpartner DNV GL nach aktuellen internationalen Richtlinien geprüft. Um den Platzbedarf der Anlage möglichst gering zu halten, wurden einigen Komponenten mehrere Funktionen zugeschrieben. Das Lade- und Löschsystem wurde im Detail beim Projektpartner UDE geplant und ist dort im Bericht beschrieben [3].

5.2.11 E-Anlage

Für die Motorschiffe ist im Maschinenraum achtern je ein Diesellaggregat, wassergekühlt, mit Druckluft-Startermotor vorgesehen. Die Dauerleistung beträgt ca. 75 kW, mit Drehstromgenerator, 400/231 V, 75 kVA. Ein Diesel-Hafenaggregat im vorderen Maschinenraum hat eine Dauerleistung von ca. 20 kW – auch im Schubleichter. Ein Landanschluss für 380 V, 50 Hz, 63 A ist vorzusehen.

5.3 Anpassung bestehender Schiffe

Neben einem vollständigen Neubau eines LNG-Binnentankschiffes, kann auch der Umbau eines geeigneten Binnenschiffes, auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten, eine Alternative darstellen. Zwei unterschiedliche Konzepte werden im Folgenden untersucht: zum einen die Integration eines großen Ladungstanks, zum anderen ein modulares Konzept. Neben dem Transport von LNG wird auch die Nutzung als Treibstoff untersucht. Hier müssen gegebenenfalls erhebliche Umbauten und meist ein Austausch der Hauptmaschine vorgenommen werden.

Für den Umbau und damit die Kombination verschiedener Konzepte bestehen die in den folgenden Abbildungen gezeigten Möglichkeiten:

Abbildung 5.6 (a) zeigt die Möglichkeit, ein konventionelles Binnenschiff mit einer LNG-Antriebsanlage auszustatten. Die transportierte Ladung bleibt von dem Umbau unberührt. In Abbildung 5.6 (b) ist ein Containerschiff zu sehen, welches mit einer LNG-Antriebsanlage ausgerüstet ist und zusätzlich LNG-Tankcontainer transportiert. Einzelheiten zu LNG-Tankcontainern finden sich im folgenden Abschnitt 5.3.1. Ebenfalls möglich ist der LNG-Tankcontainertransport mit einem konventionell angetriebenen Binnenschiff, da der LNG-Tankcontainertransport keine besonderen schiffbaulichen Maßnahmen erfordert (zu sehen in Abbildung 5.6 (c)). Neben dem Transport von Tankcontainern ist auch der Einbau von großen LNG-Ladungstanks denkbar. Die Maßnahmen zu einem solchen Umbau werden in Abschnitt 5.3.2

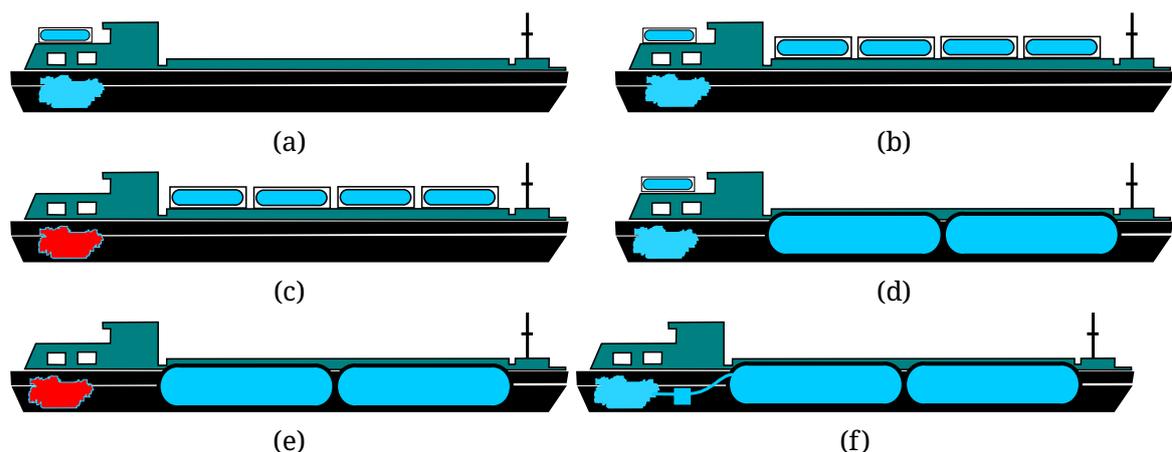


Abb. 5.6: a) Gasmotor, separater Treibstofftank auf dem Achterdeck, beliebige Ladung möglich; b) Gasmotor, separater Treibstofftank auf dem Achterdeck, u.a. LNG-Tankcontainer als Ladung; c) Dieselmotor, u.a. LNG-Tankcontainer als Ladung; d) Gasmotor, separater Treibstofftank auf dem Achterdeck, LNG-Drucktanks

beschrieben. Auch hier besteht die Möglichkeit, das Schiff entweder mit einem Gasmotor und einem separaten Treibstofftank (Abbildung 5.6 (d)) oder einem konventionellen System (Abbildung 5.6 (e)) auszurüsten. Eine dritte Möglichkeit ist die Nutzung der Ladung als Treibstoff (Abbildung 5.6 (f)).

5.3.1 Modulare Systeme

Modulare LNG-Systeme für Binnenschiffe sind in erster Linie LNG-Tankcontainer mit einer Länge von 20 bzw. 40 ft. Sie bestehen aus einem vakuumisolierten Typ C Drucktank in einem Rahmengestell. Typ C Tanks nach IMO sind unabhängige Drucktanks. Das bedeutet, die Tanks sind unabhängig von der Schiffsstruktur und sind für einen bestimmten Druckanstieg (üblicherweise 4 bis 10 bar) ausgelegt. Die Tanks sind autark und benötigen weder aktive Kühlung noch einen Stromanschluss. Die Anschlüsse und ein Überdruckventil befinden sich an einer Stirnseite des Tanks. Abbildung 5.7 zeigt einen 40 ft Tankcontainer.

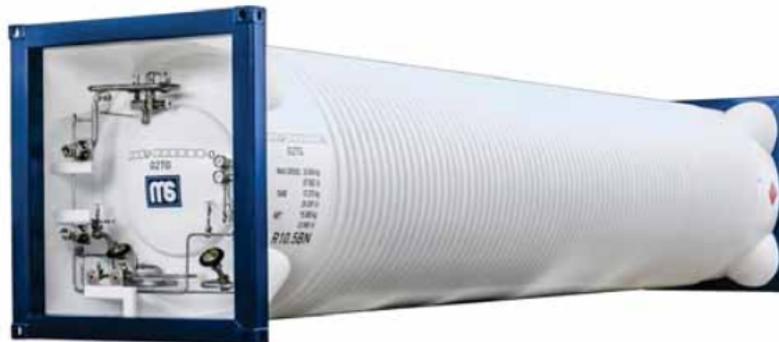


Abb. 5.7: 40 ft Tankcontainer [10]. Zu erkennen sind die Tankarmaturen an der Stirnseite.

In den Regelwerken wird eine gewisse Standzeit eingefordert, die mit LNG-Containern aufgrund der sehr guten Isolierung und des zulässigen Druckanstiegs erreicht werden kann. Tabelle 5.2 zeigt typische Spezifikationen von LNG-Containern. Mit einem Gewicht von etwa 30 t ist ein gefüllter 40 ft LNG-Container vergleichbar mit einem Standard-40 ft Container. Das Leergewicht beträgt jedoch ein Vielfaches eines Standard-Containers. Dieser Umstand muss beim Rücktransport leerer LNG-Tankcontainer in Betracht gezogen werden.

Tab. 5.2: Typische Spezifikationen von LNG-Containern [3]

	20 ft, 17 bar	20 ft, 24 bar	40 ft, 10 bar
Kapazität	20 m ³	20 m ³	43,5 m ³
Maximaler Betriebsdruck	17 bar	24 bar	10 bar
Leergewicht	8 t	9 t	13 t
Haltezeit	55 d	76 d	80 d

Simulationen der Universität Duisburg-Essen zur Gasausbreitung haben ergeben, dass LNG-Tankcontainer in den oberen Lagen gestaut werden sollten, da im Falle eines Lecks die Umgebung lokal so stark abkühlen kann, dass es zu Beschädigung umliegender Strukturen kommen kann [3].

Im Falle des Transports von LNG Containern kann das Schiff weiterhin mit einem konventionellen Antrieb betrieben werden. Es gibt jedoch auch Konzepte, die, unabhängig von der Ladung, die Verwendung von LNG-Tankcontainern als Treibstofftanks vorsehen. Diese können dann jedoch nicht mit den anderen Ladungscontainern gestaut werden, sondern müssten z.B. achtern separat positioniert und mit einer Gasaufbereitungsanlage für den Motor verbunden werden.

5.3.2 Ausrüstung bestehender Schiffe mit festen Ladungstanks

Die im Projekt entworfenen Binnenschiffe verfügen über für diese Schiffe ungewöhnlich schlanke Linien (vergleiche Kapitel 6 auf Seite 53). Bei einem konventionellen Binnenschiff mit völligeren Linien ergeben sich entsprechend Tragfähigkeitsreserven. Zudem ist die Dichte von LNG so gering, dass das Gewicht der Ladung die vergleichsweise schweren Tanks dennoch kompensiert.

Ein Tanksystem mit Drucktanks ist unabhängig von der Schiffsstruktur, eventuell sind jedoch lokale Verstärkungen der Schiffsstruktur an den Auflagerpunkten des Tanks notwendig. Die Verwendung von Membrantanks erscheint nicht zielführend; diese werden entlang der Schiffsstruktur aufgebaut und von dieser getragen. Im Falle von Membrantanks ist ein Neubau daher die bessere Alternative.

Für das Antriebssystem ergeben sich verschiedene Optionen. Zunächst ist es durchaus denkbar, den konventionellen Dieselantrieb zu erhalten. LNG als Ladung kann

unabhängig vom Transport- und Tankkonzept transportiert werden. Soll die Hauptmaschine ausgetauscht werden, so bieten sich zwei verschiedene Motorkonzepte an: zum einen ein reiner Gasmotor, zum anderen ein sogenannter Dual-Fuel Motor, der Diesel und Gas als Treibstoff nutzt. Das erste LNG-Binnenschiff, die ARGONON wurde mit einem Dual-Fuel Motor ausgerüstet, der einerseits einen Anteil Diesel verbrennt, aber zusätzlich Erdgas über die angesaugte Verbrennungsluft aufnimmt, so dass das Verhältnis der beiden Kraftstoffe geregelt werden kann (*Gas-breathing-Dual-Fuel-Engine*). Dieses Konzept wurde danach aufgrund verschiedener technischer Probleme jedoch nicht weiter verfolgt. Eine weit verbreitete Art von Dual-Fuel Motoren ist der sogenannte Zündstrahlmotor. Auch hier kann der Anteil von Gas und Diesel variiert werden. Bei reinem Gasbetrieb wird eine kleine Menge Diesel verwendet, um das Gas im Verbrennungsprozess zu zünden [22]. Vom Umbau eines Diesel- in einen Dual-Fuel Motor wird inzwischen ganz abgesehen, da es sich bei dem Umbau immer um ein Provisorium handelt.

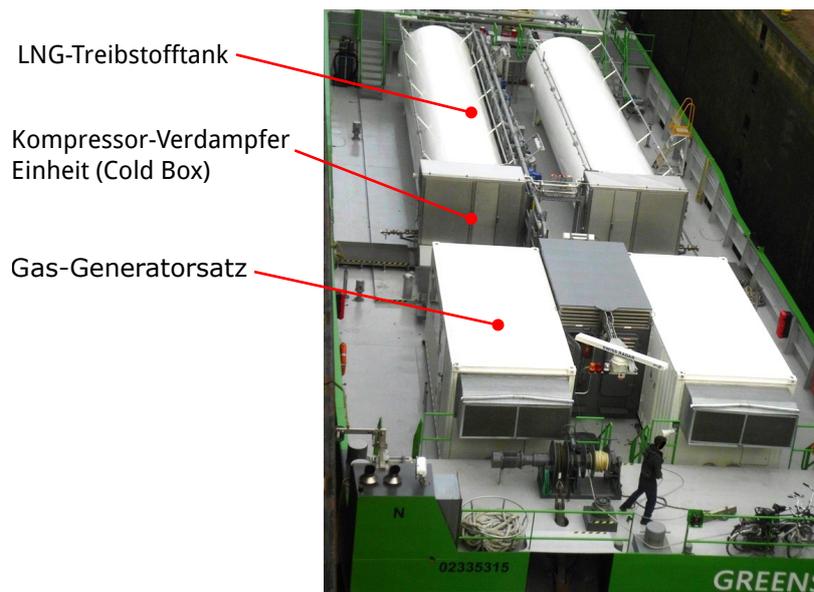


Abb. 5.8: Die TMS GREENSTREAM wird Gas-elektrisch angetrieben. Der Antrieb wurde zudem redundant ausgelegt. Zu sehen sind die beiden LNG-Treibstofftanks, die angeschlossene Cold Box sowie die Einhausungen der Generatorsätze. Entnommen aus [18].

Beim Einbau eines neuen Gasmotors ist ein Gas-sicheres Konzept zu bevorzugen, da dieser ohne besondere Sicherheitsmaßnahmen im Maschinenraum aufgestellt werden kann. Gas-sicher bedeutet, dass alle gasführenden Leitungen doppelwandig sind und auch im Motor bestimmte technische Maßnahmen ergriffen werden, sodass auch im Störfall kein unverbranntes Gas in die Umgebung dringen kann.

Die Aufstellung eines Gas-Gensets zur Versorgung aller zusätzlichen Verbraucher ist empfehlenswert; sämtliche zusätzlichen Verbraucher könnten dann direkt mit dem hier erzeugten Strom betrieben werden und zusätzliche Dieselaggregate würden wegfallen. Wenn nur ein Gasmotor als Hauptmaschine eingebaut wird, sollte zur Sicherung der Manövrierfähigkeit im Störfall des Gassystems ein 4-Wege-Pumpjet im Bug mit Dieselantrieb eingebaut werden. Werden zwei Gasmotoren verwendet, so kann die Einrichtung von zwei unabhängigen Maschinenräumen eine gute Wahl sein. Die verschiedenen Varianten sind in Abbildung 5.9 zu sehen.

Im Maschinenraum beansprucht die sogenannte Gasregelstrecke einen gewissen Raum. Dieser darf bei der Planung nicht vernachlässigt werden. Die Gasregelstrecke regelt die Gaszufuhr zum Motor. Zusätzlich muss eine Kompressor-Verdampfer-Einheit installiert werden, die den vom Motor geforderten Gaszustand hinsichtlich Druck und Temperatur einstellt. Wenn ein separater Treibstofftank verwendet wird, befindet sich diese Einheit meist direkt neben dem Tank bzw. wird mit dem Tank vom Hersteller auf einer Plattform angeboten. Eine Möglichkeit, wie ein Antriebssystem und die Treibstoffversorgung angeordnet sein können, zeigt die TMS GREEN-STREAM, zu sehen in Abbildung 5.8.

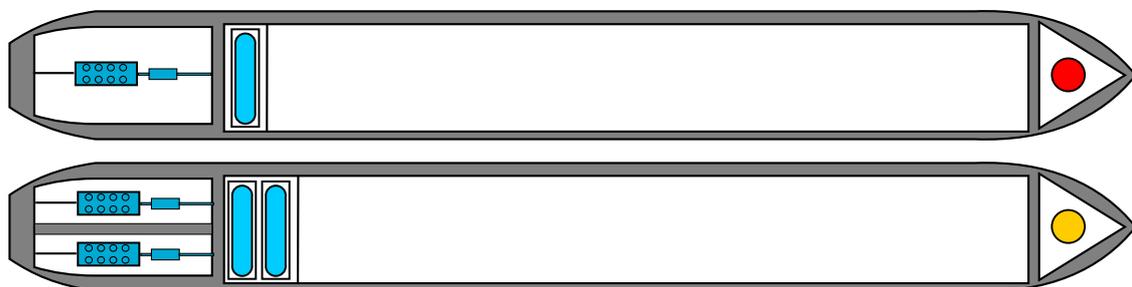


Abb. 5.9: In der oberen Grafik ist eine Lösung mit einem Gasmotor zu sehen. Das Bugstrahlruder sollte dann Diesel-getrieben sein (rot). In der unteren Grafik ist eine Lösung mit zwei unabhängigen Maschinenräumen und Treibstofftankssystemen zu sehen. Das Bugstrahlruder kann hier zum Beispiel Gas-elektrisch angetrieben werden (gelb), da eine Redundanz mit zwei Maschinenräumen gegeben ist.

Für LNG-Binnentankschiffe ist die Doppelhüllenkonstruktion Pflicht, daher erscheinen für den Umbau insbesondere Binnentankschiffe, die bereits über eine Doppelhülle verfügen, geeignet. Die Längsfestigkeit erhalten diese Schiffe auch aus ihrer geschlossenen Deckskonstruktion. Ein geschlossenes Deck ist auch für ein LNG-Binnentankschiff verpflichtend, sodass nach Einbau der Tanks das Deck wieder geschlossen werden muss. Es empfiehlt sich, das neue Deck in die Längsverbände einzubinden.

Ein weiterer Schiffstyp, wäre ein Massengutschiff. Dieses müsste jedoch über eine Doppelhülle verfügen und nach dem Umbau müsste ein geschlossenes Deck ergänzt werden. Ob der wirtschaftliche und finanzielle Aufwand bei diesem Schiffstyp lohnend ist, kann nur im Einzelfall geprüft und bewertet werden. Der Transport von LNG-Tankcontainern kann ohne besondere Umbaumaßnahmen erfolgen, da Tankcontainer nahezu wie normale Frachtstücke behandelt werden können.

Die Umstellung auf einen LNG-Antrieb mit einem separaten Tank wurde auf der EIGER bereits realisiert und hat sich als erfolgreich erwiesen. Besonders hinsichtlich der neuen NRMM (Non Road Mobile Machinery) Emissions-Vorschriften kann LNG eine gute Alternative zu einer Abgasreinigungsanlage für einen Dieselmotor sein.

Die Integration von großen fest eingebauten Ladungstanks in ein bestehendes Schiff ist kritisch zu sehen, da dieses Schiff dann auf die Ladung LNG festgelegt ist ohne dabei die im Projekt aufgezeigten Vorteile eines reinen LNG-Binnentankschiffs, beispielsweise hinsichtlich der hydrodynamischen Optimierung, zu nutzen.

6 Optimierung der Rümpfe mit CFD-Methoden

6.1 Einleitung

Unter der Berücksichtigung der Randbedingungen für den Transport von LNG im definierten Fahrtgebiet sollen Schiffsformen entwickelt werden, die den speziellen Anforderungen der Transportaufgabe effizient gerecht werden. Ausgehend von definierten Schiffsformen werden durch die Anwendung numerischer und experimenteller Verfahren weitere optimierte Formvarianten entwickelt und auf ihre Eignung für den Einsatz insbesondere im flachen Wasser überprüft.

Auf Grund ihrer Effizienz haben sich die numerischen Verfahren zur Untersuchung der Schiffsumströmung in Verbindung mit den klassischen experimentellen Methoden als ein wichtiges Element im Entwurfsprozess von Schiffen durchgesetzt. Durch die Anwendung numerischer Verfahren kann die Anzahl der untersuchten Formvarianten zur Ermittlung der optimalen Schiffsform für eine Transportaufgabe gegenüber experimentellen Untersuchungen mit Modellen deutlich gesteigert werden.

Die Auswirkungen von Formveränderungen auf die Umströmung des Schiffes und deren Visualisierung zur Bewertung der Formvarianten durch den Entwurfsingenieur sind in dieser Vielzahl nur durch numerische Untersuchungen realisierbar und machen den Optimierungsprozess bedeutend effizienter.

Eine experimentelle Validierung der mathematisch ermittelten integralen Größen, wie zum Beispiel den Schiffswiderstand, ist auf Grund der vorhandenen Unsicherheiten hinsichtlich der Genauigkeit bei der Ermittlung des Schiffswiderstandes unabdingbar. Diese Unsicherheiten sind begründet in notwendigen Vereinfachungen bei der Modellierung der Turbulenz. Deshalb werden die Widerstände der unterschiedlichen Formvarianten vergleichend betrachtet und die finalen Schiffsfor-

men werden im Flachwassertank des Development Centre for Ship Technology and Transport Systems (DST) experimentell untersucht.

6.2 Verfahren

Für numerische Untersuchungen an einem Schiff zur Formoptimierung als wesentliches Element des Entwurfsprozesses werden im DST verschiedene Bestandteile des Programmpakets ANSYS eingesetzt. Für die Berechnung inkompressibler, reibungsbehafteter und turbulenter Strömungen kommen standardmäßig die kommerziellen Löser ANSYS-CFX und Fluent zur Anwendung. Beide Löser basieren auf den Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations und beschreiben die Strömungen im Fluid mit den Erhaltungsgleichungen für Masse und Impuls.

Die Strömung an einem Hinterschiff ist im Normalfall unregelmäßig und gekennzeichnet durch eine 3-dimensionale turbulente Strömung. Das Druck- und Geschwindigkeitsfeld unterliegt räumlichen und zeitlichen Schwankungen, die vollständig aufgelöst werden müssen, um die Turbulenz zu beschreiben. Diese Auflösung erfordert erhebliche Rechenleistung, die von aktuell verfügbaren High performance computing (HPC)-Systemen für technisch relevante Problemstellungen nicht bereitgestellt werden kann. Die Anwendung sogenannter statistischer Modelle zur Beschreibung der turbulenten Erscheinungen ersetzt die vollständige Auflösung der Turbulenz. Bei diesen Modellen wird die turbulente Strömung durch einen gemittelten und einen Schwankungswert für die Feldgrößen (Druck und Geschwindigkeit) simuliert. Im DST wird das $k-\omega$ -SST-Turbulenzmodell [15] erfolgreich bei der Formoptimierung von Schiffsrümpfen eingesetzt. Durch die angewandten Löser werden die Erhaltungsgleichungen nach der Finite-Volumen-Methode diskretisiert. Ausführlich werden die angewandten Verfahren in [1] beschrieben.

Eine Formoptimierung auf Basis von numerischen Widerstandsversuchen ist trotz der vorhandenen Unsicherheiten bei der Bestimmung der integralen Größen möglich. Dazu werden die berechneten Widerstände vergleichend betrachtet. Um die Interaktion zwischen Schiffsrumpf und Antriebsorgan zu berücksichtigen, muss der Propeller in die numerische Simulation implementiert werden. Die Integration des vollständig geometrisch aufgelösten Propellers in die numerische Simulation kann die Verhältnisse am Hinterschiff realitätsnah modellieren. Durch die Rotation des

Propellers ist diese Art der Berechnung nur mit transienten Methoden realisierbar und dadurch mit einem hohen Zeitaufwand verbunden, so dass die Anzahl der Formvarianten erheblich reduziert werden müsste. Ein weiterer nicht zu vernachlässigender Punkt ist der Aufwand bei der Erzeugung des Rechengitters für den Propeller. Automatische Verfahren zur Vernetzung des Propellers sind bei den meisten realen Propellern in Düsen nicht geeignet, so dass sich der manuelle Aufwand für den Bearbeiter im Preprocessing stark erhöht. Mit vergleichbar geringem Zeitaufwand und deutlich geringeren Berechnungszeiten lässt sich das sogenannte KSM implementieren. Dabei wird der reale Propeller durch eine Zylinderscheibe, die in Lage und Ausdehnung dem Propeller entspricht, ersetzt. In der Propellerebene werden zusätzliche Quellterme definiert, die den Schub und das Drehmoment des Antriebs wiedergeben. Schub und Drehmoment müssen so gewählt werden, dass sie mit dem Widerstand des Schiffes und dem Schub einer vorhandenen Düse im Gleichgewicht stehen. Mit der mittleren Geschwindigkeit am Ort des Propellers können der Schub und das Drehmoment aus dem Freifahrt diagramm des Propellers bzw. dem Freifahrt diagramm der Propellerdüsenkombination zugeordnet werden. Die radiale Verteilung der axialen und tangentialen Kräfte in der Propellerebene wird durch Funktionen, die die lokale Verteilung der am Propeller induzierten Kräfte möglichst genau abbilden sollen, zugeordnet.

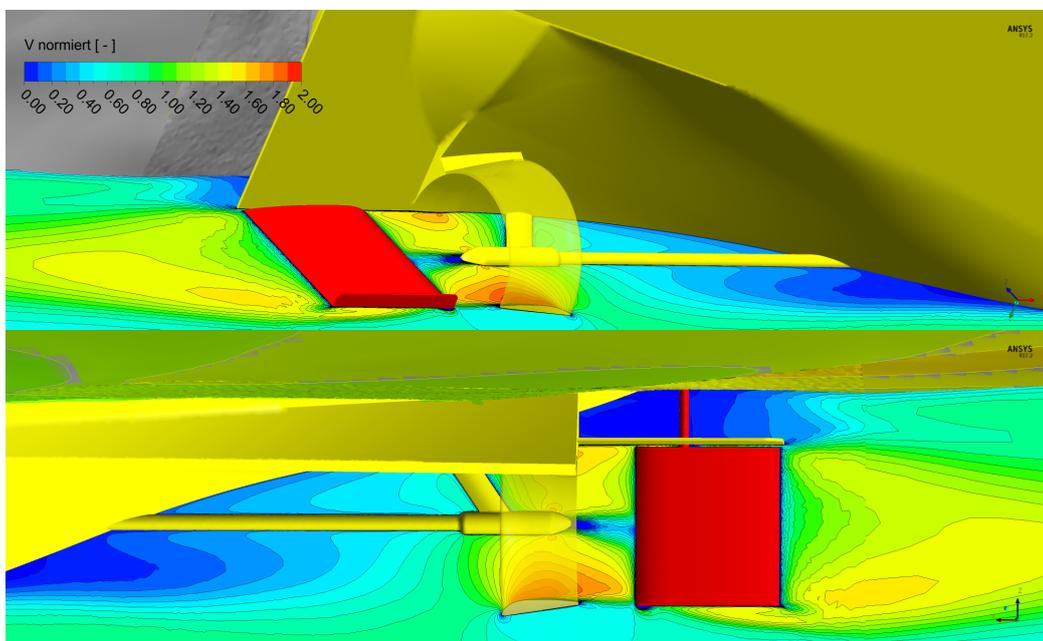


Abb. 6.1: Propellerwirkung durch KSM

Durch dieses Verfahren können die veränderte Druckverteilung am Schiffskörper und das durch den Antrieb induzierte Geschwindigkeitsfeld simuliert werden. Auf Grund der über den Umfang des Propellers gemittelten Werte für Schub und Drehmoment werden die instationären Effekte, wie zum Beispiel die Druckimpulse am Hinterschiff, nicht erfasst. Für die vergleichende Optimierung von Schiffsförmern, deren Strömungsgrößen mit der gleichen Methode berechnet werden, hat sich dieses Verfahren bewährt.

Sofern die Berücksichtigung des induzierten Wellenbildes am Rumpf für die Optimierung der Schiffskörper relevant war, wurde diese mit der Volume-of-Fluid (VOF) Methode ermittelt.

6.3 Randbedingungen

Entsprechend dem Einsatzgebiet der Schiffe werden die Betriebsbedingungen für jeden Berechnungsfall eindeutig definiert. Das sind im Wesentlichen die Schiffsgeschwindigkeit, der Tiefgang und die geometrischen Begrenzungen durch die Schiffsförm und die Topologie des Gewässers. Im Gegensatz zur Realität ist die Ausdehnung des Berechnungsgebietes endlich. Die Randbedingungen müssen so gewählt werden, dass die Vorgaben des Betriebspunktes weitestgehend realisiert werden. Beim angewandten Finite-Volumen-Verfahren wird ein Lösungsgebiet definiert, welches mit diskreten Volumenelementen den Berechnungsraum beschreibt.

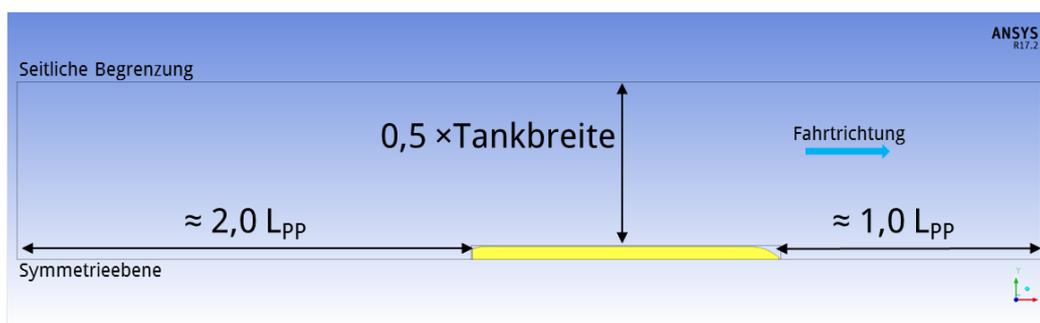


Abb. 6.2: Ausdehnung des Lösungsgebietes

Die Ränder, an denen die Unendlichkeit des Lösungsgebietes durch endliche Grenzen ersetzt wird, müssen so gewählt werden, dass durch ihre Lage das Ergebnis der Berechnung nicht unzulässig beeinflusst wird. Die seitlichen Begrenzungen sind

festgelegt durch die Breite des Flachwassertanks des DST, da alle Optimierungen im Modellmaßstab erfolgen. Die Ausdehnung vor und hinter dem Schiff kann variieren, da die Positionen des Ein- und Austritts zum Lösungsgebiet im Verhältnis zur Schiffs- bzw. Schubverbandslänge gesetzt wurden.

Im Folgenden werden die angewandten numerischen Randbedingungen beschrieben und die Zuordnung zum Lösungsgebiet in Abbildung 6.3 beispielhaft dargestellt.

Einlass Der Einströmrand ist eine Dirichlet-Randbedingung, an dem eine homogene Anströmung vorgegeben wird, die der Schiffsgeschwindigkeit entspricht. Die Richtung der Geschwindigkeit ist normal zur Eintritts-Fläche. Weitere Parameter, wie die Intensität der Turbulenz, können am Inlet definiert werden, um die Strömung im Lösungsgebiet gezielt zu beeinflussen.

Auslass 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 und verbessert die Stabilität der Berechnung.

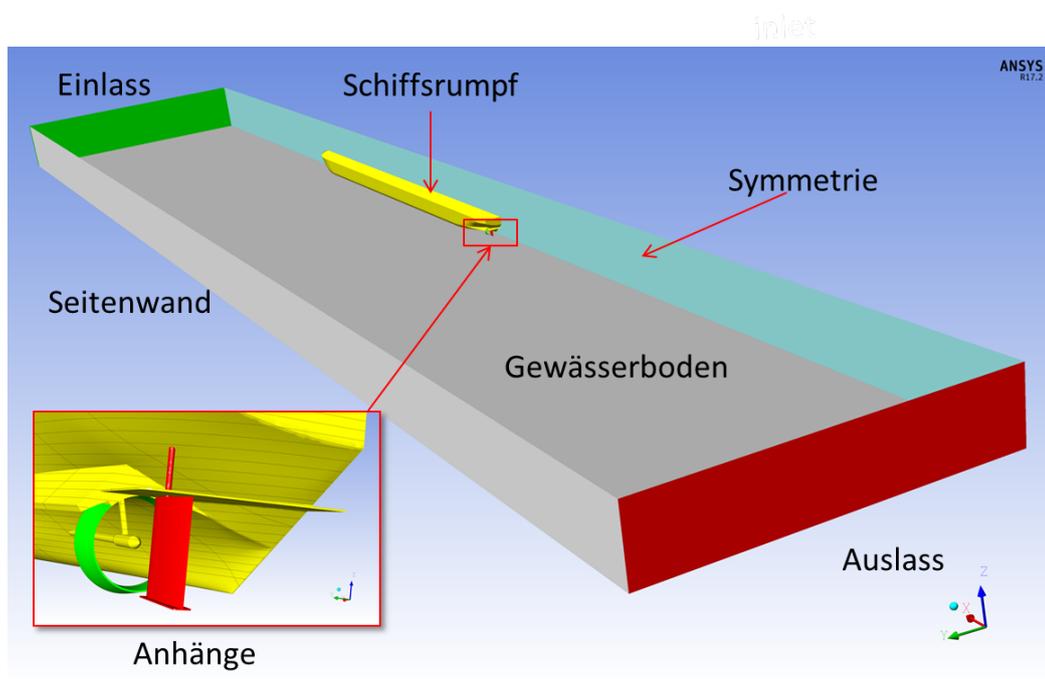


Abb. 6.3: Schematische Darstellung des Lösungsgebietes (Zweischrauber)

Schiffsrumpf Reibungsbehaftete Wände, an denen die Haftbedingung gilt (WALL NO SLIP). Diese Randbedingung gilt auch für alle implementierten Schiffsanhänge und die Koppelstelle am Verband

Seitenwand Die seitliche Begrenzung des Lösungsgebietes wird als reibungsbehaftete Wand definiert, an der die Haftbedingung gilt (WALL NO SLIP).

TOP Die Randbedingung an der oberen Begrenzung des Lösungsgebietes ist abhängig von der Art der Berechnungsmethode. Bei der VOF-Methode, bei der die Verformung der Wasseroberfläche ermittelt wird, ist diese Wand als OPENING weit oberhalb des Schiffes definiert. Für Double-Body Berechnungen wurde diese Begrenzung auf den Ruhewassertiefgang gesetzt und als FREE SLIP WALL definiert. Diese Art der Berechnung ist für mäßige Verformungen der Wasseroberfläche für die vergleichende Optimierung des Schiffsrumpfes hinreichend.

6.4 Gittergenerierung

Für numerische Berechnungen mit RANSE-Lösern, die zur Lösung der Gleichungen des mathematischen Modells die Finite-Volumen-Methode (FVM) anwenden, muss das physikalische Strömungsgebiet in eine endliche Anzahl von Kontrollvolumen unterteilt werden. In diesen einzelnen Volumenelementen werden die Strömungsgrößen des Lösungsgebietes berechnet. Die Aufteilung des Berechnungsgebietes kann unstrukturiert mit Tetraederelementen beziehungsweise blockstrukturiert mit Hexaedern realisiert werden. Bezüglich der Rechenzeit, der Auflösung der freien Wasseroberfläche und der Vernetzung des Fernfeldes liegen die Vorteile klar bei blockstrukturierten Gittern. Bei recht komplexer Geometrie, wie man sie bei Binnenschiffen häufig antrifft, verbunden mit der Integration aller Anhänge, ist die Erzeugung von Hexaedergittern, die eine orthogonale Aufteilung erfordern, mit ausreichender Qualität im Nahbereich des Schiffes nicht möglich.

Unstrukturierte Gitter, bestehend aus Tetraeder- und Prismenelementen, haben den Vorteil, dass sie halbautomatisch erzeugt werden können. Mit dieser Gitterart sind komplexe Geometrien mit ausreichender Qualität im Nahbereich des Schiffes diskretisierbar. Durch den Benutzer muss definiert werden, in welchen Bereichen das Strömungsgebiet feiner vernetzt wird, um die Schiffsgeometrie und mögliche Strömungsgradienten, induziert durch die Fahrt des Schiffes, im Berechnungsgebiet

aufzulösen. Aber auch diese Methode hat Nachteile, die insbesondere bei der Diskretisierung von flachen Gewässern auftreten. Die Abbildung 6.4 zeigt die Diskretisierung des Lösungsgebietes mit Tetraedern und Prismen. Die Anzahl der notwendigen Volumenelemente steigt auf ungefähr 100 Millionen Zellen an, obwohl die freie Wasseroberfläche nicht ausreichend fein in vertikaler Ausdehnung aufgelöst wurde und der Übergang zu den Prismenschichten am Boden sehr grob ist. Eine notwendige höhere Auflösung würde zu Zellanzahlen führen, die keine praktikablen Optimierungszyklen erlauben und die Speicherkapazitäten der vorhandenen HPC-Systeme übersteigt.

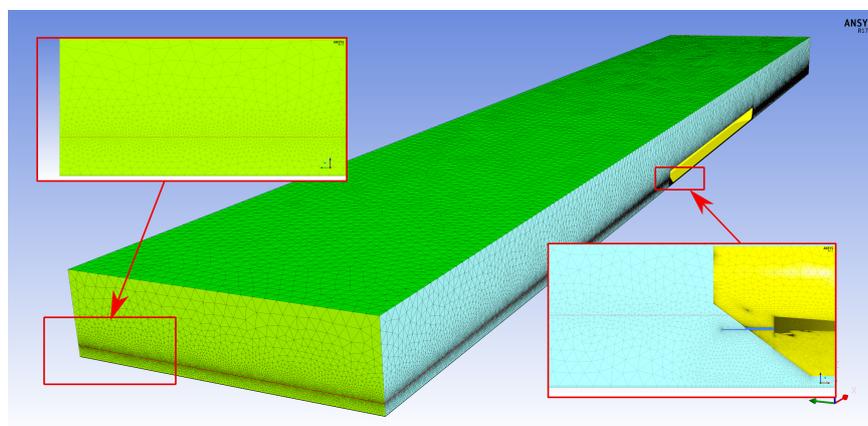


Abb. 6.4: Tetraedergitter gesamtes Lösungsgebiet (Zweischrauber)

In einem Optimierungsprozess ist es notwendig, eine Vielzahl von Berechnungen durchzuführen. Aus diesem Grund muss die Berechnungszeit für die Untersuchung der einzelnen Formvarianten minimal gehalten werden, da die Dauer der numerischen Berechnung mit zunehmender Zellanzahl ansteigt. Die Genauigkeit der numerisch ermittelten Strömungsgrößen darf durch die Minimierung der Anzahl der Volumenelemente jedoch nicht beeinflusst werden. Bei der numerischen Berechnung von Schiffen in unbegrenzter Wassertiefe wird das Problem dadurch gelöst, in dem die Größe der Berechnungszellen mit wachsendem Abstand zum Schiff ansteigt. Diese Vorgehensweise ist bei Flachwasserberechnungen nur begrenzt einsetzbar, da die maximale Größe der Zellen durch die Wassertiefe festgelegt ist.

Eine Lösung für dieses Problem ist der Einsatz von hybriden Gitterstrukturen. Bei dieser Art der Diskretisierung des Lösungsgebietes wird das Nahfeld mit Tetraederelementen und das Fernfeld mit Hexaedern (Abbildung 6.5) gefüllt. Beide Einzelgitter werden mit einem General Grid Interface (GGI) verbunden, in dem die Strö-

mungsgrößen interpoliert werden, da die Zellen am Interface keine 1:1 Verbindung ermöglichen. Die erforderliche Auflösung der Grenzschicht an den Wänden wurde durch die Integration von Prismenelementen realisiert (Abbildung 6.6).

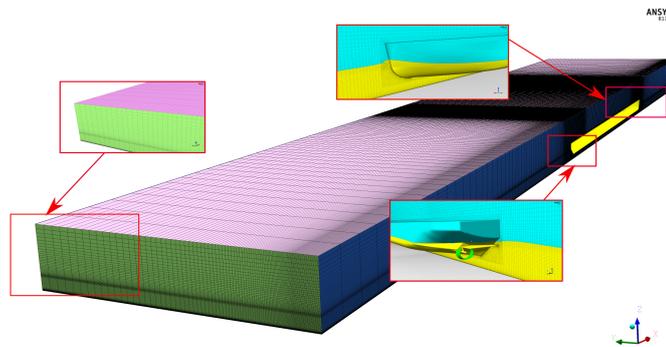


Abb. 6.5: Hexaedergitter gesamtes Lösungsgebiet (Zweischrauber)

Im Rahmen dieses Projektes wurden unterschiedliche Diskretisierungsansätze zur Erzeugung des Lösungsgebietes untersucht und für die Berechnungen eingesetzt. Der Bereich der unstrukturierten Teilgitter wurde in seiner Ausdehnung variiert und minimiert, um die Gesamtzellanzahl zu reduzieren. Auf Grund der notwendigen feinen Auflösung der Verformung der freien Wasseroberfläche konnte die Anzahl auf ein Minima von ungefähr 6 Millionen Elementen reduziert werden. Für die Berechnungsfälle am Einschrauber, bei dem die Symmetrie der Geometrie mit Propellerwirkung nicht mehr ausgenutzt werden konnte, und beim Koppelverband erhöhte sich die Anzahl der Volumenelemente im Lösungsgebiet auf 20 Millionen.

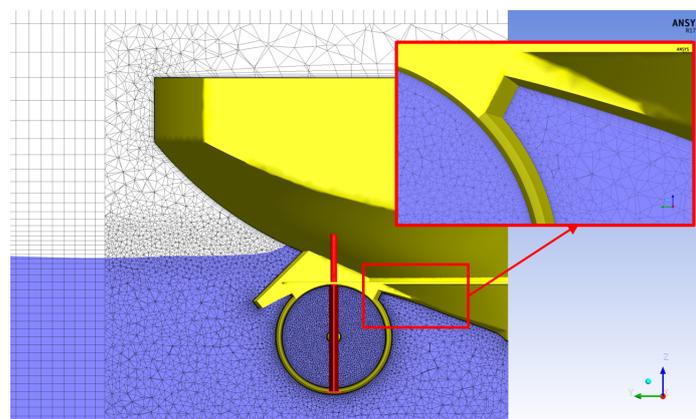


Abb. 6.6: Hybridgitter (Zweischrauber)

6.5 Definition und Beschreibung der Optimierungsroutinen

Die Festlegung der Berechnungsfälle für die numerische Optimierung orientiert sich an der Definition der repräsentativen Einsatzszenarien. Aus den definierten Szenarien ergeben sich die maximalen Schiffsabmessungen, die Fahrtgebiete, die durchschnittlich zu erwartende Wassertiefe, der Tiefgang der Schiffseinheiten und die Geschwindigkeit der LNG-Tanker bei der gewählten Wassertiefe.

Für 3 Schiffstypen wurden die Berechnungsfälle in den Tabellen 6.1 und 6.2 gewählt. Der Einschrauber wurde in den Einsatzszenarien Neckar 1 bis Neckar 3, der Koppelverband im Einsatzszenario Rhein 2 und der Zweischrauber im Szenario Rhein 1 und Rhein 2 untersucht.

Tab. 6.1: Einsatzszenarien Neckar

	Neckar 1	Neckar 2	Neckar 3
Schiffsgeschwindigkeit V_S	12,0 km/h	12,5 km/h	15 km/h
Wassertiefe h	2,8 m	2,8 m	4,0 m
Tiefgang T	2,0 m	2,0 m	2,0 m

Tab. 6.2: Einsatzszenarien Rhein

	Rhein 1	Rhein 2
Schiffsgeschwindigkeit V_S	12,0 km/h	15 km/h
Wassertiefe h	2,8 m	4,0 m
Tiefgang T	2,0 m	2,0 m

Alle numerischen Berechnungen wurden im Modellmaßstab $\lambda = 16$ unter Berücksichtigung des Wellenwiderstandes, teilweise mit Propellerwirkung und Implementierung der Schiffsanhänge, wie Propellerwelle, Düse und Ruder realisiert. Sofern

die Veränderung der dynamischen Schwimmelage durch die Fahrt des Schiffes Berücksichtigung fand, wurde diese abgeschätzt bzw. aus vorhandenen Modellversuchsergebnissen übernommen.

Die qualitative Bewertung der Optimierungsvarianten wurde durch die Auswertung folgender Informationen aus den numerischen Berechnungen realisiert:

- Verformung der Wasseroberfläche
- Druckverteilung an der Außenhaut des Leichters
- Geschwindigkeit in Betrag und Richtung im Nahfeld des Schiffes
- Vergleichende Betrachtung des Widerstandes
- Ausdehnung vorhandener Rückstromgebiete im Zustrom zum Propeller

Das Ziel der Optimierung der Schiffsformen ist die Minimierung des Widerstandes für die jeweilige Transportaufgabe und die Homogenisierung der Propellerzuströmung, um die Effizienz des Antriebes zu gewährleisten.

6.6 Untersuchungen mit verändertem Kimmradius

Ausgehend vom Anfangsdesign des für die Fahrt auf dem Rhein bis Basel entworfenen Zweischraubers mit einer Länge von 135 m und einer Breite von 11,4 m wurde der Einfluss von unterschiedlichen Kimmradien auf die Umströmung des Tankschiffes numerisch untersucht.

Die Größe des Kimmradius r_K hat einen wesentlichen Einfluss auf die Umströmung des Hinterschiffes und wird in der Binnenschifffahrt häufig aus baulichen Gründen relativ klein festgelegt. Aus hydrodynamischer Sicht sollte der Kimmradius größtmöglich gewählt werden, da eine Maximierung dieser Radien die Völligkeit des Schiffes verringert und zu einer verbesserten Hinterschiffsumströmung bzw. Propelleranströmung führt. Für die Ausgangsvariante Rhein A wurde ein Radius $r_K = 0,4 \text{ m}$ gewählt. Dieser wurde in der Variante Rhein B auf $r_K = 1,3 \text{ m}$ erhöht.

Die Abbildungen 6.7 bis 6.10 zeigen die entworfenen Schiffsformen für den Rhein im Vergleich der beiden Varianten A und B schematisch. Diese Geometrien bilden die Grundlage für die numerischen Untersuchungen.

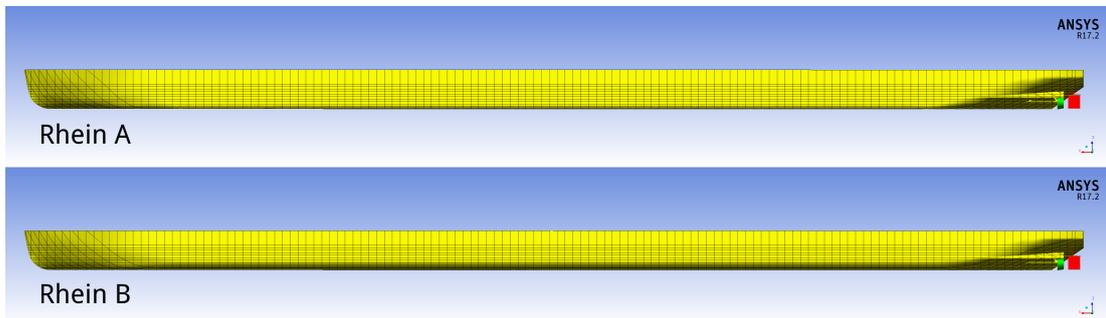


Abb. 6.7: Seitenansicht über Alles - Varianten Rheintanker (Zweischrauber)

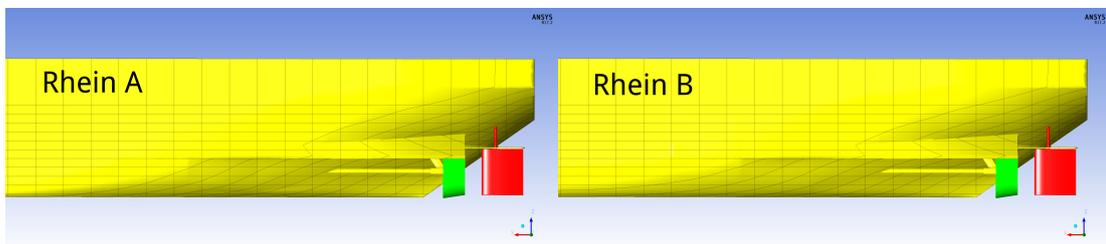


Abb. 6.8: Seitenansicht Heck - Varianten Rheintanker

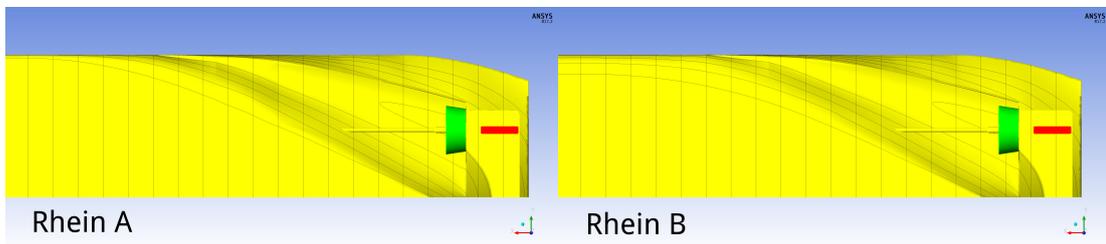


Abb. 6.9: Ansicht von unten Heck - Varianten Rheintanker

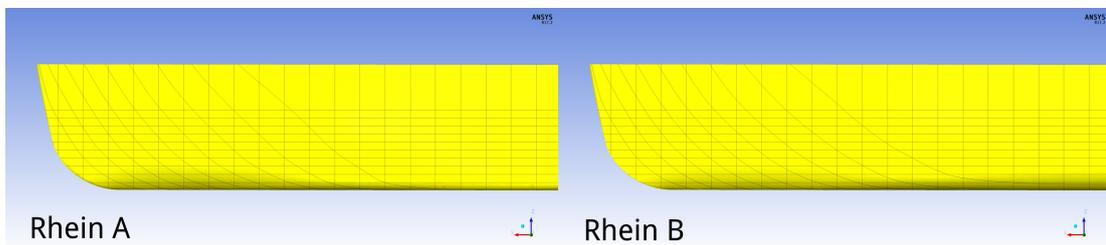


Abb. 6.10: Seitenansicht Bug - Varianten Rheintanker

Tab. 6.3: Hauptparameter der Rheinschiffe

	Rhein A	Rhein B
Länge über Alles $L_{üA}$	135,0 m	135,0 m
Breite auf Spant B	11,44 m	11,44 m
Tiefgang T	2,0 m	2,0 m
Verdrängung ∇	2750 m ³	2680 m ³
Kimradius r_K	0,4 m	1,3 m
Blockkoeffizient C_B	0,891	0,868
Hauptspantvölligkeit C_M	0,997	0,970

Die Abbildungen 6.7 bis 6.10 lassen erkennen, dass der Entwurf der Tankschiffvariante Rhein B kein neuer Entwurf ist und auf der Ausgangsvariante Rhein A basiert. Die Schiffslinien an Bug und Heck sollten beibehalten werden. Es wurde lediglich das neue Mittschiff mit verändertem Kimradius in die Schiffsenden eingestragt. Die Abbildung 6.11 zeigt die Veränderungen der Spantlinien im Vergleich.

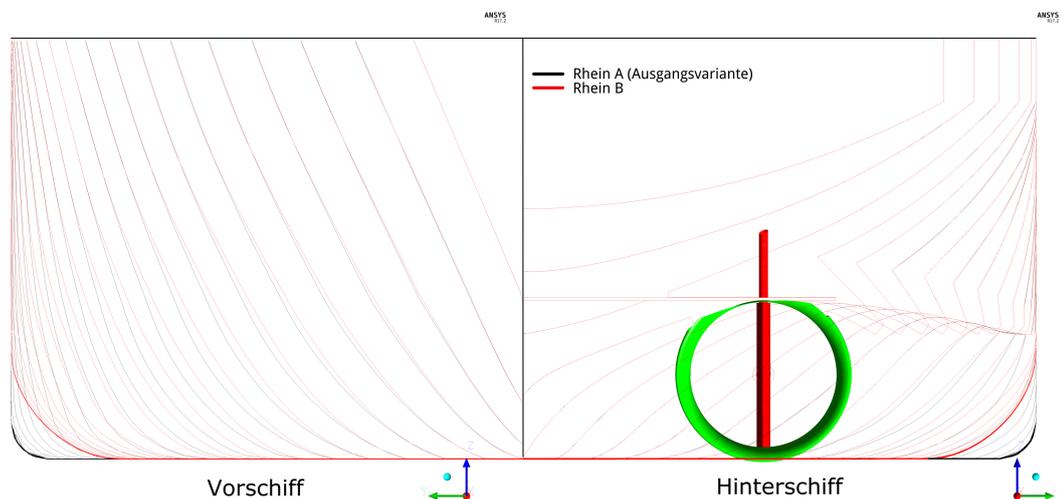


Abb. 6.11: Vergleich der Spanten Variante Rhein A und B

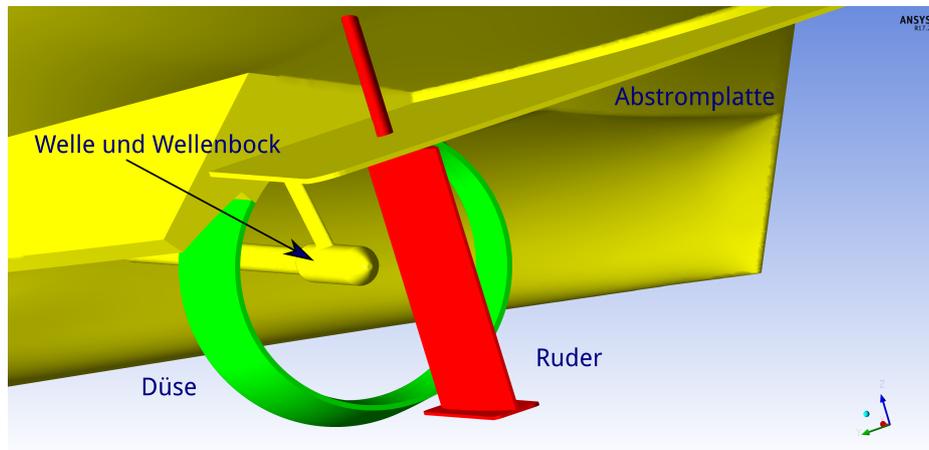


Abb. 6.12: Implementierte Anhänge am Zweischrauber

Die Gestaltung des Hinterschiffes mit dem Antriebsorgan ist gerade bei Binnenschiffen von besonderer Bedeutung. Durch die extremen Flachwasserbedingungen kann bei nicht optimaler Hinterschiffgestaltung der Wirkungsgrad des Propulsionsorgans stark eingeschränkt werden. Des Weiteren können unerwünschte Effekte, wie Lufteintrag zum Propeller und starke Ablöseerscheinungen, auftreten. Aus diesem Grund muss die Propeller-Düsenkombination optimal in den Tunnel eingepasst werden.

Eine weitere effektive Maßnahme zur Verbesserung der Strömungsverhältnisse am Hinterschiff ist die Integration einer sogenannten Abstromplatte, die hinter dem Propeller oberhalb des Ruders angebracht wird. Diese Platte sorgt für eine Vergleichmäßigung des Geschwindigkeitsfeldes hinter dem Propeller und verhindert Lufteinträge zum Propeller über das Heck. Bei der Gestaltung des hier optimierten Zweischraubers für den Rhein wurde die Abstromplatte in den Entwurf integriert und das Hinterschiff so gestaltet, dass der Zustrom zum Propeller nicht gestört wird.

Zur Überprüfung dieser Entwurfsmaßnahmen wurden alle Anhänge (Welle, Wellenbock, Düse, Ruder und Abstromplatte) bei den numerischen Untersuchungen mit Propellerwirkung berücksichtigt. Die dynamische Schwimmelage der Tankschiffe, der für das KSM erforderliche Propellerschub und das Drehmoment wurden für beide Varianten mit gleichen Werten vordefiniert und mit Daten aus Modellversuchen abgeglichen. Der Düsenschub ergibt sich aus der Wirkung des Propellers. In der Tabelle 6.4 sind für die Einsatzszenarien Rhein 1 und Rhein 2 (siehe Seite 61) die Vorgaben für die numerischen Untersuchungen mit Propellerwirkung zusammengefasst.

Tab. 6.4: Vorgaben numerischer Propulsionspunkt

	Rhein 1	Rhein 2
Wassertiefe h	0,175 m	0,25 m
Schiffsgeschwindigkeit V_S	0,869 m/s	1,044 m/s
Tiefgang T	0,125 m	0,125 m
Absenkung Z_{VM}	16,9 mm	13,8 mm
Trimm Θ	0,0685°	0,01183°
Propellerschub T_P	6,825 N	6,6485 N
Drehmoment Q	0,126 Nm	0,1225 Nm

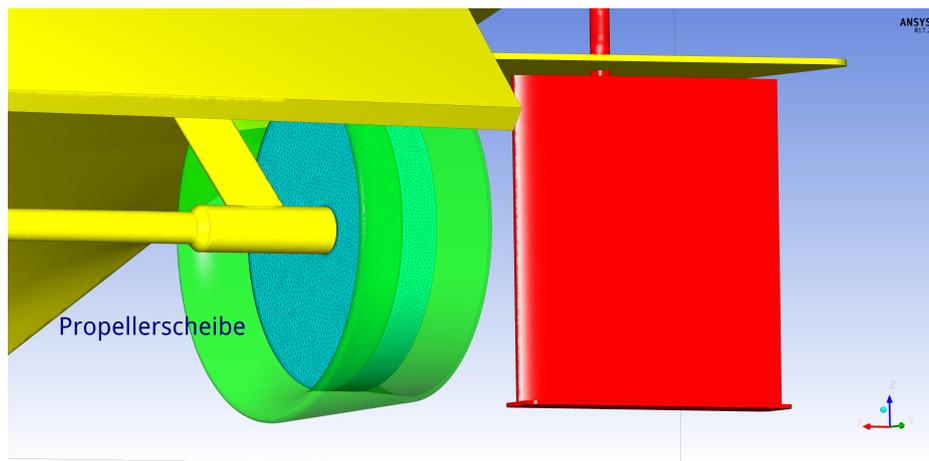


Abb. 6.13: Zylinder für Kraftscheibenmodell in Düse

Durch notwendige Vereinfachungen bei der Anwendung von numerischen Verfahren zur Strömungsberechnung am Schiff (z.B. Turbulenzmodelle) ist die Genauigkeit des berechneten Widerstandes noch nicht zuverlässig. Aus diesem Grund werden die unterschiedlichen Formvarianten im Entwurfsprozess qualitativ gegenübergestellt.

6.6.1 Vergleich Berechnungsergebnisse Rheintanker

Zur Beurteilung der Güte des Entwurfs wird das Druck- und Geschwindigkeitsfeld im Lösungsgebiet für jede Schiffsvariante ausgewertet und verglichen. Aus diesen Größen lassen sich Druckverhältnisse am Rumpf, Rückstromgebiete, der Verlauf von schiffsnahen Stromlinien und die Veränderung des Wellenbildes in Folge der Fahrt des Schiffes darstellen.

Tab. 6.5: Beiwerte und Koeffizienten

Dimensionslose Größe	Gleichung
Druckkoeffizient c_p	$Druck / (\frac{\rho}{2} \cdot V_S^2)$
Wellenbildung d_z	$(Z_{lokal} - Tiefgang) / L_{PP} \cdot 100 [\%]$
Geschwindigkeit	V_{lokal} / V_S

Der Druck, die Geschwindigkeit und die Verformung des Wellenbildes werden, wenn möglich, als dimensionslose Werte dargestellt (Tabelle 6.5). Die dimensionslose Darstellung der Strömungsgrößen wird bei allen numerischen Untersuchungen in diesem Projekt angewandt.

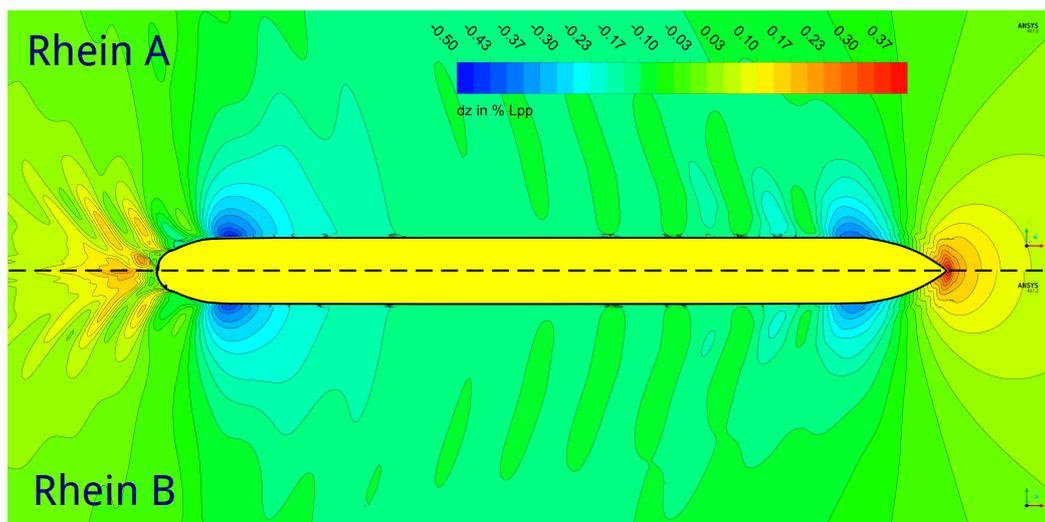


Abb. 6.14: Rheintanker - Verformung der Wasseroberfläche (Rhein 1)

In der Abbildung 6.14 wurde die Wellenbildung der beiden Rheintankschiffe gegenübergestellt. Durch die Veränderung der Kimmradien konnte das Wellenbild lokal verbessert werden. Das Wellental an der vorderen und hinteren Schulter wurde minimiert und eine Homogenisierung der Wellenbildung hinter dem Schiff konnte erreicht werden.

Stromlinien sind eine Möglichkeit, den Zustrom zum Propeller zu visualisieren. Unstetigkeiten der Stromlinien weisen auf Probleme im Strömungsfeld hin. Blau eingefärbte Stromlinien markieren eine Verzögerung des Geschwindigkeitsfeldes. Die Abbildung 6.15 zeigt, dass durch die geometrischen Veränderungen am Schiffsrumpf der Verlauf der Stromlinien am Beginn des Hinterschiffes verbessert werden konnte. In den Bereichen, in denen Rückstromgebiete auftreten (Abbildung 6.16 bis 6.18), war eine Verbesserung im Verlauf der Stromlinien nicht zu erreichen. Die Rückstromgebiete am Hinterschiff konnten am Übergang vom Schiffsboden in den Tunnel verändert werden, eine Minimierung im Zustrom zum Propeller konnte aber nicht nachgewiesen werden. Das Nachstromgebiet zwischen den Düsen blieb unverändert und ist bei extremen Flachwasserbedingungen von $h/T = 1,4$ auch nicht vermeidbar.

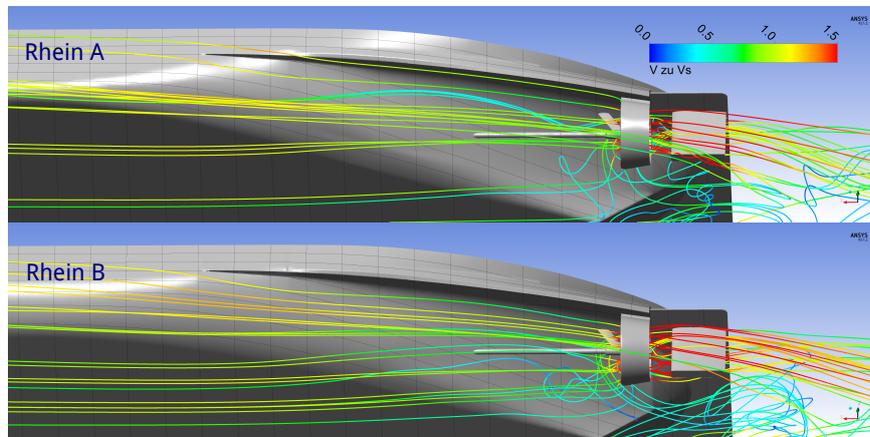


Abb. 6.15: Rheintanker - Stromlinien am Hinterschiff (Rhein 1)

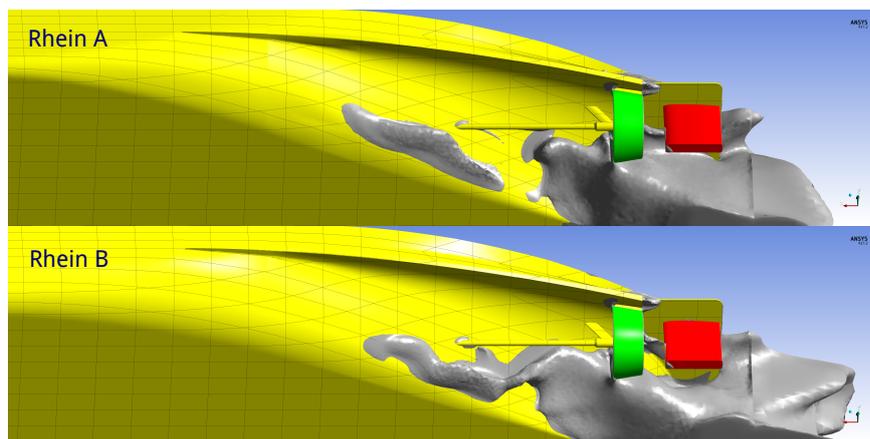


Abb. 6.16: Rheintanker - Rückstrom (3D) am Hinterschiff (Rhein 1)

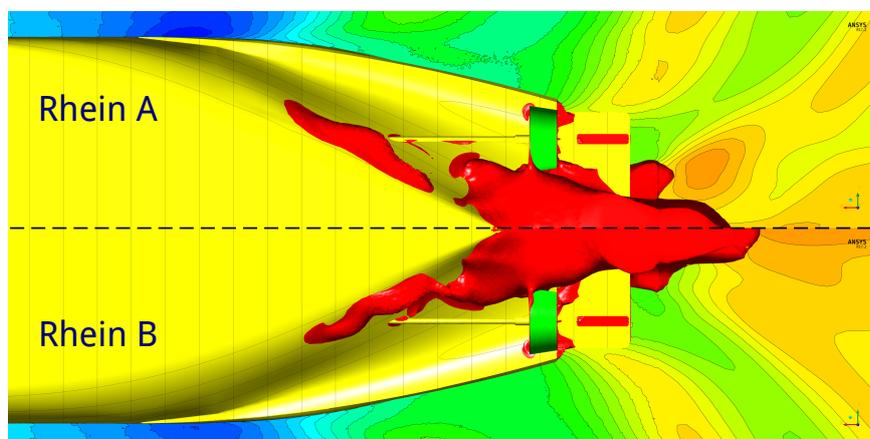


Abb. 6.17: Rheintanker - Rückstrom (Ansicht Boden) am Hinterschiff (Rhein 1)

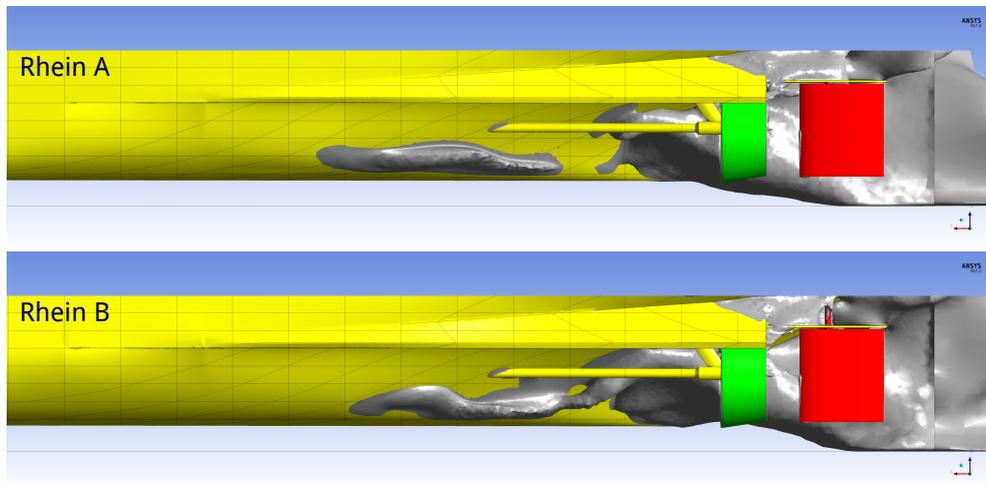


Abb. 6.18: Rheintanker - Rückstrom (Ansicht Seite) am Hinterschiff (Rhein 1)

Entsprechend den Wellenbildern aus Abbildung 6.14 auf Seite 67 verringern sich auch die Unterdruckgebiete am Vor- und Hinterschiff der Variante Rhein B (Abbildung 6.19). Auch das Unterdruckgebiet am Beginn des Hinterschiffes im Tunnelbereich wurde minimiert und die Druckbeiwerte homogenisiert.

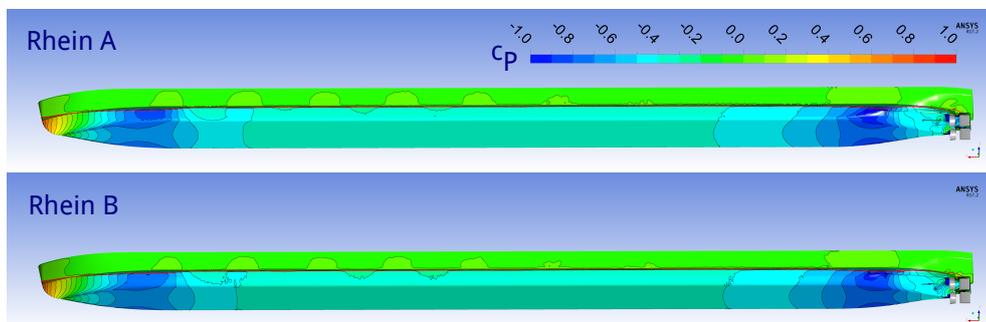


Abb. 6.19: Rheintanker - Druckbeiwerte c_p (Rhein 1)

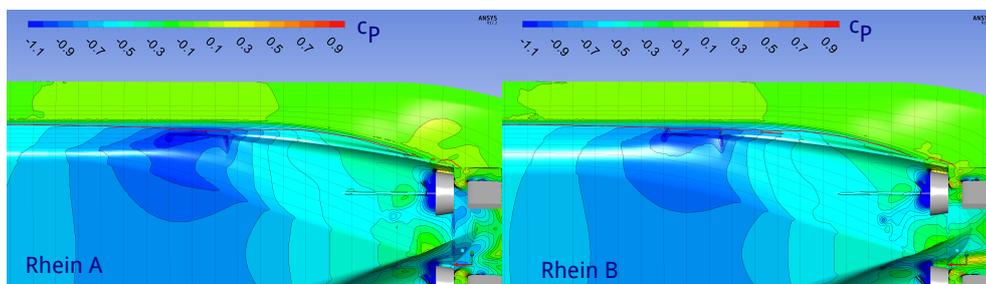


Abb. 6.20: Rheintanker - Druckbeiwerte c_p am Heck - 3D (Rhein 1)

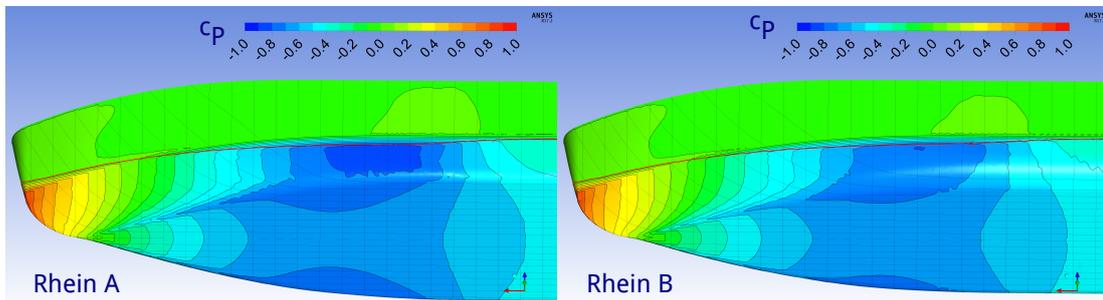


Abb. 6.21: Rheintanker - Druckbeiwerte c_p am Bug - 3D (Rhein 1)

Die Untersuchungen im 2. Einsatzszenario Rhein 2 mit beiden Schiffstypen ergaben ähnliche Verbesserungen im Wellenbild, bei der Druckverteilung am Schiffsrumpf und dem Verlauf der Stromlinien im Zustrom zum Propeller. Die Veränderungen gegenüber der Ausgangsvariante sind jedoch etwas moderater. Bei der Ausbildung der Rückstromgebiete sind kaum Veränderungen erkennbar. Diese treten, wie erwartet, aber nur noch zwischen den installierten Düsen auf.

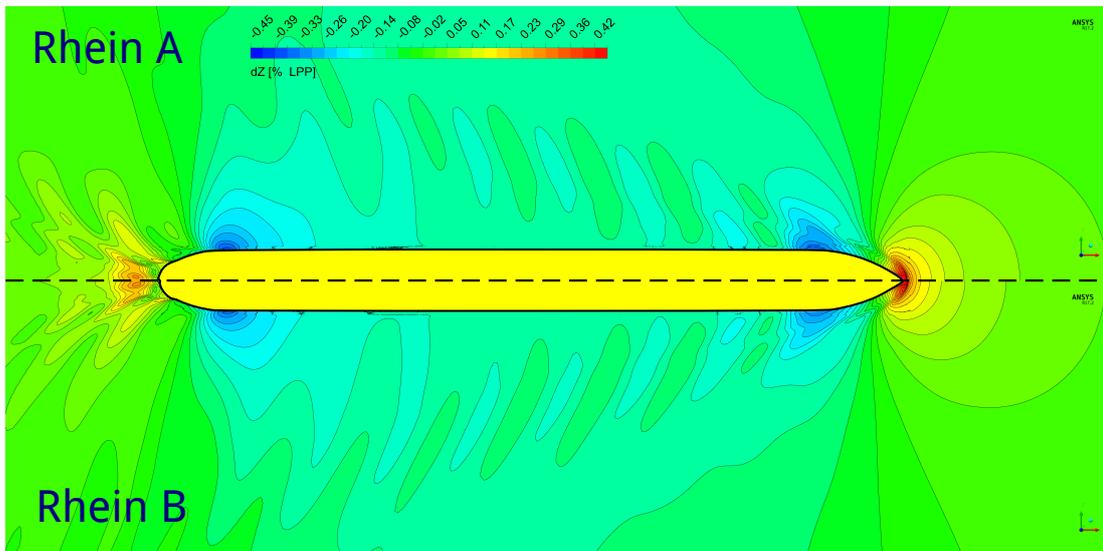


Abb. 6.22: Rheintanker - Verformung der Wasseroberfläche (Rhein 2)

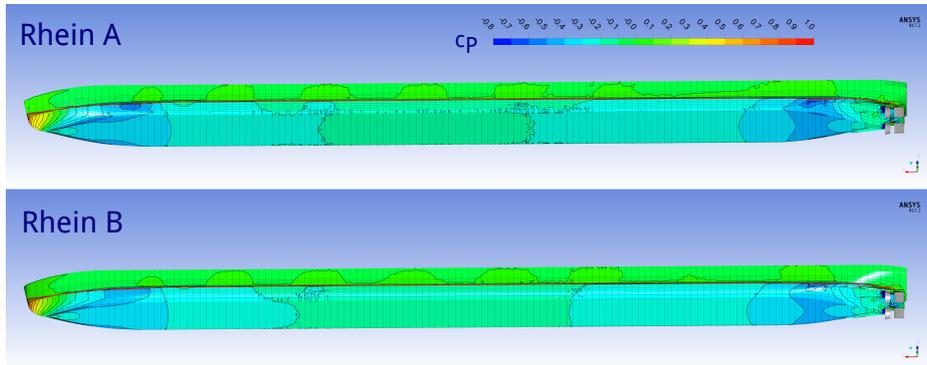


Abb. 6.23: Rheintanker - Druckbeiwerte c_p (Rhein 2)

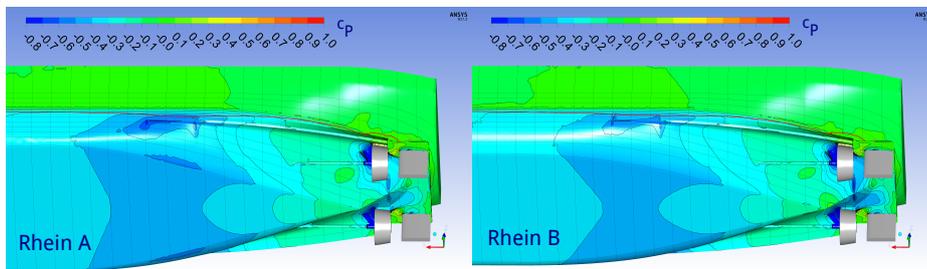


Abb. 6.24: Rheintanker - Druckbeiwerte c_p am Heck - 3D (Rhein 2)

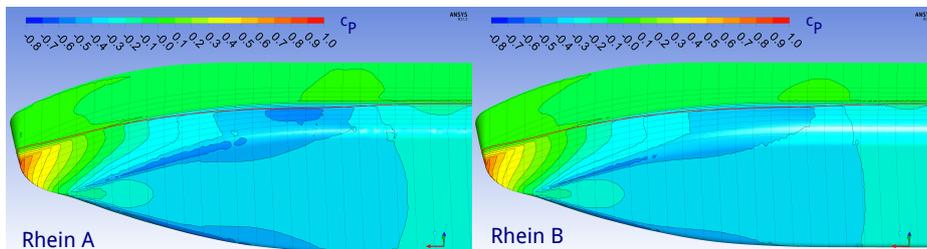


Abb. 6.25: Rheintanker - Druckbeiwerte c_p am Bug - 3D (Rhein 2)

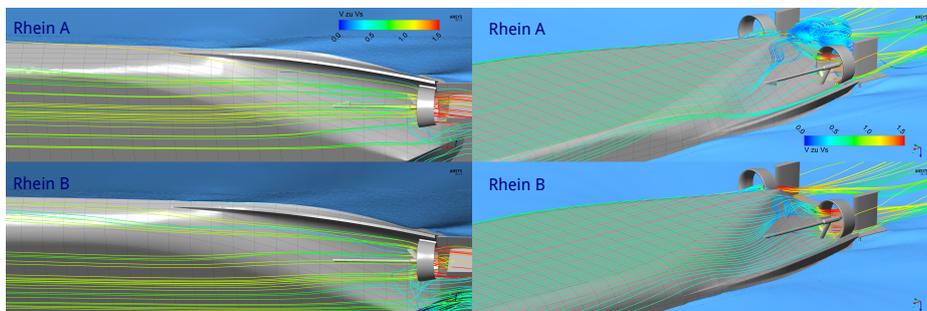


Abb. 6.26: Rheintanker - Stromlinien am Hinterschiff (Rhein 2)

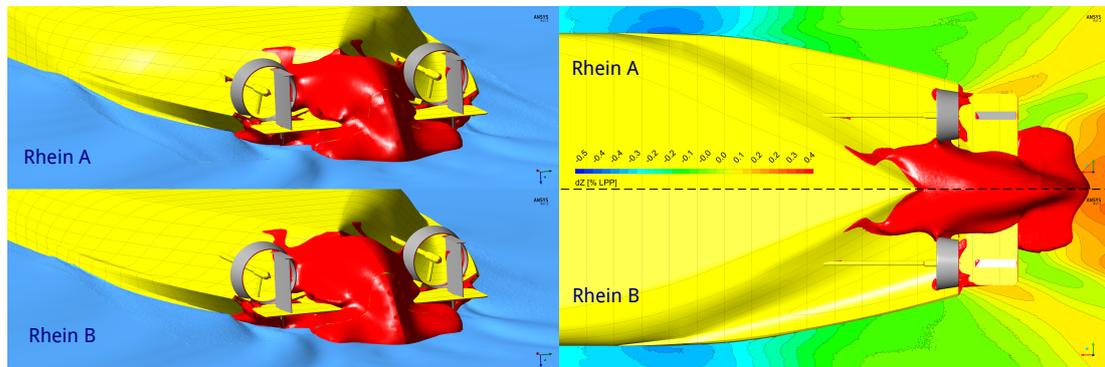


Abb. 6.27: Rheintanker - Rückstrom am Hinterschiff (Rhein 2)

Tab. 6.6: Vergleich der Widerstände der Rheinschiffe

Szenario	R_T Rhein A	R_T Rhein B	ΔR_T
Rhein 1	24,60 N	23,18 N	-5,77 %
Rhein 2	24,16 N	22,70 N	-6,04 %

Die durchgeführten Formmodifikationen am Rheintankerschiff haben qualitativ und quantitativ zur Verbesserung der Strömungsverhältnisse am Schiffsrumpf geführt. Die Ausbildung von Rückstromgebieten konnte unter extremen Flachwasserbedingungen nicht verhindert werden. Die numerischen Berechnungen ergaben jedoch eine Reduzierung des Widerstandes für beide Einsatzszenarien.

Numerische Untersuchungen mit der Großausführung bestätigen, dass die im Modellversuch auftretenden Rückstromgebiete im Großversuch auch unter extremen Flachwasserbedingungen weniger stark ausgeprägt sind. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in den folgenden Abbildungen zusammengefasst.

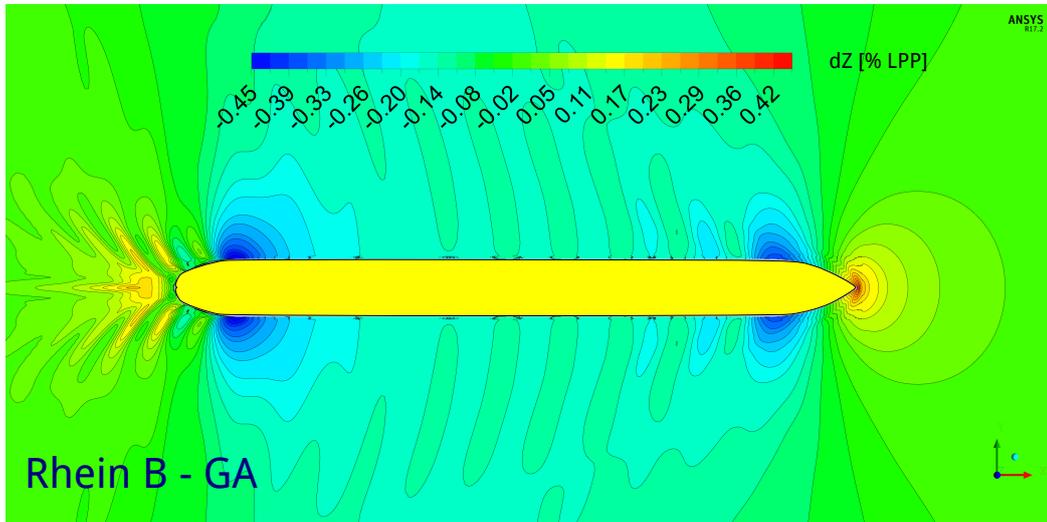


Abb. 6.28: GA Rheintanker - Verformung der Wasseroberfläche (Rhein 1)

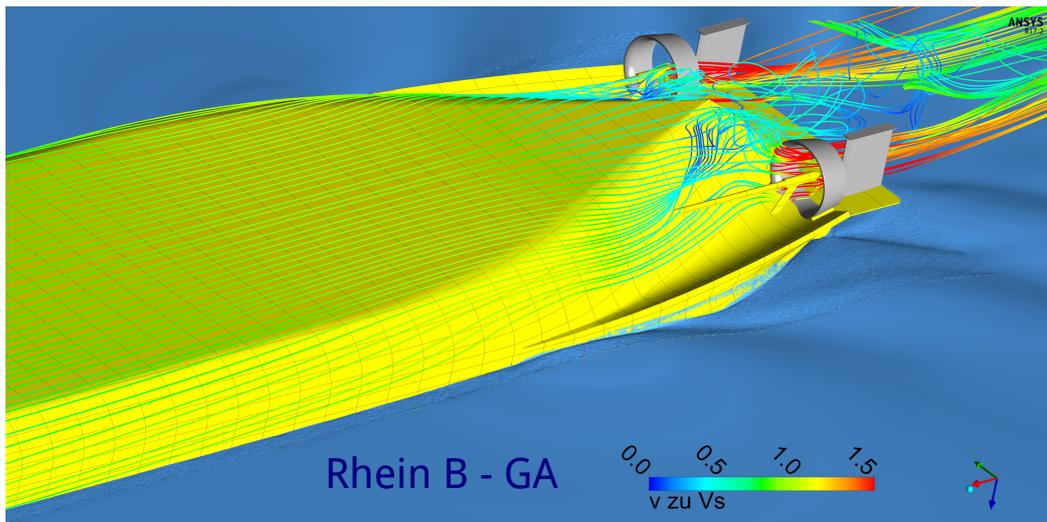


Abb. 6.29: GA Rheintanker - Stromlinien am Hinterschiff (Rhein 1)

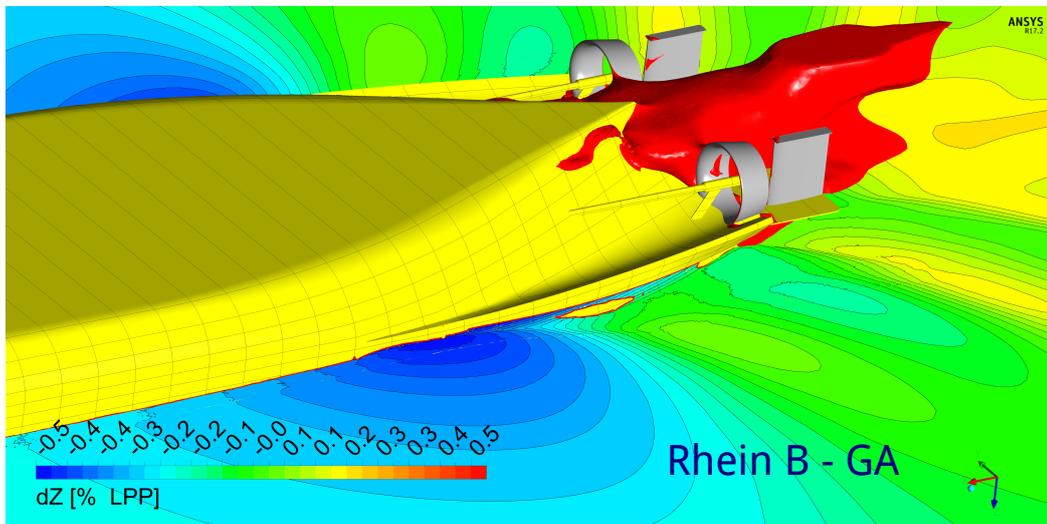


Abb. 6.30: GA Rheintanker - Rückstrom (3D) am Hinterschiff (Rhein 1)

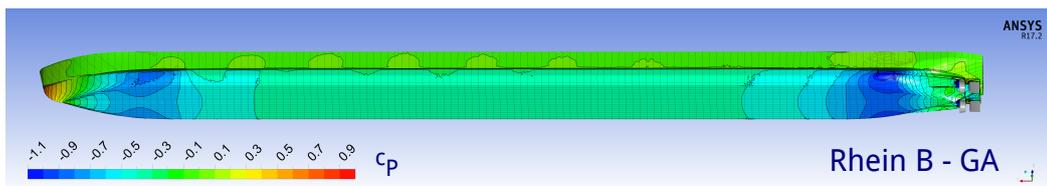


Abb. 6.31: GA Rheintanker - Druckbeiwerte c_p (Rhein 1)

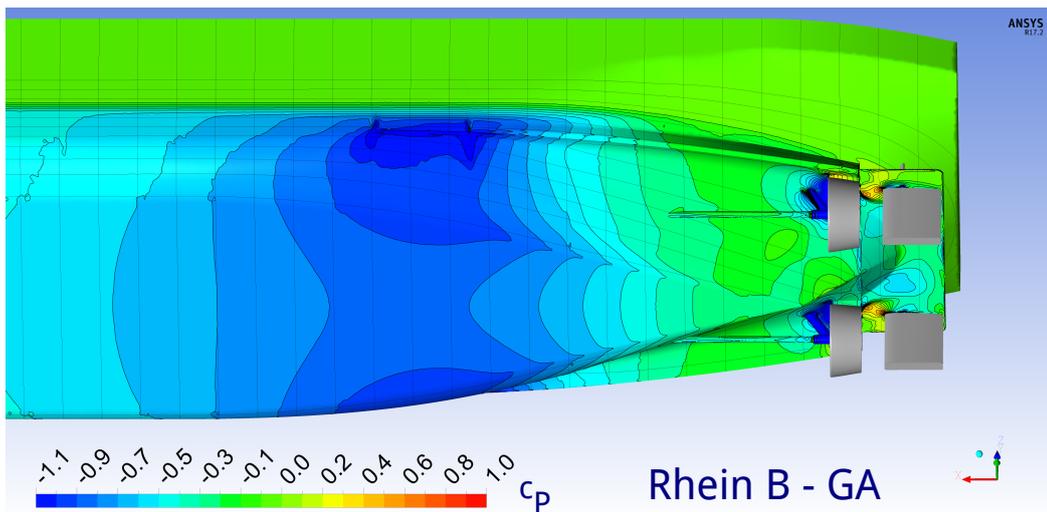


Abb. 6.32: GA Rheintanker - Druckbeiwerte c_p am Heck (Rhein 1)

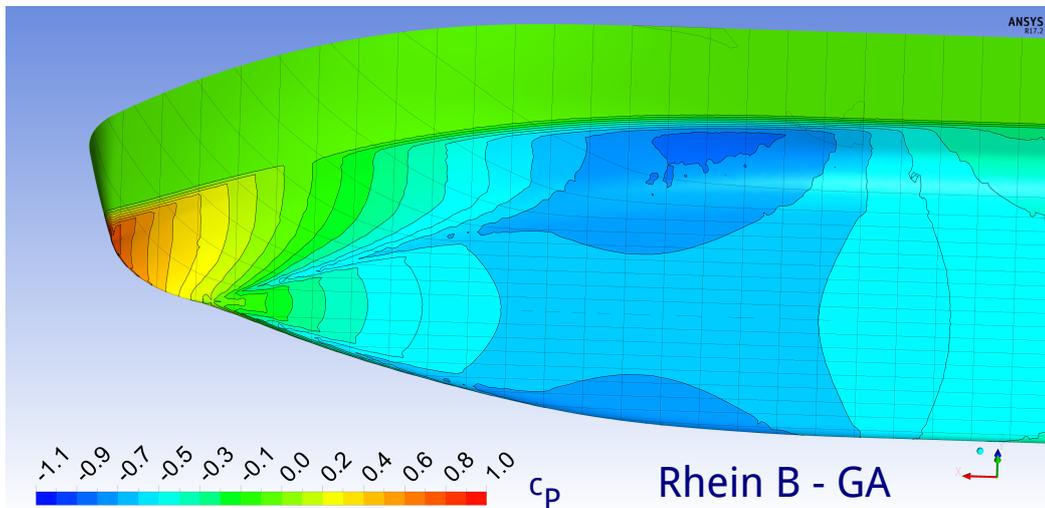


Abb. 6.33: GA Rheintanker - Druckbeiwerte c_p am Bug (Rhein 1)

6.7 Optimierung des Typschiffs Neckar

Basierend auf den in Kapitel 5.1 beschriebenen Anforderungen, bedingt durch das Transportgut und das Fahrtgebiet, wurde ein Schiff entsprechend der jetzigen Schleusenkapazität mit einer Länge $L_{üA} = 105 \text{ m}$ entwickelt. Die guten Erfahrungen bezüglich der Maximierung des Kimmradius (Kapitel 6.6) führten zu der Entscheidung, dass das Anfangsdesign des Neckarschiffes mit größeren Kimmradien als in der Binnenschifffahrt üblich ausgestattet wurde. Die Hauptparameter wurden bei allen Neckarvarianten beibehalten. Variiert wurde die Form des Hinterschiffes.

Tab. 6.7: Hauptparameter Neckarschiffe

Länge über Alles $L_{üA}$	105,0 m
Breite auf Spant B	11,44 m
Tiefgang T	2,0 m

Die Abbildung 6.34 zeigt schematisch die Formgebung der Ausgangsvariante des Neckartankschiffes. In den Abbildungen 6.35 bis 6.39 auf den folgenden Seiten ist die Geometrie der Formvarianten Neckar A bis Neckar D dargestellt.

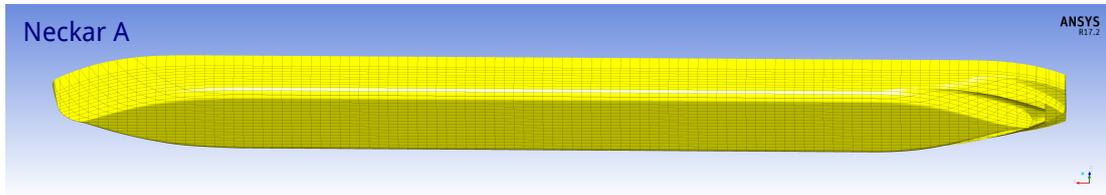


Abb. 6.34: Geometrie Ausgangsvariante Neckartanker

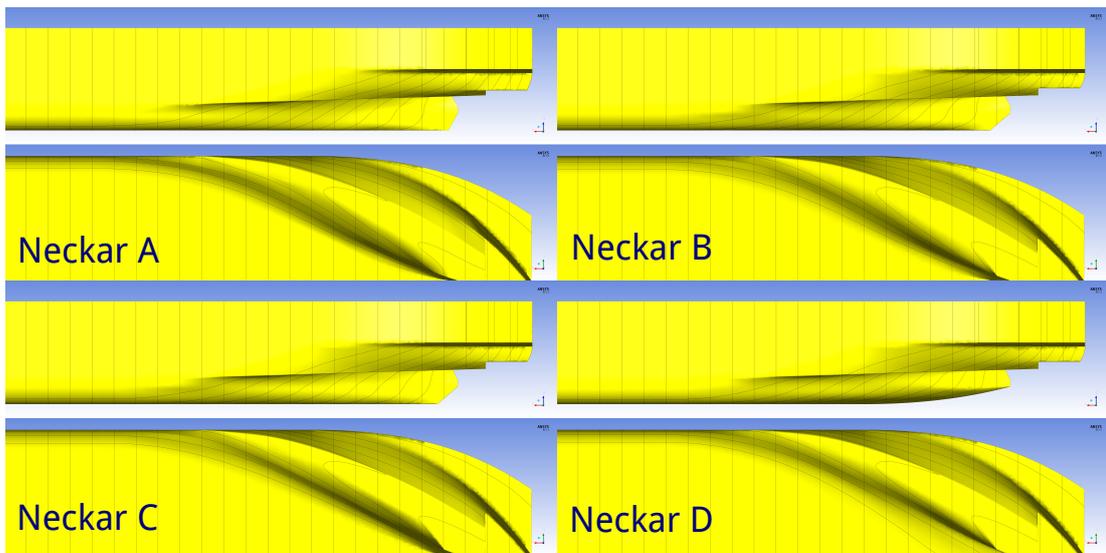


Abb. 6.35: Variantenvergleich Neckar Geometrie Hinterschiff

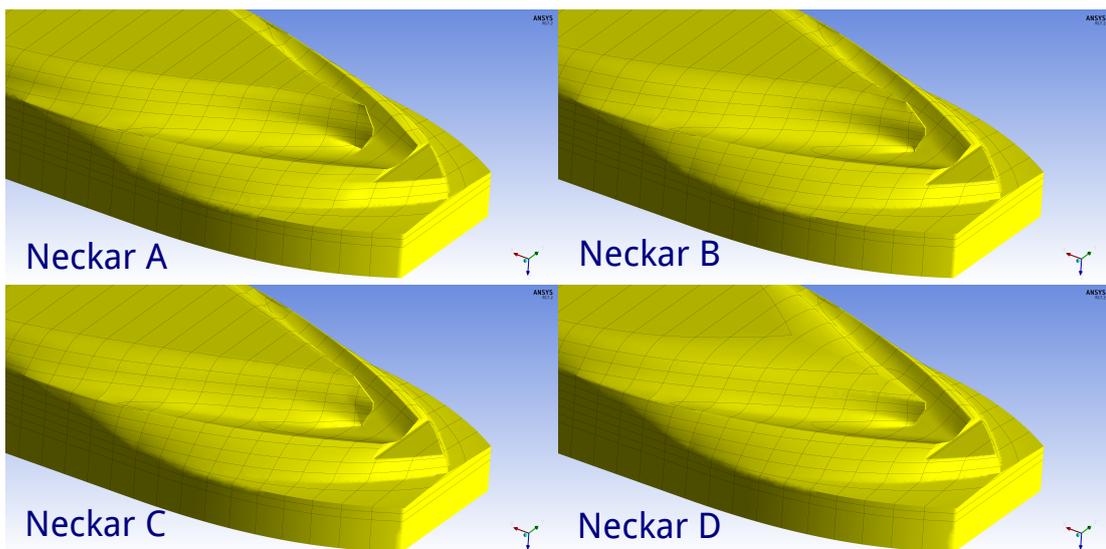


Abb. 6.36: Variantenvergleich Neckar Geometrie Hinterschiff (3D)

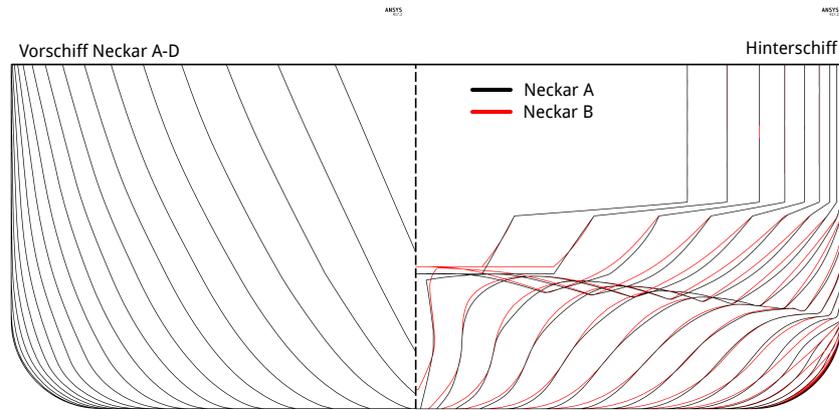


Abb. 6.37: Liniendriss Vergleich Ausgangsvariante Neckar A mit Variante Neckar B

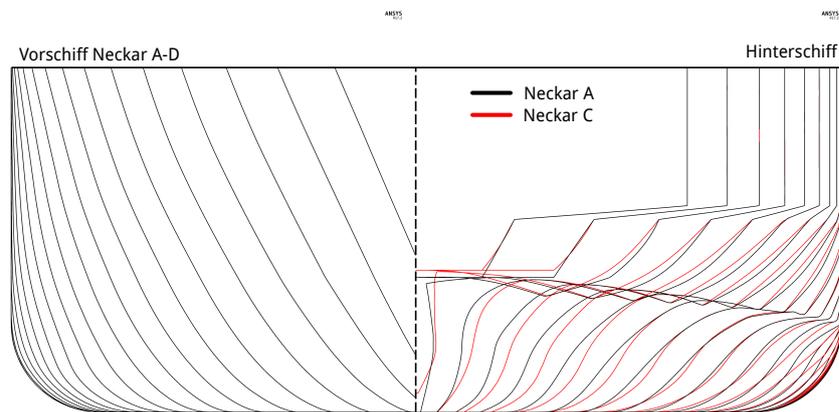


Abb. 6.38: Liniendriss Vergleich Ausgangsvariante Neckar A mit Variante Neckar C

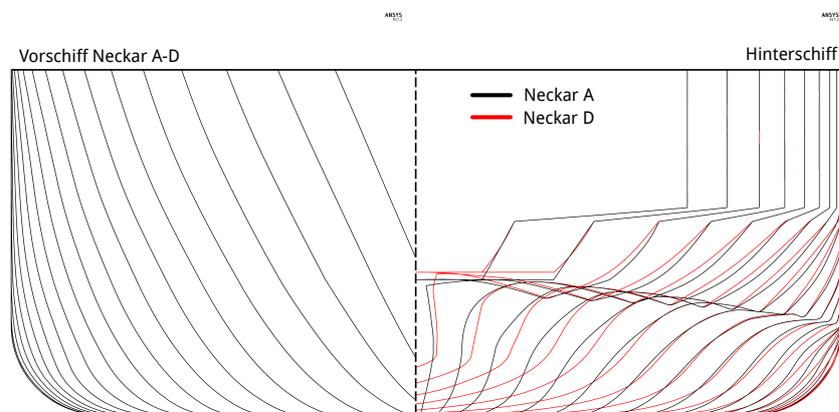


Abb. 6.39: Liniendriss Vergleich Ausgangsvariante Neckar A mit Variante Neckar D

Die Auswertung der Ergebnisse erster numerischer Berechnungen mit der Ausgangsform und die Erfahrungen mit numerischen und experimentellen Untersuchungen an vergleichbaren Binnenschiffen aus anderen Projekten führten zu der Entscheidung, die Ausgangsform des Vorschiffes beizubehalten. Alle weiteren Varianten des Neckarschiffes wurden mit dem gleichen Bug ausgestattet.

Für die erste Optimierungsphase wurden numerische Untersuchungen in extrem flachem Wasser ($h = 2,8 \text{ m}$ - Neckar 1) bei einer Schiffsgeschwindigkeit von $V_S = 12,5 \text{ km/h}$ durchgeführt. Die Anhänge des Schiffes, die Wirkung des Propellers und die dynamische Trimmlagenänderung des Schiffes wurden in der ersten Phase nicht berücksichtigt.

Um den Einfluss der Interaktion zwischen Schiffsrumpf und Antrieb zu überprüfen, wurden die reinen Widerstandsversuche durch numerische Propulsionsversuche für die Einsatzszenarien Neckar 2 und Neckar 3 ergänzt. Die Modelle wurden mit allen Anhängen (Welle, Ruder, Düse) ausgestattet.

Tab. 6.8: Vorgaben numerischer Propulsionspunkt Neckarschiff

	Neckar 2	Neckar 3
Wassertiefe h	0,175 m	0,25 m
Schiffsgeschwindigkeit V_S	0,869 m/s	1,044 m/s
Tiefgang T	0,125 m	0,125 m
Absenkung Z_{VM}	18,5 mm	15,2 mm
Trimm Θ	0,014°	0,0048°
Propellerschub T_P	11,04 N	10,37 N
Drehmoment Q	0,214 Nm	0,197 Nm

In der 2. Optimierungsphase wurden der Schub und das Drehmoment sowie Trimm und Absenkung für beide Schiffe entsprechend dem Fahrtgebiet auf gleiche Werte gesetzt. Vergleiche mit Modellversuchen zeigten, dass beide Varianten eine vergleichbare Absenkung haben, der gemessene Trimmwinkel des Schiffes bei der Ausgangsvariante aber deutlich höher ausfällt.

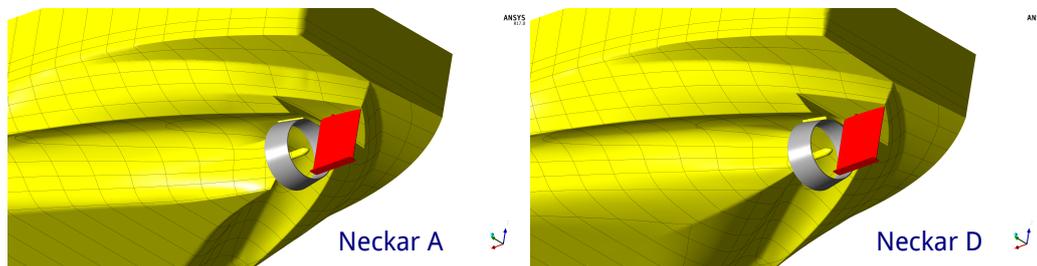


Abb. 6.40: Anhänge Neckarschiff

Alle Untersuchungen zur Optimierung des Neckarschiffes wurden im Modellmaßstab $\lambda = 16$ realisiert.

6.7.1 Vergleich Berechnungsergebnisse Neckarschiff

Die Ergebnisse der numerischen Untersuchungen wurden nach jedem Optimierungsschritt ausgewertet und bildeten die Basis für die Weiterentwicklung der Formvarianten. Die Strömungsgrößen werden entsprechend Tabelle 6.5 auf Seite 67 dimensionslos dargestellt.

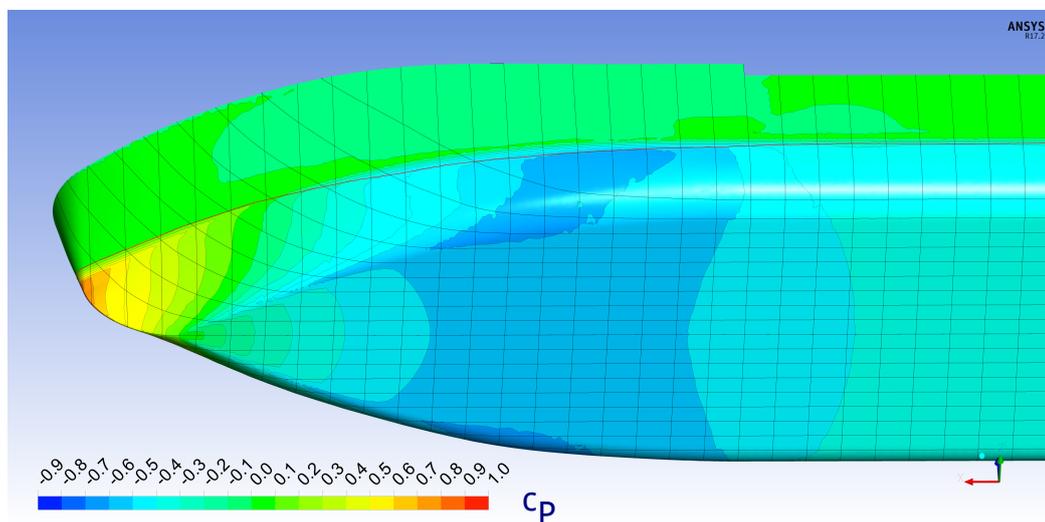


Abb. 6.41: Druckverteilung am Bug Ausgangsvariante Neckar A (Neckar 1)

Die Abbildung 6.41 zeigt die moderate Druckverteilung am Vorschiff der Variante Neckar A. Das Unterdruckgebiet an der vorderen Schulter korrespondiert zum vorhandenen Wellental, welches sich nicht verhindern lässt. Die Unterdruckgebiete am

Übergang zum Boden lassen sich nur durch größere Kimmradien in diesem Bereich ändern. Bei Binnenschiffen mit langem parallelen Mittelteil und kurzen Schiffsenden, bedingt durch die Transportaufgaben, lässt sich dieser Übergang aber kaum schlanker gestalten.

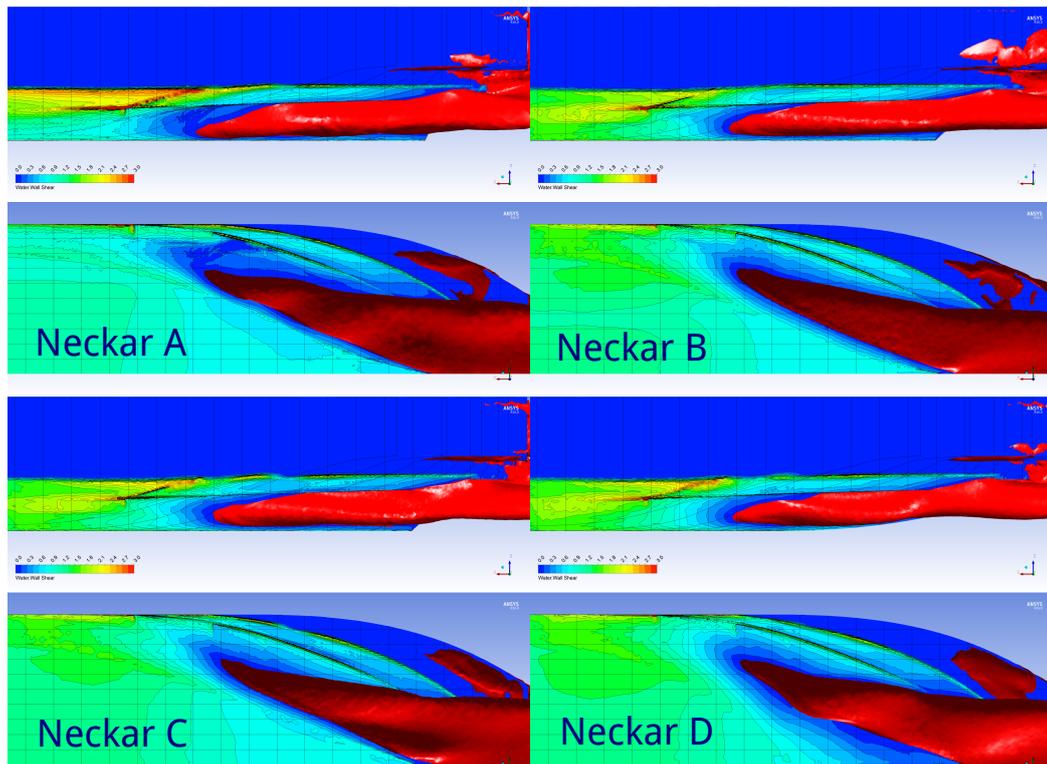


Abb. 6.42: Rückstromgebiete der Neckarschiffsvarianten (Neckar 1)

Die weiteren Optimierungen konzentrierten sich auf die Umströmung des Hinterschiffes, mit dem Ziel, den Widerstand zu reduzieren und die Zuströmung zum Propeller zu verbessern. Wie die Abbildungen der Rückstromgebiete (6.42) und der Vektoren in Rumpfnähe (6.43) zeigen, konnte die Umströmung des Hinterschiffes nur geringfügig verbessert werden. Die Ursache hierfür sind die extremen Flachwasser-Verhältnisse von $h/T = 1,4$, bei denen die Rückstromgebiete durch den hohen Grad der Versperrung, verbunden mit dem für Binnenschiffe typischen kurzen Hinterschiff, nicht vermeidbar sind.

Die Druckverteilung am Hinterschiff konnte durch gezielte Maßnahmen verändert werden und wirkt sich widerstandsminimierend (Tabelle 6.9) aus. Das Unterdruckgebiet an der hinteren Schulter ist bei der Variante Neckar D gegenüber der Variante

Neckar A geringfügig stärker ausgeprägt. Im weiteren Verlauf in Richtung Propeller konnte es jedoch leicht homogenisiert werden.

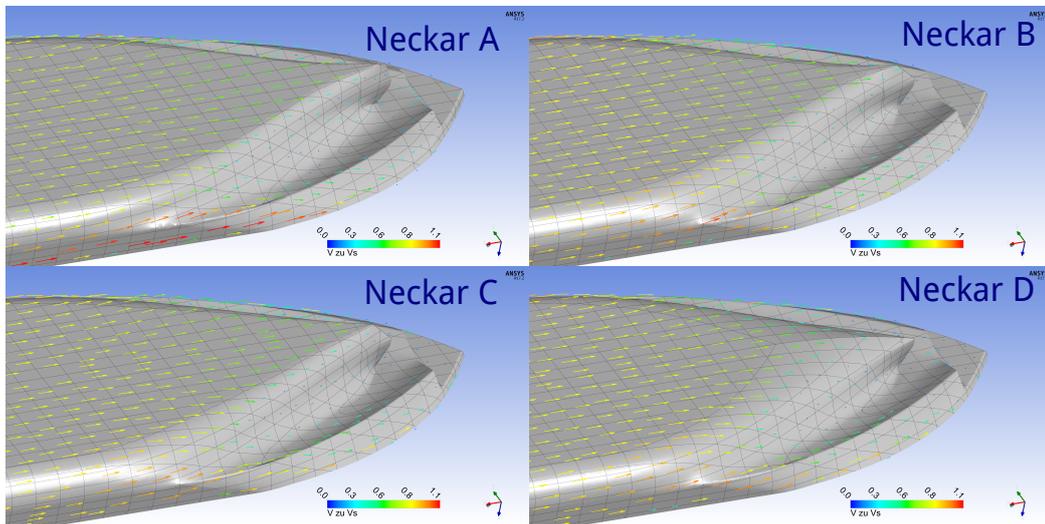


Abb. 6.43: Vektoren in Rumpfnähe - Neckarschiffsvarianten (Neckar 1)

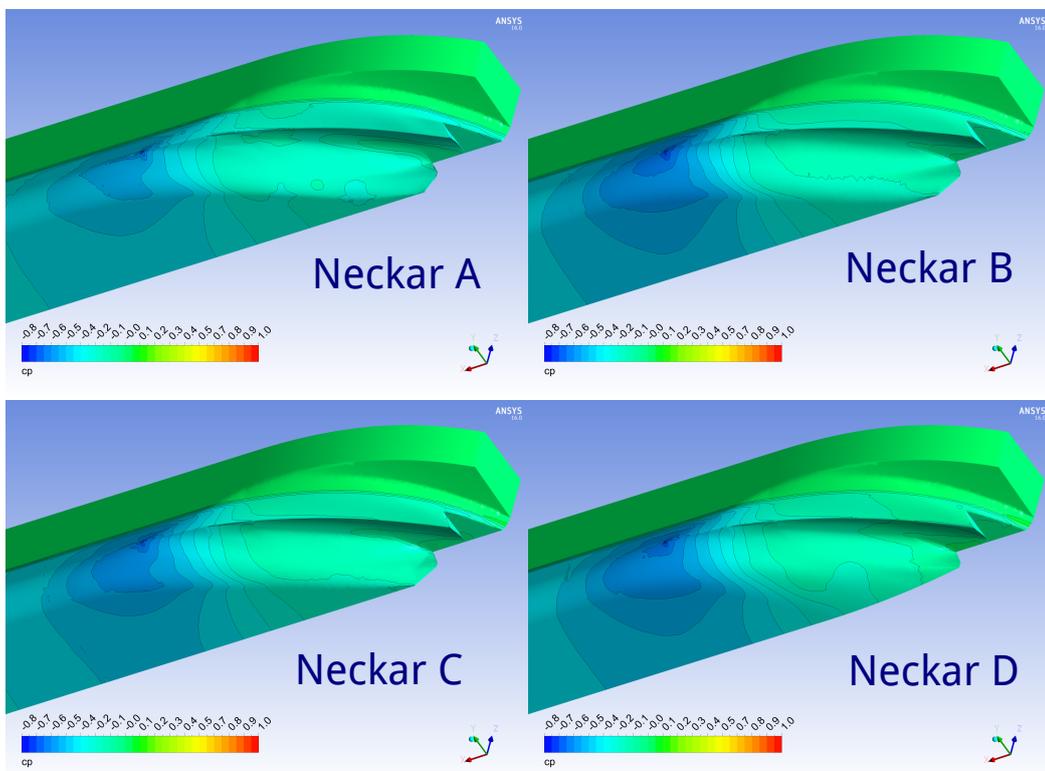


Abb. 6.44: Druck am Hinterschiff - Neckarschiffsvarianten (Neckar 1)

Tab. 6.9: Vergleich der Widerstände der Neckarschiffe (Neckar 1)

Variante	R_T	ΔR_T zu Neckar A
Neckar A	15,66 N	0 %
Neckar B	14,42 N	-7,92 %
Neckar C	14,40 N	-8,05 %
Neckar D	13,44 N	-14,17 %

Die Berücksichtigung der Propellerwirkung und der dynamischen Schwimmelage ergibt für beide Einsatzszenarien kaum Unterschiede zwischen den Formvarianten bei der durch das Schiff induzierten Wellenbildung. Die Ausdehnung des vorderen Wellentales und an der hinteren Schulter des Rumpfes ist bei beiden Varianten identisch. Die Ausprägung der Wellen hinter dem Schiff erscheint bei Variante D etwas inhomogener.

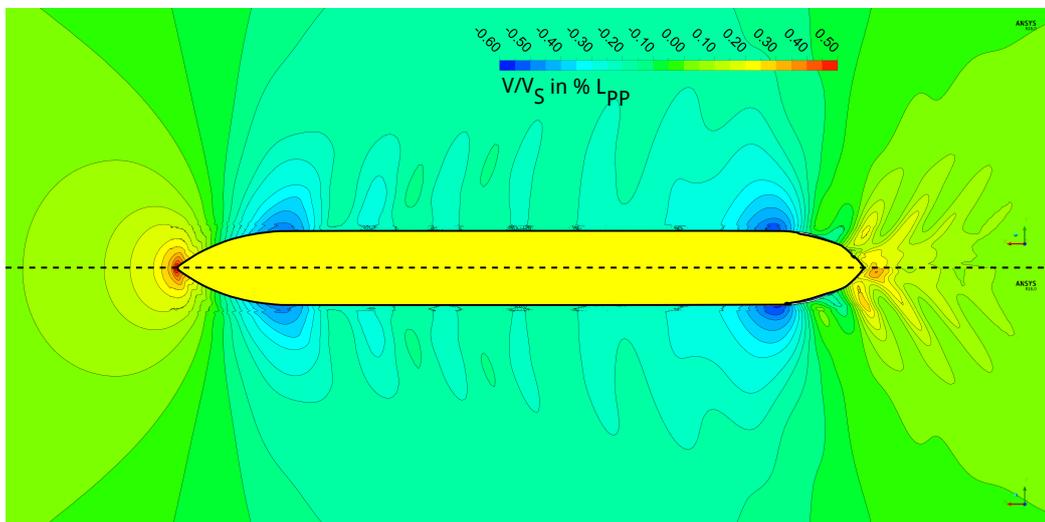


Abb. 6.45: Druckbeiwerte c_p Neckar A und Neckar D (Neckar 2)

Vergleicht man die Umströmung des Hinterschiffes, sind insbesondere bei der Druckverteilung und dem Verlauf der Stromlinien Verbesserungen zu erkennen. Der weniger abrupte Übergang vom Schiffsboden in den Tunnelbereich durch größere Radien und die Anhebung des Schiffsbodens zum Propeller hin haben die auf-

tretenen Unterdruckgebiete weiter nach vorn verschoben und die Druckverhältnisse vor dem Propeller positiv beeinflusst.

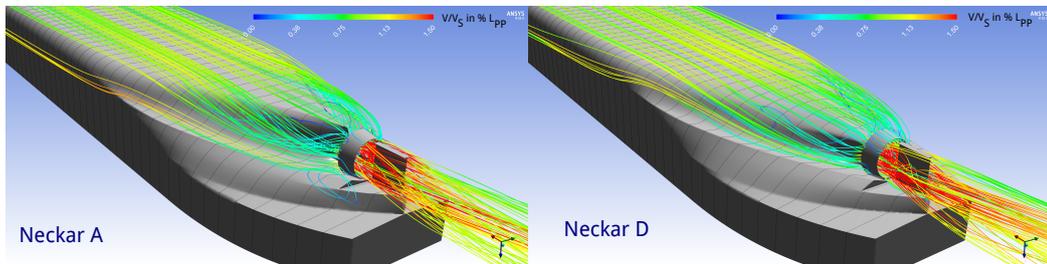


Abb. 6.46: Stromlinien Neckar A und Neckar D (Neckar 2)

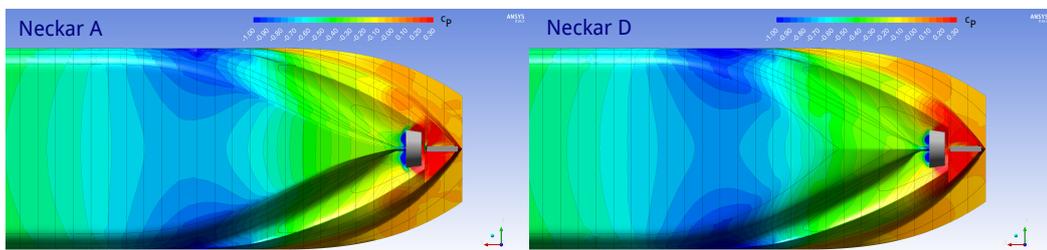


Abb. 6.47: Druckbeiwerte c_p Neckar A und Neckar D (Neckar 2)

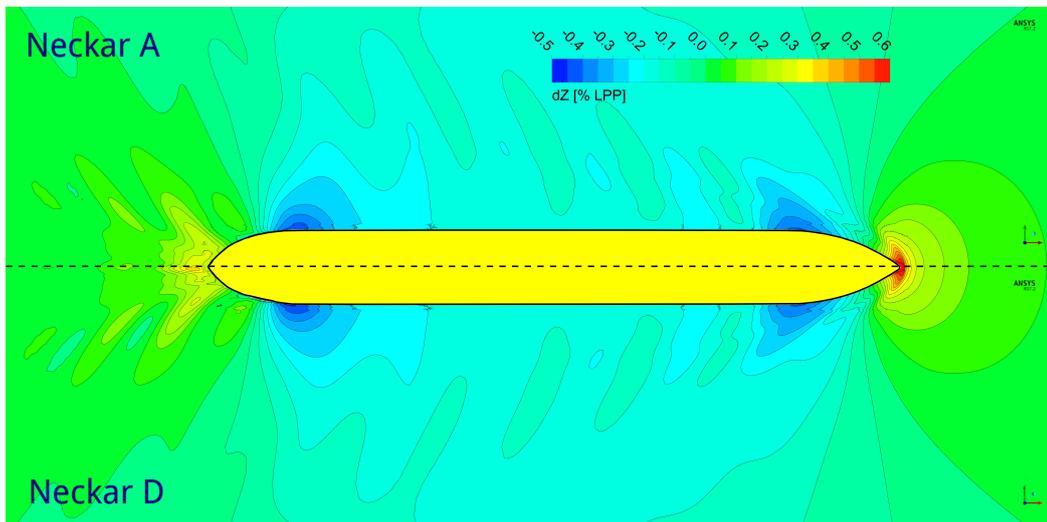


Abb. 6.48: Wellenbild Neckar A und Neckar D (Neckar 3)

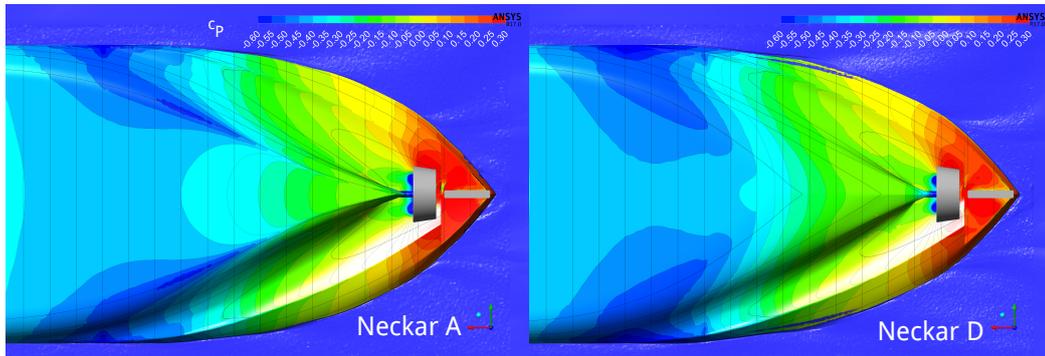


Abb. 6.49: Druckbeiwerte c_p Neckar A und Neckar D (Neckar 3)

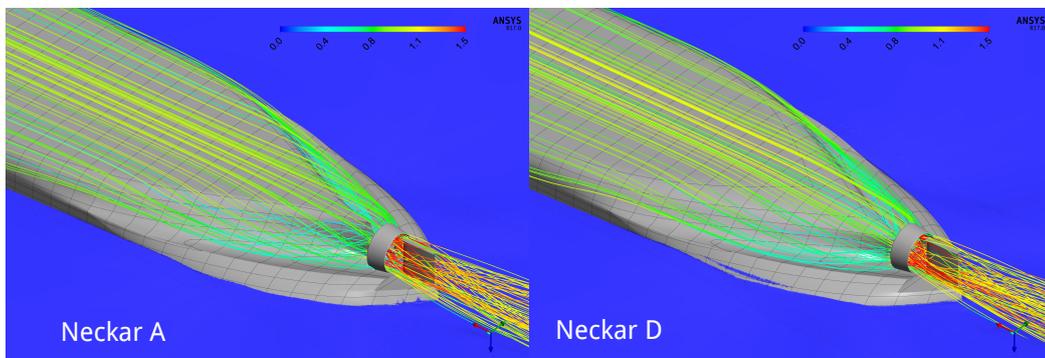


Abb. 6.50: Stromlinien Neckar A und Neckar D (Neckar 3)

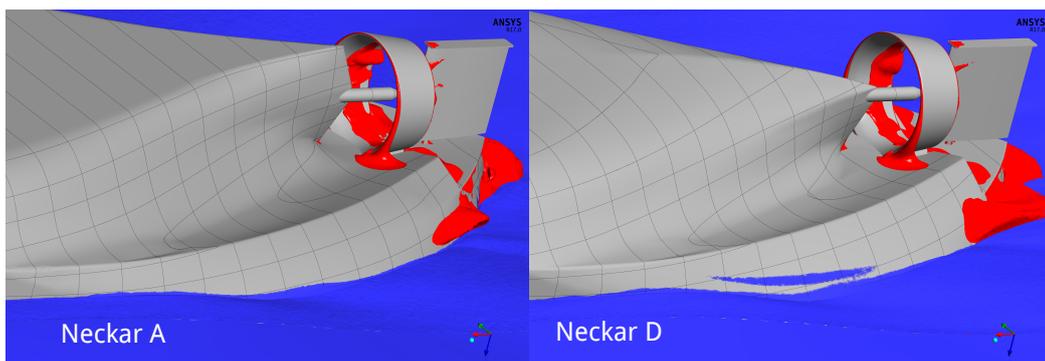


Abb. 6.51: Rückstromgebiete Neckar A und Neckar D (Neckar 3)

Die Stromlinien im Zustrom zum Propeller erscheinen durch die Veränderungen der Hinterschiffslinien etwas homogener. Durch die Anhebung des Schiffsbodens vor dem Propeller ist die mittige Anströmung zum Propeller bei beiden Wassertiefen

(Neckar 2 und Neckar 3) verbessert worden. Rückstromgebiete treten, wie erwartet, bei dieser Wassertiefe in keiner Entwurfsvariante auf.

6.8 Untersuchungen zur Koppelstelle am Verband

Für die Fahrt auf dem Rhein bis Mannheim kann der Einschrauber auch als Koppelverband zum Einsatz kommen. Durch die Kopplung von mehreren Schiffen bzw. Leichtern treten Unstetigkeiten der Strömung an der Verbindung zwischen den Einheiten auf. Die Unstetigkeiten sind schon durch das Wellenbild erkennbar. Es entstehen Wirbel und Ablösungen, die den Widerstand erhöhen und im weiteren Verlauf zu ungünstigen Bedingungen im Propellerzustrom führen. Eine Minimierung dieser Unstetigkeit durch geeignete Maßnahmen kann zu einer Effizienzsteigerung der gesamten Einheit führen.

Aus diesem Grund wurde im DST eine Koppelstelle für die Verbindung zwischen dem Einschraubenmotorschiff, welches in Kapitel 6.7 optimiert wurde, und einem Standardleichter mit einer Länge von 76,5 m entworfen.

Mit numerischen Verfahren wurde der Verband mit und ohne Koppelstelle bei einer Wassertiefe von $h = 4,0 \text{ m}$ und einer Geschwindigkeit von $V_S = 15 \text{ km/h}$ (Einsatzszenario Rhein 3) untersucht und die Ergebnisse verglichen. Diese Untersuchungen wurden mit vordefinierter dynamischer Schwimmlage beider Einheiten realisiert. Da sich die Untersuchungen auf die Wirkung der Koppelstelle konzentrierten, wurde die Wirkung des Propellers vernachlässigt.

In den Abbildungen 6.52 und 6.53 ist die Geometrie der Verbände und die Gestaltung der Koppelstelle schematisch dargestellt. Die Verbindung zwischen dem Einschraubenschiff und dem Leichter wurde so entworfen, dass der Bereich zwischen den Einheiten vollständig ausgefüllt ist, jedoch die unterschiedliche Vertrimmung der Komponenten möglich ist.

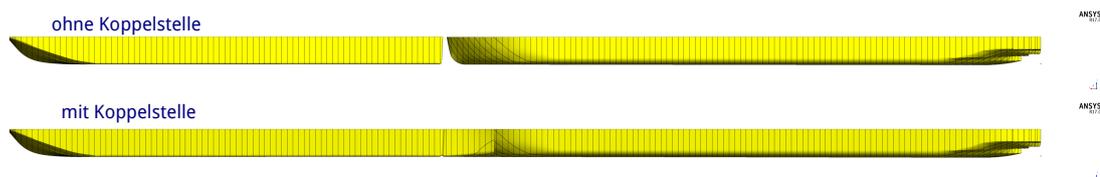


Abb. 6.52: Seitenansicht der Verbände

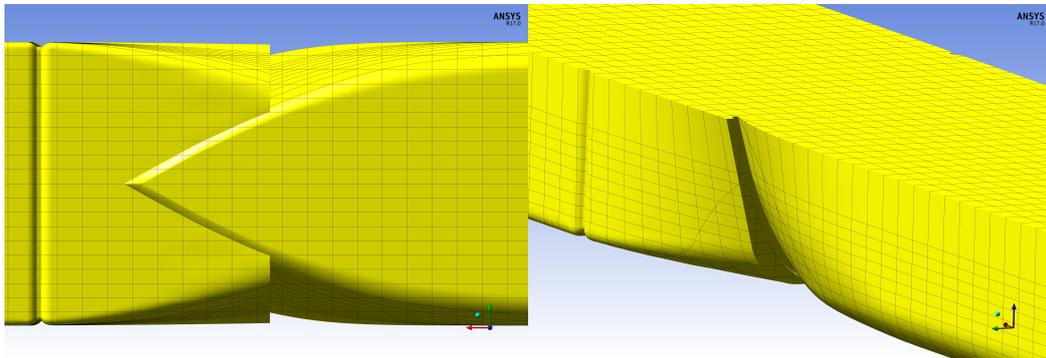


Abb. 6.53: Geometrie Koppelstelle

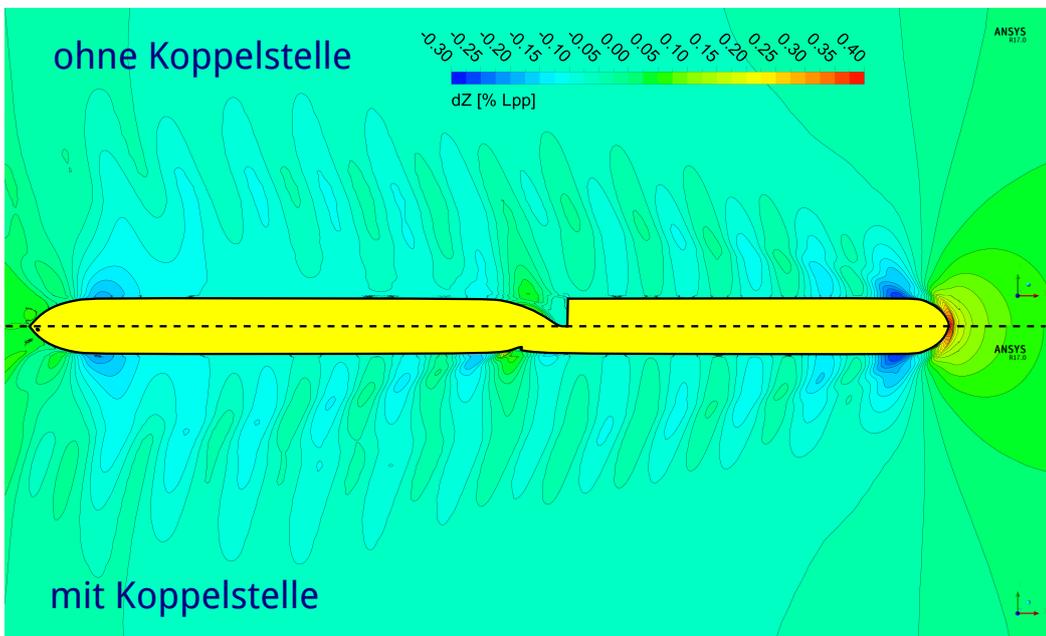


Abb. 6.54: Wellenbild Verband mit/ohne Koppelstelle

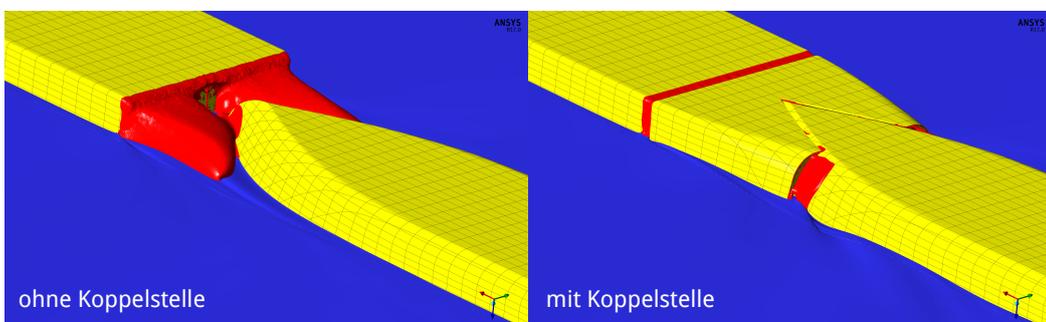


Abb. 6.55: Rückstromgebiete an den Koppelstellen

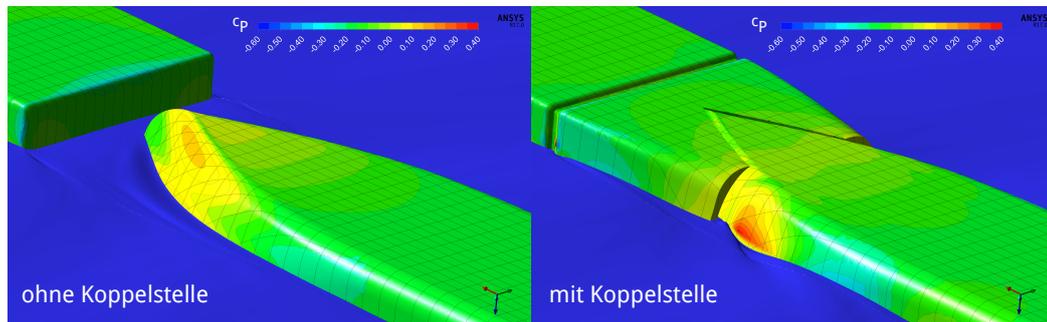


Abb. 6.56: Druckbeiwerte c_p an den Koppelstellen

Die Auswertung der Computational Fluid Dynamic (CFD)-Berechnungen mit beiden Kombinationen ergab insgesamt deutliche Verbesserungen in der Umströmung der Nahtstelle zwischen den Einheiten.

Vergleicht man die Verformung der Wasseroberfläche beider Berechnungen, kann bei der Fahrt des Verbandes ohne Füllstück eine sehr unregelmäßige Verteilung der Wellenberge beobachtet werden, die sich aus den Überlagerungen der durch die Einzeleinheiten induzierten Wellen ergibt. Dies deckt sich auch mit den Visualisierungen aus dem Modellversuch. Die Verformung der Wasseroberfläche zeigt aber auch, dass noch weiteres Optimierungspotential vorhanden ist. Durch den Einzug der Koppelstelle in der Wasserlinie kommt es zu einem Druckanstieg im vorderen Teil des Einschraubenschiffes, durch den weitere Wellen induziert werden. Leichte Veränderungen der Geometrie der Koppelstelle durch eine Anpassung an die Schiffsbreite sollten zu einer Minimierung des Druckanstiegs führen.

Die Rückstromgebiete konnten, wie erwartet, durch die Installation eines Füllstückes fast vollständig eliminiert werden. Diese treten nur noch in den Bereichen mit Strömungsabschattung auf, wie zum Beispiel den Spalten zwischen Koppelstelle und den Einzeleinheiten,

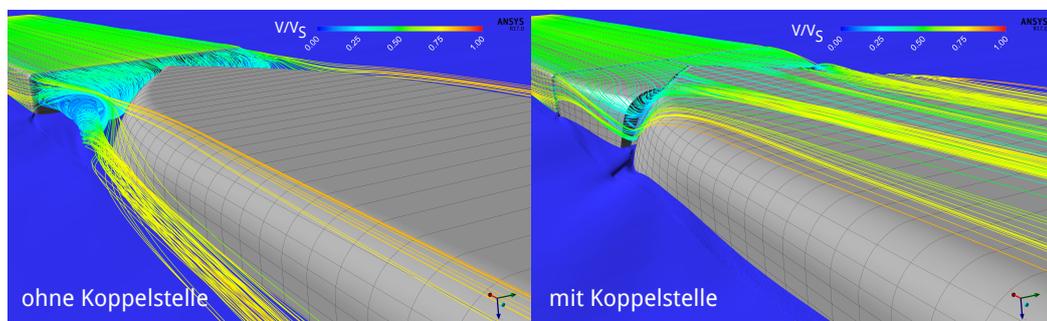


Abb. 6.57: Stromlinien Ebene 1 an den Koppelstellen

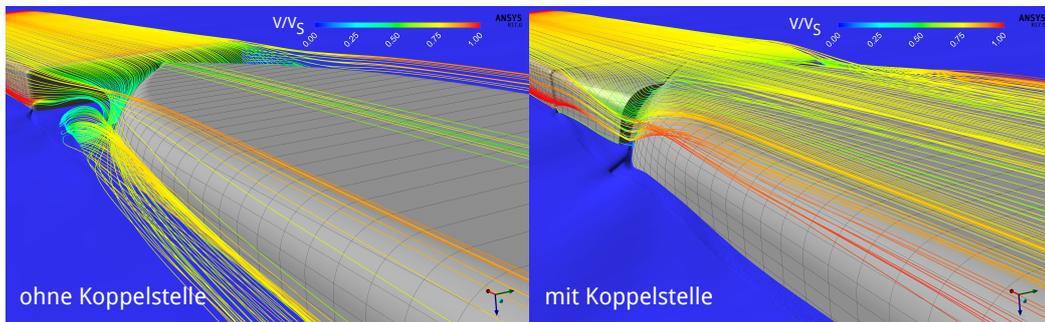


Abb. 6.58: Stromlinien Ebene 2 an den Koppelstellen

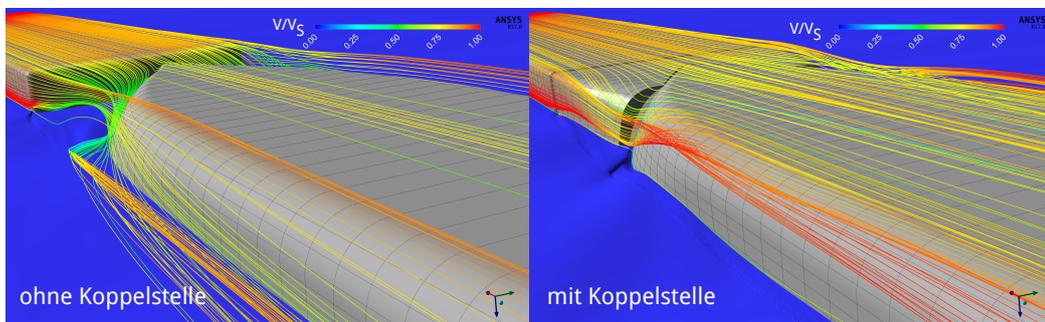


Abb. 6.59: Stromlinien Ebene 3 an den Koppelstellen

Die Stromlinien bestätigen die Erkenntnis, dass durch die Verbindung beider Einheiten mit einem Füllstück die Strömungsverhältnisse deutlich verbessert werden konnten. Eine Beeinflussung der Strömung durch die Abschattung des Leichters kann dadurch deutlich reduziert werden.

Tab. 6.10: Vergleich der Widerstände Koppelverband

R_T ohne	R_T mit	ΔR_T
30,05 N	28,50 N	-5,16 %

Die Auswertung der numerisch ermittelten Widerstände hat ergeben, dass durch eine Koppelstelle eine erhebliche Minimierung des Widerstandes erreicht werden kann.

Die Implementierung eines Füllstückes zwischen den Einzeleinheiten ist aus hydrodynamischer Sicht eine sinnvolle Maßnahme zur Steigerung der Effizienz von Verbänden. Die Koppelstelle sollte aber in jedem Fall an die Schiffsformen und die Fahrtgebiete angepasst werden.

7 Experimentelle Untersuchung der Entwürfe

7.1 Modelle und Anordnungen

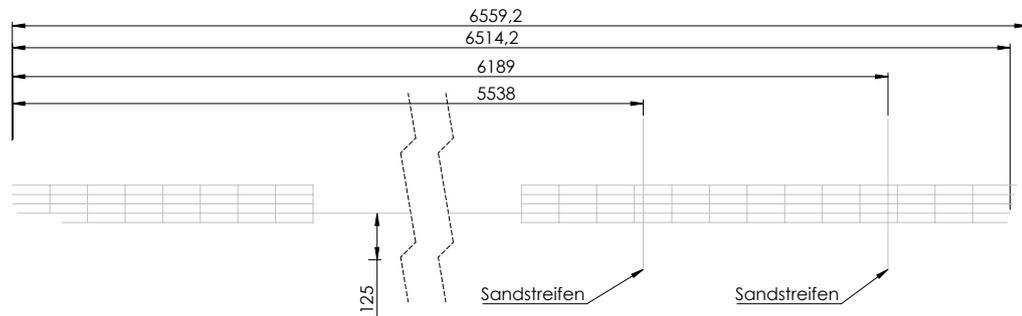
Die in Kapitel 5.1 auf Seite 37 beschriebenen Entwürfe wurden zur Bestimmung der Propulsionskurven, die für die Simulation des Schiffsbetriebs (siehe Kapitel 3 auf Seite 20 und Bericht MTU [2]) benötigt wurden, im Schlepptank des DST untersucht. Des Weiteren wurden im Rahmen der Modellversuche das Ergebnis der Formoptimierung verifiziert sowie das Stoppvermögen geprüft. Beide Typschiffe wurden in den Maßstab 16 umgesetzt und als Holzmodelle gebaut. Der erste Typ ist ein 105 m langes Motorschiff mit einem Propeller, welches für das Neckar/Main-Revier eingesetzt wird. Es kann zudem mit einem Schubleichter gefahren werden. Kommt der Leichter zum Einsatz, kann er an der Koppelstelle auch mit einem Füllstück versehen werden. Für Schiffe der Wasserstraßenklasse VI (Donau, Rhein, Weser) wurde ein 135 m Motorschiff mit zwei Propellern untersucht. Da beide Typen den gleichen Hauptspantquerschnitt besitzen, wurde nur ein Vorschiff gebaut.

Tab. 7.1: Modellvarianten

Schiffstyp	Hinterschiff	Vorschiff	Füllstück	Leichter
Einschrauber „Neckar“	2041 B	2030	-	
Koppelverband „Neckar“	2041 B	2030	X	1861
Koppelverband „Neckar“	2041 B	2030	-	1861
Zweischrauber „Rhein“	2030 D	2030	-	

Tabelle 7.1 zeigt, wie die untersuchten Modelle aus den gebauten Teilmodellen gebildet werden. Ein Modell für den Leichter konnte aus dem DST-Bestand verwendet werden.

Alle Modelle wurden mit einem Fotonetz (siehe Abbildungen 7.1 und 7.2) zur Visualisierung der Wellenbildung ausgerüstet. Für die Propulsionsversuche wurden an allen Schiffen die Anhänge, wie Propeller, Düse und Ruder installiert. Die jeweiligen Anhänge (Abbildungen 7.3 und 7.4) sowie deren Anordnung am Modell (siehe Abbildungen 7.5 und 7.6) für das Neckarschiff und das Rheinschiff sind nachfolgend dargestellt.



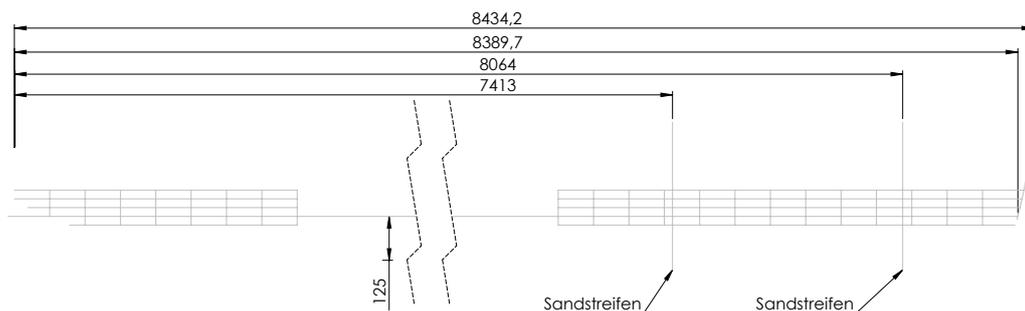
M 2041 - Anriss

Maßstab 1/16

Tiefgang 125 mm durchgezogen
 Tiefgang 94 mm markiert
 Sandstreifen siehe Zeichnung

Fotonetz vorn:
 13 x 100 mm lang ab vorderem Lot
 4 x 25 mm hoch
 Fotonetz achtern:
 8 x 100 mm lang ab Spiegel
 4 x 25 mm hoch

Abb. 7.1: Fotonetz Modell Neckarschiff



M 2030 D - Anriss

Maßstab 1/16

Tiefgang 125 mm durchgezogen
 Tiefgang 94 mm markiert
 Sandstreifen siehe Zeichnung

Fotonetz vorn:
 13 x 100 mm lang ab vorderem Lot
 4 x 25 mm hoch
 Fotonetz achtern:
 8 x 100 mm lang ab Spiegel
 4 x 25 mm hoch

Abb. 7.2: Fotonetz Modell Rheinschiff

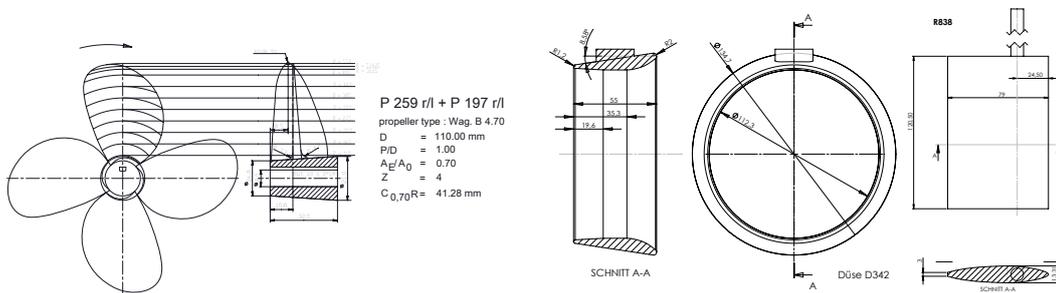


Abb. 7.3: Propeller, Düse und Ruder Neckarschiff M2041.

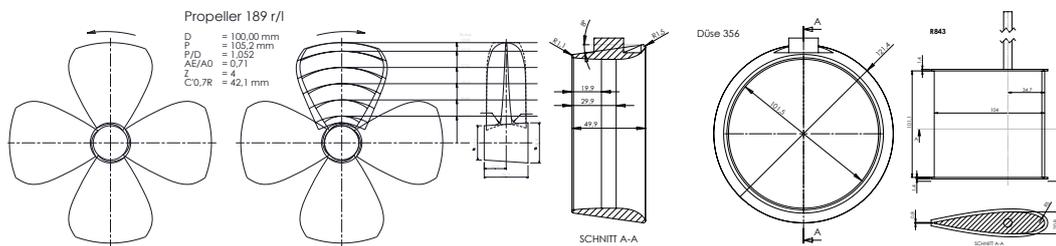


Abb. 7.4: Propeller, Düse und Ruder Rheinschiff M2030D

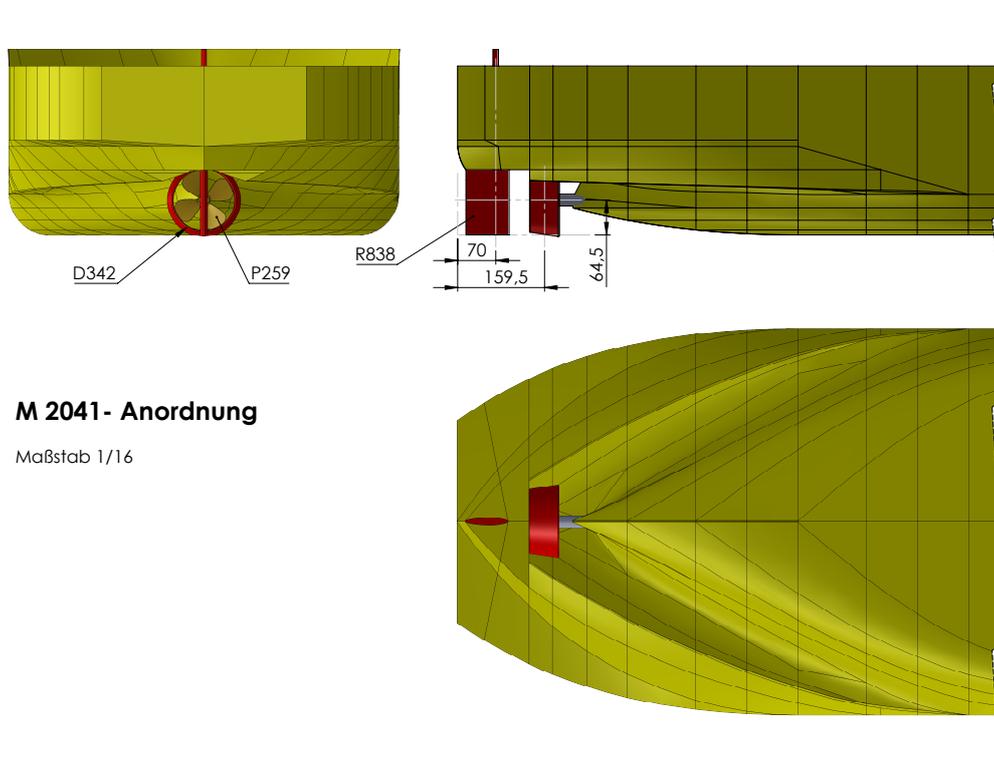


Abb. 7.5: Anordnungszeichnung Modell Neckarschiff

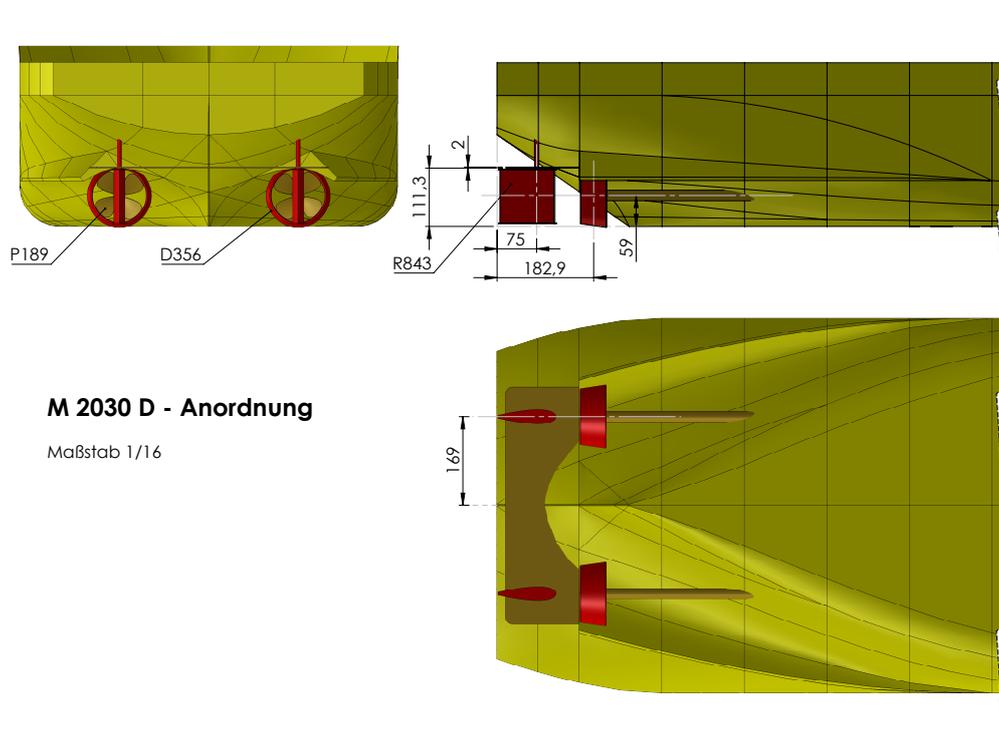


Abb. 7.6: Anordnungszeichnung Modell Rheinschiff

Die verwendeten Düsen und Propeller sind aus dem Bestand des DST und werden als Standardpropeller bzw. Düsen bei Propulsionsversuchen für unterschiedliche Schiffstypen in der Entwurfsphase eingesetzt.

7.2 Modellversuche

In den im Kapitel 6 auf Seite 53 beschriebenen numerischen Untersuchungen wurden unterschiedliche Formvarianten der Schiffstypen eingehend untersucht. Die Bewertung der numerischen Ergebnisse erfolgte weitestgehend nach qualitativen Kriterien oder vergleichend zwischen den Varianten, da die Genauigkeit der Berechnung des Leistungsbedarfs auch mit heutigen Methoden noch nicht ausreichend ist. Aus diesem Grund erfolgt die Bestätigung der Güte eines Entwurfs nach wie vor durch Modellversuche.

Die Leistungsprognose für Schiffe auf Basis von Modellversuchen erfolgt nicht allein anhand von Propulsionsversuchen, sondern über eine Verrechnung der Ergebnisse

von Widerstandsversuchen, der Charakteristik der Propulsionsorgane aus dem sogenannten Freifahrtversuch und den eigentlichen Selbstpropulsionsversuchen. Nur so ist eine Bestimmung der Maßstabeffekte und vor allem eine Identifikation der Wechselwirkung zwischen Schiffskörper und Propulsion möglich. Die nachstehenden Tabellen enthalten die Zuordnung der getesteten Konfigurationen und Versuche. Das „Füllstück“ ist ein Übergangsvolumen zwischen Motorschiff und Schubleichter. Hierdurch werden großskalige Ablösungen zwischen den Schwimmkörpereinheiten vermieden und erhebliche Einsparungen im Leistungsbedarf möglich. Wenn ein Leichter ausschließlich mit Motorschiffen mit geeigneter Bugform genutzt wird, kann das Füllstück als Teil der Leichtergeometrie fest integriert werden.

Tab. 7.2: Versuchsmatrix Widerstandsversuche, alle Maße für Großausführung

Test	Art	Schiffstyp	Leichter	Füllstück	h_s [m]	T_A [m]	T_F [m]
15.037	Widerstand	Neckar			2,8	2	2
15.038	Widerstand	Neckar			2,8	2	2
15.074	Widerstand	Rhein			2,8	2	2
15.077	Widerstand	Rhein			4	1,95	0,88
15.078	Widerstand	Rhein			4	1,95	0,88
15.079	Widerstand	Rhein			4	2	2
15.083	Widerstand	Neckar			4	2	2
15.086	Widerstand	Neckar			2,8	1,86	0,59
15.087	Widerstand	Neckar			2,8	1,86	0,59
15.090	Widerstand	Neckar			4	2	2
15.092	Widerstand	Neckar	SL 62		4	2	2
15.095	Widerstand	Neckar	SL 62		4	1,86	0,59
15.097	Widerstand	Neckar	SL 62	X	4	1,86	0,59
15.099	Widerstand	Neckar	SL 62	X	4	2	2

Tab. 7.3: Versuchsmatrix Propulsionsversuche, alle Maße für Großausführung

Test	Art	Schiffstyp	Leichter	Füllstück	h_s [m]	T_A [m]	T_F [m]
15.036	Propulsion	Neckar			4	2	2
15.075	Propulsion	Rhein			2,8	2	2
15.076	Propulsion	Rhein			2,8	1,95	0,88
15.080	Propulsion	Rhein			4	2	2
15.082	Propulsion	Rhein			4	1,95	0,88
15.084	Propulsion	Neckar			4	2	2
15.085	Propulsion	Neckar			4	1,86	0,59
15.088	Propulsion	Neckar			2,8	1,86	0,59
15.089	Propulsion	Neckar			2,8	2	2
15.093	Propulsion	Neckar	SL 62		4	2	2
15.096	Propulsion	Neckar	SL 62		4	1,86	0,59
15.098	Propulsion	Neckar	SL 62	X	4	1,86	0,59
15.100	Propulsion	Neckar	SL 62	X	4	2	2

Tab. 7.4: Versuchsmatrix Stoppversuche, alle Maße für Großausführung

Test	Art	Schiffstyp	Leichter	Füllstück	h_s [m]	T_A [m]	T_F [m]
15.081	Stoppen	Rhein			4	2	2
15.091	Stoppen	Neckar			4	2	2
15.094	Stoppen	Neckar	SL 62		4	2	2

7.2.1 Widerstandsversuche

Die Widerstandsversuche wurden mit konstanter Wagengeschwindigkeit gefahren. Jede Fahrt wurde mit einem Mehrkanaldatenerfassungssystem aufgezeichnet und anschließend ausgewertet. Folgende Messgrößen wurden erfasst:

Tab. 7.5: Messgrößen im Widerstandsversuch

Modellgeschwindigkeit	v	[m/s]
Widerstand	RT	[m/s]
Trimm	Θ	[min]
Absenkung	zV	[cm]

7.2.2 Propellerfreifahrt

Der Freifahrtversuch hat die Bestimmung der Propeller-Charakteristik ohne Beeinflussung durch einen Schiffsrumpf zum Ziel. Hierbei wird der Modellpropeller mit Hilfe eines schlanken, strömungsgünstigen Schaftes in einem ausgewählten Propeller-Schlupf-Bereich betrieben. Der Schlupf eines Propellers ist hier definiert als die Differenz zwischen der idealen Bewegung des Propellers relativ zum Medium um den Betrag der Propellersteigung P je Umdrehung und der tatsächlich pro Umdrehung zurückgelegten Wegstrecke. Das dimensionslose Schlupfverhältnis ist definiert als

$$s_R = 1 - \frac{V_A}{nP} \quad (7.1)$$

und wird in der Auswertung der Freifahrtversuche widergespiegelt durch die Fortschrittsziffer J , welche anstelle der Steigung mit dem Durchmesser D normiert ist.

Zur Vermeidung von störenden Einflüssen durch den Nachstrom des Schaftes, arbeitet der Propeller als Zugpropeller im freien Zustrom vor dem Schaft. Auch Einflüsse durch die freie Wasseroberfläche sollten weitestgehend minimiert werden, weshalb der Propeller ausreichend tief getaucht sein muss. Dabei misst man Schub, Drehmoment, Drehrate und Fortschrittsgeschwindigkeit des Schleppwagens.

Die gemessenen Größen V_A , n , Q und T werden in die dimensionslosen Koeffizienten Fortschrittsziffer

$$J = \frac{V_A}{nD}, \quad (7.2)$$

Schubbeiwert

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \quad (7.3)$$

und Momentenbeiwert

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5} \quad (7.4)$$

überführt und im so genannten Freifahrt diagramm dargestellt. In der nachfolgenden Abbildung ist das Freifahrtgerät für eine Propeller-Düsen Kombination dargestellt.



Abb. 7.7: Seitenansicht des Freifahrt-Gerätes

Die Daten der Freifahrten für Propeller P189R/L mit Düse D356 und Propeller P259R in Düse D342 werden nachstehend als Tabellen und Freifahrt diagramme aufgeführt. Diese Propulsionscharakteristik wurde auch für die Simulation beim Projektpartner MTU genutzt.

Tab. 7.6: Propellerfreifahrt Propeller P189L in Düse D356

J	K_{TP}	K_{TD}	K_{TT}	$10K_Q$	η_0
0,00000	0,2650	0,2494	0,5154	0,4460	0,0000
0,05191	0,2616	0,2246	0,4862	0,4401	0,0913
0,10160	0,2542	0,2005	0,4546	0,4291	0,1713
0,15070	0,2499	0,1751	0,4250	0,4219	0,2416
0,20017	0,2450	0,1513	0,3963	0,4143	0,3047
0,25106	0,2391	0,1292	0,3682	0,4054	0,3629
0,29990	0,2319	0,1094	0,3413	0,3948	0,4126
0,35017	0,2229	0,0905	0,3135	0,3821	0,4572
0,39934	0,2129	0,0738	0,2866	0,3676	0,4956
0,45017	0,1997	0,0567	0,2565	0,3459	0,5312
0,49983	0,1873	0,0418	0,2291	0,3277	0,5562
0,54880	0,1727	0,0280	0,2007	0,3061	0,5727
0,59920	0,1564	0,0144	0,1708	0,2817	0,5782
0,64897	0,1386	-0,0006	0,1380	0,2554	0,5580
0,69761	0,1193	-0,0164	0,1029	0,2264	0,5046
0,74735	0,0958	-0,0343	0,0615	0,1908	0,3833
0,79702	0,0673	-0,0537	0,0135	0,1467	0,1171

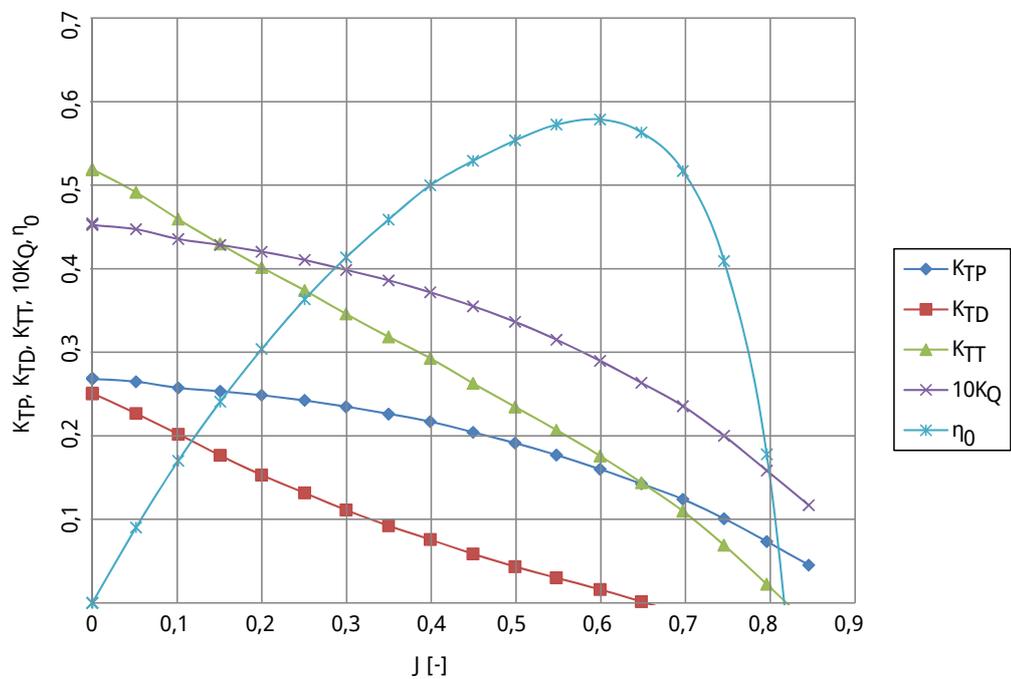


Abb. 7.8: Freifahrt diagramm Propeller 189L in Düse D356

Tab. 7.7: Propellerfreifahrt Propeller P189R in Düse D356

J	K_{TP}	K_{TD}	K_{TT}	$10K_Q$	η_0
0,00000	0,2681	0,2509	0,5190	0,4523	0,0000
0,05156	0,2647	0,2267	0,4914	0,4472	0,0902
0,10143	0,2574	0,2019	0,4593	0,4356	0,1702
0,15078	0,2533	0,1764	0,4297	0,4284	0,2407
0,19987	0,2485	0,1530	0,4014	0,4204	0,3037
0,25068	0,2423	0,1315	0,3739	0,4104	0,3635
0,29947	0,2348	0,1110	0,3458	0,3986	0,4135
0,34960	0,2262	0,0923	0,3184	0,3861	0,4589
0,39894	0,2170	0,0757	0,2926	0,3717	0,4999
0,44939	0,2042	0,0585	0,2627	0,3551	0,5291
0,49900	0,1913	0,0433	0,2345	0,3364	0,5536
0,54775	0,1769	0,0299	0,2068	0,3150	0,5724
0,59914	0,1600	0,0159	0,1759	0,2898	0,5787
0,64811	0,1424	0,0014	0,1438	0,2633	0,5632
0,69702	0,1240	-0,0142	0,1098	0,2355	0,5170
0,74545	0,1009	-0,0319	0,0690	0,2000	0,4093
0,79590	0,0734	-0,0512	0,0222	0,1582	0,1779

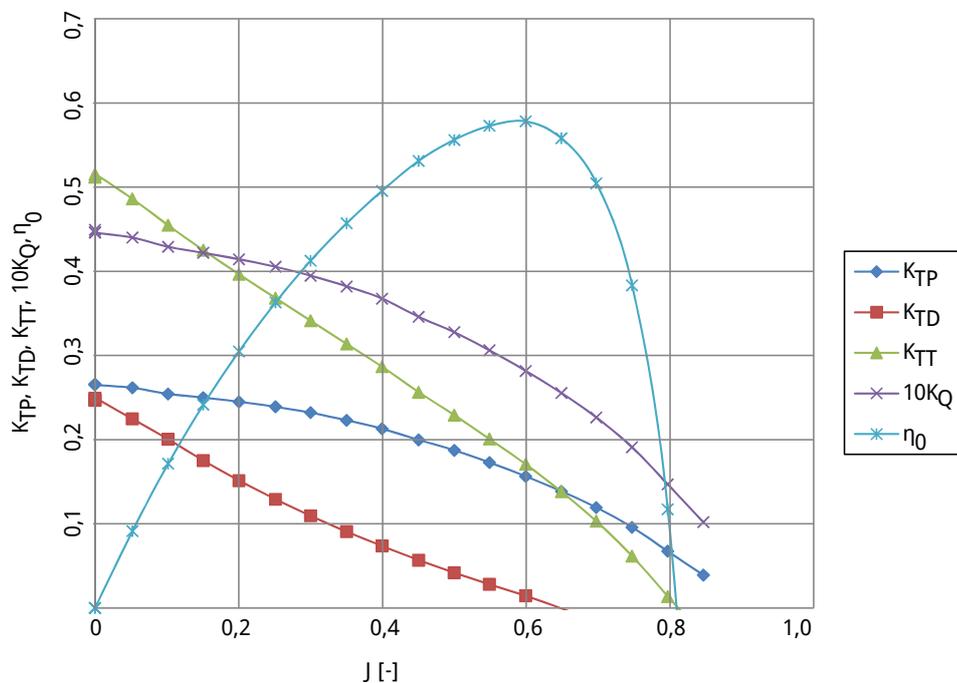


Abb. 7.9: Freifahrt diagramm Propeller P189R in Düse D356

Tab. 7.8: Propellerfreifahrt Propeller P259R in Düse D342

J	K_{TP}	K_{TD}	K_{TT}	$10K_Q$	η_0
0,00002	0,2600	0,2062	0,4661	0,4212	0,0000
0,05749	0,2578	0,1806	0,4383	0,4145	0,0968
0,11424	0,2534	0,1574	0,4108	0,4062	0,1839
0,16884	0,2404	0,1373	0,3777	0,3899	0,2603
0,22522	0,2343	0,1137	0,3480	0,3804	0,3279
0,28158	0,2273	0,0921	0,3194	0,3702	0,3866
0,33628	0,2198	0,0742	0,2940	0,3598	0,4373
0,39242	0,2104	0,0582	0,2686	0,3482	0,4817
0,44795	0,1995	0,0439	0,2435	0,3325	0,5220
0,50317	0,1842	0,0307	0,2149	0,3150	0,5463
0,55644	0,1689	0,0200	0,1889	0,2940	0,5689
0,61178	0,1509	0,0076	0,1585	0,2675	0,5769
0,66622	0,1308	-0,0102	0,1206	0,2385	0,5363
0,71952	0,1063	-0,0280	0,0783	0,2057	0,4360
0,77727	0,0769	-0,0486	0,0283	0,1672	0,2093
0,82587	0,0535	-0,0640	-0,0105	0,1355	-0,1020

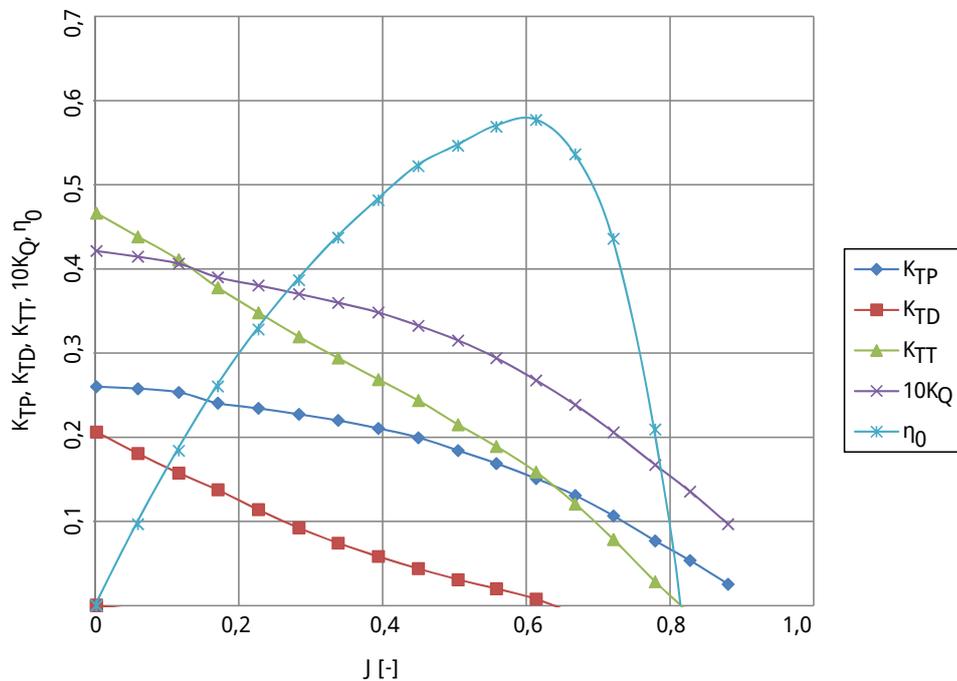


Abb. 7.10: Freifahrt diagramm Propeller P259R in Düse D342

7.2.3 Propulsionsversuche

Entsprechend den navigatorischen Randbedingungen werden die Typschiffe im Propulsionsversuch auf ihren Leistungsbedarf hin untersucht. Die Propulsionsversuche werden als Selbstpropulsionstest mit konstanter Wagengeschwindigkeit gefahren. Für jede Geschwindigkeit werden bis zu drei Messungen mit unterschiedlichen Drehzahlen durchgeführt. Durch Interpolation wird dann der Selbstpropulsionspunkt bestimmt. Jede Fahrt wird mit einem Messsystem aufgezeichnet und anschließend ausgewertet. Folgende Werte werden registriert:

Tab. 7.9: Messgrößen im Propulsionsversuch

Modellgeschwindigkeit	V	[m/s]
Propellerfrequenz	n	[1/s]
Wellendrehmoment	Q	[Nm]
Propellerschub	T_P	[N]
Düschub	T_D	[N]
Restkraft	F_R	[N]
Trimm	Θ	[min]
Absenkung	z_{VM}	[m]

Verschiedene Maßstabeffekte, basierend auf der unterschiedlichen Viskosität und Dichte zwischen Modell und Großausführung, werden für Reibungswiderstand und Effekte am Propeller explizit berücksichtigt. Zusätzliche Unterschiede aufgrund von größerer Rauigkeit der Außenhaut am Schiff und Anhängen oder Rumpfföffnungen werden pauschal mit einem Korrelationsbeiwert erfasst. Nachstehende Abbildungen zeigen exemplarisch die für jede Messfahrt durchgeführte fotografische Dokumentation.



Abb. 7.11: M2030 Vorschiff



Abb. 7.12: M2030D Zweischauber



Abb. 7.13: Modell 2041 Einschrauber



Abb. 7.14: M2030B Koppelverband ohne (links) und mit (rechts) Füllstück

Die ermittelten Prognosen des Leistungsbedarfs für verschiedene Konfigurationen der Typschiffe, ausgewählte Ladefälle und Wassertiefen sind in den nachstehenden Diagrammen 7.15 bis 7.17 dargestellt.

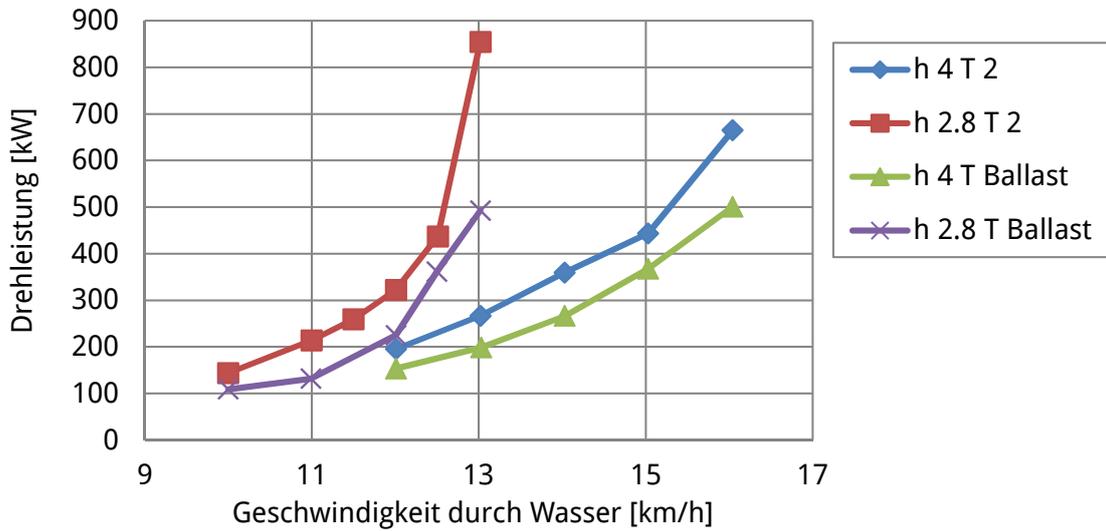


Abb. 7.15: Leistungsbedarf Rheinschiff leer und beladen

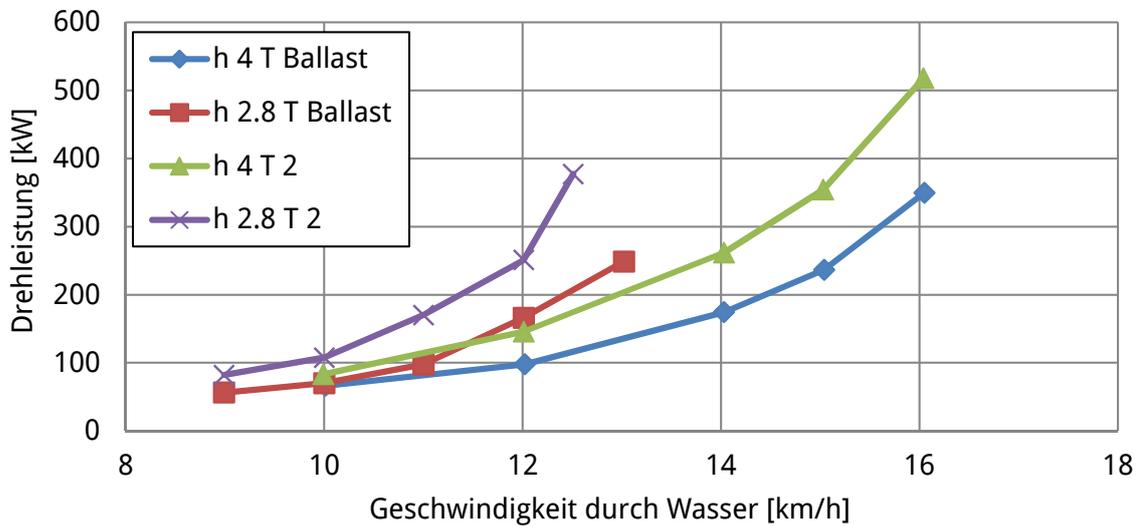


Abb. 7.16: Leistungsbedarf Neckarschiff leer und beladen

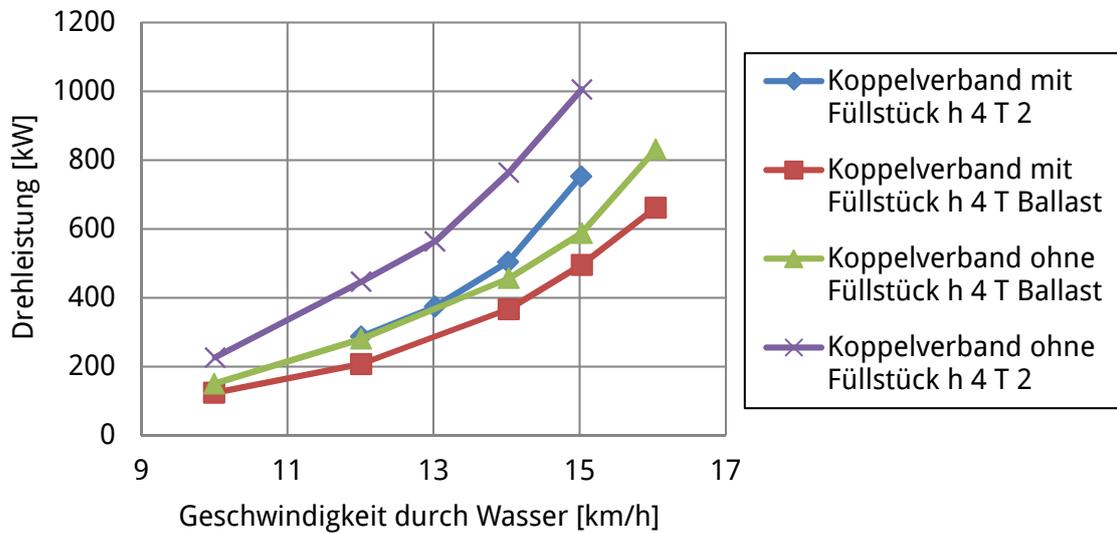


Abb. 7.17: Leistungsbedarf Koppelverband leer und beladen mit und ohne Füllstück

Diese nach der iterativen Optimierung experimentell ermittelten Propulsionskurven der einzelnen Fahrzeuge wurden für die finalen Durchläufe der Betriebssimulationen aufbereitet und genutzt.

7.2.4 Stoppversuche

Schiffe und Verbände müssen rechtzeitig Bug zu Tal anhalten können und dabei ausreichend manövrierfähig bleiben. Wird das Stoppmanöver in stillen Gewässern durchgeführt, ist zusätzlich ein Rückwärtsfahrversuch durchzuführen. Das Stoppvermögen der Modelle wurde entsprechend einer installierten Leistung von ca. 800 bzw. 1100 kW und einer Ausgangsgeschwindigkeit von 13 km/h untersucht. Hierbei zeigte sich, dass das „Crash-Stop Manöver“, wie es in der Rheinschiffahrtsuntersuchungsordnung (CCNR/RheinSchUO §5.07) gefordert wird, bei $T = 2$ m und $h = 4$ m besondere Beachtung benötigt.

In der nachfolgenden Tabelle 7.10 werden die erzielten Stoppwege ausgehend von einer Geschwindigkeit von 13 km/h wiedergegeben und in Abbildung 7.18 als Weg-Zeit-Diagramm dargestellt. Das Diagramm enthält im Gegensatz zur Tabelle nicht die Reaktionszeiten (insgesamt 12 s für Umsteuern und Reaktionszeit des Schiffsführers) und -wege.

Tab. 7.10: Versuchsmatrix der Stoppversuche

Test Nr.	Modell	T_h/T_v	V_S [km/h]	X [m]	Zeit [s]	V_S [km/h] (rückwärts)
15.081.02	2030 D	2	13,0	281,2	131	10,9
15.091.02	2041 B	2	13,0	301,0	177	11,4
15.094.02	2030 B	2	12,7	349,3	217	5,5

Die Stoppwege der Einzelfahrer mit 105 m Länge und 135 m Länge sind im Vergleich zu anderen Schiffen moderat. Ein 110 m langes Motorschiff erreicht üblicherweise einen Stoppweg von < 200 m. Das 135 m lange Schiff mit zwei Propellern liegt ebenfalls im Bereich von 1,5 Schiffslängen. Der maximal erlaubte Weg von 350 m (RheinSchUO §5.07) wird von beiden GMS unterschritten und zeigt keinen deutlichen Unterschied zwischen Einschrauber und Zweischrauber. Die ermittelten Rückwärtsgeschwindigkeiten erlauben ein Halten des Schiffes mit dem Heck gegen den Strom.

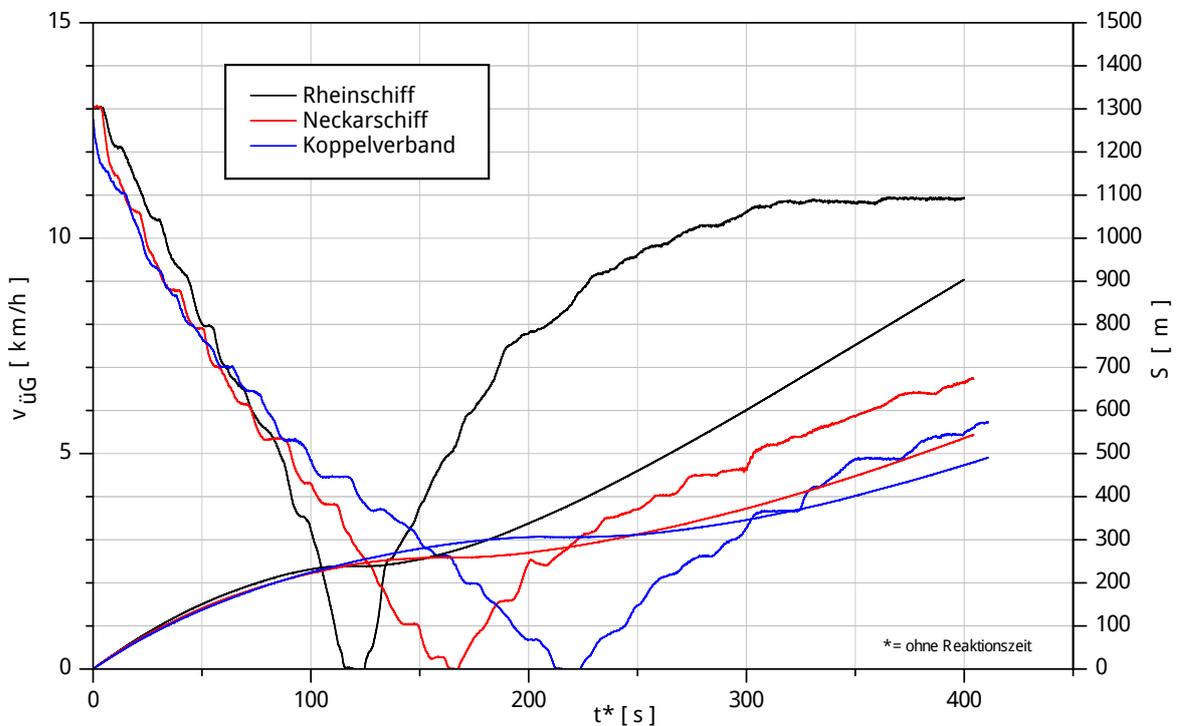


Abb. 7.18: Stoppen gemäß RheinSchUO ausgehend von folgendem Betriebszustand: $V_S = 13 \text{ km/h}$, $T = 2 \text{ m}$, $h = 4 \text{ m}$

Gefordert werden mindestens 6,5 km/h gegen Wasser. Die Rückwärtsgeschwindigkeit reicht aus, um das Schiff auch bei höchstem Schifffahrtswasserstand (HSW) sicher zu halten.

Gesondert muss hier der Koppelverband betrachtet werden. Der Stoppversuch mit dem Verband zeigt, dass die Vorgaben für die Zulassung nicht erreicht werden. Der Stoppweg ist mit 349,3 m grenzwertig und eine Rückwärtsgeschwindigkeit von ca. 5,5 km/h reicht für den Rhein nicht aus. Der geringe Tiefgang in Kombination mit dem relativ großen Propellerdurchmesser ($D_P = 1,75$ m) begünstigen bei einem Rückwärtsdrehen des Propellers den Lufteinbruch und reduzieren den ohnehin reduzierten Rückwärtsschub. Das Propeller-Flächenverhältnis (A_E/A_0) von 0,7 führt beim Aufstoppen des Schiffes ebenfalls dazu, dass durch Wellenschlag von achtern Luft in die Düse eindringen kann. Ein größeres Propeller-Flächenverhältnis wäre hier von Vorteil. In der Praxis ist es oft üblich, in der Talfahrt den Tiefgang achtern durch Wasserballast leicht (um ca. 0,20 m) zu vergrößern. Die tiefere Eintauchung der Düse und des Propellertunnels verhindert dann die Belüftung der Propellerblätter beim Stoppen und sorgt für ein sehr stark verbessertes Stoppverhalten der Schiffe. Dies wird auch bei dem hier untersuchten Neckarschiff als Koppelverband möglich sein und die Einhaltung der Anforderungen zum Stoppweg und den Rückwärtsfahreigenschaften sicherstellen.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Das Verbundvorhaben BinGas und damit auch das hier beschriebene Teilvorhaben BinGas.Hydro konnten erfolgreich abgeschlossen werden. Passend zu den vielfältigen Anforderungen aus der Transportaufgabe, den Fahrtgebieten und den Besonderheiten des Transports von LNG als Ladung und dessen Nutzung als Treibstoff konnten LNG-Binnentanker entworfen, untersucht und optimiert werden.

In enger Abstimmung mit den anderen Teilvorhaben und den assoziierten Partnern wurden zunächst die relevanten Transportszenarien identifiziert. Daran gekoppelt sind die zu befahrenden Wasserstraßen, welche wiederum die Randbedingungen für die Hauptabmessungen und Antriebskonzepte der Tankschiffe mit sich bringen. Die Entwürfe hierzu wurden in vielen iterativen Durchläufen angepasst und zunehmend in Details ausgestaltet. Basierend auf dem jeweiligen Erkenntnisstand wurden immer wieder aufwändige Simulationen des Schiffsbetriebs in zeitlich und räumlich aufgelösten Umgebungsbedingungen durchgeführt. So konnten auch selten auftretende Szenarien mit besonders hohem oder besonders niedrigem Energiebedarf identifiziert und in der Auslegung der Systeme bei den Partnern UDE und MTU berücksichtigt werden.

Durch die begrenzten Abmessungen der Schiffe, vor allem in der Breite und Höhe, ergaben sich im Entwurf teils erhebliche Unterschiede zu bekannten Lösungen aus dem Bereich der Seeschifffahrt. Das ungünstige Verhältnis der Tankoberfläche zum Volumen und die begrenzte Stärke der Isolierung führen zu einer Boil-Off Gasmenge, die häufig den Treibstoffbedarf der Motoren überschreitet. So war der angestrebte Verzicht auf Komponenten zur Rückverflüssigung nicht realisierbar.

8.1 Verwendung der Zuwendung

Die zur Durchführung des Teilvorhabens BinGas.Hydro entstandenen Kosten waren überwiegend Personalkosten für insgesamt 34,7 Personenmonate (PM, umgerechnet

auf Vollzeitäquivalent) aufgeteilt auf 18,7 PM in Position 812 und 16,1 PM in Position 817 des Gesamtfinanzierungsplans. Sämtliche im Projekt entstandenen Kosten sind durch die Verwaltung des DST mit dem Projektträger abgerechnet worden.

8.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeit

Die Bearbeitung des Teilvorhabens konnte im Rahmen des im Antrag vorgesehenen Personalaufwands realisiert werden. Die Arbeiten wurden im Projektverbund abgestimmt und von allen Beteiligten als notwendig und angemessen zur erfolgreichen Bearbeitung des Verbundvorhabens bewertet.

8.3 Voraussichtliche Nutzung und Verwertung der Ergebnisse

Im Verbundvorhaben konnte eine technische Lösung für einen Transport von LNG vom Seehafen-Terminal in Rotterdam zu relevanten Zielhäfen im Hinterland erarbeitet werden. Auch wenn die Verbreitung der LNG-Nutzung zur Zeit unter anderem aufgrund des Preisgefüges bei Kraftstoffen erheblich verzögert stattfindet, ist mittelfristig eine Verwertung zu erwarten. Die Aufbereitung des sogenannten Dieselskandals hat das gesellschaftliche Bewusstsein um die Bedeutung der Luftqualität erheblich gesteigert. Stickoxide gehen mit einem Faktor von 310 in die Berechnung von CO₂-Äquivalenten ein und sind, wie auch Feinstaub, verantwortlich für zahlreiche vorzeitige Todesfälle. Diese Erkenntnisse sind beispielsweise in die ab 2019/2020 für die Binnenschifffahrt relevante Abgasvorschrift NRMM eingeflossen und werden den Einbau von Gasmotoren in neue Schiffe oder im Rahmen eines Motorenaustauschs begünstigen.

Die Ergebnisse des Vorhabens wurden sowohl von der Wirtschaft als auch von der Wissenschaft mit Interesse verfolgt. Wissenschaftlich laufen bereits mehrere partiell darauf aufbauende Vorhaben, beispielsweise im durch die EU im Rahmen des INTERREG-Programms geförderten Projekt MariGreen. Eine wirtschaftliche Verwertung kann durch politisch gesteuerte Anreize, beispielsweise durch entsprechende Anpassung der Zuschussförderung „Nachhaltige Modernisierung von Binnenschiffen“ des BMVI mit Inkrafttreten der NRMM-Regulation, beschleunigt werden. Eine

Weiterentwicklung der Gasmotoren, die Minimierung der Methanschlepp-Problemik und steigende Dieselpreise werden ebenfalls erwartet und werden zur Verbreitung von LNG beitragen. Ein aktuelles Forschungsvorhaben in den Niederlanden erprobt sogar eine direkte Einspritzung von LNG in den Brennraum, so dass große Teile der teuren Anlagentechnik für die Gasaufbereitung entfallen würden. Dies würde die Lücke der Investitionskosten zwischen Diesel- und Gasmotoren mit LNG-Tank erheblich verkleinern.

8.4 Bekannt gewordene Fortschritte bei anderen Stellen

Zum Gegenstand des hier dokumentierten Verbundvorhabens sind keine vergleichbaren Projekte bekannt.

8.5 Veröffentlichungen

Die Ergebnisse des Verbund- und Teilvorhabens wurden und werden auf verschiedenen Wegen parallel veröffentlicht. Der Wissenschaftlich-Technische Ausschuss des DST und damit zahlreiche Vertreter der Wirtschaft wurden bereits während der Projektlaufzeit über die Ergebnisse informiert. Zudem gab es im Bearbeitungszeitraum zahlreiche Treffen und eine enge Kommunikation mit den assoziierten Partnern und Behörden.

Des Weiteren wurden die Ergebnisse in verschiedenen Vorträgen, wie beispielsweise im Rahmen der Hauptversammlung der Schiffbautechnischen Gesellschaft am 15. November 2016 in Hamburg und bei der Statustagung Maritime Technologien am 7. Dezember 2016 in Berlin, präsentiert. Schriftliche Beiträge sind im Jahrbuch der STG und im Tagungsband der Statustagung Maritime Technologien enthalten. Der vollständige Bericht wird über die Technische Informationsbibliothek Hannover veröffentlicht.

Literaturverzeichnis

- [1] *ANSYS CFX-Solver Theory Guide, Release 14.5*. ANSYS Inc. Southpointe 275 Technology Drive Canonsburg PA 15317. 2012.
- [2] J. Boog M. und Eichmeier. *Schlussbericht zum Teilvorhaben Entwicklung eines Simulationsprogramms für die Antriebsanlage von LNG-Binnentankschiffen – BinGas.Power*. Technischer Bericht. MTU Friedrichshafen GmbH, 2017.
- [3] F. Dahlke, M. Radisch und B. El Moctar. *Schlussbericht zum Teilvorhaben Entwicklung von LNG-Tank- und Nutzungstechnologien für Binnentankschiffe – BinGas.Technik*. Technischer Bericht. Institut für Schiffstechnik und Transportsysteme, Universität Duisburg-Essen, 2017.
- [4] EEA/Alberto González Ortiz. „Air quality in Europe — 2016 report“. In: ().
- [5] *Eiger LNG Refit*. <http://www.danser.nl/en/Fleet/EigerLNGRefit.aspx>. Abgerufen: Januar 2017.
- [6] Ralf Kurtenbach, Kai Vaupel, Jörg Kleffmann, Ulrich Klenk, Eberhard Schmidt und Peter Wiesen. „Emissions of NO, NO_x and PM from inland shipping“. In: *Atmospheric Chemistry and Physics* 16.22 (2016), Seiten 14285–14295.
- [7] *LNG Bunkern im Hafen Mannheim*. <http://www.bonapart.de/nachrichten/beitrag/erste-lng-bunkerung-in-deutschland-im-hafen-mannheim-durchgefuehrt.html>. Abgerufen: Januar 2017.
- [8] *LNG Inland*. http://www.vekagroup.com/en/lng_inland.html. Abgerufen: Januar 2017.
- [9] *LNG-Masterplan, Deliverable 3.1.3.1-2: Case study LNG bunker stations - Ports of Mannheim and Switzerland*. <http://www.lngmasterplan.eu/download/deliverables>. Abgerufen: Januar 2017.
- [10] *LNG-Tankcontainer*. <http://www.ms-de.eu/lng/>. Abgerufen: Januar 2017.
- [11] *LNG Terminal in Rotterdam*. <https://www.portofrotterdam.com/de/transport-und-industrie/lng-drehscheibe/lng-terminal>. Abgerufen: Januar 2017.

- [12] *LNG-powered EcoLiner delivers dramatic fuel savings*. http://www.damen.com/en/news/2015/03/lng_powered_ecoliner_delivers_dramatic_fuel_savings. Abgerufen: Januar 2017.
- [13] *MTS Argonon*. <http://www.deenshipping.com/argonon.html>. Abgerufen: Januar 2017.
- [14] *MTS Argos-GL*. <http://www.rsdbv.nl/project/mts-argos-gl/23>. Abgerufen: Januar 2017.
- [15] F. R. Menter. „Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications (MENTER)“. In: *AIAA Journal* 32(8) (1994), Seiten 1598–1605.
- [16] Zentralkommission für die Rheinschifffahrt. *Europäisches Übereinkommen vom 26. Mai 2000 über die internationale Beförderung von gefährlichen Gütern auf Binnenwasserstraßen (ADN)*. 2015.
- [17] *Schiffstaupe des Sirocco, eines Dual/Fuel/Diesel/LNG- Schiffes, in Grevenmacher*. <http://www.gouvernement.lu/4040438/24-bausch-scirocco>. Abgerufen: Januar 2017.
- [18] *TMS GreenStream*. http://www.gelsenkirchener-geschichten.de/userpix/2225/2225_DSCI1794Greenstream_1.jpg. Abgerufen: Januar 2017.
- [19] Vogler, F., Scholz, B., Langfeldt, L. *Machbarkeitsstudie zum Bunkern von Flüssiggasen in deutschen Häfen*. Germanischer Lloyd SE. 2012.
- [20] Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes. *Binnenschifffahrtsstraßen-Ordnung (BinSchStrO)*. 2016. URL: <https://www.elwis.de/Schifffahrtsrecht/Verzeichnis-Rechtsverordnungen-Gesetze/BinSchStrO.pdf> (besucht am 25.01.2017).
- [21] Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes. *Binnenschiffsuntersuchungsordnung - BinSchUO*. 2016. URL: <https://www.elwis.de/Schifffahrtsrecht/Verzeichnis-Rechtsverordnungen-Gesetze/BinSchUO.pdf> (besucht am 25.01.2017).
- [22] Doug Woodyard. *Marine Diesel Engines and Gas Turbines*. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2009.
- [23] *World Maritime News Staff: Peters Shipyards introduces LNG Greenstream Tanker*. <http://worldmaritimenews.com/archives/46758/the-netherlands-peters-shipyards-introduces-lng-greenstream-tanker1>. Abgerufen: Januar 2017.

- [24] *weska 2015, Europäischer Schifffahrts- und Hafenkalendar*. Binnenschifffahrts-Verlag GmbH, 2015.

**BinGas – Entwicklung von Technologien zum LNG-Transport mit
Binnenschiffen: Tank-Antrieb-Schiff
BinGas.Hydro – Logistische und hydrodynamische Untersuchungen für den
LNG-Transport mit Binnenschiffen**

Duisburg, im Januar 2017

Fachbereich Schiffshydrodynamik

Projektleiter:


.....
(Dipl.-Ing. Benjamin Friedhoff)

DST – Entwicklungszentrum für
Schiffstechnik und Transportsysteme e.V.


.....
(Dr.-Ing. Rupert Henn)