



Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme e.V.

DST - Development Centre for Ship Technology and Transport Systems

NRW / EU - Ziel 2 - Programm 2000 - 2006

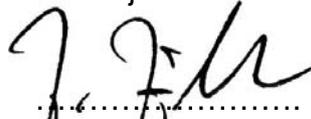
Programmteil „Technologie und Innovation“

Förderkennzeichen: 005-0404-0013 - Aktenzeichen: z0404PM08

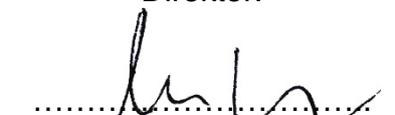
**Modernisierung der vorhandenen Binnenschiffsflotte durch
Vergrößerung der Hauptabmessungen, Reduzierung der
Fixpunkthöhe und Austausch des Hinterschiffs**

Bericht 1852 - April 2007

Projektleiter:


.....
(Dipl.-Ing. J. Zöllner)

Direktor:


.....
(Prof. Dr. Paul Engelkamp)

Der Bericht ist in drei Teile gegliedert:

Teil A - Modellversuche und numerische Untersuchungen

Teil B - Wirtschaftliche Bewertung der Maßnahmen

Teil C - Reduzierung der Fixpunkthöhe



Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und
Transportsysteme e.V.

Untersuchungsbericht

im Auftrag des

**Ministeriums für Wirtschaft, Mittelstand und Energie
des Landes Nordrhein-Westfalen**

**Modernisierung der vorhandenen Binnenschiffsflotte durch Vergrößerung der
Hauptabmessungen, Reduzierung der Fixpunkthöhe und Austausch des
Hinterschiffs**

– Teil A: Modellversuche und numerische Untersuchungen –

Bericht 1852 A – April 2007

von

Dipl.-Ing. Walter Förster
Dipl.-Ing. Sven List

Projektleiter:
Dipl.-Ing. Joachim Zöllner

Direktor:
Prof. Dr. Paul Engelkamp

Oststr. 77
47057 Duisburg • Germany
Tel.: ++49-203 99369-0
Fax ++49-203 361373

e-mail: dst@dst-org.de
<http://www.dst-org.de>
USt-Nr. 10958400016
USt-IdNr. DE 119553654

Institut an der
Universität Essen Duisburg
Standort Duisburg



Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	3
2.	Aufgabenstellung	3
3.	Nachträgliche Vergrößerung der Hauptabmessungen	5
3.1	Schiffsverlängerung	5
3.1.1	Modelle	6
3.1.2	Versuche	8
3.1.3	Ergebnisse	10
3.2	Schiffsverbreiterung	11
3.2.1	Modelle	12
3.2.2	Versuche	16
3.2.3	Ergebnisse	18
3.3	Kompletter Ersatz des Hinterschiffes	20
3.3.1	Modelle	20
3.3.2	Versuche	24
3.3.3	Ergebnisse	25
4.	Widerstand	29
5.	Stoppen	30
6.	Wellen, axiale Strömung und Bodendrucke	31
7.	Beurteilung	33
8.	Numerische Untersuchungen	34
8.1	Aufgabenstellung	34
8.2	Verfahren	34
8.2.1	Erhaltungsgleichungen und Turbulenzmodellierung	34
8.2.2	Diskretisierung	35
8.2.3	Randbedingungen	35
8.3	CFD-Berechnungen	36
8.3.1	Gittergenerierung und Aufbereitung der Geometrie	36
8.3.2	Berechnungsfälle	47
8.3.3	Ergebnisse	48
8.4	Zusammenfassung	67

1. Einleitung

Die lange Lebensdauer und daraus resultierend das hohe Durchschnittsalter der im Einsatz befindlichen Binnenschiffe (rund 50 Jahre bei den Trockengüterschiffen) verhindern eine schnelle und marktgerechte Anpassung der Flotte und führt zu relativen Wettbewerbsnachteilen gegenüber der Konkurrenz. Besonders die Modernisierung der LKW-Flotten ist hier als rasant zu bezeichnen.

Berücksichtigt man zum Beispiel die Zwänge durch die Abgasnorm EURO oder die Entwicklung im Bereich der Bordelektronik (Einführung der BUS-Technologie) so kann man sagen, dass sich aktuell der LKW Bestand innerhalb der letzten 10 Jahre komplett erneuert hat.

Modernisierungsmaßnahmen an der vorhandenen Binnenschiffsflotte bilden deshalb einen wichtigen Schlüssel zur Umsetzung von Neuerungen und zur Verbesserung der Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit.

2. Aufgabenstellung

Zentrales Thema der Untersuchung zur Modernisierung der vorhandenen Flotte ist die nachträgliche Vergrößerung der Hauptabmessungen Länge und Breite. Ein typisches Motorgüterschiff wird daher in vier Versionen verbreitert und/oder verlängert. Die Versionen werden in systematischen Propulsionsversuchen miteinander verglichen. In einer fünften Version werden das Vor- und Hinterschiff erneuert.

Die nachfolgende Matrix zeigt den Umfang der Versuche. Wassertiefen und Tiefgänge wurden bewusst repräsentativ gewählt, so kann ein zu bewertendes Motorschiff sehr genau zugeordnet werden.

Version	h / T											
	2.5/1.7	3.5/1.7	3.5/2.0	3.5/2.5	5.0/1.7	5.0/2.0	5.0/2.5	5.0/3.4	7.5/2.0	7.5/2.5	7.5/3.4	
A	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
B	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
BB	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
C	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
D	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
E	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
EE		x	x							x	x	

Tab. 1: Aufstellung der Versuchsmatrix

Die Versionen werden im Folgenden kurz charakterisiert:

Version A ist das Basisschiff und entspricht dem so genannten „verlängerten Johann Welker“. Das Schiff trägt bei einem Tiefgang von 2,50 m ca. 1350 t. Der Typ kann als sehr weit verbreitet bezeichnet werden und stellt somit das größte Potential für die Umbaumaßnahmen dar.

Version B entsteht durch die Laderaumverbreiterung der Version A. Das komplette parallele Mittelschiff wird sprunghaft von 9,50 m auf 11,40 m verbreitert und erfährt somit eine gut 300 t höhere Verdrängung.

Version BB ist eine Evolutionsstufe der Version B. Die sprunghafte Verbreiterung des Schiffes führte zu deutlichen hydrodynamischen Nachteilen und wurde durch besseres einstraken der Vor- und Hinterschiffslinien verbessert.

Version C ist die alternative Möglichkeit zu Version B, das heißt die Version A wird von 86 m auf 110 m verlängert. Das Schiff erhält somit bis zu 75 m Laderaumlänge, wenn dieses als Ein-Raum-Schiff ausgeführt wird.

Version D hat nach der Verbreiterung der Version C die Charakteristik eines Großmotorschiffes. Hauptabmessungen von 110 m x 11,40 m erlauben bei max. 3,50 m Tiefgang eine Tragfähigkeit von 3000 t.

Version E beschreitet neue Wege des Hinterschiffsentwurfs. Die klassische getunnelte Hinterschiffsform kommt hier nicht zum Einsatz. Die Anbringung von klappbaren Schürzen soll hier die positiven Eigenschaften eines Tunnels übernehmen, ohne dass Verdrängung verloren geht. Die Hauptabmessungen sind entsprechend Version D gewählt, damit ein direkter Vergleich stattfinden kann.

3. Nachträgliche Vergrößerung der Hauptabmessungen

Ausgewählt wurde ein typisches Motorschiff („Johann Welker verlängert“) mit einer Länge von 86 m und einer Breite von 9,50 m. Die Änderung der Hauptabmessungen führt zu einem Verdrängungsanstieg – dieser muss jedoch nicht unbedingt zu einer höheren Tragfähigkeit führen.

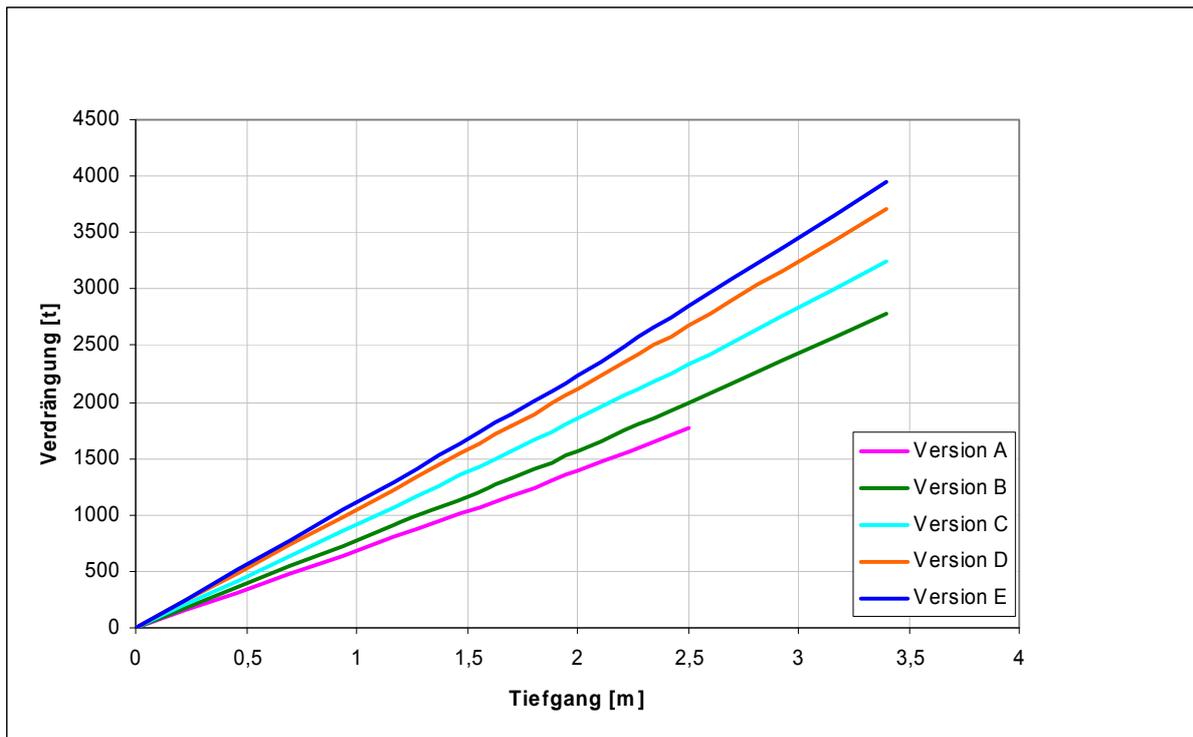
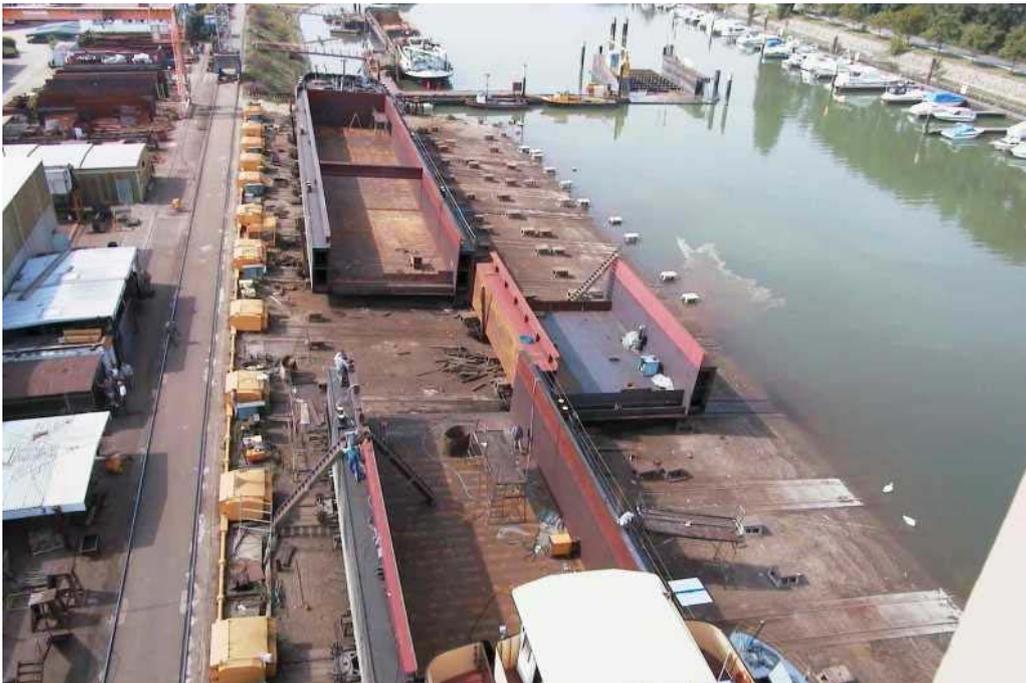


Abb. 1: Verdrängung als Funktion des Tiefgangs

3.1 Schiffsverlängerung

Schiffsverlängerungen sind eine Möglichkeit, geänderten wirtschaftlichen Rahmenbedingungen zu begegnen. Die Effekte einer solchen Maßnahme auf das Antriebs- und Geschwindigkeitsverhalten des Schiffes müssen aus Termin- oder Kostengründen oftmals ohne Absicherung durch Modellversuche abgeschätzt werden.



http://www.schiffswerft-braun.de/Aktuelle_Umbauten/MS_Najade_/Najade1/najade1.html

Abb. 2: Beispiel einer Schiffsverlängerung

Das Kapitel ist daher nachhaltig auf dieses Thema eingegangen und liefert ein weites Feld (Tiefgang/Wassertiefe) an Propulsionsergebnissen, welche bei der Abschätzung der hydrodynamischen Folgen einer Schiffsverlängerung notwendig sind.

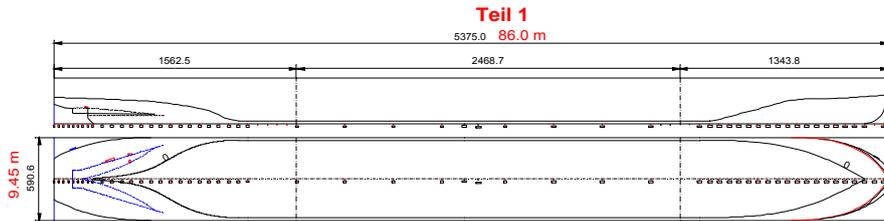
3.1.1 Modelle

Die im DST gebauten Modelle der Motorgüterschiffe im Maßstab $\lambda = 16$ wurden mit Rudern, Düse und Propeller (siehe Anhang A) ausgerüstet. Bei Vergrößerung der Länge werden die Anhänge nicht geändert. So ist ein direkter Einfluss zu erkennen.

Basis für alle Versuche ist die Version A. Sie kann mit einem entsprechenden Modul für den parallelen Mitschiffsbereich verlängert werden. Die Version wird dann als Version C bezeichnet.

Die wesentlichen Hauptabmessungen des Motorgüterschiffes (Basis) sind:

Version A (Basis): L x B = 85 m x 9,50 m



			Modell	Großausführung
Maßstab	λ	[-]	16	1
Länge	$L_{\text{üa}}$	[m]	5,375	86,0
Breite	B	[m]	0,590	9,46
Tiefgang	T_{max}	[m]	0,212	3,40
Verdrängung	V	[m ³]	0,600	2457,5
Blockkoeffizient	C_B	[-]	0,888	0,888

Der Propulsionsvergleich (siehe nachfolgendes Diagramm) mit einem typischen Motorschiff dieser Größe zeigt, dass das DST-Basis-Modell durchaus als beispielhaft angesehen werden kann.

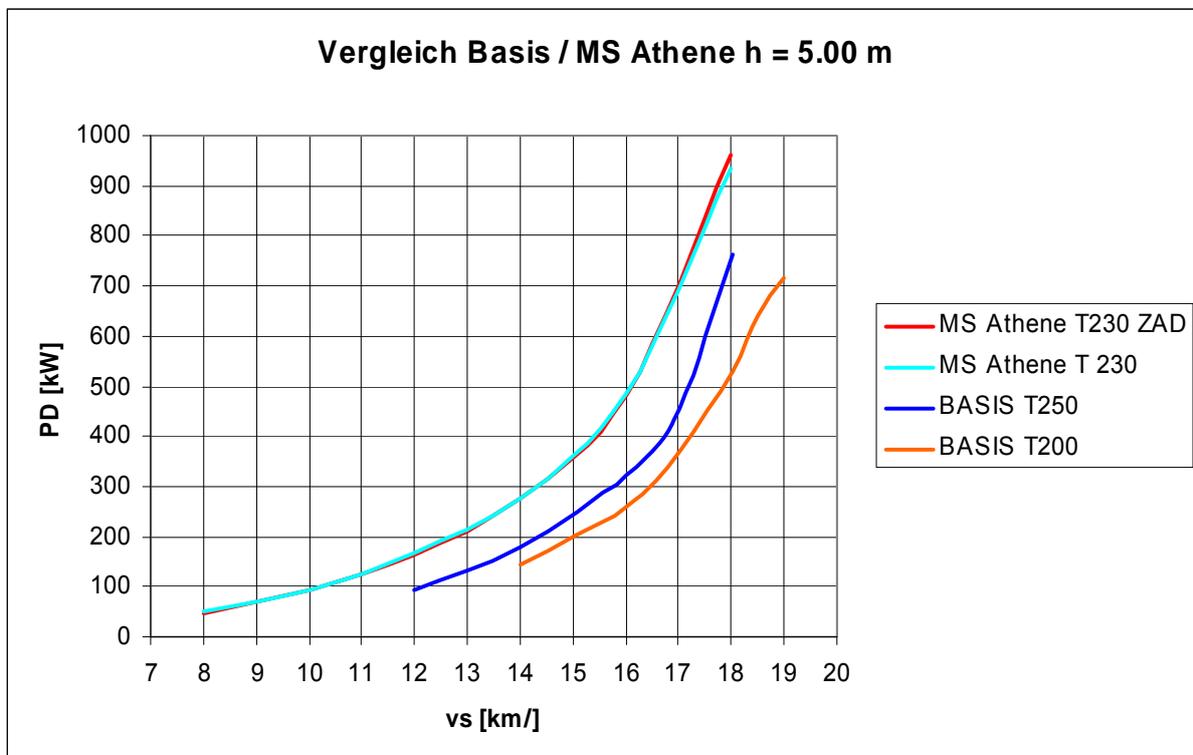
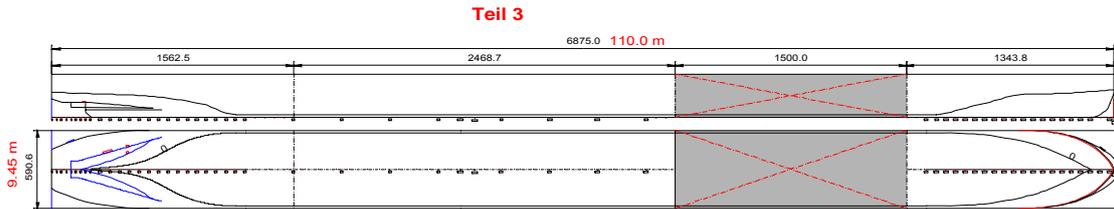


Abb. 3: Leistungsvergleich Version A

Version C: L x B = 110 m x 9,50 m



			Modell	Großausführung
Maßstab	λ	[-]	16	1
Länge	$L_{\text{üa}}$	[m]	6,875	110,0
Breite	B	[m]	0,590	9,46
Tiefgang	T_{max}	[m]	0,212	3,40
Verdrängung	V	[m ³]	0,793	3248,6
Blockkoeffizient	C_B	[-]	0,91	0,91

Die Abmessungen und Charakteristika der Anhänge (Propeller, Düsen und Ruder) sind im Anhang A dargestellt.

3.1.2 Versuche

Propulsion

Im flachen Wasser wurden die Modelle bis an ihre hydraulischen Grenzen (Querwelle, Grundberührung) gefahren. Bei den Mittel- und Tiefwasserversuchen galt eine Leistung P_D von ca. 1200 kW als Orientierung für die Motorisierung und der damit erzielbaren Schiffsgeschwindigkeit.

Die Durchführung der Versuche erfolgte unter Einhaltung der Modellgesetze und nach internationaler Norm.

Das Modell hat gegenüber der Großausführung einen im Verhältnis höheren Widerstand. Bereits im Versuch wird durch ein in Fahrtrichtung wirkendes Gewicht ein Ausgleich geschaffen. Diese mechanisch in Fahrtrichtung wirkende Kraft, als Reibungsabzug F_D bezeichnet, wurde bei diesen Untersuchungen nach der ITTC-57 Methode ohne Berücksichtigung der Übergeschwindigkeit (infolge Fahrwasserbegrenzung) bestimmt.

$$F_D = 0,5 * \rho * V_M^2 * S_M * (C_{FM} - C_{FS} - C_A)$$

$$C_{FM} = 0,075 / (\log R_{nM} - 2)^2 \quad C_{FS} = 0,075 / (\log R_{nS} - 2)^2$$

$$R_{nM} = V_M * L_{WLM} / \nu_M \quad R_{nS} = V_S * L_{WLS} / \nu_S$$

$$C_A = 0,0002$$

Der Index M steht für Modellwerte, Index S für Schiffswerte.

Die Versuche im großen Schlepptank des DST ($L = 190 \text{ m}$; $B = 9,8 \text{ m}$) erfolgten bei ruhigem strömungsfreiem Wasser.

Das Modell des Motorgüterschiffes wurde vor den Versuchen durch Gewichte auf die richtige Verdrängung abgeladen und gleichzeitig auf ebenem Kiel eingetrimmt. Mit dieser Schwimmlage sind Widerstands-, Propulsions- und Pfahlzugversuche durchgeführt worden.

Messgrößen bei den Pfahlzugversuchen sind:

Drehzahl	n	$[\text{s}^{-1}]$
Schub	TP, TD	$[\text{N}]$
Drehmoment	Q	$[\text{Nm}]$
Pfahlzugkraft	F_P	$[\text{N}]$

bei den Widerstandsversuchen:

Gesamtwiderstand	RT	$[\text{N}]$
Trimm	tr	$[\text{w-min}]$
Absenkung	z_V	$[\text{m}]$
Geschwindigkeit	V_M	$[\text{m/s}]$

bei den Propulsionsversuchen:

Drehzahl	n	$[\text{s}^{-1}]$
Drehmoment	Q	$[\text{Nm}]$
Schub	TP, TD	$[\text{N}]$
Trimm	tr	$[\text{w-min}]$
Absenkung	z_V	$[\text{m}]$
Geschwindigkeit	V_M	$[\text{m/s}]$

Die Spannungen der elektrischen Messwertgeber sind mit einer Taktrate von 100 Messungen pro Sekunde aufgenommen worden. Für messrelevante Zeitbereiche wurden anschließend mittlere Spannungswerte gebildet und daraus die Absolutwerte berechnet.

Die Auswertung der Versuchsmesswerte und die Übertragung der Modellergebnisse auf die Großausführung erfolgte nach dem Froude'schen Ähnlichkeitsgesetz und der Methode der ITTC.

Es berechnet sich:

$$P_D = 2\pi * Q_M * n_M * \lambda^{3,5} * (\rho_S / \rho_M) * m_P * m_D \quad (\text{Leistung})$$

m_P Maßstabsfaktoren für Propeller
 m_D Maßstabsfaktor für Düse

$n = n_M / \sqrt{\lambda}$ (Drehzahl)
 $V = V_M * \sqrt{\lambda}$ (Geschwindigkeit)
 $F_P = F_{PM} * \lambda^3$ (Pfahlzugkraft)
 $Q = Q_M * \lambda^4$ (Drehmoment)
 $z_V = z_{VM} * \lambda$ (Absenkung)
 $tr = tr_M$ (Trimm)

3.1.3 Ergebnisse

Die Verlängerung der Schiffe um 24 m wird in den Propulsionsversuchen direkt sichtbar. Exemplarisch wird hier der Tiefgang 2,50 m auf einer Wassertiefe von 5,0 m betrachtet. Das h/T wurde deshalb gewählt, weil hier auch ein Widerstandsversuch vorliegt.

Nachfolgend sind die Widerstands- und Propulsionskurven für die Versionen A bis D dargestellt.

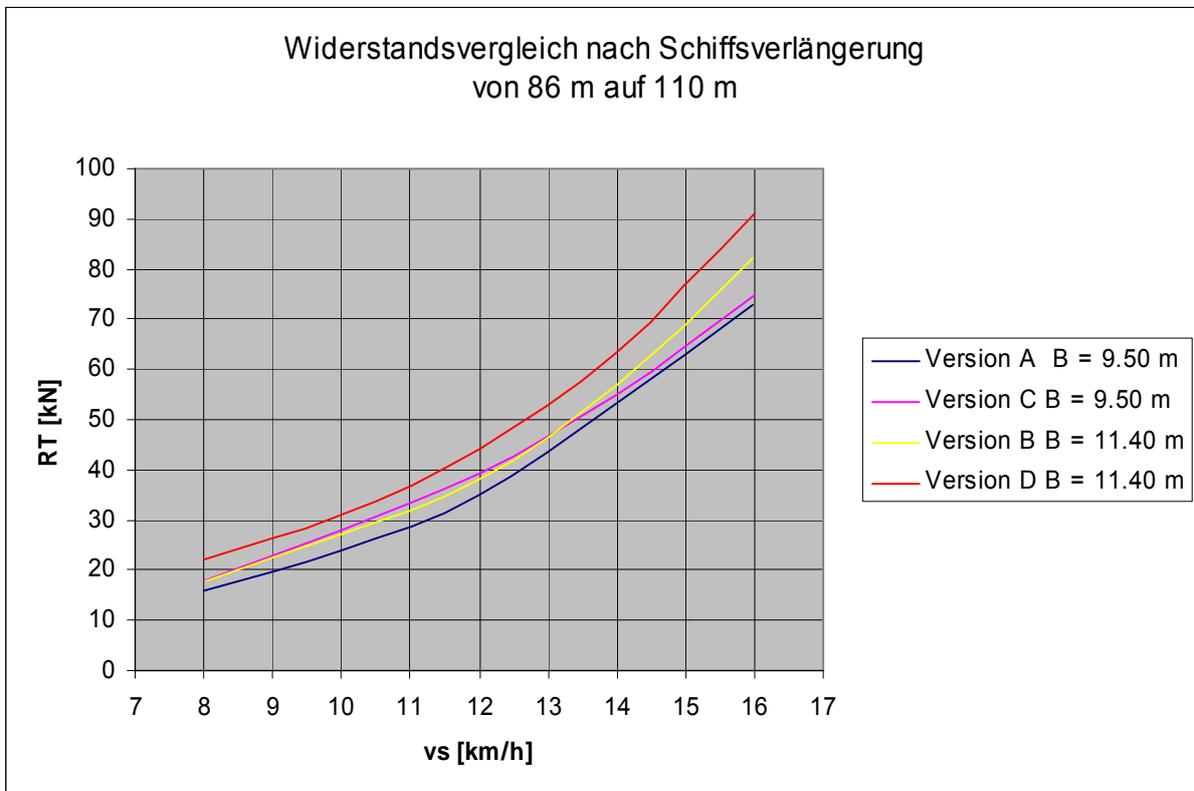


Abb. 4: Widerstand

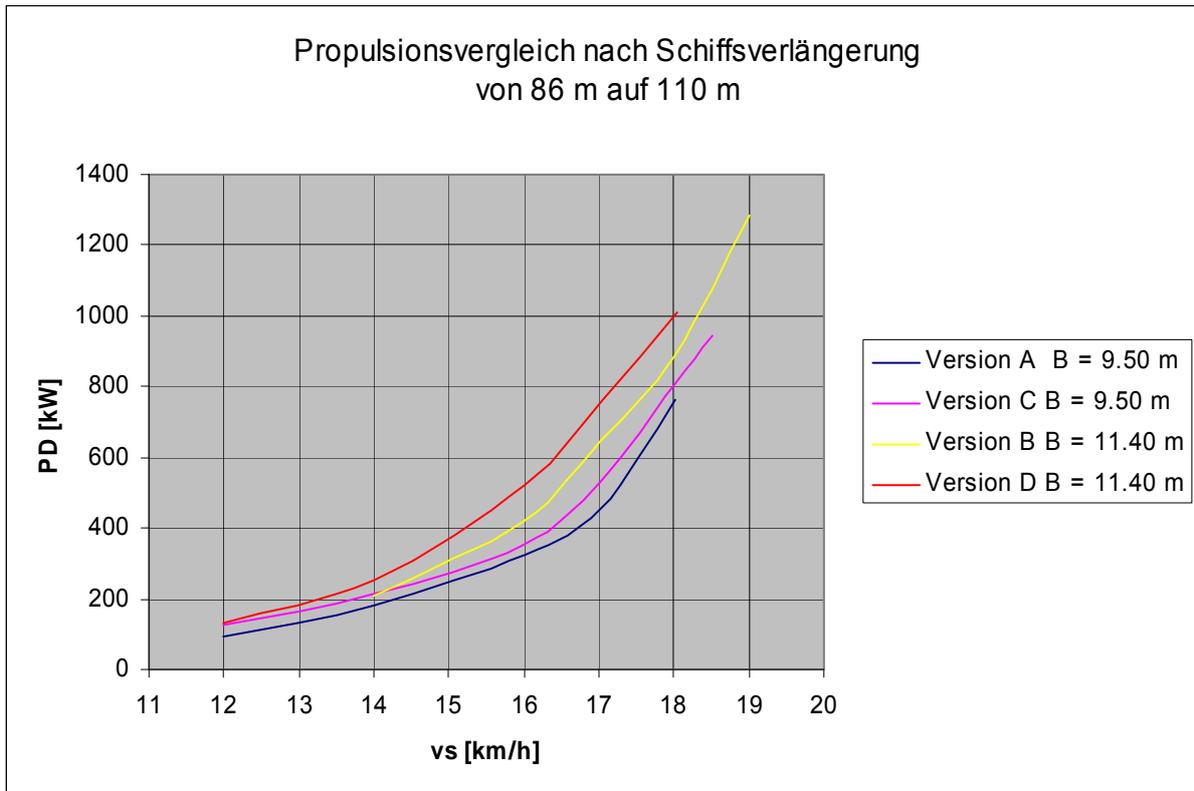


Abb. 5: Propulsion

Betrachtet man die Propulsionspunkte bei $v_s = 16$ km/h, so wird deutlich, dass sich die Verlängerung auf das schmale Schiff (A und C) mit ca. 5 % Mehrleistung und auf das breite Schiff (B und D) hingegen mit ca. 20 % auswirkt.

3.2 Schiffsverbreiterung

Die Schiffsverbreiterung basiert im Wesentlichen auf den gleichen wirtschaftlichen Überlegungen wie die Verlängerung – das Schiff soll rentabel und marktfähig einsetzbar sein.

Zumeist ist aber nicht die Tragfähigkeitserhöhung gefragt, sondern es wird eine bestimmte Laderaumgeometrie (Volumen) angestrebt, die beispielsweise den Transport von ISO Containern ermöglicht.

Im nachfolgenden Bild wurde das parallele Mittelschiff (Laderaum) komplett neu gebaut und das Schiff von 8,20 m auf 9,50 m verbreitert. Das Vor- und Hinterschiff wurden unverändert angebaut. Diese Umbauvariante ist wesentlich aufwendiger.



http://www.schiffswerft-braun.de/Aktuelle_Umbauten/MS_Europa_/Europa3/europa3.html

Abb. 6: Beispiel einer Schiffsverbreiterung

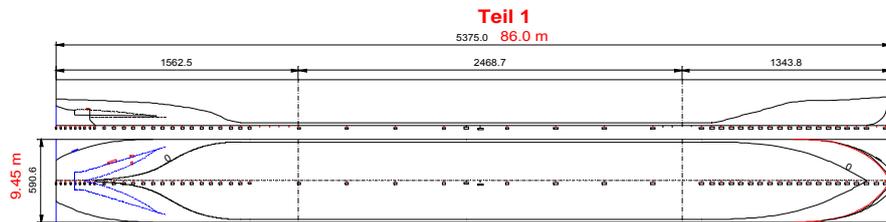
3.2.1 Modelle

Das aus Holz gefertigte Modell war außen technisch glatt lackiert. Als unterstützende Maßnahme zur Strömungsturbulenzbildung an der Außenhaut während der Versuchsfahrten sind jeweils an den Spanten 17 und 19 (bei 20-er Spanteinteilung der Modelllänge) 20 mm breite Sandstreifen mit einer Körnung von 1 mm aufgetragen worden.

Das Modell (siehe Anhang A) entspricht einem Standardschiff und wird zunächst als Basisschiff auf seine Propulsionseigenschaften untersucht. Das Schiff wird als Version A bezeichnet.

In weiteren Versuchen wird zunächst die Breite im parallelen Mittelschiff von 9,50 m auf 11,40 m erhöht. Das Schiff wird hiernach als Version B bezeichnet.

Version A (Basis): L x B = 86 m x 9,50 m

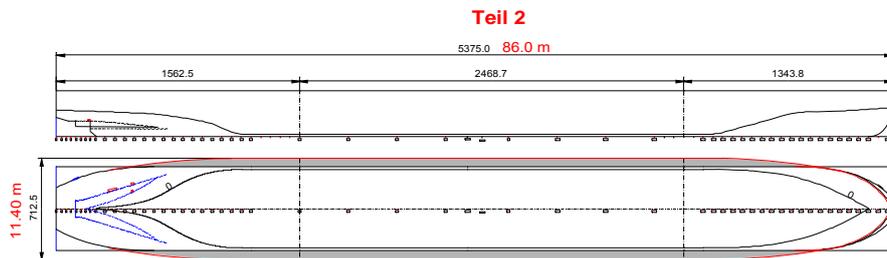


			Modell	Großausführung
Maßstab	λ	[-]	16	1
Länge	$L_{\text{üa}}$	[m]	5,375	86,0
Breite	B	[m]	0,591	9,46
Tiefgang	T_{max}	[m]	0,212	3,40
Verdrängung	V	[m ³]	0,603	2469,5
Blockkoeffizient	C_B	[-]	0,888	0,888



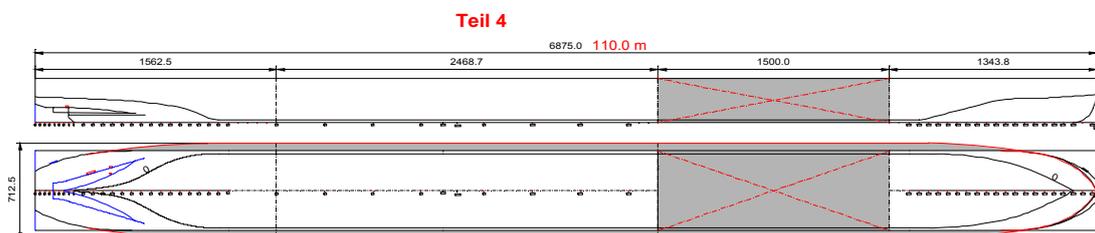
Abb. 7: Propulsionsversuche mit einem verbreiterten Motorschiff (Länge 86 m, Breite 11,40 m)

Version B: L x B = 86 m x 11,40 m



			Modell	Großausführung
Maßstab	λ	[-]	16	1
Länge	$L_{\text{üa}}$	[m]	5,375	86,0
Breite	B	[m]	0,713	11,40
Tiefgang	T_{max}	[m]	0,212	3,40
Verdrängung	V	[m ³]	0,677	2774,9
Blockkoeffizient	C_B	[-]	0,8	0,8

Version D: L x B = 110 m x 11,40 m



			Modell	Großausführung
Maßstab	λ	[-]	16	1
Länge	$L_{\text{üa}}$	[m]	6,875	110,0
Breite	B	[m]	0,712	11,40
Tiefgang	T_{max}	[m]	0,212	3,40
Verdrängung	V	[m ³]	0,906	3709
Blockkoeffizient	C_B	[-]	0,87	0,87

Linien und Spantenriss sowie die Anordnung der Propulsionsorgane sind im Anhang A enthalten.

Als weitere versuchstechnische Ausrüstung im Modell erfolgt die Anordnung eines Drehzahlgebers und eines Kraftmessglieds zur Erfassung der Pfahlzugkraft FP bzw. der Längskräfte X bei den Widerstands- und Propulsionsversuchen.

Die nachfolgenden Bilder zeigen die Anbauelemente, mit denen eine Schiffsverbreiterung erwirkt wird.



Abb. 8: Teilmodelle zur Schiffsverbreiterung, auf dem Kopf liegend

Jede Version wird entsprechend der Tabelle 1 auf vier Wassertiefen und mit vier Tiefgängen untersucht.



Abb. 9: Übergang der Schiffsverbreiterung auf das alte Hinterschiff

Die Abbildung zeigt die Verbreiterung des Modells im Hinterschiffsbereich. Die roten Pfeile markieren den Übergangsbereich zum Laderaum hin.

3.2.2 Versuche

Propulsion

Im flachen Wasser wurden die Modelle bis an ihre hydraulischen Grenzen (Querwelle, Grundberührung) gefahren. Bei den Mittel- und Tiefwasserversuchen galt eine Leistung P_D von ca. 1200 kW als Orientierung für die mögliche Schiffsgeschwindigkeit.

Wassertiefe h [m]	Tiefgänge T [m]			
	1,7	-	-	-
2,5	1,7	-	-	-
3,5	1,7	2,0	2,5	-
5,0	1,7	2,0	2,5	3,4
7,5	-	2,0	2,5	3,4

Tab. 2: Versuchsübersicht

Die Durchführung der Versuche erfolgte unter Einhaltung der Modellgesetze und nach internationaler Norm.

Das Modell hat gegenüber der Großausführung einen im Verhältnis höheren Widerstand. Bereits im Versuch wird durch ein in Fahrtrichtung wirkendes Gewicht ein Ausgleich geschaffen. Diese mechanisch in Fahrtrichtung wirkende Kraft, als Reibungsabzug F_D bezeichnet, wurde bei diesen Untersuchungen nach der ITTC-57 Methode ohne Berücksichtigung der Übergeschwindigkeit (infolge Fahrwasserbegrenzung) bestimmt.

$$F_D = 0,5 * \rho * V_M^2 * S_M * (C_{FM} - C_{FS} - C_A)$$

$$C_{FM} = 0,075 / (\log R_{nM} - 2)^2 \quad C_{FS} = 0,075 / (\log R_{nS} - 2)^2$$

$$R_{nM} = V_M * L_{WLM} / \nu_M \quad R_{nS} = V_S * L_{WLS} / \nu_S$$

$$C_A = 0,0002$$

Der Index M steht für Modellwerte, Index S für Schiffswerte.

Die Versuche im großen Schlepptank des DST (L = 190 m; B = 9,8 m) erfolgten bei ruhigem strömungsfreiem Wasser.

Das Modell des Motorgüterschiffes wurde vor den Versuchen durch Gewichte auf die richtige Verdrängung abgeladen und gleichzeitig auf ebenem Kiel eingetrimmt. Mit dieser Schwimmelage sind Propulsions- und Pfahlzugversuche durchgeführt worden.

3.2.3 Ergebnisse

Die Auswirkungen der nachträglichen Verbreiterung des parallelen Mittelschiffes und der recht abrupte Übergang zu den Vor- und Hinterschiffen mit unveränderter Breite sind in Widerstand und Propulsion deutlich zu erkennen.

Ein ca. 9 % höherer Widerstand und rund 20 % mehr Leistung bei der 86 m langen Version B sind zu erwarten, wenn das Schiff - wie hier geschehen - umgebaut wird.

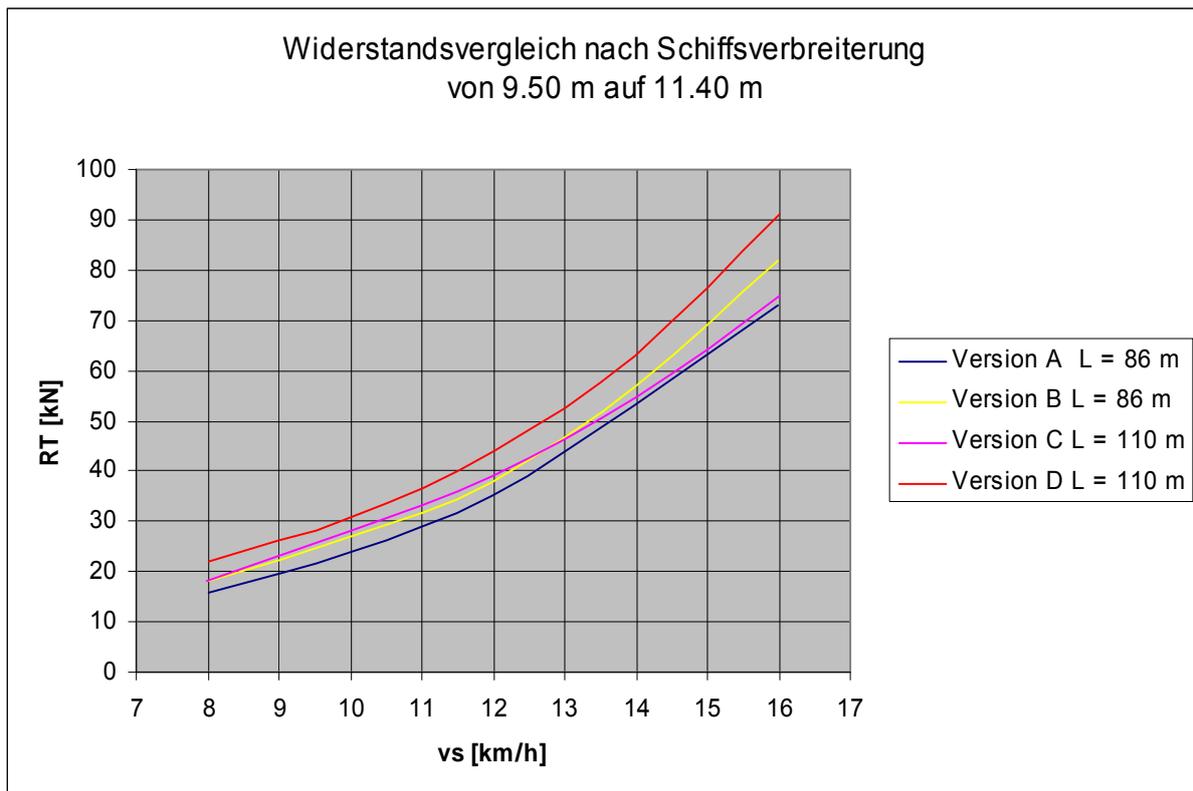


Abb. 10: Widerstand

Wird das 110 m lange Schiff (Version C) verbreitert, so liegt bei gleicher Geschwindigkeit von $v_s = 16$ km/h der Widerstand um 18 % höher. Die verbreiterte Version D benötigt zudem über 30 % mehr Antriebsleistung.

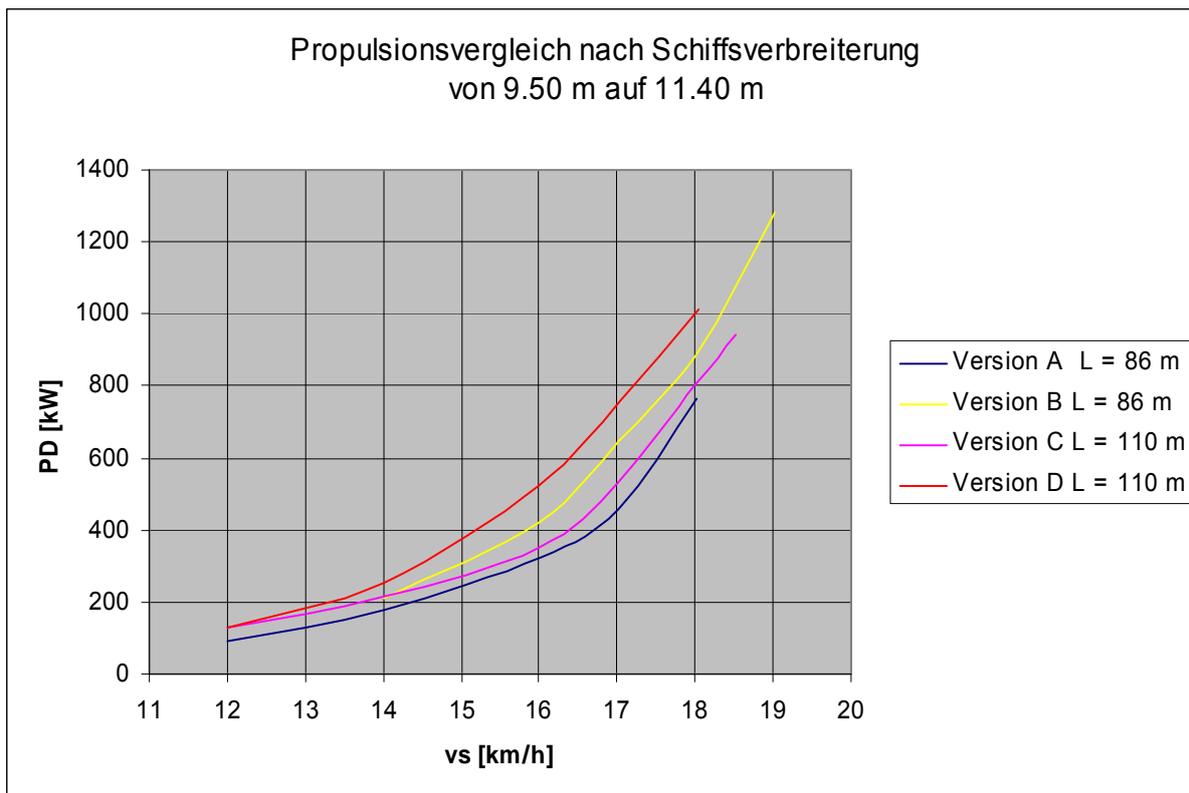


Abb. 11: Propulsion

Welchen Einfluss die Formgebung der Verbreiterung tatsächlich hat, soll in einer weiteren Variante der Version B (Version BB) betrachtet werden. Hierzu werden die Übergänge der Laderaumverbreiterung an Version B hydrodynamisch günstiger gestaltet.



Abb. 12: Bugwelle, $P_D = 845$ kW, $V = 18$ km/h, scharfer Übergang

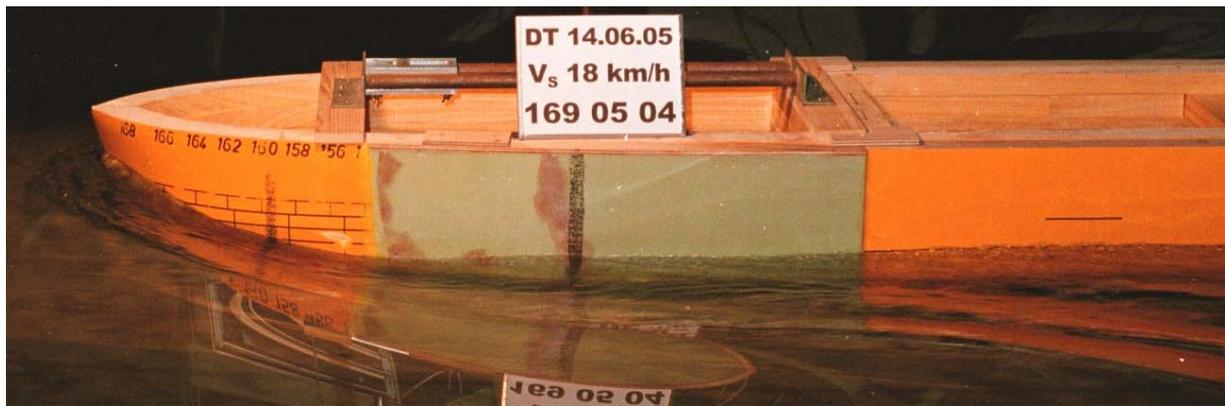


Abb. 13: Bugwelle, $P_D = 671 \text{ kW}$, $V = 18 \text{ km/h}$, weicher Übergang

Die Wellenbilder und der direkte Leistungsvergleich machen deutlich, dass ein Einstrahlen der Verbreiterung in die Vor- und Hinterschiffslinien eine markante Wirkung (Leistungsersparnis ca. 25 %) zeigt. Dem gegenüber stehen jedoch wesentlich höhere Umbaukosten.

3.3 Kompletter Ersatz des Hinterschiffes

Eine große Zahl von Motorschiffen ist im Bereich des Zustroms vor dem Propeller getunnelt. Das Wasser kann so möglichst ungestört zum Propeller gelangen und dessen Wirkung verbessern. Weiterhin ist der Propeller selbst bei geringem Tiefgang ($T = 1,70 \text{ m}$) gegen Lufteinbruch abgeschirmt und kann ausreichend Vortrieb erzeugen.

3.3.1 Modelle

Bei dem hier als Version E bezeichneten Neuentwurf des DST wurde der eingangs beschriebene Konstruktionsweg verlassen.

Entsprechend den Vorgaben des Forschungsprojekts war der Linierriss für ein Binnenschiff zu entwickeln. Dabei steht im Vordergrund:

- Einfache, kostengünstig zu erstellende Bauform.
- Möglichst Zugewinn an Verdrängung bzw. Tragfähigkeit im Vergleich zu konventionellen Bauformen.
- Gute Propulsionseigenschaften, niedriger Brennstoffverbrauch.
- Gute Fahr- und Manövriereigenschaften, auch bei der Fahrt auf kleiner Wassertiefe und mit kleinen Tiefgängen.

<u>Schiffstyp</u>	<u>MGS</u>
Einsatzgebiet	Transporte auf dem Rhein und im Kanalnetz
Länge ü. A.	110,00 m
Breite auf Spant	11,40 m
Tiefgang	2,80 m bis 3,5 m
Tragfähigkeit ca.	> 1740 t
Motorisierung	1 x Propeller Ø 1,75 m, Düse

Wenn es wie in den betrachteten Fällen um den kompletten Ersatz bzw. Neubau des Hinterschiffes geht, wird zumeist eine schon bewährte Schiffsform als Grundlage des Neuentwurfs herangezogen. Dabei werden für die Verdrängung des Hinterschiffes (Länge des Hinterschiffes jeweils 24,0 m) folgende Ergebnisse erzielt:

Hinterschiffsverdrängung

DST- Modell Nr.	Beschreibung	Hinterschiffsverdrängung bei T = 3,00 m
M1767/B11400	Konventionelle Bauform, 1 Propeller	558 t
M1738	Aktuell entwickeltes Tankschiff, 1 Propeller	564 t
M1698	Konventionelles Tankschiff, 2 Propeller	564 t
M1764	Tankschiff mit kurzen Hinterschiff, 2 Propeller	618 t
M1773	Neuentwicklung	582 t

Tab. 3: Veränderung der Hinterschiffsverdrängung

Im Vergleich der Verdrängung des Hinterschiffes zeigt sich, dass das Modell M1773 im Vergleich zu anderen Motorschiffen mit einem Propeller eine um ca. 20 t erhöhte Verdrängung aufweist und damit im Bereich ist zu den Motorschiffen mit 2 Propellern.

Propulsion

Die Propulsionseigenschaften werden wesentlich von der Form des Hinterschiffes bestimmt. Eine maßgebliche Bewertungszahl ist hier die „Sogziffer“, dargestellt als das Verhältnis zwischen dem Schiffwiderstand und dem tatsächlich in der Fahrt erforderlichen Propellerschub. Nach Dr. v. d. Stein¹ wird die Sogziffer im Wesentlichen durch die Volumenverteilung des Hinterschiffes vor der Propellerebene beeinflusst.

¹ „Nutzschubmessung am geteilten Modell“, STG-Jahrbuch 2005

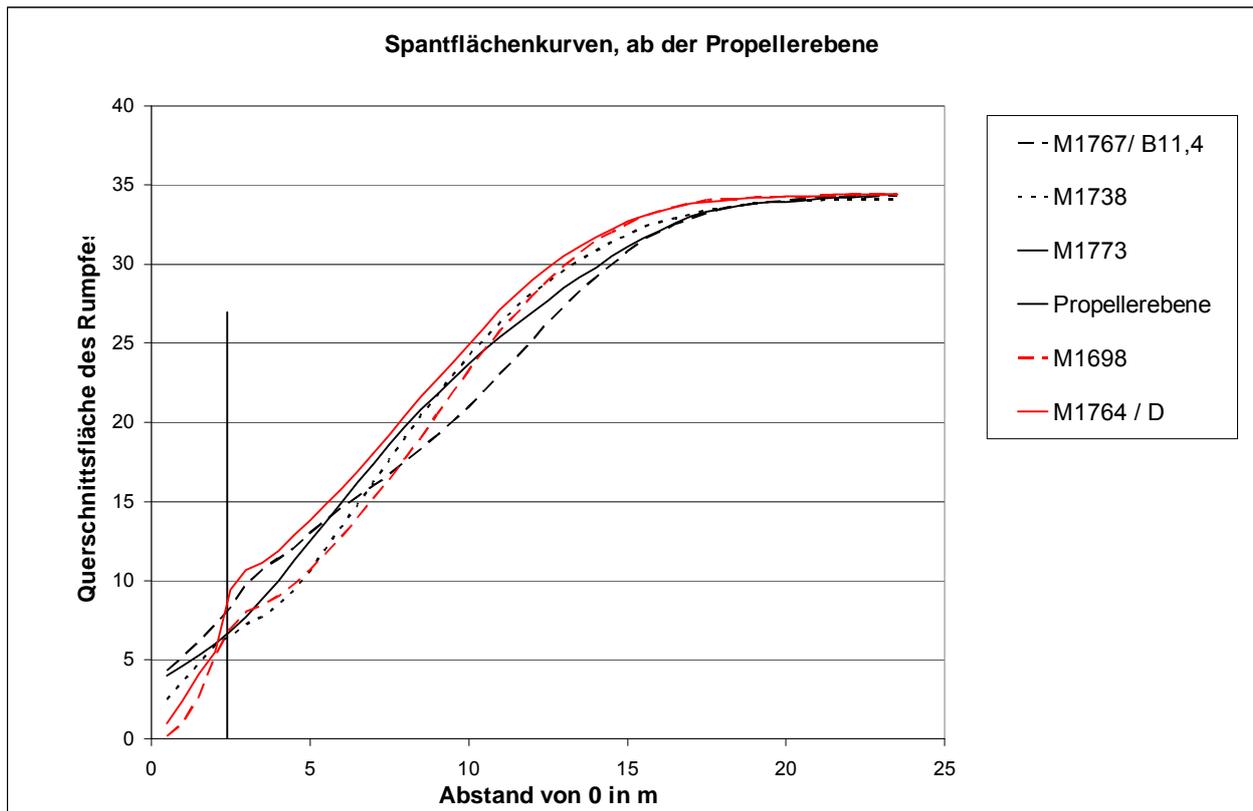


Abb. 14: Spantflächenkurve im Vergleich

Bei dem Neuentwurf (durchgezogene schwarze Linie in Abb. 14) wird deshalb der Versuch gemacht, trotz der vergleichsweise hohen Verdrängung eine günstige Verteilung der Querschnitte zu erzielen. Die Querschnitte unmittelbar vor der Propellerebene sind kleiner als bei den Vergleichsschiffen M1767/B11,4 m und M 1764.

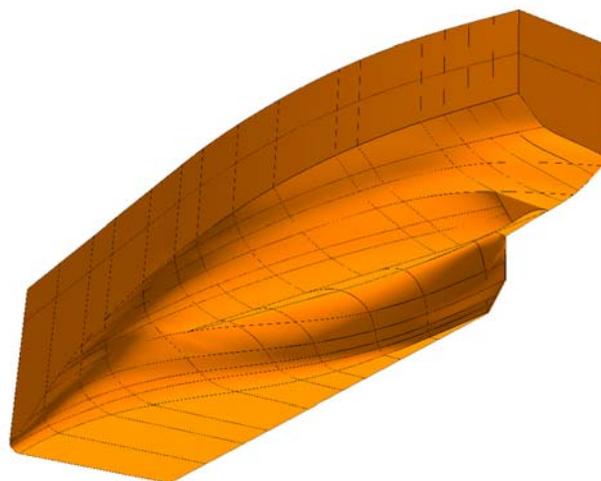


Abb. 15: Hinterschiff der Form M1767

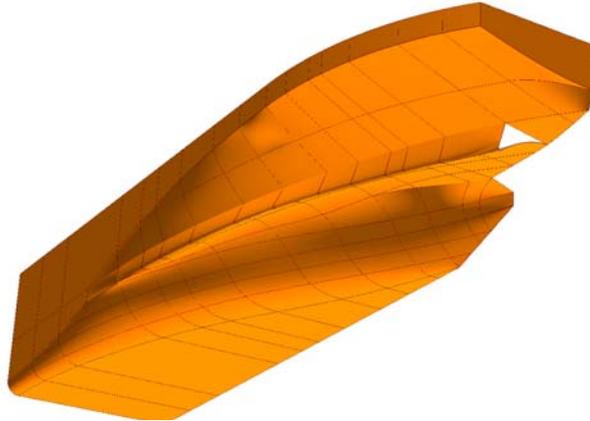


Abb. 16: Hinterschiff der Form M1738

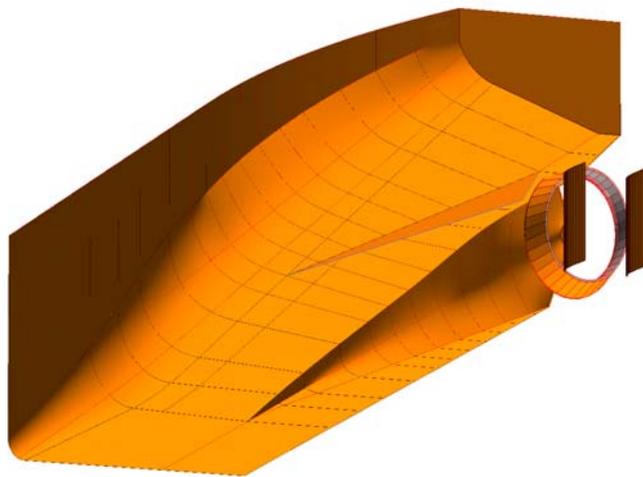


Abb. 17: Hinterschiff Version E mit Leitblechen, Ruder und Düse

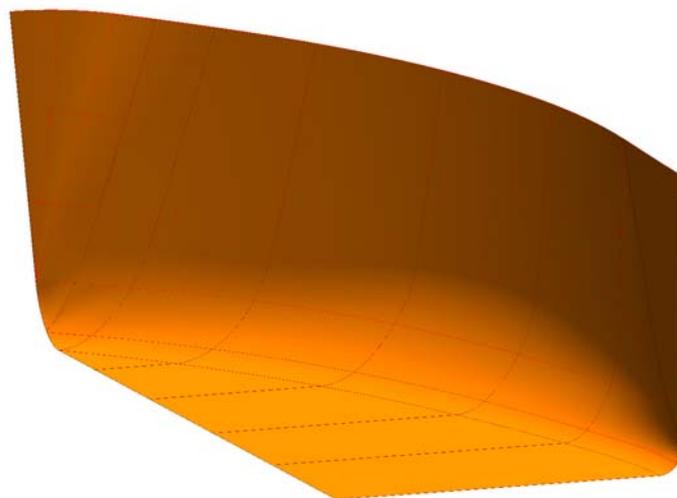
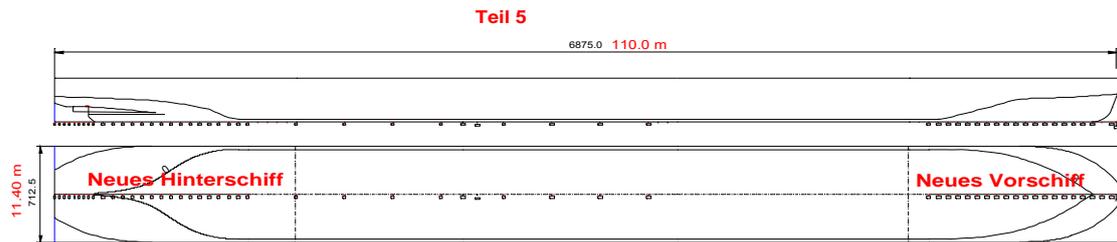


Abb. 18: Vorschiff Version E

Version E: L x B = 110 m x 11,40 m



			Modell	Großausführung
Maßstab	λ	[-]	16	1
Länge	$L_{\text{üa}}$	[m]	6,875	110,0
Breite	B	[m]	0,712	11,40
Tiefgang	T_{max}	[m]	0,212	3,40
Verdrängung	V	[m ³]	0,965	3954,3
Blockkoeffizient	C_B	[-]	0,896	0,896

3.3.2 Versuche

Damit der Neuentwurf auch bei kritischen Wasserverhältnissen verkehren kann, wurden hydraulisch anstellbare Klappschürzen angebaut, die bei kleinem Tiefgang angestellt werden und die Anströmung des Propellers somit verbessern und den Propeller am Ansaugen von Luft hindern.

Damit die Wirkung der Schürze genau beurteilt werden kann, werden folgende Teilversuche unternommen:

- Version E wird ohne Schürzen untersucht
- Version E wird mit Schürzen gering getaucht untersucht
- Version E wird mit Schürzen tief getaucht untersucht
- Version E wird erneut formoptimiert und ohne Schürzen untersucht

Die Schürze wurde in zwei verschiedenen Positionen angebaut und in Propulsions- und Pfahlzugversuchen untersucht.

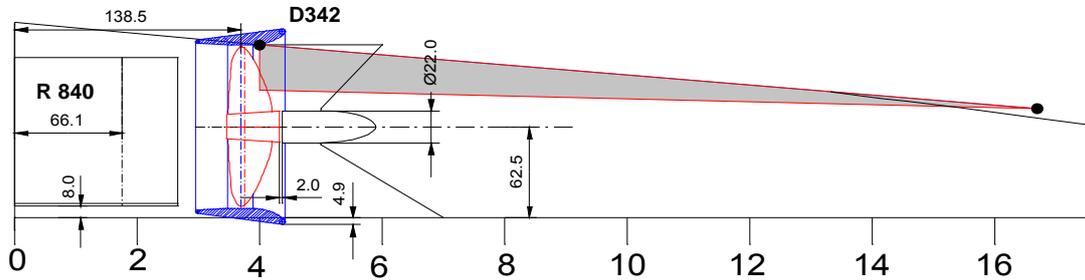


Abb. 19: gering getauchte Tunnelschürze reicht in das Düsenprofil

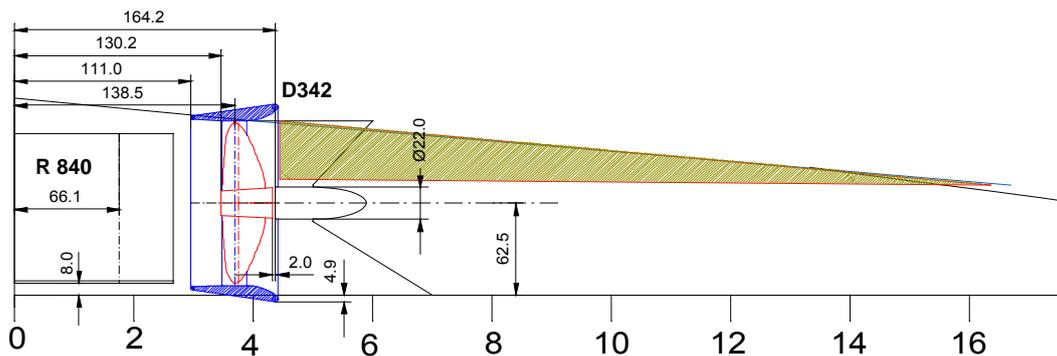


Abb. 20: tief getauchte Tunnelschürze reicht bis an das Düsenprofil

3.3.3 Ergebnisse

Nachteil dieses Tunnelvolumens ist der damit verbundene Auftrieb. Wird nun das Hinterschiff ohne Tunnel ausgeführt, wie es im DST-Entwurf (Version E) geschehen ist, so wird einerseits zwar die Tragfähigkeit (siehe Tabelle 3) erhöht, andererseits aber auch der Propellerzustrom verschlechtert.

Die Version E wurde daher mit zwei verschiedenen Schürzenanordnungen in der Propulsion untersucht.



Abb. 21: Getunneltes Hinterschiff Version D (links) und 1. Hinterschiffsvariation, Schürze in Position A Version E

Auf die Funktionen des Tunnels kann nicht gänzlich verzichtet werden. Besonders bei kleinen Tiefgängen (hier $T = 2,0$ m), die erforderlich werden, wenn die Pegel der Wasserstraßen fallen (hier exemplarisch $h = 3,5$ m), leitet der Tunnel das nötige Wasser luftfrei zum Propeller.

Im folgenden Diagramm werden die Propulsionskurven der gefahrenen Modellversuche einander gegenüber gestellt. Im unteren Teil der Kurve ist zu erkennen, dass dem Schiff nur geringfügig mehr Leistung abverlangt wird, wenn die Schürzen aufgestellt sind und einen Zusatzwiderstand erzeugen.

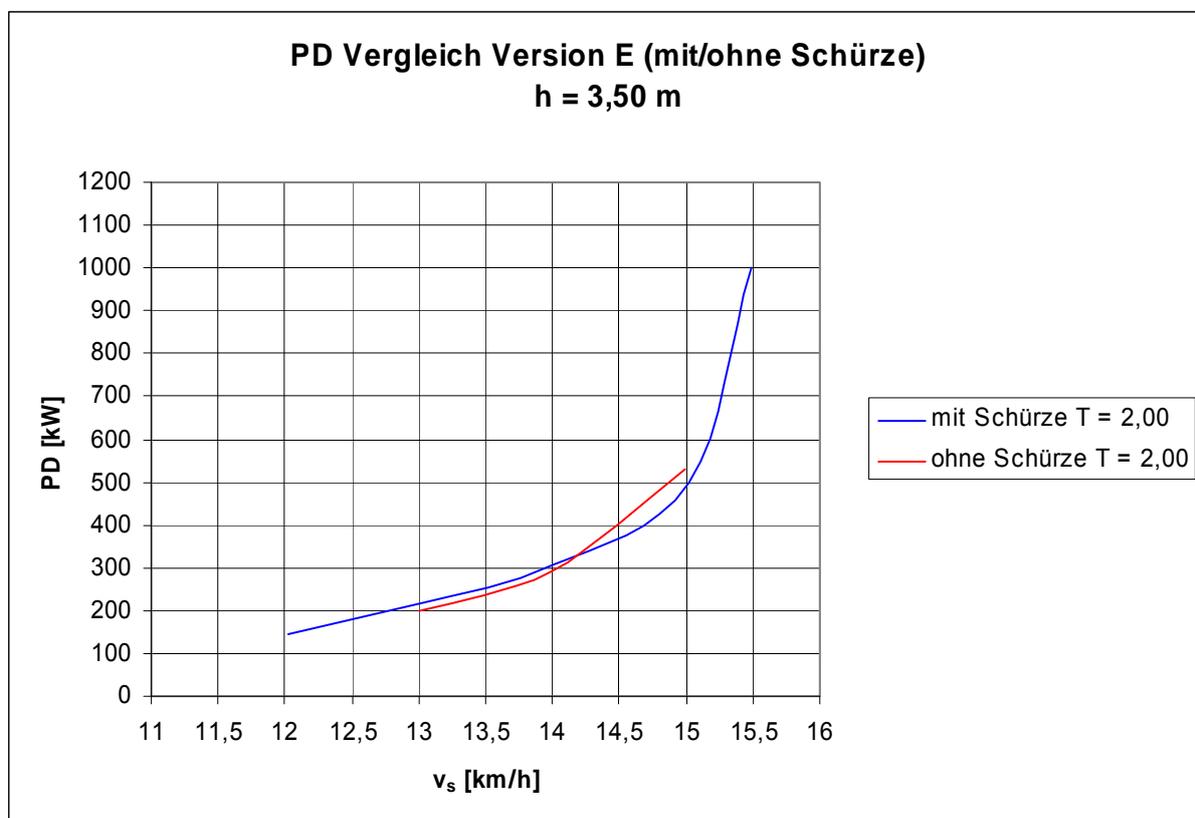


Abb. 22: Propulsion, Einfluss der Tunnelschürze

Erreicht das Motorschiff eine Geschwindigkeit von ca. 14 km/h, so begünstigt die höhere Propelleranströmung im Bereich der Schürzen das Schiff – die Bilanz aus Widerstand und Schub fällt insgesamt positiv aus.

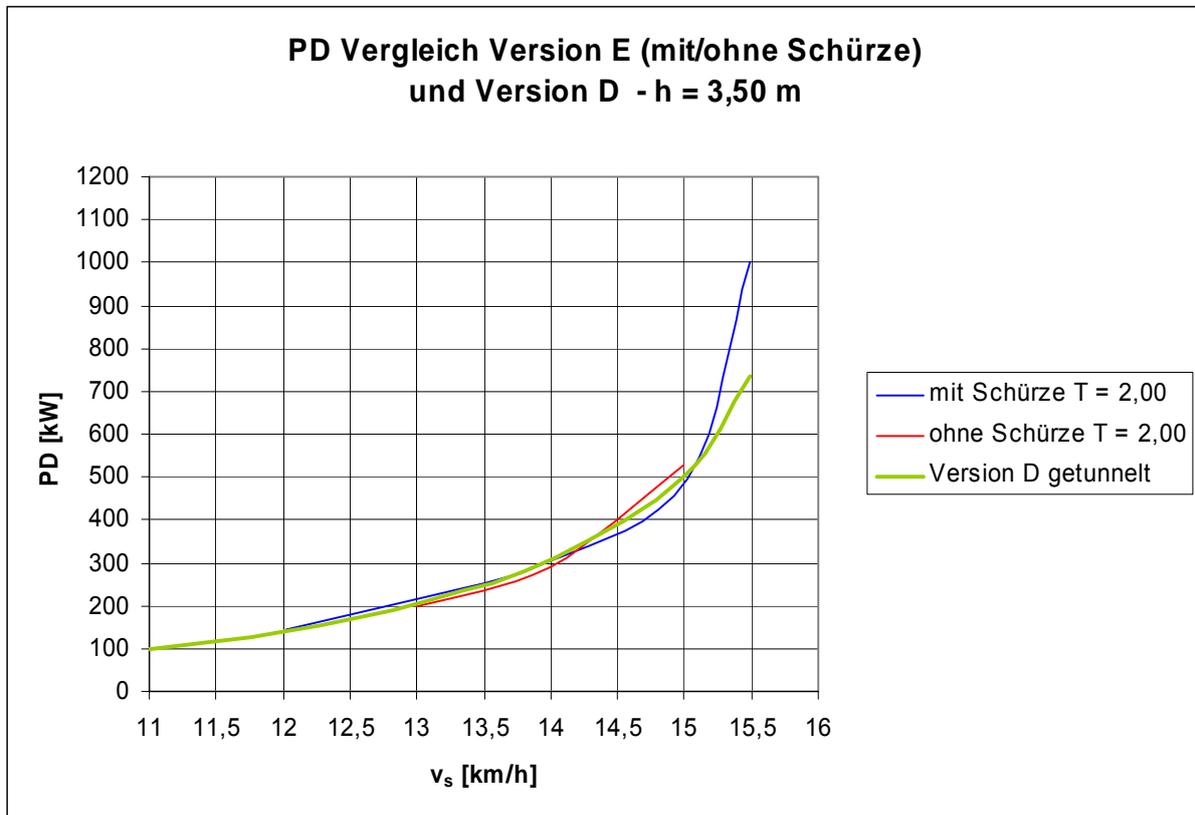


Abb. 23: Propulsion, Einfluss der Tunnelschürze

Version E II (Modell 1804) ist eine weitere Variante des DST-Neuentwurfes. Sie vereint den geringen Verdrängungsverlust der Version E mit Schürze mit dem besseren Zustrom eines eingeformten Tunnels (Version D).



Abb. 24: Version E mit 2. Hinterschiffsvariation

Die Propulsionsversuche mit der Version E (getunnelte Version) zeigen deutlich, wie nah die Ergebnisse der einzelnen Versionen vom Typ E beieinander liegen.

Als Nachrüstung für ein vorhandenes Schiff ist die Schürze geeignet. Die Abmessungen und die Position der Schürze muss in Abhängigkeit vom Propeller-/Düsendurchmesser gewählt werden. Die Ergebnisse zeigen nur, dass die Schürze das Propulsionsverhalten verbessert, wenn kleine Tiefgänge gefahren werden.

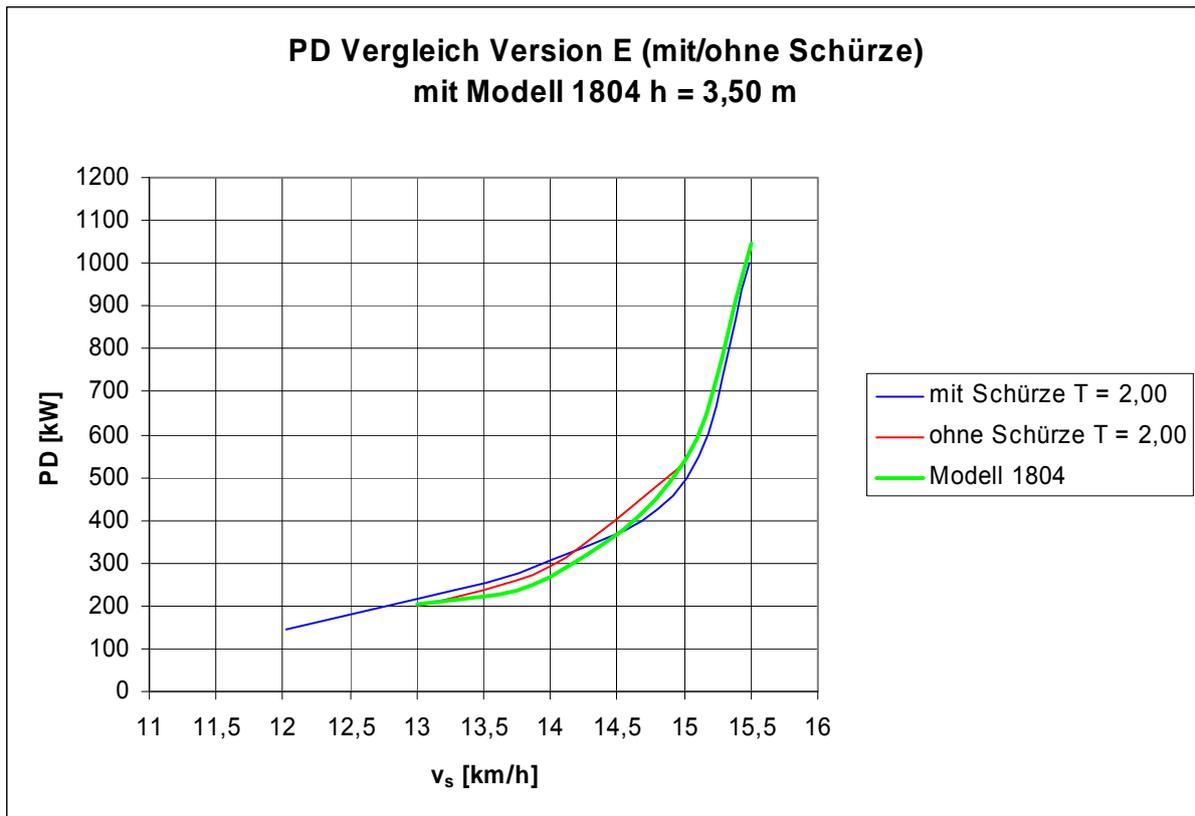


Abb. 25: Propulsion, Einfluss der Tunnelschürze

Grafisch dargestellt sind die Ergebnisse für die Großausführung (Anhang C). In den Darstellungen ist der Propellermaßstabseffekt m_p nicht berücksichtigt worden.

4. Widerstand

Obwohl im Mittelpunkt der Untersuchungen die Propulsionsversuche standen, wurden zusätzlich mit allen Versionen Widerstandsversuche bei einer Wassertiefe $h = 5,0$ m und einem Tiefgang $T = 2,5$ m durchgeführt. Im Versuch waren alle Varianten mit Düsen und Rudern ausgerüstet. So genannte „bare hull“-Versuche, das heißt ohne Anhänge wie Ruder und Düse, wurden nicht gefahren.

Untersucht wurde hingegen der Zusatzwiderstand der Schürze. Sie ist ein konstruktiver Bestandteil der neu entwickelten Version E und soll die Funktionen des fehlenden Tunnels am Hinterschiff übernehmen. In dem nachfolgenden Diagramm wurde bei einem Tiefgang von 2,50 m und einer Wassertiefe von 5,0 m ein Widerstandsversuch mit aufgestellter Schürze gefahren.

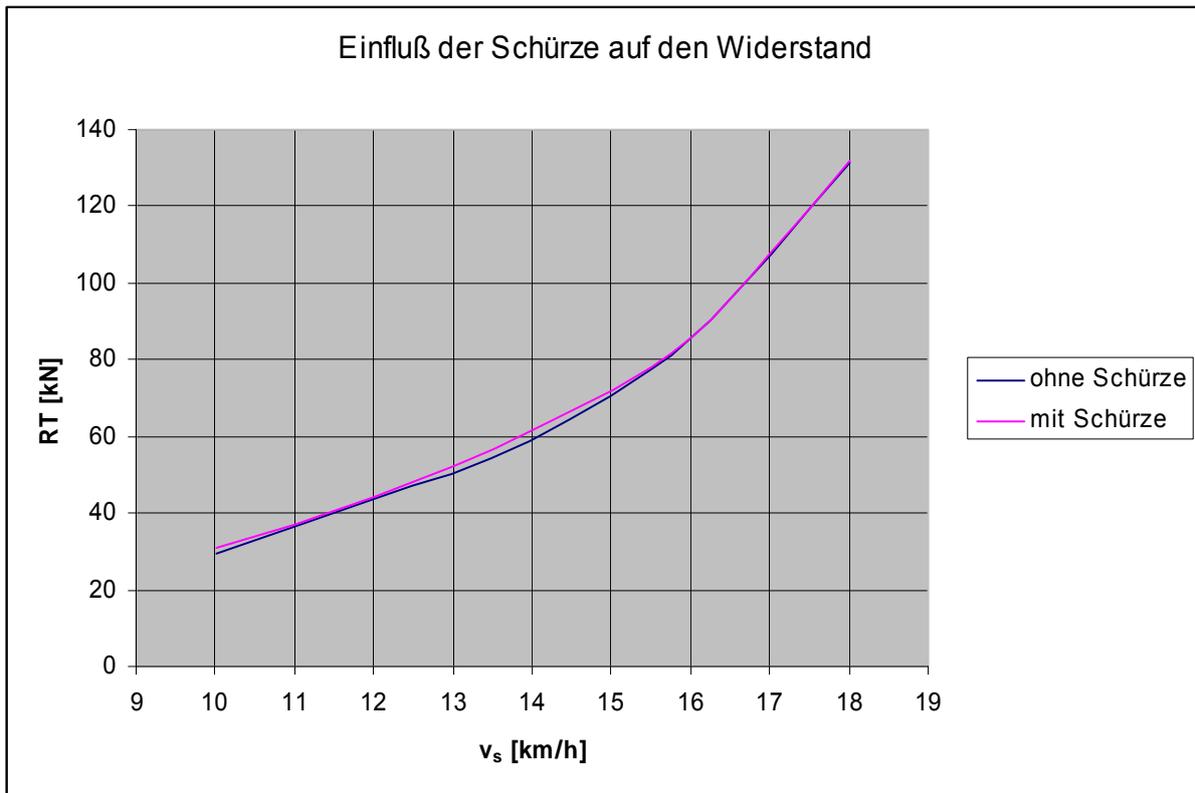


Abb. 26: Widerstand, Einfluss der Tunnelschürze

Der Versuch zeigt, dass die Schürze praktisch keine störende Wirkung besitzt. Grafisch dargestellt sind die Ergebnisse für die Großausführung im Anhang B.

5. Stoppen

Die Stoppversuche wurden einheitlich für alle Varianten bei einer Wassertiefe von $h = 5,0$ m und einem Tiefgang von $T = 2,50$ m durchgeführt. Das Modell wurde hierbei gefesselt auf eine Geschwindigkeit von $v_s = 17$ km/h geschleppt und dann in Längsrichtung freigegeben.

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

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

Version	v_s [km/h]	Stoppweg [m]	Stoppzeit [s]	V_{\max} rückwärts [km/h]
A	17	252,8	110	8,7
B	17	232	103	9,0
BB	17	274	120	10,5
C	17	277	121	9,1
D	17	274	118	9,5
E	17	282	124	10,5
E (ohne Schürze)	17	280	121	9,7

Tab. 4: Vergleich Stopp- und Rückwärtseigenschaften

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

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

$$v_0 = 17 \text{ km/h}$$

$$12 \times v_0 = 12 \text{ s} \times 4.7 \text{ m/s} = 56.4 \text{ m}$$

Alle durchgeführten Stoppversuche unterschreiten den maximal erlaubten Stoppweg von 305 m (Rheinschiffahrtsuntersuchungsordnung).

Im Anhang D befinden sich exemplarisch die Ergebnisse zweier Stoppversuche. Die Modellwerte wurden hier bereits auf die Großausführung umgerechnet.

6. Wellen, axiale Strömung und Bodendrucke

Für die Aufnahme der Wellenprofile wurden fünf Messsonden im definierten Abstand zum Schiff angeordnet (siehe Abb. 28). Sie geben Auskunft über die schiffsnahen Wellenhöhen und sind wichtige Parameter für die numerischen Berechnungen.

Um die Wirkung des Schiffes auf die Sohle zu erkennen, sind Bodendruck- und Strömungsmessungen durchgeführt worden. Die 5 Messpunkte bestehen aus Bodendruckdose und Pitot-Rohr (siehe Abb. 27). Sie sind in der Mittelachse des Schiffes sowie in definierten Querabständen so angeordnet worden, dass ein Feld von ca. 60 m Breite von der Mitschiffsachse erfasst werden konnte.

Die bei der Fahrt entstehenden Bodendrücke sind über die Differenzdruckhöhen als Niveaulinien der Geschwindigkeit abgebildet. Auf die installierten Pitot-Rohre wirkt dominant die Verdrängungsströmung.

In den Anhängen E bis G werden Messungen exemplarisch dargestellt.

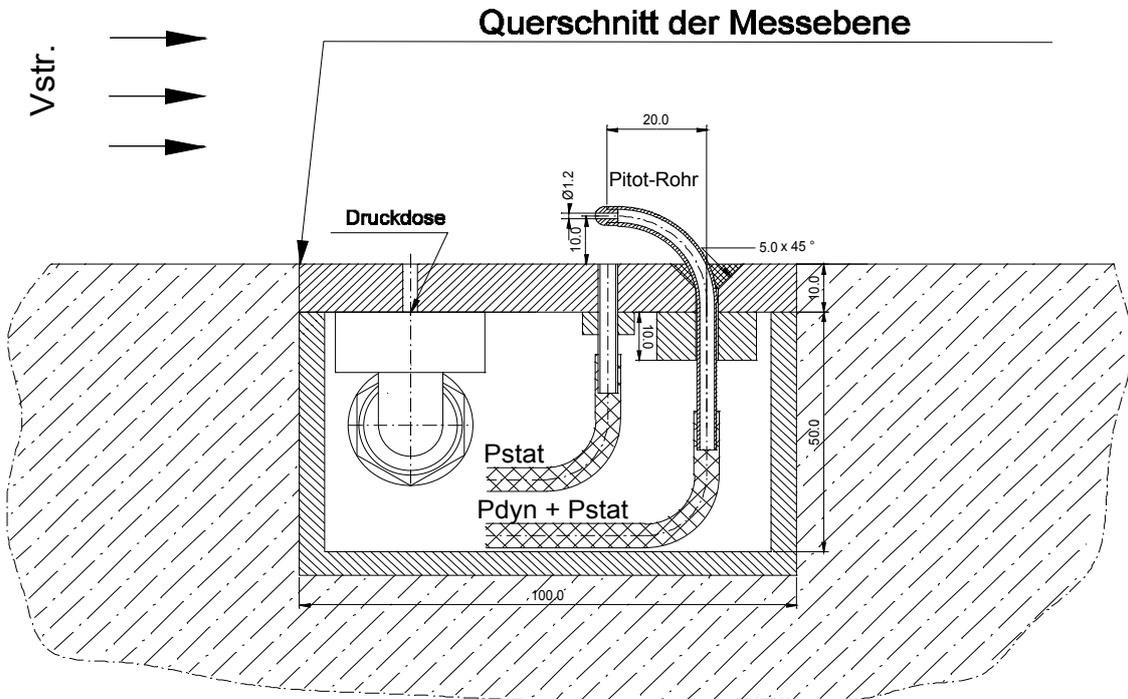


Abb. 27: Anordnung Pitot-Rohr

Mit den gleichen Koordinaten sind die Wellensonden über den Sonden im Tankboden angeordnet.

Anordnung der Wellensonden

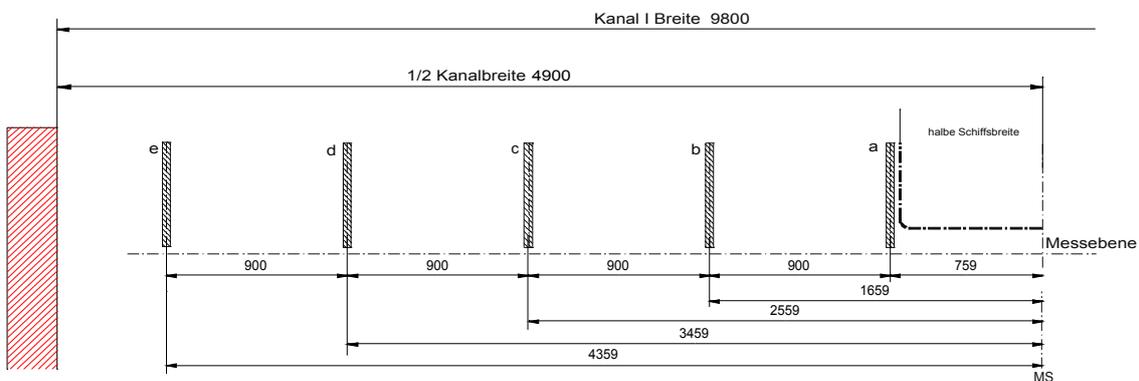


Abb. 28: Anordnung Wellensonden

7. Beurteilung

Die vorliegenden Modellversuche sollten als wichtigstes Entscheidungs-Tool für die Auswahl einer Modernisierungsmaßnahme gesehen werden. Besonders mit Hilfe der Propulsionskurven können weitere Entscheidungskriterien wie beispielsweise der spezifische Leistungsbedarf abgeleitet werden.

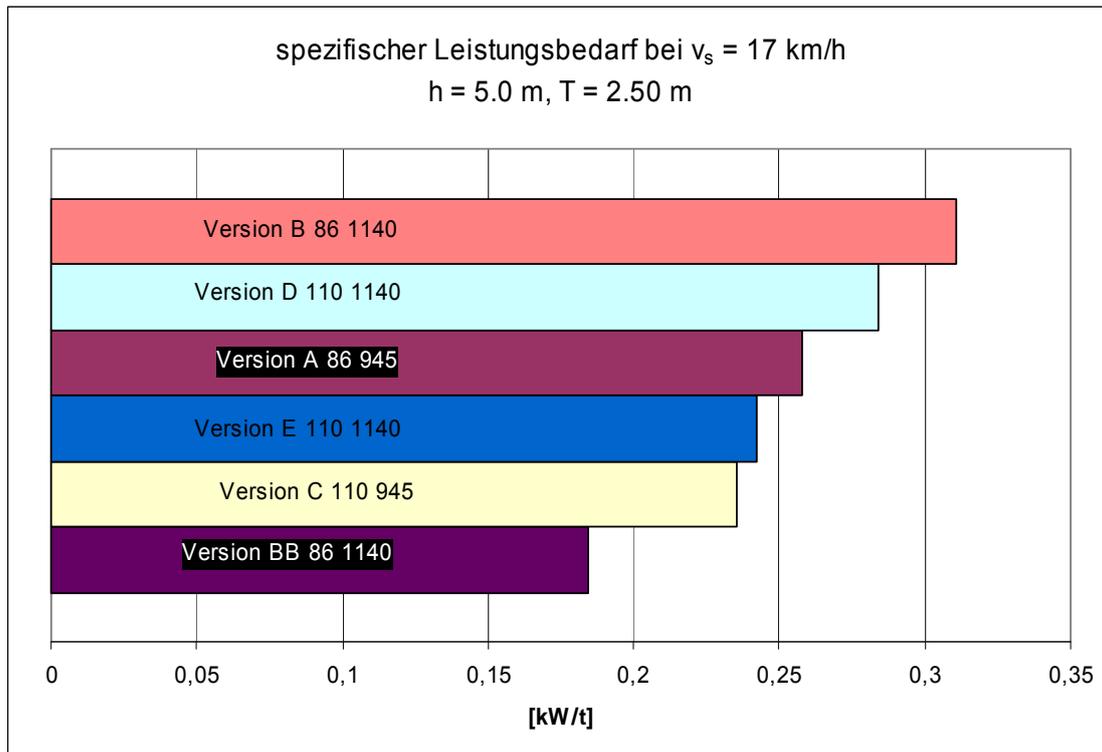


Abb. 29: verdrängungsspezifischer Leistungsbedarf

Die ergänzenden Versuche innerhalb einer Version (z.B. Wirkung des Bleches an Version E) sollten besonders beachtet werden, da sie zusätzliche Gestaltungsmaßnahmen beschreiben und eventuell auch einen Schritt in Richtung einer falschen Entscheidung aufzeigen. So ist die Version BB zwar hydrodynamisch günstiger als die Version B, deren Ausführung kann aber enorm hohe Baukosten bedeuten.

Alle hier angestellten Vergleiche sollten also auch vor dem Hintergrund der Kosten/Nutzen-Frage gesehen werden.

In den Versuchsserien wurden zahlreiche Seiten- und Unterwasseraufnahmen erstellt. Die Wellenbilder geben eine gute Hilfe bei der Gestaltung der Vor- und Hinterschiffsübergänge und zeigen welche hydrodynamische Veränderung zu erwarten ist. Exemplarisch wird im Anhang H ein Auszug von Seiten- und Unterwasseraufnahmen für die Wassertiefe $h = 5,0 \text{ m}$ und den Tiefgang $T = 2,5 \text{ m}$ wiedergegeben.

8. Numerische Untersuchungen

8.1 Aufgabenstellung

Die numerischen Methoden zur Berechnung der Schiffsumströmung haben sich in den letzten Jahren zu einem wichtigen Hilfsmittel bei der Analyse von Strömungsproblemen und insbesondere beim Entwurf von Schiffen entwickelt. Durch die Einbeziehung der CFD-Methoden in den Entwurfsprozess eines Schiffskörpers ist es möglich, einen Schiffslinienentwurf qualitativ zu beurteilen und geeignete Maßnahmen zur Formverbesserung zu empfehlen. Die berechneten Druckverteilungen am Schiffskörper und die Geschwindigkeitskomponenten im Nahbereich des Schiffes können wichtige Informationen über die Güte des Entwurfes liefern. So lassen sich mögliche Ablösezone der Strömung am Hinterschiff erkennen und die dreidimensionale Zuströmung zum Propeller kann optimiert werden. Die Berechnung der integralen Größen, wie Reibungs- und Formwiderstand, macht eine qualitative Beurteilung der unterschiedlichen Schiffsvarianten möglich. Durch numerische Untersuchungen kann die Anzahl der Modellversuche erheblich reduziert werden. Das führt zu einer Verkürzung der Entwicklungszeit bis zum „optimalen Schiff“. Die Definition des „optimalen Schiffes“ ist abhängig von der Zielstellung des Entwurfs. Häufige Entwurfsziele sind zum Beispiel die Optimierung des Leistungsbedarfs, die Ladekapazität, das Bewegungsverhalten und die Geschwindigkeit des Schiffes.

Im DST wird zur Optimierung der Schiffsförm unter Berücksichtigung der Reibungseffekte der kommerzielle RANSE-Löser ANSYS-CFX eingesetzt. Durch die Anwendung dieses Verfahrens sollten im Vorfeld der experimentellen Untersuchungen numerische Berechnungen an ausgewählten Schiffskonfigurationen, bei denen die Länge bzw. die Breite der Schiffe variiert wurde, durchgeführt werden. Basierend auf der Auswertung der Ergebnisse dieser Berechnungen sollten weitere numerische Untersuchungen mit der optimalen Längen-Breiten-Version durchgeführt werden. Dabei sollen unterschiedliche Hinter- bzw. Vorschiffsvarianten untersucht werden. Die Berechnungsergebnisse sollen mit den experimentellen Untersuchungen verglichen werden.

8.2 Verfahren

8.2.1 Erhaltungsgleichungen und Turbulenzmodellierung

Der RANSE-Löser (Reynolds-Averaged-Navier-Stokes) ANSYS-CFX ermöglicht die Berechnung von reibungsbehafteten turbulenten Strömungen, die durch die Erhaltungsgleichungen für Masse und die Impulsgleichungen (Navier-Stokes-Gleichung) beschrieben werden. Die Kompressibilität des Fluids kann bei den Berechnungen mit den geringen Schiffsgeschwindigkeiten vernachlässigt werden. Die Navier-Stokes-Gleichungen beschreiben turbulente Strömungen vollständig. Eine Lösung dieser Gleichungen ist mit einem erheblichen Rechenaufwand verbunden, da die Auflösung der kleinsten Zeit- und Längenskalen ein extrem feines Berechnungsgitter erfordert. Für technisch relevante Reynoldszahlen, wie sie im Schiffbau üblich sind, ist die Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen nicht möglich. Aus diesem Grund müssen die Auswirkungen der Turbulenz modelliert werden. Für turbulente Strömungen gilt, dass sie räumlich und zeitlich verän-

derlich sind, das heißt, dass sich der Druck und die Geschwindigkeit im Lösungsgebiet unregelmäßig ändern. Um die turbulenten Erscheinungen näherungsweise zu beschreiben, werden statistische Modelle eingesetzt. Dabei werden die Geschwindigkeiten und der Druck aufgespalten in einen Mittelwert und in einen Schwankungsanteil. Setzt man diese Anteile in die Navier-Stokes-Gleichungen ein, erhält man die Reynolds-Gemittelten-Navier-Stokes-Gleichungen (RANSE). Dabei entstehen zusätzliche Terme, die auch Reynoldsspannungen genannt werden. Damit die Anzahl der Unbekannten der Anzahl der Gleichungen entspricht, müssen Turbulenzmodelle eingeführt werden. Durch diesen Ansatz werden die Komponenten der Reynoldsspannungen mit den Strömungsgrößen der Navier-Stokes-Gleichungen verbunden.

Für die hier durchgeführten Untersuchungen wurde das $k-\omega$ -SST (Shear-Stress-Transport) angewandt. Es verbindet die Vorteile des $k-\varepsilon$ -Modells im wandfernen Bereich mit den Vorteilen des $k-\omega$ -Modells in Wandnähe. Beide Modelle werden über eine Gewichtsfunktion miteinander gekoppelt. Das $k-\omega$ -SST-Modell ist für die Lokalisierung und die Größe von druckbedingten Ablösezonen am Hinterschiff besser geeignet, als das häufig bei industriellen Anwendungen verwendete $k-\varepsilon$ -Modell. Für alle Turbulenzmodelle gilt, dass sie nicht die turbulenten Erscheinungen wiedergeben, sondern nur die Auswirkung der Turbulenz auf das Fluid modellieren.

8.2.2 Diskretisierung

Die mathematischen Formulierungen zur Beschreibung von Strömungen führen zu einem System von Differentialgleichungen, welche für die Berechnung von Schiffsumströmungen nicht analytisch gelöst werden können. Für praxisrelevante Untersuchungen müssen die differentiellen Transportgleichungen in algebraische Gleichungen überführt werden. Die analytische Lösung wird durch die numerische Lösung angenähert. Zur Diskretisierung der Gleichungen, die die Strömung des Fluids beschreiben, wird im Programmpaket ANSYS-CFX das Finite-Volumen-Verfahren eingesetzt. Bei diesem Verfahren wird der gesamte Berechnungsraum in nicht überlappende Kontrollvolumina unterteilt. Die Lösung der Massenerhaltungsgleichung und der Impulserhaltungsgleichungen erfolgt gleichzeitig für jede Iteration. Für alle Rechenpunkte werden der Druck und die Geschwindigkeit gekoppelt ermittelt. Die Gitterpunkte bzw. die Volumenelemente können im Raum nichtorthogonal und randangepasst verteilt werden. Durch das eingesetzte Mehrgitterverfahren wird die Konvergenz der Berechnung beschleunigt.

8.2.3 Randbedingungen

Die RANSE-Gleichungen erfordern zur Berechnung der Strömung die Vorgabe von Randbedingungen an allen Begrenzungen des Rechengebietes, um das strömungstechnische Problem zu beschreiben. Dabei kann die Variable selbst (Dirichlet-Randbedingung) oder der Gradient entlang einer Berandung (Neumann-Randbedingung) als Randwert gesetzt werden. Die Grenzen des Lösungsgebietes ergeben sich zum größten Teil aus geometrischen Vorgaben, wie dem Gewässerboden, der Kanalwand, dem Schiffskörper und der definierten Wasseroberfläche. Die Ausdehnung des Lösungsgebietes vor dem Schiff muss so gewählt werden, dass sich die gewünschte Zuströmung

auf der Basis der am Eintrittsrand vorgegebenen Informationen vor dem Schiff einstellen kann. Die Lage des Austrittsrandes sollte soweit stromabwärts positioniert werden, dass kein Einfluss auf die Strömung im Nahbereich des Schiffes zu erwarten ist.

Da die Strömung als Bewegung eines Fluids gegenüber einem anderen Medium (z.B. Schiffskörper) definiert ist, ist es möglich, die Fahrt des Schiffes durch die Bewegung des Fluids zu simulieren. Entscheidend ist die Relativbewegung zwischen Wasser und Schiffskörper. Aus diesem Grund kann die Fahrtgeschwindigkeit des Schiffes als Geschwindigkeitsvektor und die Intensität der Turbulenz am Eintrittsrand zum Lösungsgebiet vorgegeben werden. Für die Turbulenzintensität wird ein Wert von 3 % gewählt. Der Austrittsrand des Berechnungsraumes hinter dem Schiff wird aus Stabilitätsgründen als Opening-Randbedingung definiert, die ein ungehindertes Ein- bzw. Ausströmen des Fluids ermöglicht. Eine Druckänderung ist nicht möglich. Am Schiffskörper inklusive aller Anhänge gilt die Haftbedingung, daraus ergibt sich, dass alle Geschwindigkeitskomponenten an der Wand zu Null gesetzt werden. Für die Berechnungen mit nur einer Phase (Wasser) wird die Ruhewasserebene als Symmetrieebene bzw. als reibungsfreie Wand definiert, so dass keine Geschwindigkeitsvektoren senkrecht zur Wasseroberfläche auftreten können. Bei den 2-Phasenberechnungen mit Luft und Wasser zur Ermittlung der Veränderung der freien Wasseroberfläche infolge der Fahrt des Schiffes wurde die obere Begrenzung des Lösungsgebietes als Opening definiert. Um die Relativgeschwindigkeit des angeströmten Schiffes gegenüber den Berandungen (Gewässerboden, Kanalwand) zu modellieren, wurden diese Wände als reibungsbehaftete, translatorische Ränder mit einer fixen Wandgeschwindigkeit (entgegen der Schiffsgeschwindigkeit) definiert.

8.3 CFD-Berechnungen

8.3.1 Gittergenerierung und Aufbereitung der Geometrie

Die zu untersuchenden Schiffe und Formvarianten wurden mit dem Schiffslinienprogramm NAPA erzeugt und im IGES-Format (Flächenbeschreibung) exportiert. Dabei wurde teilweise auf die Modellierung der Anhänge, insbesondere der Antriebs- und Steuerorgane, verzichtet. Die Formänderungen, die sich aus dem CFD-Optimierungszyklus ergaben, wurden durch das CAD-Programm NAPA implementiert und in die Modelldatenbank des DST übernommen.

Die Ladekapazität bzw. die Tragfähigkeit eines vorhandenen Schiffes kann vergrößert werden, indem entweder die Länge oder die Breite des Schiffes vergrößert wird. Um die Effizienz solcher Maßnahmen zu untersuchen, wurde ein Ausgangsmodell gewählt, welches in den Hauptabmessungen variiert wurde. Diese Modellvarianten sind im Abschnitt 3. „Modellversuche“ dokumentiert und in der folgenden Tabelle 5 zusammengefasst.

<i>Variante</i>	<i>Länge [m]</i>	<i>Breite [m]</i>	<i>Tiefgang [m]</i>
Version A	86,00	9,45	2,5
Version B	86,00	11,40	2,5
Version C	110,00	9,45	2,5
Version D	110,00	11,40	2,5

Tab. 5: Modellvarianten

Damit ein Einfluss der Hinter- bzw. Vorschiffsform ausgeschlossen werden kann, wurde bewusst auf eine geometrische Anpassung der Hauptabmessungsveränderungen verzichtet. Alle Modifikationen wurden im Parallelteil der Modelle durchgeführt. Die Abbildungen 30 bis 33 zeigen die untersuchten Längen- und Breitenvariationen.



Abb. 30: Ausgangsvariante (Version A)



Abb. 31: Verbreiterung der Ausgangsvariante (Version B)



Abb. 32: Verlängerung der Ausgangsvariante (Version C)



Abb. 33: Verlängerung und Verbreiterung der Ausgangsvariante (Version D)

Der Übergang vom verbreiterten Mittelteil des Modells zum Hinterschiff bzw. zum Vorschiff wurde geglättet. Die Linien der Schiffsenden wurden jedoch beibehalten, dadurch wurde eine Modifikation am Bug bzw. am Heck verhindert. Eine Anpassung der Änderung der Schiffsbreite mit stetigem Übergang, also ohne Sprünge in der Geometrie, hätte zu großen geometrischen Änderungen der Schiffsenden geführt. Die dadurch notwendigen Veränderungen wären verbunden mit einem neuen Schiffsentwurf und würden die Vergleichbarkeit mit der Ausgangsform unmöglich machen. In der Abbildung 34 sind die Übergänge im Bereich des Vor- und Hinterschiffes dargestellt. Die obere Ansicht in Abbildung 34 zeigt, dass beim Übergang vom hinteren Hauptspant zum Heck trotz der kurzen Anpassungsstrecke sprunghafte Veränderungen der Schiffsförm vermieden werden konnten. Dies gilt auch für die Anpassung am Bug des Modells, wie in der Ansicht unten rechts in Abbildung 34 zu sehen ist.

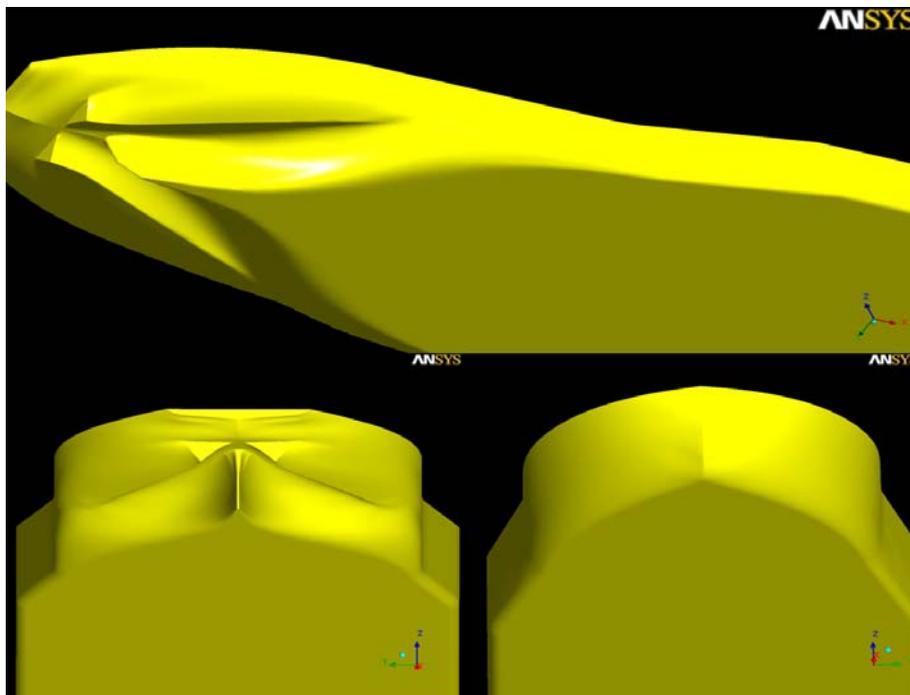


Abb. 34: Geometrische Anpassung der Verbreiterung der Schiffsförm

Die bisher beschriebenen Modellvarianten basieren auf schon vorhandene Schiffsförmwürfe. Die Entwicklung weiterer Formvarianten sollte nach den in Abschnitt 3. „Modellversuche“ beschriebenen Kriterien unter Nutzung von CFD-Optimierungsmethoden durchgeführt werden. Im Folgenden werden ausgewählte Formvarianten des Optimierungsprozesses beschrieben.

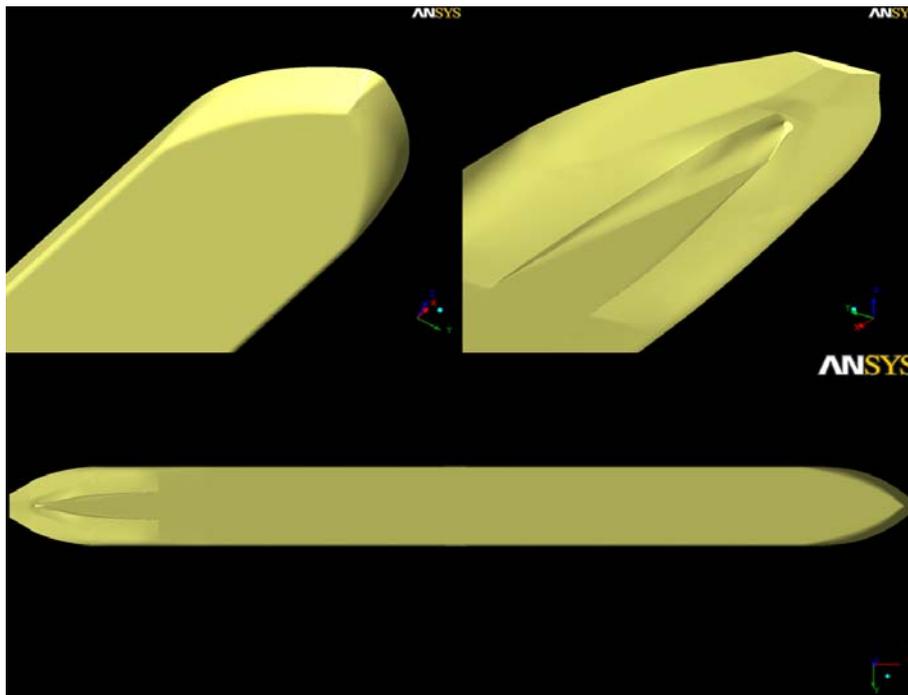


Abb. 35: Geometrie Version E (Ausgangsform)

Die Abbildung 35 zeigt den Bug, das Heck und die Gesamtansicht des Ausgangsentwurfes der Version E bei einem Tiefgang von 2,5 m. Das Modell wird im Abschnitt 3. „Modellversuche“ näher beschrieben. Ein wesentliches Merkmal dieses Entwurfes ist, dass am Hinterschiff keine Tunnelschürze integriert wurde, die den Zustrom zum Propeller verbessern soll und einen Lufteinbruch zum Propeller verhindert.

Die Hauptabmessungen sollten durch die Optimierung nicht verändert werden und wurden auf folgende Werte für alle Varianten festgelegt. Eine weitere Forderung an den Optimierungsprozess war, dass alle Varianten, so weit wie möglich, eine ähnliche Verdrängung haben.

Hauptdaten Version E:

Schiffslänge [m]	110,00
Schiffsbreite [m]	11,40

Für das Vorschiff wurden weitere Konzepte der Gestaltung untersucht, dabei wurde von herkömmlichen Bugformen aus der Binnenschifffahrt abgewichen. Zwei untersuchte Varianten sind in den folgenden Abbildungen beschrieben.

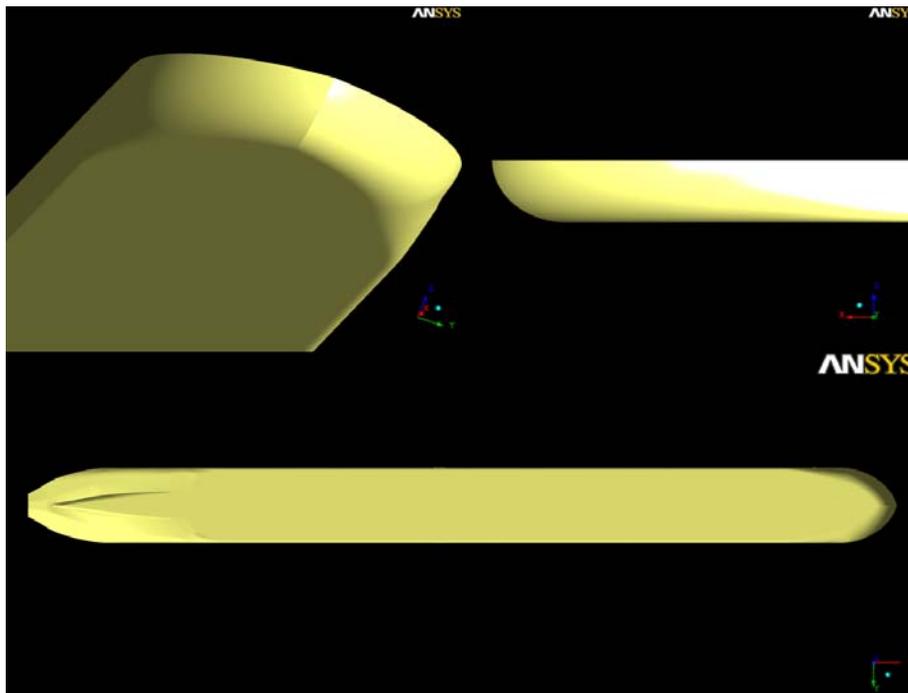


Abb. 36: Variante E mit kreisförmigem Bug

Die Abbildung 36 zeigt einen Bug mit ausgeprägten Radien, um einen stetigen Einlauf am Schiffsboden und an der Seite des Schiffes zu erreichen. Das Hinterschiff entspricht der Ausgangsvariante E.

Bei einer weiteren Vorschiffsmodifikation wurde ein Bugwulst integriert. Bugwülste werden überwiegend in der Seeschifffahrt eingesetzt, um den Wellenwiderstand bei einem definierten Fahrtzustand (Geschwindigkeit, Tiefgang) zu reduzieren. Die Form des Bugwulstes und des Vorstevens muss solange variiert werden, bis der gewünschte Effekt der Verringerung der Bugwelle erzielt wird. Ein wesentlicher Einfluss auf den Gesamtwiderstand ist jedoch durch den Einbau eines Bugwulstes nicht zu erwarten, da der Anteil des Wellenwiderstandes am Gesamtwiderstand bei Binnenschiffen mit moderaten Geschwindigkeiten nur gering ist. Sie können aber auch gezielt eingesetzt werden, um die Verdrängung im Vorschiff zu verteilen. Dadurch ist es möglich, die vordere Schulter des völligen Binnenschiffes schlanker zu gestalten und störende Unterdruckgebiete in diesem Bereich zu reduzieren. In der Abbildung 37 ist die Geometrie des eingesetzten Wulstes am Bug des Binnenschiffes dargestellt. Der hier eingesetzte Bugwulst führt zu keiner Verlängerung der Wasserlinie, da er sehr tief angesetzt wurde.

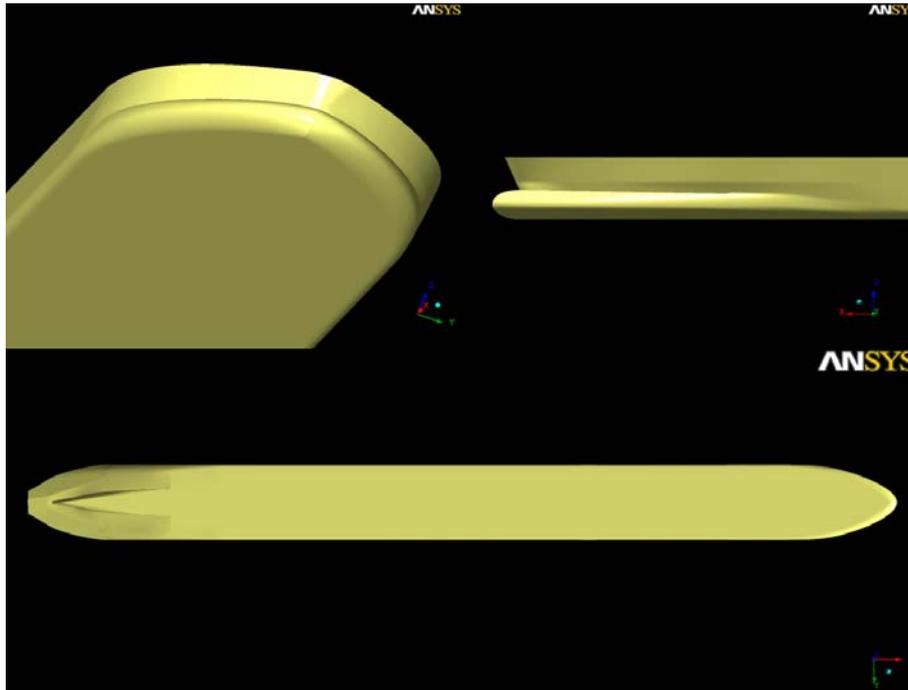


Abb. 37: Variante E mit Bugwulst

Im Schiffs-Optimierungsprozess mittels CFD-Verfahren können eine Vielzahl von geometrischen Modifikationen untersucht werden. Die einzelnen Geometrieänderungen können gegensätzliche Wirkungen haben. Der Gesamtwiderstand kann positiv oder negativ beeinflusst werden. Aus diesem Grund muss jede Veränderung der Schiffsform einzeln untersucht werden, so dass die Summe aller Veränderungen an der Schiffsgeometrie zu einer Verringerung des Leistungsbedarfes des Schiffes führt. Die für den Vortrieb notwendige Leistung ist aber nicht nur abhängig vom Widerstand, sondern auch davon, wie das Antriebsorgan die zugeführte Leistung in Schub umsetzen kann. Aus diesem Grund ist gerade unter den Bedingungen des flachen Wassers die Gestaltung des Hinterschiffes von großer Bedeutung für die Qualität eines Schiffes.

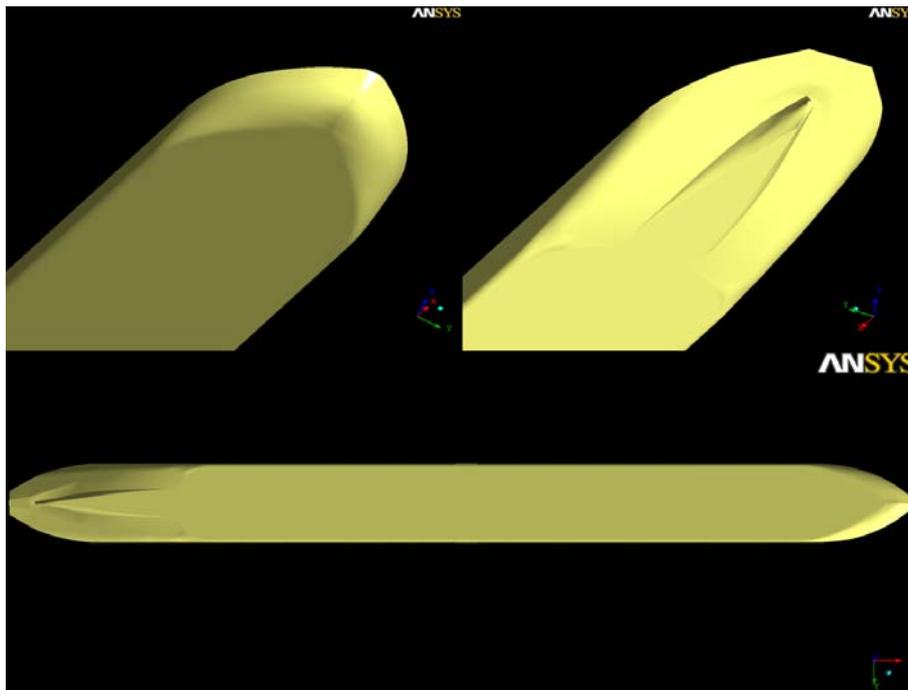


Abb. 38: CFD-optimierte Version E-CFD

In Abbildung 38 ist die Geometrie der CFD-optimierten Schiffsform dargestellt. Im Optimierungsprozess wurden Modifikationen am Vorschiff und an Teilen des Hinterschiffes durchgeführt.

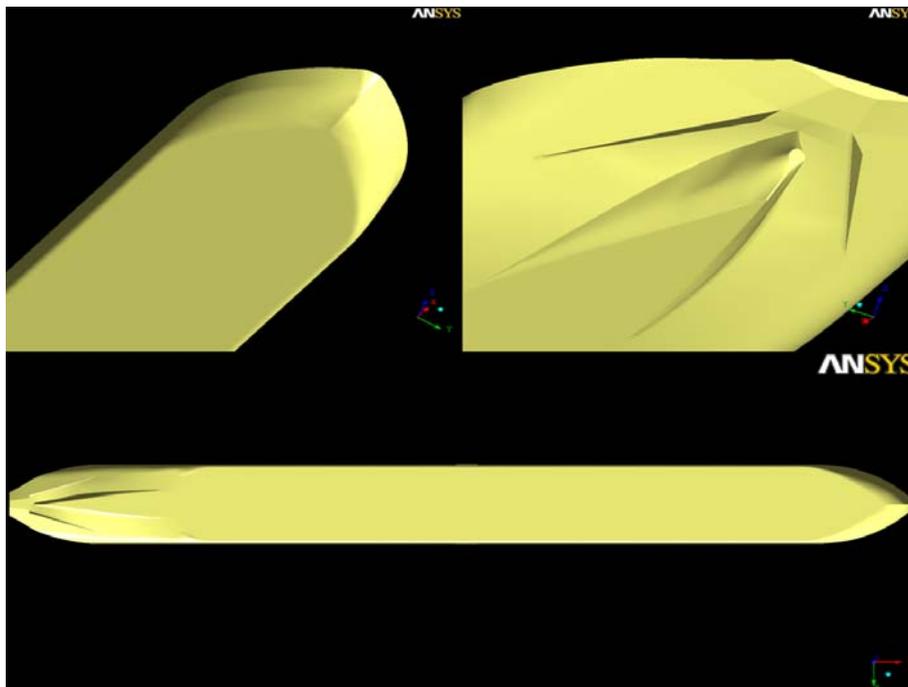


Abb. 39: CFD-optimierte Version E-CFD mit Schürze

Zur Optimierung des Propellerzustromes unter extremen Flachwasserbedingungen wurden so genannte Schürzen am Hinterschiff montiert. Diese Schürzen sollen die Funktion des Tunnels ersetzen, so dass der Propeller in Extremsituationen keine Luft ansaugt und das Schiff auch bei sehr flachem Gewässerpegel einsatzbereit ist. Die Abbildung 39 zeigt die Anordnung der Schürze. Geometrisch wurde die Tunnelschürze als 2-dimensionale Platte implementiert.

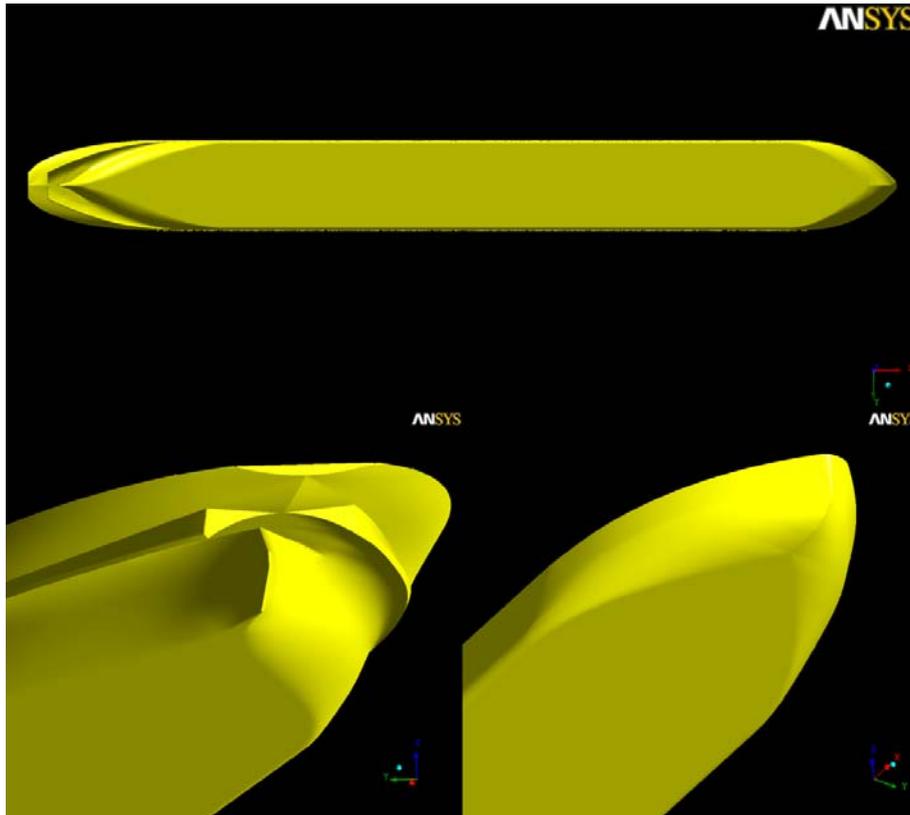


Abb. 40: CFD-optimierte Version E2-CFD

Alternativ zum Entwurf mit nachträglich installierten Tunnelschürzen (Platten) wurde ein Modell (Version E2) mit einem „normalen Tunnelheck“ untersucht. Das Vorschiff entspricht der CFD-optimierten Version E. Abbildung 40 zeigt die Version E2-CFD. Nachteil dieser Version ist die höhere Verdrängung im Hinterschiffsbereich.

Die geometrische Aufbereitung des Berechnungsgebietes wurde mit dem Preprozessing-Modul des Programmpaketes ANSYS-CFX (IcemCFD) realisiert. Für alle Berechnungen wurden die Abmaße des Flachwassertanks des DST als seitliche Begrenzungen vorgegeben. Die Ausdehnung des Lösungsgebietes vor dem Schiff entsprach bei den einzelnen Rechenfällen einer halben bis einer Schiffslänge vor dem Modell. Hinter dem Schiff dehnte sich das Lösungsgebiet 1,5 bis 2 Schiffslängen aus. Da die Geometrie des Schiffes und des Gewässers symmetrisch ist, konnte bei allen numerischen Untersuchungen auf die Berechnung des „ganzen Schiffes“ verzichtet werden. Dadurch ist es möglich, die Anzahl der zur Berechnung notwendigen Gitterpunkte zu reduzieren und damit verbunden die Rechenzeit zu verkürzen. Die Abbildung 41 zeigt schematisch den

Aufbau eines typischen Berechnungsraumes bei homogener Ausdehnung des Lösungsgebietes. Die untere Begrenzung (Boden) ist abhängig von der Wassertiefe des Berechnungsfalles.

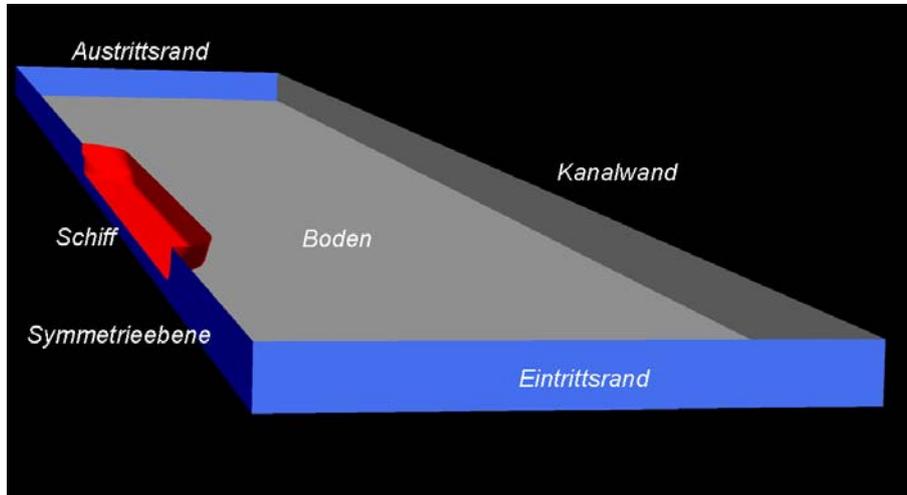


Abb. 41: Schematisches Lösungsgebiet

Um das oben beschriebene CFD-Verfahren einsetzen zu können, muss der durch Randflächen definierte Rechenraum mit Volumenelementen abgebildet werden. Die Anordnung der Kontrollvolumen im Raum kann durch verschiedene Strukturen realisiert werden. Das sind zum einen blockstrukturierte Gittertechniken, bei denen das gesamte Lösungsgebiet in einzelne Blöcke zerlegt wird, deren Grenzen die Geometrie der physikalischen Problemstellung wiedergeben oder unstrukturierte Gitter. Beide Topologien haben Vor- bzw. Nachteile. Das Erzeugen blockstrukturierter Gitter, deren Einzelblöcke mit Hexaederelementen gefüllt werden, ist ein sehr zeitaufwendiger Prozess, hat aber den Vorteil, dass bei entsprechender Gitterqualität ein gutes Konvergenzverhalten erreicht wird. Unstrukturierte Gitter bestehen in der Regel aus Tetraederelementen und können halbautomatisch erzeugt werden. Bei der Generierung dieser Gitter wird ein Berechnungsraum geometrisch definiert und dieses Gebiet mit Volumina nach einer bestimmten vorgegebenen lokalen Verteilung gefüllt. Die notwendige Verfeinerung des Gitters an der Schiffsaußenhaut zur Auflösung der Grenzschicht erfolgt mit Prismenschichten. Der Zeitaufwand für die Erstellung solcher Gitter ist wesentlich geringer, als bei der Generierung blockstrukturierter Gitter insbesondere bei komplexen Hinterschiffsgeometrien, wie sie in der Binnenschifffahrt häufig anzutreffen sind. Um Aussagen über den Widerstand eines Schiffes zu erhalten, ist die Genauigkeit der Lösung von wesentlicher Bedeutung. Berechnungen haben gezeigt, dass bei der Anwendung von Hexaedergittern eine bessere Übereinstimmung der Berechnungsergebnisse zu den Modellversuchsergebnissen erzielt werden kann. Aus diesem Grund wurden in diesem Projekt überwiegend blockstrukturierte Hexaedergitter eingesetzt. Ausnahmen bildeten die Fälle, bei denen die Erzeugung eines strukturierten Gitters auf Grund der komplizierten Geometrie des Schiffes nur mit starken Einbußen bei der Gitterqualität möglich waren. Die Abbildung 42 zeigt beispielhaft den Aufbau einer blockstrukturierten Topologie für das Hinterschiff der Ausgangsvariante A.

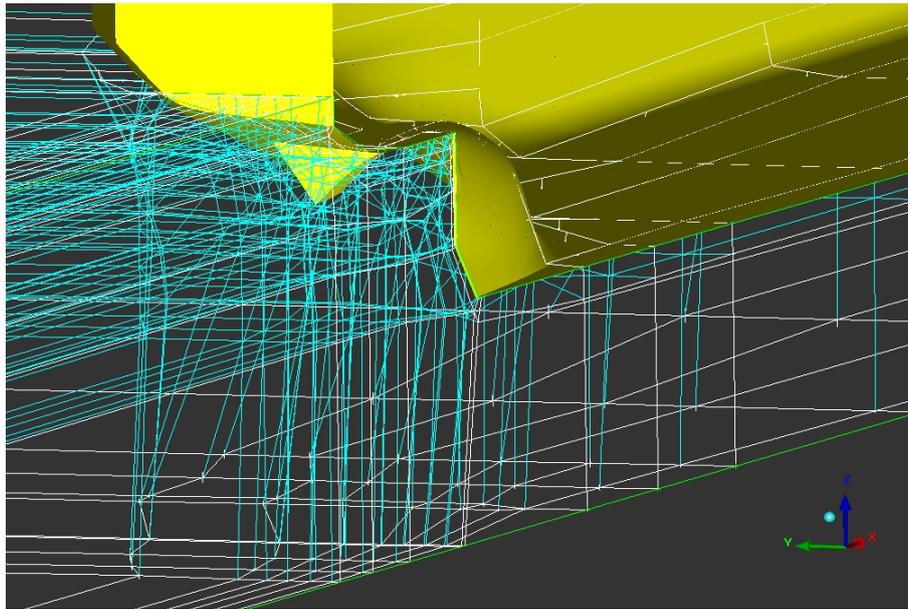


Abb. 42: Ausschnitt aus Gittertopologie am Hinterschiff (blockstrukturiert)

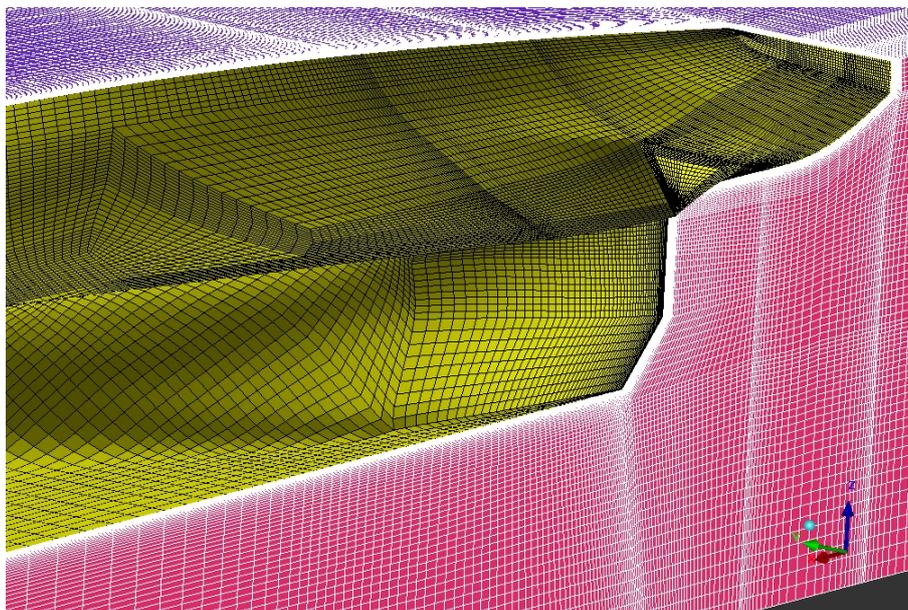


Abb. 43: Ausschnitt aus Hexaedergitter am Hinterschiff (blockstrukturiert)

In der Abbildung 43 ist ein Ausschnitt des Hexaedergitters dargestellt. Auf die Darstellung der Volumenelemente wurde verzichtet. Gelb eingefärbt ist das Hinterschiff zu erkennen. Die roten Rechtecke stellen die Symmetrieebene des Lösungsgebietes dar. Die Größe der Elemente an der Schiffsaußenhaut wurde so gewählt, dass die y^+ Werte in weiten Teilen des Schiffes kleiner 10 waren und im Hinterschiff sich y^+ Werte von ungefähr 2 ergaben. Für die Anwendung des gewählten SST-Turbulenzmodelles werden y^+ werte von 2 empfohlen. Ausgehend von der Oberfläche des Schiffes, vergrößern sich die Zellen in den Raum mit einem Faktor von ca. 1,5.

Für die untersuchten Modellvarianten wurden Lösungsgitter mit unterschiedlicher Anzahl von Berechnungsknoten erstellt. Die Anzahl der Berechnungspunkte variierte zwischen ca. 800.000 Knoten für kleine Gitter und 3.300.000 für Berechnungsgitter mit 2-Phasenströmung. Die folgende Tabelle 6 zeigt eine Übersicht der erstellten Gitter mit der jeweiligen Knoten- und Elementanzahl (für jeden Elementtyp). Dargestellt sind nur die Gitter, die zu einer konvergierenden Lösung geführt haben.

<i>Modellvariante</i>	<i>Gitterart</i>	<i>Prism</i>	<i>Tetra</i>	<i>Hexa</i>	<i>Knotenanzahl</i>
Variante A (1)*	Tetra	307.935	3.800.761		830.874
Variante A (2)	Tetra	481.844	6.268.150		1.356.774
Variante A (3)	Tetra	440.108	6.915.174		1.450.305
Variante A (4)	Tetra	481.376	7.499.450		1.566.929
Variante A (5)	Hybrid		887.346	1.665.069	1.886.686
Variante A (5a)	Hybrid	194.468	709.726	1.665.069	1.886.686
Variante A (6)	Hexa			2.053.228	1.986.894
Variante B	Hexa			2.053.228	1.986.894
Variante C	Hexa			2.269.393	2.197.792
Variante D	Hexa			2.328.973	2.225.368
Variante E (ORIGINAL)	Hexa			2.647.113	2.728.610
Variante E-CFD	Hexa			2.657.807	2.739.974
Variante E (Bugwulst)	Hexa			2.657.807	2.739.974
Variante E (runde Bugform)	Hexa			2.657.807	2.739.974
Variante E-CFD (mit Blech)	Hexa			2.695.091	2.778.290
Variante E-CFD-FS	Hexa			3.239.366	3.331.870
Variante E 2-CFD	Hexa	3.341.293	4.375.218		2.556.180

Tab. 6: Übersicht

Um eine Gitterabhängigkeit auszuschließen, wurden für die Ausgangsvariante A fünf Gitter mit unterschiedlicher Struktur und Knotenanzahl generiert. Mit (...) gekennzeichnete Modellvarianten sind Gittervarianten der Ausgangsform. Die Varianten A (5) und A (5a) sind so genannte Hybridgitter, bei denen blockstrukturierte Gitterteile mit unstrukturierten Gittern über ein Interface gekoppelt werden. Das Interface ist keine 1:1 Verbindung der Knoten. Diese Art der Gittertopologie wurde gewählt, um einfache Konzepte der Diskretisierung geometrisch komplexer Hinterschiffe aus der Binnenschiffahrt hinsichtlich der Qualität der Berechnungsergebnisse zu überprüfen. Durch Zeitersparnis bei der Gittergenerierung ist es möglich, den gesamten CFD-Optimierungsprozess effizienter zu gestalten. Bei Variante A (5a) wurden zusätzlich noch Prismenschichten zur besseren Auflösung der Grenzschicht im Tetra-Teilnetz implementiert. Bei kleinen geometrischen Modifikationen an den Modellen wurde versucht, die Struktur des Gitters und

die Anzahl der Rechenknoten beizubehalten, um den Einfluss der Diskretisierung auf das Berechnungsergebnis so gering wie möglich zu halten.

8.3.2 Berechnungsfälle

Die numerischen Untersuchungen für dieses Projekt wurden im Modellmaßstab $\lambda = 16$ durchgeführt, um eine Vergleichbarkeit mit den experimentellen Untersuchungen zu ermöglichen. Ähnlich dem Widerstandsversuch im Experiment werden für eine Wassertiefe und einen Tiefgang Berechnungen für einen definierten Geschwindigkeitsbereich durchgeführt. Dabei wurde die Geschwindigkeit des Schiffes im Bereich $8 \text{ km/h} \leq V_{\text{Schiff}} \leq 16 \text{ km/h}$ variiert. Bei diesen Berechnungen wird der viskose Widerstand des Modells ermittelt, der sich aus dem Reibungswiderstand und dem viskosen Druckwiderstand zusammensetzt. Der Reibungswiderstand ergibt sich aus der Integration der Wandschubspannungen an der Schiffsaußenhaut in Fahrtrichtung des Schiffes. Der viskose Druckwiderstand wird ermittelt aus der Summe aller am Schiff auftretenden Drücke bezogen auf die in Fahrtrichtung projizierte Fläche. Der Wellenwiderstand des Schiffes wird bei den „numerischen Widerstandsversuchen“, im Gegensatz zum Experiment, nicht berücksichtigt.

Für jede untersuchte Modell- bzw. Optimierungsvariante gelten folgende Berechnungsparameter:

Wassertiefe	$h = 5,00 \text{ m}$
Tiefgang	$T = 2,50 \text{ m}$
Schiffsgeschwindigkeitsbereich (GA)	$8,0 \text{ km/h} \leq V_{\text{Schiff}} \leq 16,0 \text{ km/h}$
Schiffsgeschwindigkeitsbereich (Modell)	$0,55 \text{ m/s} \leq V_{\text{Schiff}} \leq 1,11 \text{ m/s}$

Die Geschwindigkeit des Schiffsmodells wurde mit einem ΔV_{Schiff} von 1 km/h variiert. Insgesamt wurden pro Widerstandskurve 9 Berechnungen durchgeführt. Die Auswertung der Widerstandskurven, der Druckverteilungen am Schiffskörper und die Zuströmung zum Propeller führten innerhalb des Optimierungsprozesses zu neuen Formvarianten. Für jede Formvariante wurde ein neuer Berechnungsfall mit den oben beschriebenen Parametern aufgesetzt. Mit der CFD-optimierten Schiffsform wurde bei maximaler Schiffsgeschwindigkeit die Wasseroberflächenverformung, die durch die Fahrt des Schiffes hervorgerufen wird, untersucht. Alle Berechnungsfälle wurden unter stationären Bedingungen durchgeführt. Die Schiffsform erfährt durch die Anströmung im Kanal keine dynamische Schwimmlagenveränderung. Bei numerischen Berechnungen mit fixem Gitter, also ohne iterative Gitteranpassung, ist es nicht möglich, das Schiff auf Grund der wirkenden Kräfte abzusenken bzw. zu vertrimmen. Das Schiff ist fest eingespannt.

8.3.3 Ergebnisse

Zur Beurteilung der Qualität eines Schiffsentwurfes aus hydrodynamischer Sicht dienen die berechnete Widerstandskurve, das erzeugte Wellenbild, die Druckverteilungen am Schiffskörper und, um eine optimale Anströmung des Propellers zu gewährleisten, die Strömungsverhältnisse im Hinterschiffsbereich. Da gerade bei langsam fahrenden Binnenschiffen der Anteil des Wellenwiderstandes am Gesamtwiderstand relativ gering ist, wurde auf zeitaufwendige 2-Phasenberechnungen (Wasser-Luft) im Optimierungsprozess verzichtet. Mit dem im Rahmen dieses Vorhabens angeschafften Linux-Cluster sind Rechenzeiten von bis zu zwei Wochen für einen Geschwindigkeitspunkt der Widerstandskurve unter Berücksichtigung der freien Wasseroberfläche möglich. Die Berechnung einer kompletten Widerstandskurve mit der notwendigen Gitterauflösung würde 16 Knoten (CPU) des Clusters bis zu 20 Wochen blockieren. Mit diesem Zeitaufwand ist eine Optimierung des erzeugten Wellenbildes nicht möglich.

Als Kriterien für die Güte der Berechnung wurden die RMS-Residien und der konstante Verlauf der integralen Größen gewählt. Eine Rechnung galt als ausreichend konvergiert, wenn sich für die gemittelten Residien ein Wert kleiner 10^{-6} eingestellt hat und bei den Kraftgrößen keine nennenswerten Schwankungen mehr zu erkennen waren.

Um den Einfluss der benutzerabhängigen Diskretisierung auszuschließen, wurde das Geschwindigkeits- und Druckfeld der Ausgangsvariante A mit einer Vielzahl von Gittertopologien und Gittergrößen berechnet (siehe Abschnitt 8.3.1). Der qualitative Vergleich der Druckverteilung am Schiffskörper lässt nur geringe Unterschiede in der Druckverteilung am Hinterschiff erkennen.

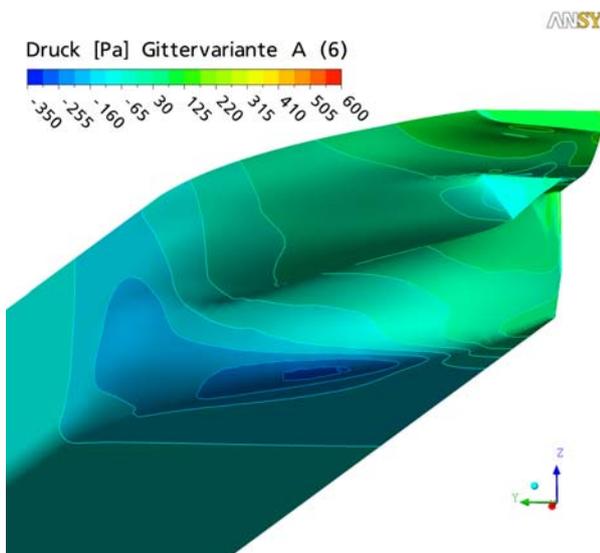


Abb. 44: Gittervariante A (6)

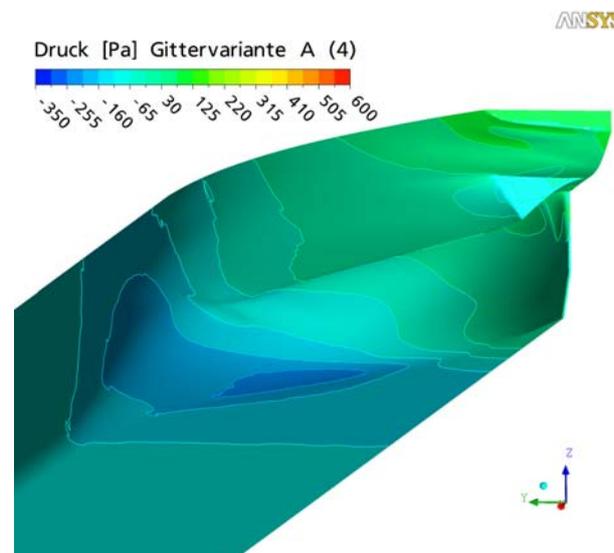


Abb. 45: Gittervariante A (4)

Die Abbildungen 44 und 45 zeigen, dass bei der reinen Hexaedergitter-Variante A (6), das Unterdruckgebiet am Übergang vom Schiffsboden zum Tunnel stärker ausgebildet ist, als bei dem sehr fein aufgelösten Tetraedergitter (Variante A (4)) mit Prismenschicht am Schiffskörper. Die Berechnungen mit den Hybridgittervarianten A (5) und A (5a) zei-

gen eine gute Übereinstimmung hinsichtlich der Druckverteilung. Für das ausgeprägte Unterdruckgebiet an der unteren Tunnelkante ergeben sich gleiche Werte wie bei der Gittervariante A (6). Bei beiden Hybridgittern (Abb. 46 und 47) ist jedoch ein weiteres Unterdruckgebiet an der Kante des Tunnelspiegels zu erkennen. Die Ursachen für dieses Unterdruckgebiet können darin liegen, dass eine hohe Gitterqualität an geometrischen Unstetigkeiten dieser Art durch den automatischen Gittergenerator nicht immer realisierbar ist.

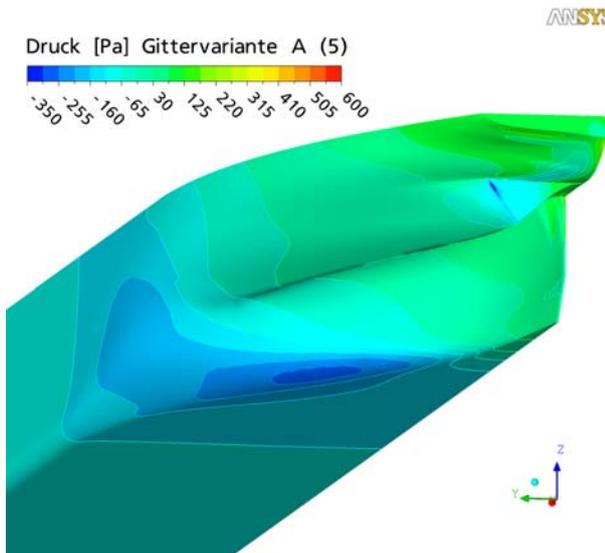


Abb. 46: Gittervariante A (5)

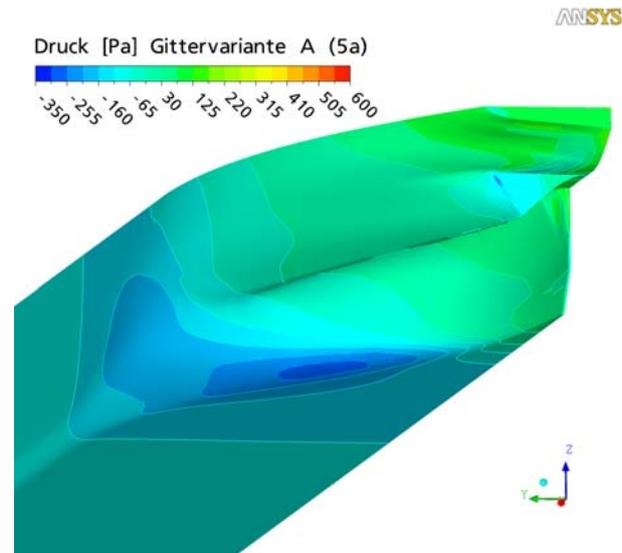


Abb. 47: Gittervariante A (5a)

Ein Vergleich der berechneten Gesamtwiderstände aller Gittervarianten der Version A (Abb. 48) zeigt, dass die numerischen Widerstände bei Geschwindigkeiten größer 11 km/h deutlich zu gering berechnet werden.

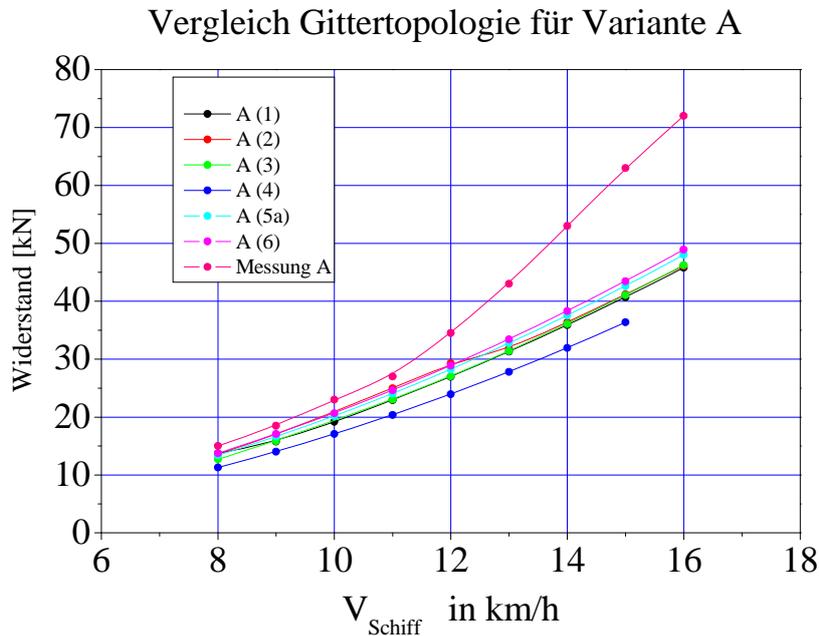


Abb. 48: Gitterabhängigkeit des Widerstandes Variante A

Ein Grund dafür kann die Nichtberücksichtigung des Wellenwiderstandes bei den CFD-Berechnungen sein. Wahrscheinlicher ist aber, dass die Veränderung der dynamischen Schwimmelage des Modells bei höheren Geschwindigkeiten unter Flachwasserbedingungen einen wesentlichen Einfluss auf den Gesamtwiderstand des Schiffes hat. Diese Effekte werden durch die Numerik bei diesen Berechnungen nicht erfasst.

Eine Bewertung der Ergebnisse hinsichtlich des Einflusses der Gittertopologie ergibt, dass Berechnungen mit blockstrukturierten Gittern (A 6) im unteren Geschwindigkeitsbereich eine gute Übereinstimmung mit dem Experiment liefern. Bei höheren Geschwindigkeiten liegen die Ergebnisse der Berechnung mit Hexaedernetzen näher an dem im Experiment ermittelten Widerstand als die mit unstrukturierten Gittern berechneten Widerstände. Als Ergebnis dieses Vergleiches wurde entschieden, dass für die weiteren Optimierungsberechnungen, soweit möglich, Hexaedernetze (A 6) als Lösungsgitter benutzt werden. Eine Alternative dazu können Hybridgitter (A 5a) sein, deren Berechnungsergebnisse sich nur geringfügig von den Ergebnissen der Berechnungen mit Hexaedergittern unterscheiden. Trotz der Abweichungen der integralen Größen (Widerstand) ist eine qualitative Bewertung des Schiffsentwurfs im Optimierungsprozess möglich.

Im ersten Optimierungsschritt soll der Einfluss einer Änderung der Schiffslänge und der Schiffsbreite auf den Leistungsbedarf des Schiffes untersucht werden. Betrachtet man den absoluten Widerstand, der sich durch die durchgeführten Veränderungen ergibt, zeigen sich die Veränderungen deutlich.

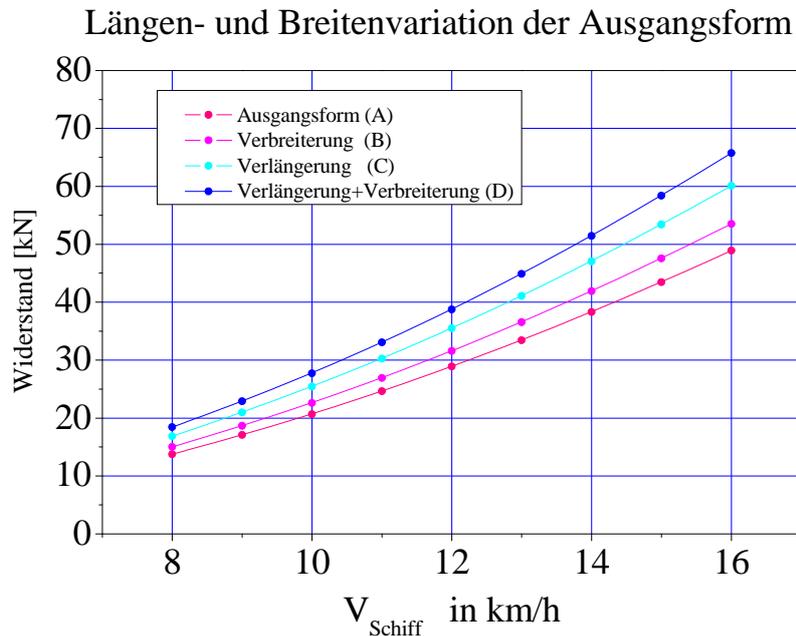


Abb. 49: Gesamtwiderstand für Längen- und Breitenänderung der Ausgangsform

Wie zu erwarten, erhöht sich der Widerstand mit zunehmender Länge und Breite des Schiffes deutlich, da eine Vergrößerung des Schiffes in dieser Größenordnung immer verbunden ist mit einem höheren Leistungsbedarf. Festzustellen bleibt jedoch, dass sich aus der durchgeführten Verbreiterung des Schiffes eine geringere Widerstandserhöhung ergibt als durch eine Verlängerung des Ausgangsentwurfes (Abb. 49). Interessanter für den wirtschaftlichen Nutzen, der sich aus einer Änderung der Hauptabmessungen ergibt, ist der Vergleich des Widerstandes bezogen auf die Verdrängung des Schiffes (Abb. 50).

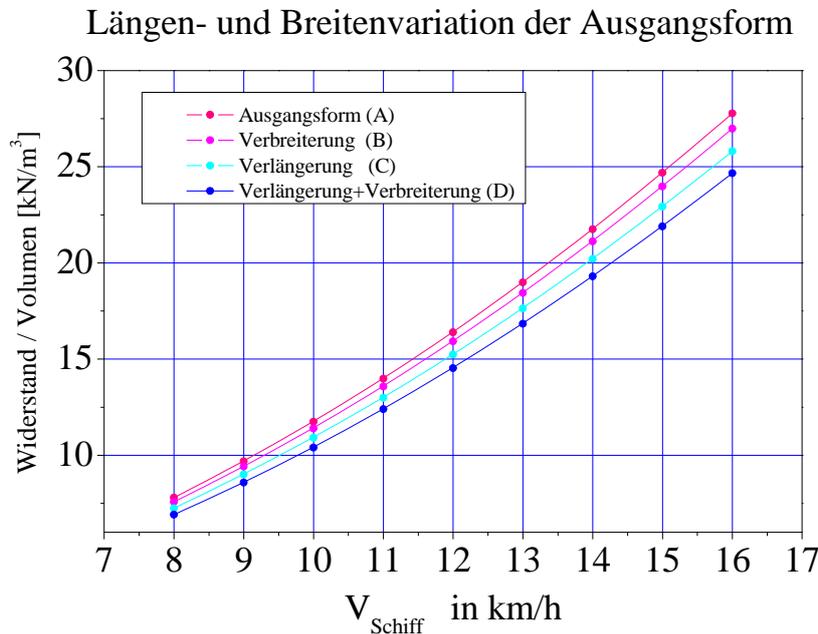


Abb. 50: Widerstand bezogen auf Verdrängung – Längen-Breiten-Variation

Die Gegenüberstellung des auf die Verdrängung bezogenen Widerstandes zeigt deutlich den Vorteil eines längeren Schiffes. Für die alleinige Verlängerung der Ausgangsform (C) und die gleichzeitige Verlängerung und Verbreiterung (D) der Variante A ergibt sich ein fast identischer verdrängungsbezogener Widerstand. Berücksichtigt man die nicht optimalen Übergänge bei der geometrischen Anpassung der Verbreiterung des Schiffes, sind durch einen strömungsgünstigeren Übergang vom verbreiterten Mittelschiff zu den Schiffsenden weitere Reserven für einen effizienten Schiffsentwurf zu erwarten.

Ausgehend von diesen Erkenntnissen wurde ein neues Schiff (Variante E) mit der Breite $B = 11,4$ m und einer Länge von $L = 110$ m entworfen. Dieser Entwurf entstand durch die Auswertung von Vergleichsschiffen und auf der Basis vorhandener Erfahrungen.

Ein erster Schritt zur Bewertung der Güte des Neuentwurfes ist der Vergleich der berechneten integralen Größen des Ausgangsschiffes mit dem neu entworfenen Schiff. Eine Gegenüberstellung der auf die Verdrängung bezogenen Widerstandskurven zeigt, dass durch den Neuentwurf eine Verringerung des Leistungsbedarfes, insbesondere bei höheren Schiffsgeschwindigkeiten, erreicht werden kann (Abb. 51).

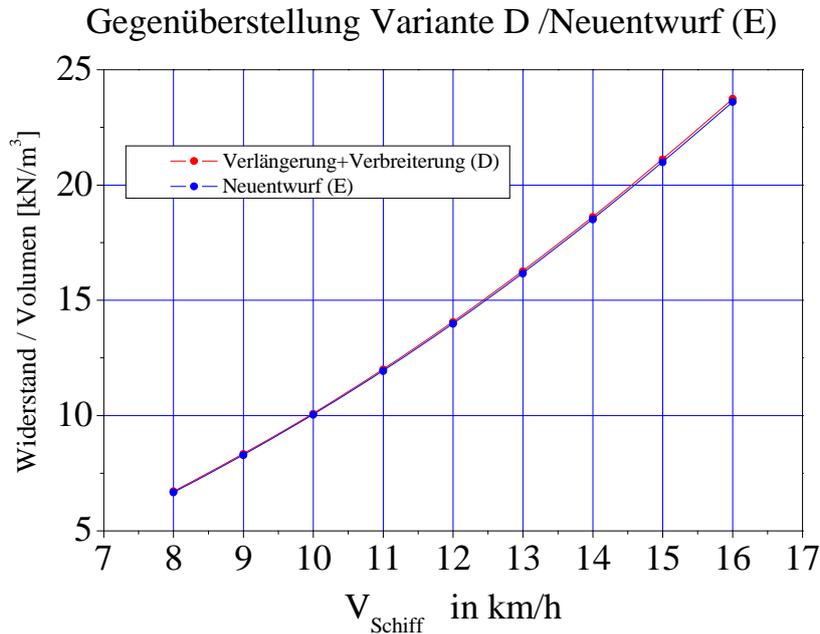


Abb. 51: Widerstand bezogen auf Verdrängung – Neuentwurf Variante E

Durch CFD-Berechnungen werden dem Entwurfsingenieur Informationen über das Druck- und Geschwindigkeitsfeld im Lösungsgebiet zur Verfügung gestellt, die durch herkömmliche Modellversuche nicht oder nur mit sehr hohem Kosten- und Zeitaufwand bereitgestellt werden können. Für die experimentelle Ermittlung der Druckverteilung am Schiff müssen eine Vielzahl von Druckdosen am Schiffskörper verteilt und ausgewertet werden. Die Messung des Geschwindigkeitsfeldes im Nahfeld des Schiffes ist nur mit moderner Lasertechnik mit sehr hohem Zeitaufwand möglich, da die Geschwindigkeitskomponenten für jeden Raumpunkt einzeln gemessen werden.

Die Auswertung der berechneten Druckverteilung am Schiffsrumpf liefert Informationen über Druckunstetigkeiten (z.B. Unterdruckgebiete), die durch geeignete Veränderungen der Schiffsförm vermieden werden können. Die Abbildung 52 zeigt die Druckverteilung am Schiffskörper des Entwurfes E bei einer Schiffsgeschwindigkeit der Großausführung von 16 km/h. Die am Modell auftretenden Drücke, infolge der „Fahrt“ des Schiffes, wurden für alle Berechnungen mit dem Staudruck der ungestörten Anströmung $\rho/2 \cdot (V_{\text{Schiff}})^2$ normiert. Die so erhaltenen Druckbeiwerte gelten für beliebige Schiffsgeschwindigkeiten.

Negative Druckbeiwerte (blau) zeigen Gebiete, in denen die Geschwindigkeit des Fluids beschleunigt wird. Positive Beiwerte des Drucks (rot) kennzeichnen Bereiche, in denen die Strömung abgebremst wird, wie am vorderen Staupunkt des Modells deutlich zu erkennen ist. Die Druckverteilung am Bug des Schiffes (rechte obere Darstellung in Abbildung 52) zeigt ein starkes Unterdruckgebiet am Einlauf zum Boden des Binnenschiffes. Aus der Unterdruckzone am Vorschiff ergeben sich weitere Optimierungsmöglichkeiten bezüglich der Bugförm der Variante E, deren Ziel es ist, extreme Drucksprünge zu verhindern. Im hinteren Teil des Schiffes (linke obere Darstellung in Abbildung 52) sind bei dieser Skalierung der Beiwerte keine extremen Drücke zu erkennen. Zur Beurteilung der

Druckverhältnisse am Hinterschiff muss eine auf das Hinterschiff beschränkte lokale Skalierung erfolgen.

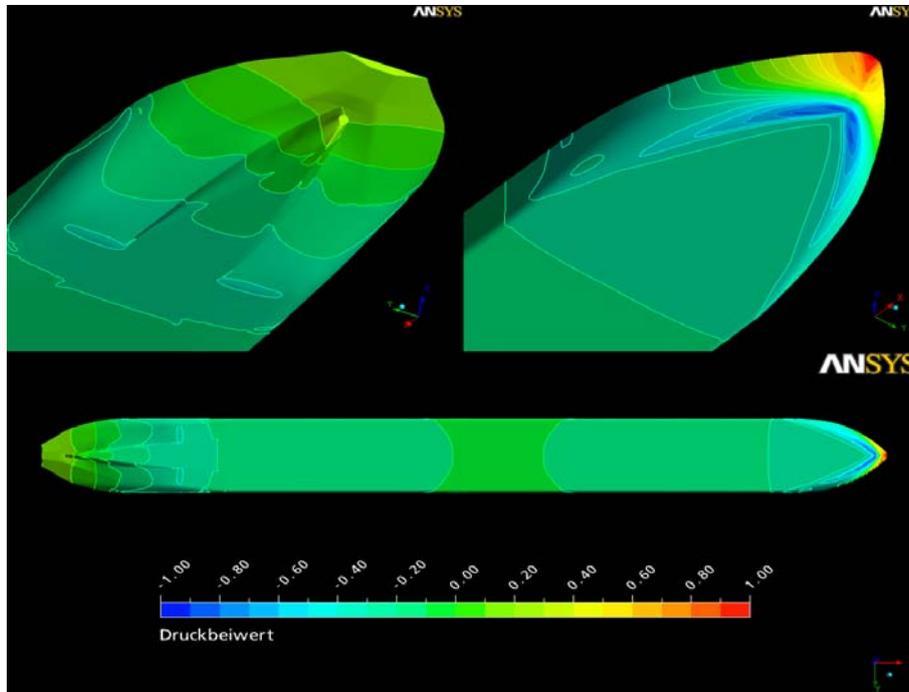


Abb. 52: Druckbeiwerte am Schiffskörper – Neuentwurf Variante E

Um die Güte des Hinterschiffentwurfs beurteilen zu können, sind Informationen über mögliche Ablösezonen der Strömung am Schiffskörper und über die Strömungsverhältnisse in der Nähe des Schiffes hilfreich. Auf der Basis dieser Informationen ist es möglich, den Propellerzustrom zu optimieren und den druckbedingten viskosen Widerstand des Binnenschiffes zu verringern. Durch CFD-Berechnungen können die Wandschubspannungen am Rumpf des Schiffes und die Geschwindigkeitskomponenten ermittelt werden.

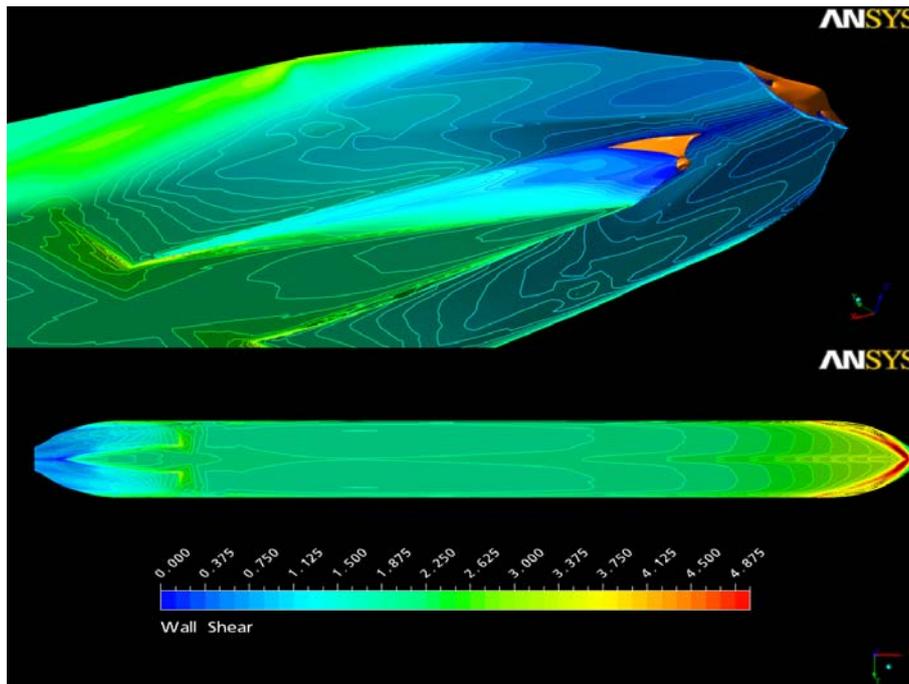


Abb. 53: Wandschubspannung am Schiffskörper – Neuentwurf Variante E

Sehr geringe Wandschubspannungen und Rückstromgebiete in Wandnähe können ein Indiz für lokale Strömungsablösungen sein. In Abbildung 53 sind die Wandschubspannungen in Isoliniendarstellung und die Bereiche, in denen Rückströmungen am Hinterschiff auftreten, als Isosurface (orange) für die Version E dargestellt. Ablösungen der Strömung sind in den Regionen zu erwarten, an denen sich für die Wandschubspannung einen sehr kleiner Wert (dunkelblau) einstellt und eine Umkehrung der Strömungsrichtung einsetzt.

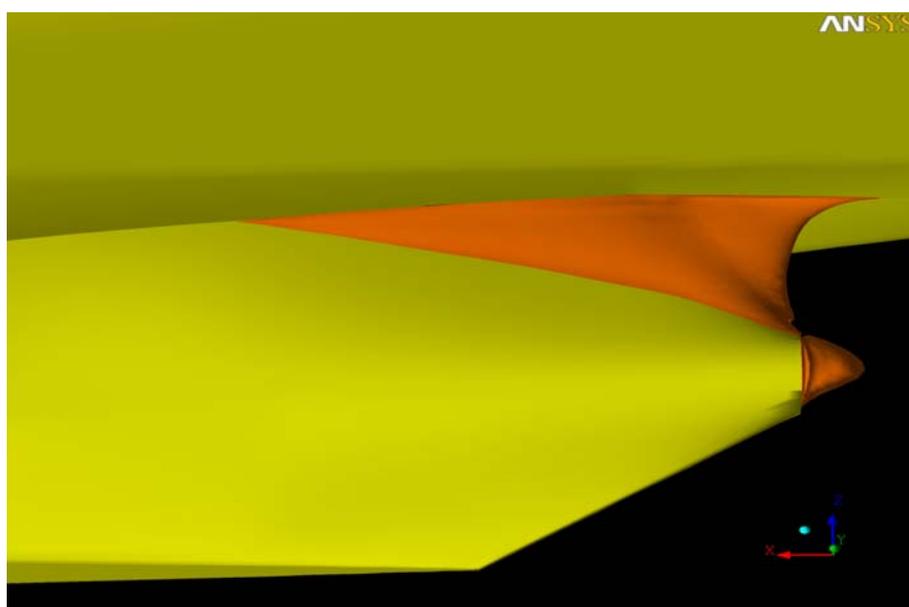


Abb. 54: Mögliche Ablösegebiete am Hinterschiff – Neuentwurf Variante E

In Abbildung 54 ist zu erkennen, dass im Stevenbereich oberhalb der Propellerwelle mit Ablösung zu rechnen ist. Die möglichen Ablösegebiete sind orangefarbig dargestellt. Allgemein kann festgestellt werden, dass die Ausprägung der Strömungsablösung bei der Entwurfsvariante E im Vergleich zu anderen völligen Binnenschiffen moderat ist.

Der Propulsionsgütegrad eines Schiffes kann verbessert werden, indem das Hinterschiff so gestaltet wird, dass ein möglichst gleichförmiger Zustrom zum Propeller realisiert wird. Dadurch können die durch den Propeller erzeugten Schwingungen verringert und der Gesamtwiderstand reduziert werden. Die Darstellung der Geschwindigkeitsverteilung in ausgewählten Ebenen vor dem Propeller ermöglicht die Überprüfung und Bewertung der Anströmung zum Propeller. Durch die numerischen Berechnungen werden die notwendigen Informationen zur Bewertung bereitgestellt. Das Postprocessing der CFD-Ergebnisse liefert den Betrag der Geschwindigkeit in Form von Isolinien und die Richtung der Geschwindigkeit als Vektorfeld für äquidistante Punkte einer beliebigen Ebene. Die folgenden Abbildungen 55 bis 60 geben einen Einblick in die Strömungsverhältnisse am Hinterschiff der Entwurfsvariante E für 6 gewählte Schnittebenen quer zur Strömungsrichtung. Die Geschwindigkeit wurde mit der Fahrtgeschwindigkeit des Schiffes normiert. Die Positionen der Schnittebenen beziehen sich auf die Länge des Binnenschiffes. Der Betrag der Geschwindigkeit zeigt, dass sich wie erwartet am Einlauf zum Hinterschiff bei 0,15 L (Abb. 60) Übergeschwindigkeiten neben dem Schiff im Kanal ausbilden. Im Bereich des Propellers (Abb. 56) ist oberhalb der Propellerwelle ein schmales Totwassergebiet, bedingt durch den Nachlauf des Stevens, zu erkennen. Wirbel mit geringer Intensität sind im Bereich der Propellerwelle zu beobachten (Abb. 56)

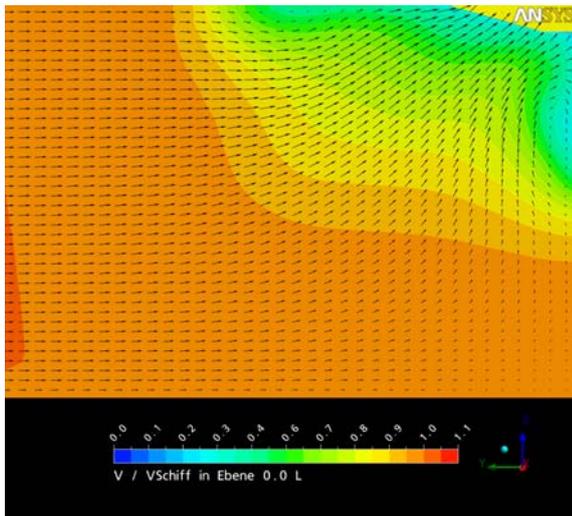


Abb. 55: Geschwindigkeitsfeld $x = 0,0 L$

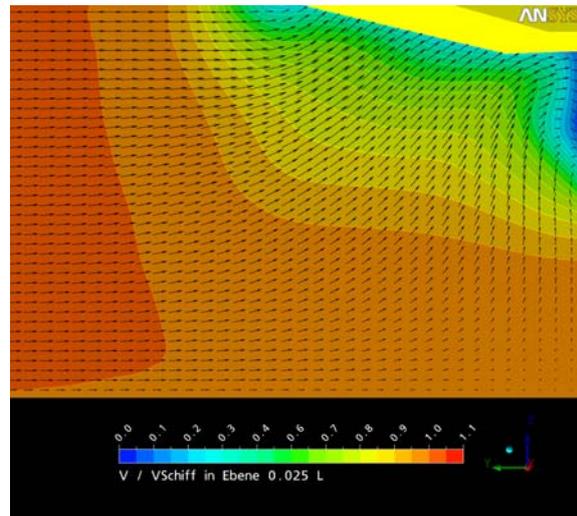


Abb. 56: Geschwindigkeitsfeld $x = 0,025 L$

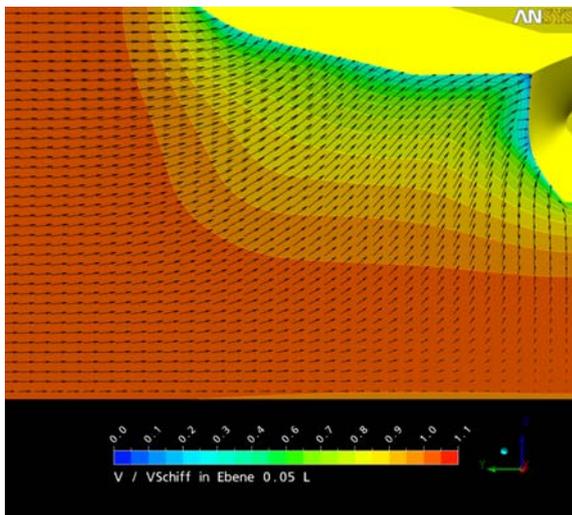


Abb. 57: Geschwindigkeitsfeld $x = 0,05 L$

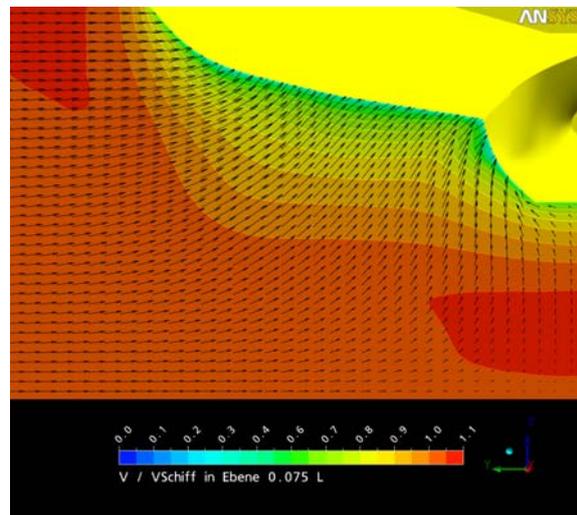


Abb. 58: Geschwindigkeitsfeld $x = 0,075 L$

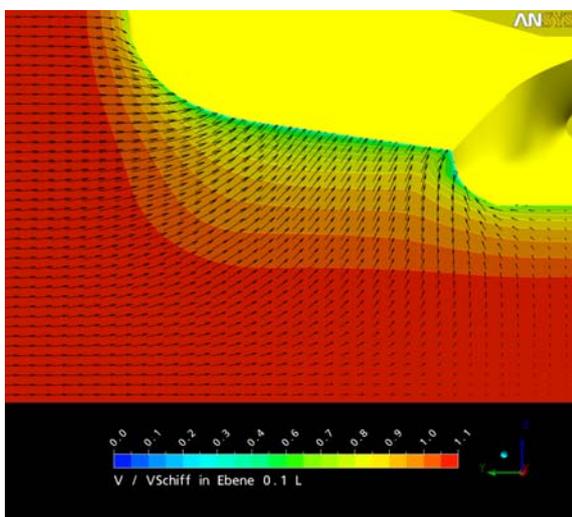


Abb. 59: Geschwindigkeitsfeld $x = 0,10 L$

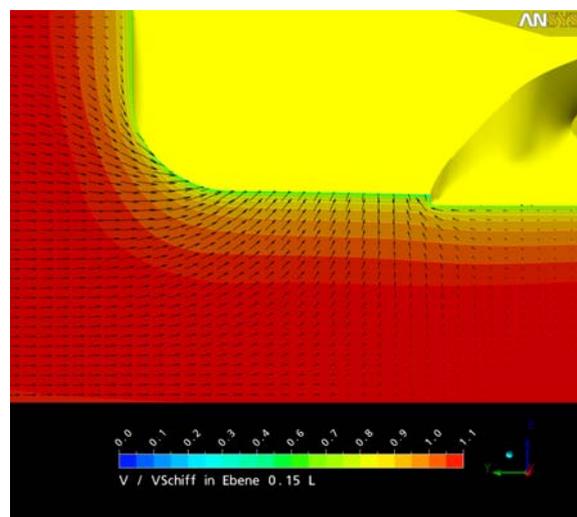


Abb. 60: Geschwindigkeitsfeld $x = 0,15 L$

Die Auswertung von Stromlinien ist ein weiteres Kriterium zur Bewertung des Hinterschiffes. In der Abbildung 61 sind die Stromlinien im Bereich des Hecks der Version E dargestellt. Überschneidene Stromlinien weisen auf Wirbelbildungen hin.

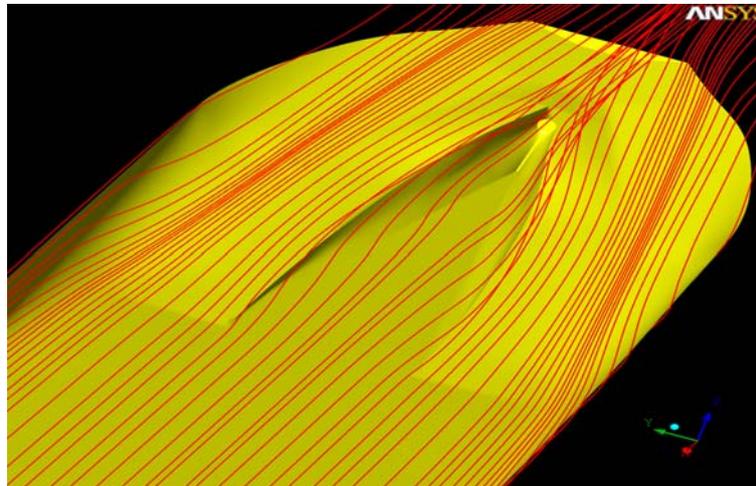


Abb. 61: Stromlinien am Hinterschiff - Neuentwurf Variante E

Durch die Stromliniendarstellung können mögliche Ursachen für die Entstehung eines Wirbels lokalisiert werden. Verfolgt man die Stromlinien, die den Bereich des Wirbels an der Propellerwelle darstellen, stromaufwärts, kann als eine Ursache der Wirbelentstehung die Gestaltung der Stevenkante gelten.

Ausgehend von der Version E, wurden durch die Auswertung der CFD-Berechnungen die Linienrisse der Schiffe durch das Konstruktionsbüro soweit verändert, bis weitere numerische Berechnungen eine Verbesserung der Strömungsverhältnisse erzielten. Die finale Variante dieser Optimierungen wird im Weiteren als Version E-CFD bezeichnet. Die Abbildungen 62 und 63 zeigen die durch den Optimierungszyklus erzielten Verbesserungen im Druckverlauf am Hinterschiff.

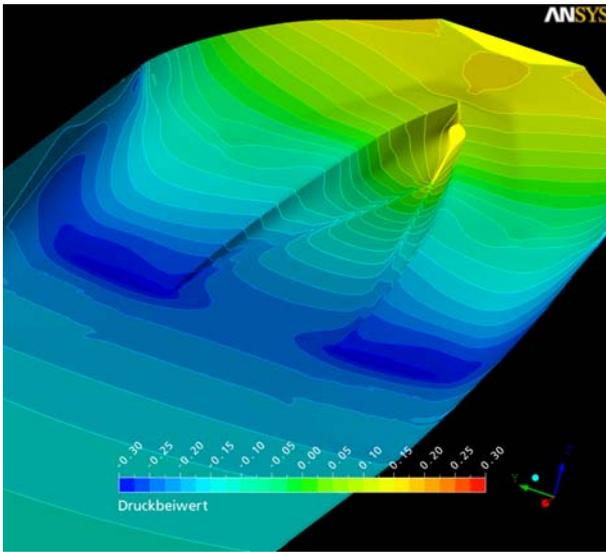


Abb. 62: Druckbeiwerte – Version E

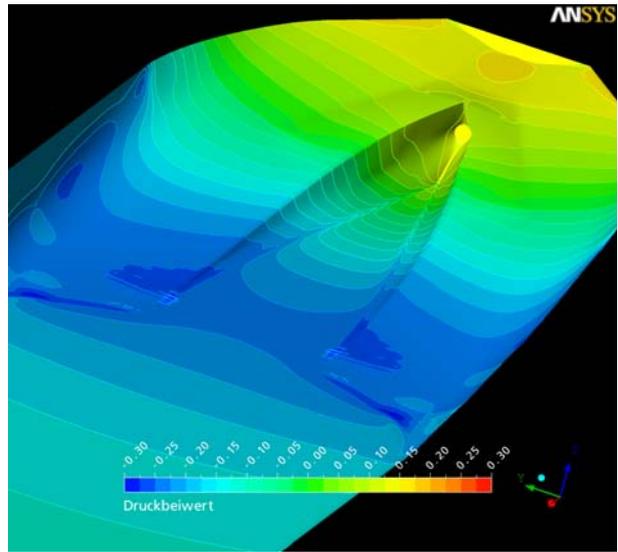


Abb. 63: Druckbeiwerte – Version E-CFD

Das Unterdruckgebiet am Übergang des mittleren Schiffes zum Heck konnte durch die geometrischen Veränderungen wesentlich reduziert werden. Ein Vergleich der Geschwindigkeitsfelder am Hinterschiff zeigte, dass die durchgeführten Veränderungen keinen wesentlichen Einfluss auf den Betrag und die Richtung der Geschwindigkeit hatten.

Weitere Änderungen des Linienrisses konzentrierten sich auf die Verringerung des stark ausgeprägten Unterdruckgebietes im Vorschiff der Ausgangsvariante E. Das Vorschiff wurde in zwei Fällen vollkommen ersetzt durch einen Bug mit sehr kreisförmigen Linien (Abb. 37) und durch ein Bugwulstvorschiff (Abb. 37). Die dritte Variante verfolgte die Strategie, das vorhandene Vorschiff der Variante E zu modifizieren und dabei die Vorschiffslinien besser in den Boden zu straken (Abb. 38). In den Abbildungen 64 bis 67 sind die Auswirkungen der Entwurfsveränderungen auf den Druckbeiwert dokumentiert.

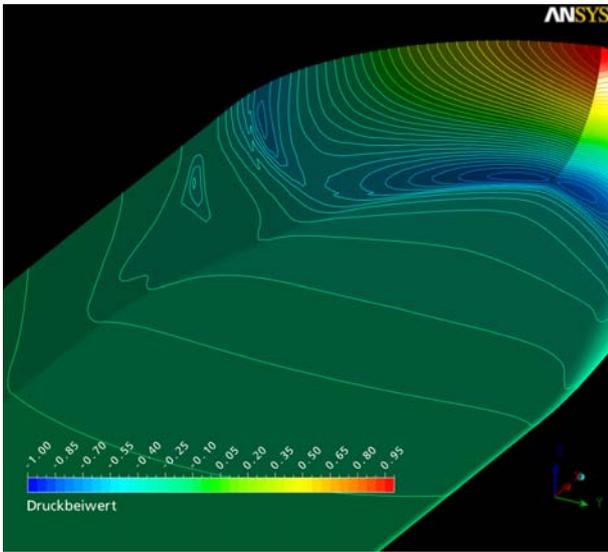


Abb. 64: Druckbeiwerte – kreisförmiger Bug

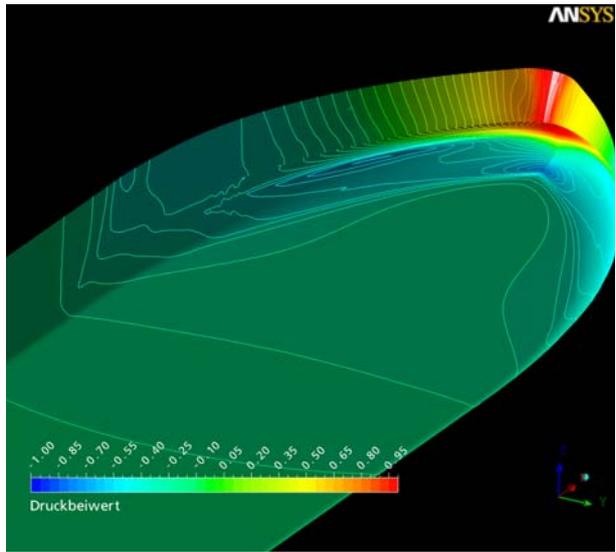


Abb. 65: Druckbeiwerte – Bugwulst

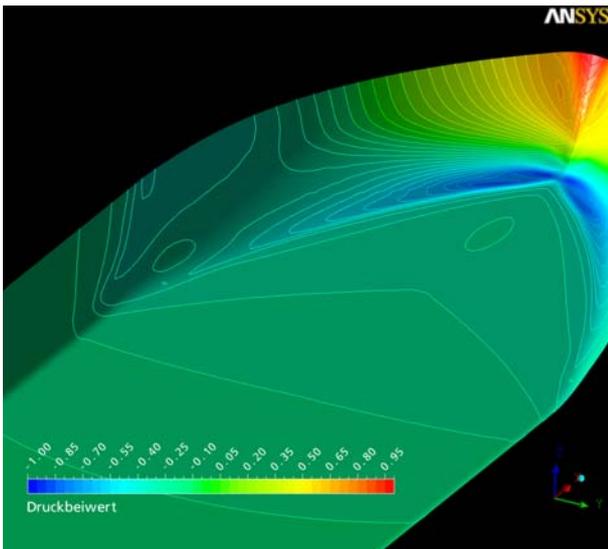


Abb. 66: Druckbeiwerte – Version E

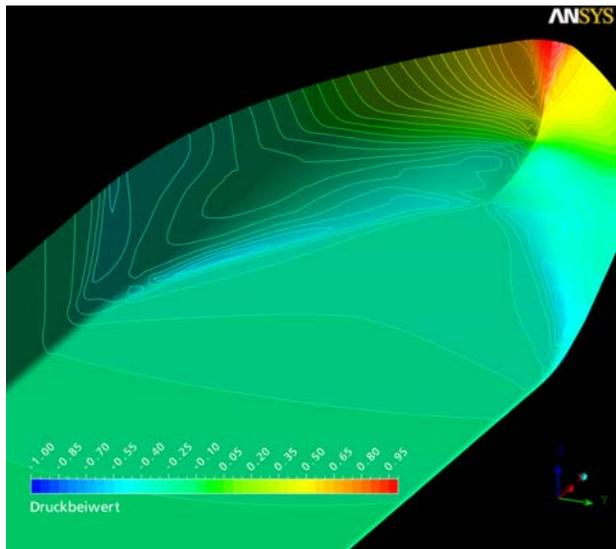


Abb. 67: Druckbeiwerte – Version E-CFD

Durch die sehr kreisförmigen Linien (Abb. 64) im Vorschiff konnte beim Vergleich der Druckbeiwerte keine Verbesserung im Druckverlauf erzielt werden. Die Installation eines Bugwulstes (Abb. 65) verbesserte zwar die Druckverteilung am Vorschiff, aber unter dem Aspekt der geringsten Druckunstetigkeiten am Vorschiff, ist die CFD-optimierte Variante E (Abb. 67) allen anderen Varianten vorzuziehen.

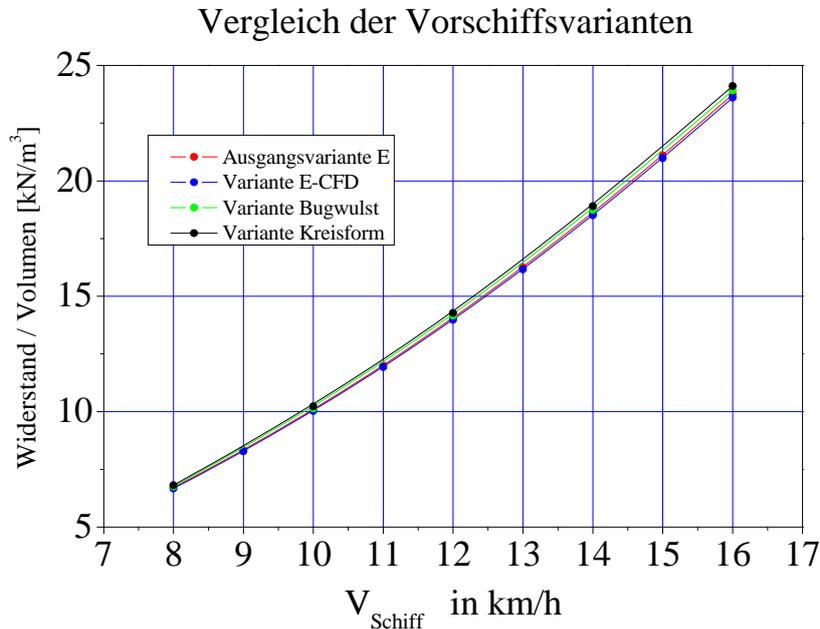


Abb. 68: Vergleich der Vorschiffsvarianten

Ein Vergleich der integralen Größe Widerstand bezogen auf die Verdrängung des Schiffkörpers (Abb. 68) zeigt nur geringe Unterschiede durch die unterschiedliche Formgebung des Vorschiffes. Leichte Verbesserungen des verdrängungsbezogenen Widerstandes sind bei der Variante E-CFD zu erkennen. Hierbei muss erwähnt werden, dass sich die Änderungen im Vorschiff im Wesentlichen auf den Wellenwiderstand des Schiffes auswirken. Dieser wurde bei den durchgeführten Berechnungen nicht ermittelt, da die Wasseroberfläche als reibungsfreie Ebene definiert wurde, die den Tiefgang im Ruhezustand des Schiffes wiedergibt.

Für die weiteren Vergleiche mit einer für Binnenschiffe typischen getunnelten Hinterschiffsform (Abb. 40) wurde die CFD-optimierte Variante E-CFD ausgewählt, da sie auf Basis der CFD-Methoden die besten Ergebnisse lieferte. Getunnelte Hinterschiffe werden in der Binnenschifffahrt häufig eingesetzt, da sie unter anderem die Einsatzfähigkeit des Schiffes auch bei extremen Flachwasserbedingungen erhöhen können. Durch diese Maßnahme wird die Wahrscheinlichkeit des Lufteinbruches zum Propeller verringert. Ein Nachteil dieser Hinterschiffsform ist jedoch die Entstehung von Wirbeln an den Tunnelkanten, die sich ungünstig auf die Strömungsverhältnisse auswirken können. Zum Vergleich mit der getunnelten Hinterschiffsform (Variante E2) wurden an der Variante E-CFD Tunnelbleche angebracht und ebenfalls numerisch untersucht. Die Abbildungen 69 bis 71 zeigen die durch die Fahrtgeschwindigkeit normierten Geschwindigkeitsfelder in der Propellerebene für alle 3 Varianten. Ein Vergleich der Strömungsverhältnisse in der Propellerebene dokumentiert für alle drei Varianten die Vor bzw. Nachteile.

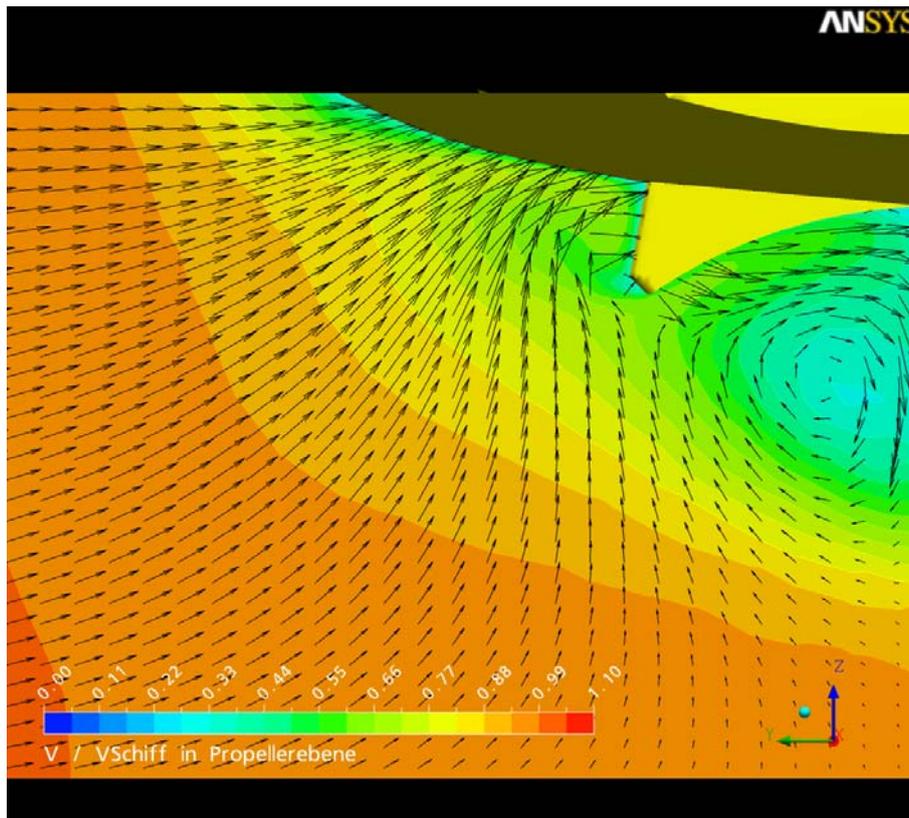


Abb. 69: Geschwindigkeitsfeld in Propellerebene Variante E2-CFD

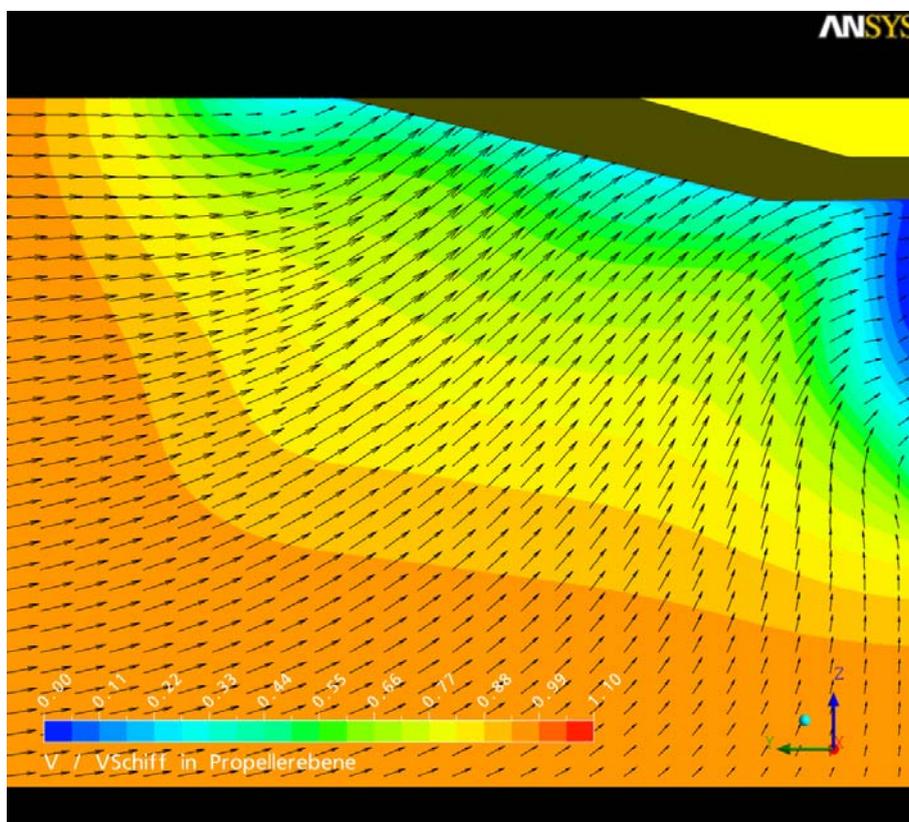


Abb. 70: Geschwindigkeitsfeld in Propellerebene Variante E-CFD

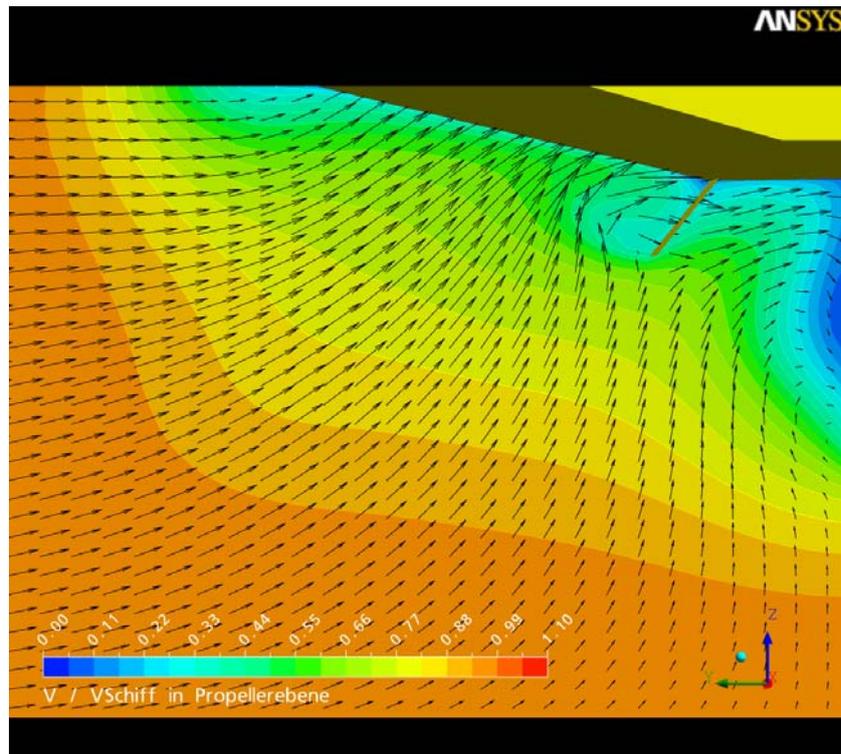


Abb. 71: Geschwindigkeitsfeld in Propellerebene Variante E-CFD mit Blech

Bei der Variante E-CFD (Abb. 70) und E-CFD mit Blech (Abb. 71) hat sich ein Totwassergebiet hinter dem Steven ausgebildet, welches die Zuströmung negativ beeinflussen kann. Zusätzlich werden durch die Installation des Bleches (Abb. 71) wie erwartet Wirbel erzeugt, die ebenfalls die Inhomogenität der Propelleranströmung verstärken. Das Tunnelhinterschiff (Abb. 69) zeigt in der Propellerebene keine Totwassergebiete, diese bilden sich erst weiter hinten am Tunnelspiegel aus. Nachteile dieser Hinterschiffsform können sich aus dem starken Drall der Zuströmung ergeben. Die Abbildung 72 gibt Aufschluss über mögliche Ablösegebiete am Hinterschiff der Variante E2-CFD, die durch geringe Wandschubspannungen (blau) und Rückstromgebiete (orange) definiert sind.

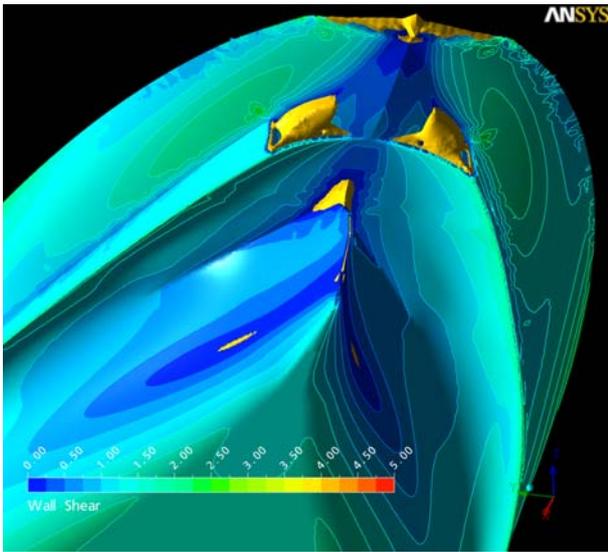


Abb. 72: Ablösegebiete – Version E2

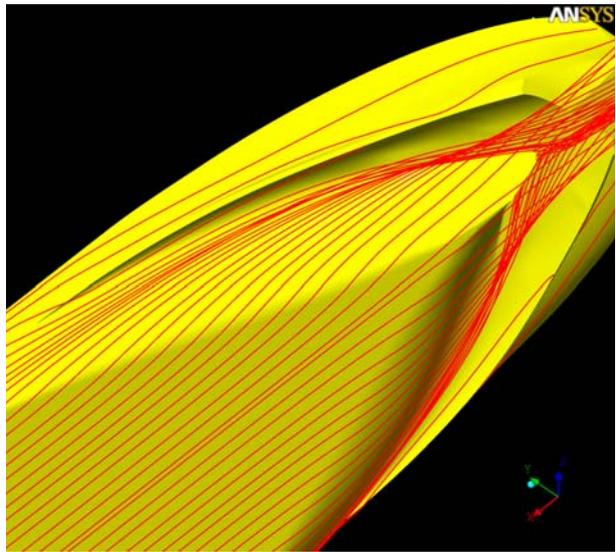


Abb. 73: Stromlinien – Version E2-CFD

Die Stromlinien am Hinterschiff der Variante E2-CFD (Abb. 73) deuten darauf hin, dass sich schon bei halber Tunnellänge ein Wirbel ausbildet, der durch die Mischung des vom Schiffsboden kommenden Wassers mit dem seitlich in den Tunnel strömenden Wasser induziert wird.

Vergleich der optimierten Hinterschiffsvarianten

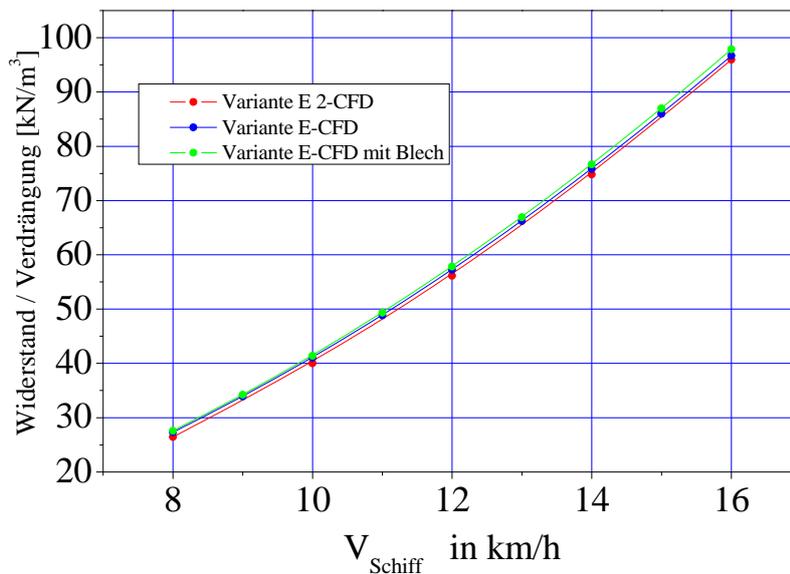


Abb. 74: Vergleich der Hinterschiffsvarianten

Ein Vergleich der Widerstandskurven der drei Hinterschiffsvarianten zeigt nur geringe Unterschiede. Als Ergebnis des numerischen Widerstandsversuches wird der geringste

Leistungsbedarf von der getunnelten Hinterschiffsform Variante E2-CFD erwartet. Jedoch ist es notwendig, die Ergebnisse der Berechnungen der drei CFD-optimierten Varianten mit Propulsionsversuchen zu validieren, da die Unterschiede sehr gering ausfallen und durch die Wechselwirkung Propeller-Schiff ein weiterer Einfluss auf den Leistungsbedarf des Schiffes zu erwarten ist. Dieser Einfluss kann bei Berechnungen ohne Propellermodell nicht ermittelt werden.

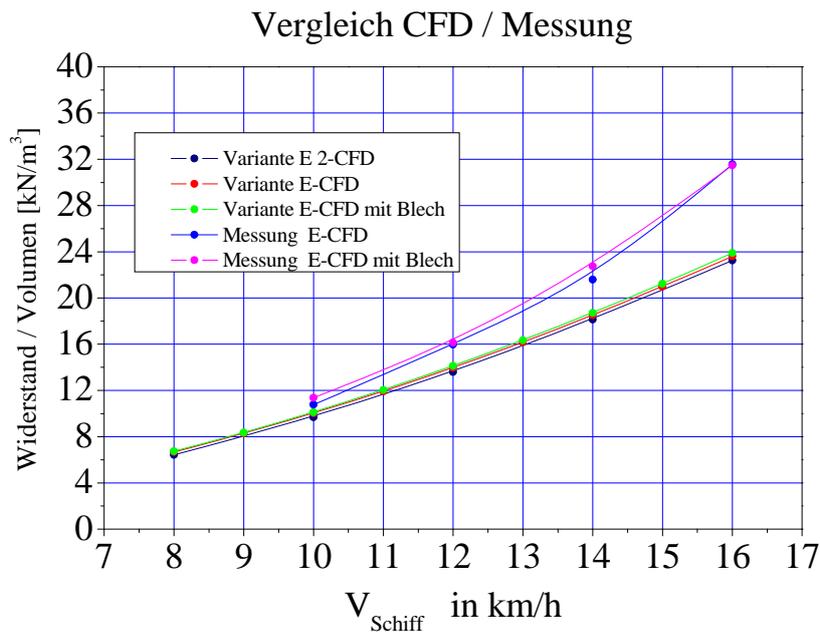


Abb. 75: Vergleich Rechnung / Messung

Die berechneten integralen Kraftgrößen wurden mit den Ergebnissen der experimentellen Widerstandsversuche verglichen und in Abbildung 75 grafisch dargestellt. Es kann festgestellt werden, dass die berechneten Kraftgrößen im Geschwindigkeitsbereich ab 12 km/h zu gering berechnet werden, da Trimm und Absenkung und die Verformung der Wasseroberfläche bei den durchgeführten numerischen Untersuchungen keine Berücksichtigung fanden.

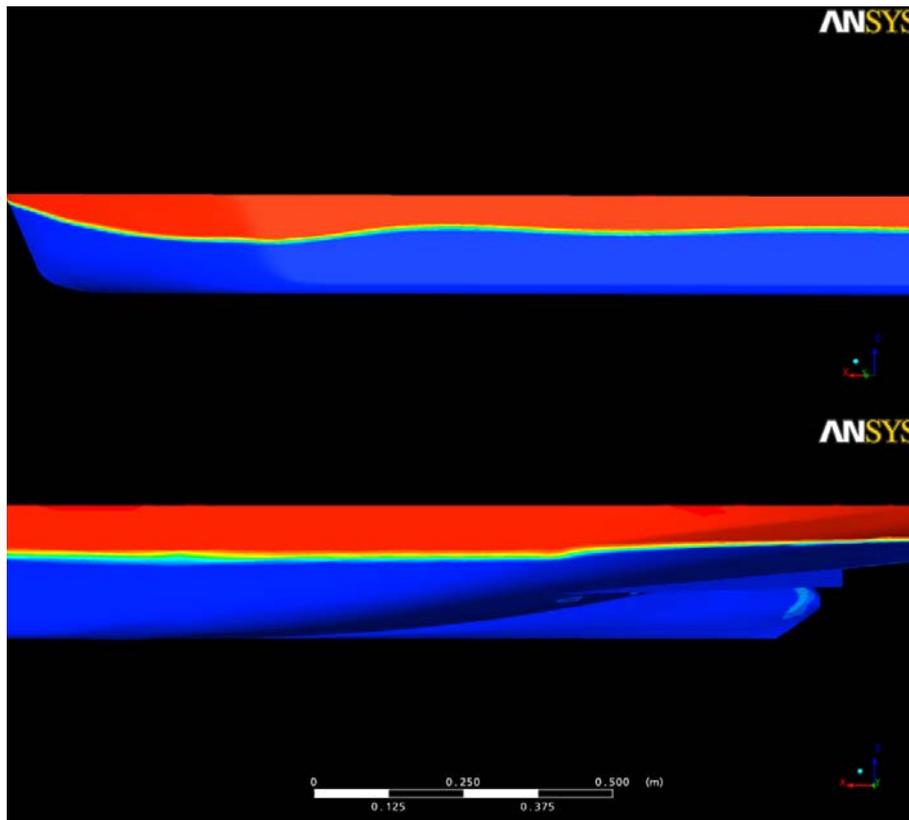


Abb. 76: Verformung der Wasseroberfläche Version E-CFD mit Blech

Die Berechnung der Verformung der Wasseroberfläche ist mit den angewandten Methoden zu zeitaufwendig, um einen effizienten Optimierungsprozess zu ermöglichen. Um Konvergenzprobleme zu vermeiden, werden insbesondere für die 2-Phasenberechnungen hohe Ansprüche an die Gitterqualität gestellt. Für die Version E-CFD wurden beispielhaft Berechnungen der durch das Schiff induzierten Verformung der Wasserlinie in Abbildung 76 für das Vorschiff (oben) bzw. das Heck (unten) dargestellt.

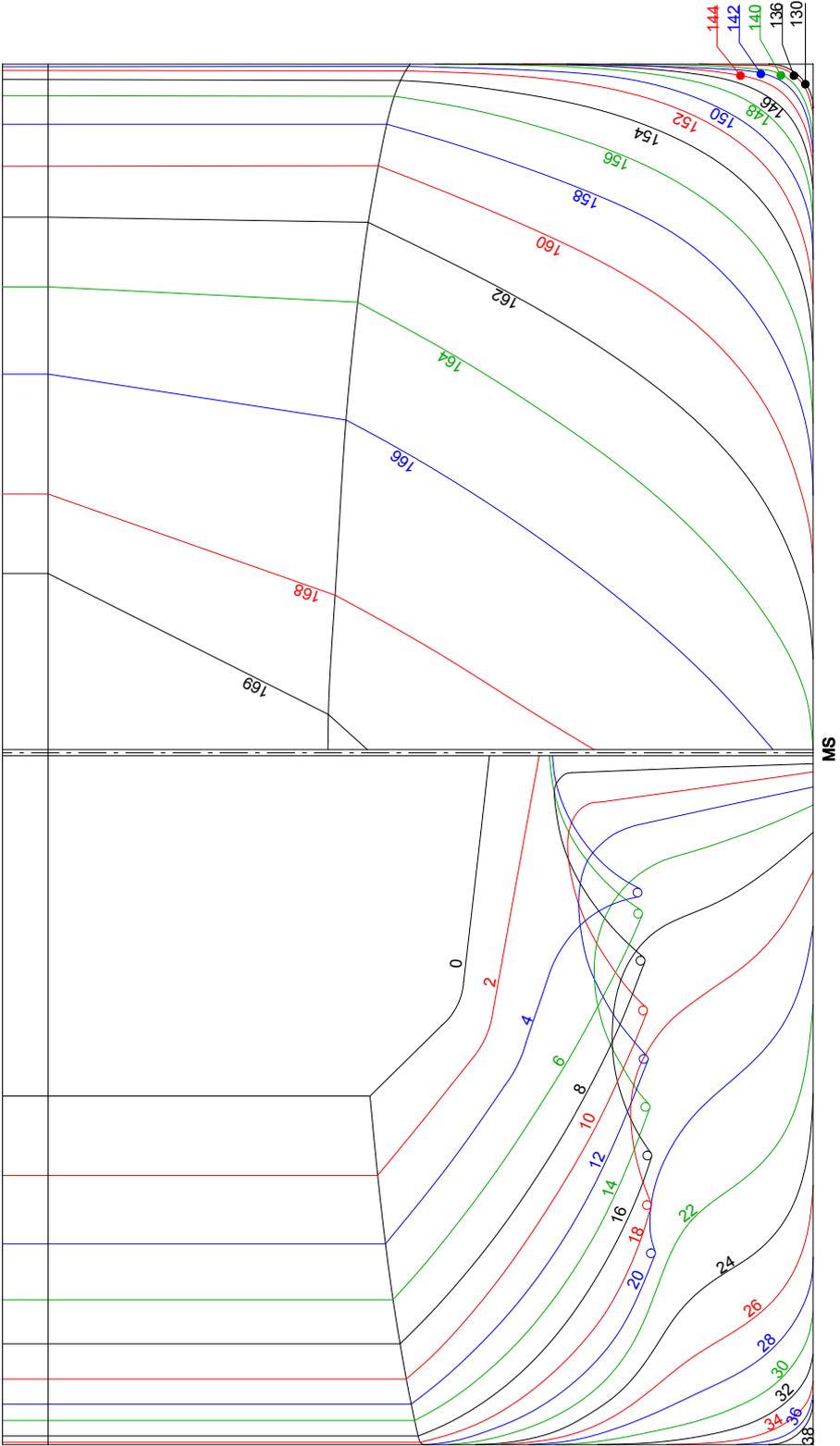
8.4 Zusammenfassung

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass durch die Anwendung geeigneter CFD-Verfahren der Optimierungsprozess im Schiffsentwurf wesentlich beschleunigt werden kann. Die Auswirkung von Formvarianten und lokalen Veränderungen der Schiffsgeometrie auf den Widerstand und das Strömungsfeld in der Nähe des Schiffes können schon im Vorfeld der Modellversuche qualitativ abgeschätzt werden. Im Entwurfsprozess stehen dem Schiffsentwickler zur hydrodynamischen Optimierung weitere Möglichkeiten der Detaildarstellung des gesamten Strömungsgebietes zur Verfügung, insbesondere das interaktive Postprocessing an der Workstation zur Darstellung der Ergebnisse liefert eine Vielzahl von Informationen, die zum besseren Verständnis der komplexen Strömungsverhältnisse beitragen. Die Auswertung der integralen Größen (Widerstand) machte deutlich, dass gerade bei Problemstellungen unter Flachwasserbedingungen, die dynamische Schwimmlagenveränderung des Schiffes nicht vernachlässigt werden kann. Die CFD-Methoden müssen hinsichtlich der Realisierung von Trimm und Absenkung erweitert werden. Für die Beurteilung der Güte eines Schiffsentwurfes sind die qualitativen Informationen ein immer wichtiger werdendes Hilfsmittel.

Anlagen

Anhang A	Modelldaten und Versuchsanordnungen
Anhang B	Ergebnisse der Widerstandsversuche
Anhang C	Ergebnisse der Propulsionsversuche
Anhang D	Ergebnisse der Stoppversuche
Anhang E	Wellenmessungen
Anhang F	Bodendruckmessungen
Anhang G	Strömungsmessungen
Anhang H	Fotodokumentation

SPANTENRISS

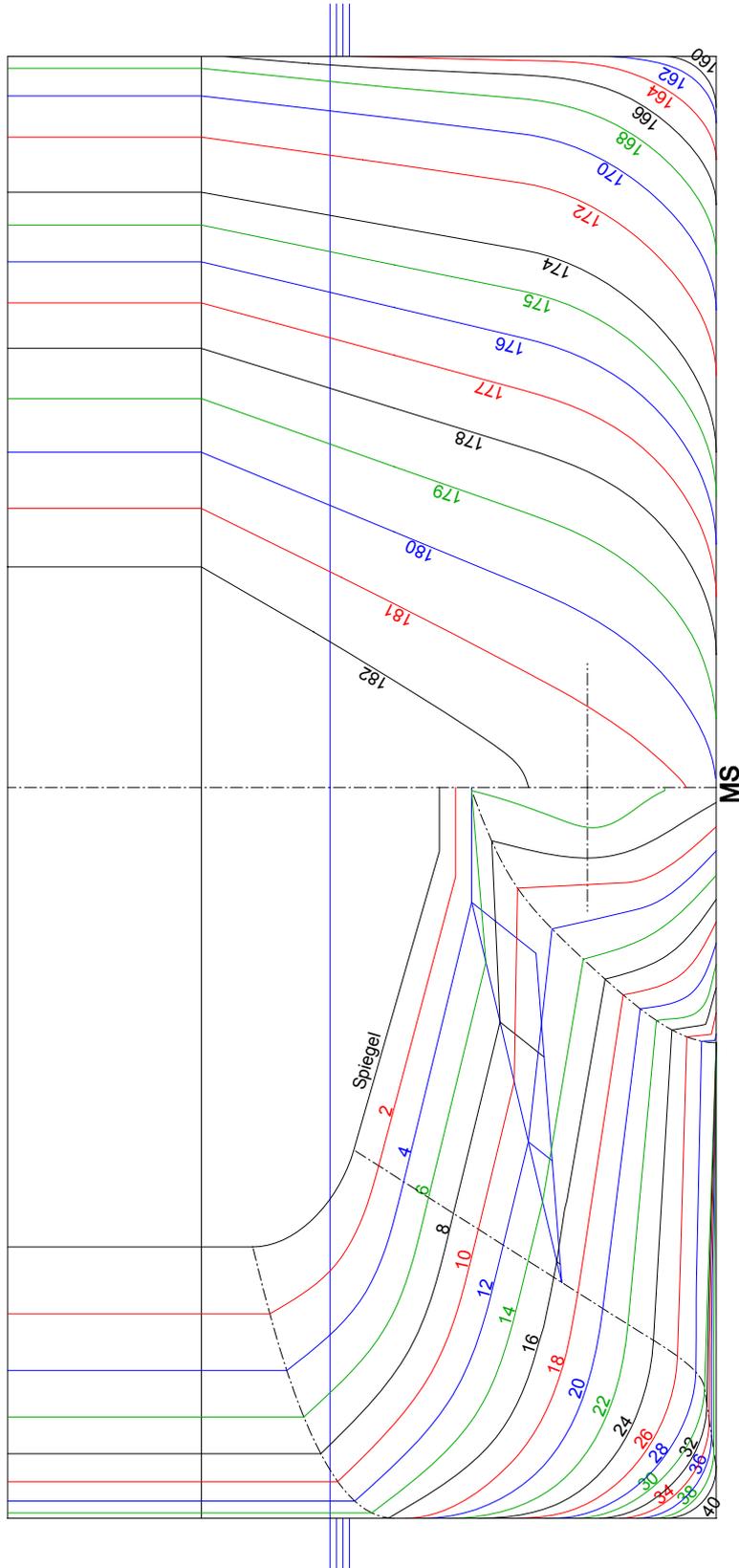


M 1767

Lambda = 16

- L_{ua} = 5375,0 mm
- B = 590,6 mm
- T = 143,8 mm
- Spt.-Abst. = 31,25 mm





Modell M1773

Scale 1 : 16.0

Länge Lpp = 6825.0 mm

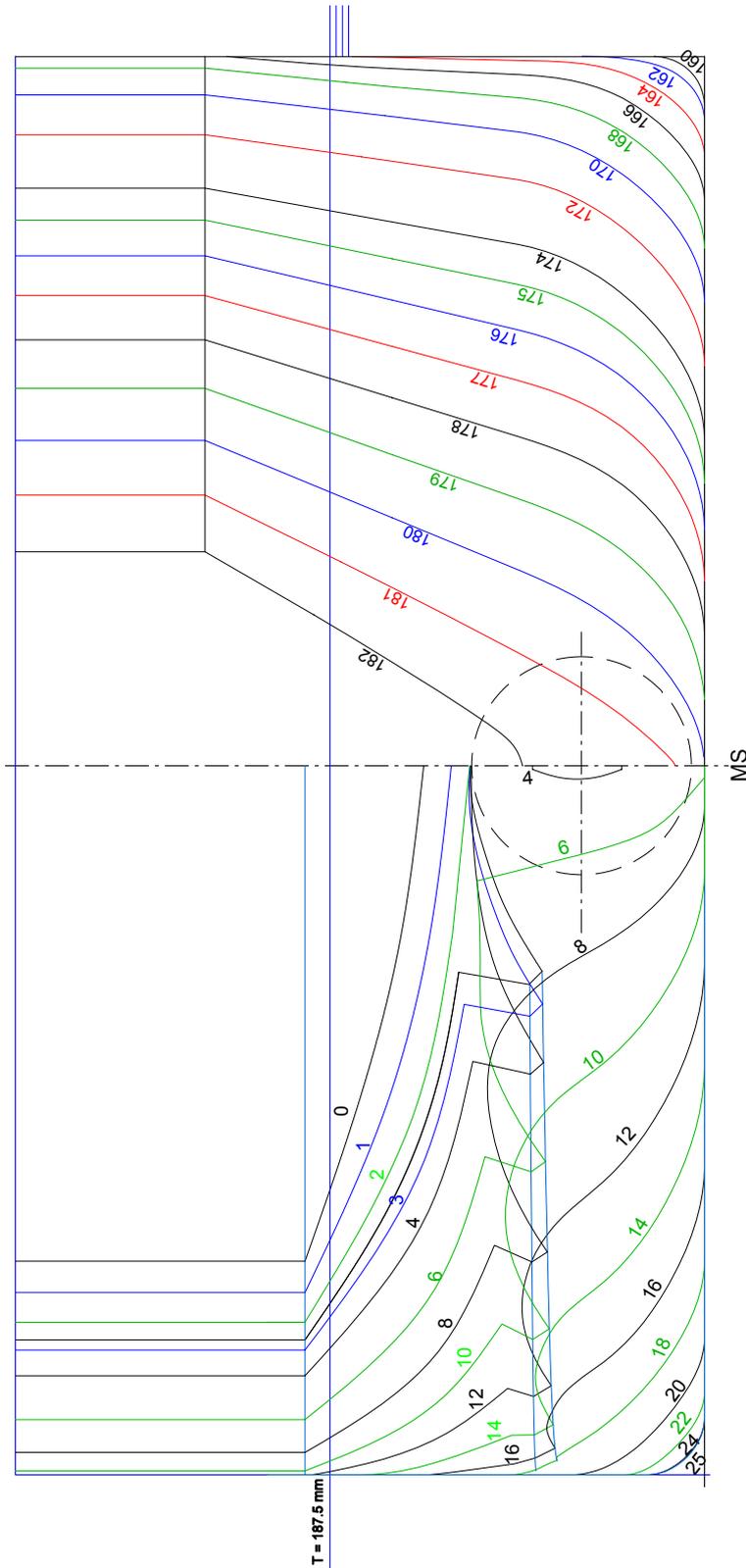
Breite = 715.63 mm

Spantabstand = 37.5 mm

TIEFGANG = 187.5 mm



Innovative Lösungen für
Binnen- und Küstenschifffahrt
DST, 2005 RÜCK



Modell M1804 (VS M1773)

Lambda = 16

$L_{ua} = 6882,0 \text{ mm}$

$L_{MS} = 2025,0 \text{ mm}$ (von Spt. 0 bis Trenntuge)

$B = 715,63 \text{ mm}$

$T = 187,5 \text{ mm}$

VS-Spt.-Abst. = 37,5 mm

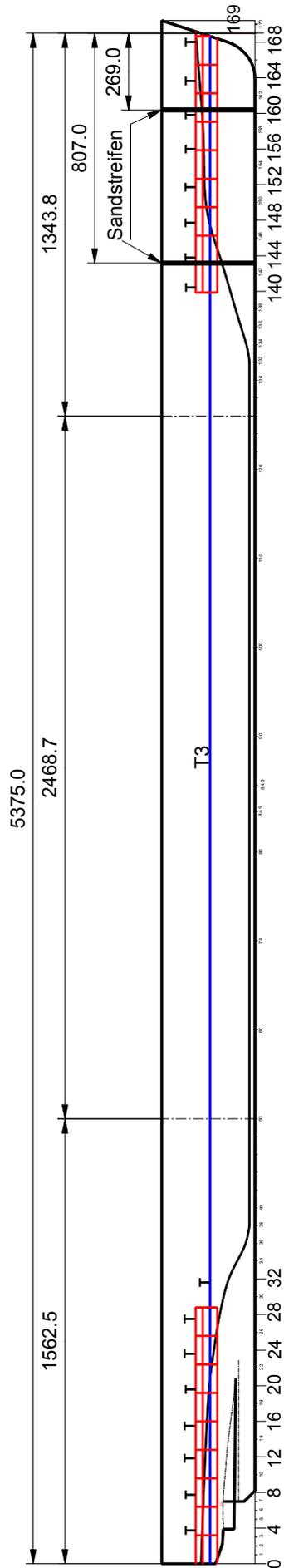
HS-Spt.-Abst. = 62,5 mm



Innovative Lösungen für
Binnen- und Küstenschifffahrt

DST, 2005 RÜCK

ANRISSPLAN



M1767

Lambda = 16

$L_{HS} = 1562,5$ mm

$L_{MS} = 2468,7$ mm

$L_{VS} = 1343,8$ mm

$L_{\text{üa}} = 5375,0$ mm bis Spt. 169

$B = 590,6$ mm

$T = 106,25$ mm

$T = 125,00$ mm

$T = 156,25$ mm

$T = 212,50$ mm

Spantabstand = 31,25 mm

Tubulenzерzeuger

Art : Sandstreifen

Lage : siehe Zchnng.

Fotonetz

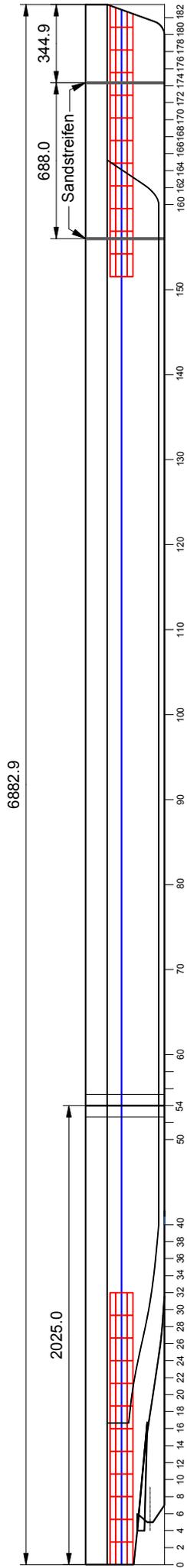
Höhenabstand dZ = 3x25 mm

Längenabstand dX = 9x100 mm



A. 2386
DST. 16.08.06

SKIZZE : WL - ANRISSPLAN FÜR M1773



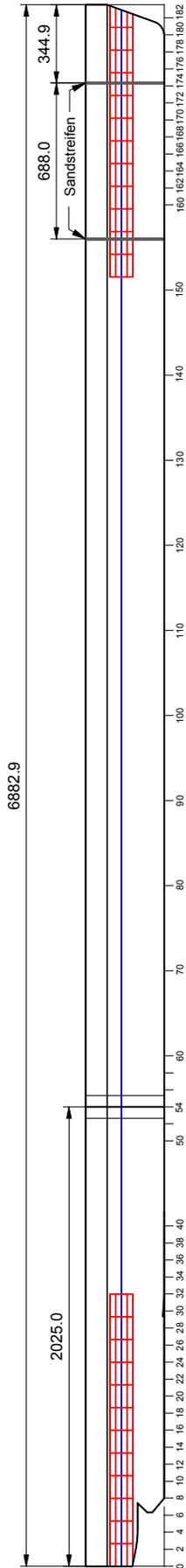
Modell M1773

Tubulenzröhrchen
Art : Sandstreifen
Lage : siehe Zeichnung.
WL-Abst. = 4 x 25.0 mm
Fotonetz = 12 x 100 mm

Gesamt-Länge = 6825.0 mm von Spt. 0 bis 182
Länge Hinterschiff = 2025.0 mm
Breite = 715.63 mm
Tiefgang = 187.5 mm
Spantabstand = 37.5 mm
M 1 : 16.0



ANRISSPLAN



Turbulenzgeber

Art : Sandstreifen

Lage : Siehe Skizze

Fotonez an Bug und Heck

Höhenabst. dZ = 4x25 mm

Längenabst. dX = 12x100 mm

Modell M1804 (VS M1773)

Lambda = 16

$L_{\text{ia}} = 6882,0 \text{ mm}$

$L_{\text{ris}} = 2025,0 \text{ mm}$

$B = 715,63 \text{ mm}$

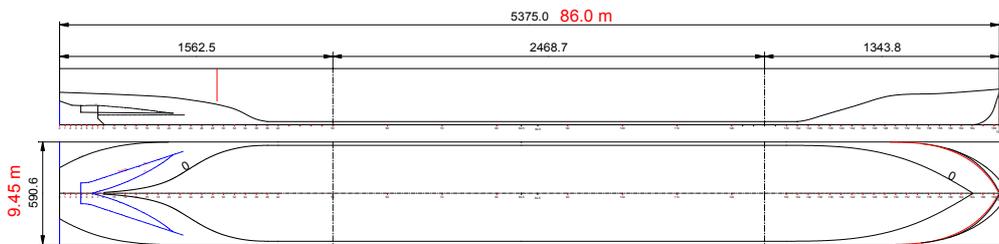
$T = 187,5 \text{ mm}$

Spt.-Abst. = 37,5 mm

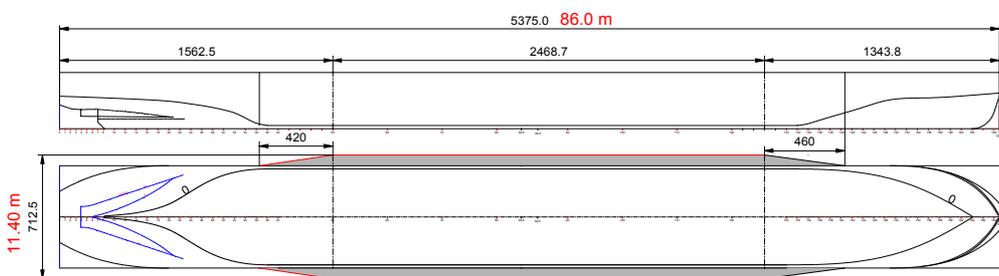


Modellvarianten M1767

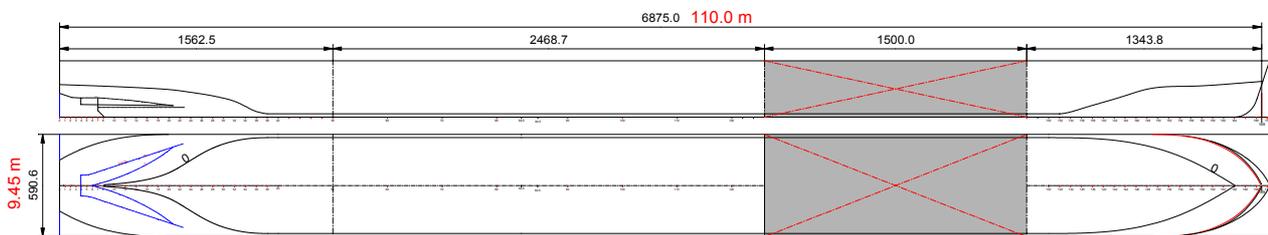
Teil 1



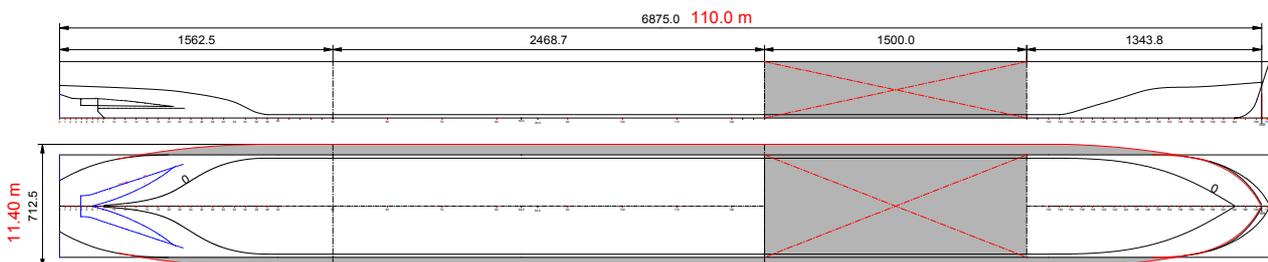
Teil 2



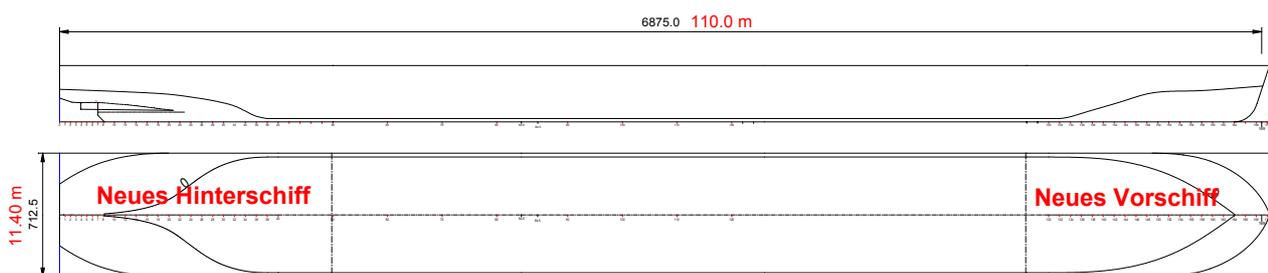
Teil 3



Teil 4



Teil 5



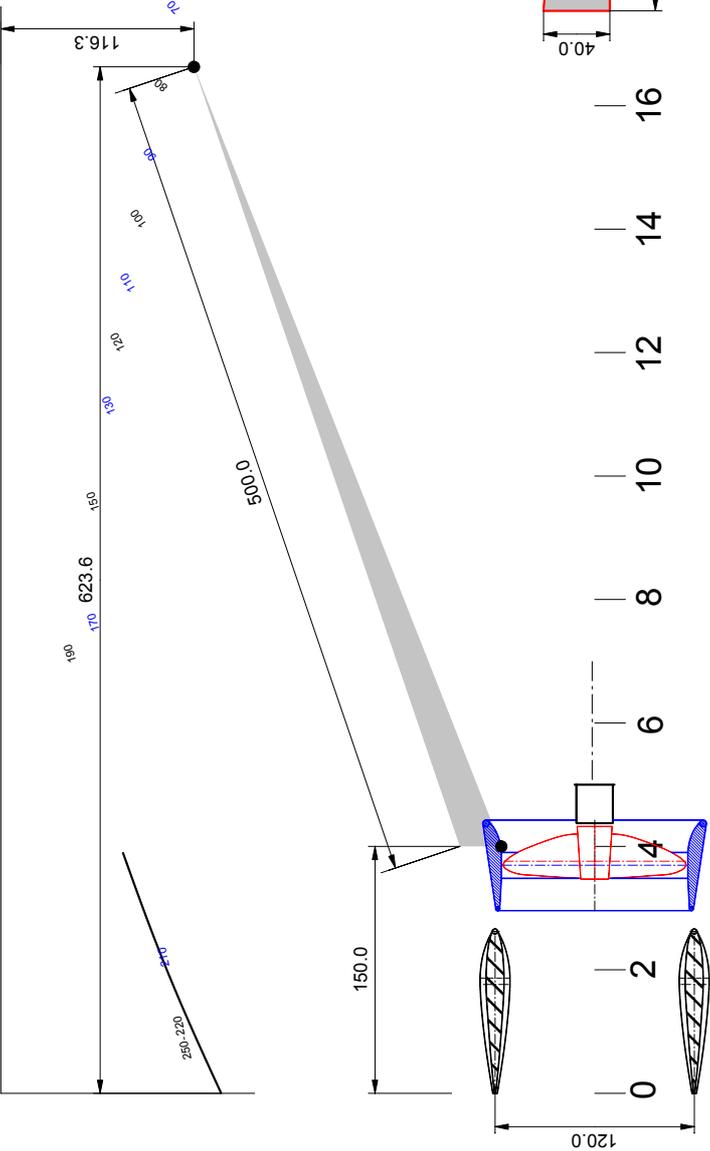
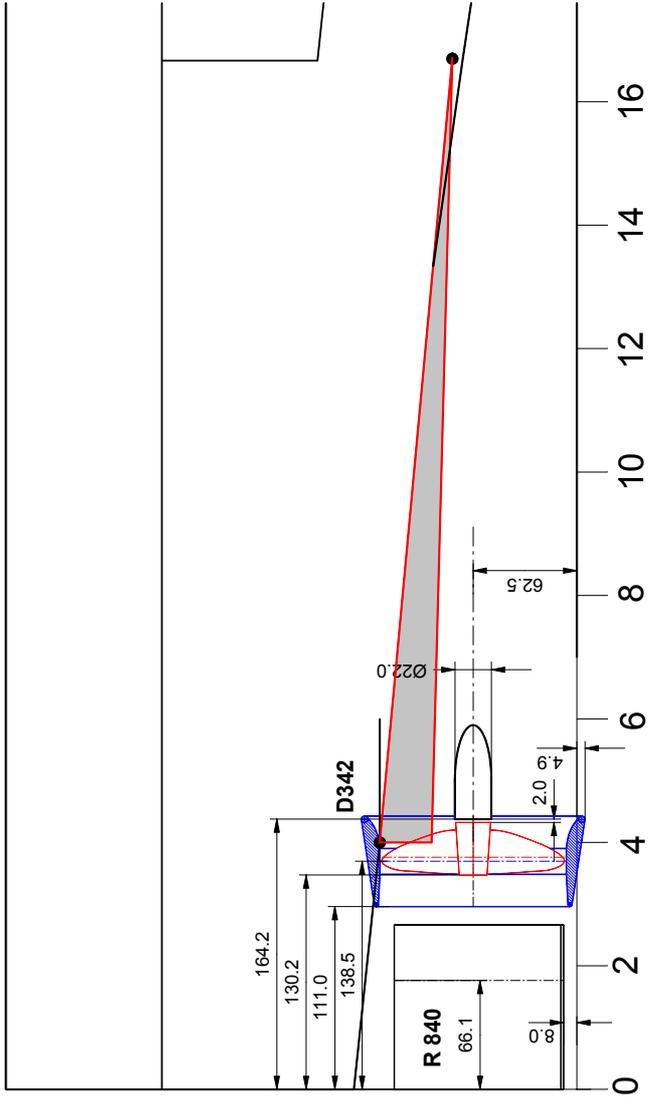
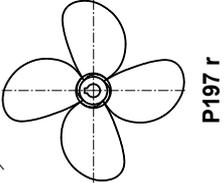
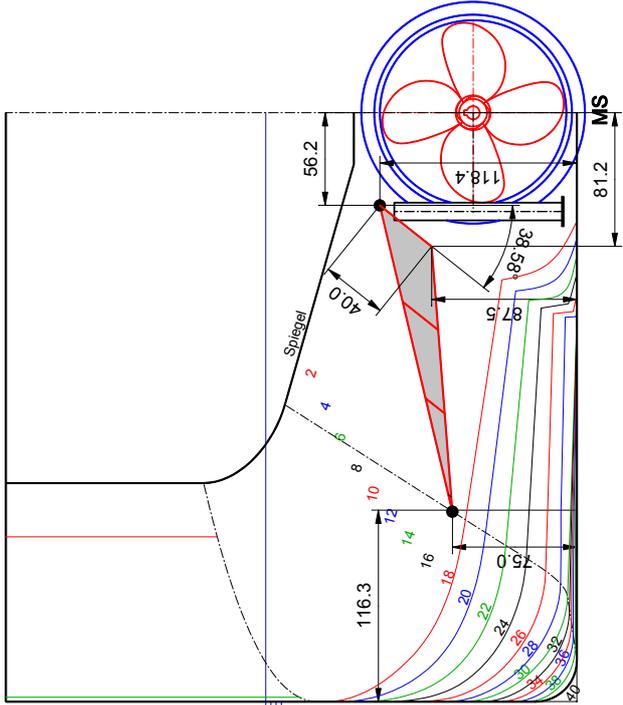
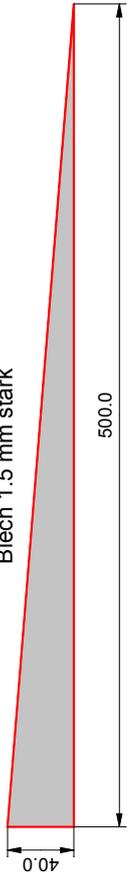


Innovative Lösungen für
Binnen- und Küstenschifffahrt
DST, 2005 RÜCK

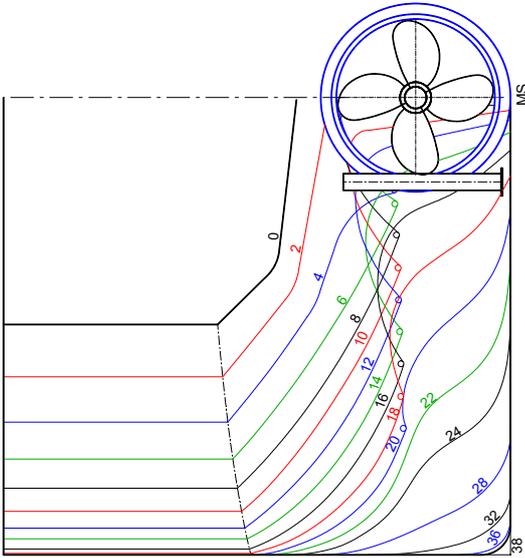
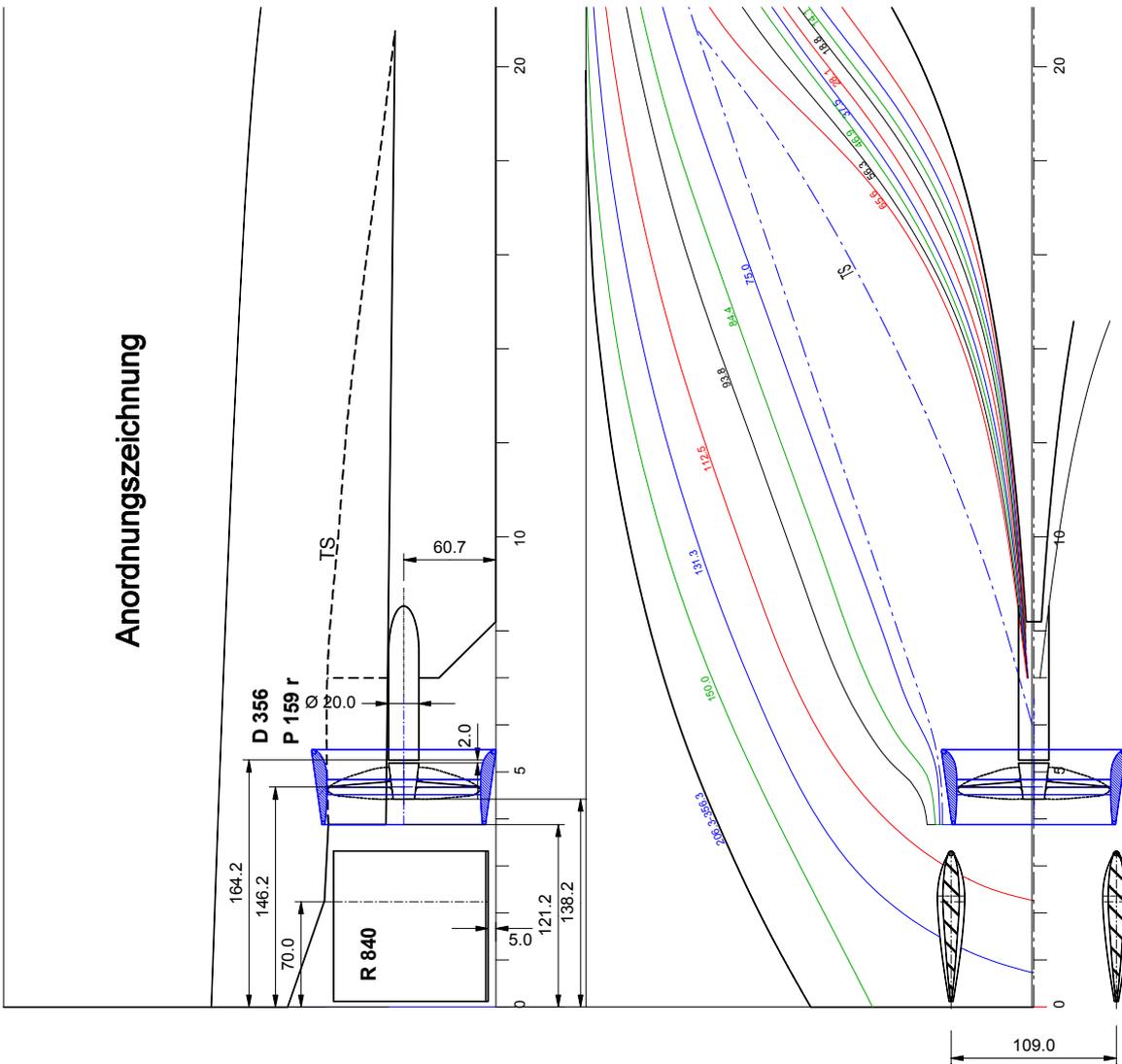
**Anordnungszeichnung
Modell M1773**

Scale 1 : 16.0
 Länge Lpp = 6825.0 mm
 Breite = 715.63 mm
 Spantabstand = 37.5 mm
 TIEFGANG = 187.5 mm

Blech 1.5 mm stark



Anordnungszeichnung



M 1767

Lambda = 16

$L_{ua} = 5375,0 \text{ mm}$

B = 590,6 mm

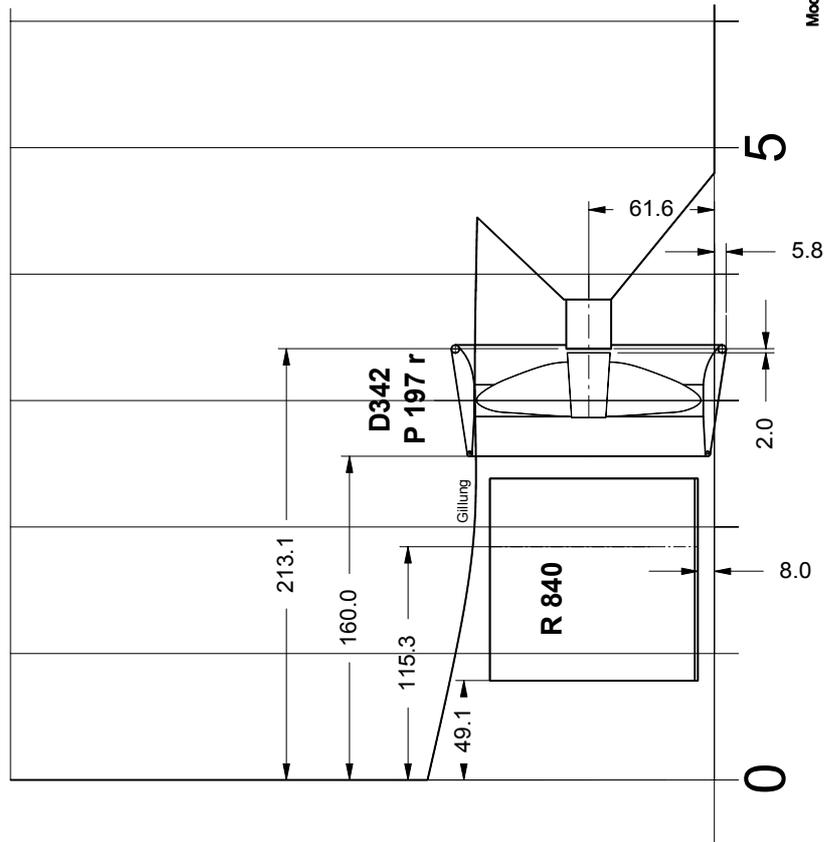
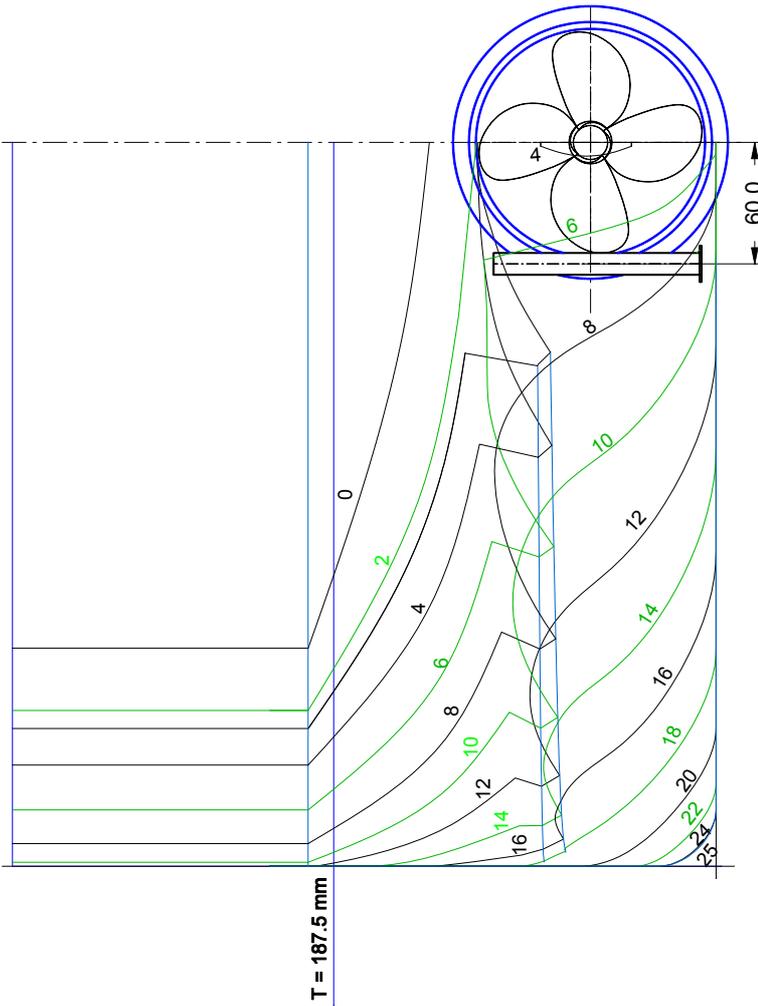
T = 143,8 mm

Spt.-Abst. = 31,25 mm



A. 2386
DST 11/04/06

Anordnungszeichnung



Modell M1804 (VS M1773)

Lambda = 16

$L_{\text{ia}} = 6882,0 \text{ mm}$

$L_{\text{HS}} = 2025,0 \text{ mm}$ (von Spt. 0 bis Trennfuge)

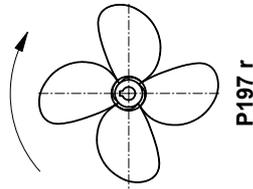
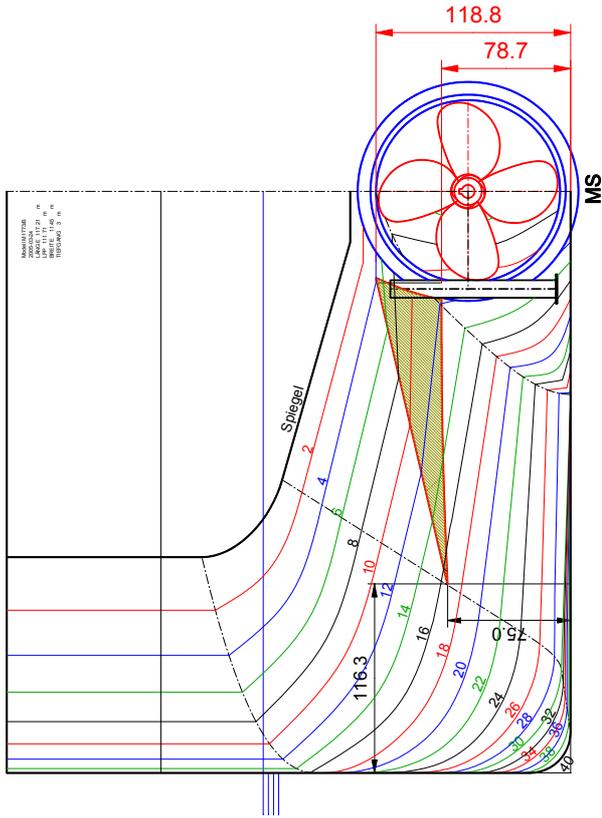
$B = 715,63 \text{ mm}$

$T = 187,5 \text{ mm}$

VS-Spt.-Abst. = 37,5 mm

HS-Spt.-Abst. = 62,5 mm





Anordnungszeichnung

Modell M1773

Lambda 1 : 16.0

Länge Lpp = 6825.0 mm

Breite = 715.63 mm

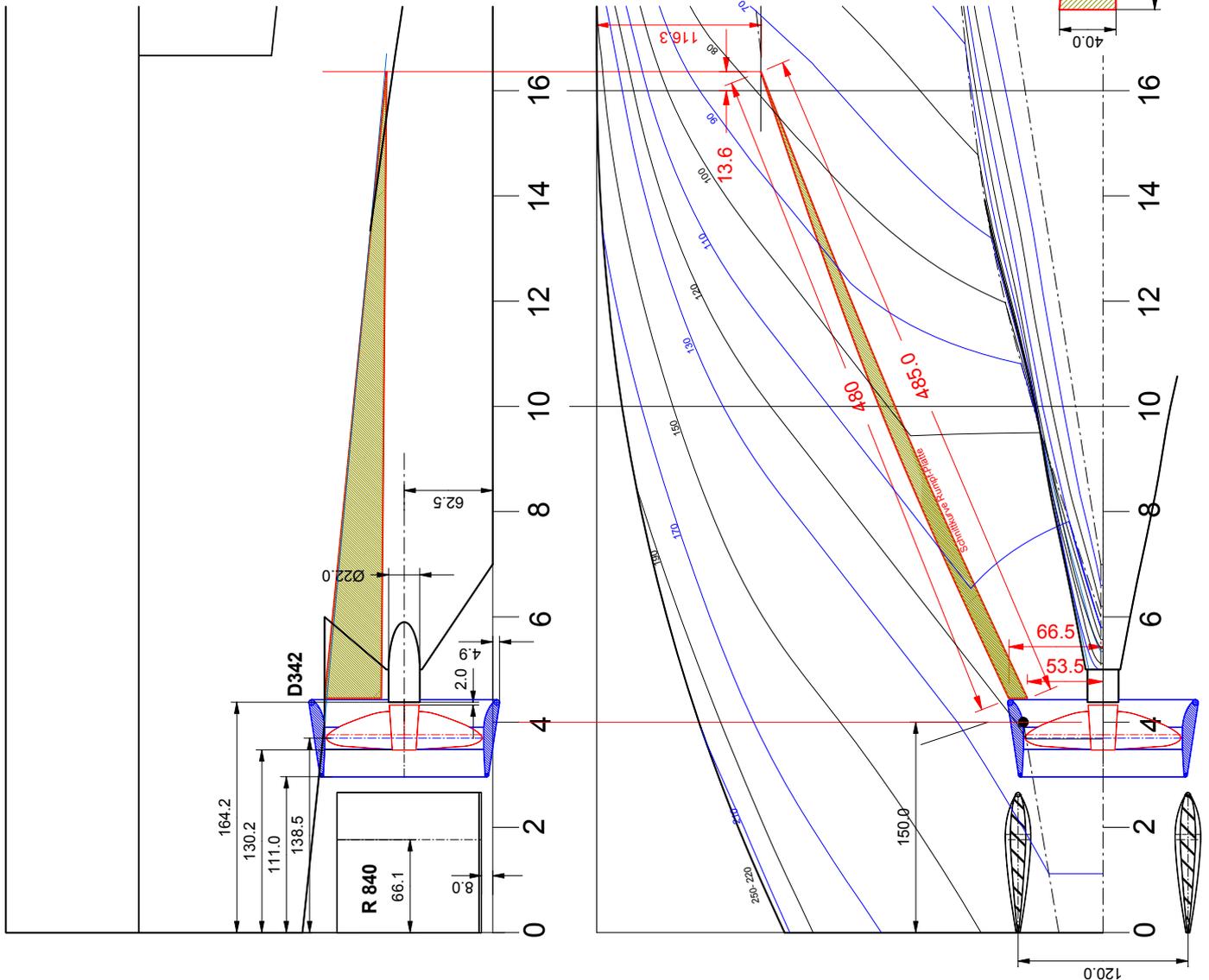
Spantabstand = 37.5 mm

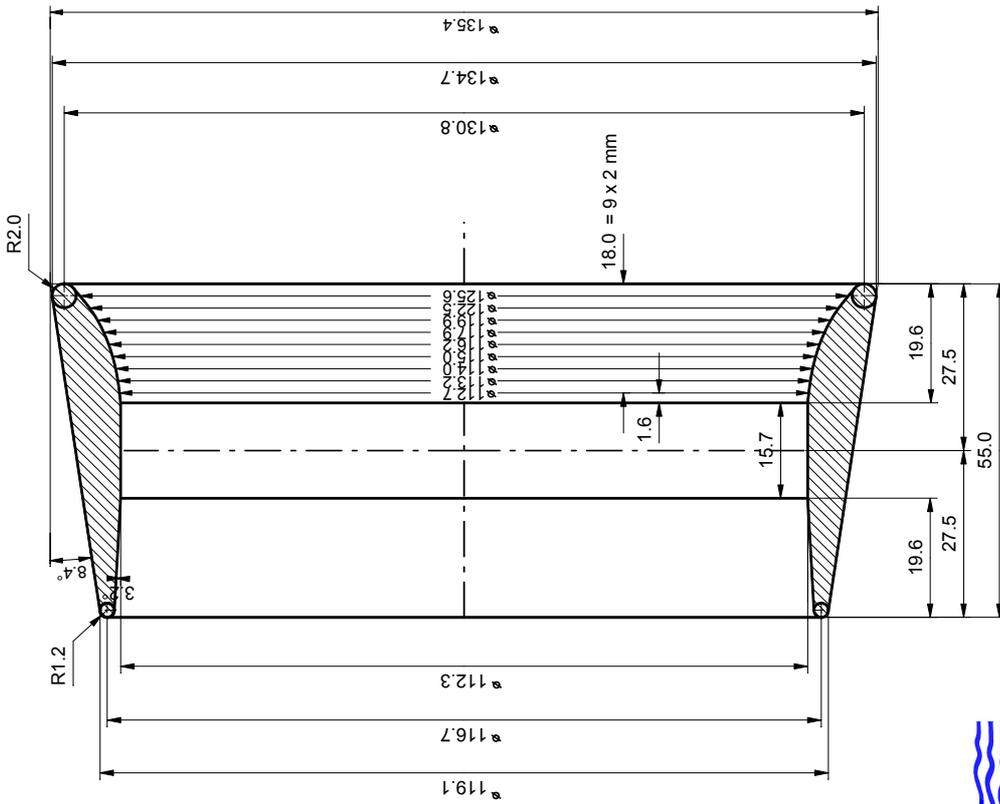
TIEFGANG = 187.5 mm

Blech 1.5 mm stark
abgewickelt



DST: 23.09.05



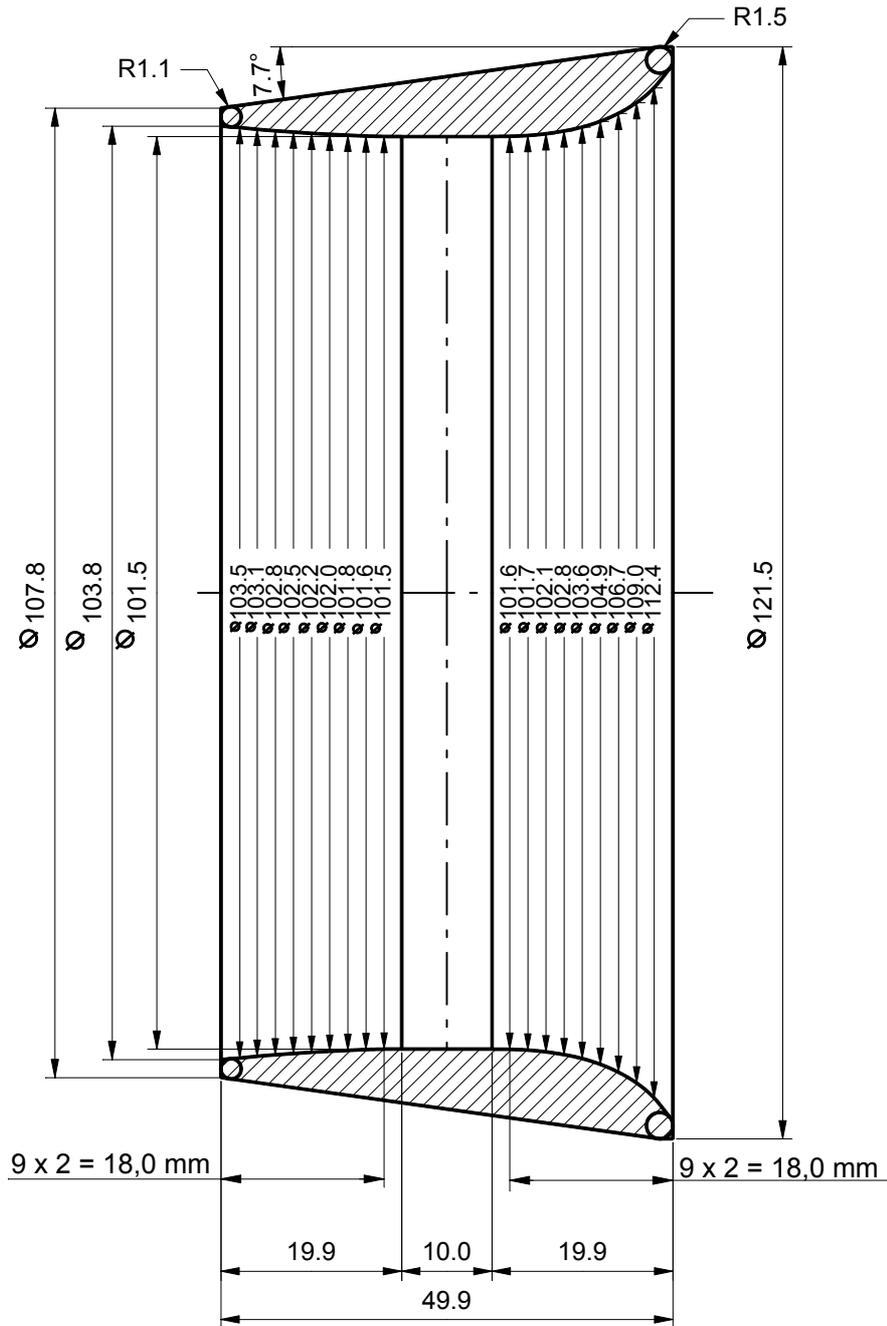


D 342



Innovative Lösungen für
Binnen- und Küstenschifffahrt

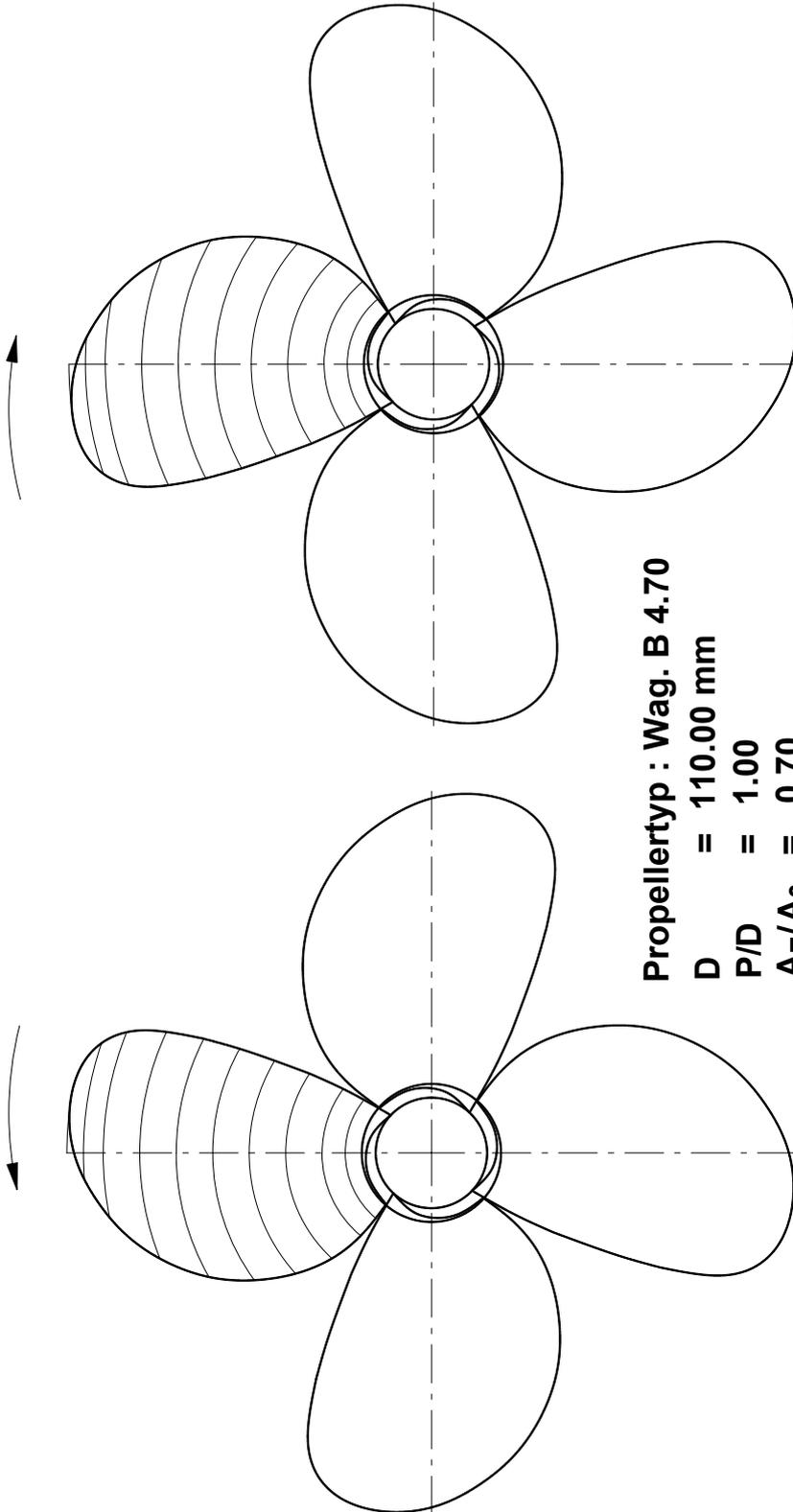
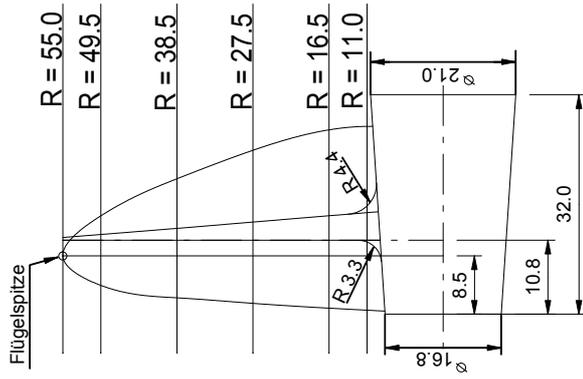
DST, 2005 RÜCK



D 356
1 Düse für M1767

2 Düsen für M1710





Propellertyp : Wag. B 4.70

D = 110.00 mm

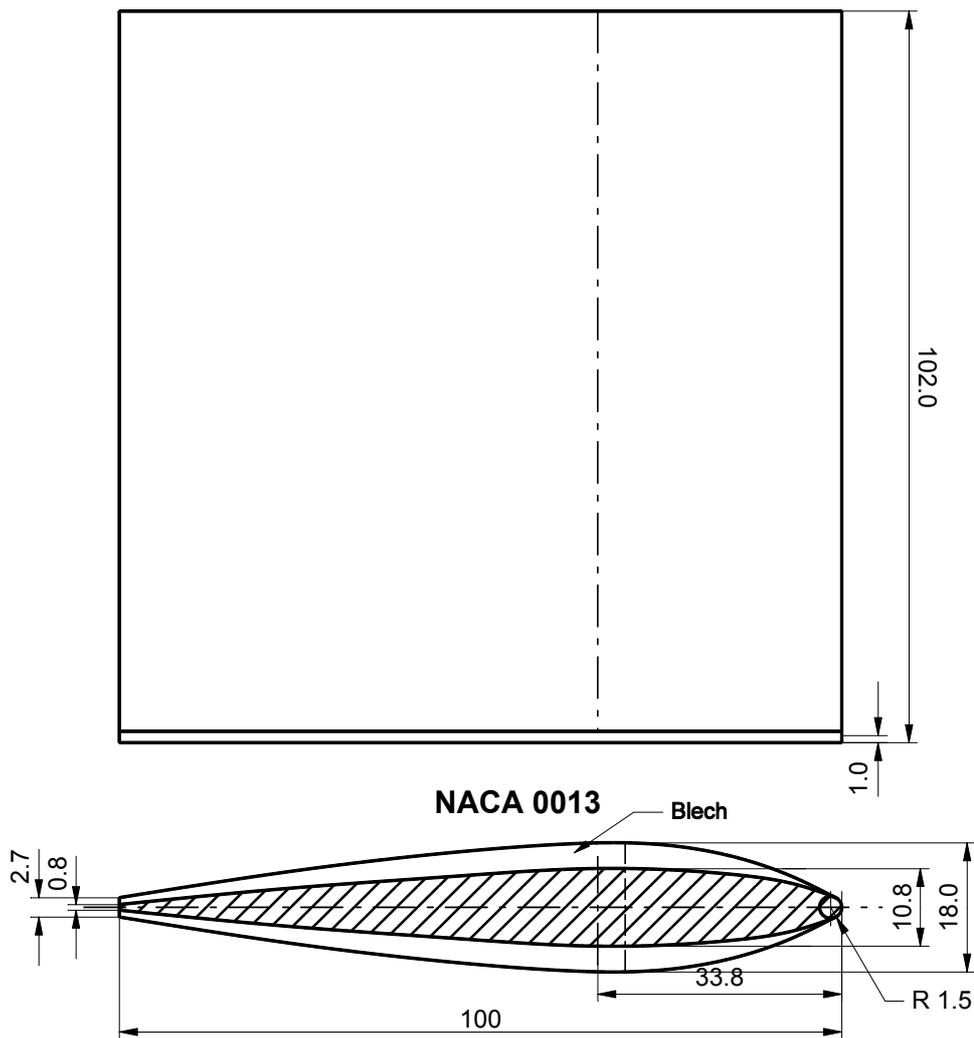
P/D = 1.00

$A_E/A_0 = 0.70$

Z = 4

$C'_{0,70R} = 41.28$ mm

P 197 r,l



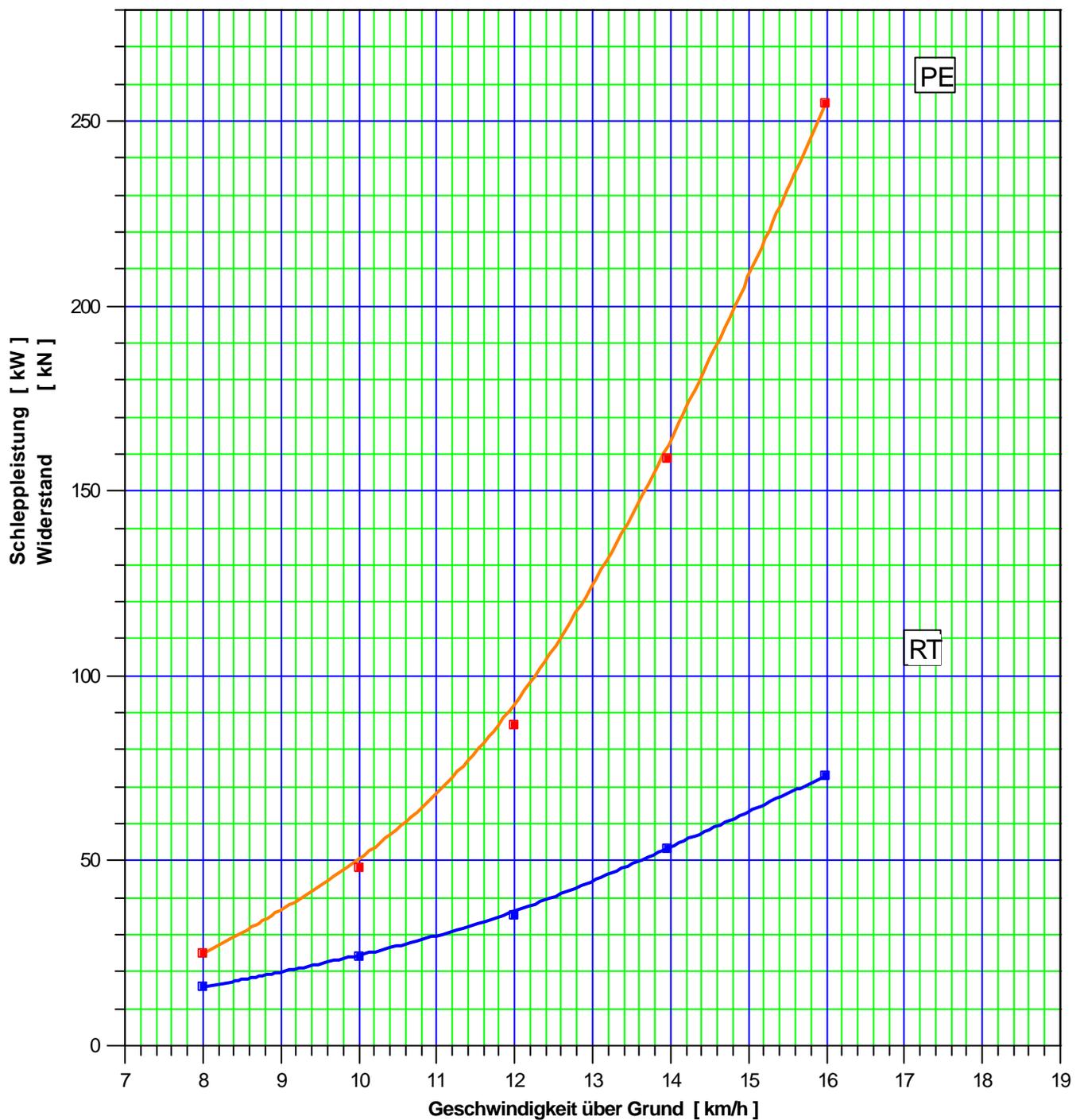
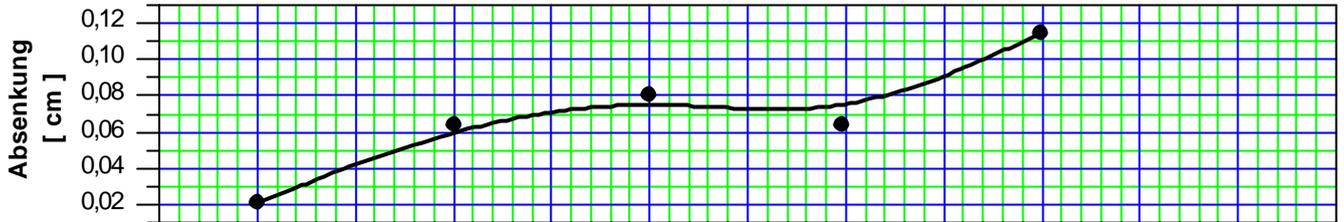
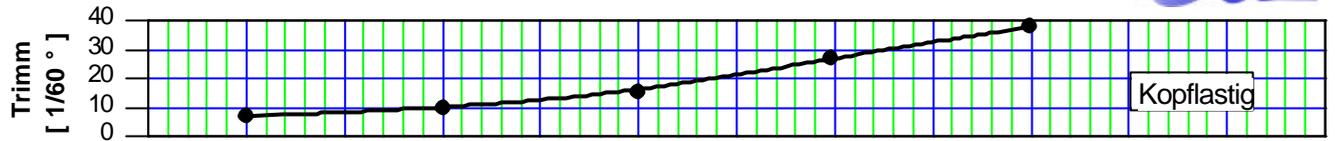
R840
2 Ruder für M1804



WIDERSTAND

h = 5 m; T = 2.5 m

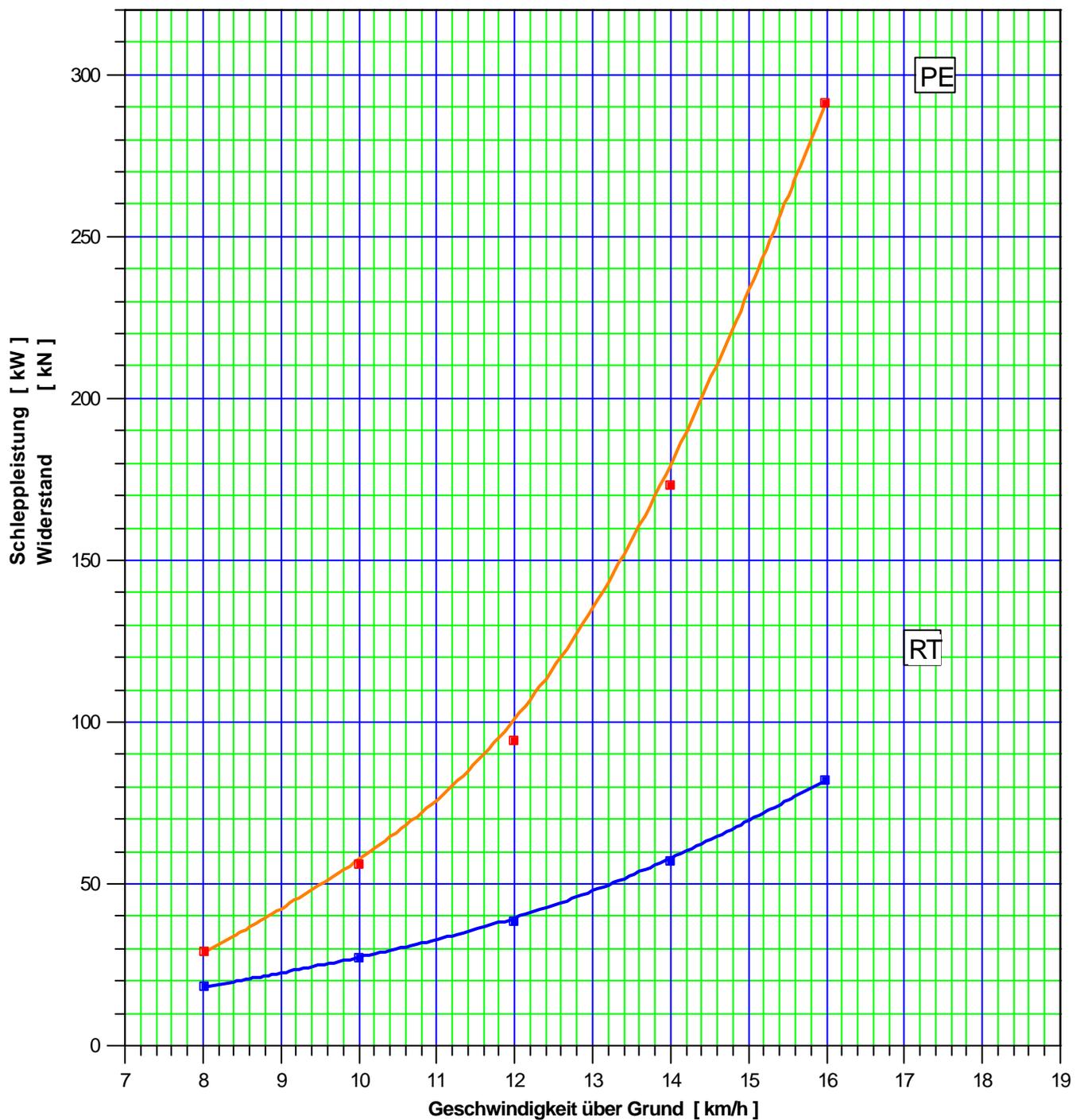
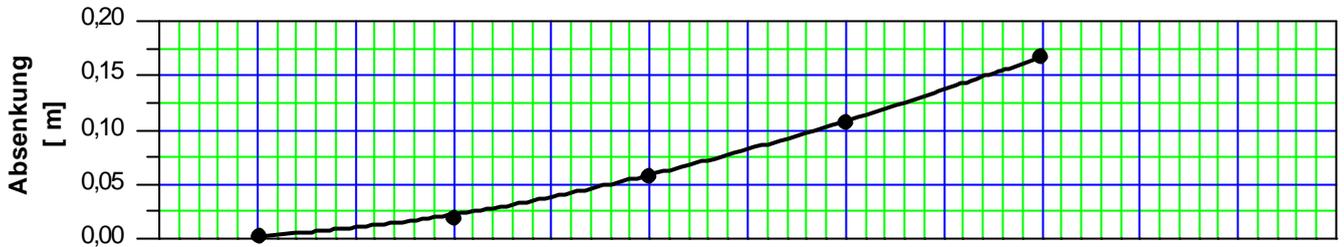
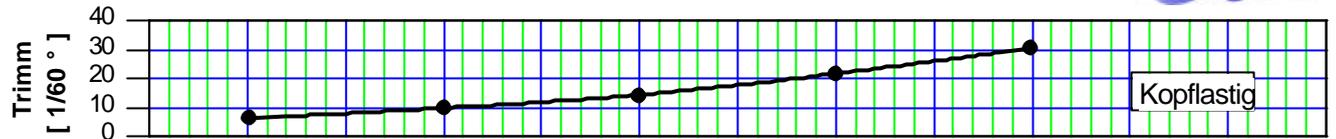
Version A



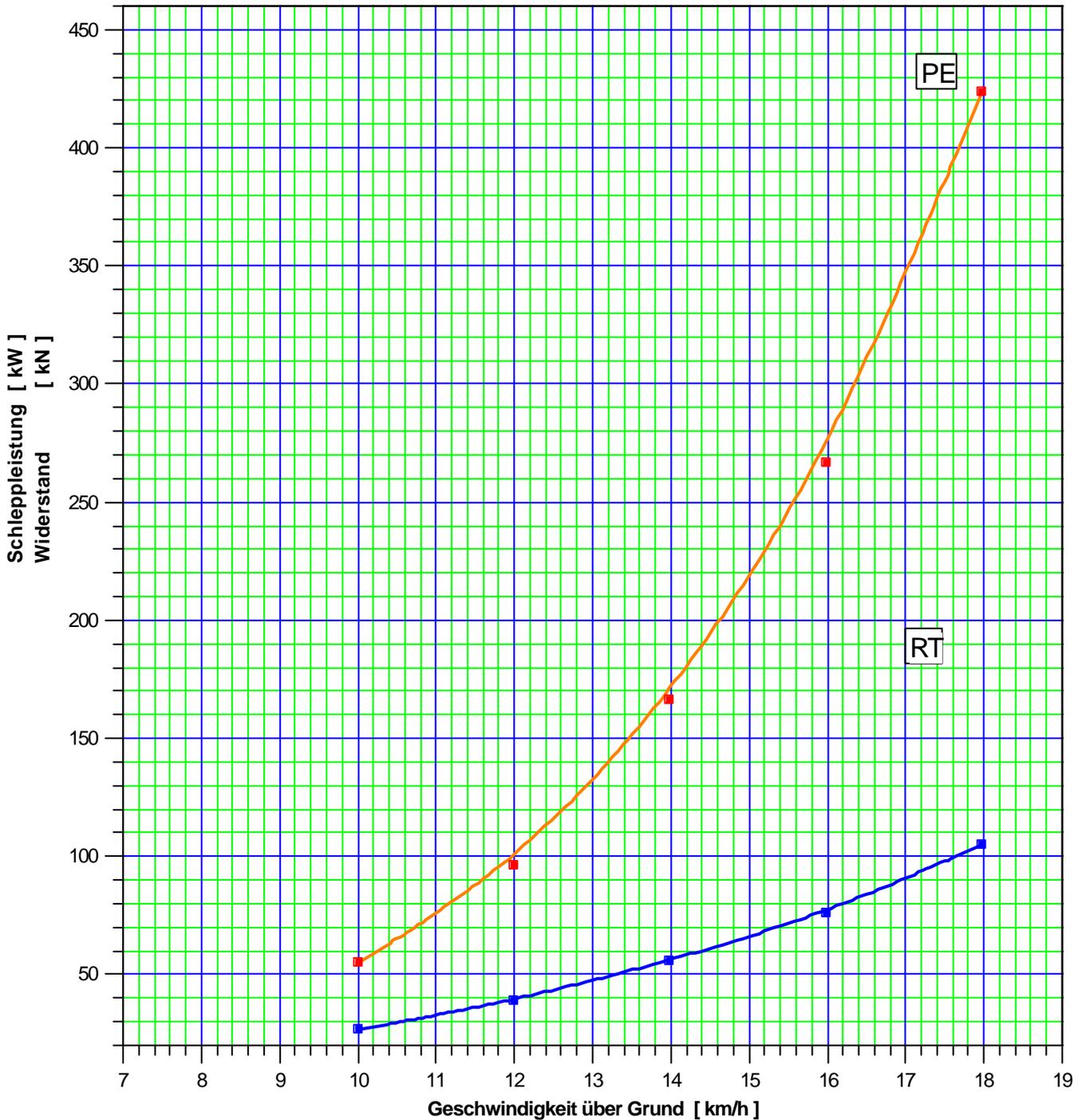
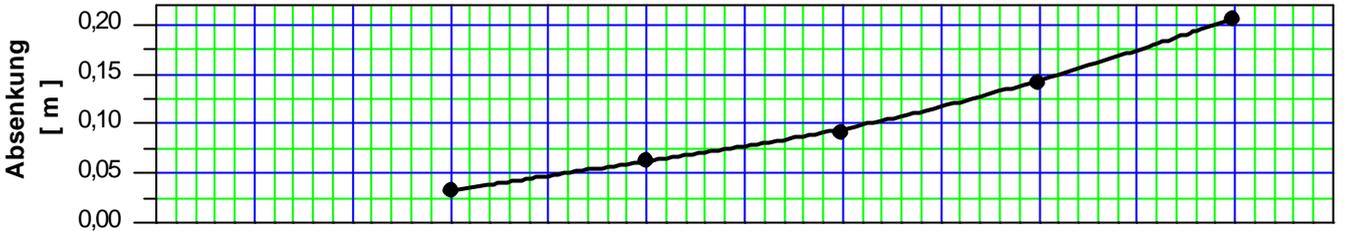
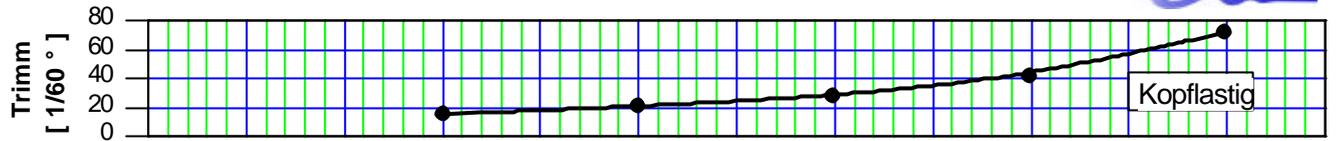
WIDERSTAND

h = 5 m; T = 2.5 m

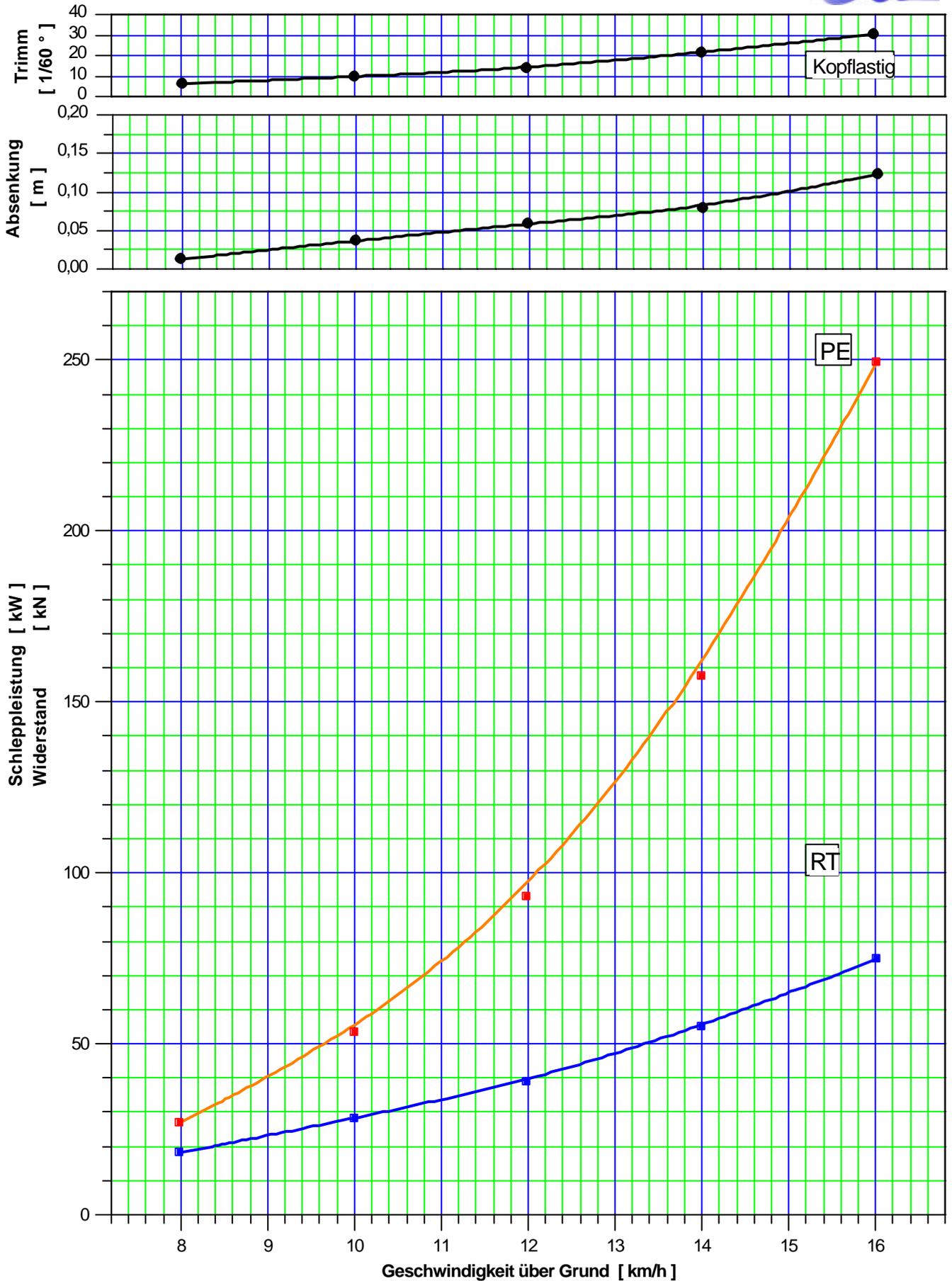
Version B



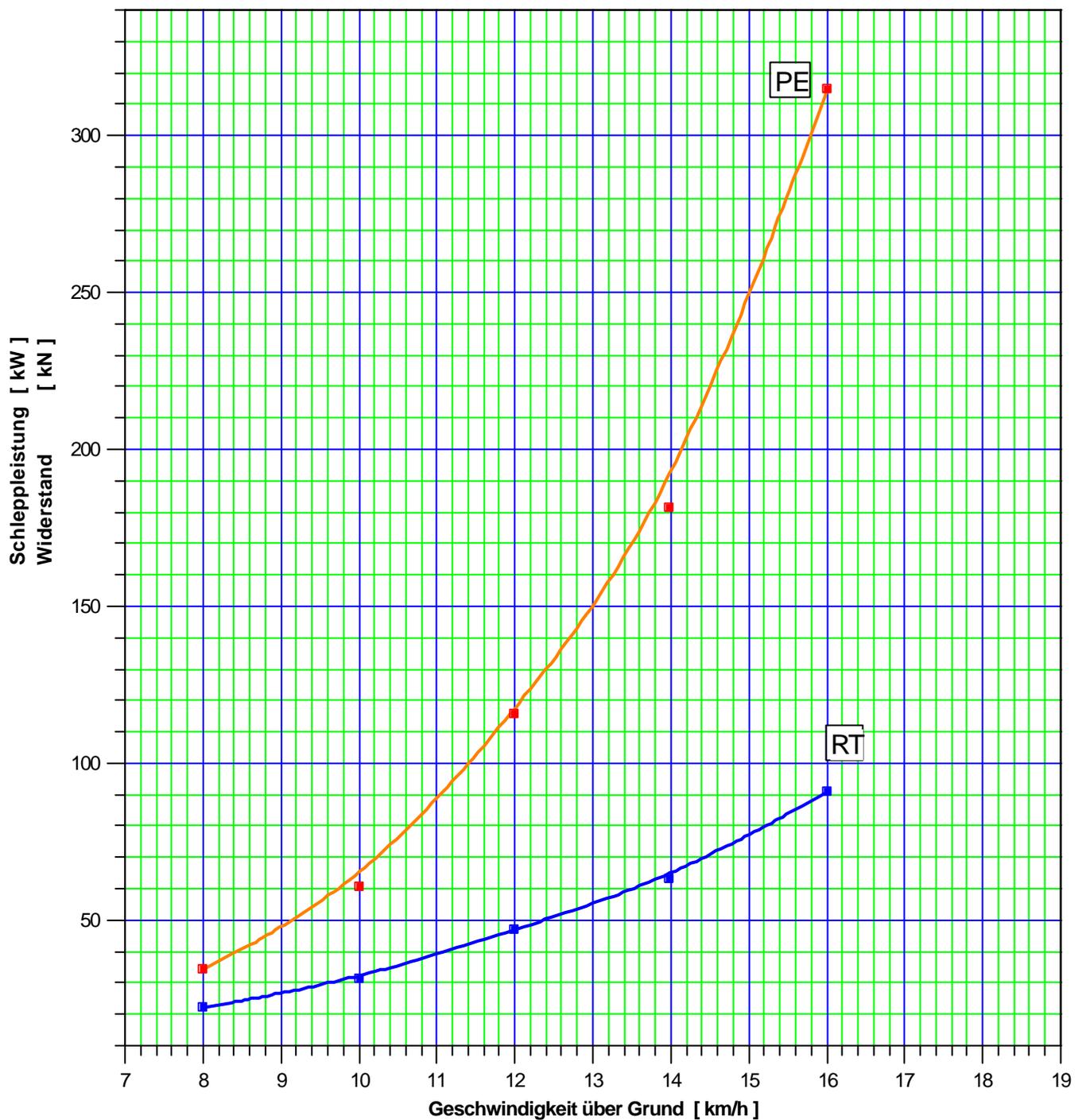
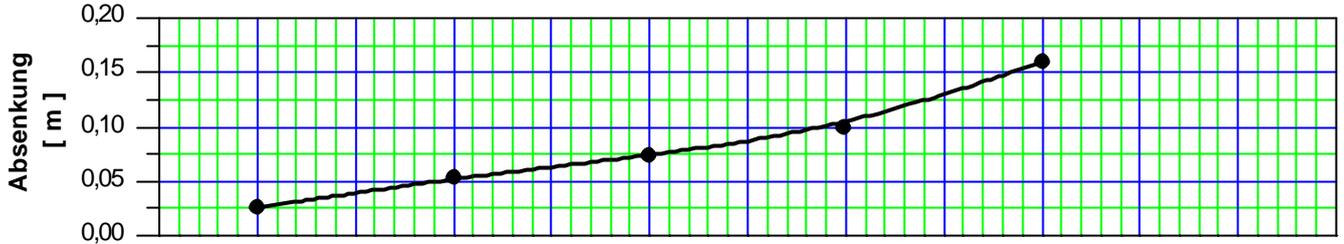
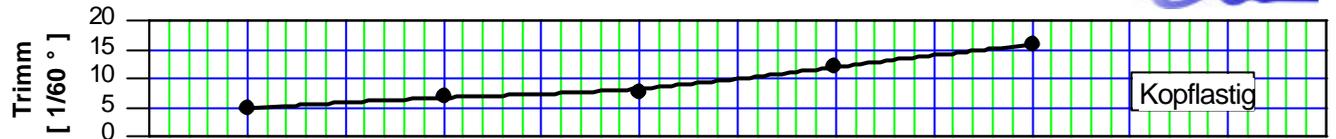
WIDERSTAND
h = 5 m; T = 2.5 m
Version BB



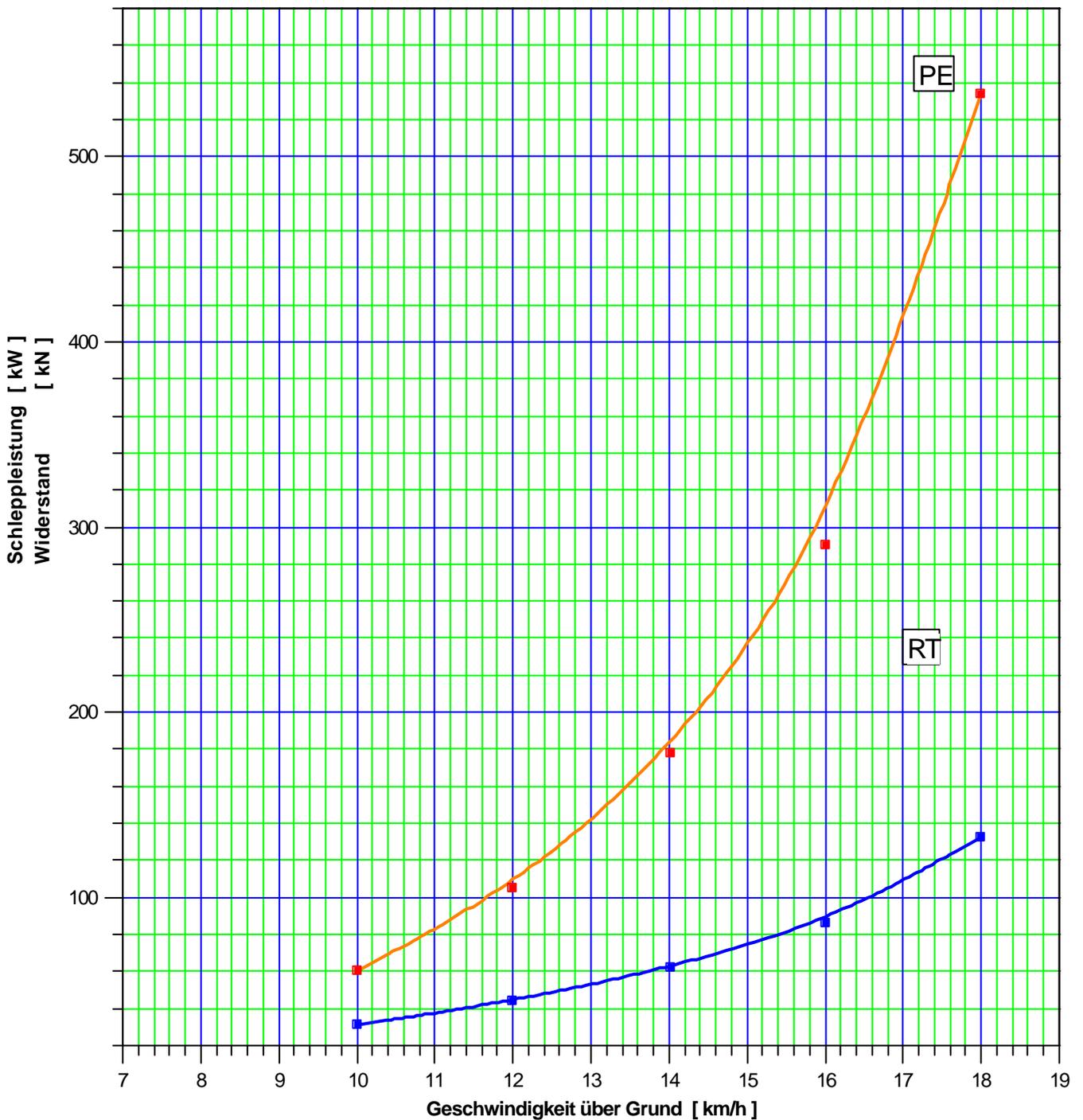
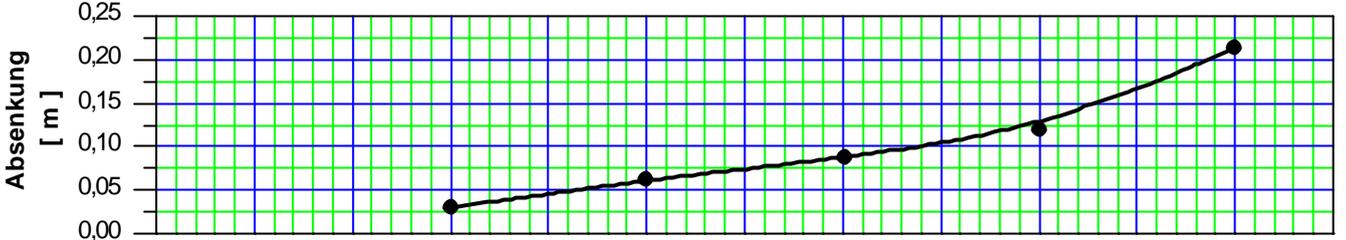
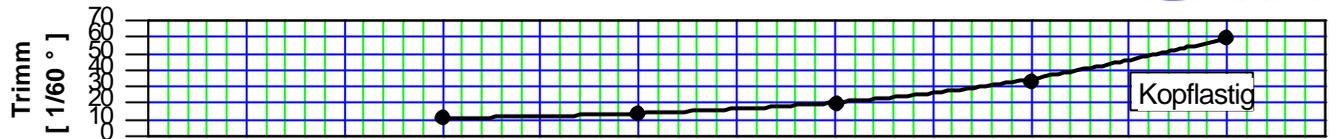
WIDERSTAND
 h = 5 m; T = 2.5 m
 Version C



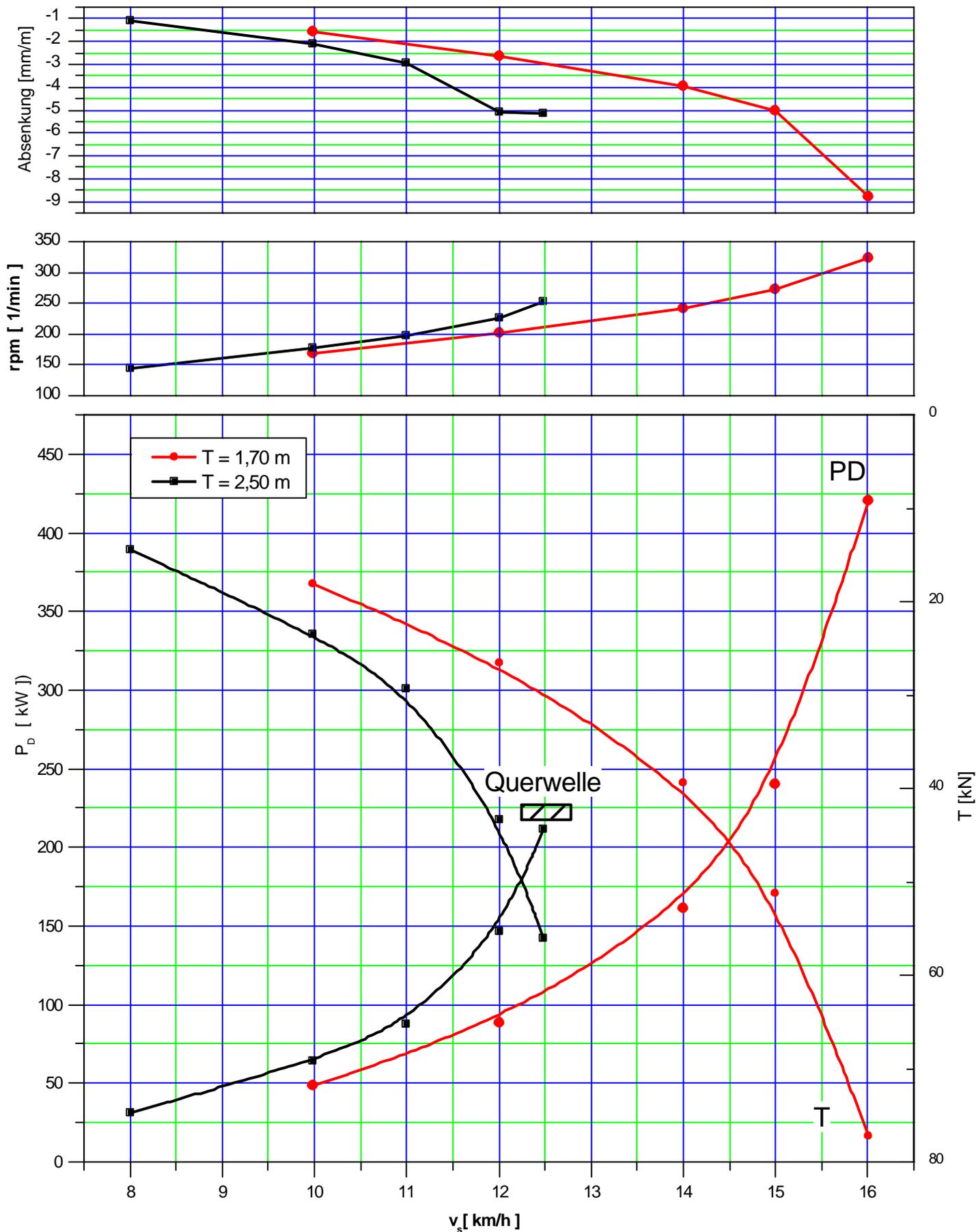
WIDERSTAND
 h = 5 m; T = 2.5 m
 Version D



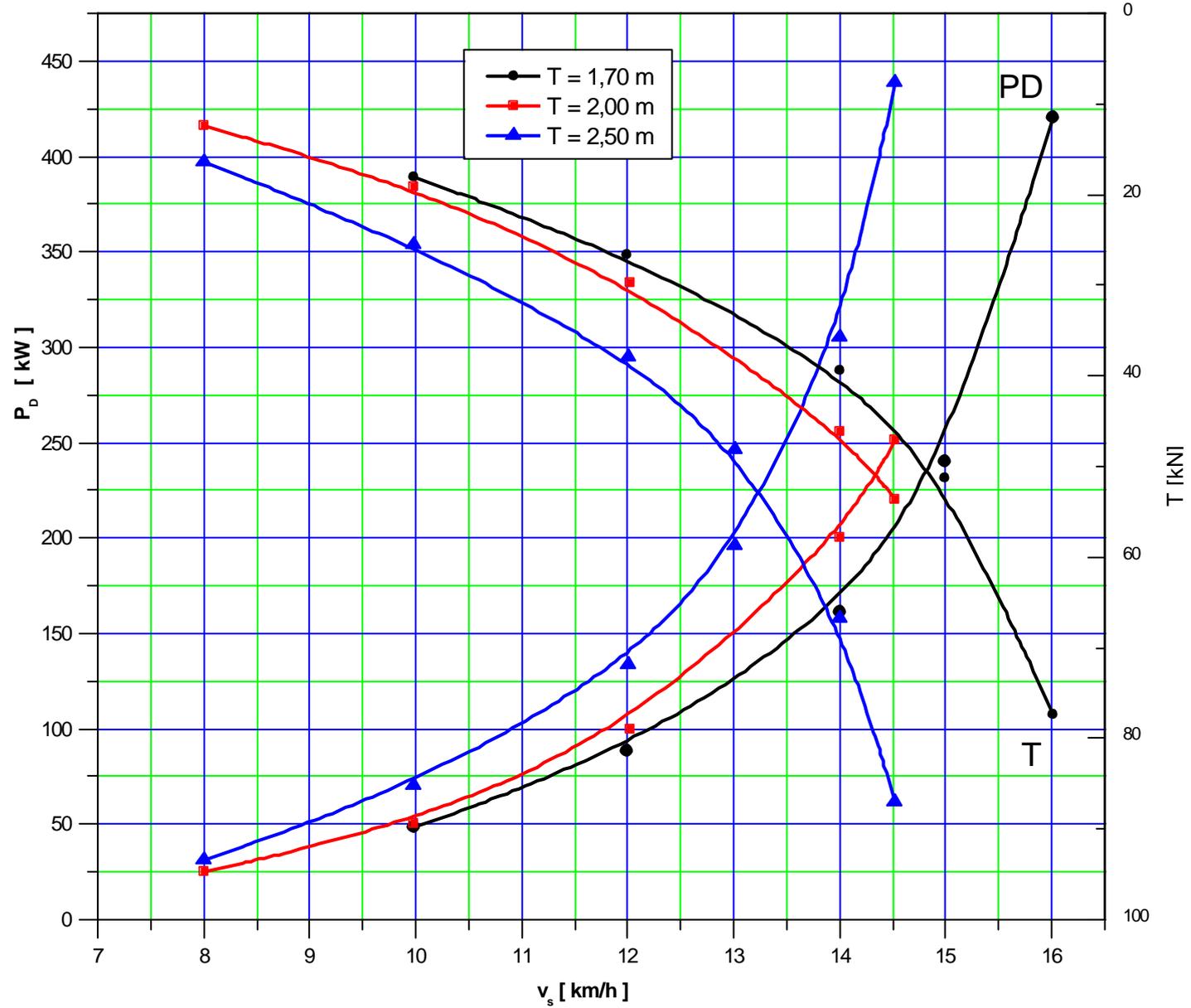
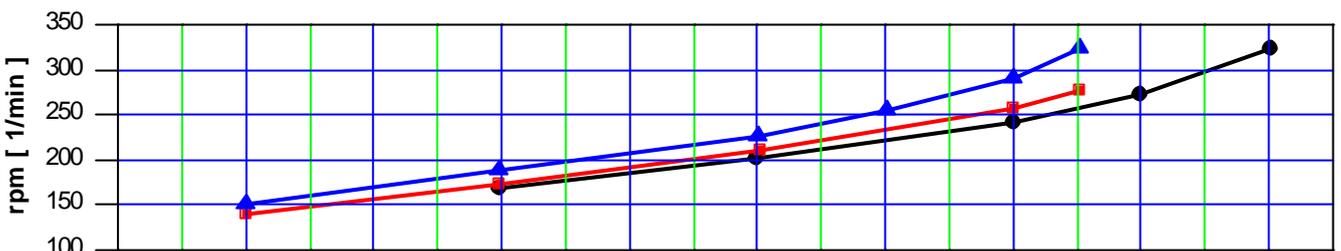
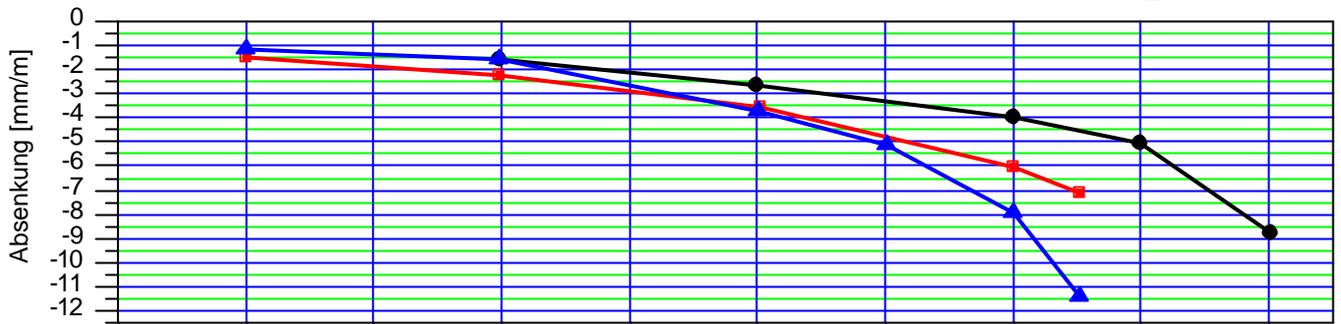
WIDERSTAND
 h = 5 m; T = 2.5 m
 Version E



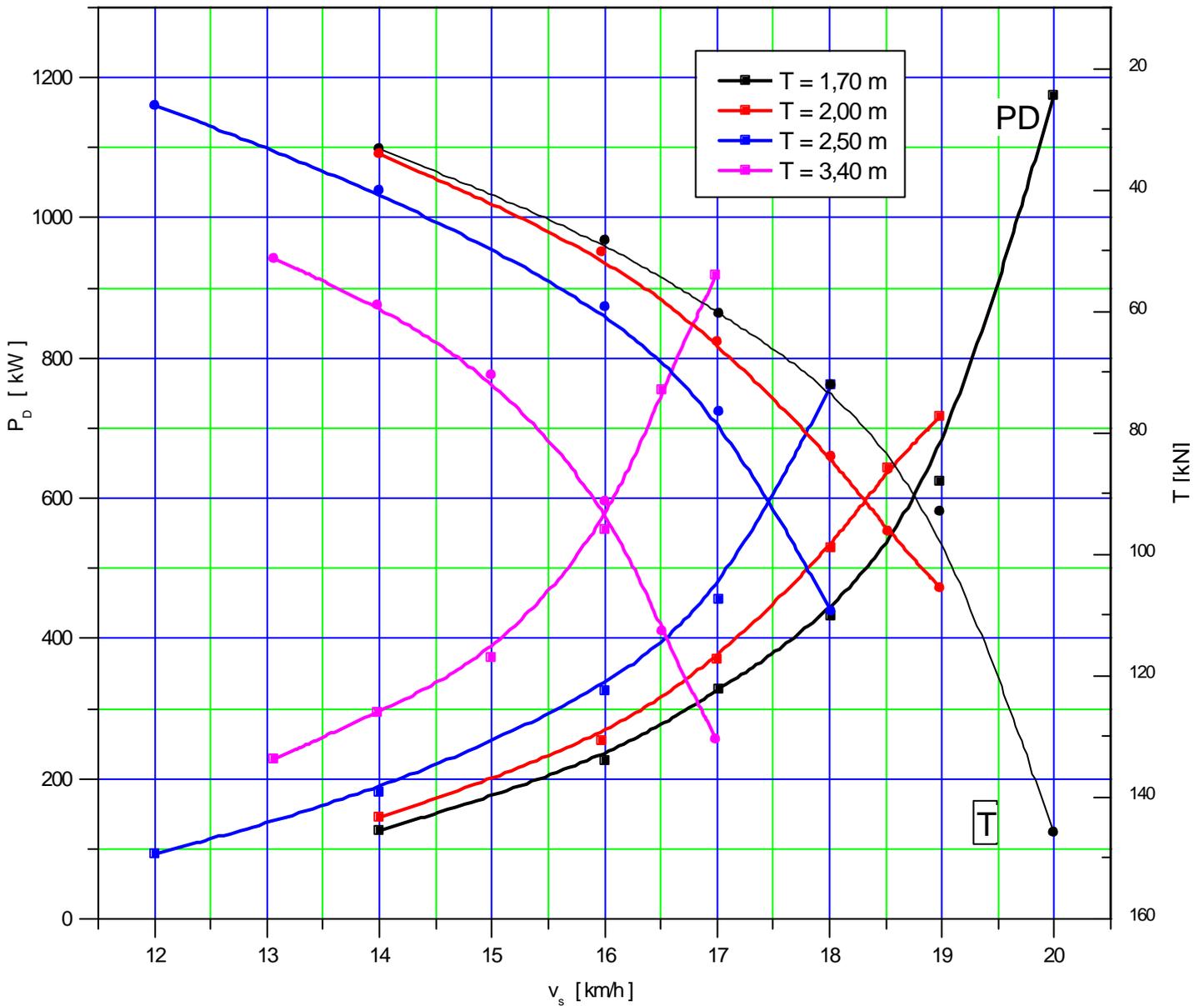
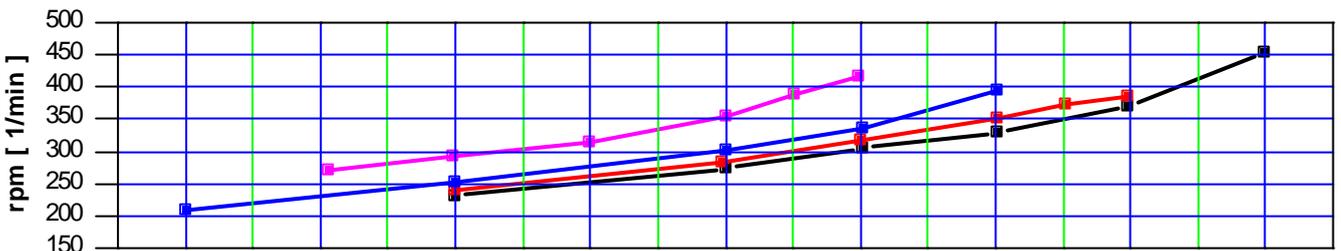
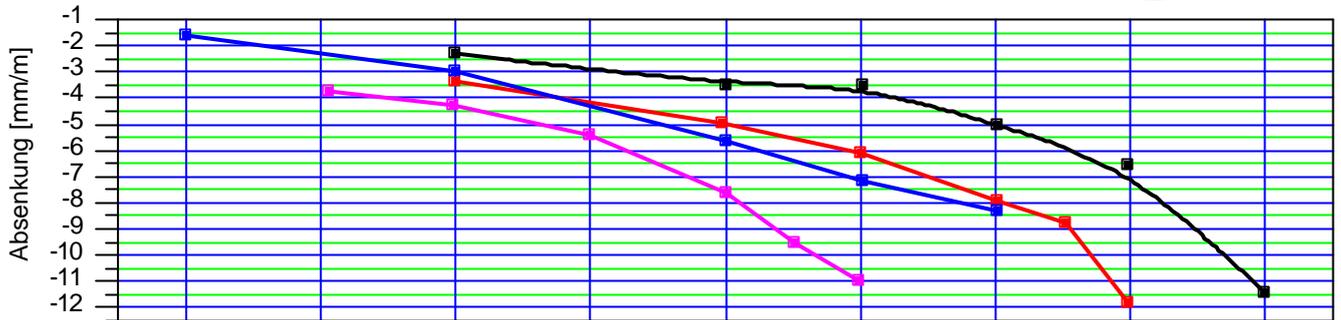
Propulsion Tests
 h = 2,50 m
 T = 1.70 m, 2,50 m
 Variante A



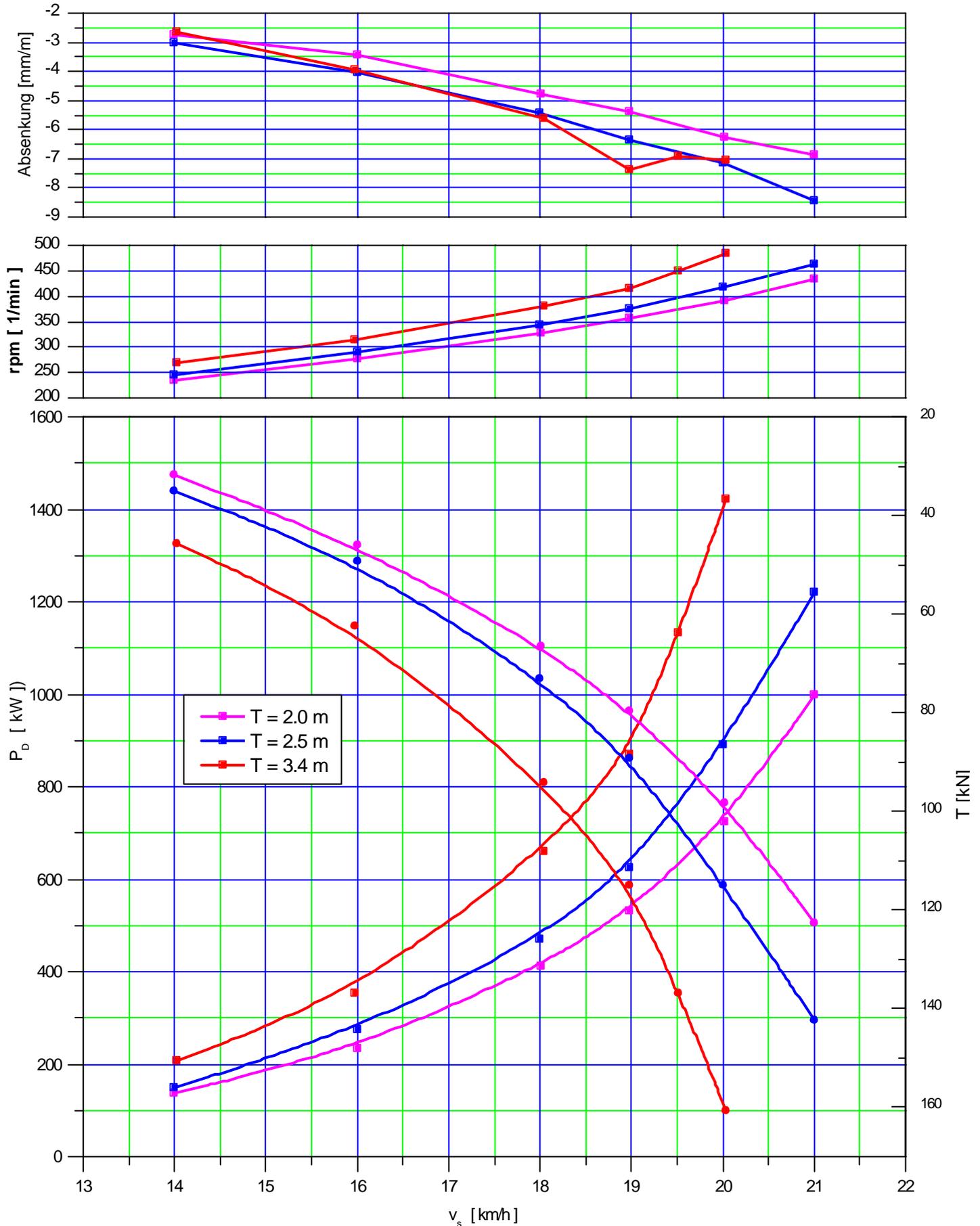
Propulsion Tests
 h = 3,50 m
 T = 1,70 m, 2,0 m, 2,50 m
 Variante A



Propulsion Tests
 h = 5,0 m
 T = 1,70 m, 2,00 m, 2,50 m, 3,40 m
 Variante A



Propulsion Tests
 h = 7,50 m
 T = 2,00 m, 2,50 m, 3,40 m
 Variante A

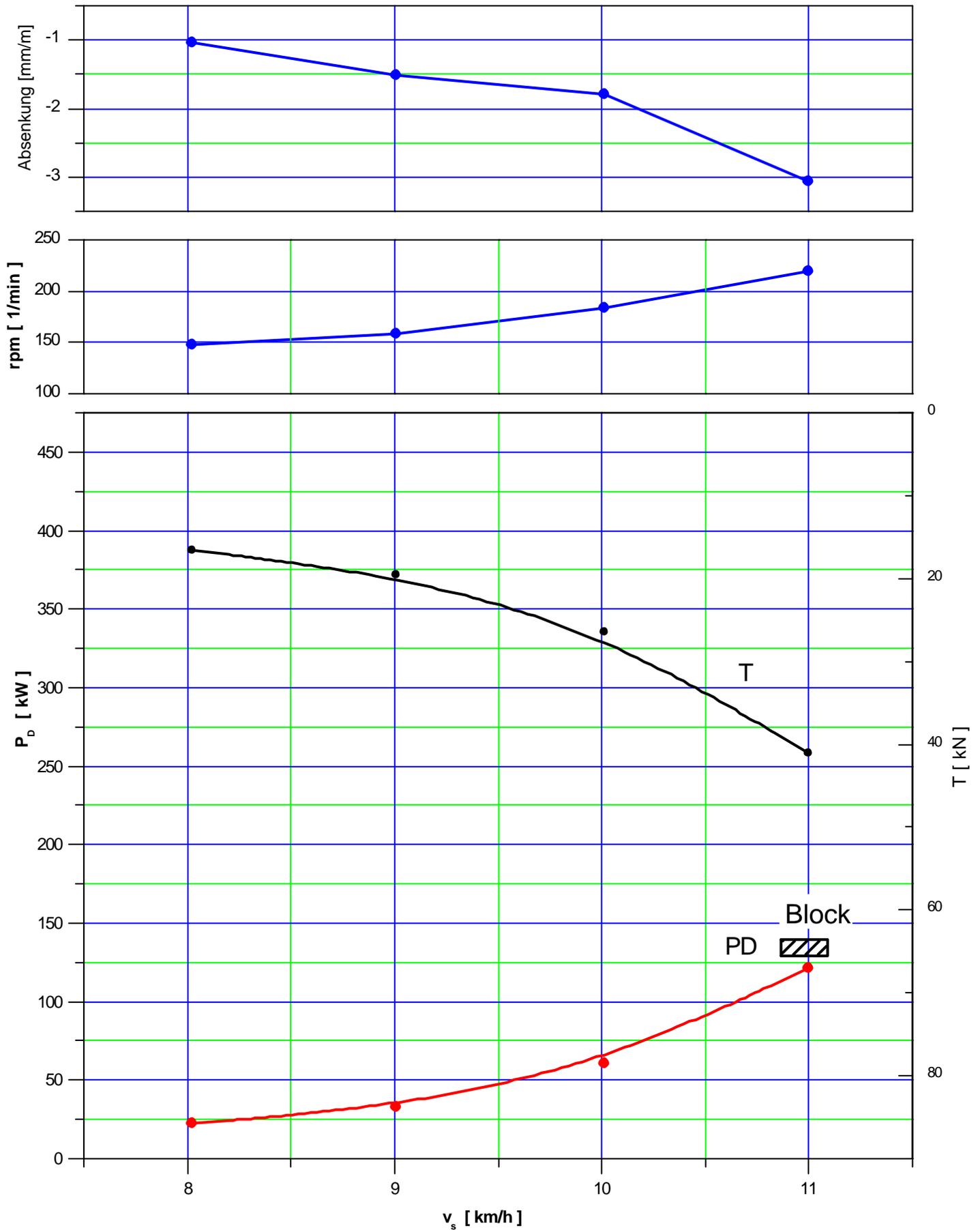


Propulsion Tests

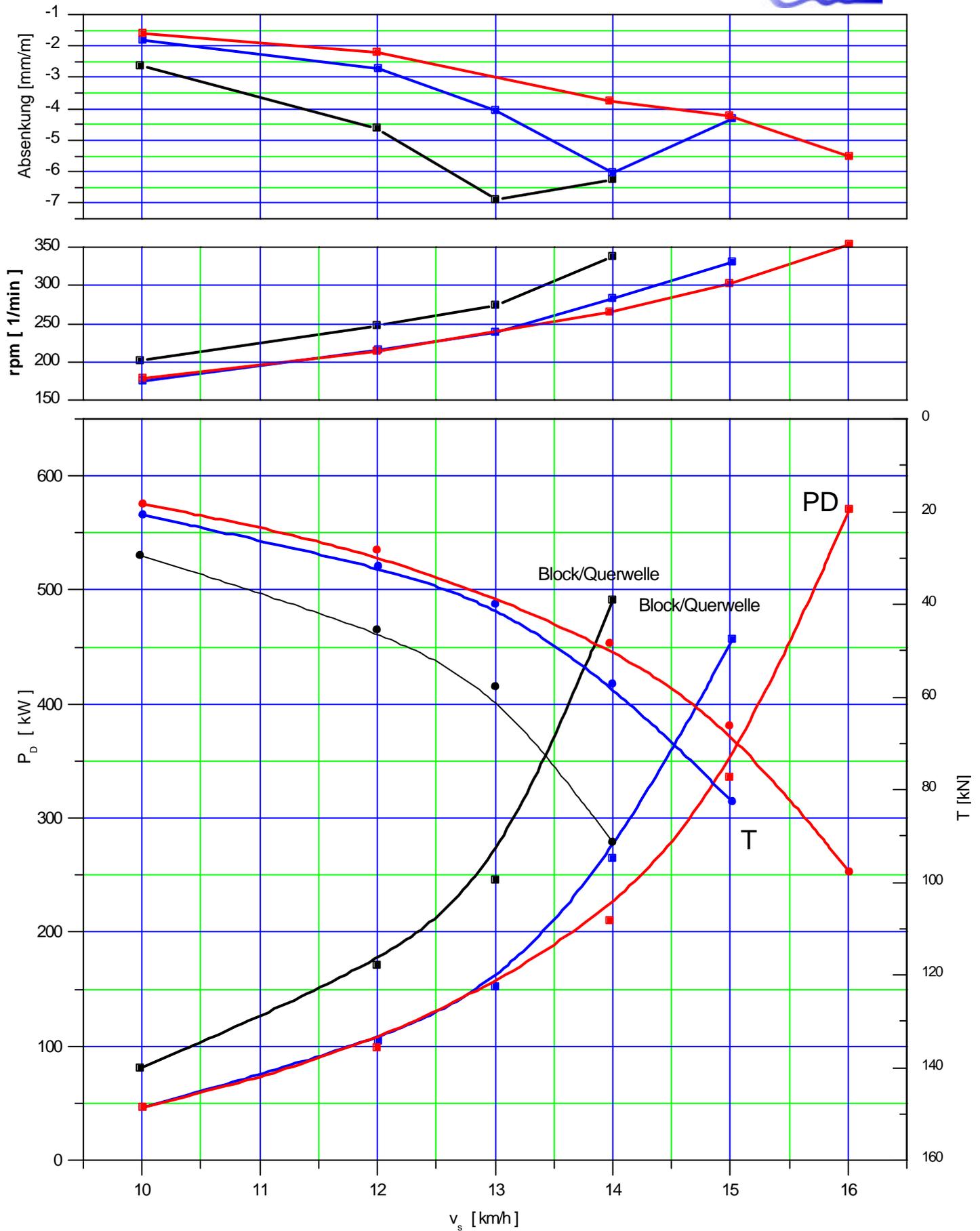
$h = 2,50 \text{ m}$

$T = 1,70 \text{ m}$

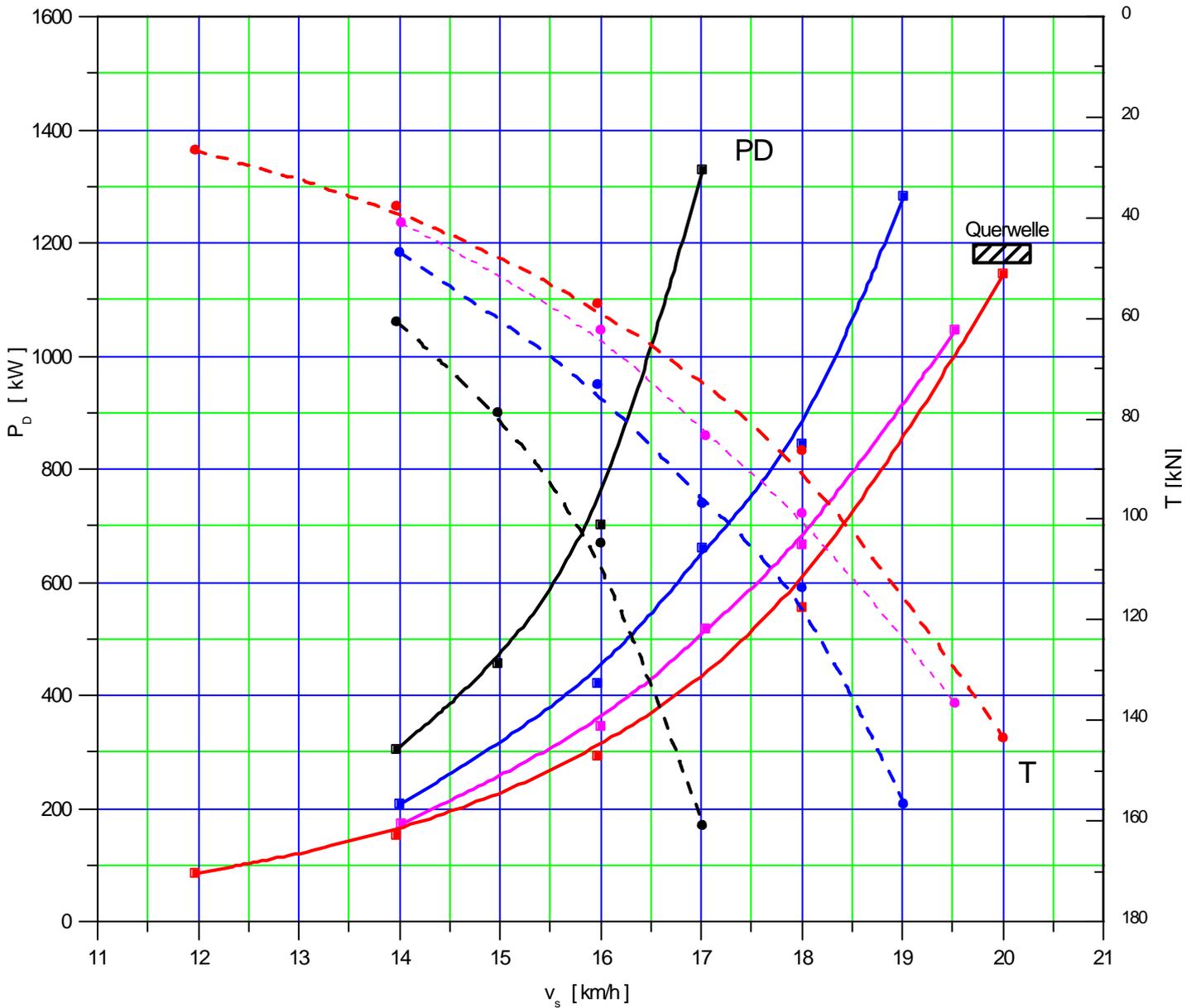
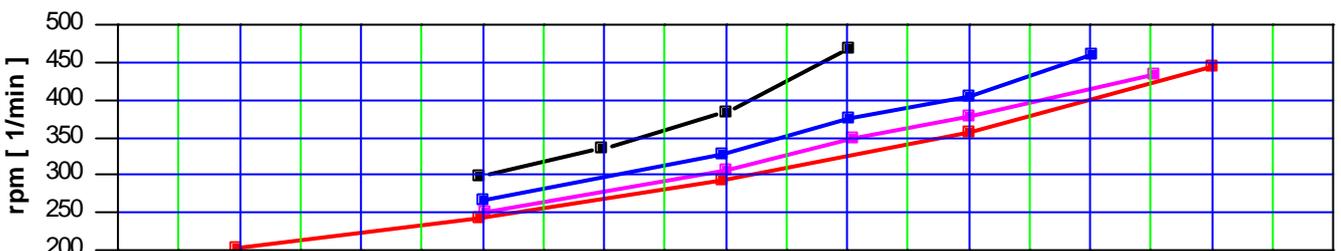
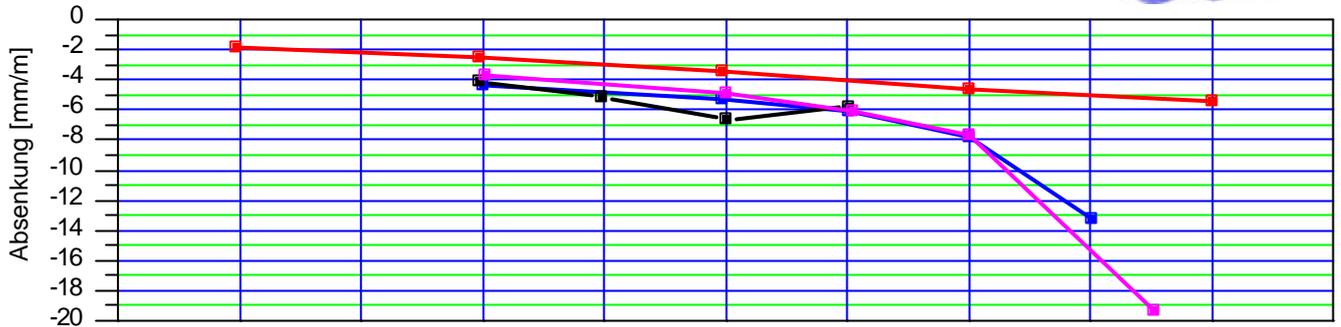
Variante B



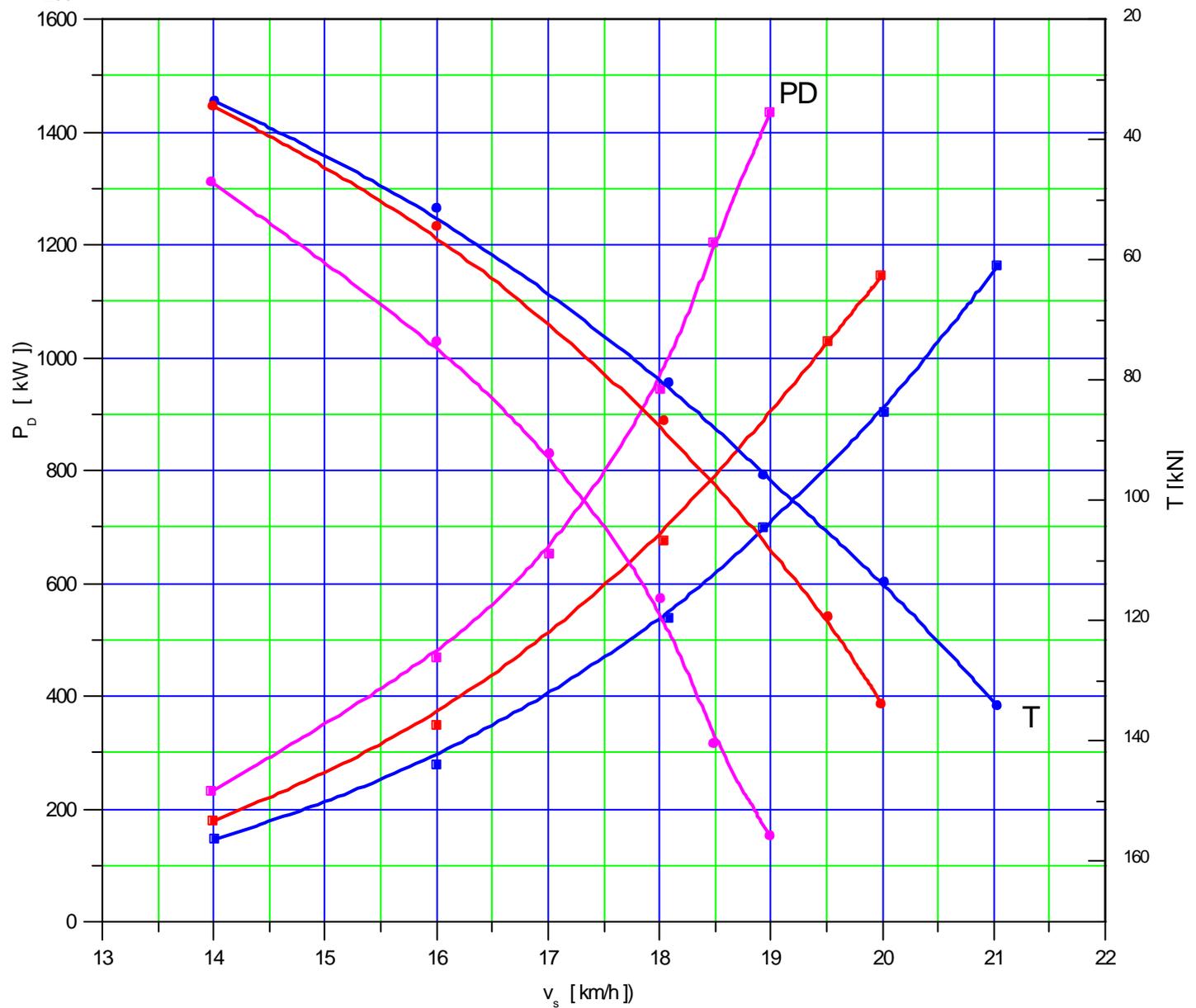
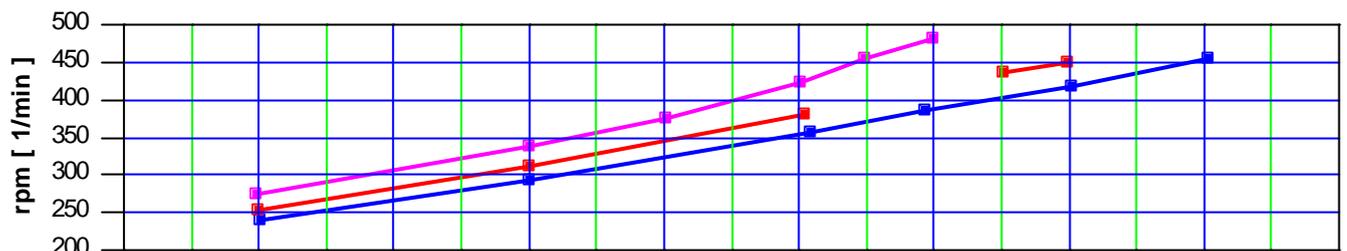
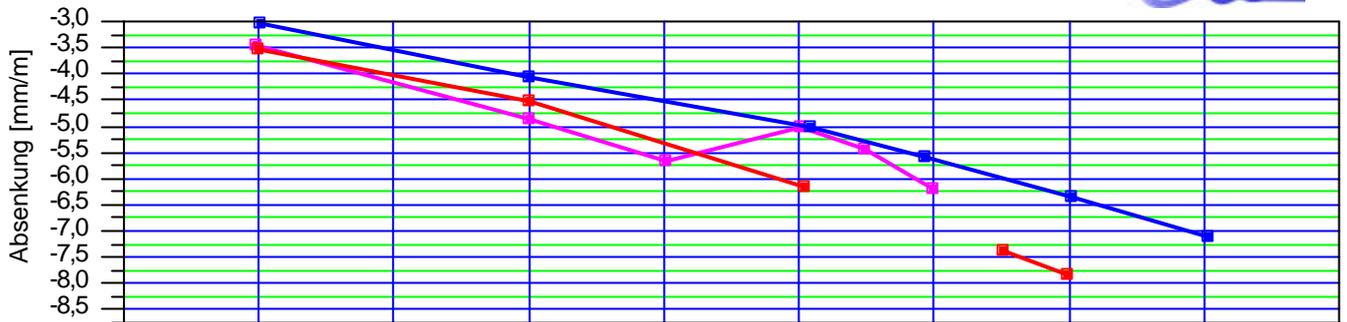
Propulsion
 $h = 3,50 \text{ m}$
 $T = 1,70 \text{ m}, 2,00 \text{ m}, 2,50 \text{ m}$
 Variante B



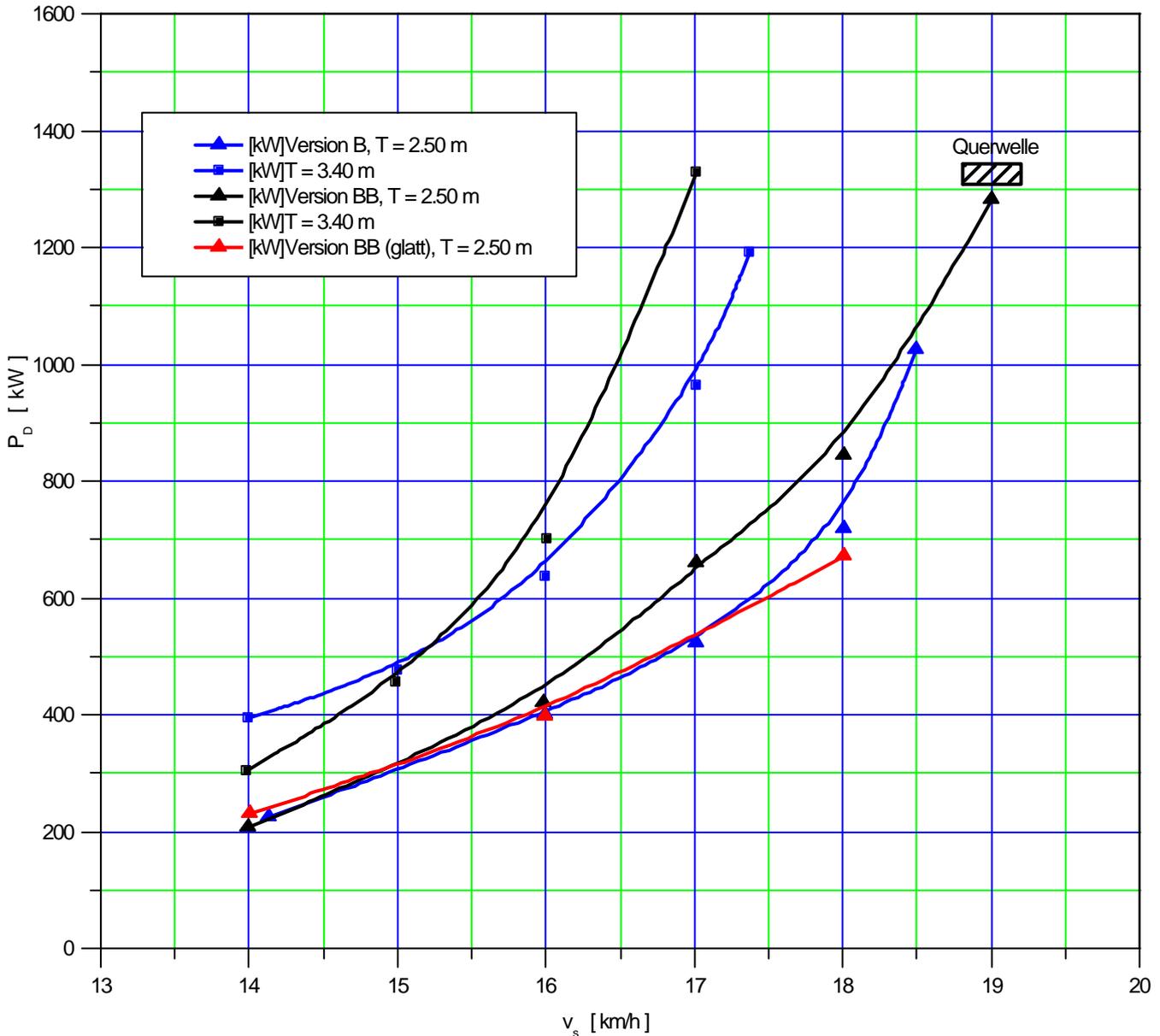
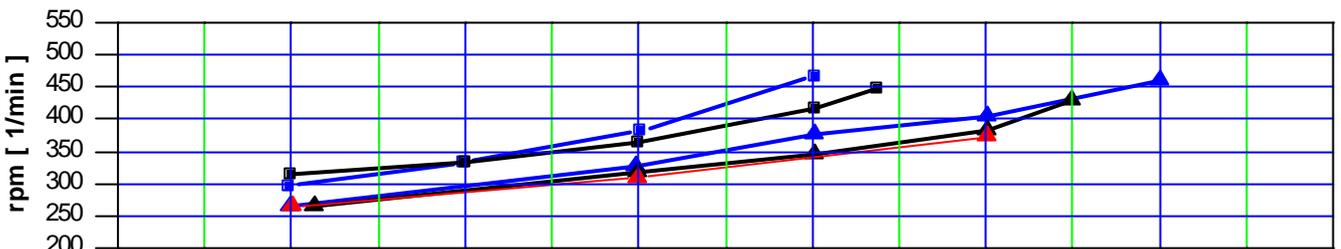
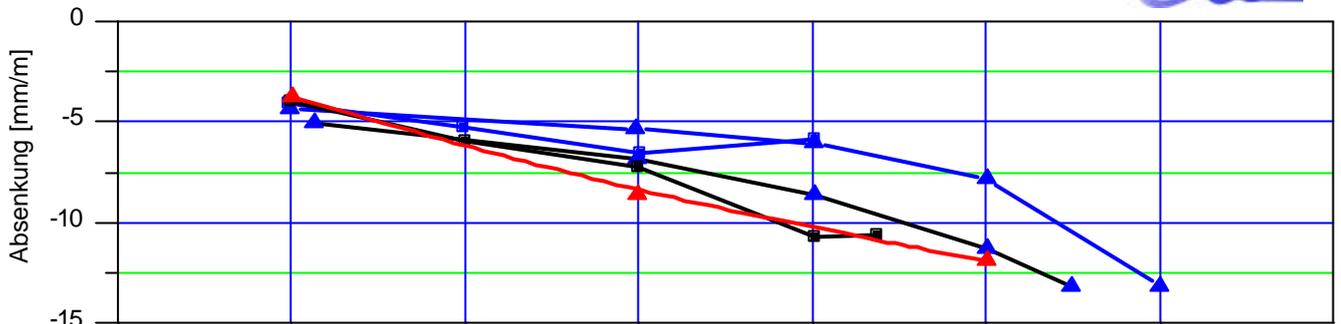
Propulsion Tests
 h = 5,0 m
 T = 1,70 m, 2,00 m, 2,50 m, 3,40 m
 Variante B



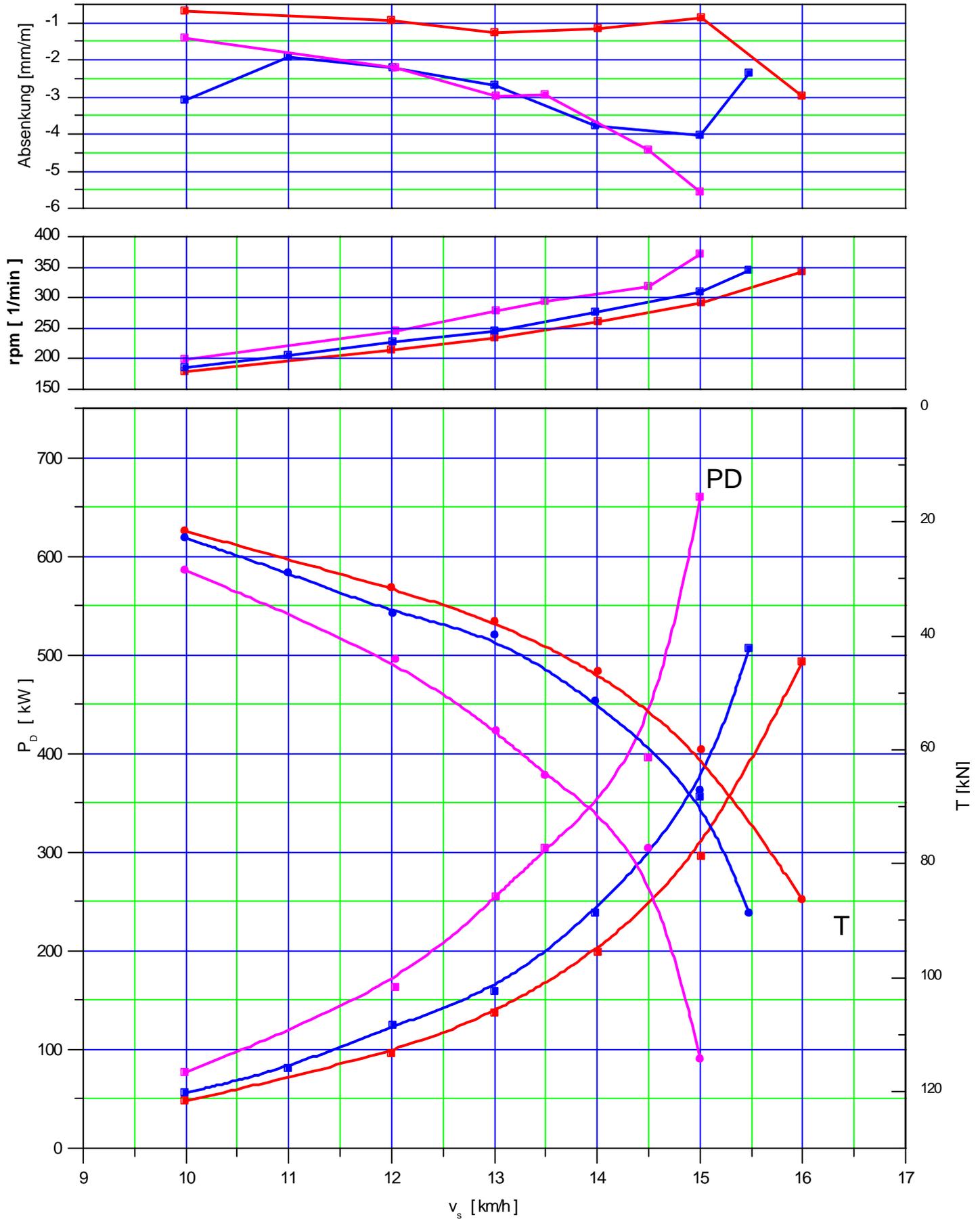
Propulsion
 h = 7,50 m
 T = 2,00 m, 2,50 m, 3,40 m
 Variante B



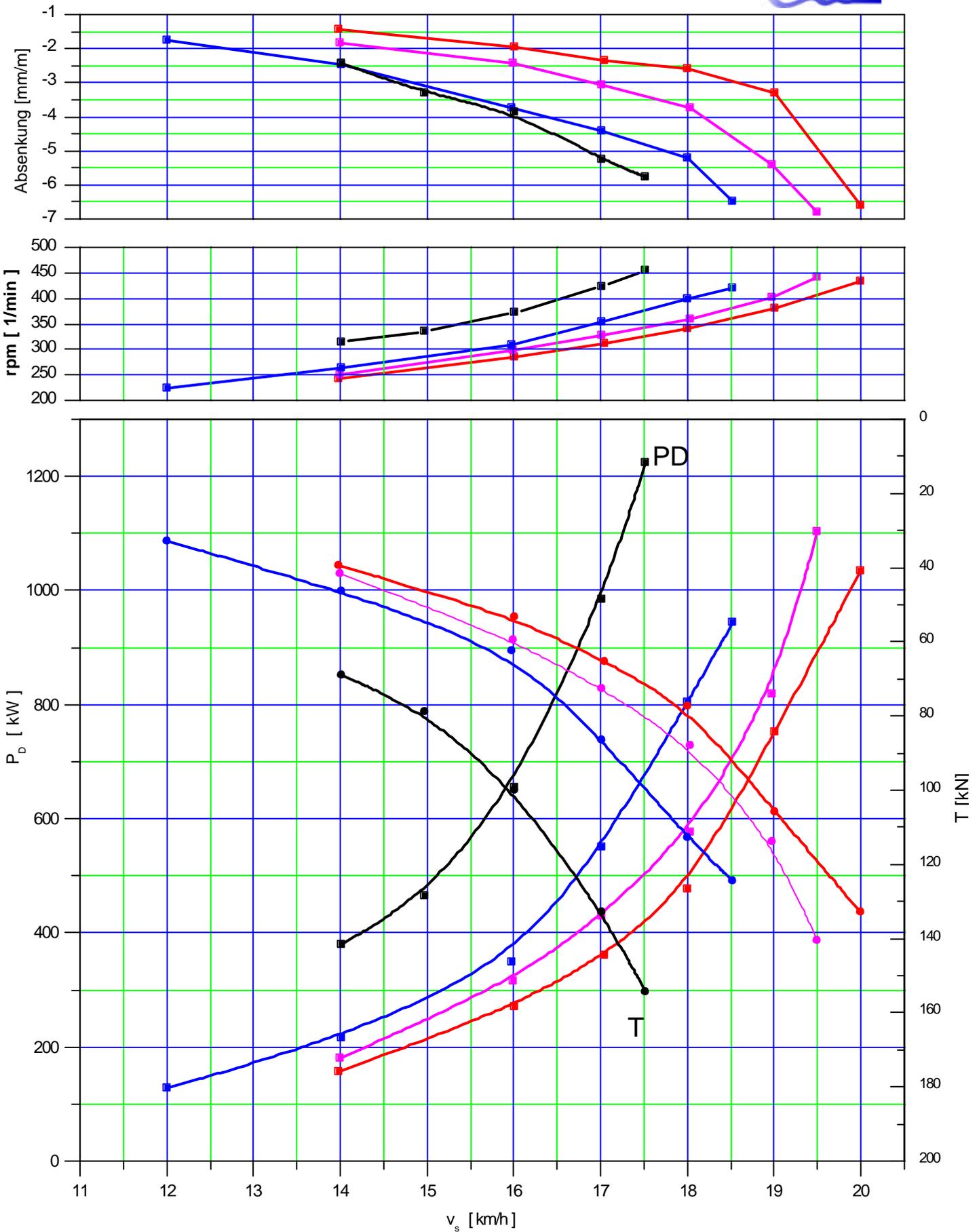
Propulsion Tests
 h = 5,0 m
 T = 2,50 m, 3,40 m
 Variante B, BB u. BBG (lackiert)



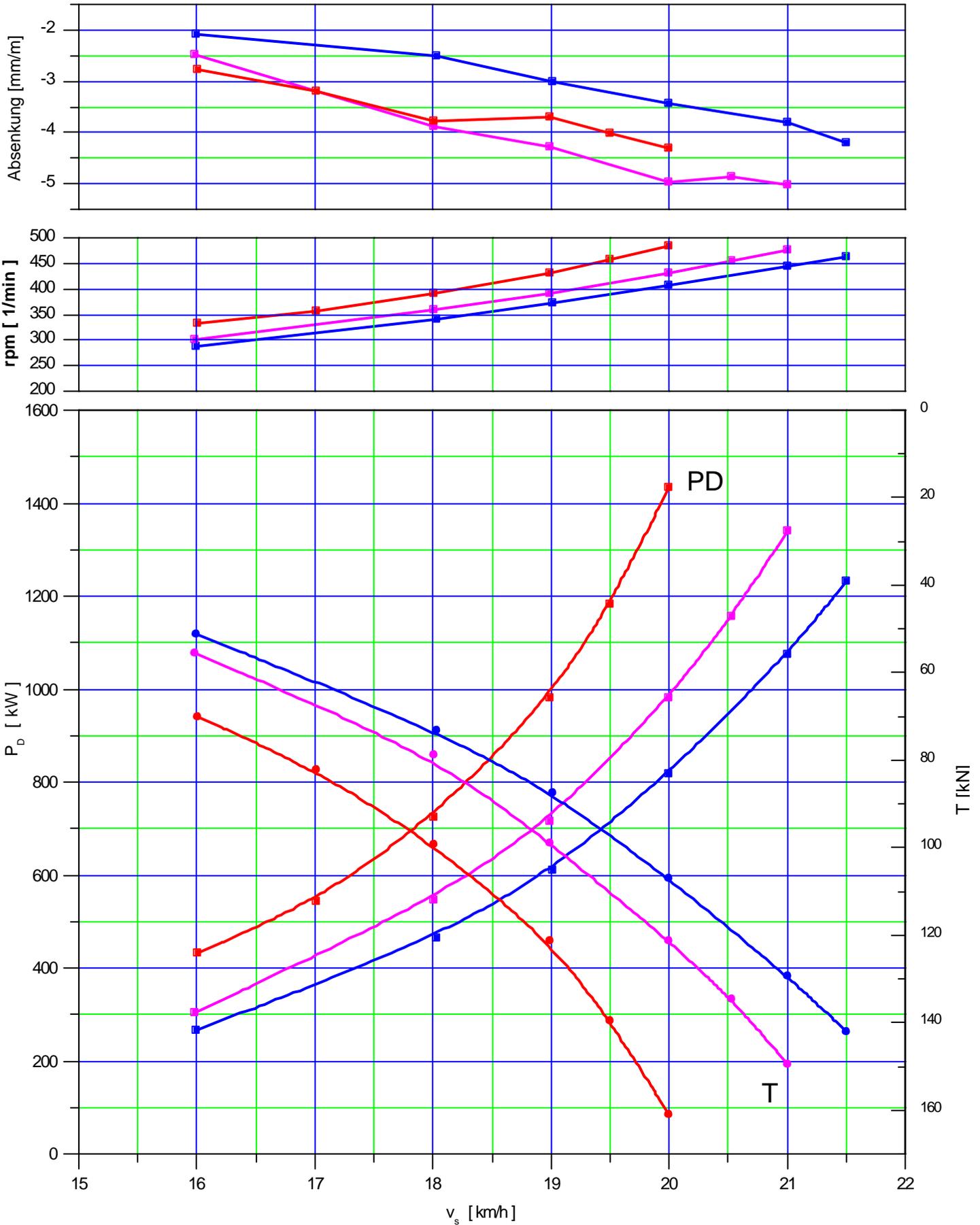
Propulsion
 h = 3,50 m
 T = 1,70 m, 2,00 m, 2,50 m
 Variante C



Propulsion Tests
 h = 5,0 m
 T = 1,70 m, 2,00 m, 2,50 m, 3,40 m
 Variante C



Propulsion
 h = 7,50 m
 T = 2,00 m, 2,50 m, 3,40 m
 Variante C

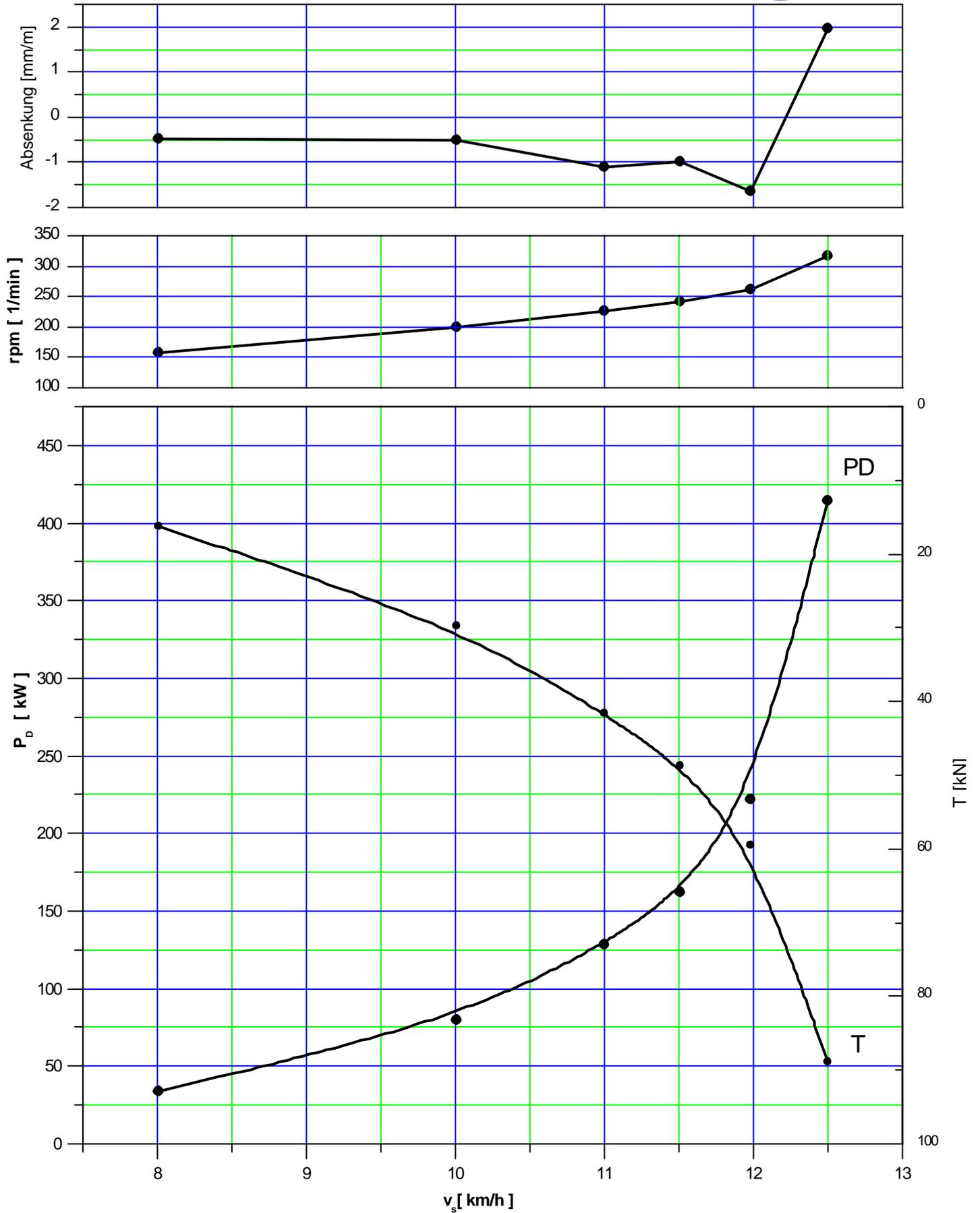


Propulsion Tests

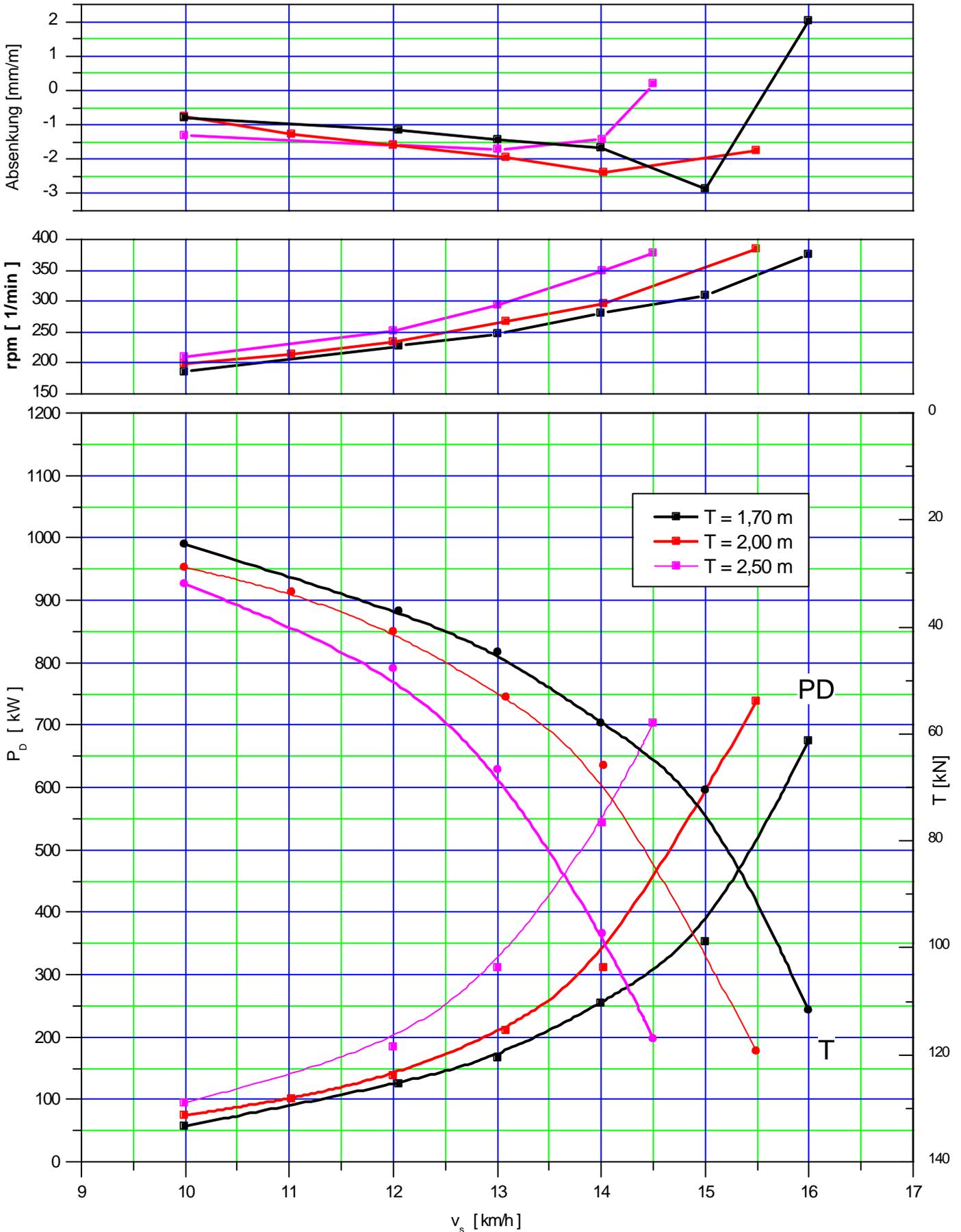
$h = 2,50 \text{ m}$

$T = 1,70 \text{ m}$

Variante D

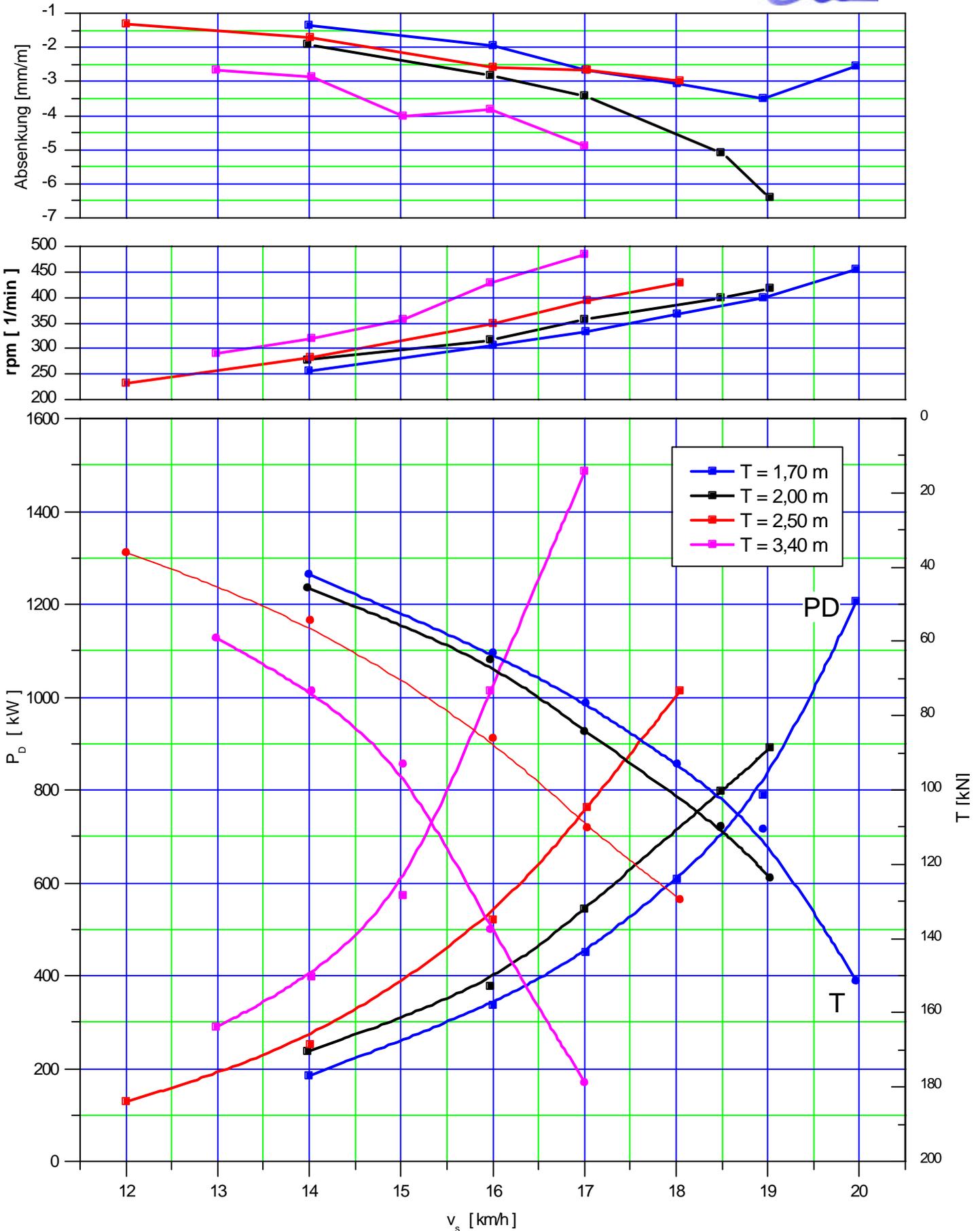


Propulsion
 h = 3,50 m
 T = 1,70 m, 2,00 m, 2,50 m
 Variante D

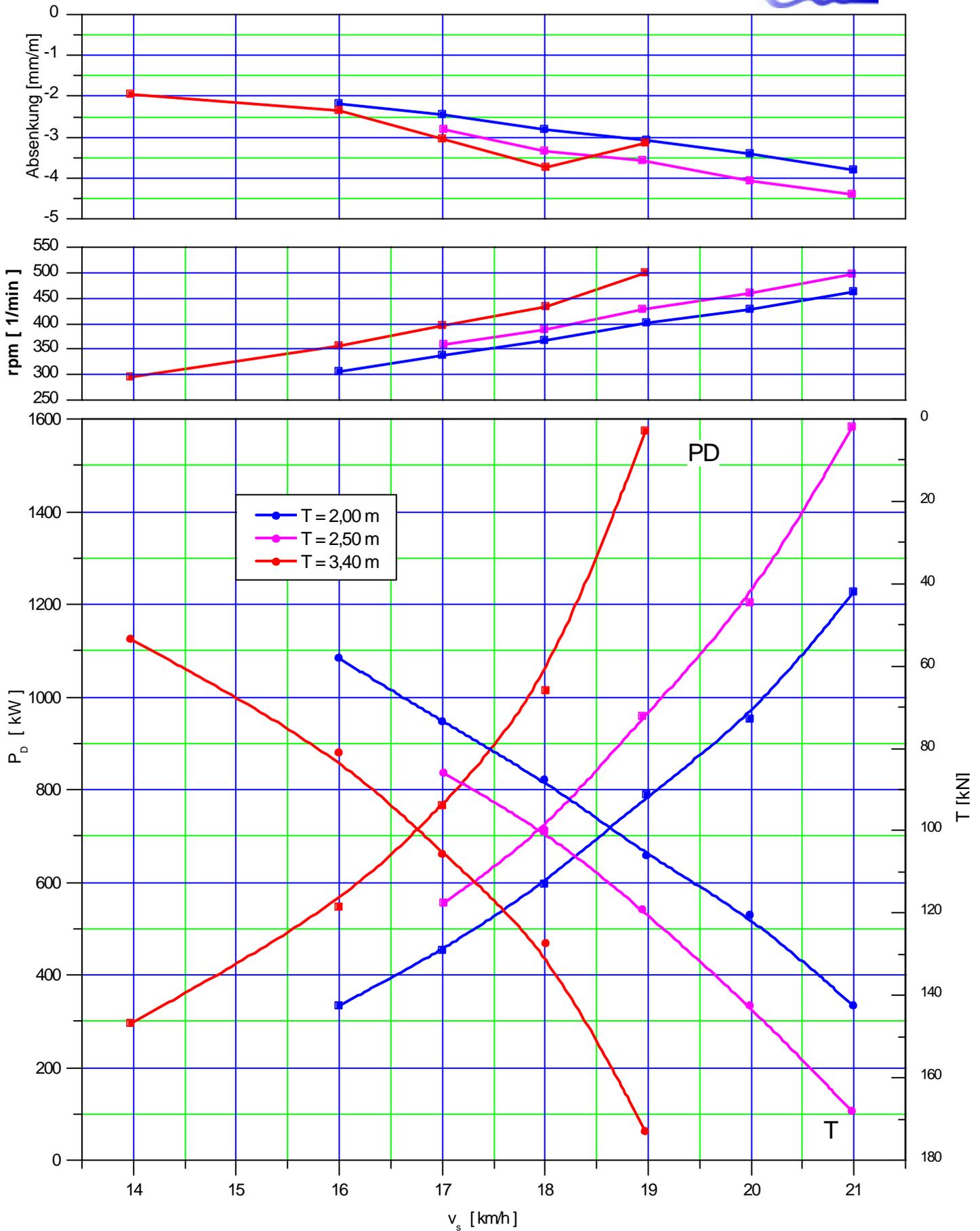


Propulsion Tests

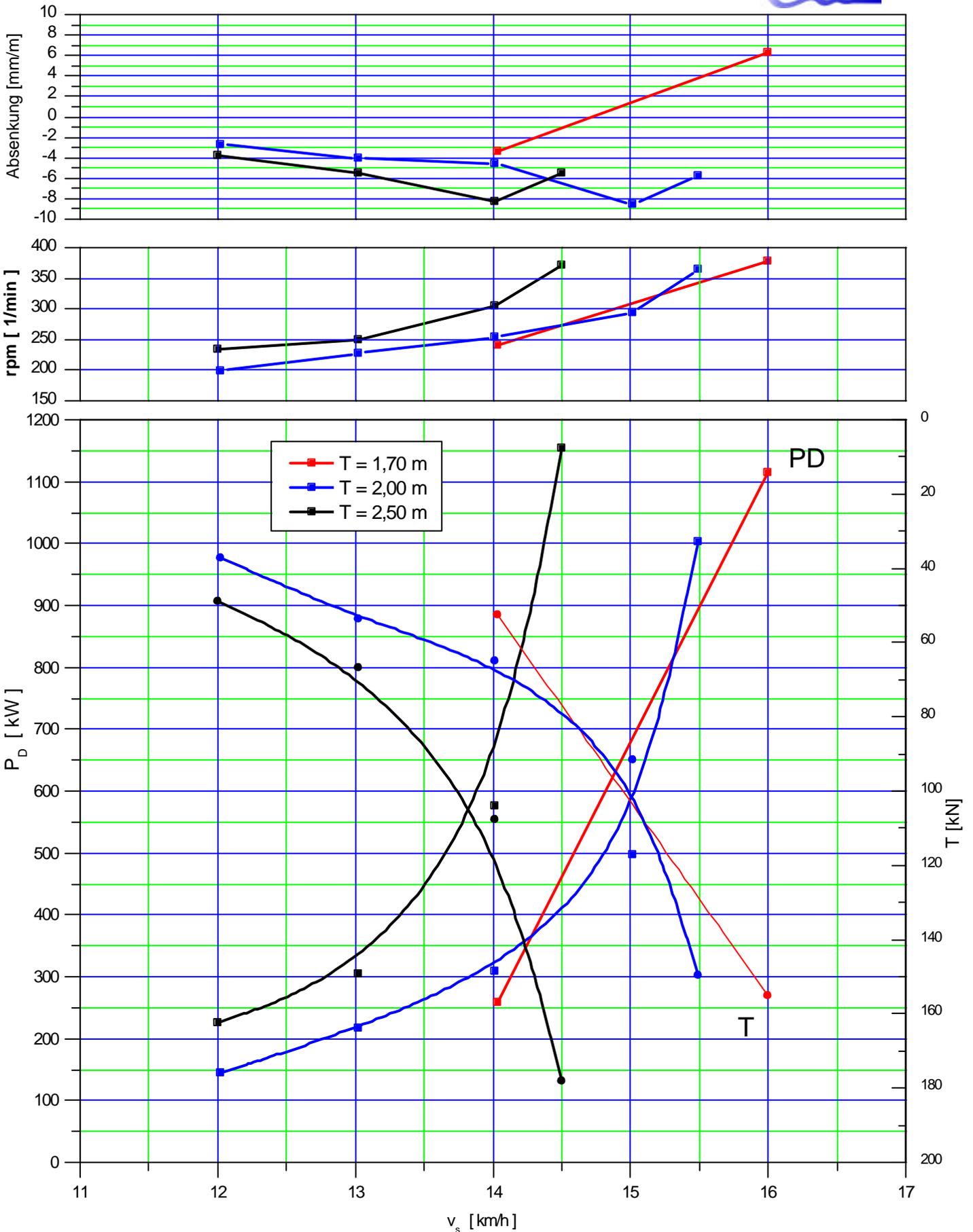
h = 5,0 m
 T = 1,70 m, 2,00 m, 2,50 m, 3,40 m
 Variante D



Propulsion
 $h = 7,50 \text{ m}$
 $T = 2,00 \text{ m}, 2,50 \text{ m}, 3,40 \text{ m}$
 Variante D

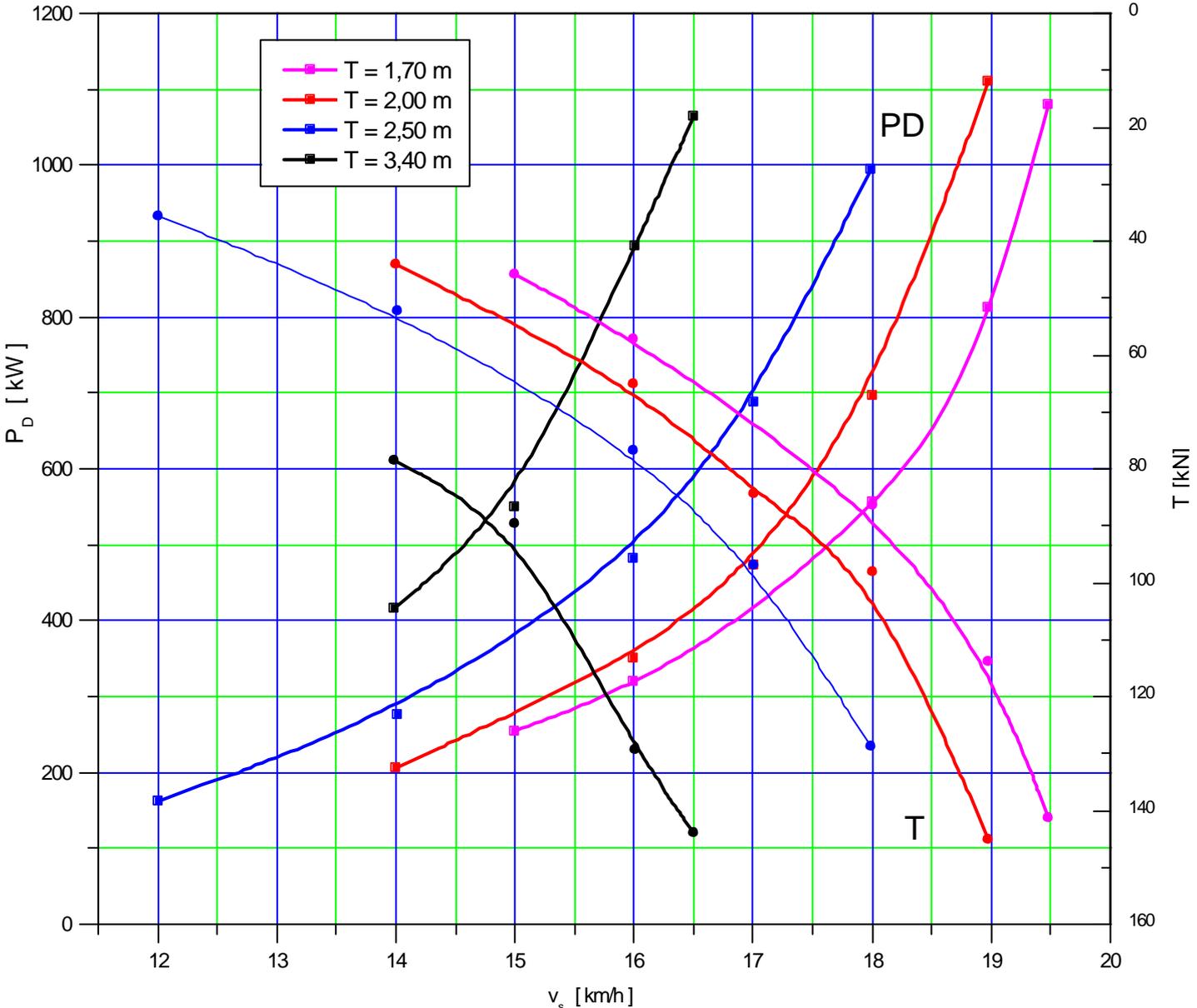
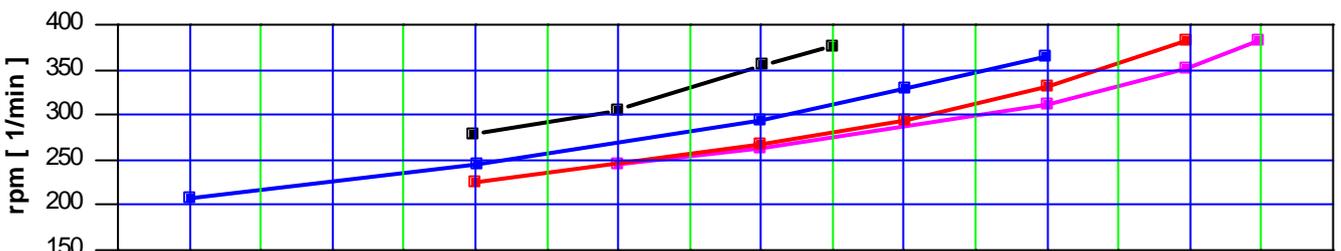
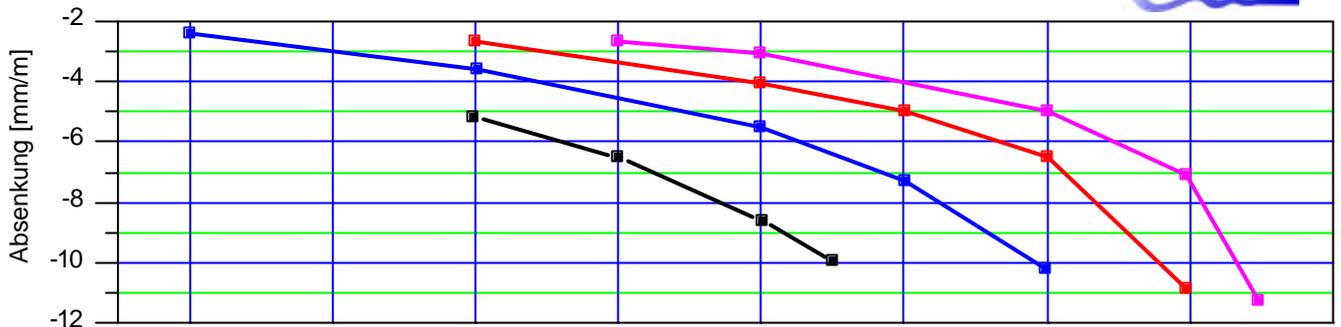


Propulsion Tests
 h = 3,50 m
 T = 1,70 m, 2,00 m, 2,50 m
 Variante E

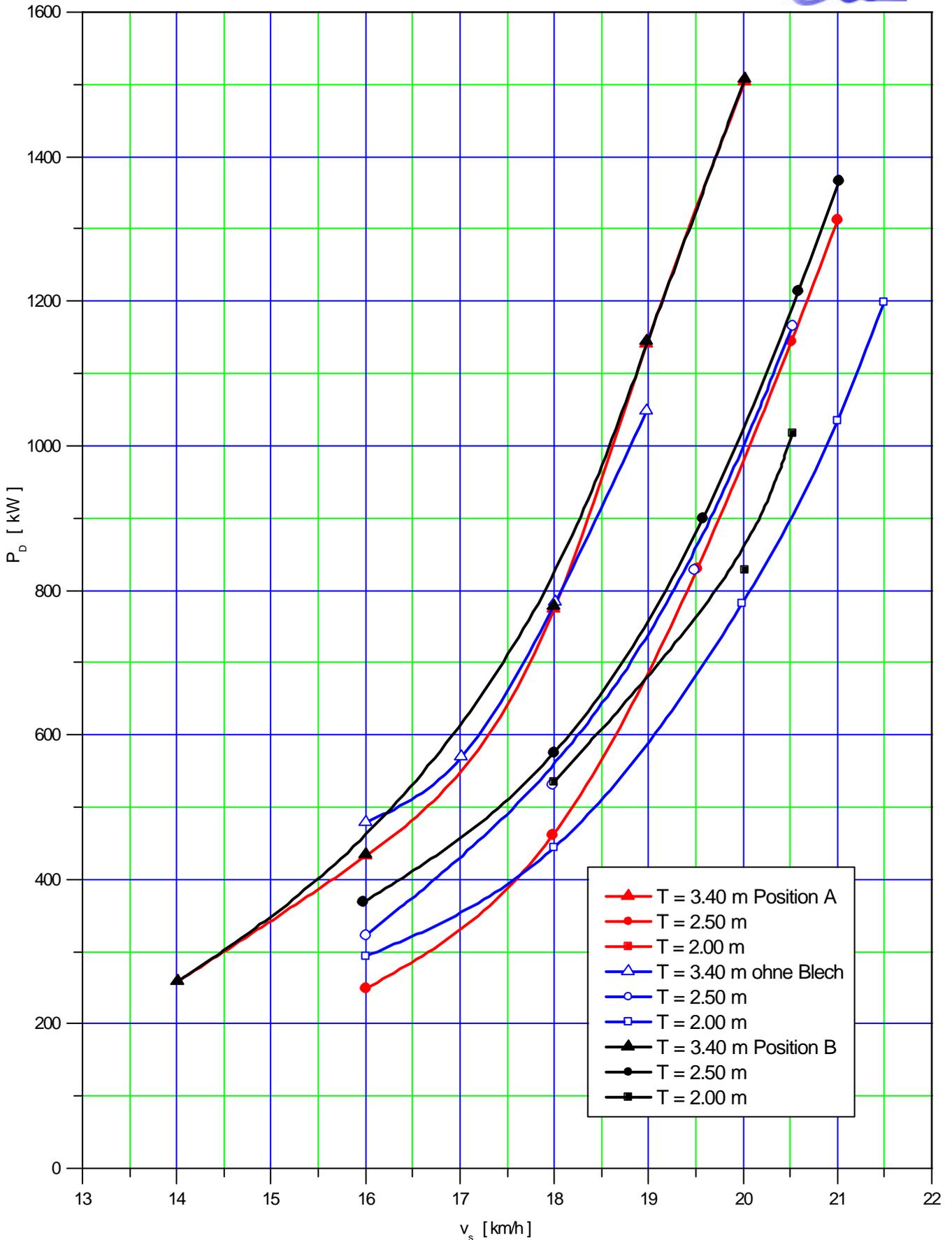


Propulsion Tests

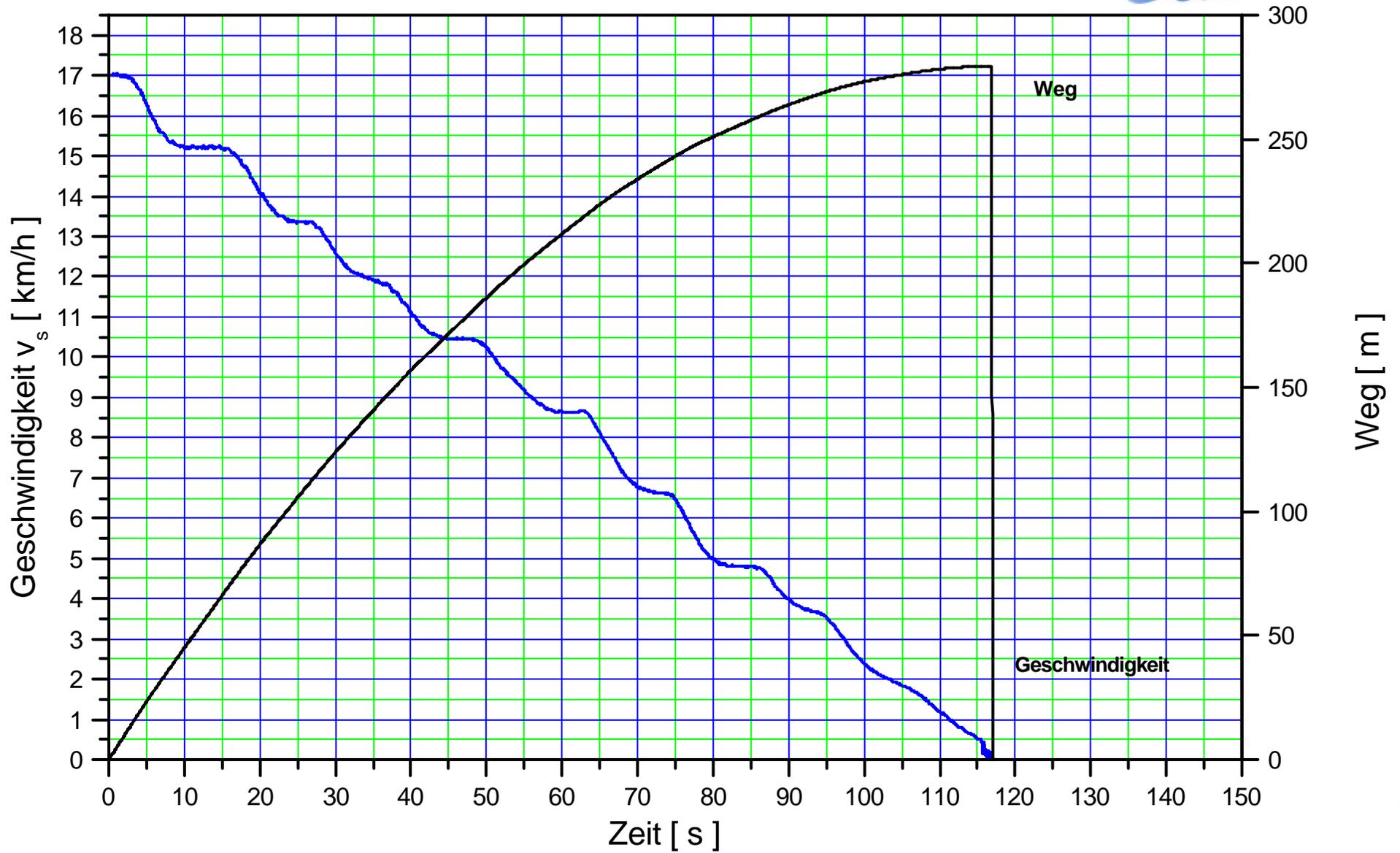
h = 5,0 m
 T = 1,70 m, 2,00 m, 2,50 m, 3,40 m
 Variante E



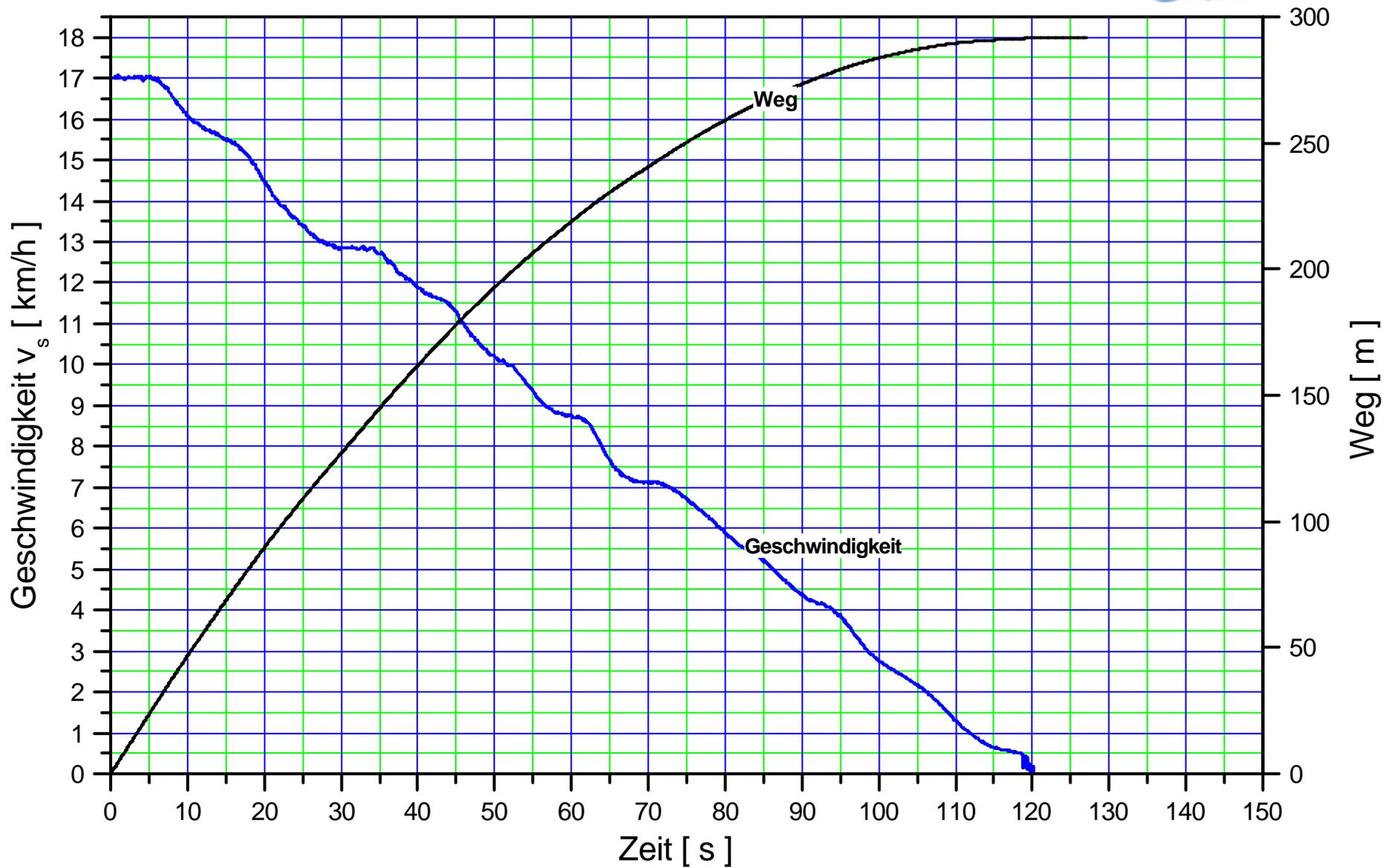
Propulsion Tests
 h = 7,5 m
 T = 2,00 m, 2,50 m, 3,40 m
 Variante E
 Vergleich der Tunnelschürzen



Stoppversuch
Version E
Wassertiefe $h = 5 \text{ m}$
Tiefgang $T = 2,5 \text{ m}$



Stoppversuch
Version BB
Wassertiefe $h = 5 \text{ m}$
Tiefgang $T = 2,5 \text{ m}$





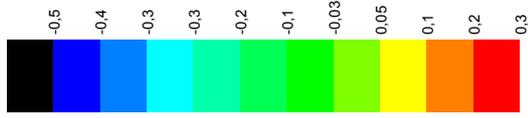
Wellenaufmessung

- Version D -

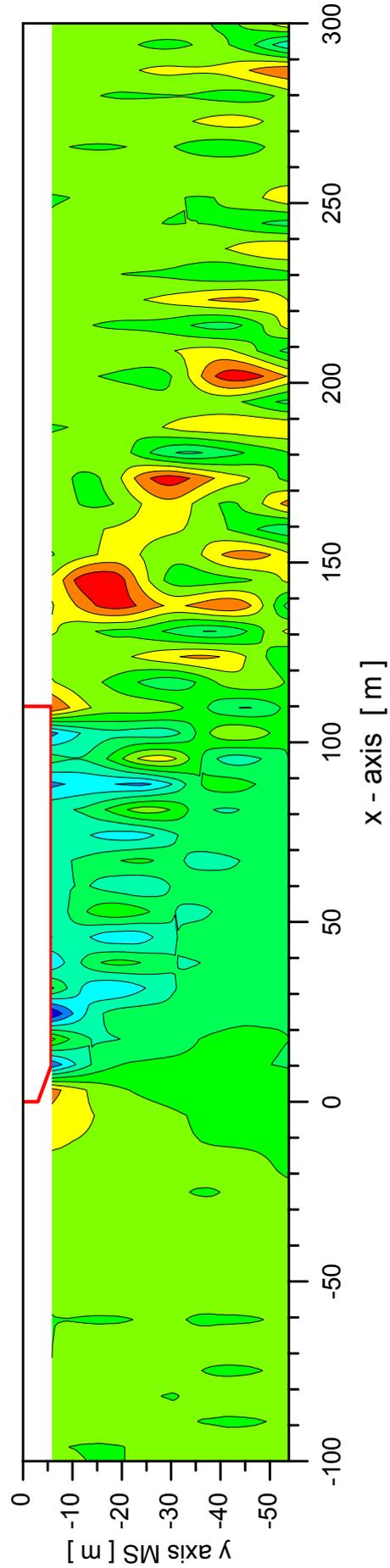
DST-Modell-Nr. M 1767
 Länge [m] 110,0
 Breite [m] 11,40
 Tiefgang [m] 2,50

Versuchs-Nr. 122 05 07
 Fahrinnenbreite [m] 157,0
 Wassertiefe [m] 5
 Geschwindigkeit [km/h] 16

Wellenhöhe [m]



LÜA. = 110 m

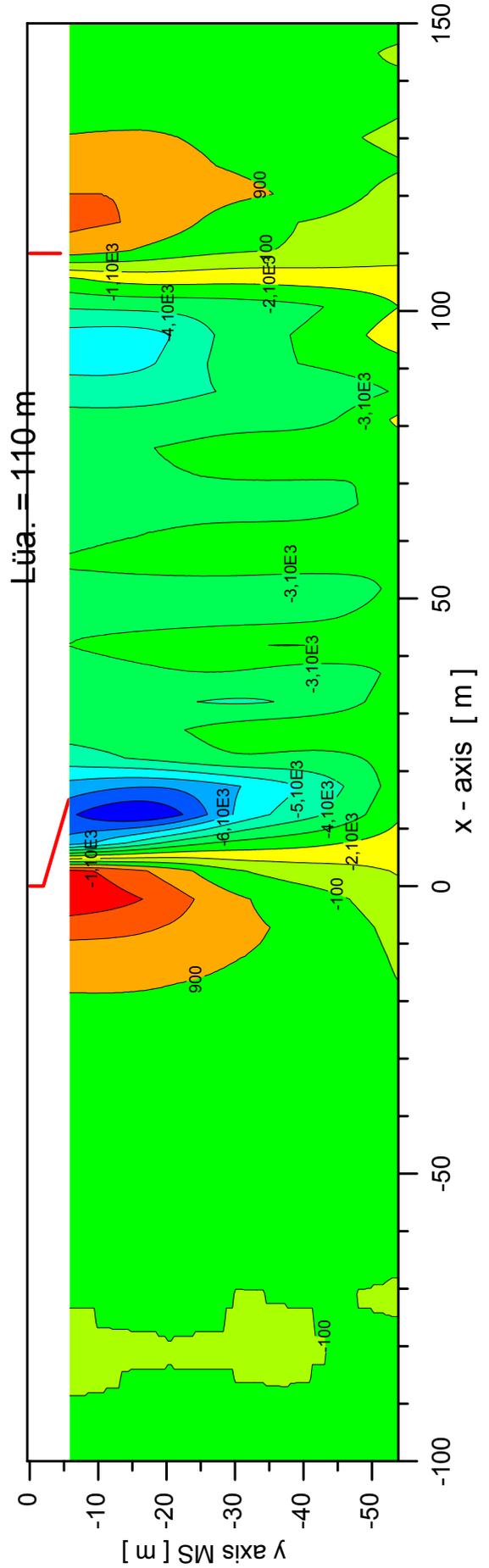
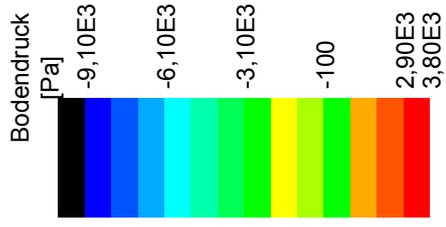




Bodendrucke Version E

DST-Model-No. M1773
 Länge [m] 110
 Breite [m] 11.40
 Tiefgang [m] 2.50

Test-No. 0518103
 Fahrinnenbreite [m] 160,0
 Tiefe [m] 5,0
 Geschwindigkeit [km/h] 16

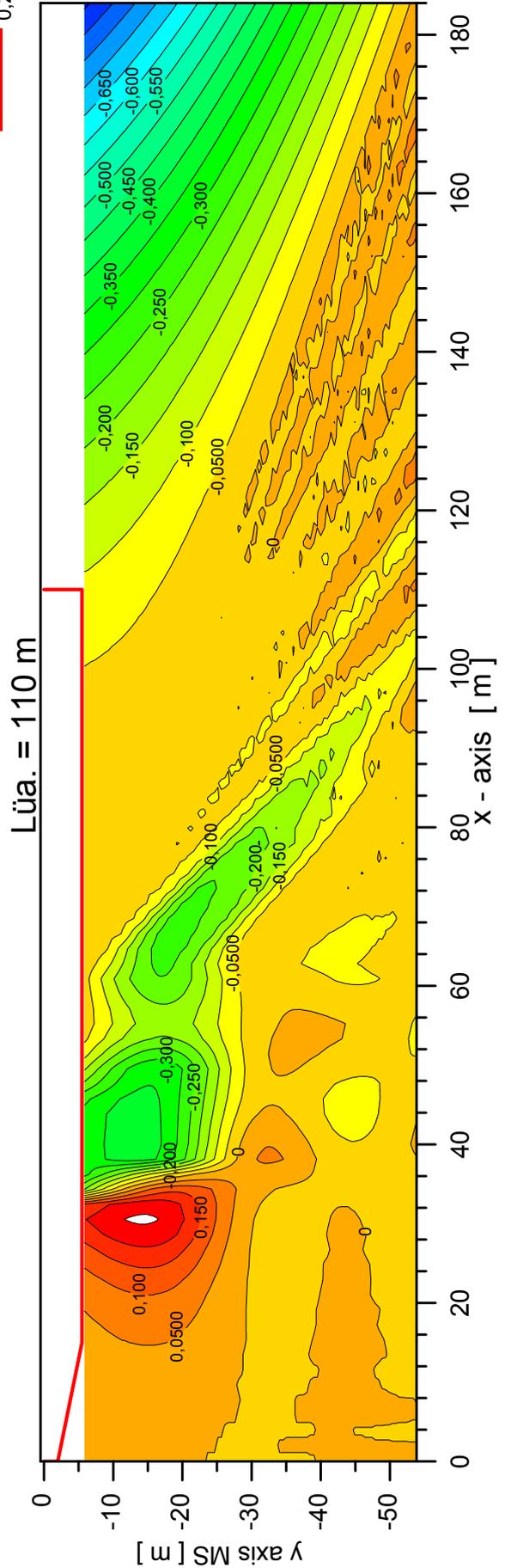
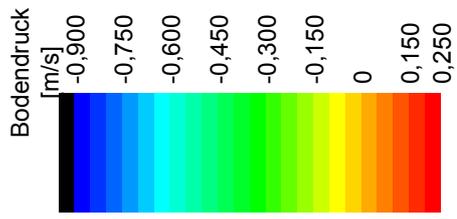




Axiale Sohlströmung Version E

DST-Model-No. M1773
 Länge [m] 110
 Breite [m] 11.40
 Tiefgang [m] 2.50

Test-No. 0518103
 Fahrrinnenbreite [m] 160,0
 Tiefe [m] 5.0
 Geschwindigkeit [km/h] 16



Version A



Seitenansicht $h = 5,0 \text{ m}$ $T = 2,5 \text{ m}$



Version A



Unterwasseransicht $h = 5,0 \text{ m}$ $T = 2,5 \text{ m}$



Version B



Seitenansicht $h = 5,0 \text{ m}$ $T = 2,5 \text{ m}$

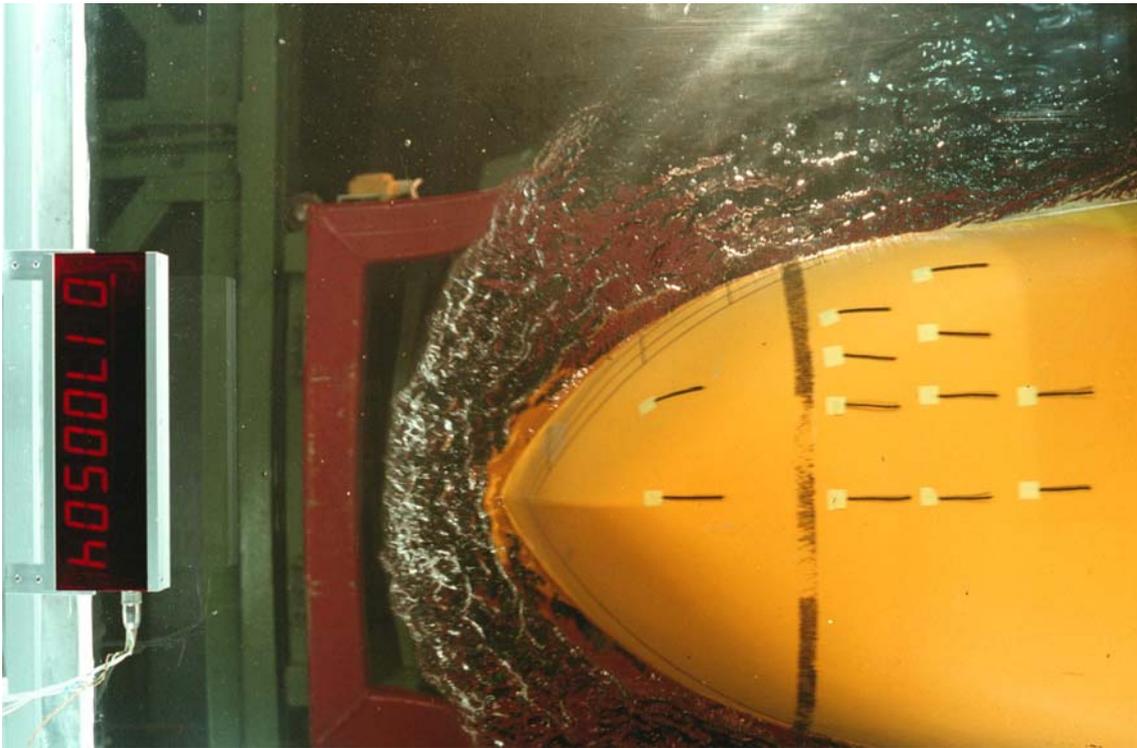


Version BB

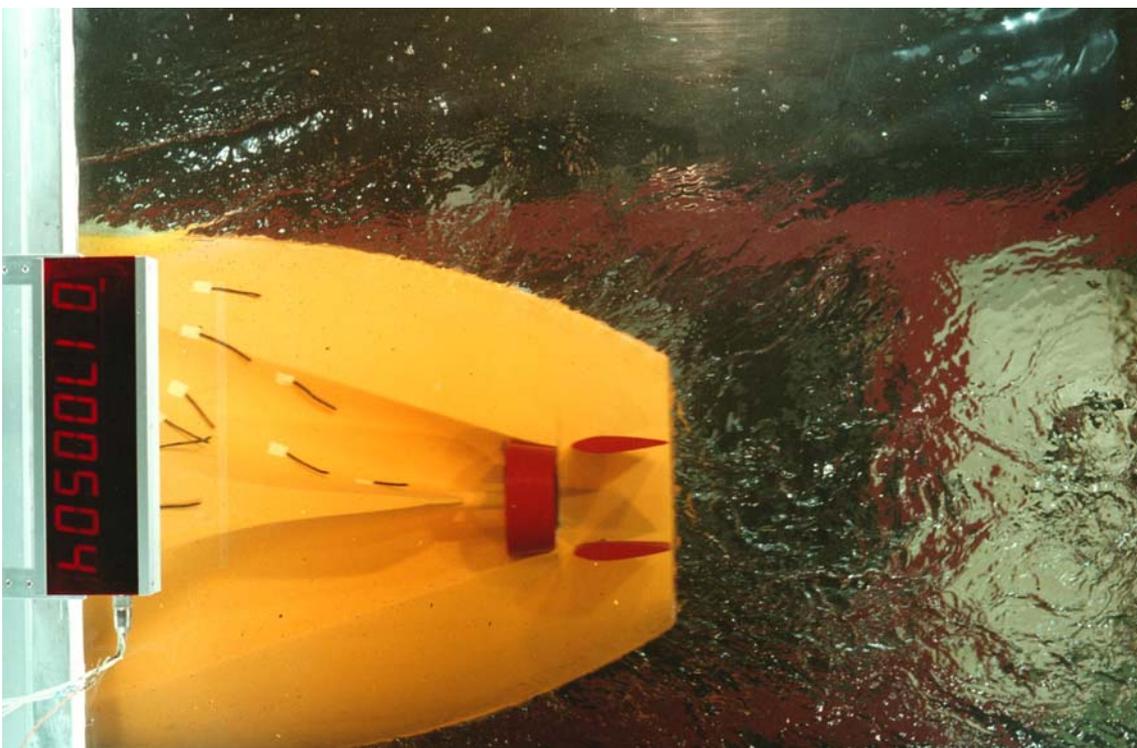


Seitenansicht $h = 5,0 \text{ m}$ $T = 2,5 \text{ m}$

Version BB



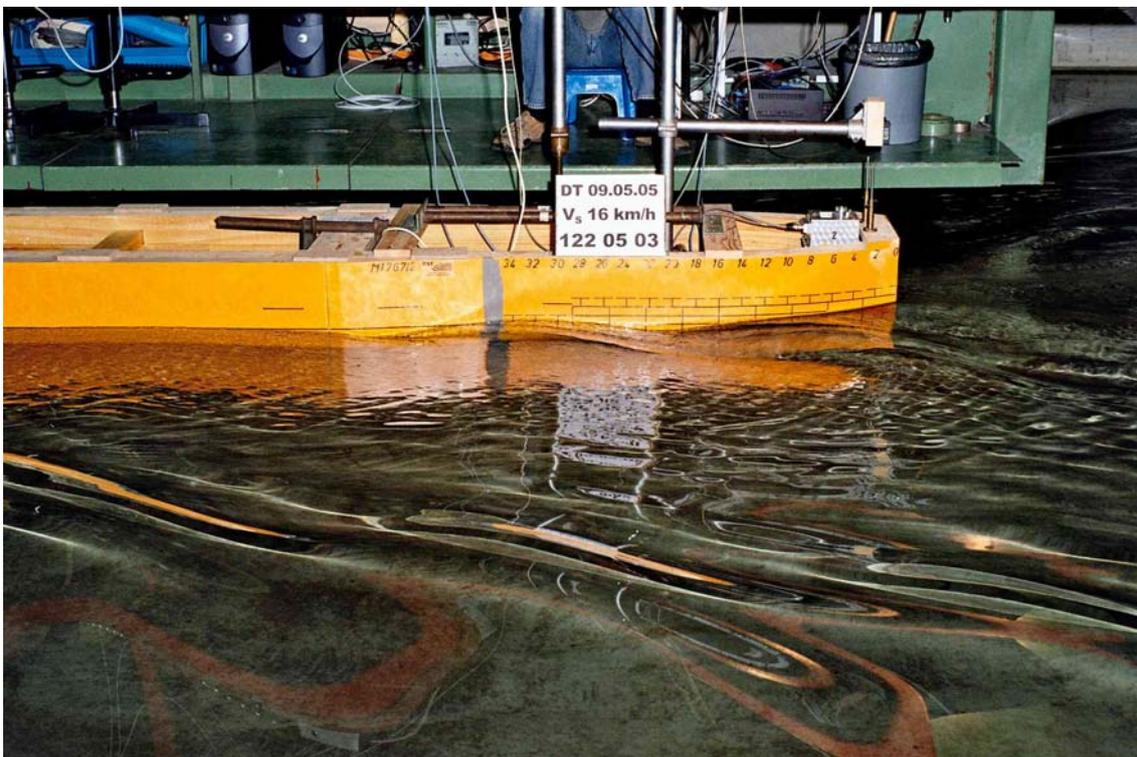
Unterwasseransicht $h = 5,0 \text{ m}$ $T = 2,5 \text{ m}$



Version D



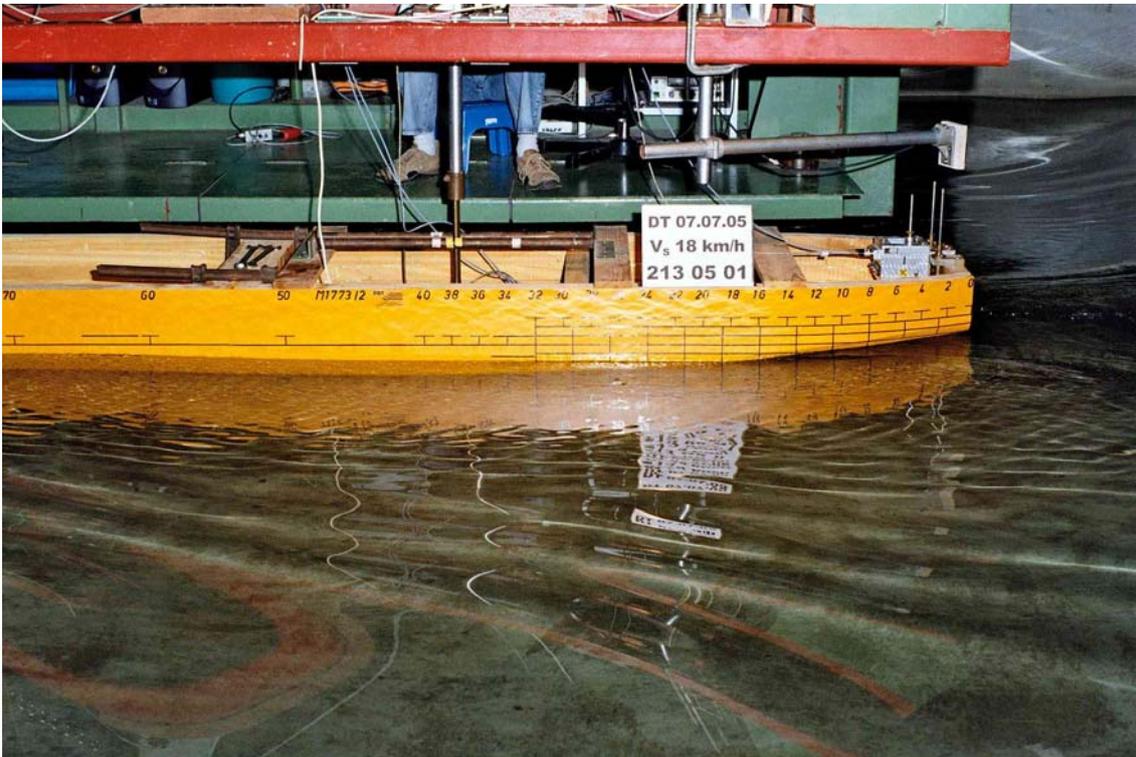
Seitenansicht h = 5,0 m T = 2,5 m



Version E ohne Blech



Seitenansicht $h = 5,0 \text{ m}$ $T = 2,5 \text{ m}$



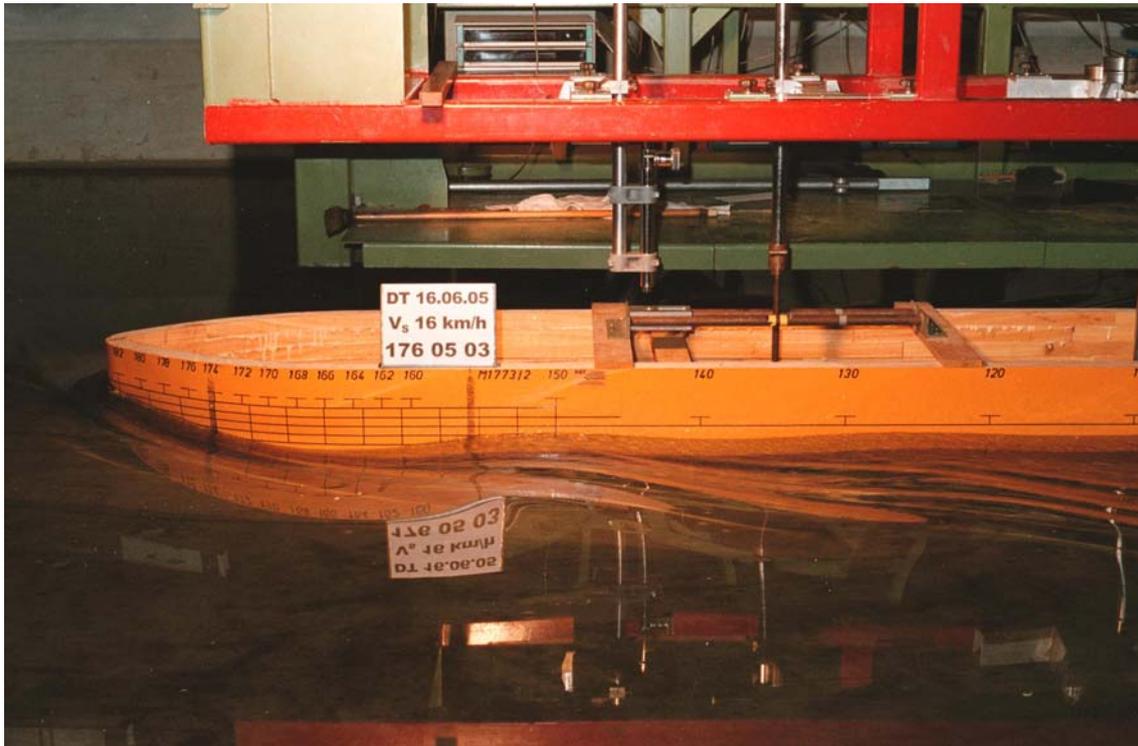
Version E ohne Blech



Unterwasseransicht $h = 5,0 \text{ m}$ $T = 2,5 \text{ m}$



Version E mit Blech



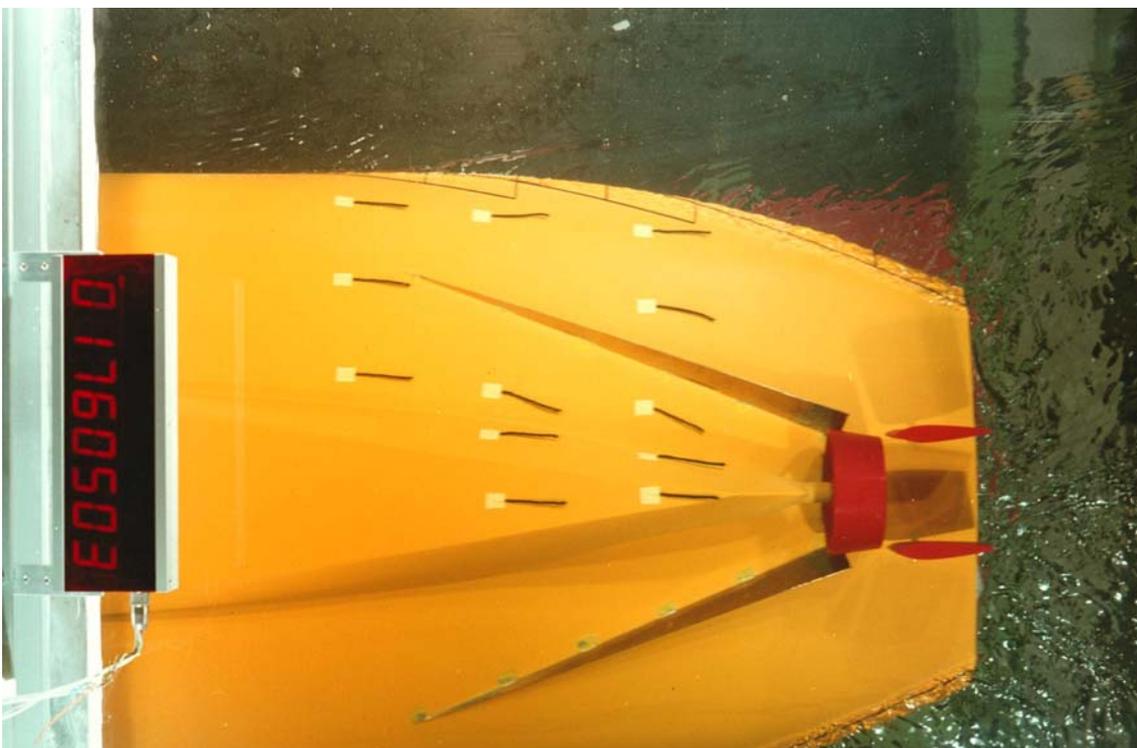
Seitenansicht h = 5,0 m T = 2,5 m



Version E mit Blech



Unterwasseransicht $h = 5,0 \text{ m}$ $T = 2,5 \text{ m}$





Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und
Transportsysteme e.V.

Untersuchungsbericht

im Auftrag des

**Ministeriums für Wirtschaft, Mittelstand und Energie
des Landes Nordrhein-Westfalen**

**Modernisierung der vorhandenen Binnenschiffsflotte durch Vergrößerung der
Hauptabmessungen, Reduzierung der Fixpunkthöhe und Austausch des
Hinterschiffs**

– Teil B: Wirtschaftliche Bewertung der Maßnahmen –

Bericht 1852 B – April 2007

von

Dipl.-Oec. Dieter Gründer

Projektleiter:
Dipl.-Ing. Joachim Zöllner

Direktor:
Prof. Dr. Paul Engelkamp

Oststr. 77e-mail:
47057 Duisburg • Germany
Tel.: ++49-203 99369-0
Fax ++49-203 361373

dst@dst-org.de Institut an der
<http://www.dst-org.de>
USt-Nr. 10958400016
USt-IdNr. DE 119553654

Universität Essen Duisburg
Standort Duisburg



Inhaltsverzeichnis

1.	Modernisierungsmaßnahmen	3
1.1	Allgemeines	3
1.2	Kosten der einzelnen Modernisierungsmaßnahmen	4
2.	Das Rechenmodell und betriebswirtschaftliche Kalkulationsgrundlagen	5
2.1	Allgemeines	5
2.1.1	Transportkosten	5
2.1.2	Transportleistung	6
2.2	Kalkulationsgrundlagen	7
2.2.1	Reisezeit und Einsatzdauer der Schiffe	7
2.2.2	Brennstoff- und Schmierölkosten	8
2.2.3	Reparatur- und Instandhaltungskosten	9
2.2.4	Personalkosten	9
2.2.5	Abschreibung	10
2.2.6	Zinssatz	12
2.2.7	Versicherungskosten	12
3.	Transportkostenvergleich	13
3.1	Allgemeines	13
3.2	Maßnahme 1: Verbreiterung durch Umbau des parallelen Mittelschiffs	15
3.3	Maßnahme 2: Verbreiterung durch Neubau des parallelen Mittelschiffs	15
3.4	Maßnahme 3: Verlängerung	16
3.5	Maßnahme 4: Verbreiterung und Verlängerung	17
3.6	Maßnahme 5: Neubau	18
3.7	Vergleich der einzelnen Maßnahmen	18
4.	Zusammenfassung	21
5.	Literatur	22

1. Modernisierungsmaßnahmen

1.1 Allgemeines

Modernisierungsmaßnahmen zielen wie Neubaumaßnahmen im Normalfall darauf ab, die technische bzw. wirtschaftliche Situation für den Schiffseigner zu verbessern. Die Wirtschaftlichkeit steht dabei im Vordergrund und ist ein wichtiger Faktor bei der Auswahl der geeigneten Maßnahmen.

Ein wesentliches Ziel von Modernisierungsmaßnahmen besteht z.B. in der Erhöhung der Tragfähigkeit. Hiermit kann – aufgrund der Tendenz, dass bei Neubauten die Abmessungen und Tragfähigkeiten im Normalfall deutlich über den Werten des Bestandes liegen – die Wettbewerbsfähigkeit erhöht oder u. U. erst wieder hergestellt werden.

Das Basis-Schiff („Version A“), das den Umbaumaßnahmen unterzogen werden soll, hat die folgenden Merkmale:

- Länge: 86 Meter
- Breite 9,46 Meter
- Tiefgang 2,70 Meter
- Tragfähigkeit 1500 Tonnen
- 1-Schrauber getunnelt

Für die hydrodynamischen Versuche wurden verschiedene Veränderungen der Hauptabmessungen dieser Ausgangsversion vorgenommen.

Die folgenden Berechnungen und Analysen greifen die wesentlichen der für die hydrodynamischen Versuche analysierten Umbaumaßnahmen auf.

Mit den Maßnahmen 1 bis 4 werden die Hauptabmessungen in verschiedener Weise vergrößert:

- Maßnahme 1 (Version B1): Verbreiterung des Mittelschiffs auf 11,40 m durch Umbau
- Maßnahme 2 (Version B2): Verbreiterung des Mittelschiffs auf 11,40 m durch Neubau des Mittelschiffs
- Maßnahme 3 (Version C): Verlängerung auf 110 m
- Maßnahme 4 (Version D): Verbreiterung auf 11,40 m und Verlängerung auf 110 m

Bei der ebenfalls untersuchten Maßnahme 5 (Version E) handelt es sich um eine Version mit verändertem Hinterschiff¹ bei gleichen Maßen wie Version D (Länge 110 m, Breite 11,4 m), wobei hier von einem Neubau ausgegangen wird.

¹ Anders als die ursprünglich untersuchte Version D verfügt das Hinterschiff der Version E nicht über eine Tunnelung, sondern über klappbare Schürzen.

1.2 Kosten der einzelnen Modernisierungsmaßnahmen

Bei der Ermittlung der Kosten für die Modernisierungsmaßnahmen wird davon ausgegangen, dass die Arbeiten in Westeuropa durchgeführt werden. Aus der erforderlichen Wertzeit zur Umsetzung der Modernisierungsmaßnahme ergeben sich die durch den Umbau bedingten Ausfalltage des Schiffes, wobei 7 Tage (1 Woche) Ausfallzeit pro 5 Werftarbeitstage zugrunde gelegt werden.

Sowohl die Kosten für die Modernisierungsmaßnahmen als auch die durch die Maßnahme verursachten zusätzlichen Ausfalltage fließen nachfolgend in die Berechnungen der Transportkosten ein.

Bei den hier zu untersuchenden Maßnahmen wird mit folgenden Kosten und Ausfallzeiten (Tab. 1) kalkuliert:

	Basisschiff (keine Maßnahme)	Umbau	Umbau	Umbau	Umbau	Neubau
Schiffsversion	A	B1	B2	C	D	E
Anzahl Ausfalltage wegen Umbauten	-	56	14	14	56	-
Kosten der Umbau- maßnahme (€)	-	450.000	700.000	590.000	1.050.000	-

Tab. 1: Anschaffungs- bzw. Maßnahmenkosten für die einzelnen Schiffsversionen

Die Maßnahmen 1 (Schiffsversion B1) und 2 (Schiffsversion B2) unterscheiden sich lediglich durch den Weg der Ausführung. Dies hat zur Folge, dass das im Endergebnis zur Verfügung stehende Schiff bei beiden Maßnahmen das gleiche ist, d.h. hier von identischen Propulsionsdaten auszugehen ist, während die Kosten der Ausführung und die erforderlichen Ausfallzeiten variieren.

Bei den Kostenabschätzungen ist zu beachten, dass die Kosten, insbesondere in Bezug auf die Stahlpreise, in hohem Maße von der aktuellen Marktlage abhängig sind und deshalb bereits innerhalb kurzer Zeiträume hohe Schwankungsbreiten aufweisen können.

2. Das Rechenmodell und betriebswirtschaftliche Kalkulationsgrundlagen

2.1 Allgemeines

Bei der wirtschaftlichen Bewertung der hier zu untersuchenden Modernisierungsmaßnahmen kommt es nicht darauf an, die Wirtschaftlichkeit der Binnenschifffahrt grundsätzlich oder die verschiedener Schiffstypen untereinander zu bewerten. Stattdessen sind die Auswirkungen der Modernisierungsmaßnahmen zu analysieren, indem die Wirtschaftlichkeit modernisierter Schiffe einem Vergleich mit der einer unveränderten – d.h. nicht modernisierten – Ausgangsversion unterzogen wird.

Zu diesem Zweck erfolgt die Ermittlung der spezifischen Kosten des Transports von Containern unter Betrachtung verschiedener Fahrtbedingungen, die im Abschnitt „Transportkostenvergleich“ näher spezifiziert sind. Dabei wird vorausgesetzt, dass genügend Ladung zur Verfügung steht, um die Schiffe sowohl auf der Hin- als auch auf der Rückreise entsprechend dem zugrunde gelegten Tiefgang vollständig zu beladen.

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

Beide Größen werden von den Modernisierungsmaßnahmen beeinflusst und verändern damit die spezifischen Transportkosten. Die Ermittlung der spezifischen Transportkosten erfolgt

- a) beim Vergleichsschiff, bei dem keine Maßnahme durchgeführt wird sowie
- b) für jede einzelne Modernisierungsmaßnahme bzw. Maßnahmenkombination.

2.1.1 Transportkosten

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

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

- wegeabhängige Kosten; hier werden die durch das Fahren des Schiffes verursachten Kosten ausgewiesen. Darunter fallen z.B. die Treibstoff- und Schmierstoffkosten sowie ein Teil der Reparaturkosten (nutzungsabhängig).
- wegeunabhängige Kosten; hierunter fallen z.B.:
 - o Personalkosten
 - o Reparaturkosten (zeitabhängig).
 - o Versicherung

- Abschreibung
- Zinsen.

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

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

- die jährlichen Gesamtkosten.

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

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

2.1.2 Transportleistung

In dieser Untersuchung bezieht sich die Transportleistung auf den Transport von Containern. Wenn andere Güter, z.B. Massengüter, transportiert werden sollen, können sich u.U. andere Ergebnisse bei der Bewertung der Modernisierungsmaßnahmen ergeben.

Die Transportleistung pro Jahr ergibt sich aus der

- Anzahl der Umläufe bzw. Reisen pro Jahr (s.o.)
- Transportmenge in Abhängigkeit des Tiefgangs
- Transportentfernung pro Umlauf.

Tab. 2 zeigt, dass durch Verbreiterung bzw. Verlängerung ein deutlicher Zuwachs an Containerstellplatzkapazität erfolgt, wobei eine Verbreiterung im Hinblick auf die Vergrößerung der Stellplatzkapazität noch einen deutlich stärkeren Zuwachs als die Verlängerungsmaßnahme erbringt, was in hohem Maße darauf zurückzuführen ist, dass die Verbreiterungsmaßnahme nicht nur die Beladung mit einer zusätzlichen Containerreihe erlaubt, sondern dadurch auch eine zusätzliche Containerlage möglich ist.

Schiffsversion	Anzahl Container-Lagen	Anzahl Container-Reihen	Länge einer Container-Reihe (TEU)	Anzahl Containerstellplätze (TEU)
A	3	3	9	81
B1	4	4	9	144
B2	4	4	9	144
C	3	3	13	117
D	4	4	13	208
E	4	4	13	208

Tab. 2: Containerstellplatzkapazität der einzelnen Schiffsversionen

2.2 Kalkulationsgrundlagen

Im Folgenden werden die wesentlichen Kalkulationsgrundlagen und deren hier verwendete Ausprägungen erörtert.

2.2.1 Reisezeit und Einsatzdauer der Schiffe

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

Die Reisezeit setzt sich zusammen aus

- Fahrzeit zwischen Be- und Entladehafen
- Lade- und Löschzeit im Hafen
- Dispositionszeit sowie
- Zeitbedarf für eventuelle Schleusungen.

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

Die Lade- und Löschzeit wird bestimmt durch die Größe der im Hafen umzuschlagenden Ladung des Schiffes und die Umschlagkapazität der Verladeanlagen. Als Umschlagkapazität je Containerbrücke oder –kran werden 2 Minuten pro Box zugrunde gelegt.

Der sich hieraus ergebende Zeitbedarf tritt sowohl beim Laden als auch beim Löschen, d.h. zweimal pro Reise auf.

Eng verbunden mit der Lade- und Löschzeit sind Puffer-, Warte- und Navigationszeiten. Diese sind als Zeiten zu verstehen, die im Hafen neben der reinen Be- und Entladezeit

anfallen (z.B. für Anfahrten zu verschiedenen Terminals). Diese Zeiten sind bei größeren Schiffen tendenziell höher als bei kleineren und werden berücksichtigt, indem auf die reinen Umschlagszeiten pauschal weitere 30 % aufgeschlagen werden.

Auch die Zeit der Schleusungen beeinflusst die Reisezeit. Sie wird mit je 1 Stunde pro Schleusung veranschlagt.

Als Einsatzzeit werden 350 Tage pro Jahr zugrunde gelegt. Im Jahr des Umbaus haben die Schiffsversionen, die einer Umbaumaßnahme unterzogen werden eine um die Umbauzeit verringerte Einsatzdauer. In den Folgejahren ist jedoch wieder von der o.a. regulären Einsatzzeit auszugehen.

2.2.2 Brennstoff- und Schmierölkosten

Der Brennstoffpreis hat einen wesentlichen Einfluss auf die Transportkosten. Die hier betrachteten Schiffe bzw. Schiffsversionen beginnen und beenden ihre Rundreise in Rotterdam. Aus diesem Grund wird vorausgesetzt, dass der größere Teil des jeweils benötigten Brennstoffs in Rotterdam übernommen wird. Abb. 1 zeigt die Entwicklung des Brennstoffpreises von Juni 2004 bis Juni 2006 in Rotterdam. Insgesamt ist eine deutliche Steigerung festzustellen.

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

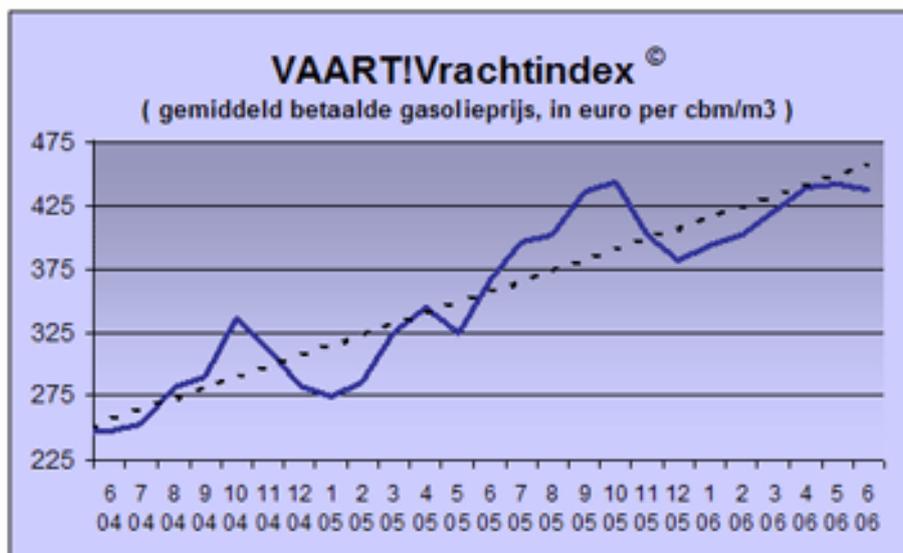


Abb. 1: Entwicklung des Brennstoffpreises in Rotterdam von Juni 2004 bis Juni 2006 [1]

Als Schmierstoffkosten werden 3 % der Treibstoffkosten angesetzt.

2.2.3 Reparatur- und Instandhaltungskosten

Gerade bei älteren Fahrzeugen können die Reparatur- und Instandhaltungskosten deutlich schwanken. Der hier verwendete Wert von 25 €/max. Tragfähigkeitstonne wird für Schiffe mit einem Alter zwischen 10 und 20 Jahren zugrunde gelegt und im Übrigen wie folgt differenziert:

- das 1,5-fache bei einem Alter ab 20 Jahren
- das 0,5-fache bei einem Alter von bis zu 10 Jahren

Diese Angaben sind als grobe Richtwerte zu verstehen.

2.2.4 Personalkosten

Die Personalkosten eines Schiffes richten sich nach der Betriebsform, der Besatzungsstärke, der Besatzungsstruktur und den Gehältern der Besatzung.

a) Gehälter

Bei den Personalkosten erfolgt eine Orientierung an den in der Planco-Studie „Potenziale und Zukunft der deutschen Binnenschifffahrt“ [2] dargestellten Angaben. Diese wurden zunächst mit der allgemeinen Einkommensentwicklung fortgeschrieben; auf der so ermittelten Basis wurden Zuschläge für Urlaubs- und Weihnachtsgeld, Sozialabgaben und Springermannschaft eingerechnet.

b) Betriebsform, Besatzungsstärke und Besatzungsstruktur

Für alle Schiffsversionen wird in dieser Untersuchung angenommen, dass sie auf dem Rhein operieren; daher erfolgt die Festlegung der Besatzungsstärke und der Besatzungsstruktur nach der Rheinschiffs-Untersuchungsordnung (RheinSchUO) [3]. Hier wird zwischen drei Betriebsformen unterschieden:

A1: Fahrt bis zu 14 Stunden

A2: Fahrt bis zu 18 Stunden

B: Fahrt bis zu 24 Stunden

(jeweils innerhalb eines Zeitraums von 24 Stunden)

Abhängig von der gewählten Betriebsform sind gemäß [3] die Besatzungsstärken vorgeschrieben. Die festgelegte Betriebsform und die sich ergebenden Besatzungsstärken und Besatzungsstrukturen sind nachfolgend in Tab. 3 vereinfacht zusammengefasst.

Schiffsversion	Betriebsform	Kapitän / Schiffsführer	Steuermann	Bootsmann, Matrose
A	B (24 Std.)	2	0	2
B1	B (24 Std.)	2	0	2
B2	B (24 Std.)	2	0	2
C	B (24 Std.)	2	1	1
D	B (24 Std.)	2	1	1
E	B (24 Std.)	2	1	1

Tab. 3: Betriebsformen, Besatzungsstärken und Besatzungsstruktur (vereinfacht) für die verschiedenen Schiffsversionen

2.2.5 Abschreibung

Bei der Festlegung der Abschreibungsgröße stellt sich zunächst die Frage nach den Herstellkosten bzw. bei einem existierendem Schiff nach dem Restwert des Schiffes. Weiterhin von Bedeutung ist der Abschreibungszeitraum, der von der voraussichtlichen Nutzungsdauer des Schiffs abhängig ist.

Bei der Festlegung des Restwertes des Basisschiffs A sowie der Schiffsversion E (Neubau) wird zunächst von den o.a. Anschaffungskosten ausgegangen (vgl. Tab. 1 Anschaffungs- bzw. Maßnahmenkosten für die einzelnen Schiffsversionen).

Der Restwert eines existierendem Schiffes ist in starkem Maße von dessen Alter und „Erhaltungszustand“ abhängig. Des Weiteren wird der Restwert beeinflusst von der Frage, inwieweit in der Vergangenheit und in Zukunft verstärkt größere und leistungsfähigere Schiffseinheiten in den Markt kommen oder noch zu erwarten sind.

Für das Basisschiff A wird ein Alter von 28 Jahren zugrunde gelegt, was bei einer Gesamtnutzungsdauer von 40 Jahren eine Restnutzungsdauer von 12 Jahren ergibt.

Das gleiche Schiffsalter wird auch für die Versionen angesetzt, die Verlängerungs- bzw. Verbreiterungsmaßnahmen unterzogen werden (B1, B2, C, D). Bei Schiffen mit diesen Maßnahmen ist eine Verbesserung der Wettbewerbsposition zu erwarten; deshalb wird hier eine Verlängerung der Restnutzungsdauern in Höhe

- von fünf Jahren bei Verbreiterung oder Verlängerung bzw.
- von zehn Jahren bei Verbreiterung und Verlängerung

unterstellt. Das Schiff E ist ein Neubau, hier wird von 40 Jahren Nutzungsdauer ausgegangen.

Auf Basis des Anschaffungspreises und der bisherigen Nutzungsdauer (lineare kalkulatorische Abschreibung von 2,5 % p.a.) ergibt sich für die Version A ein Restwert vor Umbau von 600.000 €.

Auch bei den Versionen B, C und D ist dies zunächst der Ausgangspunkt; hinzugerechnet werden jedoch die jeweiligen Maßnahmenkosten sowie die Kosten für Ausfalltage für die Realisierung der Umbauten. Als Tageskosten für ein nicht im Einsatz befindliches Schiff werden 500 € angesetzt (Tab. 4).

	Basisschiff (keine Maßnahme)	Umbau	Umbau	Umbau	Umbau	Neubau
Schiffsversion	A	B1	B2	C	D	E
Urspr. Anschaffungskosten aus Kundensicht (€)	2.000.000	2.000.000	2.000.000	2.000.000	2.000.000	4.000.000
Anzahl Ausfalltage wegen Umbauten	-	56	14	14	56	-
Restwert vor Umbau (€)	600.000	600.000	600.000	600.000	600.000	4.000.000
Kosten der Umbau-Maßnahme (€)	-	450.000	700.000	590.000	1.050.000	-
Kosten der Ausfallzeit (500 € pro Ausfalltag (€))	-	28.000	7.000	7.000	28.000	-
Gesamter Restwert nach Umbau (€)	600.000	1.078.000	1.307.000	1.197.000	1.678.000	4.000.000
Restnutzungsdauer vor Umbau (Jahre)	12	12	12	12	12	40
Zusätzliche Nutzungsdauer aufgr. Umbau (Jahre)	0	5	5	5	10	0
Gesamte Restnutzungsdauer nach Umbau (Jahre)	12	17	17	17	22	40

Tab. 4: Gesamtrestwerte und –nutzungsdauern unter Berücksichtigung von Umbaukosten und -zeiten

2.2.6 Zinssatz

Als Zinssatz werden 6 % festgelegt. In Anlehnung an die Empfehlung in [4] wird der Zinssatz vereinfachend auf 50 % der Abschreibungssumme erhoben.

2.2.7 Versicherungskosten

Bei den Versicherungskosten, die mit 12 €/max. Tragfähigkeitstonne angesetzt werden, handelt es sich ebenfalls um einen Richtwert, der auf den Kalkulationsrichtlinien von [4] basiert.

3. Transportkostenvergleich

3.1 Allgemeines

In diesem Abschnitt geht es nicht darum, die Transportkosten der Binnenschifffahrt grundsätzlich oder die der verschiedenen Schiffstypen auf unterschiedlichen Relationen miteinander zu vergleichen, sondern ausschließlich darum, den Einfluss verschiedener Umbaumaßnahmen auf die Transportkosten zu verdeutlichen. Zu diesem Zweck wird unterstellt, dass die einzelnen Maßnahmen am Basisschiff (Version A) vorgenommen werden. Die sich aus den Berechnungen ergebenden Transportkosten werden mit denen eines unveränderten Basisschiffs verglichen. Eine Umbaumaßnahme kann dann als erfolgreich betrachtet werden, wenn die spezifischen Transportkosten bei einem umgebauten Schiff niedriger als beim Basisschiff sind. Ein Sonderfall ist die Version E, da es sich hierbei um einen Neubau handelt, der dann mit einem älteren und kleineren Schiffstyp zu vergleichen ist.

Die den Berechnungen zugrunde gelegten alternativen Rahmenbedingungen umfassen in einem ersten Schritt zunächst (annähernd) ideale Fahrtverhältnisse („Basisrechnung“ (1)), wie tiefes Fahrwasser und geringes Containerdurchschnittsgewicht. Potenzielle Einschränkungen durch ungünstige Infrastrukturverhältnisse werden zunächst einmal ausgeblendet und eine neutrale Vergleichsgrundlage für die verschiedenen Schiffsversionen bzw. Umbaumaßnahmen geschaffen. Die weiteren Berechnungen beinhalten dann zunehmend suboptimale Rahmenbedingungen wie sie auf verschiedenen Wasserstraßen – z.T. temporär – gegeben sind.

Die die verschiedenen Berechnungen differenzierenden Parameter sind hier:

- a) Fahrwassertiefe
- b) Geschwindigkeit
- c) Durchschnittliches Containergewicht
- d) Containerstellplatz-Auslastungsgrad

Während b) in gewissem Maße von a) abhängig ist, bestehen zwischen c) und d) Interdependenzen.

Die folgende Tab. 5 zeigt die den durchgeführten Berechnungen zugrunde liegenden Eckdaten-Kombinationen:

Berechnungsfall →	(1) (Basis)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
H=7,5	X	X						
H=5,0			X	X				
H=3,5					X	X	X	X
v=18	X	X						
v=16			X	X				
v=14					X	X	X	X
t/TEU=12	X		X		X		X	
t/TEU=14		X		X		X		X
Auslastungsgrad=100% ²	X	X	X	X				
Auslastungsgrad =70%					X	X		
Auslastungsgrad bis T=2,5 ³							X	X

H Fahrwassertiefe in Metern
v Geschwindigkeit in km/h
t/TEU Durchschnittliches Containergewicht in Tonnen pro TEU

Tab. 5: Hauptmerkmale der einzelnen Berechnungsfälle

Für die Berechnungen wird ein Umlauf mit 1000 km Gesamtstrecke unterstellt, die Strömungsgeschwindigkeit im Fahrwasser beträgt 4 km/h.

Im Folgenden werden die Umbaumaßnahmen separat für die einzelnen Berechnungsfälle betrachtet und die Ergebnisse denen eines unveränderten Basisschiffs gegenüber gestellt.

² Es wird der maximal mögliche Auslastungsgrad angesetzt, wenn die Tragfähigkeit bei dem gewählten Containergewicht keine 100%-Auslastung zulässt.

³ Zwar ist die zugrunde gelegte Fahrwassertiefe 3,5 m, doch liegt diesen Berechnungsfällen die Annahme zugrunde, dass auf einem Teil der Fahrtstrecke ein Engpass gegeben ist, der nicht mehr als diesen Maximal-Tiefgang erlaubt.

3.2 Maßnahme 1: Verbreiterung durch Umbau des parallelen Mittelschiffs

Die Vergleichsergebnisse für die Maßnahme Verbreiterung durch Umbau des Mittelschiffs sind in Tab. 6 wiedergegeben.

Berechnungsfall	Basisschiff (Version A)	Maßnahme 1 (Version B1)	
		Cent / TEU-km	% i.V. zum Basisschiff A
(1)	8,6	7,5	-12,5
(2)	8,7	8,3	-4,4
(3)	8,2	7,0	-14,2
(4)	8,4	7,8	-6,7
(5)	10,3	8,4	-18,3
(6)	10,6	9,2	-13,0
(7)	8,4	8,1	-3,4
(8)	8,7	9,0	4,3

Tab. 6: Kostenvergleich Maßnahme 1 im Vergleich zum Basisschiff

Die spezifischen Transportkosten liegen bei der Version B1 mit Ausnahme des Berechnungsfalls (8) durchgängig unter denen des Basisschiffs. Dabei werden die größten Kostendifferenzen in den Fällen mit leichten Containern sowie bei einer Stellplatzauslastung von 70 % erreicht. Allein im Fall (8), d.h. unter sehr ungünstigen Fahrtbedingungen, schneidet die Version B1 mit ca. 4 % höheren Kosten (9,0 vs. 8,7 Cent) ungünstiger als das Basisschiff ab.

3.3 Maßnahme 2: Verbreiterung durch Neubau des parallelen Mittelschiffs

Erfolgt die Verbreiterung anstatt durch einen Umbau durch einen Neubau des Mittelschiffs, stellen sich die Vergleichsergebnisse wie folgt dar (Tab. 7):

Berechnungsfall	Basisschiff (Version A)	Maßnahme 2 (Version B2)	
		Cent / TEU-km	% i.V. zum Basisschiff A
(1)	8,6	7,7	-10,8
(2)	8,7	8,5	-2,4
(3)	8,2	7,2	-12,2
(4)	8,4	8,0	-4,6
(5)	10,3	8,6	-16,1
(6)	10,6	9,4	-10,8
(7)	8,4	8,3	-1,1
(8)	8,7	9,3	6,9

Tab. 7: Kostenvergleich Maßnahme 2 im Vergleich zum Basisschiff

Bei der Maßnahme 2 zeigt sich das gleiche Bild wie bei Maßnahme 1 – jedoch jetzt bei einer Kostendifferenz, die sich um ca. zwei Prozentpunkte zugunsten des Basisschiffs (Version A) verschoben hat. Auch hier schneidet die Version B2 allein im Berechnungsfall (8) ungünstiger als das Basisschiff ab. Im Fall (7) ist nur noch ein knapper Kostenvorteil von ca. 1 % gegeben.

Die im Vergleich zur Maßnahme 1 durchgängig um etwa zwei Prozentpunkte ungünstigere Kostendifferenz zur unveränderten Basisversion resultiert allein aus den gegenüber der Maßnahme 1 um gut 200.000 € höheren Investitionskosten der Maßnahme 2.

3.4 Maßnahme 3: Verlängerung

Die Verlängerung des Basisschiffs auf 110 m stellt sich in den Ergebnissen durchweg positiv dar (Tab. 8):

Berechnungsfall	Basisschiff (Version A)	Maßnahme 3 (Version C)	
		Cent / TEU-km	% i.V. zum Basisschiff A
(1)	8,6	7,9	-8,5
(2)	8,7	8,1	-7,6
(3)	8,2	7,6	-7,0
(4)	8,4	7,7	-7,6
(5)	10,3	9,7	-6,0
(6)	10,6	9,9	-6,5
(7)	8,4	7,9	-5,6
(8)	8,7	8,4	-3,2

Tab. 8: Kostenvergleich Maßnahme 3 im Vergleich zum Basisschiff

Die Maßnahme 3, Verlängerung des Basisschiffs auf 110 m, zeigt eindeutig und in allen Berechnungsfällen Kostenvorteile auf, die im Schwerpunkt etwa sechs bis acht Prozent betragen. Unter besonders ungünstigen Fahrtbedingungen ist der Kostenvorteil mit etwa 3 % etwas geringer.

3.5 Maßnahme 4: Verbreiterung und Verlängerung

Diese Maßnahme kombiniert die o.a. Maßnahmen 1 und 3, die Ergebnisse sind in Tab. 9 wiedergegeben.

Berechnungsfall	Basisschiff (Version A)	Maßnahme 4 (Version D)	
		Cent / TEU-km	% i.V. zum Basisschiff A
(1)	8,6	6,9	-19,8
(2)	8,7	7,1	-18,4
(3)	8,2	7,1	-13,1
(4)	8,4	7,5	-9,8
(5)	10,3	8,3	-19,7
(6)	10,6	8,8	-16,6
(7)	8,4	8,3	-1,6
(8)	8,7	9,2	5,7

Tab. 9: Kostenvergleich Maßnahme 4 im Vergleich zum Basisschiff

Die Kostenvorteile der Version D sind in den Berechnungsfällen (1) bis (6) sehr deutlich – teilweise erreichen sie eine Größenordnung von annähernd 20 %. Während diese Version bei einer Stellplatzauslastung von etwa 72 % im Fall (7) noch einen geringen Vorteil von knapp 2 % erzielt, ist die Auslastung im Fall (8) mit 62 % so gering, dass hier ein Kostennachteil von knapp 6 % zu verzeichnen ist.

3.6 Maßnahme 5: Neubau

Anders als die ursprünglich den Modellversuchen zugrunde liegende Version hat das Hinterschiff der hier untersuchten Version E keine Schürzen, sondern eine leichte Tunnelung. Tab. 10 zeigt die ermittelten Kostenvergleichsergebnisse.

Berechnungsfall	Basisschiff (Version A)	Maßnahme 5 (Version E): Neubau	
		Cent / TEU-km	% i.V. zum Basisschiff A
(1)	8,6	7,4	-13,7
(2)	8,7	7,6	-13,3
(3)	8,2	7,9	-3,2
(4)	8,4	8,3	-0,9
(5)	10,3	9,8	-4,7
(6)	10,6	10,7	1,6
(7)	8,4	9,8	16,7
(8)	8,7	10,9	25,6

Tab. 10: Kostenvergleich Maßnahme 5 im Vergleich zum Basisschiff

Unter den recht günstigen Fahrtbedingungen (1) und (2) erzielt die Version E Kostenvorteile von 13 bis 14 %. Diese verringern sich unter den Einsatzbedingungen (3), (4) und (5) auf 1 bis knapp 5 %. Unter den Bedingungen der Fälle (7) und (8), die nur eine Beladung bis maximal 2,50 m Tiefgang – und damit wie bei der Version D eine Stellplatzauslastung von nur 72 bzw. 62 % – zulassen, kommt die Version E auf erhebliche Kostennachteile in Höhe von ca. 17 (Fall 7) bzw. 26 % (Fall 8).

3.7 Vergleich der einzelnen Maßnahmen

In der folgenden Tab. 11 werden die spezifischen Transportkosten der einzelnen Maßnahmen einander gegenüber gestellt:

Berechnungsfall	Maßnahme 1 (Version B1)	Maßnahme 2 (Version B2)	Maßnahme 3 (Version C)	Maßnahme 4 (Version D)	Maßnahme 5 (Version E) Neubau
(1)	7,5	7,7	7,9	6,9	7,4
(2)	8,3	8,5	8,1	7,1	7,6
(3)	7,0	7,2	7,6	7,1	7,9
(4)	7,8	8,0	7,7	7,5	8,3
(5)	8,4	8,6	9,7	8,3	9,8
(6)	9,2	9,4	9,9	8,8	10,7
(7)	8,1	8,3	7,9	8,3	9,8
(8)	9,0	9,3	8,4	9,2	10,9

Tab. 11: Vergleich der einzelnen Maßnahmen (Kosten pro TEU-km)

Zur besseren Vergleichbarkeit werden die o.a. Kostensätze in der folgenden Tab. 12 zusätzlich als Indexwerte – bezogen auf die Basisversion A (=100) – dargestellt:

Berechnungsfall	Maßnahme 1 (Version B1)	Maßnahme 2 (Version B2)	Maßnahme 3 (Version C)	Maßnahme 4 (Version D)	Maßnahme 5 (Version E) Neubau
(1)	87	89	92	80	86
(2)	96	98	92	82	87
(3)	86	88	93	87	97
(4)	93	95	92	90	99
(5)	82	84	94	80	95
(6)	87	89	94	83	102
(7)	97	99	94	99	117
(8)	104	107	97	106	126

Tab. 12: Vergleich der einzelnen Maßnahmen (Kosten pro TEU-km: Index Version A = 100)

Die Umbaumaßnahmen 1 und 2 (Schiffsversionen B1 und B2) führen letztendlich zu dem gleichen Schiff und unterscheiden sich lediglich durch die Vorgehensweise beim Umbau (s.o.). Da die Investitionskosten bei Maßnahme 2 etwas geringer sind, hat die Version B2 durchgängig um 0,2 bis 0,3 Cent bzw. um ca. zwei bis drei Prozent niedrigere spezifische Transportkosten als die Version B1.

Im Falle der B-Versionen wurde die Containerstellplatzkapazität deutlich stärker als bei der C-Version vergrößert. Dieser größere Kapazitätzuwachs kann im Falle schwerer Container (Fälle 2 und 4) sowie ungünstiger Fahrtbedingungen (Fälle 7 und 8) nicht in günstigere Transportkosten pro Einheit umgesetzt werden, weil der in diesen Fällen erreichbare Auslastungsgrad der B-Versionen deutlich unter dem der C-Version liegt. Die

Version C weist von allen Schiffen bei ungünstigen Fahrtbedingungen (Fälle 7 und 8) die niedrigsten Kostensätze auf.

Die Version D erzielt in den Berechnungsfällen (1) bis (6) die niedrigsten oder zumindest mit die niedrigsten spezifischen Transportkosten aller Schiffe. Unter den für große Schiffe eher ungünstigen Einsatzbedingungen (7) und (8) erzielt es nur geringfügig schlechtere Werte als die Version B1 und liegt auf gleichem Kostenniveau wie Version B2.

Die Maßnahme 5 „Neubau“ (Schiff E) lässt sich am ehesten mit der Version D vergleichen, da dieses Schiff in Bezug auf Abmessungen und Kapazität gleich groß ist. Vor allem bedingt durch die deutlich höheren Investitionskosten liegen die spezifischen Transportkosten bei der Version E in allen Berechnungsfällen deutlich über denen der Version D.

Vor allem bedingt durch die deutlich höheren Investitionskosten liegen die spezifischen Transportkosten bei der Version E in allen Berechnungsfällen deutlich über denen der Version D.

4. Zusammenfassung

Angesichts der Tatsache, dass es nicht das für alle Fahrtgebiete und Einsatzbedingungen optimale Schiff gibt, war nicht zu erwarten, dass alle hier untersuchten Schiffsversionen, die für jeweils unterschiedliche Umbaumaßnahmen stehen, in allen Untersuchungsfällen besser als das Vergleichsschiff (Version A) abschneiden.

In der Mehrzahl der Berechnungsfälle stellt sich der Effekt der hier untersuchten Maßnahmen jedoch überwiegend positiv dar. Zum einen gibt es generell nur wenige Vergleichssituationen, in denen das Basisschiff bessere Ergebnisse als die Umbauversionen erzielt, zum anderen sind dies gerade die Fälle, in denen kleinere Schiffe typischerweise Vorteile haben, wie Situationen mit ungünstigem Fahrwasser, welches von größeren Schiffen nur mit deutlicher Unterauslastung befahren werden kann (v.a. Berechnungsfälle 7 und 8).

Aus diesem Grund dürften die untersuchten Maßnahmen jeweils für sich betrachtet i.d.R. als wirtschaftlich sinnvoll anzusehen sein, sofern ein entsprechend umgebautes Schiff überwiegend unter den Einsatzbedingungen der Berechnungsfälle (1) bis (6) eingesetzt werden kann.

Ein Vergleich der Maßnahmen untereinander zeigt, dass die verlängerte Version (Schiff C) am deutlichsten Vorteile bei eher ungünstigen bzw. eingeschränkten Fahrtbedingungen bietet. In der Gesamtsicht aller Berechnungsfälle scheint die Maßnahme 4 (Version D) – Verlängerung und Verbreiterung – am vorteilhaftesten zu sein, da diese Version in den günstigeren Berechnungsfällen (1 bis 6) immer zu den Schiffen mit den niedrigsten spezifischen Transportkosten zählt und auch unter ungünstigen Einsatzbedingungen (Fälle 7 und 8) der Abstand zu den dort besten Versionen sehr gering ist.

5. Literatur

- [1] Vaart-Frachtindex: <http://www.vaart.nl/vracht/vrachtindicator.htm>
- [2] Planco, Potenziale und Zukunft der deutschen Binnenschifffahrt, zweiter Zwischenbericht, Mai 2003
- [3] Rheinschiffsuntersuchungsordnung § 23
- [4] Kostenkalkulationshilfen des BdB



Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und
Transportsysteme e.V.

Untersuchungsbericht

im Auftrag des

**Ministeriums für Wirtschaft, Mittelstand und Energie
des Landes Nordrhein-Westfalen**

**Modernisierung der vorhandenen Binnenschiffsflotte durch Vergrößerung der
Hauptabmessungen, Reduzierung der Fixpunkthöhe und Austausch des
Hinterschiffs**

Teilprojekt C: Reduzierung der Fixpunkthöhe

Bericht 1852 C – April 2007

von

Dipl.-Ing. Branislav Zigic

Projektleiter:
Dipl.-Ing. Joachim Zöllner

Direktor:
Prof. Dr. Paul Engelkamp

Oststr. 77e-mail:
47057 Duisburg • Germany
Tel.: ++49-203 99369-0
Fax ++49-203 361373

dst@dst-org.de Institut an der
<http://www.dst-org.de>
USt-Nr. 10958400016
USt-IdNr. DE 119553654

Universität Essen Duisburg
Standort Duisburg



Dieses Projekt wurde in Kooperation mit dem Institut für Mathematik an der Universität Duisburg-Essen, Standort Duisburg durchgeführt. Wir bedanken uns bei Professor Törner und seinen Mitarbeitern für die konstruktive und vertrauensvolle Zusammenarbeit.

INHALTSVEREICHNIS

1.	Einleitung	6
1.1	Hintergrund	6
1.2	Projektziel	7
1.3	Problemstellung und Aspekte	7
1.4	Arbeitsschnitte (Methodik)	8
2.	Modellierung der Aufgabestellung	9
2.1	Das Schiff als schwimmende Plattform	9
2.1.1	Notwendige technische Daten	14
2.1.2	Verfügbare technische Daten in der Praxis	14
2.2	Containerdaten	15
2.2.1	Containerparameter	15
2.2.2	Stauplan und Raster	16
3.	Schiffsbezogene Grundlagen	20
3.1	Allgemeine hydrostatische Aufstellungen	20
3.2	Vereinfachte Methode zur Bestimmung von Tiefgang, Trimm und Krängung	20
4.	Entwicklung des Optimierungsmodells	22
4.1	Lösungsanforderungen	22
4.2	Vereinfachungen	22
4.3	Fehlereinschätzungen	23
4.4	Einsatz von Ballast	23
5.	Testphase mit Simulationsmodell	24
5.1	Benutzeroberfläche	24
5.2	Dateneingabe	24
5.2.1	Schiffsdaten	24
5.2.2	Flüssigkeiten an Bord	26
5.2.3	Containerdaten	26
5.2.4	Containerübersicht	27
5.3	Optimierung der Beladung	28
5.4	Rechendauer	30
5.5	Testergebnisse	31
5.5.1	Vorgehensweise	31
5.5.2	Resultate	31
6.	Testphase mit existierendem Schiff	33
6.1	Allgemeines	33

6.2	Schiffsdaten	33
6.3	Kalibrierung des Schiffes	35
6.4	Handoptimierung	37
6.4.1	Zu berücksichtigende Rahmenbedingungen bei der „Handoptimierung“	37
6.4.2	Vorgehen bei der Stauoptimierung von Hand	37
6.4.3	Verteilung der Container im Laderaum	37
6.4.4	Ergebnis der Stauoptimierung „von Hand“	38
6.5	PC-Optimierung mit CARGO+® Programm	40
6.6	Vergleich der Testergebnisse	40
6.6.1	Vergleich zwischen Handoptimierung und CARGO+ Optimierung	40
6.6.2	CARGO+ Ergebnisse basierend auf unterschiedlichen Zufallsverteilungen	41
6.6.3	Erzielte Ergebnisse und Kommentierung	42
7.	Integrationsmöglichkeiten vorhandener Programme	44
7.1	Diverse Aspekte der Stauplanoptimierung	44
7.1.1	Stabilität	44
7.1.2	Festigkeit (Elastische Linie und Tragfähigkeitsminderung)	45
7.1.3	Umschlagreihenfolge	45
7.1.4	Schwimmlage des beladenen Schiffes (Hydrodynamik im flachen Wasser)	46
7.2	Weitere Entwicklungsmöglichkeiten	47
8.	Zusammenfassung	49
9.	Literatur	51

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Fixpunkthöhe eines Container-Binnenschiffes	7
Abb. 2:	Zusammenhang zwischen Brückendurchfahrtshöhe und maximalem Tiefgang	9
Abb. 3:	Schwimmlage und Fixpunkthöhe des Schiffes bei willkürlicher Verteilung der Container an Bord	11
Abb. 4:	Schwimmlage und Fixpunkthöhe des Schiffes nach der Optimierung des Container-Stauplans	11
Abb. 5:	Blick von der Brücke des „Hendrik-Jan Jr.“ auf die Container im Laderaum [Foto DST, Renner]	12
Abb. 6:	Passage der Vinckekanalbrücke im Hafen Duisburg mit einer offensichtlich optimal verteilten Containerladung an Bord eines Fluss-See-Schiffes [Foto DST, Renner]	13
Abb. 7:	Container-Stauplan eines „Johann Welker“ Schiffes mit dem Raster 9 x 3 TEU	17
Abb. 8:	Container-Stauplan eines GMS mit ausschließlich 20' Containern	18
Abb. 9:	Container-Stauplan eines GMS mit überwiegend 40' Containern	18
Abb. 10:	Container-Stauplan eines GMS mit Containern in 3 Lagen, Beispiel aus der Praxis, für die Anwendung in dieser Studie angepasst	19
Abb. 11:	Automatische, gleichmäßige Verteilung des Containerasters im Programm CARGO+	23
Abb. 12:	Excel-Blatt „Schiffsdaten“ für ein GMS mit dem Raster von 13 x 4 TEU	25
Abb. 13:	Schematisch dargestellte Hauptabmessungen des Schiffes zur Eingabe der Daten in das Datenblatt „Schiffsdaten“	25
Abb. 14:	Schematisch dargestellte Lage der Tanks auf dem Schiff	26
Abb. 15:	Konkretes Beispiel für eine tabellarische Darstellung der Containerdaten vor der Optimierung	27
Abb. 16:	Container-Übersicht vor der Optimierung	28
Abb. 17:	Excel-Blatt „Optimierung“	29
Abb. 18:	Excel-Blatt „Übersicht Optimierung“	29
Abb. 19:	„Zusatzdaten“ mit Ursprungs- und Zielhafen und Hinweis auf Gefahrgut	30
Abb. 20:	Vereinfachte Containerverteilung zu Testzwecken	31
Abb. 21:	MS „Henrik-Jan Jr.“ bei Rhein-km 780 [Foto DST, Renner]	34
Abb. 22:	Generalplan des MS „Hendrik-Jan Jr.“ [Quelle, Dodewaard]	34
Abb. 23:	Ergebnisse der in 7 Rechenläufen erzielten relevanten Parameter	36
Abb. 24:	Verschiedene Mittelwerte aus den einzelnen gültigen Rechenkombinationen	36
Abb. 25:	Verteilung der Container vor der Handoptimierung	38
Abb. 26:	Schwimmlage des Schiffes vor der Handoptimierung (Referenzfall)	39
Abb. 27:	Schwimmlage des Schiffes nach der Handoptimierung durch 5 Testpersonen	39
Abb. 28:	Optimierungsergebnis mit dem CARGO+ Programm	40

1. Einleitung

Die Entwicklungen im Containeraufkommen der Binnenschifffahrt zeigen, dass das Binnenschiff im Hinterland der ARA Häfen besonders erfolgreich ist. Die infrastrukturellen Bedingungen des Rheins einschließlich der Brückendurchfahrtshöhen waren Voraussetzung für die dynamische Entwicklung, die bereits heute im Rheinstromgebiet zu einem jährlichen Transportvolumen von mehr als 1,6 Millionen TEU¹ geführt haben. Eine Möglichkeit, den Einsatz von Binnen-Containerschiffen auch auf anderen Wasserstraßen auszuweiten, besteht in der Optimierung der Containerstauung an Bord.

1.1 Hintergrund

Brücken an Wasserstraßen können durch ihre Lichtraumprofile die Transportkapazität von Binnen-Containerschiffen begrenzen. Zu Beginn einer Reise wird der Stauplan für ein Binnen-Containerschiff erstellt unter Berücksichtigung der Reihenfolge neuer Ladungsaufnahmen in den angelaufenen Häfen sowie der Notwendigkeit einer angemessenen Ladungsverteilung, um eine übermäßige Krängung und Vertrimmung zu vermeiden. Informationen über Wasserstände auf der Fahrstrecke dienen dabei der Entscheidungsfindung, ob die oberste Containerlage geladen werden kann oder nicht. Eine ungünstige Verteilung der ISO-Container unterschiedlicher Höhen² können dazu führen, dass der höchste Punkt der Containerladung um wenige Zentimeter oberhalb der Lichtraumhöhe der niedrigsten Brücke auf der Fahrstrecke liegt, sodass die obere Containerreihe dadurch entfallen muss. Es erscheint jedoch vorstellbar, dass eine optimierte Verteilung derselben Container – optimiert in Bezug auf die Höhe der Containerladung – zu einer Reduzierung der Fixpunkthöhe führen kann und damit zu einer sicheren Passage niedriger Brücken. Dies würde – je nach Anzahl der Lagen – einen Kapazitätswachstum zwischen 33 % und 100 % bedeuten und damit bei annähernd gleichen Gesamtkosten zu einer erheblichen Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit gegenüber den konkurrierenden Verkehrsträgern führen.

Die damit verbundenen Marktchancen stehen in engem Bezug zu NRW. Zunächst geht es um die Sicherstellung eines zweilagigen Verkehrs im westdeutschen und nordwestdeutschen Kanalnetz, da hier bereits heute auf Grund des Trends zu höheren Containern erste Schwierigkeiten bei den Brückenpassagen erkennbar sind. Zweitens bestehen mit Blick auf den Transitverkehr über die Rhein-Main-Donau-Verbindung realistische Chancen, von dem heute üblicherweise praktizierten zweilagigen Verkehr zu einem dreilagigen Verkehr überzugehen. Und drittens schließlich sei auf die Hafenzufahrt zum Duisburger DeCeTe-Terminal verwiesen, hier behindert die Vinckekanalbrücke bei hohen Wasserständen ein Anlaufen mit vier Containerlagen.

Nicht zuletzt wäre ein derartiges Vorgehen auch für die Nebenflüsse des Rheins von großem Interesse. Dort ist der Transport von zwei Containerlagen übereinander im Normalfall durchführbar, allerdings nicht immer wirtschaftlich. Eine dritte Containerlage übersteigt die Brückendurchfahrtshöhen oftmals um wenige Zentimeter und verhindert sie dadurch.

¹ „Schifffahrt und Technik“ 3/2006, -Umschlagzahlen in deutschen Binnenhäfen in Rheinstromgebiet für 2005, nur per Schiff transportierte Container

² zwischen 8 und 9,5', im Abstand von einem halben Fuß (\cong 15,12 cm)

Vor diesem Hintergrund war im Rahmen der durchgeführten Studie ein Computerprogramm zur Minimierung der Fixpunkthöhe durch eine optimierte Beladung des Binnenschiffs zu entwickeln. Die Möglichkeiten eines solchen Computerprogramms sollten untersucht und ein Software-Pilot implementiert werden.

1.2 Projektziel

Das Projektziel ist die Entwicklung eines EDV-gestützten Beladungsprogramms, das die Stellplatzzuordnung (Stauplan der Container an Bord) sowohl in der Ebene als auch in der Höhe optimieren kann, um die Fixpunkthöhe des beladenen Schiffes zu reduzieren. Eine Senkung der Fixpunkthöhe vom willkürlichen zum optimierten Stauplan in einer Größenordnung von etwa 30-50 cm erscheint machbar.

Neben der Senkung der Fixpunkthöhe ist auch ein Zeitgewinn bei der Erstellung eines optimalen Stauplans im Vergleich zu einer manuellen Optimierung zu erwarten. Ein erklärtes Ziel des EDV-Programms ist es, das Optimierungsergebnis in nur wenigen Minuten zu ermitteln.

1.3 Problemstellung und Aspekte

Für ein gegebenes Binnen-Containerschiff mit bestimmten Parametern, wie Leertiefgänge, Verdrängung, Trimm- und Krängungsverhalten, Position und Füllmenge von Tanks (Ballastwasser, Treibstoff, Öl, Brauchwasser) und einer relevanten Staukapazität von bis zu 208 TEU ist die Ladungsverteilung so zu berechnen, dass der Fixpunkt des Schiffes, d.h. die Höhe des höchsten starren, aus dem Wasser herausragenden Punktes, minimiert wird. Die folgende Grafik (Abb. 1) veranschaulicht die Situation¹:

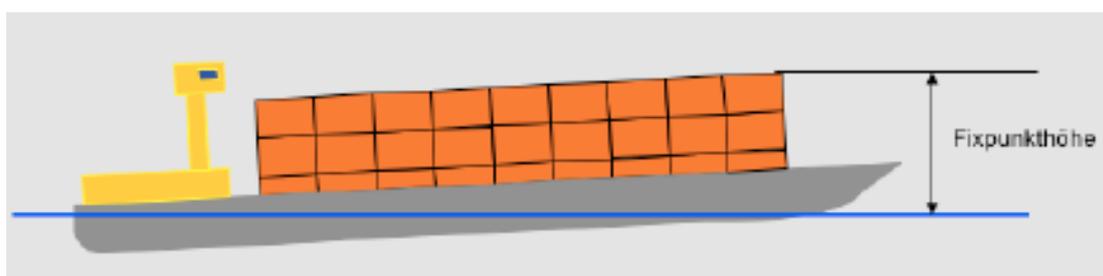


Abb. 1: Fixpunkthöhe eines Container-Binnenschiffes

Hierbei ist zu beachten, dass die Ladung sehr heterogen sein kann, da im Allgemeinen verschieden hohe Container zum Einsatz kommen. Der Fokus liegt hier jedoch ausschließlich auf den Standard-Containergrößen unterschiedlicher Höhe.

Folgende Aspekte spielen bei dieser Aufgabe eine wesentliche Rolle:

¹ Das Steuerhaus kann nach Bedarf heruntergefahren werden.

- Ein Schiff ist eine schwimmende „bewegliche“ Plattform, die ein- und austaut. Krängung und Trimm - und damit auch die Fixpunkthöhe - ändern sich als Folge jeder Gewichtsverschiebung, Be- und Entladung bzw. jeder Containerbewegung an Bord.
- Die Berücksichtigung einer Vielzahl von Kombinationen bei der Containerstauung ($n!$, n = Anzahl der Container an Bord) und daraus resultierend die jeweilige Überprüfung der Schwimmelage des Schiffe sowie der sich ergebenden Fixpunkthöhe sind zeitintensiv und erfordern ein hohes Rechenpotenzial.
- Die Rechnerkapazitäten handelsüblicher PCs und deren Geschwindigkeiten stellen eine weitere Einschränkung dar.
- Fehlende oder ungenaue Schiffsdaten erschweren zudem die hydrostatischen Berechnungen.

1.4 Arbeitsschnitte (Methodik)

Im Einzelnen sind folgende Arbeitsschritte durchzuführen:

- Modellierung der Aufgabestellung
- Ermittlung und Integration der relevanten Schiffsparemeter in das Modell
- Lösung der Optimierungsaufgabe und Programmierung
- Testphase mit Simulationsmodell
- Testphase mit existierendem Schiff
- Integrationsmöglichkeiten vorhandener Programme und anderer Optimierungskriterien

¹ $n! = n \cdot (n-1) \cdot (n-2) \cdot \dots \cdot 3 \cdot 2 \cdot 1$

2. Modellierung der Aufgabestellung

2.1 Das Schiff als schwimmende Plattform

Die Tragfähigkeit eines Binnenschiffes wird durch seine Hauptabmessungen bestimmt. Die Hauptabmessungen sind wiederum abhängig von der Wasserstraßeninfrastruktur. Bei Containertransporten stellt die Infrastruktur eine natürliche Begrenzung der Staukapazität dar, und zwar durch die Wassertiefe einerseits und die Lichtraumhöhe der Brücken andererseits. Dabei sind die folgenden Fakten zu beachten:

- Der Tiefgang des Schiffes muss kleiner sein als die Wassertiefe, d.h. es ist ein Sicherheitsabstand zwischen Schiffsboden bzw. Fluss- oder Kanalgrund zu berücksichtigen (Abb. 2).

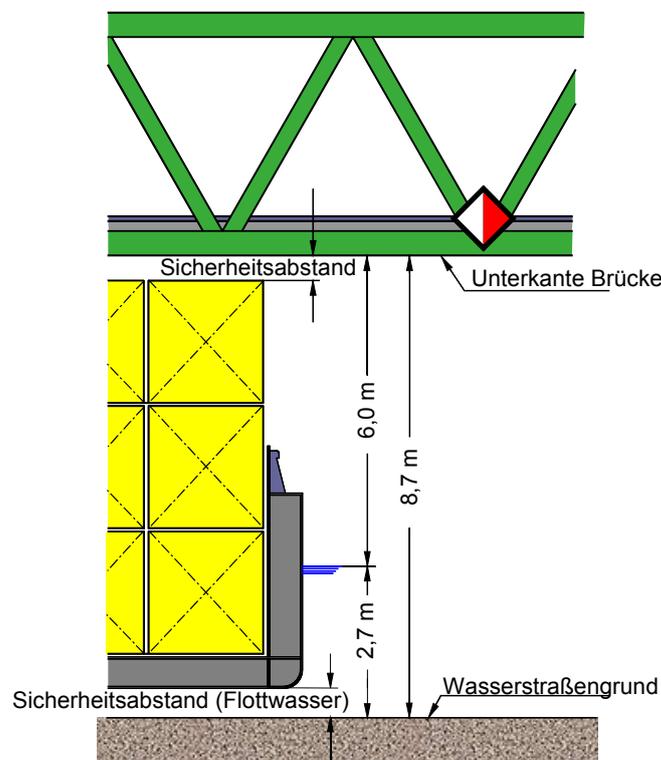


Abb. 2: Zusammenhang zwischen Brückendurchfahrtshöhe und maximalem Tiefgang

- Der Tiefgang muss unterhalb des maximalen zugelassenen (konstruktiven) Tiefgangs liegen.
- Der Wert der Fixpunkthöhe des beladenen Schiffes muss kleiner sein als die Brückenlichtraumhöhe, d.h. es ist ein weiterer Sicherheitsabstand zu berücksichtigen (Abb. 2).
- Die Stabilitätsanforderungen müssen eingehalten werden.

Der beste Transportwirkungsgrad (Nutzung der Kapazität) eines Containerschiffes ist dann erreicht, wenn gleichzeitig die zur Verfügung stehende Tragfähigkeit und das vorhandene Raumvolumen zu 100 % ausgenutzt werden.

Das heißt,

- das Schiff ist bis zu seinem maximal zulässigen Tiefgang beladen,
- die Container sind so gestaut, dass eine sichere Durchfahrt unter den niedrigsten Brücken auf der befahrenen Relation möglich ist,
- die Stabilität des Schiffes entspricht den Vorschriften.

Container als Güterart gelten als spezifisch leicht. In vielen Fällen sind die Container an Bord zu leicht, um das Schiff bis zu seinem zulässigen Tiefgang eintauchen zu lassen. Daher liegt das Problem einer Containerladung auf vielen Wasserstraßen in der unzureichenden Freifahrtshöhe unter den Brücken. Als Folge davon wird oft eine Containerlage weniger an Bord gestaut, z.B. statt 3 Lagen übereinander nur 2 oder statt 4 Lagen nur 3. Damit wird die zur Verfügung stehende Tragfähigkeit nur zum Teil genutzt; die Transporteffektivität ist dadurch stark eingeschränkt.

Beträchtliche Veränderungen der Wasserstände auf den frei fließenden Wasserstraßen beeinflussen die Zuverlässigkeit der Containertransporte mit dem Binnenschiff in großem Umfang. Im ungünstigen Fall kann der Anstieg des Wasserstandes um wenige cm dazu führen, dass das Passieren einer kritischen Brücke mit der obersten Containerlage nicht mehr möglich ist.

Die zur Verfügung stehenden Durchfahrtshöhen sind amtlich festgelegt und beziehen sich im Normalfall auf den HSW¹. Da der aktuelle Wasserstand, bis auf wenige Ausnahmetage, deutlich niedriger ist als der HSW, können überwiegend größere Durchfahrtshöhen genutzt werden. Damit wird die aktuelle Durchfahrtshöhe maßgeblich beeinflusst vom augenblicklichen Wasserstand, wobei es bei modernen Containerschiffen möglich ist, durch die Aufnahme von Ballastwasser die Fixpunkthöhe des Schiffes in einem bestimmten Umfang zu verringern.

Die Wahrscheinlichkeit, eine kritische Brücke passieren zu können, steigt daher für Schiffe mit Ballastsystem. Durch die Aufnahme von Ballastwasser kann ein Schiff vom Typ GMS² seine Fixpunkthöhe in einer Größenordnung von 50-60 cm reduzieren. Natürlich sind die Kosten einer derartigen Aktion beträchtlich: Energieverbrauch, Zeit, steigender Brennstoffverbrauch durch höhere Widerstandswerte. Zum anderen kann sich das Problem auch nur verschieben von der Lichtraumhöhe auf den Tiefgang, was bei Flachwasserbedingungen ebenfalls kritisch ist. Dies kann bedeuten, dass im Falle einer schweren Containerladung oder einer zusätzlichen Ballastierung die Brückenhöhe für eine Passage zwar ausreicht, jedoch aufgrund der Überschreitung des maximal möglichen Tiefgangs die Gefahr einer Grundberührung besteht und damit die Brücke ebenfalls nicht passiert werden kann.

Eine willkürliche Verteilung der Container an Bord kann optimiert werden, wenn es darum geht, die Fixpunkthöhe zu minimieren (Abb. 3).

¹ HSW, höchster schiffbarer Wasserstand, d.h. bei Erreichen des HSW wird die Schifffahrt eingestellt.

² Groß-Motor-Schiff auf dem Rhein, mit einer Länge von 95-110 m und einer Breite bis zu 11,45 m

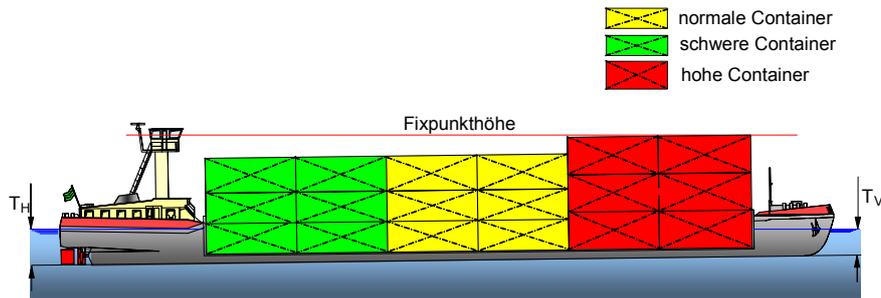


Abb. 3: Schwimmelage und Fixpunkthöhe des Schiffes bei willkürlicher Verteilung der Container an Bord

Durch Umstauen bestimmter Container nach hinten oder vorne verändert das Schiff seinen Trimm. Gleichzeitig können durch sorgfältige Kombination von hohen und niedrigen Containern in einem Stapel außergewöhnliche Höhen vermieden werden. Beide Vorgehensweisen tragen dazu bei, die Fixpunkthöhe deutlich zu reduzieren, wie aus Abb. 4 hervorgeht.

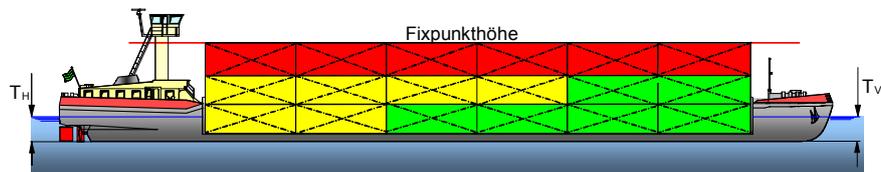


Abb. 4: Schwimmelage und Fixpunkthöhe des Schiffes nach der Optimierung des Container-Stauplans

In beiden Fällen, vor und nach der Optimierung, bleibt der mittlere Tiefgang des Schiffes gleich, da die Verdrängung nicht verändert wurde. Durch eine Reduzierung des Trimms wird auch der maximale Tiefgang entsprechend herabgesetzt. Außerdem ist es nach wie vor möglich, Trimm und Tiefgang durch die Aufnahme von Wasserballast anzupassen.

Abb. 5 zeigt eine typische Containerverteilung auf einem auf dem Rhein fahrenden GMS. Das Foto entstand an Bord des MS „Hendrik-Jan Jr.“ während der Praxistests auf dem Rhein zwischen Duisburg und Düsseldorf im September 2006.



Abb. 5: Blick von der Brücke des „Hendrik-Jan Jr.“ auf die Container im Laderaum [Foto DST, Renner]

Die nächste Abbildung verdeutlicht das Problem beim Passieren der kritischen Vinckekanalbrücke im Hafen Duisburg bei hohem Wasserstand mit einer Containerladung. Sehr anschaulich wird dabei die für die Binnenwasserstraßen typische Frage dargestellt: Kann die Brücke mit der oberen Containerlage passiert werden oder nicht?



Abb. 6: Passage der Vinckekanalbrücke im Hafen Duisburg mit einer offensichtlich optimal verteilten Containerladung an Bord eines Fluss-See-Schiffes [Foto DST, Renner]

Die oben genannten Aspekte zeigen, wie wichtig es ist, ein effizientes Werkzeug für die Erstellung eines in Bezug auf die Fixpunkthöhe optimalen Container-Stauplans zu entwickeln.

Innerhalb des zu entwickelnden Beladungsprogramms sollen die Einflüsse folgender Faktoren und deren Zusammenhänge Eingang finden:

- Schiffsbezogene (konstante) Eigenschaften:
 - Hauptabmessungen
 - Laderaumanordnung, nutzbare Länge und Breite
 - Hydrostatische Eigenschaften:
 - Verdrängungsverhalten
 - Leertiefgang
 - Trimm- und Krängungsverhalten
 - Tankanordnung und Kapazitäten
- Ladungsbezogene (variable) Eigenschaften:
 - Längen, Höhen und Gewichte aller zu ladender Container
 - Tatsächliche Menge aller Flüssigkeiten an Bord – Brennstoff, Wasser, Ballast

Diese Zusammenhänge müssen zunächst modelliert werden, um hierauf aufbauend die eigentliche Optimierung vornehmen zu können. Im Anschluss daran wird in einer dritten Phase das erarbeitete Programm sowohl im Simulationsmodell als auch im realen Einsatz auf einem Containerschiff getestet werden. Darüber hinaus erfolgt eine Prüfung der Frage,

inwieweit das erarbeitete Beladungsprogramm mit den heute bereits im Einsatz befindlichen Programmen kombiniert werden kann.

2.1.1 Notwendige technische Daten

Für die genaue Berechnung der Schwimmelage eines Schiffes sind Daten, wie das Gesamtgewicht des Schiffes, seine Schwerpunktposition in Längs- und Querrichtung sowie die Höhe des Schwerpunktes, notwendig. Ferner müssen zusätzlich zu diesen Angaben noch Details über alle sich an Bord befindenden Flüssigkeiten, wie Treibstoff, Schmieröl, Trinkwasser, Abfall- und eventuell Ballastwasser ergänzt werden, um das CARGO+ Programm ausführen zu können.

Darüber hinaus ist eine Definition der Geometrie des Rumpfes (Formgebung, Linien-, Spantenriss) notwendig. Erst danach lassen sich mit der Hilfe eines für die Berechnung der Schiffshydrostatik existierenden Computerprogramms Parameter, wie mittlerer Tiefgang, Trimm, Krängungswinkel, Fläche der wirkenden Wasserlinie sowie weitere schiffstechnische Werte, präzise bestimmen¹.

Unter der Voraussetzung, dass alle benötigten Daten zur Verfügung stehen, optimiert das Computerprogramm, welches auch die Hydrostatik berechnet, die Containerstauung, d.h. es bestimmt die Schwimmelage des Schiffes nach jeder Containerverschiebung und reduziert seine Fixpunkthöhe. Theoretisch wäre es sogar denkbar, ein bereits vorhandenes hydrostatisches Rechenprogramm in das Optimierungsprogramm zu integrieren.

In der Realität scheitern diese Ansätze, weil oft ein großer Teil der notwendigen Daten fehlen. Ist z.B. kein Linienriss vorhanden, kann das Programm zur Berechnung der Hydrostatik nicht zur Anwendung kommen.

2.1.2 Verfügbare technische Daten in der Praxis

Normalerweise sind nur die Hauptabmessungen des Schiffes bekannt und die aktuellen Tiefgänge lassen sich an den Tiefgangsmarken vorne und hinten, an Backbord und Steuerbord relativ einfach ablesen. Daten, wie Linienriss, Formblatt, Gewicht und Schwerpunktlage des leeren Schiffes, sind in den meisten Fällen nicht vorhanden. Aus diesem Grund werden einige Annahmen getroffen und einige einfache Rechenmethoden eingeführt.

¹ Auch ohne ein spezielles Computerprogramm ist es möglich - und zwar mit etwa gleicher Präzision -, alle benötigten hydrostatischen Werte „von Hand“ zu berechnen. Nach der Digitalisierung der Rumpfform dauert die Berechnung der Schwimmelage oder der Änderung der Schwimmelage durch Verschiebung der Ladung bei Anwendung eines entsprechenden Computerprogramms nur wenige Sekunden. Aber auch ohne ein solches Programm, kann mit dem zur Verfügung stehenden so genannten „Formblatt“ die Berechnung – innerhalb einiger Minuten – erfolgen.

Oftmals ist der Generalplan das wichtigste Dokument, obwohl er nicht unbedingt den aktuellen Zustand des Schiffes wiedergeben muss. Mit seiner Hilfe und der zusätzlicher Informationen, z.B. aus dem Tonnagezertifikat mit Angabe über die exakte Position der Tiefgangsmarken, Tankkapazitäten und weiterer struktureller Details, können die Lage und Abmessungen von Laderäumen und Tanks für Brennstoff, Schmierstoffe, Wasser, Ballast usw. bestimmt werden. Die tatsächlichen Tiefgänge und ihre Auswirkungen lassen sich nur durch Ablesen der entsprechenden Markierungen an Bord verifizieren, ebenso wie die aktuelle Ladung selbst. Anschließend können das Gewicht sowie die Schwerpunktlage des leeren Schiffes und die entsprechenden Referenziefgänge mit Hilfe der für diesen Zweck ausreichenden Näherungsrechnungen ermittelt werden. Dieses einfache Rechenverfahren wird kurz in Abschnitt 3 beschrieben.

2.2 Containerdaten

Stapelbare Seecontainer vom Typ ISO-1 haben Standardabmessungen in Bezug auf ihre Länge, Breite und Höhe. Außerdem ist ihre Ladekapazität begrenzt.

2.2.1 Containerparameter

Alle ISO-1 Container haben eine Breite von 8', welches 2.440 mm entspricht. Darüber hinaus gibt es weitere Standardlängen und -höhen. Im internationalen Warenaustausch werden Container mit einer Länge von 20' und 40' am häufigsten eingesetzt. Gerade in der letzten Zeit ist ein Trend zu 45' langen Containern festzustellen, deren Anteil jedoch noch relativ gering ist. Hin und wieder sind auch 30' Container anzutreffen.

Das für diese Studie wichtige Kriterium ist die Containerhöhe. Die vorherrschenden Standardhöhen auf dem Welt-Containermarkt liegen bei 8, 8 ½, 9 und 9 ½'. Obwohl alle 4 Höhen beträchtliche Marktanteile haben, kann ein Trend zu den so genannten „high Cubes“ mit einer Höhe von 9 und 9 ½' beobachtet werden.

Für das Eigengewicht der ISO-1 Container existiert keine strenge Norm; es liegt normalerweise bei 2,2 t für 20' und bei 4,0 t für 40' Container. Im Gegensatz dazu ist das Bruttogewicht sehr wohl limitiert und beträgt 24,0 t für 20' und 30,48 t für 40' Container. Dabei wird auch nicht nach verschiedenen Containerhöhen unterschieden, sondern das Höchstgewicht gilt für alle Höhen.

Spricht man von der Staukapazität eines Schiffes – unabhängig davon ob See- oder Binnenschiff – wird diese in TEU¹ bei 20' Containern und seltener in FEU² für 40' Container angegeben.

¹ TEU – Twenty feet Equivalent Unit

² FEU – Forty feet Equivalent Unit

2.2.2 Stauplan und Raster

Für die Entwicklung des CARGO+ Programms wurden zwei Basis-Schiffstypen berücksichtigt. Zum einen das so genannte GMS¹ und zum anderen der Johann-Welker-Typ².

Das Optimierungsprogramm lässt sich natürlich auch bei anderen kleineren Schiffen anwenden, aber die Praxis zeigt, dass kleinere Schiffe selten Containerladungen transportieren.

Größere Schiffe der so genannten JOWI-Klasse³ wurden gerade in den letzten Jahren in den Containertransport zwischen den ARA-Häfen⁴ und den großen Hinterland-Containerterminals am Rhein eingebunden und können zum jetzigen Zeitpunkt auf Grund ihrer großen Staukapazität⁵ nicht in das Programm integriert werden. Der Grund dafür liegt in der Zahl der möglichen Zuordnungen von Containern zu Stellplätzen. Im Falle eines GMS mit vierlagiger Stauung beträgt sie etwa $1,987 \cdot 10^{106}$, ohne dabei auf die Anordnung der Container innerhalb eines Stapels zu achten. Ein Schiff der JOWI-Klasse kann je Lage mit 17 x 6 Containern beladen werden; bei nur 4 Lagen (also 408 TEU statt 208 bei einem GMS) ergeben sich bei diesem Schiffstyp etwa $3,432 \cdot 10^{326}$ verschiedene Möglichkeiten. Dies bedeutet etwa 10^{220} mehr mögliche Zuordnungen bei einem Schiff vom Typ JOWI als bei einem GMS. Heutige handelsübliche PCs sind keinesfalls dazu in der Lage, in einer annehmbaren Zeitspanne eine Optimierung mit so vielen verschiedenen Kombinationsmöglichkeiten durchzuführen.

Die Laderaumgröße des GMS von 80,00 m x 10,00 m erlaubt die Beladung mit dreizehn TEU in Längs- und vier in Querrichtung (Abb. 8). Mit der Möglichkeit, vier Container übereinander zu stapeln, ergibt sich eine maximale Containerkapazität von 208 TEU. Dieser Schiffstyp ist zu den neueren Schiffen zu zählen und deshalb überwiegend als Doppelhüllenschiff gebaut. Er verfügt über Ballasttanks im Doppelboden, in den Seitenzellen sowie im Vor- und Hinterschiff.

Die Laderaumgröße des Schiffstyps „Johann Welker“ von ca. 59,00 m x 7,50 m erlaubt die Beladung von neun TEU in Längs- und drei in Querrichtung. Aus Gründen der Stabilitätsicherheit lassen sich nur drei Container übereinander stauen (Abb. 7), sodass sich eine maximale Containerkapazität von 81 TEU ergibt. Bei diesem Schiffstyp ist weiterhin zu berücksichtigen, dass es sich hierbei überwiegend um Einhüllenschiffe handelt, bei denen Ballasttanks nur in einem sehr beschränkten Umfang im Vor- und Hinterschiff zur Verfügung stehen.

¹ Groß-Motor-Schiff auf dem Rhein, mit einer Länge von 95-110 m und einer Breite bis zu 11,45 m

² Auch als „Europa-Schiff“ bekannt mit einer Länge von 80-85 m und einer Standard-Breite von 9,5 m

³ Zurzeit größte Containerschiffe auf dem Rhein mit einer Länge von 135 m und einer Breite von bis zu 16.8 m

⁴ Nordsee container hubs in Antwerpen, Rotterdam und Amsterdam

⁵ Bis zu 408 TEU in 4 Lagen oder bis zu 510 TEU in 5 Lagen, soweit es das Ladungsgewicht und die nautischen Bedingungen zulassen

3. Lage	79	76	73	70	67	64	61	58	55
	80	77	74	71	68	65	62	59	56
	81	78	75	72	69	66	63	60	57
2. Lage	52	49	46	43	40	37	34	31	28
	53	50	47	44	41	38	35	32	29
	54	51	48	45	42	39	36	33	30
1. Lage	25	22	19	16	13	10	7	4	1
	26	23	20	17	14	11	8	5	2
	27	24	21	18	15	12	9	6	3

Abb. 7: Container-Stauplan eines „Johann Welker“ Schiffes mit dem Raster 9 x 3 TEU

Die Eingabe der Containerdaten erfolgt in Form einer Liste mit Angabe der Seriennummer jedes TEU, seiner Position im TEU-Raster im Laderaum (Code-Nr.), seiner Höhe und seines Bruttogewichtes. Im Falle von 40' Containern, die zwei TEU-Stellplätze hintereinander im Raster einnehmen, müssen 2 entsprechende Code-Nummern eingegeben werden, aus denen hervorgeht, welche beiden Stellplätze im Raster durch einen 40' Container belegt sind. Das ist für das CARGO+ Programm beim Verschieben einzelner Boxen zur Stauplanoptimierung sehr wichtig. Dementsprechend muss das Gewicht eines 40' Containers zu gleichen Teilen auf die beiden entsprechenden Codenummern im Raster verteilt werden.

Eine gleichmäßige Gewichtsverteilung im Container wird vorausgesetzt, sodass der Schwerpunkt jedes Containers im Schnittpunkt seiner Diagonalen im Rasterplan liegt.

Bei einem ungeraden Raster in Längsrichtung – 13 TEU beim GMS oder 9 TEU beim Typschiff Johann Welker– sowie einer gemischten Ladung aus 20' und 40' Boxen müssen in jeder Lage die 20' und 40' Container kombiniert werden, um die vorhandene Laderaumfläche optimal nutzen zu können. Da die 40' Container inzwischen den weitaus größten Anteil im Warenaustausch einnehmen, ist die in Abb. 9 dargestellte Aufteilung durchaus realistisch.

4. Lage	205	201	197	193	189	185	181	177	173	169	165	161	157
	206	202	198	194	190	186	182	178	174	170	166	162	158
	207	203	199	195	191	187	183	179	175	171	167	163	159
	208	204	200	196	192	188	184	180	176	172	168	164	160
3. Lage	153	149	145	141	137	133	129	125	121	117	113	109	105
	154	150	146	142	138	134	130	126	122	118	114	110	106
	155	151	147	143	139	135	131	127	123	119	115	111	107
	156	152	148	144	140	136	132	128	124	120	116	112	108
2. Lage	101	97	93	89	85	81	77	73	69	65	61	57	53
	102	98	94	90	86	82	78	74	70	66	62	58	54
	103	99	95	91	87	83	79	75	71	67	63	59	55
	104	100	96	92	88	84	80	76	72	68	64	60	56
1. Lage	49	45	41	37	33	29	25	21	17	13	9	5	1
	50	46	42	38	34	30	26	22	18	14	10	6	2
	51	47	43	39	35	31	27	23	19	15	11	7	3
	52	48	44	40	36	32	28	24	20	16	12	8	4

Abb. 8: Container-Stauplan eines GMS mit ausschließlich 20' Containern

4. Lage	205	201	197	193	189	185	181	177	173	169	165	161	157
	206	202	198	194	190	186	182	178	174	170	166	162	158
	207	203	199	195	191	187	183	179	175	171	167	163	159
	208	204	200	196	192	188	184	180	176	172	168	164	160
3. Lage	153	149	145	141	137	133	129	125	121	117	113	109	105
	154	150	146	142	138	134	130	126	122	118	114	110	106
	155	151	147	143	139	135	131	127	123	119	115	111	107
	156	152	148	144	140	136	132	128	124	120	116	112	108
2. Lage	101	97	93	89	85	81	77	73	69	65	61	57	53
	102	98	94	90	86	82	78	74	70	66	62	58	54
	103	99	95	91	87	83	79	75	71	67	63	59	55
	104	100	96	92	88	84	80	76	72	68	64	60	56
1. Lage	49	45	41	37	33	29	25	21	17	13	9	5	1
	50	46	42	38	34	30	26	22	18	14	10	6	2
	51	47	43	39	35	31	27	23	19	15	11	7	3
	52	48	44	40	36	32	28	24	20	16	12	8	4

Abb. 9: Container-Stauplan eines GMS mit überwiegend 40' Containern

Befrachter auf dem Rhein verwenden leicht lesbare Excel-Datenblätter mit allen notwendigen Containerdaten. Auf Grund der fehlenden Optimierung im Hinblick auf die Fixpunkthöhe sind Informationen über die Containerhöhe gewöhnlich nicht vorhanden. Einen leicht angepassten typischen Stauplan zeigt Abb. 10, der um die Höhenangaben ergänzt wurde. Er enthält die Seriennummer des Container-Rasterfeldes (gelb), den Code des Container-Rasterfeldes für das entsprechende eingesetzte Schiff (weiß), die Gewichte jedes Containers (gelbbraun) sowie die Containerhöhen (türkis). Die Rahmenlinien zeigen, ob der betreffende Stellplatz von einem 20' oder einem 40' Container belegt ist.

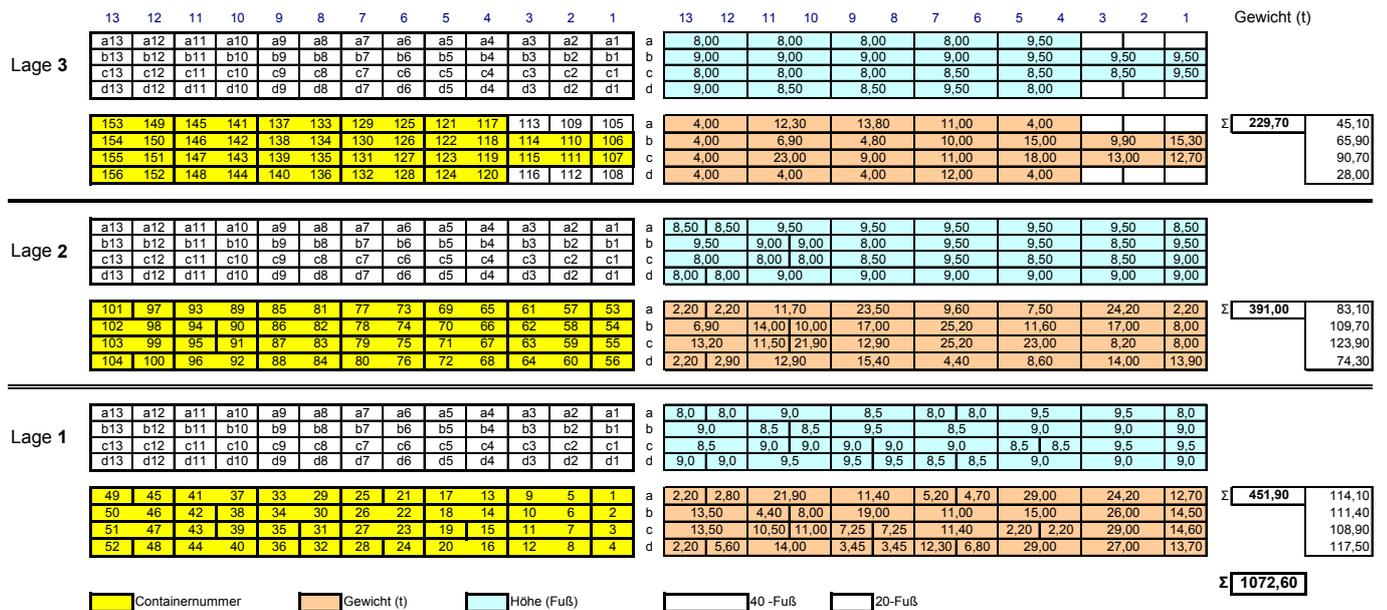


Abb. 10: Container-Stauplan eines GMS mit Containern in 3 Lagen, Beispiel aus der Praxis, für die Anwendung in dieser Studie angepasst

3. Schiffsbezogene Grundlagen

Hydrostatische Grundlagen aus der Schiffstechnik bilden die Basis für den Programmwurf, der die Reaktionen des Schiffes auf jegliche Gewichtsbewegung an Bord berücksichtigt. Nachfolgend werden die Kernpunkte angesprochen und kurz erläutert.

3.1 Allgemeine hydrostatische Aufstellungen

Das CARGO+ Programm berechnet routinemäßig den Trimm und die Krängung des mit Containern beladenen Schiffes. Als Basis dient das leere Schiff mit seinem eigenen Leergewicht, dem definierten Schwerpunkt, seinen Abmessungen und seiner Unterwasserform. Außerdem sind für jeden Container an Bord eigene Parameter, wie Abmessungen und Gewicht, vorhanden. Die Container mit ihren Gewichten und ihre horizontale Position im Laderaum beeinflussen zusammen mit den Parametern des Schiffes selbst die Schwimmelage des Schiffes. Schließlich gibt es neben den Containern noch andere Gewichte an Bord wie die Flüssigkeiten – im Wesentlichen Treibstoff, Schmiermittel, Hydrauliköl, Trinkwasser, Schmutzwasser und Ballast -, die auch wiederum dazu beitragen, die Schwimmelage des Schiffes zu verändern.

Der vertikale Schwerpunkt des gesamten Systems – Schiff plus Ladung plus jegliche Flüssigkeiten – beeinflusst die Stabilität des Schiffes, d.h. die Auswirkungen auf Trimm und Krängung bei Verschieben eines Teils der Ladung (z.B. Container) von einem Bereich in den anderen. Bei einem Verschieben der Ladung in Vertikalrichtung, wobei die horizontale Position unverändert bleibt, wird die Stabilität beeinträchtigt. Bei der zweiten Version (vertikale Position bleibt unverändert, Ladungsbewegung in Horizontalrichtung) ändern sich Trimm und Krängung. Ein weiterer Faktor, der die Stabilität beeinflusst, ist der Effekt der freien Oberfläche von Flüssigkeiten in den Tanks. Je größer die Oberfläche ist, desto schlechter wird die Stabilität.

Zu Beginn des Projektes wurde eine Reihe von Vereinfachungen im hydrostatischen Teil festgelegt. Das geschah zum einen aus der Notwendigkeit heraus, schnell die Schwimmelage und die Fixpunkthöhe berechnen zu müssen und diese anschließend auf der Basis der zahlreichen Containerkombinationen ($n!$ mögliche Kombinationen, wobei n = Zahl der Containerstellplätze an Bord) zu optimieren. Zum anderen musste das Programm auf handelsüblichen PCs anwendbar sein. Hinzu kommt, dass die für die hydrostatischen Berechnungen notwendigen Informationen in der Mehrzahl der Fälle nicht vorhanden (siehe Abschnitte 2.1.1 und 2.1.2) sind. Gerade die letzte Annahme wurde in der Testphase des Programms voll und ganz bestätigt.

3.2 Vereinfachte Methode zur Bestimmung von Tiefgang, Trimm und Krängung

Folgende Vereinfachungen wurden durchgeführt:

¹ $n! = n \cdot (n-1) \cdot (n-2) \cdot \dots \cdot 3 \cdot 2 \cdot 1$

- Die Unterwasserform des Schiffes wurde durch ein vertikales Prisma ersetzt mit den Abmessungen $L \times B$ und zusätzlich mit Hilfe des Wasserlinien-Koeffizienten $c_w < 1$ korrigiert.
- Die vertikale Position des Gewichtsschwerpunktes und des Auftriebsschwerpunktes, die die Stabilität des Schiffes und entsprechend den Trimm und insbesondere die Krängung (die Querstabilität eines schlanken Schiffes ist wesentlich sensibler als dessen Längsstabilität) beeinflussen, wurde nicht berücksichtigt. Der Grund dafür liegt in der Tatsache, dass bei allen Stauvariationen sämtliche Container an Bord bleiben. Auch nach Verschieben eines Container von seiner ursprünglichen Position auf eine andere, die nicht in derselben Lage liegt, wird sich der vertikale Gewichtsschwerpunkt nicht wesentlich ändern, da ein Container aus einer anderen Lage an seine ursprüngliche Position tritt.
- Der Schiffskörper ist vollkommen steif. Ein Verschieben der Ladung verursacht weder ein Verbiegen noch eine Torsion.

4. Entwicklung des Optimierungsmodells

4.1 Lösungsanforderungen

Zu Beginn des Projektes wurde die Bandbreite für die Reduzierung der Fixpunkthöhe festgelegt. Die Erwartungen gingen davon aus, dass das Programm in der Lage sein sollte, bei durchschnittlicher willkürlicher Containerverteilung den Fixpunkt in einer Größenordnung von 30-50 cm zu senken.

In diesem Stadium der Projektentwicklung wurde die Frage nach der Berechnungszeit für die Optimierung vernachlässigt. Ausgangspunkt war ein vernünftiges Zeitmaß, das deutlich unter dem Zeitbedarf lag, den ein Fachmann für die Optimierung der Containerladung „von Hand“ ansetzen müsste.

4.2 Vereinfachungen

Im Laufe der Bearbeitung mussten weitere Vereinfachungen vorgenommen werden:

- Der Standardcontainer (TEU) ist vom Typ ISO-1¹.
- Der vertikale Schwerpunkt des Containers ist für das hydrostatische Rechenmodell irrelevant und fällt daher heraus.
- Der horizontale Schwerpunkt jedes Containers liegt in der Mitte (Schnittpunkt der Diagonalen).
- Das TEU Raster verteilt sich gleichmäßig auf den Laderaum des Schiffes. Stehen Länge und Breite des Laderaumes (für das jeweilige Schiff) sowie die Anzahl der Reihen und Lagen fest, berechnet das CARGO+ Programm automatisch den gleichen Abstand zwischen zwei nebeneinander und hintereinander im Raster liegenden Containern (Abb. 11). Das ist zwar ein beabsichtigter Fehler in der Methodik, führt aber auf Grund der großen Anzahl der Container im Raster zu kaum merklichen Abweichungen im Endergebnis.
- Freie Oberflächen von Flüssigkeiten in Tanks bleiben unberücksichtigt.
- Die Füllmenge der Tanks und ihre Auswirkungen auf den horizontalen Gewichts-
schwerpunkt werden vernachlässigt.

¹ Es handelt sich um maritime Container (TEU) mit einer Länge von 20', einer Breite von 8' und einer Höhe von 8, 8 ½, 9, 9 ½ oder 10'

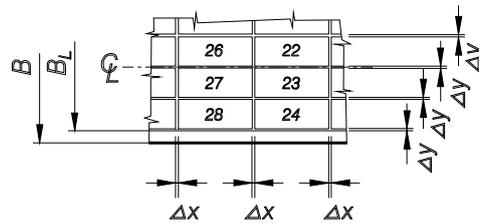


Abb. 11: Automatische, gleichmäßige Verteilung des Containerrasters im Programm CARGO+

4.3 Fehlereinschätzungen

Bezüglich der hydrostatischen Vereinfachungen und der Annahmen, die für die Containerstauung im Raster sowie den Schwerpunkt jeder Box und jedes Tanks getroffen wurden, liegt die geschätzte mögliche Fehlertoleranz für die Fixpunkthöhe im Bereich von ± 10 cm.

4.4 Einsatz von Ballast

Die Möglichkeit, das Schiff zu vertrimmen oder es mit Hilfe von Ballastwasser tiefer eintauchen zu lassen, kann kurz vor der Optimierung des Stauplanes in Erwägung gezogen werden. Auf diese Weise bleibt es dem Benutzer des Programms überlassen, Tiefgang und Trimm des Schiffes bei gleichzeitiger ständiger Kontrolle der Fixpunkthöhe den Wasserstraßenbedingungen anzupassen. In vielen Fällen reicht bereits ein Umpumpen von Treibstoff und Wasser dazu aus, die Krängung und Vertrimmung auszugleichen.

5. Testphase mit Simulationsmodell

5.1 Benutzeroberfläche

Das Programm besteht aus zwei Komponenten, und zwar aus dem Optimierungskern und der Benutzeroberfläche. Alle Berechnungen werden im Optimierungskern durchgeführt. Das weit verbreitete MS Excel® Programm dient als Schnittstelle für alle Ein- und Ausgabevorgänge. Dadurch vereinfacht sich die Kommunikation zwischen dem Optimierungszentrum und dem Benutzer, der lediglich über Grundkenntnisse des Excel-Programms verfügen sollte.

5.2 Dateneingabe

Die CARGO+ Arbeitsmappe in Excel hat 6 Arbeitsblätter, und zwar

1. **Schiffsdaten**
2. **Containerdaten** in tabellarischem Format vor der Optimierung
3. **Containerdaten** in schematischer Übersicht vor der Optimierung
4. **Containerdaten** in tabellarischem Format nach der Optimierung
5. **Containerdaten** in schematischer Übersicht nach der Optimierung
6. **Zusatzdaten**

5.2.1 Schiffsdaten

Das Arbeitsblatt „Schiffsdaten“ enthält die Hauptabmessungen des Schiffes, die Verteilung der Tanks und deren Füllmengen sowie weitere für das Programm relevante Angaben über das leere Schiff (Abb. 12).

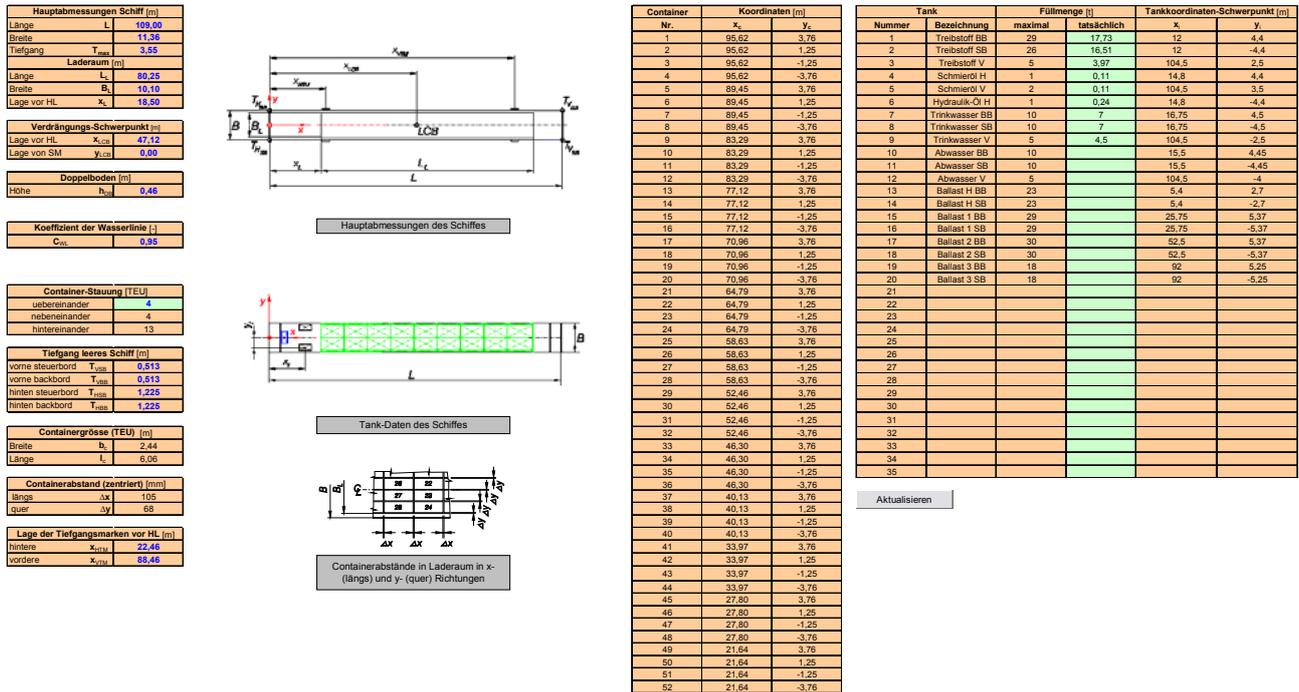


Abb. 12: Excel-Blatt „Schiffsdaten“ für ein GMS mit dem Raster von 13 x 4 TEU

Um diese Daten eindeutig zu definieren und einzutragen, sind drei Skizzen in dieses Arbeitsblatt eingefügt worden. Die erste zeigt schematisch die Hauptabmessungen (Abb. 13) und die zweite die Lage der Tanks (Abb. 14). Die dritte Zeichnung erklärt die automatisch generierten Abstände zwischen den gleichmäßig im Laderaum verteilten Container.

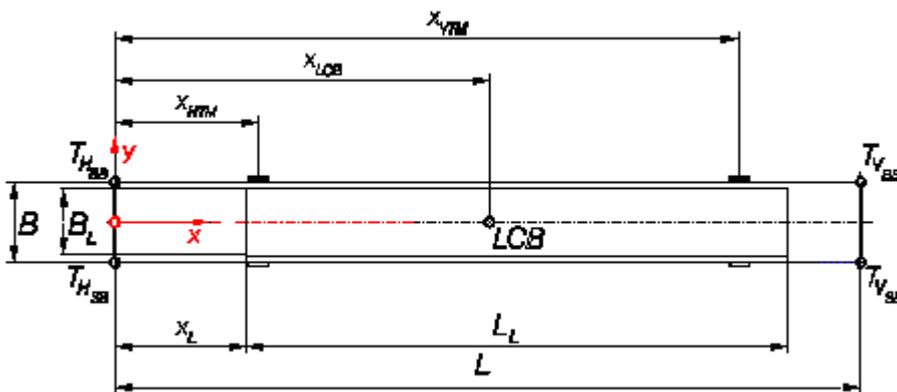


Abb. 13: Schematisch dargestellte Hauptabmessungen des Schiffes zur Eingabe der Daten in das Datenblatt „Schiffsdaten“

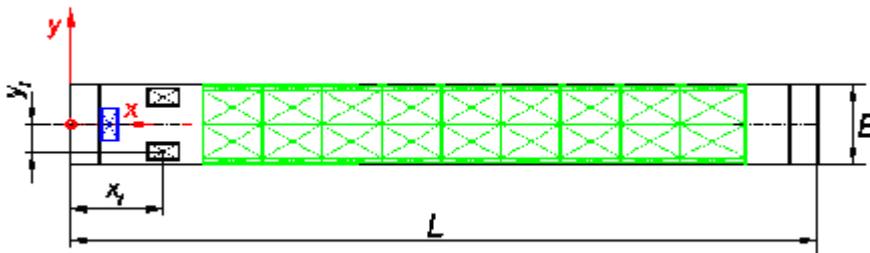


Abb. 14: Schematisch dargestellte Lage der Tanks auf dem Schiff

Alle Daten beziehen sich auf das leere, „trockene“ Schiff. Die meisten dieser Daten bleiben unverändert. Lediglich die Anzahl der Containerlagen kann variieren ebenso wie die tatsächliche Flüssigkeitsmenge in den Tanks. Sind diese konstanten Werte eingegeben, können die entsprechenden Felder (gelbbraun) vom System-Administrator gesperrt werden, sodass nur noch die Werte in den hellgrünen Feldern geändert werden können.

Die Werte in den drei Spalten in der Mitte des Blattes (Container) werden automatisch über das Programm erzeugt und eingegeben je nach Raster, Containergröße (normalerweise TEU, eine andere Größe ist aber ebenfalls möglich) und Länge sowie Breite des Laderaums.

5.2.2 Flüssigkeiten an Bord

Die Spalten auf der rechten Seite der Tabelle enthalten die Seriennummern der Tanks (deren Reihenfolge ist willkürlich), die Bezeichnung (Art der Flüssigkeit), die maximale Füllmenge, die Ist-Füllmenge und die Koordinaten des Tanks in der horizontalen Ebene. Die Spalte mit den Ist-Daten (hellgrün) ist aktiv und kann vom Benutzer ausgefüllt werden.

Sind alle Daten eingegeben, werden die Schifffdaten durch Anklicken der Schaltfläche „Aktualisieren“ für die Verarbeitung im Programm gespeichert.

5.2.3 Containerdaten

Die Containerdaten lassen sich durch Anklicken der Schaltfläche „Importieren“ aus dem vorher gespeicherten Dokument übernehmen oder können in der Tabelle auf der linken Seite des Excel Arbeitsblattes „Containerdaten“ (Abb. 15) von Hand eingetragen werden.

Containernummer	Höhe [m]		Gesamthöhe [m]		Masse [t]				Gesamtmasse [t]				Verband				Koordinaten [m]		Tiefgang [m]	ohne Tanks	mit Tanks	
	L1	L2	L1	L2	L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4	Y	X				
1	53	305	9,0	8,5	16,5	32,70	2,20		14,50									95,62	3,76		1,846	1,876
2	54	306	9,0	8,5	16,5	28,0	14,50	8,00	13,30	37,80								95,62	-1,25		1,852	1,883
3	55	307	9,5	9,0	18,5	28,0	14,60	8,00	12,70	35,30								95,62	-1,25		1,721	1,780
4	56	308	9,0	9,0	18,0	19,70	13,90			27,60								95,62	-3,76		1,758	1,788
5	57	309	9,5	9,5	19,0	12,10	12,10			24,20	9	61						89,45	-3,76		1,921	1,913
6	58	310	9,0	8,5	17,5	27,0	13,00	8,90	4,95	28,45	10	62	114					89,45	-1,25			
7	59	311	9,5	8,5	18,0	14,50	4,10	6,50		25,10	11	63	115					89,45	-1,25			
8	60	312	9,0	9,0	18,0	13,50	7,00			20,50	12	64						89,45	-3,76			
9	61	313	9,5	9,5	19,0	12,10	12,10			24,20	5	57						83,29	-3,76			
10	62	314	9,0	8,5	17,5	13,00	8,50	4,95		26,45	6	58	110					83,29	-1,25			
11	63	315	9,5	8,5	18,0	14,50	4,10	6,50		25,10	7	59	111					83,29	-1,25			
12	64	316	9,0	9,0	18,0	13,50	7,00			20,50	8	60						83,29	-3,76			
13	65	317	8,5	8,5	17,0	27,5	6,70	3,75	2,00	11,45	17	69	121					77,12	-3,76			
14	66	318	9,0	8,5	17,5	28,0	7,50	5,80	7,50	20,80	18	70	122					77,12	-1,25			
15	67	319	8,5	8,5	17,0	25,5	2,20	11,50	9,00	22,70	19	71	123					77,12	-1,25			
16	68	320	9,0	9,0	18,0	26,0	14,50	4,30	2,00	20,80	20	72	124					77,12	-3,76			
17	69	321	8,5	8,5	17,0	27,5	6,70	3,75	2,00	11,45	13	65	117					70,96	-3,76			
18	70	322	9,0	8,5	17,5	28,0	7,50	5,80	7,50	20,80	14	66	118					70,96	-1,25			
19	71	323	8,5	8,5	17,0	25,5	2,20	11,50	9,00	22,70	15	67	119					70,96	-1,25			
20	72	324	9,0	9,0	18,0	26,0	14,50	4,30	2,00	20,80	16	68	120					70,96	-3,76			
21	73	325	9,0	9,0	18,0	26,5	4,70	6,80	5,50	15,90	17	69	121					64,79	-3,76			
22	74	326	9,5	9,5	19,0	27,0	5,50	12,60	5,00	23,10	18	70	122					64,79	-1,25			
23	75	327	9,0	9,5	18,5	27,0	6,70	12,60	5,50	23,80	19	71	123					64,79	-1,25			
24	76	328	8,5	9,0	17,5	27,0	8,80	2,20	6,00	15,00	20	72	124					64,79	-3,76			
25	77	329	8,0	9,5	17,5	25,5	6,20	4,80	5,50	15,50	21	73	125					58,63	-3,76			
26	78	330	8,5	9,5	18,0	27,0	6,50	12,60	5,00	23,10	22	74	126					58,63	-1,25			
27	79	331	9,0	9,5	18,5	27,0	6,70	12,60	5,50	23,80	23	75	127					58,63	-1,25			
28	80	332	8,5	9,0	17,5	27,0	12,30	2,20	6,00	20,50	24	76	128					58,63	-3,76			
29	81	333	9,5	9,5	19,0	27,0	14,50	11,75	6,90	33,15	25	77	129					52,46	-3,76			
30	82	334	9,5	9,0	18,5	26,5	9,90	8,90	2,40	20,40	26	78	130					52,46	-1,25			
31	83	335	9,0	9,0	18,0	26,5	7,25	6,45	4,90	18,20	27	79	131					52,46	-1,25			
32	84	336	9,5	9,0	18,5	27,0	3,45	7,70	2,00	13,15	28	80	132					52,46	-3,76			
33	85	337	9,5	8,5	18,0	27,0	14,50	11,75	6,90	33,15	29	81	133					46,30	-3,76			
34	86	338	9,5	8,0	17,5	26,5	9,90	8,90	2,40	20,40	30	82	134					46,30	-1,25			
35	87	339	9,0	8,5	17,5	25,5	7,25	6,45	4,90	18,20	31	83	135					46,30	-1,25			
36	88	340	9,5	9,0	18,5	27,0	3,45	7,70	2,00	13,15	32	84	136					46,30	-3,76			
37	89	341	9,0	9,5	18,5	26,5	10,95	8,95	6,15	22,95	33	85	137					40,13	-3,76			
38	90	342	8,5	9,0	17,5	26,5	8,00	10,00	3,45	21,45	34	86	138					40,13	-1,25			
39	91	343	9,0	8,0	17,0	25,0	11,00	21,90	11,50	44,40	35	87	139					40,13	-1,25			
40	92	344	9,5	9,0	18,5	27,0	7,00	6,45	2,00	15,45	36	88	140					40,13	-3,76			
41	93	345	9,0	9,0	18,0	26,5	10,95	8,95	6,15	22,95	37	89	141					33,97	-3,76			
42	94	346	8,5	9,0	17,5	26,5	4,40	14,00	3,45	21,85	38	90	142					33,97	-1,25			
43	95	347	9,0	8,0	17,0	25,0	10,50	11,50		33,50	39	91	143					33,97	-1,25			
44	96	348	9,5	9,0	18,5	27,0	7,00	6,45	2,00	15,45	40	92	144					33,97	-3,76			
45	97	349	8,0	8,5	16,5	24,5	2,80	2,20	2,00	7,00	41	93	145					27,80	-3,76			
46	98	350	9,0	9,5	18,5	27,5	6,75	3,45	2,00	12,20	50	102	154					27,80	-1,25			
47	99	351	8,5	8,0	16,5	24,5	6,75	6,80	2,00	15,35	51	103	155					27,80	-1,25			
48	100	352	9,0	8,0	17,0	26,0	6,60	2,90	2,00	10,50	52	104	156					27,80	-3,76			
49	101	353	8,0	8,5	16,5	24,5	2,20	2,20	2,00	6,40	46	96	150					21,64	-3,76			
50	102	354	9,0	9,5	19,0	27,5	6,75	3,45	2,00	12,20	46	96	150					21,64	-1,25			
51	103	355	8,5	8,0	16,5	24,5	6,75	6,80	2,00	15,35	47	97	151					21,64	-1,25			
52	104	356	9,0	8,0	17,0	26,0	2,20	2,20	2,00	6,40	48	98	152					21,64	-3,76			
												1072,60										

Tiefgang [m]	ohne Tanks	mit Tanks
vorne steuerbord	1,846	1,876
vorne achterbord	1,852	1,883
hinten steuerbord	1,721	1,780
hinten achterbord	1,758	1,788
maximale Tanks	1,921	1,913
Fixpunkt [m]	ohne Tanks	mit Tanks
Position längs [m]	7,169	7,145
Position hörs [m]	67,93	67,93
Containernummer	122	122

Aktualisieren

Import

Export

Eingabe löschen

4. Lage

101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122
123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144

3. Lage

145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166
167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188

2. Lage

189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210
211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232

1. Lage

233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254
255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276

Diese Abbildung ist ein Beispiel für die Containerstauung. In diesem Fall für ein Raster von 4 Containern nebeneinander, 13 Container hintereinander und 3 bzw. 4 Container übereinander (vgl. Schiffsdaten -> Container-Stauung.)

Abb. 15: Konkretes Beispiel für eine tabellarische Darstellung der Containerdaten vor der Optimierung

Jeder Container im TEU-Raster definiert sich über seine Seriennummer, die seine exakte Position an Bord angibt, sein Gewicht (brutto) und seine Höhe. Im Falle eines 40' Containers ist es darüber hinaus noch erforderlich, die Seriennummer des 20' Containers anzugeben, mit dem er die 40' Einheit bildet. Für das Optimierungszentrum ist es außerordentlich wichtig zu wissen, welche beiden Felder ein FEU darstellen, damit sie bei allen Optimierungen zusammen erfasst werden können. Diese beiden virtuell gleichen 20' Einheiten müssen auch dieselbe Höhe aufweisen, denn anderenfalls gäbe das Programm eine Fehlermeldung ab.

Die Skizze mit der Containeranordnung an Bord dient der Orientierung des Benutzers bei der Eingabe der Daten. Die kleine Tabelle in der oberen rechten Ecke zeigt nach Betätigen der Schaltfläche „Aktualisieren“ die Tiefgänge vorne und achtern und die Höhe und Lage des Fixpunktes für die Containerladung vor der Optimierung. Zwei unterschiedliche Zahlenreihen stehen zur Verfügung – mit und ohne Flüssigkeitstanks -, die dem Benutzer bereits zu diesem Zeitpunkt die Möglichkeit geben zu sehen, in welchem Ausmaß die Zubunkerung von Flüssigkeiten die Schwimmelage des Schiffes beeinflussen können.

5.2.4 Containerübersicht

Das Excel Arbeitsblatt „Containerübersicht“ (Abb. 16) zeigt schematisch die Daten aus der Containerdaten-Tabelle.

- 27 -

L1 Nummer				L2 Nummer				L3 Nummer				L1 Stapelhöhe [t]				L2 Stapelhöhe [t]				L3 Stapelhöhe [t]				L1 Gewicht [t]			L2 Gewicht [t]			L3 Gewicht [t]			Sum Gewicht	Sum Höhen						
1	2	3	4	53	54	55	56	105	106	107,0	108,0	8,0	9,0	9,5	9,0	8,5	9,5	9,0	9,0	9,5	9,5			12,70	14,50	14,60	13,70	2,30	8,00	8,00	13,90	15,30	12,70		115,60	16,5	28,0	28,0	18,0	
5	6	7	8	57	58	59	60	109	110	111,0	112,0	9,5	9,0	9,5	9,0	9,5	8,5	8,5	9,0	9,5	8,5			24,20	26,00	29,00	27,00	24,20	17,00	8,20	14,00	9,90	13,00		99,25	19,0	27,0	26,5	16,0	
9	10	11	12	61	62	63	64	113	114	115,0	116,0																									96,25	19,0	27,0	26,5	18,0
13	14	15	16	65	66	67	68	117	118	119,0	120,0			8,5												2,20										75,75	27,5	28,0	25,5	26,0
17	18	19	20	69	70	71	72	121	122	123,0	124,0	8,5	9,0		9,0	9,5	9,5	8,5	9,0	9,5	9,5	8,5	9,0	11,40	15,00		29,00	7,50	11,60	23,00	8,60	4,00	15,00	18,00	4,00	75,75	27,5	28,0	25,5	26,0
21	22	23	24	73	74	75	76	125	126	127,0	128,0	8,0			8,5									4,70			6,80									76,90	25,5	27,0	27,0	27,0
25	26	27	28	77	78	79	80	129	130	131,0	132,0	8,0	8,5	9,0		9,5	9,5	9,5	9,0	8,0	9,0	8,5	9,5	11,00	11,40			9,60	25,20	25,20	4,40	11,00	10,00	11,00	12,00	82,90	25,5	27,0	27,0	27,0
29	30	31	32	81	82	83	84	133	134	135,0	136,0															7,25	3,45									84,90	27,0	26,5	25,5	27,0
33	34	35	36	85	86	87	88	137	138	139,0	140,0	9,5	9,5		9,5	9,5	8,0	8,5	9,0	8,0	9,0	8,0	8,5	29,00	19,00			23,50	17,00	12,90	15,40	13,80	4,80	9,00	4,00	84,90	27,0	26,5	25,5	27,0
37	38	39	40	89	90	91	92	141	142	143	144	9,0	8,5	9,0				9,0	8,0	8,0	9,0	8,0	8,5	8,00	11,00		14,00	10,00	21,90			12,30	6,90	23,00	4,00	104,25	26,5	26,5	26,0	27,0
41	42	43	44	93	94	95	96	145	146	147	148	9,0	8,5	9,0		9,5			9,0	9,0	9,0			21,90	14,40	10,90		11,70	14,00	11,90						93,75	26,5	26,5	25,0	27,0
45	46	47	48	97	98	99	100	149	150	151	152	8,0			9,0	8,5			8,0	8,0	9,0	8,0	9,0	2,80			5,60	2,30			2,90	4,00	4,00	4,00	4,00	45,05	24,5	27,5	24,5	26,0
49	50	51	52	101	102	103	104	153	154	155	156	8,0	9,0	8,5		8,5	9,5	8,0		8,0	9,0	8,0	9,0	13,50	13,50			2,20				4,00	4,00	4,00	4,00	40,35	24,5	27,5	24,5	26,0

Abb. 16: Container-Übersicht vor der Optimierung

5.3 Optimierung der Beladung

Beim Wechsel zur Ansicht „Optimieren“ (Abb. 17) wird zunächst die Schaltfläche „Aktualisieren“ betätigt um festzustellen, ob während der Eingabe ein logischer Fehler aufgetreten ist. Sind Fehler vorhanden (z.B. ein fehlendes Gewicht = 0 oder aber die Verbindung von zwei Containern mit unterschiedlichen Höhen), generiert das System eine Fehlermeldung. Erst nach Beseitigung aller Fehler lässt sich die Schaltfläche „Optimieren“ betätigen. Es dauert 2 bis 3 Minuten, bis das Programm die Berechnung abgeschlossen hat.

Die große Tabelle (Abb. 17) auf der linken Seite zeigt die optimierte Containeraufstellung und die kleine Tabelle in der oberen rechten Ecke die Schwimmlage des Schiffes nach der Optimierung. Die beiden Spalten ganz rechts in der Container-Tabelle stellen die Tanks und ihre Ist-Inhalte dar. Der Benutzer kann interaktiv die Füllmenge jedes Tanks verändern bis hin zum Grenzwert, der in den „Schiffsdaten“ enthalten ist. Wird dieser Wert überschritten, erscheint eine Fehlermeldung.

Blau und rot markierte Felder in der großen Tabelle mit den optimierten Container-Staudaten zeigen den höchsten Containerstapel an Bord. Werden nur blaue Felder ausgewiesen, bedeutet es, dass die an Bord vorhandenen Flüssigkeiten mit ihrem jetzigen Füllstand und ihrer Verteilung an Bord eine Trimm- und Krängungs-Änderung nicht beeinflussen. Bei roten Feldern ist das nicht der Fall.

Die „Übersicht Optimierung“ (Abb. 18) stellt den optimierten Container-Stauplan aus Abb. 17 erneut dar, jedoch in einer einfacheren und verständlicheren Weise.

Bericht 1852
Teil C: Reduzierung der Fixpunkthöhe

Containernummer	Höhe [m]				Deckenhöhe [m]				Masse [t]				Deckenmasse [t]				Verbund				Koordinaten [m]				Tanks	
L1	L2	L3	L4	L5	L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4	Decke	Wand	Nummer	Füllmenge [l]		
101	104	118	8,5	8,0	0,0	26,5	2,20	2,20	0,00	4,40	0	0	0	0	95,62	3,76	1	6,23								
107	108	112	9,5	0,0	0,0	9,5	12,70	0,00	0,00	12,70	0	0	0	0	95,62	1,25	2	6,89								
105	100	113	8,0	8,0	0,0	16,0	11,50	2,50	0,00	14,40	0	0	0	0	95,62	-1,25	3	2,78								
108	105	101	9,5	0,0	0,0	9,5	15,20	0,00	0,00	15,20	0	0	0	0	95,62	-3,76	4	0,11								
35	12	129	9,0	9,0	8,5	26,5	7,25	13,50	8,00	29,75	0	8	119	89,45	3,76	5	0,11									
71	41	18	8,5	9,0	9,0	26,5	11,50	10,95	7,50	29,95	67	37	14	89,45	-1,25	6	0,24									
10	82	86	9,0	8,5	8,0	26,5	13,00	8,50	6,45	27,95	6	88	92	89,45	-1,25	7	0,10									
1	20	87	9,0	9,0	8,5	26,5	13,70	14,50	6,45	34,65	0	16	83	89,45	-3,76	8	5,10									
31	8	118	9,0	9,0	8,5	26,5	7,25	13,50	8,00	29,75	0	12	133	83,29	3,76	9	2,56									
87	37	14	8,5	9,0	9,0	26,5	11,50	10,95	7,50	29,95	71	41	18	83,29	1,25	10	2,75									
6	58	92	9,0	8,5	9,0	26,5	13,00	8,50	6,45	27,95	10	62	86	83,29	-1,25	11	4,32									
94	16	83	9,0	9,0	8,5	26,5	14,00	14,50	6,45	34,95	0	20	87	83,29	-3,76	12	0,10									
43	51	132	8,5	8,5	8,5	26,5	4,40	6,75	4,50	17,15	0	47	108	77,12	3,76	13	0,89									
38	122	83	8,5	9,5	8,5	26,5	12,35	7,50	4,10	23,90	0	118	59	77,12	1,25	14	0,00									
115	26	121	8,5	8,5	8,5	26,5	6,90	5,50	2,00	14,00	111	22	117	77,12	-1,25	15	0,00									
87	19	114	8,5	8,5	9,5	26,5	2,20	2,20	4,95	9,35	0	0	110	77,12	-3,76	16	0,00									
38	47	128	8,5	8,5	9,5	26,5	8,00	6,75	0,00	20,75	0	81	132	70,96	3,76	17	0,00									
24	118	51	8,5	9,5	8,5	26,5	6,30	7,50	4,10	18,40	0	122	83	70,96	1,25	18	0,00									
111	22	117	8,5	8,5	9,5	26,5	6,90	5,50	2,00	14,00	119	29	121	70,96	-1,25	19	0,00									
83	15	110	8,5	8,5	9,5	26,5	2,20	2,20	4,95	9,35	0	0	114	70,96	-3,76	20	0,00									
17	131	102	8,5	8,5	9,5	26,5	6,70	5,50	3,45	14,65	13	127	98	64,79	3,76	21	0,00									
117	59	166	8,0	9,5	9,0	26,5	11,50	9,85	2,00	19,35	143	89	152	64,79	1,25	22	0,00									
88	88	154	9,5	8,0	9,0	26,5	11,75	8,50	2,00	22,25	81	82	100	64,79	-1,25	23	0,00									
79	129	148	9,5	8,0	9,0	26,5	12,80	9,50	3,45	21,55	75	125	142	64,79	-3,76	24	0,00									
13	127	98	8,5	8,5	9,5	26,5	6,70	5,50	3,45	14,65	17	131	102	58,63	3,76	25	0,00									
143	89	182	8,0	9,5	9,0	26,5	11,50	9,85	2,00	19,35	147	93	159	58,63	1,25	26	0,00									
81	84	191	9,5	8,0	9,0	26,5	11,75	8,50	2,00	22,25	85	86	154	58,63	-1,25	27	0,00									
75	125	142	9,5	8,0	9,0	26,5	12,80	9,50	3,45	21,55	79	129	146	58,63	-3,76	28	0,00									
78	145	138	9,5	8,0	9,0	26,5	12,60	6,15	2,40	21,15	74	141	134	52,48	3,76	29	0,00									
103	130	77	8,0	9,0	9,5	26,5	6,90	5,00	4,80	16,40	99	128	73	52,48	1,25	30	0,00									
137	70	27	8,0	9,5	9,0	26,5	6,90	5,80	5,70	18,40	133	66	23	52,48	-1,25	31	0,00									
2	89	155	9,5	8,0	9,0	26,5	14,00	3,75	2,00	20,25	81	82	100	52,48	-3,76	32	0,00									
74	141	134	9,5	8,0	9,0	26,5	12,60	6,15	2,40	21,15	78	145	138	46,30	3,76	33	0,00									
99	126	73	8,0	9,0	9,5	26,5	6,90	5,00	4,80	16,40	103	130	77	46,30	1,25	34	0,00									
133	86	23	8,0	9,5	9,0	26,5	6,90	5,80	5,70	18,40	137	70	27	46,30	-1,25	35	0,00									
89	85	161	9,0	9,5	8,0	26,5	10,30	3,75	2,00	15,75	81	89	155	46,30	-3,76											
61	88	134	9,5	9,0	9,0	26,5	12,10	7,70	2,00	21,80	91	84	130	40,13	3,76											
44	138	80	9,5	8,0	9,0	26,5	7,90	4,50	2,20	13,70	40	135	76	40,13	1,25											
54	72	153	9,5	9,0	8,0	26,5	8,00	4,30	2,00	14,30	0	68	149	40,13	-1,25											
91	34	84	8,0	9,5	9,0	26,5	21,90	9,50	7,00	38,40	0	30	80	40,13	-3,76											
67	84	121	9,5	9,0	9,0	26,5	12,10	7,70	2,00	21,80	91	84	134	33,97	3,76											
40	135	75	9,5	8,0	9,0	26,5	7,90	4,50	2,20	13,70	44	139	80	33,97	1,25											
36	88	149	9,5	9,0	8,0	26,5	3,45	4,30	2,00	9,75	0	72	153	33,97	-1,25											
49	30	80	8,0	9,5	8,0	26,5	2,20	9,50	7,00	18,70	0	34	84	33,97	-3,76											
95	45	31	9,0	8,0	9,5	26,5	3,30	2,80	14,40	31,20	0	0	29	27,80	3,76											
71	82	111	8,0	9,0	9,5	26,5	4,70	3,20	14,90	21,40	0	7	27,80	1,25												
9	50	148	9,5	9,0	8,5	27,0	12,10	6,75	2,00	20,85	5	46	144	27,80	-1,25											
43	32	109	9,0	9,5	8,5	27,0	10,50	3,45	2,00	15,95	0	0	136	27,80	-3,76											
95	25	39	9,0	8,0	9,5	26,5	8,00	5,50	14,40	27,70	0	0	33	21,64	3,76											
11	48	7	8,0	9,0	9,5	26,5	12,70	5,60	14,40	32,80	0	0	111	21,64	-1,25											
5	48	144	9,5	9,0	8,5	27,0	12,10	6,75	2,00	20,85	0	92	148	21,64	-1,25											
3	39	138	9,5	9,0	8,5	27,0	14,80	11,00	2,00	27,60	0	0	140	21,64	-3,76											
1072,60																										

Talgang [m]	ohne Tanks	mit Tanks
vorne steubord	1,751	1,761
vorne backbord	1,731	1,732
hinten steubord	1,865	1,924
hinten backbord	1,895	1,895
maximale Talgang	1,910	1,980

Fixpunkt [m]	ohne Tanks	mit Tanks
6,842		6,613
30,83		30,48
Containernummer	148	123

Aktualisieren

Importieren

Exportieren

Eingabe löschen

Optimieren

Abb. 17: Excel-Blatt „Optimierung“

L1 Nummer				L2 Nummer				L3 Nummer				L1 Stapelhöhe [m]				L2 Stapelhöhe [m]				L3 Stapelhöhe [m]				L1 Gewicht [t]		L2 Gewicht [t]		L3 Gewicht [t]		Sum Gewicht	Sum Höhen									
101	107	95	108	104	108	100	105	116	112	113	109	8,5	9,5	8,0	9,5	8,0	8,0	8,0	9,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,20	12,70	11,50	15,30	2,20	0,00	2,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	46,80	16,5	9,5	16,0	9,5
35	71	10	4	12	41	62	20	183	18	96	87	9,0	9,5	9,0	9,0	9,0	9,0	8,5	9,0	8,5	9,0	9,0	6,5	7,25	23,00	26,00	13,70	27,00	21,90	17,00	20,00	18,00	15,00	12,00	12,90	122,30	26,5	26,5	26,5	26,5
31	87	6	94	8	37	58	46	119	14	92	83	9,0	8,5	9,0	9,0	9,0	9,0	8,5	9,0	8,5	9,0	9,0	6,5	7,25	23,00	26,00	14,00	27,00	21,90	17,00	20,00	18,00	15,00	12,00	12,90	122,60	26,5	26,5	26,5	26,5
42	28	115	97	51	122	26	19	132	63	121	114	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	9,5	8,5	9,5	9,5	4,40	12,30	13,00	2,20	13,50	15,00	11,00	2,20	12,00	8,20	4,00	9,90	64,40	26,5	26,5	26,5	26,5
38	24	111	53	47	118	22	15	128	59	117	110	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	9,5	8,5	9,5	9,5	8,00	8,00	13,00	2,20	13,50	15,00	11,00	2,20	12,00	8,20	4,00	9,90	62,60	26,5	26,5	26,5	26,5
17	147	85	79	131	93	88	120	102	156	154	146	8,5	8,0	9,5	9,5	8,5	8,5	8,0	8,0	9,5	9,0	9,0	9,0	11,40	23,00	23,50	25,20	11,00	11,70	17,00	11,00	6,90	4,00	4,00	6,90	77,80	26,5	26,5	26,5	26,5
13	143	81	75	127	80	82	125	98	152	150	142	9,5	8,0	9,5	9,5	9,5	9,0	9,5	9,5	9,5	9,0	9,0	9,0	25,20	13,20	13,80	14,50	12,3												

Lage 1				Lage 2				Lage 3				Lage 4			
Containernummer	Ursprungshafen	Zielhafen	Gefährgut												
1				53				105							
2				54				106							
3				55				107							
4				56				108							
5				57				109							
6				58				110							
7				59				111							
8				60				112							
9				61				113							
10				62				114							
11				63				115							
12				64				116							
13				65				117							
14				66				118							
15				67				119							
16				68				120							
17				69				121							
18				70				122							
19				71				123							
20				72				124							
21				73				125							
22				74				126							
23				75				127							
24				76				128							
25				77				129							
26				78				130							
27				79				131							
28				80				132							
29				81				133							
30				82				134							
31				83				135							
32				84				136							
33				85				137							
34				86				138							
35				87				139							
36				88				140							
37				89				141							
38				90				142							
39				91				143							
40				92				144							
41				93				145							
42				94				146							
43				95				147							
44				96				148							
45				97				149							
46				98				150							
47				99				151							
48				100				152							
49				101				153							
50				102				154							
51				103				155							
52				104				156							

Abb. 19: „Zusatzdaten“ mit Ursprungs- und Zielhafen und Hinweis auf Gefährgut

5.4 Rechendauer

Die ersten Tests während der Entwicklungsphase haben erkennen lassen, dass eine Optimierung, die gleichzeitig auf beiden relevanten Containerparametern – Gewicht und Höhe – basiert, eine wesentlich stärker ausgelegte Hardware erfordert als in den Terms of Reference vorgesehen. Aufgrund der immens hohen Anzahl an Kombinationsmöglichkeiten bei der Optimierung des Stauplans würde der Rechenvorgang - selbst bei Einsatz eines Hochleistungsrechners - unverhältnismäßig lang dauern. Um den Vorgaben der Terms of Reference zu entsprechen und einen handelsüblichen PC einsetzen zu können, wurde das Rechenprogramm so gestaltet, dass die Optimierung von Gewicht und Höhe separat durchgeführt wird.

Im ersten Schritt wird eine so genannte vorläufige Optimierung ausgeführt, bei der hohe und niedrigere Container in jedem Stapel derart kombiniert werden, dass eine minimale Höhe der gesamten Containerladung erzielt wird. Danach findet die Gewichtsoptimierung statt durch Austausch von Containern mit derselben Höhe aber unterschiedlichen Gewichten, sodass das Schiff schließlich eine Schwimmlage einnimmt, bei der die Fixpunkthöhe den offensichtlich niedrigsten Wert erreicht. Die Anwendung dieser Vorgehensweise reduziert die Berechnungszeit auf 2 bis 3 Minuten bei Einsatz eines handelsüblichen PCs.

Dieser Ansatz fand seine endgültige Bestätigung im Praxistest, der in Kapitel 6 beschrieben wird.

Die Fehlertoleranz in der Fixpunkthöhe von ± 10 cm, die sich auf Grund von hydrostatischen Vereinfachungen und fehlenden oder nicht präzisen Daten über die Container ergibt, ist durchaus realistisch und kann nicht als Schwachpunkt des CARGO+ Programms eingestuft werden.

5.5 Testergebnisse

Während der gesamten Projektlaufzeit wurde das Programm immer wieder Tests unterzogen, um kleinere Anpassungen besonders bei den hydrostatischen Annahmen vorzunehmen und die Zuverlässigkeit und Präzision der Formeln erhöhen zu können. Dieser Teil des Programms beruht auf den grundlegenden hydrostatischen Prinzipien. Die Hauptaspekte der Tests mit dem CARGO+ Programm werden nachstehend dargestellt.

5.5.1 Vorgehensweise

Die Tests mit dem Simulationsprogramm bestanden aus einer Serie parallel laufender hydrostatischer Berechnungen, zum einen mit dem Rechenprogramm und zum anderen „von Hand“. Bei der „von Hand“-Methode waren alle vorhandenen Hilfsmittel, wie Taschenrechner, PC mit Excel-Programm oder hydrostatische Rechenprogramme - außer CARGO+® - zugelassen. Die Berechnungen wurden mit vereinfachten Container-Stauplänen durchgeführt, d.h. die gesamte Containerladung wurde durch einen, zwei oder drei homogene Containerblöcke ersetzt (siehe Abb. 20).

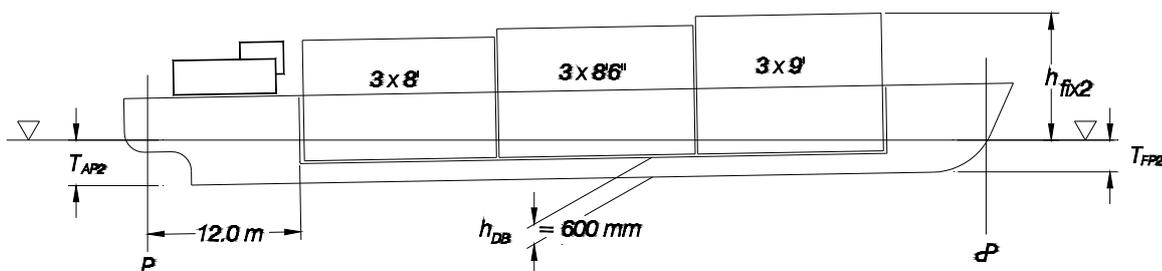


Abb. 20: Vereinfachte Containerverteilung zu Testzwecken

Hintergrund für diese Vereinfachung der Containerladung (einheitliche Blockbildung) war die schnellere Berechnung der Schwimmelage des Schiffes sowie der Lage und Höhe des Fixpunktes „von Hand“.

5.5.2 Resultate

Weder die Qualität noch die numerische Präzision wurden durch diese vereinfachte Vorgehensweise beeinflusst. Auf Grund der großen Zeitersparnis konnten eine Vielzahl von Überprüfungen durchgeführt bzw. zahlreiche vereinfachte Möglichkeiten gegengerechnet

werden. Die ersten Kontrollen machten einige Abweichungen bei bestimmten Werten sichtbar, sodass entsprechende Korrekturen im Programm vorgenommen werden mussten. Nach Anpassung des Programms zeigten sich bei der letzten Gruppe der Tests keinerlei Abweichungen mehr. Das Rechenprogramm arbeitete einwandfrei und zuverlässig.

Die folgende Tabelle (Tab. 1) enthält ein Beispiel für die parallel durchgeführten Berechnungen und deren Ergebnisse für drei willkürlich gewählte Beladungsfälle nach der letzten Feineinstellung des Rechenprogramms.

	Fall N°1			Fall N°2			Fall N°3		
	PC Routine	Hand	Abweichung (%)	PC Routine	Hand	Abweichung (%)	PC Routine	Hand	Abweichung (%)
V_1 (m ³)	1121.26	1121.33	0,0062	1206.65	1206.68	0,0025	1324.68	1324.35	0.0249
LCG ₁ (m)	49.6028	49.60	0,0056	50.9925	50.9925	0,0022	53.2198	53.21	0.0184
V_0 (m ³)	899.255	899.33	0,0083	929.649	929.68	0,0033	939.678	939.35	0.0349
LCG ₀ (m)	49.5603	49.56	0,0006	53.2255	53.2255	0,0015	56.7579	56.74	0.0315
T_{m0} (m)	0.947868	0.95	0,2244	0.925301	0.93	0,5052	0.930936	0.93	0.1005
T_{PA0} (m)	1.22988	1.23	0,0097	1.14525	1.15	0,4130	0.952224	0.95	0.2336
T_{PF0} (m)	0.665858	0.67	0,6182	0.705353	0.71	0,6545	0.909649	0.91	0.0386
V_2 (m ³)	2865.26	2865.33	0,0024	2809.65	2809.68	0,0011	2471.68	2471.35	0.0134
LCG ₂ (m)	48.5116	48.51	0,0032	51.4915	51.44	0,1001	55.1964	55.19	0.0116
T_{m2} (m)	2.82648	2.83	0,1243	2.65394	2.66	0,2278	2.31994	2.32	0.0026
T_{PA2} (m)	3.11583	3.12	0,1336	2.97328	2.96	0,4486	2.40748	2.41	0.1047
T_{PF2} (m)	2.53713	2.54	0,1229	2.3346	2.36	1,0762	2.23240	2.23	0.1075
h_{fix2} (m)	6.114230	6.11	0,0692	6.101401	6.10	0,0229	6.582693	6.56	0.3447
x_{fix2} (m)	69.20	69.20	0,0000	40.10	40.10	0,0000	96.3	96.3	0.0000

Tab. 1: Vergleich der hydrostatischen Berechnungen „von Hand“ und durch das CARGO+ Programm

Die Gegenüberstellung verdeutlicht, dass die maximalen Abweichungen zwischen den Ergebnissen des Rechenprogramms und der „von Hand“ durch einen Hydrostatikexperten erstellten Berechnungen nur etwas mehr als 0,5 % betragen. In den meisten Fällen liegt der Wert deutlich unter 1 ‰. Auf weitere Überprüfungen wurde verzichtet, da die geringen Abweichungen offensichtlich durch Auf- und Abrunden bei den Zwischenrechnungen der manuellen Rechenmethode verursacht worden sind.

Diese Vergleiche trugen außerdem dazu bei, viele kleine Fehler und Schwachstellen im Programm zu identifizieren und zu beseitigen. Die beträchtlichste Verbesserung als Folge dieser Tests betraf das Layout der Excel-Ein- und Ausgabedaten.

Weitere Verbesserungen, nicht im Programm selbst, sondern hinsichtlich einer verbesserten Visualisierung des I/O Schemas, wären jedoch sehr zeit- und arbeitsaufwendig gewesen. In diesem Stadium wurde den Tests mit einem existierenden Schiff der Vorzug gegeben.

6. Testphase mit existierendem Schiff

6.1 Allgemeines

Bei der Formulierung der Vorteile einer Neuentwicklung ist es grundsätzlich ratsam, einen Vergleich mit bereits existierenden und im Einsatz befindlichen Entwicklungen durchzuführen. Dies gilt für alle Neuentwicklungen, sei es beispielsweise die Entwicklung einer Produktionsmaschine, eines Fahrzeuges usw. oder, wie im vorliegenden Fall, einer Berechnungsmethode. Dieser Weg kann allerdings an dieser Stelle nicht begangen werden, weil eine Berechnungsmethode zur Minimierung der Fixpunkthöhe eines Containerschiffes bisher nicht zur Verfügung stand.

Die seit geraumer Zeit sowohl in der See- als auch in der Binnenschifffahrt im Einsatz befindlichen Container-Stauprogramme dienen der Absicherung einer ausreichenden Stabilität und der Vermeidung unnötiger Containerverschiebungen beim Anlaufen mehrerer Containerterminals.

Vor diesem Hintergrund bietet es sich an, im Rahmen dieses Projektes die Optimierung der Containerstauung „von Hand“ von schiffbau- und schifffahrtsversierten Fachleuten durchführen zu lassen und deren Ergebnisse mit den Ergebnissen aus dem Stauprogramm zu vergleichen.

Diesem Vergleich wurde ein GMS mit drei Containerlagen, d.h. ca. 150 TEU, mit einer zufälligen Auswahl von Containerlängen, -höhen und -gewichten und einer Zufallsverteilung innerhalb des Laderaums zugrunde gelegt.

6.2 Schiffsdaten

Die Praxistests mit dem CARGO+ Programm fanden an Bord eines typischen Containerschiffes auf dem Rhein, dem MS „Hendrik-Jan Jr“, vom Typ GMS mit einer Containerkapazität von bis zu 208 TEU statt. Abb. 21 zeigt das MS „Hendrik-Jan Jr“ mit einer Containerladung auf dem Rhein bei Duisburg-Ruhrort auf seinem Weg von Rotterdam nach Koblenz am 25. September 2006 und Abb. 22 den Generalplan des Schiffes.



Abb. 21: MS „Henrik-Jan Jr.“ bei Rhein-km 780 [Foto DST, Renner]

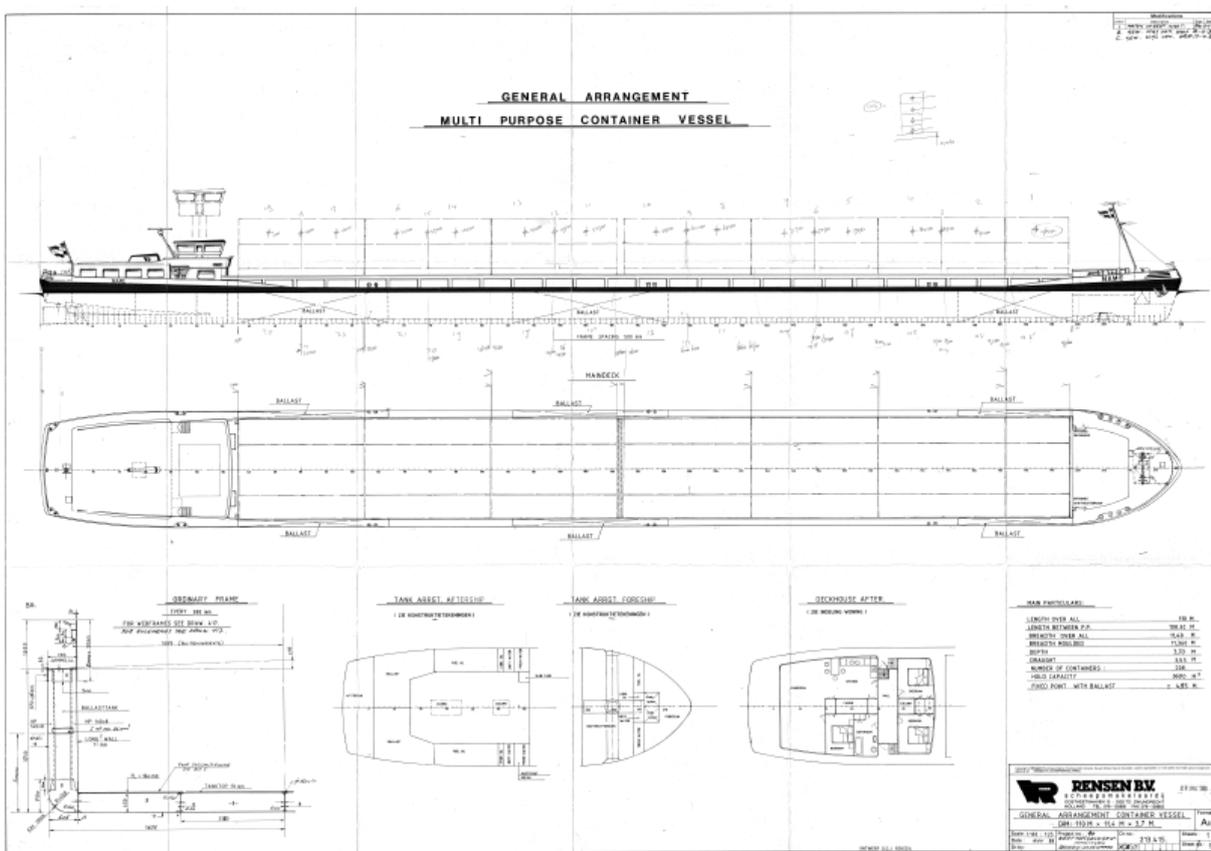


Abb. 22: Generalplan des MS „Hendrik-Jan Jr.“ [Quelle, Dodewaard]

Das Schiff war von CCS gechartert und operierte im Herbst 2006 im Container-Liniendienst zwischen den ARA-Häfen und Hinterlandhäfen, wie Koblenz, Frankfurt oder

Aschaffenburg. Schiffseigner und Schiffsführer stellten alle vorhandenen technischen Zeichnungen und weitere Dokumente zur Verfügung. Leider bestätigte sich auch in diesem Fall das Fehlen präziser hydrostatischer Daten, wie Linienriss, Formblatt, Leergewicht und Schwerpunktlage des Schiffes, sodass die im Rechenmodell verankerte Näherungsmethode absolut gerechtfertigt war.

Hauptabmessungen des MS „Hendrik-Jan Jr.“ gemäß Generalplan:

- | | |
|----------------------------|---------|
| ○ Länge über alles | 110,0 m |
| ○ Länge zwischen den Loten | 108,3 m |
| ○ Maximale Breite | 11,4 m |
| ○ Seitenhöhe | 3,7 m |
| ○ Zugelassener Tiefgang | 3,55 m |

Weiterhin waren zusätzliche Informationen, wie Position der Tiefgangsmarken und Kapazität der meisten Tanks, ebenfalls vorhanden. Andere Daten konnten indirekt aus den vorhandenen Unterlagen gewonnen werden. Schließlich waren auch die tatsächlichen Tiefgänge an den vier Tiefgangsmarken und eine Aufstellung der vorhandenen Ladung einschließlich der Flüssigkeiten gegeben. Die wichtigsten Informationen für das CARGO+ Programm, wie beispielsweise das Gewicht und die Schwerpunktlage des leeren Schiffes, fehlten allerdings und konnten nur mit Hilfe des vom DST entwickelten Näherungsrechenverfahren gewonnen werden.

6.3 Kalibrierung des Schiffes

Im Idealfall liefert das vom DST entwickelte Excel-Hilfsprogramm die für das CARGO+ Programm benötigten Daten über das Schiff in leerem Zustand bereits im ersten Lauf, wenn präzise und zuverlässige Informationen wie Tiefgänge, Container-Stauplan mit Angabe des Stellplatzes, Länge, Höhe, Bruttogewicht für jeden Container und Flüssigkeitsmengen an Bord vorhanden sind. Durch zahlreiche Ungenauigkeiten besonders bei den Gewichten der Container an Bord jedoch – nach Auskunft des Schiffsführers ist das in der Praxis vollkommen normal – wurden mehrere Rechenläufe durchgeführt, um ein zuverlässiges Ergebnis zu erhalten.

Das Problem mit ungenauen Containerdaten entsteht in den Häfen. Die Terminaldisponenten geben den Schiffsführern Containerlisten, um die Reihenfolge bei der Beladung zu beeinflussen, eine gleichmäßige Verteilung der Ladung zu erzielen, zur Kontrolle der Vertrimmung und besonders um ein Krängen des Schiffes zu verhindern. Es kommt relativ häufig vor, dass weder die Summe der Bruttogewichte der Container auf der Liste mit dem Eintauchen des Schiffes übereinstimmt, noch dass das angezeigte Schema der individuellen Gewichte das Schiff in senkrechter Position hält. Das führt schließlich zu Ungenauigkeiten in den berechneten Daten des leeren Schiffes. Die Berechnungen für das beladene Schiff müssen mit der Summe aus Ladung und leerem Schiff einschließlich der Änderungen von Trimm und Krängung nach Subtraktion der Ladungsgewichte übereinstimmen. Ist lediglich ein Teilergebnis falsch, stimmt die gesamte Rechnung nicht mehr.

Im konkreten Fall wurden beim MS „Hednrik-Jan Jr.“ 7 Rechnungen durchgeführt, jeweils mit unterschiedlichen Ladungen an Bord. Nach Einführung der Excel-Hilfsroutine konnte das nachstehende Ergebnis mit den für das leere Schiff relevanten Daten erzielt werden.

Fall	V_1	V_0	LCG_0	T_{0v}	T_{0h}	T_{0m}	
	m^3	m^3	m	m	m	m	
1	1708	880	47,73	0,19	1,60	0,89	25.09.2006
2	2093	856	42,92	-0,52	2,34	0,91	28.09.2006
3	2367	756	49,60	0,05	1,66	0,86	26.10.2006
4	1137	887	47,99	0,27	1,47	0,87	08.11.2006
5	1694	862	47,34	0,13	1,63	0,88	08.11.2006
6	1669	894	47,91	0,20	1,61	0,91	08.11.2006
7	1551	880	47,74	0,17	1,61	0,89	20.11.2006

V_1 – Verdrängung des Schiffes mit aufgenommener Ladung an Bord
 V_0 – Verdrängung des leeren Schiffes
 LCG_0 – Schwerpunkt des leeren Schiffes in Längsrichtung, gemessen vom hinteren Ende
 T_{0v} – Tiefgang des leeren Schiffes am vorderen Ende der Wasserlinie
 T_{0h} – Tiefgang des leeren Schiffes am hinteren Ende der Wasserlinie
 T_{0m} – Mittlerer Tiefgang des leeren Schiffes

Abb. 23: Ergebnisse der in 7 Rechenläufen erzielten relevanten Parameter ¹

Nach Ausschluss der Fälle 2 und 3, die auf Grund offensichtlicher Fehler in den vom Schiffsführer mitgeteilten Input-Daten zu größeren Abweichungen führten, zeigten die Mittelwerte der vier restlichen Berechnungen 1, 4, 5 und 6 zusammen mit Fall Nr. 7 eine hohe Gleichmäßigkeit. Die gültigen Mittelwert-Kombinationen differieren untereinander vernachlässigbar gering und sind für das weitere Vorgehen mit dem CARGO+ Programm absolut akzeptabel.

Mittelwert aus Rechenlauf	∇_0 [m^3]	LCG_0 [m]	T_{0v} [m]	T_{0h} [m]	T_{0m} [m]
1+4+5+6	881	47,74	0,20	1,58	0,89
1+5+6	879	47,66	0,17	1,61	0,89
1+5+6+7	879	47,68	0,17	1,61	0,89
7	880	47,74	0,17	1,61	0,89
1+4+5+6+7	881	47,74	0,19	1,58	0,89

Abb. 24: Verschiedene Mittelwerte aus den einzelnen gültigen Rechenkombinationen

¹ Unter demselben Aufzeichnungsdatum, 8. November 2006, wurden die Läufe 4,5 und 6 durchgeführt mit unterschiedlichen Ladungen an Bord, nachdem ein Teil der Ladung in verschiedenen Häfen an Main und Rhein entladen worden war.

Schließlich wurden diese Mittelwerte aller 5 gültigen Rechenläufe (1+4+5+6+7) in das CARGO+ Programms eingegeben, um die Praxistests durchführen zu können.

6.4 Handoptimierung

6.4.1 Zu berücksichtigende Rahmenbedingungen bei der „Handoptimierung“

Um eine möglichst geringe Fixpunkthöhe zu erzielen, sind bei der Verteilung der Container innerhalb des Laderaums folgende Rahmenbedingungen zu berücksichtigen:

- Hohe Container soweit möglich nicht übereinander stellen, sondern so stauen, dass beispielsweise ein hoher Container immer mit einem niedrigen Container übereinander gestapelt wird.
- Entsprechend der Laderaumlänge ergibt sich eine gerade oder ungerade Anzahl von 20'-Stauplätzen (TEU-Staupläne). Im Falle einer ungeraden Anzahl an TEU-Stauplätzen (im vorliegenden Fall können beim GMS 13 TEU hintereinander gestaut werden) ist es erforderlich, eine Querreihe für die 20' Container zu reservieren, während die anderen Bereiche sowohl mit 20' als auch mit 40' Containern beladen werden können. Hierbei ist allerdings zu berücksichtigen, dass die 20' Container unterhalb (nicht oberhalb) der 40' Container im 40'-Raster gestaut werden, d.h. unter einem 40' Container müssen immer zwei 20' Container mit derselben Höhe stehen.
- Um einen möglichst geringen Einfluss der unterschiedlichen Containergewichte auf das Trimm- und Krängungsverhalten des Schiffes zu gewährleisten, erfolgt die Verteilung der Container entsprechend ihrer Gewichte um einen „theoretischen Mittelpunkt“, der im vorliegenden Fall auf „Mitte Schiff“ und halber Laderaumlänge festgelegt wurde.

6.4.2 Vorgehen bei der Stauoptimierung von Hand

Basis der Optimierung von Hand ist eine systematische Sortierung und Auflistung aller zu ladenden Container.

Im ersten Schritt werden die Container nach ihren Längen (20', 30'¹, 40',) sortiert. Die Sortierung ergab 36 Stück 20' und 57 Stück 40' Container.

In den nächsten Schritten sind die Container innerhalb ihrer Längengruppe nach ihren Höhen (8', 8 ½', 9' und 9 ½') zu unterscheiden und nach ihren Gewichten zu sortieren.

Nur durch diese systematische Auflistung der gesamten Containerladung ist es im letzten Schritt möglich, eine gezielte Verteilung (wie auch unter 6.4.1 beschrieben) jedes einzelnen Containers innerhalb des Laderaums vorzunehmen.

6.4.3 Verteilung der Container im Laderaum

Auf Basis der zuvor beschriebenen Rahmenbedingungen und der „sortierten“ Containerliste erfolgt zunächst die Verteilung der niedrigsten 20' Container um den Bereich des Laderaum-Mittelpunkts. Weiterhin wird die 13. Reihe mit niedrigen 20' Containern belegt. Anschließend erfolgt eine Stapelung der mittelhohen und hohen 20' Container auf die bereits

¹ Ein 30' Container nimmt ebenso wie ein 40' Container zwei Plätze im Raster (2 x 20') ein. Für noch längere Boxen (z.B. 45', müssen 3 Stellplätze hintereinander reserviert werden, also 3 x 20')

im Laderaum befindlichen niedrigen Container, wobei bei der 13. Reihe bis zu drei Lagen übereinander gestapelt werden. Erst nach der Verteilung aller 20' Container werden die 40' Container auf die noch freien Stellplätze bzw. auf die 20' Container gesetzt. Auch bei dieser Verteilung erfolgt zunächst die Belegung der Stellplätze mit niedrigen Containern, anschließend mit mittelhohen und abschließen mit hohen Containern, wobei, wie zuvor bei den 20' Containern, die Anordnung um den Laderaum-Mittelpunkt erfolgt.

6.4.4 Ergebnis der Stauoptimierung „von Hand“

Um die Vorteile des CARGO+ Programms zu testen und ihre Bedeutung einschätzen zu können, wurde von 5 Experten eine Reihe von Handoptimierungen durchgeführt. Alle verfügbaren und notwendigen Daten des MS „Hendrik-Jan Jr“ wurden ihnen zur Verfügung gestellt zusammen mit einer Liste der ISO-1 Container, deren Stauung es zu optimieren galt. Diese Liste enthielt Angaben zur Länge – 20' oder 40' -, das Bruttogewicht in t und die Höhe in Fuß. Aufgabe der Experten war es, unter Beachtung von Trimm und Krängung die Container auf der Liste so im Laderaum zu verteilen, dass die Höhe des höchsten Containerstapels so gering wie möglich war. 4 Stunden standen für diese Arbeit zur Verfügung. Alle Hilfsmittel, wie MS Excel und hydrostatischen Rechenprogramme, waren erlaubt.

Die nachfolgende Abb. 25 enthält eine Darstellung der Containerverteilung und Abb. 26 zeigt die entsprechende Schwimmelage des Schiffes vor der Handoptimierung.

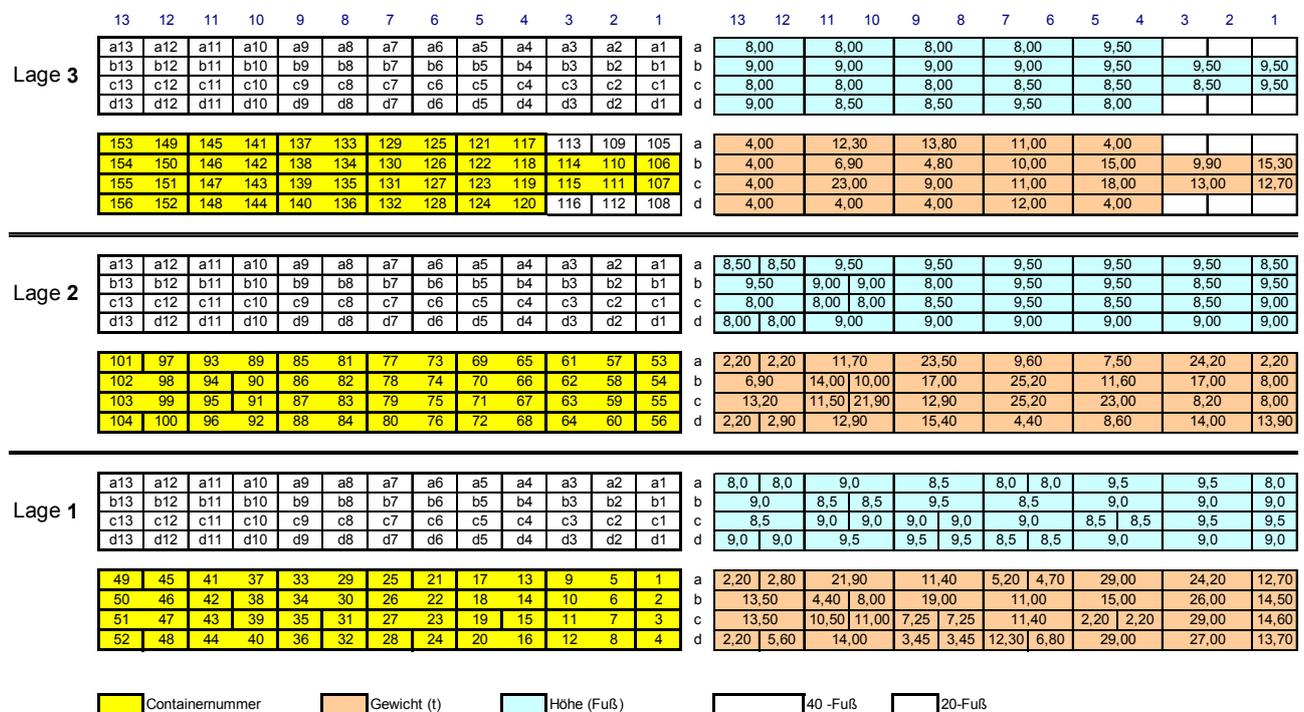


Abb. 25: Verteilung der Container vor der Handoptimierung

Zufallsverteilung		
Tiefgang [m]	ohne Tanks	mit Tanks
vorne steuerbord	1,860	1,890
vorne backbord	1,896	1,897
hinten steuerbord	1,708	1,767
hinten backbord	1,744	1,775
maximaler Tiefgang	1,944	1,936
	ohne Tanks	mit Tanks
Fixpunkthöhe [m]	7,308	7,290
Position längs [m]	67,93	67,93
Containernummer	121	121

ΔT Trimm (Marken) 0,15 m
 ΔT Krängung 0,04 m

Abb. 26: Schwimmelage des Schiffes vor der Handoptimierung (Referenzfall)

Die Ergebnisse der Handoptimierung stellen sich wie folgt dar:

Handoptimierung			Tester 1	
Tiefgang [m]	ohne Tanks	mit Tanks		
vorne steuerbord	1,829	1,859		
vorne backbord	1,705	1,706	Fixpunktsenkung 0,302 m gegenüber Zufallsverteilung	
hinten steuerbord	1,892	1,952		
hinten backbord	1,769	1,800		
maximaler Tiefgang	1,914	1,983		
	ohne Tanks	mit Tanks		
Fixpunkthöhe [m]	6,986	6,987	ΔT Trimm (Marken)	0,06 m
Position längs [m]	98,65	98,65	ΔT Krängung	0,12 m
Containernummer	105	105		

Handoptimierung			Tester 2	
Tiefgang [m]	ohne Tanks	mit Tanks		
vorne steuerbord	1,809	1,839		
vorne backbord	1,953	1,954	Fixpunktsenkung 0,335 m gegenüber Zufallsverteilung	
hinten steuerbord	1,651	1,711		
hinten backbord	1,795	1,825		
maximaler Tiefgang	2,002	1,994		
	ohne Tanks	mit Tanks		
Fixpunkthöhe [m]	7,008	6,955	ΔT Trimm (Marken)	0,16 m
Position längs [m]	30,94	30,94	ΔT Krängung	0,14 m
Containernummer	148	148		

Handoptimierung			Tester 3	
Tiefgang [m]	ohne Tanks	mit Tanks		
vorne steuerbord	1,720	1,750		
vorne backbord	1,902	1,903	Fixpunktsenkung 0,059 m gegenüber Zufallsverteilung	
hinten steuerbord	1,699	1,758		
hinten backbord	1,880	1,911		
maximaler Tiefgang	1,908	1,914		
	ohne Tanks	mit Tanks		
Fixpunkthöhe [m]	7,273	7,231	ΔT Trimm (Marken)	0,02 m
Position längs [m]	55,60	61,66	ΔT Krängung	0,18 m
Containernummer	132	132		

Handoptimierung			Tester 4	
Tiefgang [m]	ohne Tanks	mit Tanks		
vorne steuerbord	1,554	1,584		
vorne backbord	1,662	1,663	Fixpunktsenkung 0,182 m gegenüber Zufallsverteilung	
hinten steuerbord	1,926	1,986		
hinten backbord	2,035	2,065		
maximaler Tiefgang	2,162	2,202		
	ohne Tanks	mit Tanks		
Fixpunkthöhe [m]	7,127	7,107	ΔT Trimm (Marken)	0,37 m
Position längs [m]	92,48	92,48	ΔT Krängung	0,11 m
Containernummer	111	111		

Handoptimierung			Tester 5	
Tiefgang [m]	ohne Tanks	mit Tanks		
vorne steuerbord	1,688	1,718		
vorne backbord	1,697	1,698	Fixpunktsenkung -0,039 m gegenüber Zufallsverteilung	
hinten steuerbord	1,896	1,956		
hinten backbord	1,906	1,936		
maximaler Tiefgang	1,977	2,037		
	ohne Tanks	mit Tanks		
Fixpunkthöhe [m]	7,348	7,328	ΔT Trimm (Marken)	0,21 m
Position längs [m]	55,49	55,49	ΔT Krängung	0,01 m
Containernummer	133	133		

Abb. 27: Schwimmelage des Schiffes nach der Handoptimierung durch 5 Testpersonen

Die obigen Tabellen zeigen große Abweichungen in den Ergebnissen. Bei der Fixpunkthöhe beträgt die Spanne ca. 37 cm, beim Trimm ca. 35 cm und bei der Krängung ca. 17 cm. Es muss erwähnt werden, dass der Referenzfall, der auf einer willkürlichen Verteilung beruhte, den Testpersonen nicht bekannt war. Die Tatsache, dass Experte Nr. 5 gegenüber der Referenzverteilung schlechtere und Nr. 3 vernachlässigbar bessere Ergebnisse erzielte, deutet darauf hin, dass der Referenzfall nicht so schlecht ist, wie ursprünglich erwartet, sondern eher zu den normalen Ergebnissen in der Praxis zu zählen ist.

Mit Hilfe eines vorhandenen angepassten hydrostatischen Rechenprogramms wären alle 5 Experten ohne großen Zeitaufwand in der Lage, die Krängung und den Trimm durch Austauschen von Containern mit derselben Länge und Höhe aber unterschiedlichem Gewicht zu reduzieren. Dies würde die Fixpunkthöhe jedoch, wenn überhaupt, in einem vernachlässigbar geringen Ausmaß vermindern.

6.5 PC-Optimierung mit CARGO+® Programm

Die CARGO+ Optimierung wurde ebenfalls auf Basis der Zufallsverteilung der Container (siehe Abb. 25) durchgeführt. Die Ergebnisse zeigt Abb. 28.

Cargo+ Optimierung				
Tiefgang [m]	ohne Tanks	mit Tanks		
vorne steuerbord	1,816	1,846	Fixpunktsenkung 0,569 m gegenüber Zufallsverteilung	
vorne backbord	1,814	1,815		
hinten steuerbord	1,787	1,846		
hinten backbord	1,784	1,815		
maximaler Tiefgang	1,826	1,846		
	ohne Tanks	mit Tanks		
Fixpunkthöhe [m]	6,755	6,721	ΔT Trimm (Marken)	0,03 m
Position längs [m]	18,61	18,61	ΔT Krängung	0,00 m
Containernummer	127	127		

Abb. 28: Optimierungsergebnis mit dem CARGO+ Programm

6.6 Vergleich der Testergebnisse

Zur Ermittlung der Fixpunkthöhen für die Zufallsverteilung und Handoptimierungen wie auch für die CARGO+ Optimierung werden die Daten aus Abb. 25 und Abb. 26 dem CARGO+ Programm zugewiesen. Für Vergleichszwecke wird diese Zufallsverteilung (Abb. 25) im Folgenden als Referenzfall bezeichnet.

6.6.1 Vergleich zwischen Handoptimierung und CARGO+ Optimierung

Der Vergleich der Fixpunkthöhen zeigt folgende Werte:

	Art der Optimierung	Fixpunkthöhe [m]	Δ Fixpunkthöhe gegenüber 1 [m]	Δ Fixpunkthöhe gegenüber 7 [m]
1	Referenzfall	7,29	--	0,57
2	Handoptimierung 1	6,99	0,30	0,27
3	Handoptimierung 2	6,96	0,33	0,24
4	Handoptimierung 3	7,23	0,06	0,51
5	Handoptimierung 4	7,11	0,17	0,39
6	Handoptimierung 5	7,33	- 0,04	0,61
7	CARGO+ Optimierung	6,72	0,57	--

Tab. 2: Vergleich der Fixpunkthöhen nach Optimierung

Das beste Ergebnis der Handoptimierung (Nr. 3) senkt die Fixpunkthöhe gegenüber dem Referenzfall um 0,33 m. Der durchschnittliche Unterschied zwischen Referenzfall und dem Mittelwert der Handoptimierungen beträgt 0,16 m. Dies bedeutet, dass mit der Handoptimierung bereits eine deutliche Reduzierung der Fixpunkthöhe zu erzielen ist.

Durch den Einsatz des CARGO+ Programms konnte im untersuchten Beispiel eine gesamte Reduzierung der Fixpunkthöhe von 0,57 m erzielt werden, d.h. die zusätzliche Reduzierung der Fixpunkthöhe gegenüber dem besten Ergebnis bei den Handoptimierungen beträgt 0,24 und liegt sogar 0,41 m über dem Durchschnitt der Handoptimierungen.

6.6.2 CARGO+ Ergebnisse basierend auf unterschiedlichen Zufallsverteilungen

Ein zusätzlicher Test zur Absicherung der Zuverlässigkeit der CARGO+ Ergebnisse wurde durchgeführt. Dabei wurden zunächst sechs verschiedene Ladungen, drei mit einem Raster von 4 x 13 TEU und drei mit einem Raster von 4 x 12 TEU, mit dem CARGO+ Programm optimiert. Zum Vergleich wurde die Trockenoptimierung¹ in einem Modell abgebildet und der kommerzielle Löser CPLEX² auf die genannten Ladungen angewandt. CPLEX bestätigte die Lösungen von CARGO+ in allen sechs Fällen. Darüber hinaus wurde in

¹ Trockenoptimierung bedeutet in diesem Fall, dass zunächst mit der Suche nach einem optimalen Stauplan auf festem Boden begonnen wird. Dieser Optimierungsschritt basiert ausschließlich darauf, Container derart aufeinander zu stapeln, dass das daraus resultierende „Container-Gebirge“ eine möglichst niedrige maximale Stapelhöhe aufweist. Dabei wird ausschließlich auf die Geometrie des Containers geachtet, nicht jedoch auf sein Gewicht. Die Schwimmelage des Schiffes bleibt bei diesem Optimierungsschritt unberücksichtigt, weshalb hierfür der Name Trockenoptimierung gewählt wurde.

² CPLEX ist ein kommerzielles Programmpaket der Firma ILOG (www.ilog.de), welches große Lineare Probleme aus dem Bereich der Linearen Programmierung lösen kann.

zahlreichen Tests mit unterschiedlichen Ladungen die Nassoptimierung¹ geprüft. In allen Fällen waren die diesbezüglichen Lösungen zielführend.

Es ist zu erwähnen, dass mit Hilfe des CARGO+ Programms bei Mehrfachanwendung auf eine bestimmte Ladung – trotz eines identischen Fixpunktwertes (bis auf vernachlässigbar kleine Abweichungen) – unterschiedliche Lösungen in Bezug auf den Stauplan generiert werden. Dies bestätigt eine mathematische Annahme, dass es bei der Größe und Komplexität des vorliegenden Optimierungsproblems mehr als nur eine optimale Lösung (optimierter Stauplan) gibt.

6.6.3 Erzielte Ergebnisse und Kommentierung

Der Unterschied in den Ergebnissen zwischen Hand- und CARGO+ Optimierung ist beträchtlich und kann beispielsweise bei der Befahrung des Mains oder des Main-Donau-Kanals ausschlaggebend dafür sein, ob in drei Lagen oder nur wie bisher in zwei Lagen übereinander gestapelt werden kann.

Dieses Ergebnis gewinnt an Gewicht vor dem Hintergrund, dass für eine erfolgreiche Handoptimierung das erforderliche Personal wie auch eine angemessene Optimierungszeit von 3 bis 4 Stunden benötigt wird, während die CARGO+ Optimierung nur wenige Minuten in Anspruch nimmt. Die Optimierungszeit kann zwar durch die Verwendung eines (zu entwickelnden) Sortierprogramms auf etwa 50 % reduziert werden, die Genauigkeit der Handoptimierung wird hierdurch jedoch nicht beeinflusst. Die Analyse der Handoptimierung zeigt weiterhin, dass die größere Fixpunkthöhe gegenüber der Programmoptimierung durch eine mehr oder weniger ungleiche Gewichtsverteilung der unterschiedlich schweren Container hervorgerufen wird.

Dies kann als wesentlicher Mangel der Handoptimierung angesehen werden: Durch die ungleiche Gewichtsverteilung entsteht eine entsprechende Krängung und Vertrimmung des Schiffes, die zu einer größeren Fixpunkthöhe gegenüber der CARGO+ Optimierung führt. Die ungleiche Gewichtsverteilung lässt sich allerdings durch die begleitende Anwendung umfangreicher Momentenrechnungen verringern, was aber zu einer Erhöhung des Zeitbedarfs für die Handoptimierung führen würde.

In der aktuellen Version des CARGO+ Programms wurde ein Optimierungs-Algorithmus umgesetzt, der trotz äußerst harter Randbedingungen zulässige Lösungen für das gegebene Problem in geringer Zeit (Berechnungsdauer weniger als 10 Minuten) findet. Gleichzeitig wird ein minimierter Fixpunkt erreicht, womit die Möglichkeit, kritische Durchfahrts Höhen mit einer weiteren Containerlage passieren zu können, deutlich steigt.

Der Optimierungs-Algorithmus besteht dabei im Wesentlichen aus einer Trocken- und einer Nassoptimierung.

¹ Der zweite Optimierungsschritt, die „Nassoptimierung“, setzt den Stauplan, der in der Trocken-Optimierung gewonnen wird, als fest gegeben voraus. Durch einen Suchalgorithmus werden nun Container mit identischer Geometrie aber mit unterschiedlichen Gewichten vertauscht, sodass auf den Fixpunkt bezogen eine möglichst ideale Schwimmlage des Schiffes erreicht wird.

Bei der Trockenoptimierung hat eine Testreihe gezeigt, dass nur in seltenen Fällen eine Verbesserung der maximalen Container-Stapelhöhe um 0,5' erzielt werden kann, indem verschiedene Startpositionen der zu optimierenden Ladung betrachtet werden. Das CARGO+ Programm wendet aktuell die Trockenoptimierung auf 20 verschiedene Startpositionen an, und wählt aus den 20 resultierenden Werten die bestmögliche, d.h. ein möglichst flaches „Container-Gebirge“, aus. Die Testreihe hat ebenfalls gezeigt, dass eine Größenordnung von 20 Startpositionen ausreichend ist, da mehr als 80 % der Startpositionen zu einem bestmöglichen Ergebnis führen.

7. Integrationsmöglichkeiten vorhandener Programme

7.1 Diverse Aspekte der Stauplanoptimierung

Die Stauplanoptimierung mit dem Ziel, die Fixpunkthöhe zu minimieren, ist nur einer von mehreren möglichen Aspekten eines optimalen Container-Stauplans auf Binnenschiffen. Aus diesem Grund wäre es sinnvoll, in der Zukunft Möglichkeiten zu erarbeiten, das CARGO+ Programm mit anderen Rechenprogrammen, wie beispielsweise für die statische Stabilität, die Festigkeit des Rumpfes, die Container-Umschlagreihenfolge und auch die Schwimmelage des beladenen Schiffes, verknüpfen zu können.

7.1.1 Stabilität

Solange in der Binnenschifffahrt überwiegend Massengut transportiert wurde, hatte die Frage nach einer ausreichenden Stabilität eine geringe Bedeutung: Der Gewichtsschwerpunkt der Massengüter liegt gewöhnlich bei einer vergleichsweise geringen Höhe, sodass die Schiffe über eine ausreichende Stabilität verfügen. Mit zunehmendem Containeraufkommen änderte sich die Situation grundlegend. Auf Grund der mehrfachen Stapelung der Container wandern der Gewichtsschwerpunkt der Ladung, und damit der Gewichtsschwerpunkt des gesamten Schiffes, deutlich nach oben.

Als Maß für die Beurteilung der Stabilität wird unter anderem die metazentrische Höhe herangezogen. Voraussetzung für eine ausreichende Stabilität ist eine positive und ausreichend große metazentrische Höhe. Kapitel 22 der Rheinschiffsuntersuchungsordnung (RheinSchUO) widmet sich ausschließlich der Beförderung von Containern auf dem Rhein. Die Vorschriften stellen lediglich Anforderungen an die minimale metazentrische Höhe (MG) und an den Maximalwert des Krängungswinkels bei gleichzeitiger Einwirkung der Zentrifugalkraft bei der Drehbewegung, des Winddruckes und der freien Flüssigkeitsoberflächen. In der RheinSchUO findet sich auch die Formel für die Überprüfung der Stabilität auf der Grundlage der vorhandenen Daten für das fragliche Schiff.

Ein entsprechender Nachweis ist gemäß den Vorgaben der Rheinschiffspolizeiverordnung (RheinSchPV) in Form von Stabilitätsunterlagen für jede Reise zu ermitteln und an Bord zu führen. Die Rheinschiffspolizeiverordnung, § 1.07, Punkt 3 und 4, legt die Kriterien fest, ob eine Stabilitätsprüfung für ein Containerschiff auf dem Rhein erforderlich ist oder nicht. Grundsätzlich ist ein derartiger Nachweis für kleinere Schiffe mit 2 oder 3 Containerlagen und für die heute auf dem Rhein üblicherweise fahrenden größeren Schiffe mit einer Ladung von mehr als drei Lagen Containern notwendig.

Die vorhandenen Formeln für die Stabilitätsberechnung sind leicht für die PC-Anwendung zu programmieren und jedes Container-Schiff mit einem PC an Bord verfügt über ein solches Programm. Dabei geht es nicht um die Maximierung der Stabilität, sondern nur um einen Nachweis, ob die Stabilität die minimalen Anforderungen erfüllt.

Die vorhandene Variante des CARGO+ Programm ist nur in einem geringen Umfang mit der Stabilität verknüpft. In der letzten Routine des Optimierungskerns, nachdem der optimierte Stauplan bereits berechnet wurde, führt das Programm noch eine Schleife für jeden einzelnen Containerstapel aus und sortiert nach Gewicht, d.h. der schwerste Container

kommt nach unten und der leichteste nach oben. Dadurch verbessert sich die Stabilität als Folge einer Senkung des Schwerpunkts für das gesamte System, bestehend aus Schiff und Containern.

Eine wünschenswerte Weiterentwicklung wäre die Integration der nach RheinSchUO geforderten Stabilitätskriterien, um das Optimierungsergebnis (Stauplan) im Hinblick auf die Fixpunkthöhe auch bezüglich der Stabilität zu überprüfen. Die Datenausgabe wäre zusammen mit den hydrostatischen Ergebnissen in der vorhandenen Excel-Mappe darzustellen. Diese Verknüpfung hätte vor dem Hintergrund einer Vermeidung von Havarien, wie beispielsweise bei dem Containerschiff „Excelsior“ am 25. März 2007 auf dem Rhein bei Köln, eine besondere Bedeutung.

7.1.2 Festigkeit (Elastische Linie und Tragfähigkeitsminderung)

Binnenfrachtschiffe haben normalerweise eine flache Form und reagieren auf Grund ihres geringen H/B^1 und besonders des H/L^2 Verhältnisses sensibel auf eine ungleichmäßige Verteilung der Ladung im Laderaum. Auch wenn Container nicht zu den schweren Gütern gehören, führte eine Konzentration der schweren Container in der Schiffsmitte und der leichteren bzw. leeren Boxen an den Enden des Laderaums zu einer erhöhten Belastung der tragenden Struktur des Schiffes in Längsrichtung und zu einer gewissen Durchbiegung des Schiffskörpers. Der gleiche Effekt tritt bei umgekehrter Ladungsverteilung, d.h. schwere Ladung an den Enden und leichte in der Mitte, auf. Neben der erhöhten Strukturbelastung führt in diesen Fällen die Durchbiegung des Schiffes zu einer Verminderung der Tragfähigkeit.

Vor diesem Hintergrund wäre es sinnvoll, durch Verknüpfung des CARGO+ Programms mit einem geeigneten Festigkeitsprogramm eine mehr oder weniger gleichmäßige Ladungsverteilung zu erzielen. Gleichzeitig könnten mit einer Programmkombination kritische Fälle während der Be- und Entladungsphase, beispielsweise die Konzentration extrem vieler und schwerer Container in einem begrenzten Bereich des Laderaums, hinsichtlich der sich ergebenden erhöhten Belastung der Schiffsstruktur überwacht bzw. vermieden werden.

7.1.3 Umschlagreihenfolge

Die Reihenfolge des Umschlags ist für eine optimale Stauung der Container an Bord immer dann äußerst wichtig, wenn auf der Fahrstrecke noch diverse Häfen angelaufen und in diesen neben dem Abladen auch neue Container geladen werden müssen.

Das Ziel einer in dieser Hinsicht optimalen Beladung besteht darin, die Container so zu stauen, dass ein „Umpacken“ in den Zwischenhäfen weitestgehend vermieden wird. Bei Punkt-Punkt-Verkehren stellt sich das Problem nicht, da hier nach dem Grundprinzip „als Erster an Bord, als Letzter von Bord“ verfahren werden kann.

¹ Verhältnis zwischen Seitenhöhe und Schiffsbreite

² Verhältnis zwischen Seitenhöhe und Länge des Schiffes

Es kann davon ausgegangen werden, dass die Forderungen nach einer optimalen Stau-
folge und nach einer minimalen Fixpunkthöhe zu unterschiedlichen Stauergebnissen füh-
ren. Hieraus ergibt sich die Anforderung an eine zukünftige Erweiterung oder Verknüpfung
des CARGO+ Programms mit einem Rechensystem nach einer optimalen Umschlagrei-
henfolge.

Bei einer Erweiterung des CARGO+ Programms wäre beispielsweise denkbar, statt eines
einzigen Laderaums virtuell so viele Laderäume zu generieren, wie Häfen auf der Strecke
angelaufen werden. Die Optimierung der Fixpunkthöhe fände für jeden einzelnen dieser
„Laderäume“ statt. Eine andere Möglichkeit besteht in einer horizontalen Trennung der
Container, d.h. die oberste Lage wird im ersten Zwischenhafen entladen.

Das Problem wäre allerdings, dass die Fixpunkthöhe in einem dieser „virtuellen“ Laderäu-
me aber auch bei horizontaler Trennung deutlich über der optimalen Fixpunkthöhe liegen
könnte. Auch die Frage der Festigkeit ergäbe sich, z.B. wenn eine Containergruppe aus
der Schiffsmitte oder aus den Schiffsenden in den Zwischenhäfen entladen und nicht
durch neue Ladung ersetzt würde. In solch einem Fall könnte die Strukturbelastung, wie
zuvor bereits angemerkt, zu einem Problem werden.

Somit ergeben sich für diese spezielle Problematik eine Reihe komplexer Anforderungen,
deren Lösung einer möglichen späteren Erweiterung des CARGO+ Programms vorbehal-
ten werden muss.

7.1.4 Schwimmelage des beladenen Schiffes (Hydrodynamik im flachen Wasser)

Ein Binnenschiff operiert überwiegend in flachem Wasser. Bei niedrigen Geschwindigkei-
ten tritt überwiegend eine kopflastige Vertrimmung des Schiffes auf. Nimmt die Geschwin-
digkeit weiter zu, geht der Trimm in Abhängigkeit der Schiffsförm und der Wassertiefe in
die entgegengesetzte Richtung und wird hecklastig. Jede Vertrimmung des Schiffes be-
deutet eine Widerstandserhöhung und damit einen erhöhten Leistungsbedarf bzw. Brenn-
stoffverbrauch.

Dieses Verhalten wurde untersucht und als Ergebnis stellte sich heraus, dass in extrem
flachem Wasser eine leichte Vertrimmung zum Bug hin zu einem geringeren Antriebsbe-
darf führt. Mit einer Erweiterung des CARGO+ Programms, welche auch eine geeignete
Verteilung der Container hinsichtlich einer optimalen Vertrimmung bei der gewünschten
Geschwindigkeit und Wassertiefe zulässt, wäre es möglich, Brennstoff zu sparen, ohne an
Geschwindigkeit zu verlieren.

Die hydrodynamischen Beziehungen bezogen auf ein bestimmtes Schiff, das mit konkreter
Geschwindigkeit und bestimmtem Tiefgang bei konkreter Wassertiefe fährt, können mit
großer Präzision bestimmt werden. Darauf aufbauend kann in einem entsprechenden
Geschwindigkeits-, Tiefgangs- und Wassertiefenbereich ausgerechnet werden, welche
Vertrimmung für eine bestimmte Ladung, Geschwindigkeit und Wassertiefe optimal wäre.
Zwei Optionen erscheinen machbar. Die interaktive Verbindung zwischen Vertrimmung
und Bunkern der Flüssigkeiten ist bereits im CARGO+ vorhanden. Wenn dies nicht reicht,
kann der Einsatz von Ballastwasser zum Tragen kommen. Dies könnte jedoch die Vorteile
des niedrigsten Fixpunktes in gewisser Weise reduzieren.

Komplexer wäre es, den gesamten Optimierungs-Algorithmus neu zu formulieren und dabei neben der vorhandenen Gewichts- und Höhenverteilung das dritte Optimierungsziel – trimmabhängiger Leistungsbedarf - einzubeziehen. Das könnte zur Minimierung der Antriebsleistung unter bestimmten Bedingungen führen. Neben der Datenbank mit den hydrostatischen Parametern für das Schiff wären noch die zusätzlichen Eingangsvariablen „gewünschte Geschwindigkeit und Wassertiefe“ zu berücksichtigen. Solch ein Programm wäre eine sinnvolle Ergänzung des Programms zur Optimierung der Containerhöhen und wurde bisher im Rahmen dieser Untersuchung noch nicht angesprochen.

7.2 Weitere Entwicklungsmöglichkeiten

Zum jetzigen Zeitpunkt ist das CARGO+ Programm voll einsetzbar. Das Feedback verschiedener Anwender kann nach Markteinführung dazu beitragen, etwaige Schwachstellen zu identifizieren und zu beseitigen.

Programmverbesserungen an der Schnittstelle Programmoberfläche/Anwender können zeitnah umgesetzt werden. Diese sind formaler Art und beziehen sich auf Details, wie zum Beispiel den Aufbau der Excel Arbeitsblätter, besonders in Bezug auf die Visualisierung der Containeranordnung vor und nach der Optimierung. Die Fehler- und Warnmeldungen sollten ebenfalls noch weiter verbessert werden. Schließlich ist auch noch das System, welches die Eingabe unzulässiger Werte (Grenzwerte) verhindert, zu erweitern. Einige zusätzliche Schutzmaßnahmen sollten noch in die Programmroutine aufgenommen werden. Weitere Anpassungen lassen sich – soweit technisch möglich - nach einigen Monaten Praxistest durch die Anwender (Schiffsführer von Containerschiffen, Versanddisponenten in Stauereien usw.) in das System integrieren.

Die Entwicklung weiterreichender Programm-Versionen, wie in Punkt 7.1 erwähnt, ist eine mittelfristige Option. Hier sollte mit Anwendern abgestimmt werden, welche der erwähnten Programmverknüpfungen mit zusätzlichen Optimierungskriterien am sinnvollsten erscheinen.

Eine sehr wahrscheinliche Leistungssteigerung des Hardware- und Softwaresystems, die zukünftig zu erwarten ist, böte eine gute Gelegenheit, die Komplexität des Programms, die Rechenkapazität und die Optimierungsvielseitigkeit, beispielsweise um Optionen, die interaktiv vom Benutzer eingerichtet wurden, zu erweitern.

Eine Erweiterung der Rechenkapazität wäre mittelfristig sinnvoll und bezieht sich vor allem auf die Verwendung einer großen Anzahl an Variablen.

Noch mehr Variable bedeutet beispielsweise die Erweiterung der Optimierung der Staupläne für folgende Schiffstypen:

- die größten auf dem Rhein operierenden Containerschiffe mit einem Raster von 17 x 6 TEU und bis zu 5 Lagen übereinander
- Koppelverbände, deren verstärkte Implementierung in den Containertransport auf Grund ihrer Wirtschaftlichkeit festgestellt werden kann.

Voraussetzung dafür ist jedoch, dass die gegenwärtige Dauer des Rechengangs von 2-3 Minuten nicht beeinträchtigt wird. Diesbezüglich sollten auch weitere Techniken zur Verkürzung der Rechenzeiten des CARGO+ Programms untersucht werden.

Im Falle einer größeren Marktakzeptanz des CARGO+ Programms sollten ferner die Benutzerfreundlichkeit der Eingaberoutine für Containerdaten und die Visualisierung der Containeranordnung an Bord verbessert werden.

8. Zusammenfassung

Der vorliegende Teilbericht „Reduzierung der Fixpunkthöhe“ ist das Ergebnis eines Forschungsprojektes im Rahmen des Gesamtprojektes „Modernisierung der vorhandenen Binnenschiffsflotte durch Vergrößerung der Hauptabmessungen, Reduzierung der Fixpunkthöhe und Austausch des Hinterschiffs“ im Auftrag des Ministeriums für Wirtschaft, Mittelstand und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen. Das Projekt wurde vom DST – Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme e.V. Duisburg, im Zeitraum von April 2004 bis Februar 2007 durchgeführt. Die Bearbeitung der mathematischen Aufgabenstellungen einschließlich der Erstellung des EDV-gestützten Optimierungsprogramms erfolgte in Zusammenarbeit mit dem Institut für Mathematik an der Universität Duisburg-Essen.

In Rahmen des Projektes war ein EDV-gestütztes Beladungsprogramm zu entwickeln, das die Stellplatzanordnung (Stauplan der Container an Bord) sowohl in der Ebene als auch in der Höhe optimieren kann, um die Fixpunkthöhe des beladenen Schiffes zu reduzieren.

Die Entwicklung des Programms bestand aus der Entwicklung eines Algorithmus, der auf hydrostatischen Relationen basiert, der Formulierung des mathematischen Modells, der Programmierung der zentralen Rechenroutinen und der Anpassung der MS Excel-Eingangs- und Ausgangsschnittstellen sowie dem Testen des Programms in der Theorie wie auch in der Praxis auf einem realen Schiff.

Fehlende Daten für die exakten hydrostatischen Berechnungen führten zu gewissen Modifikationen und Vereinfachungen des mathematischen Modells. Die Auswirkungen auf die Genauigkeit der Ergebnisse sind für die betroffenen Binnengüterschiffe unerheblich. Demgegenüber stehen die Vorteile einer wesentlichen Reduzierung der Fixpunkthöhe und einer kürzeren Optimierungsdauer.

Die Gesamtzahl der denkbaren Staukombinationen bei 208 Containern auf einem Standard GMS Schiff auf dem Rhein liegt bei $208!$ ¹ und ist damit enorm groß. Selbst nach Eliminierung der irrelevanten Kombinationen für jeden der vier Container in einem Stapel, blieben noch immer etwa 10^{106} Möglichkeiten. Das führte vor dem Hintergrund der eingeschränkten Rechnerkapazität handelsüblicher PCs zu einer Unterteilung der Optimierungsroutine in eine geometrische („trockene“) und eine die Gewichtsverteilung betreffende („nasse“) Optimierung. Unabhängig von einigen möglichen Nachteilen auf Grund dieser unterteilten Vorgehensweise stellt die jetzige Version einen guten Kompromiss zwischen dem erzielten Ergebnis und der Hardware, also dem handelsüblichen PC, dar.

Die enorm große Anzahl möglicher Staukombinationen begrenzt auch die Schiffsgröße, sodass die größten auf dem Rhein operierenden Schiffe in diese Version des Programms nicht integriert werden können. Für jedes Schiff bis zur Größe GMS mit bis zu 4 Lagen Containern neben- und übereinander ist das Programm anwendbar.

Die Praxistests an Bord des MS „Hendrik-Jan Jr.“ haben die Bedeutung zuverlässiger Input-Daten über Schiff, Tiefgänge, Container und Flüssigkeiten an Bord unterstrichen. Feh-

¹ $F(x) = \text{Fakultät}(208) = 208 \times 207 \times 206 \times \dots \times 3 \times 2 \times 1$

ler in den Inputdaten können dazu führen, dass die Bestimmung der Parameter für das leere Schiff misslingt und erneut ausgeführt werden muss. Das Kalibrierungsverfahren sollte daher mindestens zweimal durchgeführt werden, vorzugsweise bei unterschiedlichen Beladungsständen des Schiffes.

Die Ergebnisse des Optimierungsprogramms haben die Erwartungen vollkommen erfüllt: Gegenüber einer Zufallsverteilung der Container im Laderaum konnte mit dem CARGO+ Programm eine Reduzierung der Fixpunkthöhe um 0,57 m erzielt werden. Gleichzeitig zeigte das Programm eine Gleichmäßigkeit bezüglich der technischen Genauigkeit. Das heißt, unabhängig davon, wie die Containerladung vor der Optimierung verteilt ist, wurde immer ein Optimierungsergebnis mit einer Genauigkeit von +/- 1 mm erzielt. Bei einem Vergleich mit den durch fünf Experten „von Hand“ durchgeführten Optimierungen zeigte das Programm zwei deutliche Vorteile:

- Der Stauplan konnte von den Experten nach etwa einer bis vier Stunden fertiggestellt werden, jedoch ohne Berechnung der Schwimmelage des Schiffes. Das CARGO+ Programm benötigte für diese Optimierung etwa 2 Minuten.
- Das CARGO+ Programm reduzierte die Fixpunkthöhe gegenüber einer zufällig verteilten Containerladung um 57 cm, den Experten gelang im günstigsten Fall eine Reduzierung um 33 cm.

Schließlich bestehen Überlegungen hinsichtlich einer zukünftigen Erweiterung des Programms oder einer Kombination mit anderen Programmsystemen. Verbesserungen der Schnittstelle Programm/Benutzer wurden bereits während der Testphase durchgeführt und sicherlich sind noch weitere Modifikationen und Anpassungen realisierbar. Bezüglich der Kombination mit anderen Programmsystemen wäre beispielsweise die Verknüpfung mit Programmen zur Sicherung der Stabilität, zur Überwachung und Reduzierung der Belastung der Schiffsstruktur, zur optimalen Nutzung der Tragfähigkeit, zur Überwachung des Trimmings zwecks Verbesserung des Leistungs-Geschwindigkeitsprofils wie auch zur Optimierung der Umschlagreihenfolge beim Anlaufen mehrerer Terminals denkbar.

Zunächst aber sollte das Programm in der Praxis von verschiedenen Benutzern genutzt werden, um über das Feedback Prioritäten für weitere Verbesserungen festlegen zu können.

9. Literatur

1. BCI, ProgTrans, VBD, via donau: Prospects of Inland Navigation within the Enlarged Europe (PINE). Gutachten im Auftrag der EU. Den Haag 2004
2. Fahrdynamik von Binnenschiffen - Allgemeine Einführung und Folgerungen aus Schiffsversuchen, Verein für Binnenschifffahrt und Wasserstrassen e.V., Duisburg-Ruhrort, 1992
3. J. Kabacinski: Stem and stern corrections for a deflected vessel, Hansa – International Maritime Journal, Nr.4, 2004
4. B. Ribar: Theorie des Schiffes (in serbokroatisch), Vorlesungen, Fakultät für Maschinenbau an der Universität Belgrad, Belgrad, 1986
5. H. Schneekluth: Hydromechanik zum Schiffsentwurf, Vorlesungen, RWTH Aachen - Koehler Verlag GmbH, Herford, 1977
6. VBD: Entwicklung eines technisch-wirtschaftlichen Konzeptes für den dreilagigen Containertransport mit dem Binnenschiff zwischen Koblenz und Regensburg. Gutachten im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Wirtschaft, Verkehr und Technologie und des Port of Rotterdam. Duisburg 2003
7. VBD: Technische und wirtschaftliche Voraussetzungen für einen optimalen Transport von Containern und anderen Normbehältern in Binnenschiffen auf der Strecke Antwerpen/Rotterdam nach Straßburg. Duisburg 1997