



Schnelle Containerschiffe Möglichkeiten und Grenzen

Promotionsvortrag

Dipl. Ing., MSc Lars Adamek

Gliederung



- **Schifffahrt – Anwendungen und Anforderungen**
- Schiffsantrieb
 - Wirkungsgradeinflüsse
 - Widerstandsanteile
 - Rumpfwiderstand
- Höchstgeschwindigkeit des Containertransports
 - Rumpfformen
 - Vergleich der Alternativen
- Fazit

Schiffsanwendungen



Gütertransport



Passagiertransport



Sicherheitstechnische Aufgaben



Spezialaufgaben



Anforderungen



Gütertransport



Passagiertransport



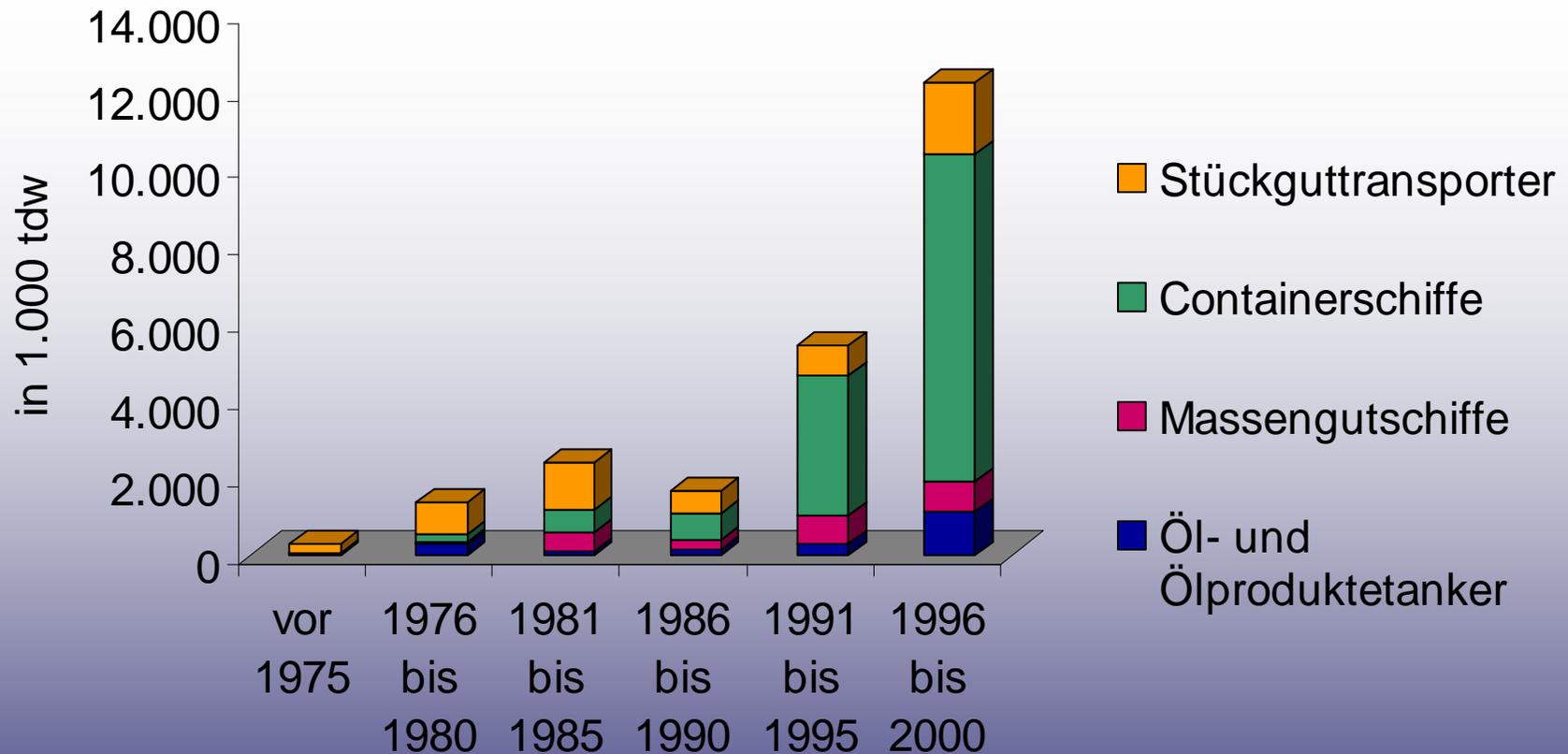
Sicherheitstechnische Aufgaben



Spezialaufgaben



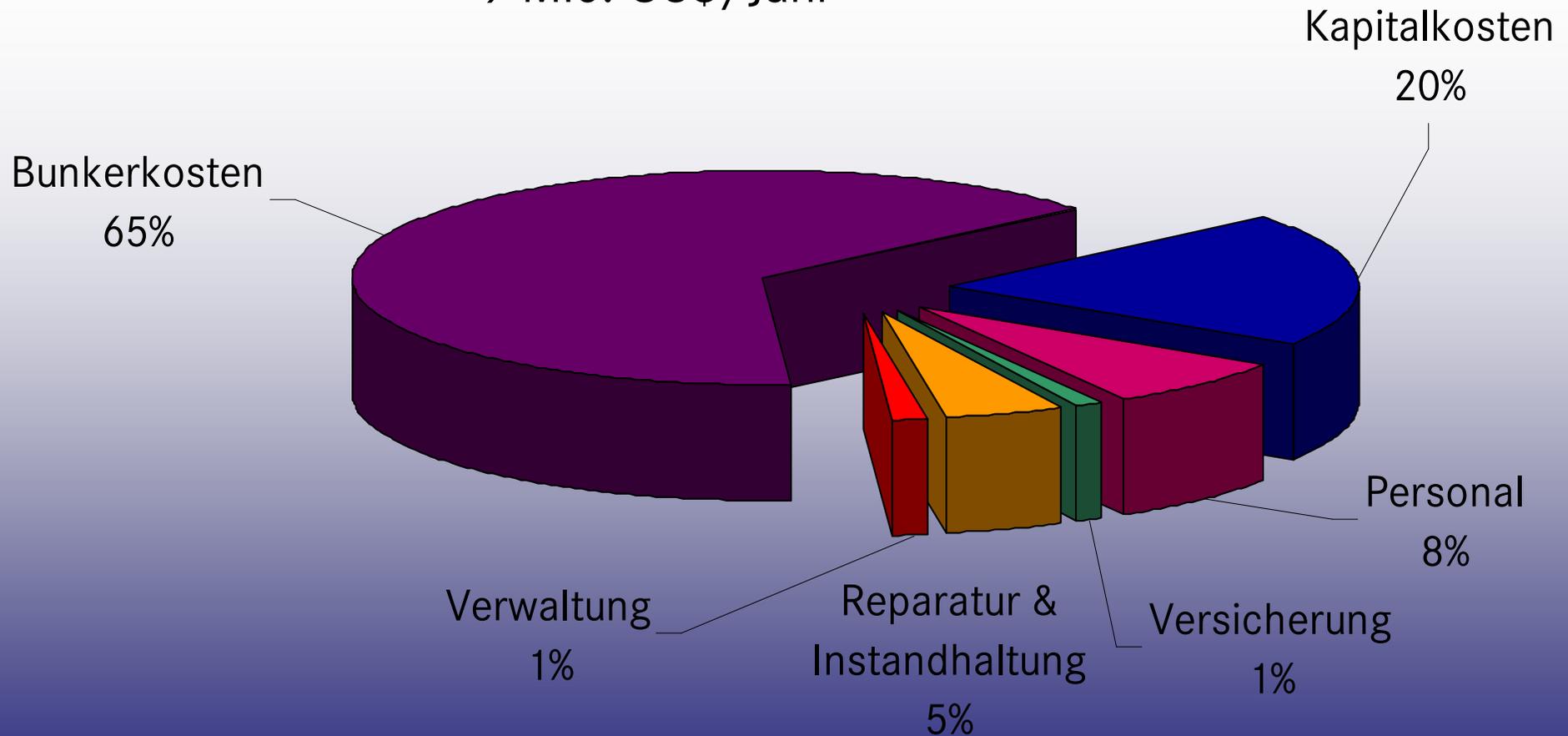
Ladekapazität der dt. Handelsflotte



Kosten



Beispiel: 1.700 TEU-Containerfrachter
9 Mio. US\$/Jahr



Spezifischer Transport Energiebedarf



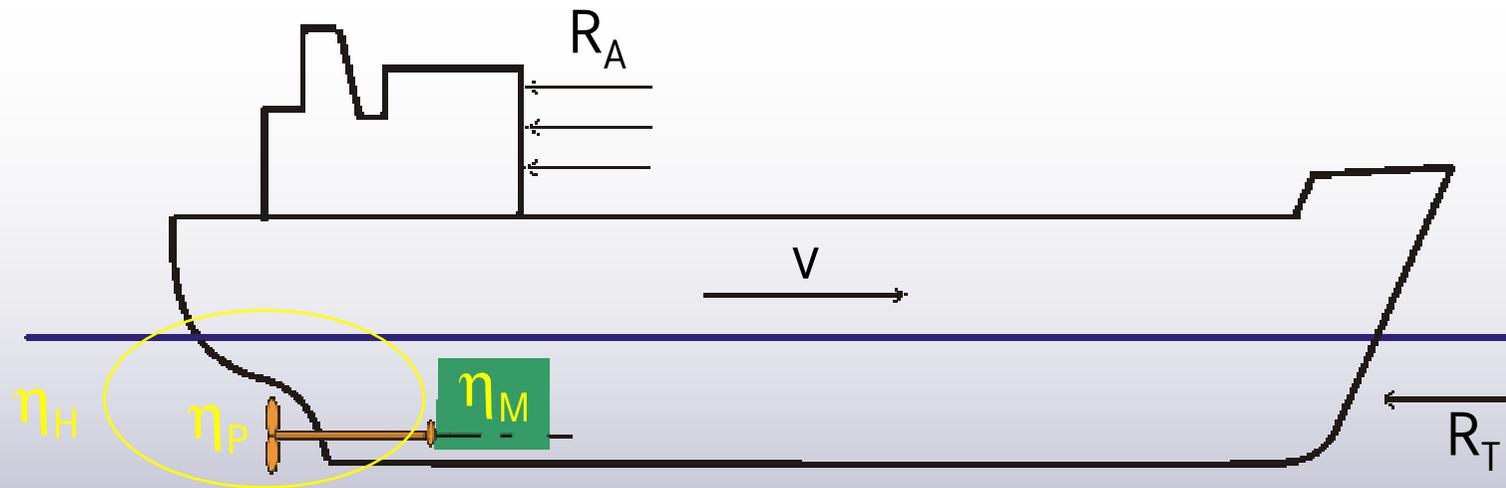
P / (m * v)	10 kn	20 kn	50 kn	100 kn	200 kn	500 kn
See (100.000 t)	$7 * 10^{-4}$	$3 * 10^{-3}$				
See (10.000 t)	$2 * 10^{-3}$	$2 * 10^{-2}$				
Schiene			$6 * 10^{-3}$	10^{-2}	$3 * 10^{-2}$	
Straße	$2 * 10^{-2}$	$2,2 * 10^{-2}$	$3,7 * 10^{-2}$	$8 * 10^{-2}$		
Luft (10 t)				$2,5 * 10^{-1}$	$9 * 10^{-2}$	$1,5 * 10^{-1}$
Luft (300 t)					$2 * 10^{-1}$	$5,5 * 10^{-2}$

Gliederung



- Schifffahrt – Anwendungen und Anforderungen
- **Schiffsantrieb**
 - **Wirkungsgradeinflüsse**
 - Widerstandsanteile
 - Rumpfwiderstand
- Höchstgeschwindigkeit des Containertransports
 - Rumpfformen
 - Vergleich der Alternativen
- Fazit

Wirkungsgradkette



$$P_B = v \cdot (R_T + R_A) \cdot \eta_D$$

$$\eta_D = \eta_M \cdot \eta_P \cdot \eta_H$$

P_B Antriebsleistung des Motors
 v Schiffsgeschwindigkeit
 η_D Propulsionsgütegrad
 R_T Schleppwiderstand

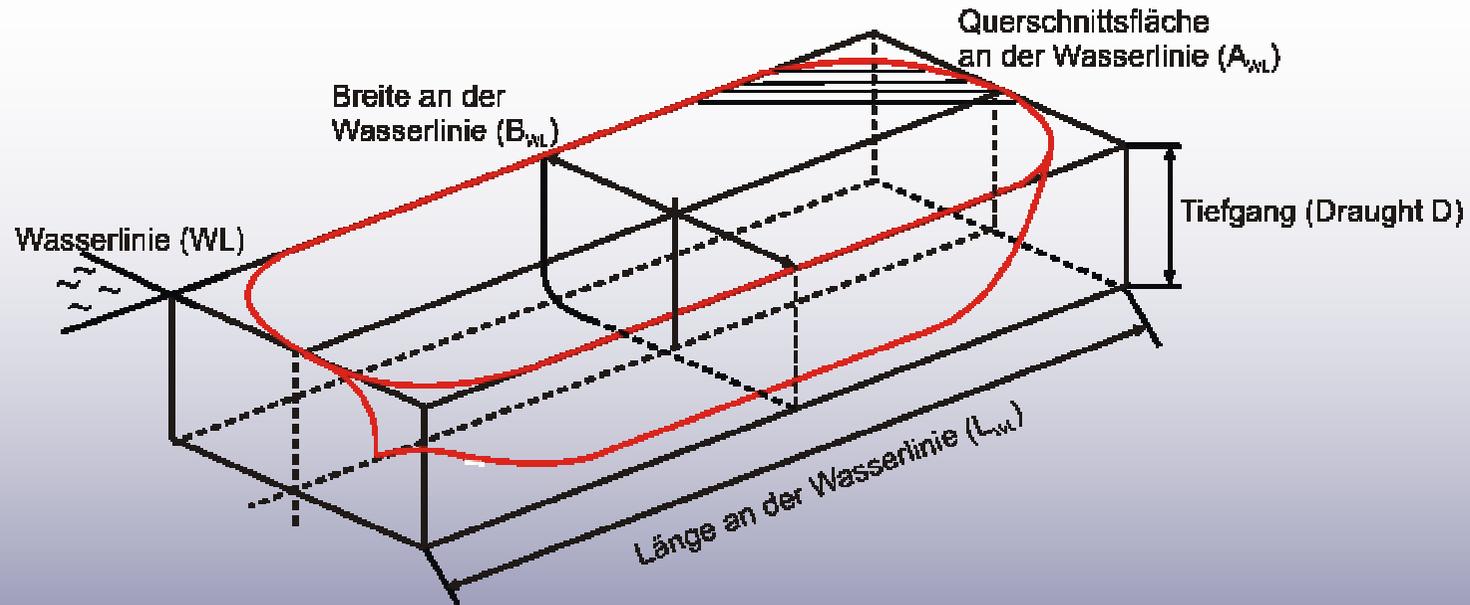
η_M Wirkungsgrad des Motors
 (0,3 bis 0,45)
 η_P Wirkungsgrad des Propellers
 (0,34 bis 0,8)
 η_H Schiffseinflussgrad
 (0,95 bis 1,4)

Gliederung



- Schifffahrt – Anwendungen und Anforderungen
- Schiffsantrieb
 - Wirkungsgradeinflüsse
 - **Widerstandsanteile**
 - Rumpfwiderstand
- Höchstgeschwindigkeit des Containertransports
 - Rumpfformen
 - Vergleich der Alternativen
- Fazit

Schiffsabmessungen



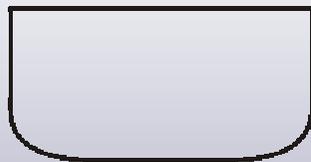
$$C_B = \frac{\Delta}{B_{WL} \cdot L_{WL} \cdot D}$$

C_B	Blockkoeffizient
Δ	Wasserverdrängung
A_{WL}	Fläche an der Wasserlinie
D	Tiefgang

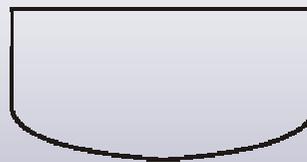
Einfluss Formgebung Ladekapazität und Froude-Zahl



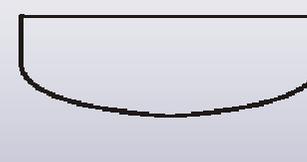
Großtanker



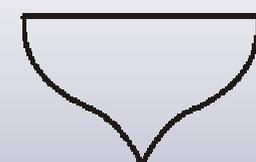
Frachter



Fäherschiffe



Kriegsschiffe



c_B	0,8 bis 0,85	0,5 bis 0,75	0,5 bis 0,7	0,25 bis 0,4
V in kn	12 bis 17	13 bis 26	15 bis 30	20 bis 45
Fn-Zahl	ca. 0,15	ca. 0,2	ca. 0,3	ca. 0,4

Widerstandsanteile



Anteile des Schiffswiderstands:

1. Druckwiderstand
Druck des Wassers auf Rumpf
2. Reibungswiderstand
Reibung an der Oberfläche des Rumpfs
3. Wellenwiderstand = $f(Fn)$
Druck des Wellensystems durch Erdschwere



Zähigkeitswiderstand = $f(Re)$

$$Re = \frac{v \cdot l}{\nu}$$

$$Fn = \frac{v}{\sqrt{g \cdot l}}$$

Schleppleistung



$$P_B = R_T \cdot v \cdot \eta_D \approx 2 \text{ bis } 10 \%$$

$$R_T = R_W + R_F + R_A$$

$$R_T = c_W \cdot S \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 + c_F \cdot S \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2$$

↳ = f(v²)

Abschätzung durch
Admiralitätsformel:

$$P_B = \frac{\Delta^{2/3} v^3 \eta_D}{c_{ADM}}$$

R_T	Schleppwiderstand
P_B	Motorleistung
R_F	Reibungswiderstand
R_W	Wellenwiderstand
R_A	Luftwiderstand

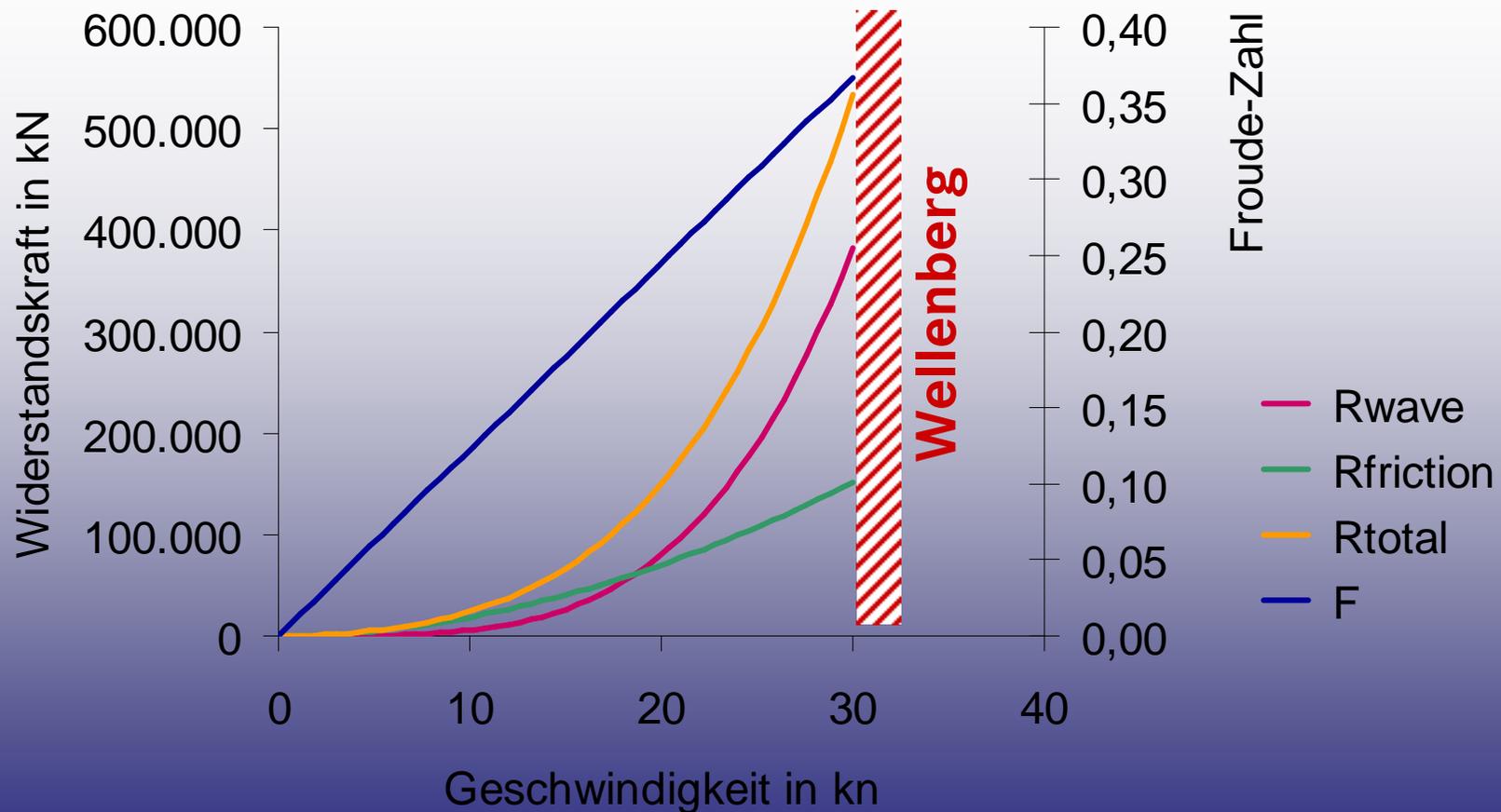
c_F	Reibungskoeffizient
c_W	Wellenkoeffizient
c_{ADM}	Admiralitätskoeffizient
S	benetzte Oberfläche
v	Schiffsgeschwindigkeit
Δ	Verdrängung

Wellenberg



Beispiel:

Widerstandsverhalten eines Containerschiffs

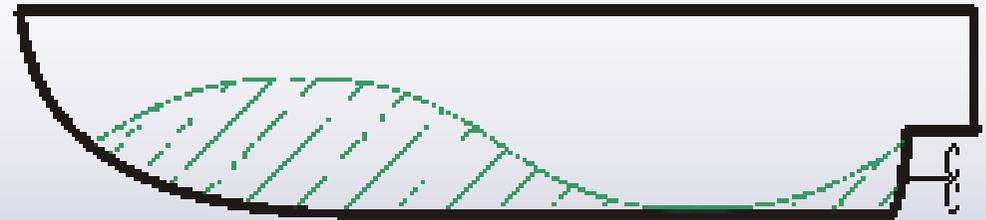


Rumpfgeschwindigkeit



Wellengeschwindigkeit im Wasser:

$$v = \sqrt{\frac{g \cdot \lambda}{2\pi}}$$



Für $\lambda = L_{WL}$ ergibt sich die sog. Rumpfgeschwindigkeit:
Max. Geschwindigkeit bei Verdrängungsfahrt

$$v = \sqrt{\frac{g \cdot L_{WL}}{2\pi}}$$

Alternative: **GLEITEN**

Boot der Wasserschutzpolizei als Beispiel



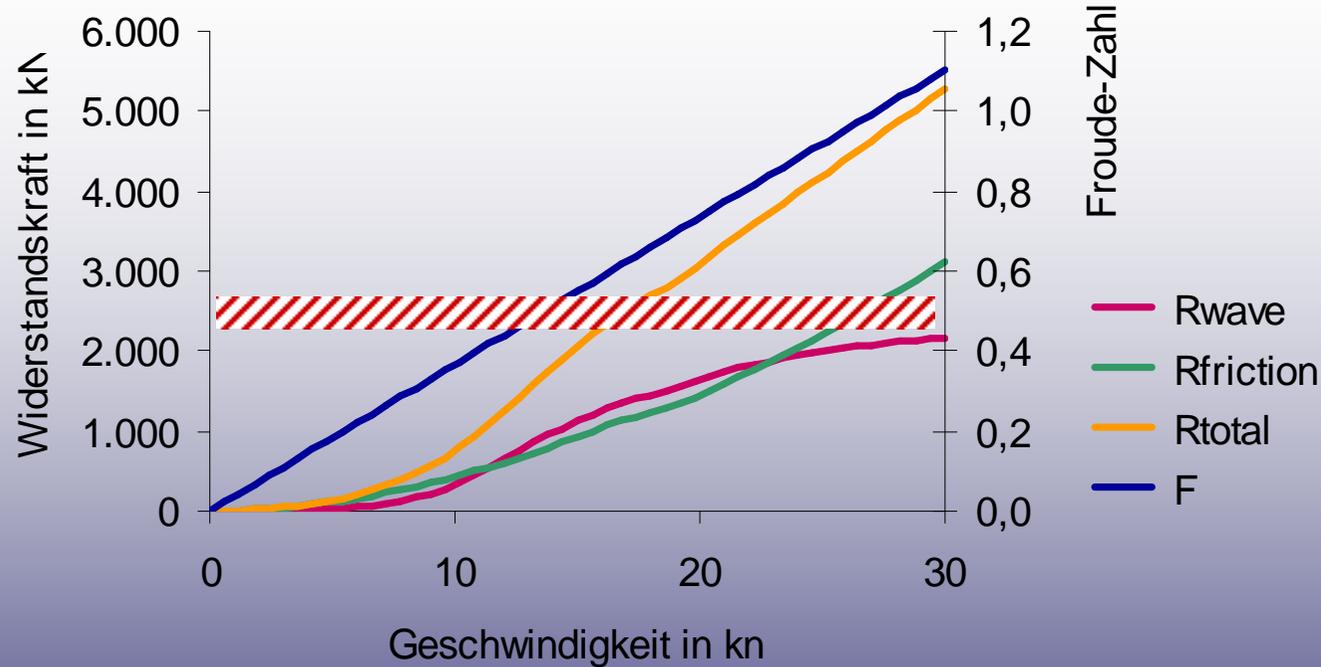
Charakteristische Daten:

Länge 20 m
Breite 4,4 m
Tiefgang 1,3 m
Gewicht 24,2 t
Motorleistung 2 * 500 PS

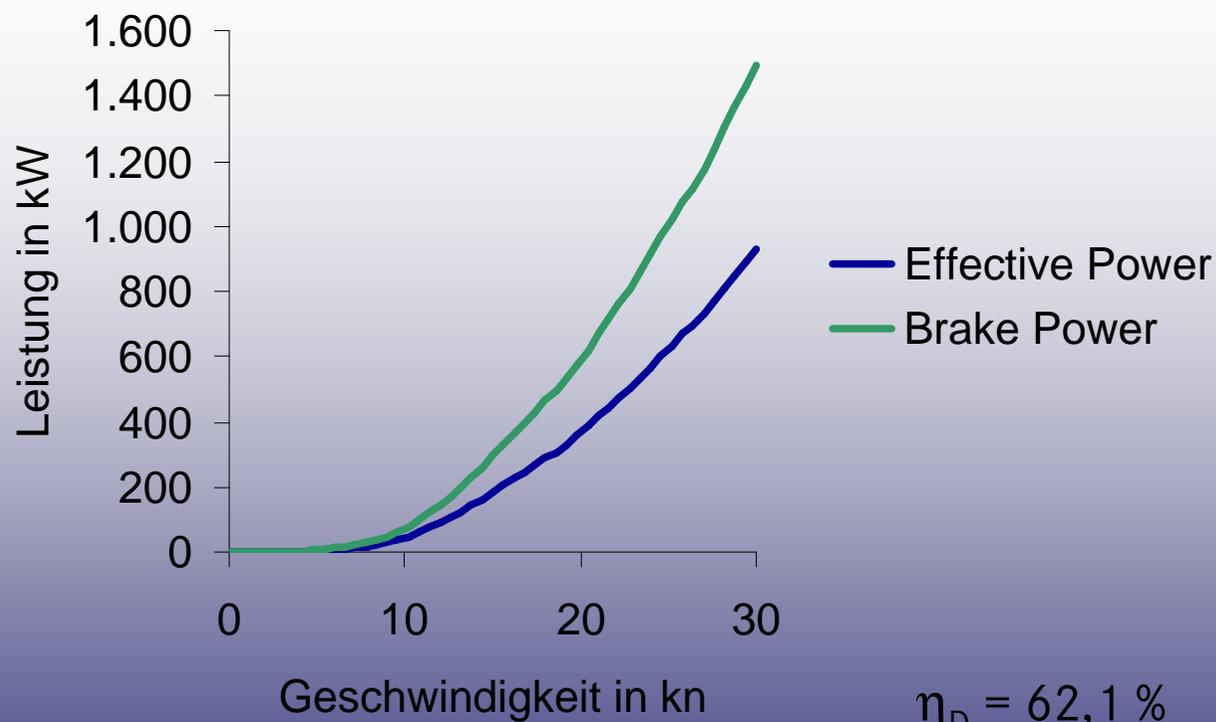
$$\rightarrow v_{\text{Rumpf}} = 10,8 \text{ kn}$$



Widerstandskräfte des WaPo-Bootes



Geschwindigkeit-Leistungs-Kennfeld des WaPo-Bootes



$$\eta_D = 62,1 \%$$

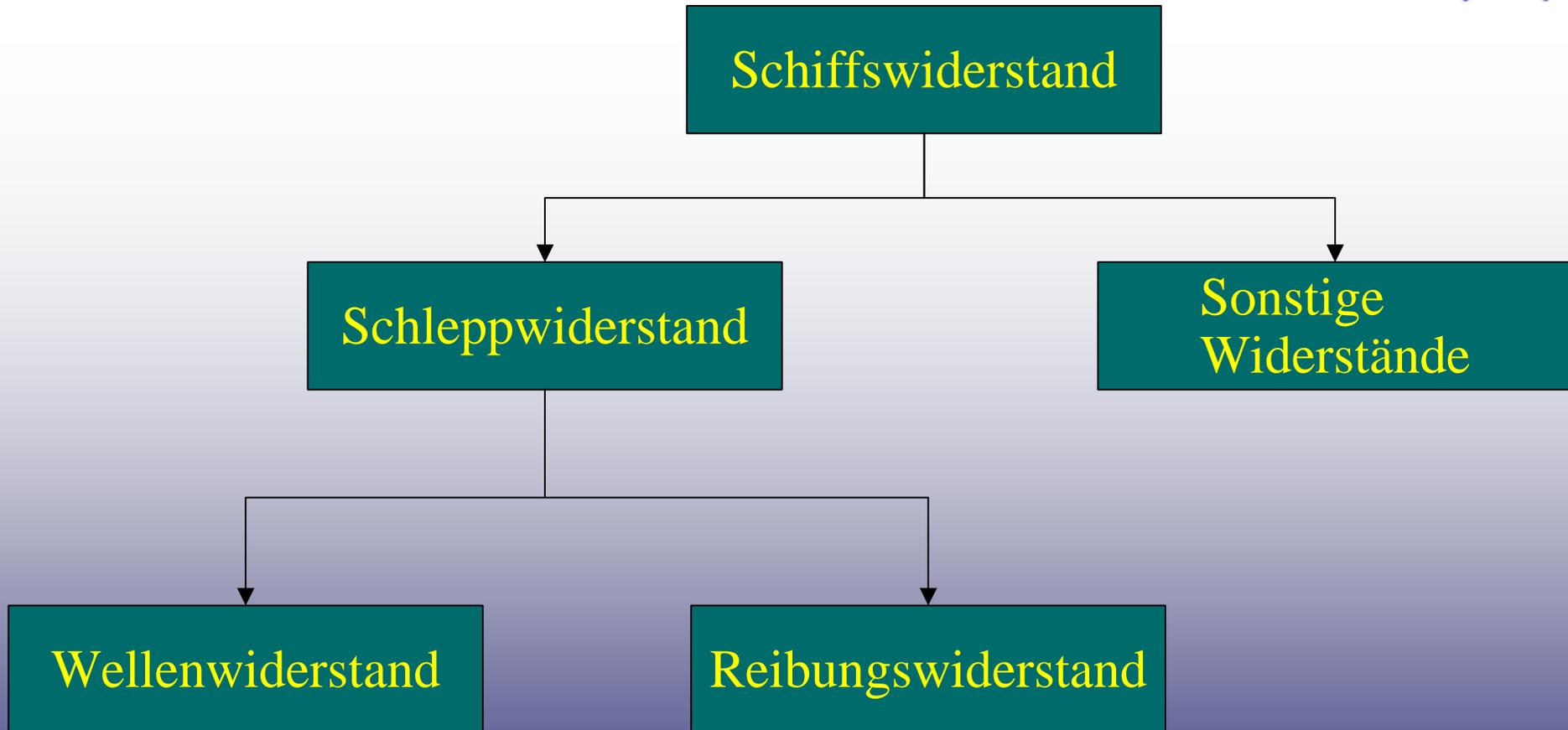
$$V_{\max} = 22 \text{ kn bei } 740 \text{ kW}$$

Gliederung



- Schifffahrt – Anwendungen und Anforderungen
- Schiffsantrieb
 - Wirkungsgradeinflüsse
 - Widerstandsanteile
 - **Rumpfwiderstand**
- Höchstgeschwindigkeit des Containertransports
 - Rumpfformen
 - Vergleich der Alternativen
- Fazit

Schiffswiderstand



Widerstandsanteile



	Schnelle Schiffe	Langsame Schiffe
F_n	ca. 0,4	ca. 0,15
Reibungswiderstand	45 %	90 %
Wellenwiderstand	40 %	5 %
Verwirbelungswiderstand	5 %	3 %
Luftwiderstand	10 %	2 %

Kraftermittlung am Modell



$$F_M \stackrel{!}{=} F_S$$

$$Fn_M = Fn_S$$

$$Re_M = Re_S$$

$$\frac{v_M}{\sqrt{g \cdot L_M}} = \frac{v_S}{\sqrt{g \cdot L_S}}$$

$$\frac{v_M \cdot L_M}{v_M} = \frac{v_S \cdot L_S}{v_S}$$

$$\lambda = \frac{L_S}{L_M} \quad v_M = \frac{v_S}{\sqrt{\lambda}}$$

$$\Rightarrow v_M = \frac{v_S}{\sqrt{\lambda}}$$

F_M Widerstandskraft am Modell
 v_M Schiffsgeschwindigkeit

L_M Länge an der Wasserlinie
 λ Größenverhältnis Schiff/Modell

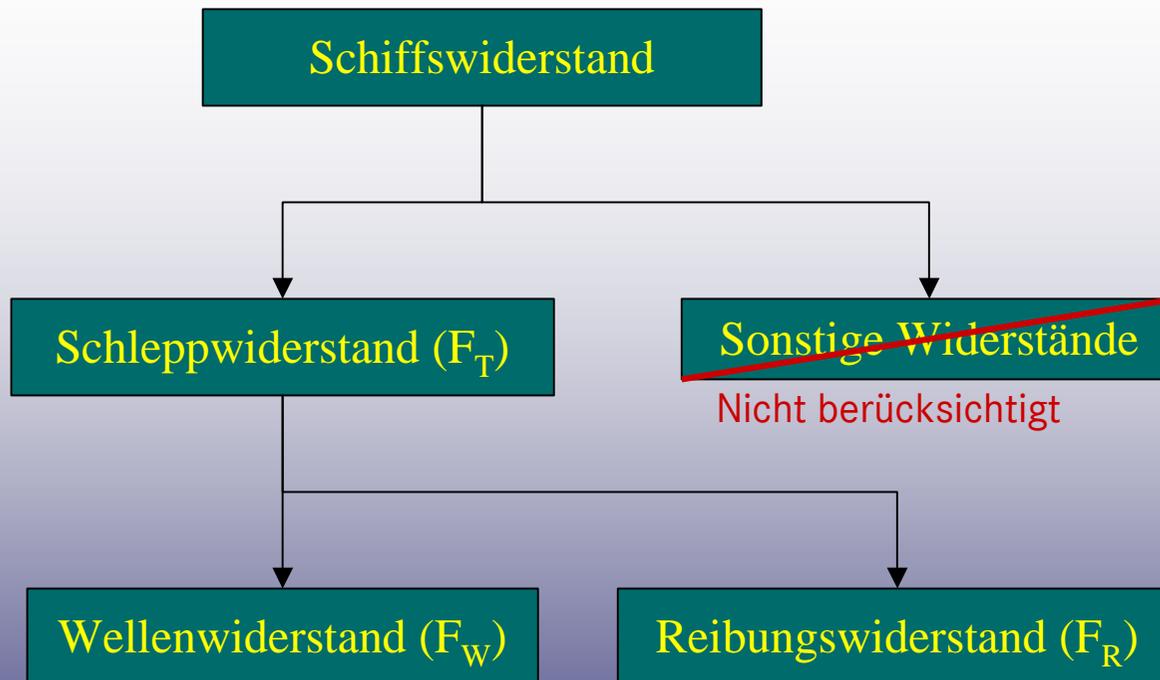
Modellparameter Schleppversuch



	Großausführung	Modell
Geschwindigkeit	10 m/s (18 kn)	1 m/s ($\lambda=100$)
Schiffslänge	200 m	2 m
Kin. Viskosität	10 bis 20 mm ² /s	500 mm ² /s

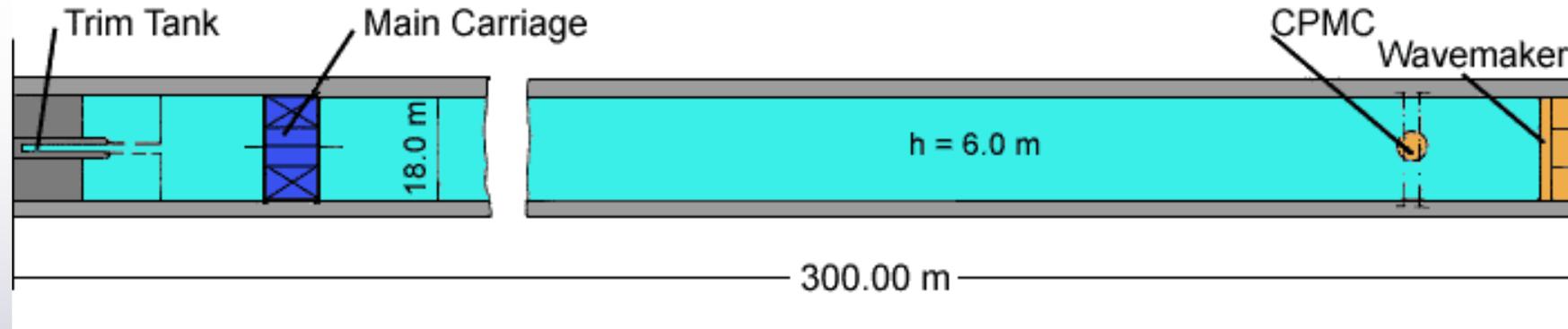
Daher Modellversuche bei kleinerer Re, da Medium mit ausreichender Viskosität nicht verfügbar. Direkte Messung des Widerstands nur in Originalgröße möglich!

Widerstandsberechnung



1. Messung F_{TM}
($F_{n_M} = F_{n_S}; Re_M < Re_S$)
2. Berechnung F_{RM}
aus Strömungsversuchen an
querschnittsgleichen Flächen
(seit 1957 mittels ITTC-
Reibungslinien)
3. $F_{WM} = F_{TM} - F_{RM}$
4. Umrechnung F_{RM} auf F_{RS} ;
 $F_{WM} = F_{WS}$
5. $F_{TS} = F_{WM} + F_{RS}$

Schleppversuch (HSVA)



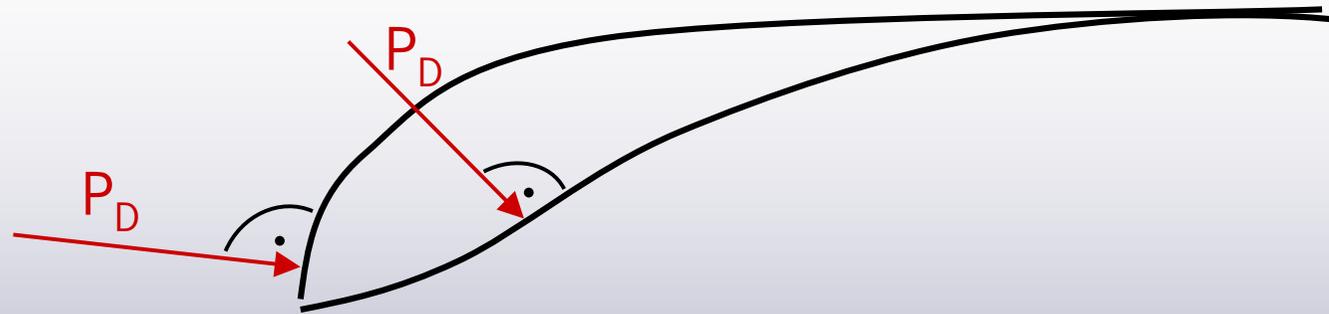
Computerized
Planar
Motion
Control



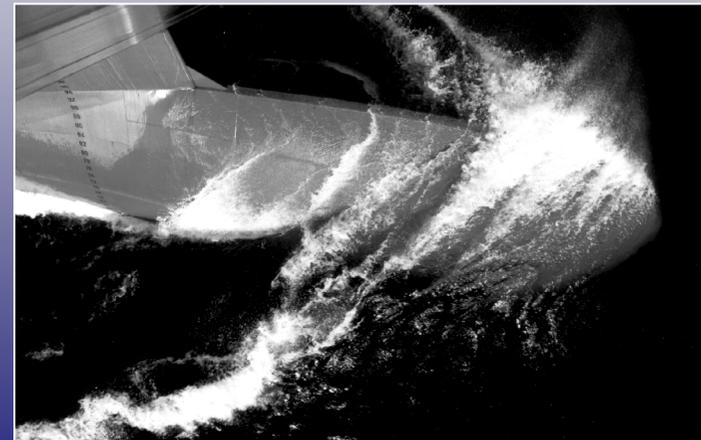
Möglichkeiten zur Reduzierung des Schleppwiderstands



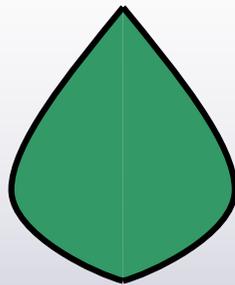
1. Linienführung



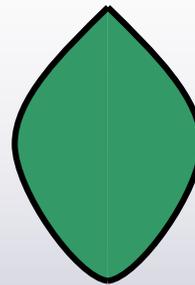
2. Widerstandsverringemde Anbauten



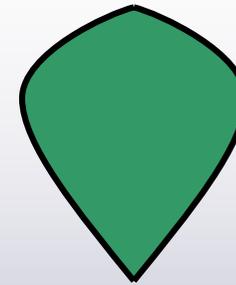
Bugwulstform



a, Δ - Typ



b, 0 - Typ

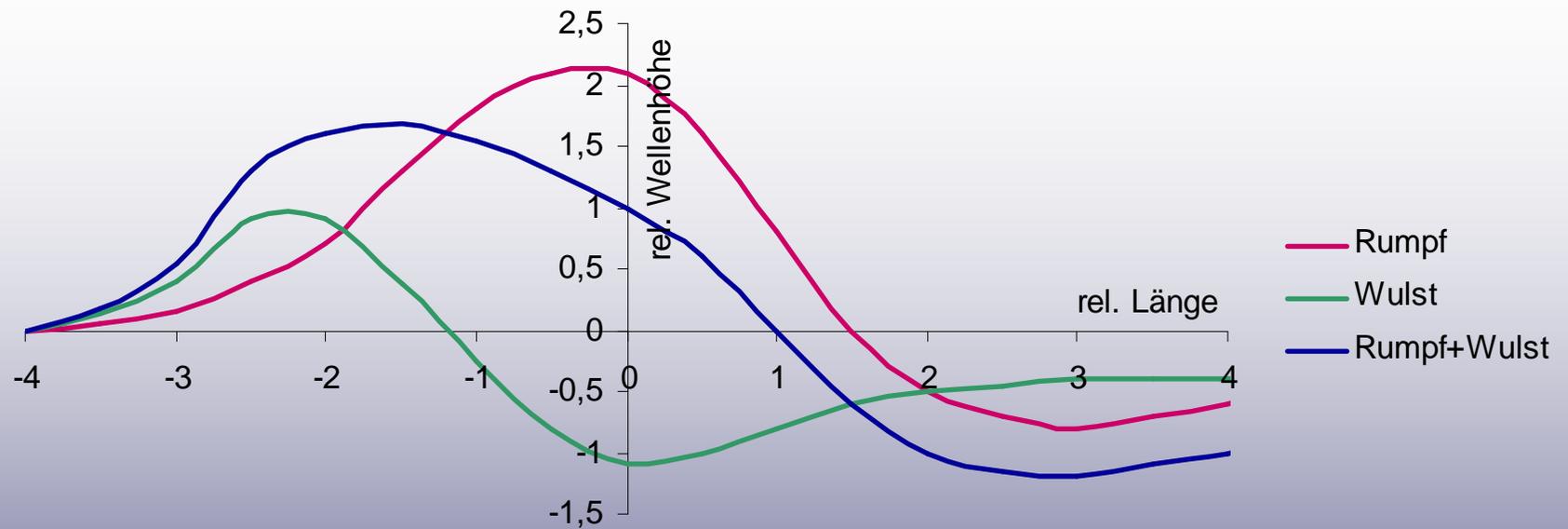


c, ∇ - Typ

Verdrängungsvolumen ca. 0,25 bis 0,35 % der Schiffsverdrängung.
Relative Länge 2,8 bis 3,2 % der Länge der Wasserlinie.

Reduktion des Wellenwiderstands bis ca. 30 % möglich!

Bugwulstwirkung



Länge Wulst: -2 bis 0

Länge Rumpf: 0 bis 4

Gliederung



- Schifffahrt – Anwendungen und Anforderungen
- Schiffsantrieb
 - Wirkungsgradeinflüsse
 - Widerstandsanteile
 - Rumpfwiderstand
- **Höchstgeschwindigkeit des Containertransports**
 - **Rumpfformen**
 - Vergleich der Alternativen
- Fazit

Erhöhung der Transportgeschwindigkeit



Möglichkeiten zur Geschwindigkeitserhöhung:

1. Mehr Leistung → Grenze durch Wellenberg
2. Rumpfform
 1. „Länge läuft!“ → Rumpf verlängern
 2. Schlankheitsgrad Rumpf → Katamaran
 3. Gleiten → Kleinere Schiffe

Mögliche Rumpfformen



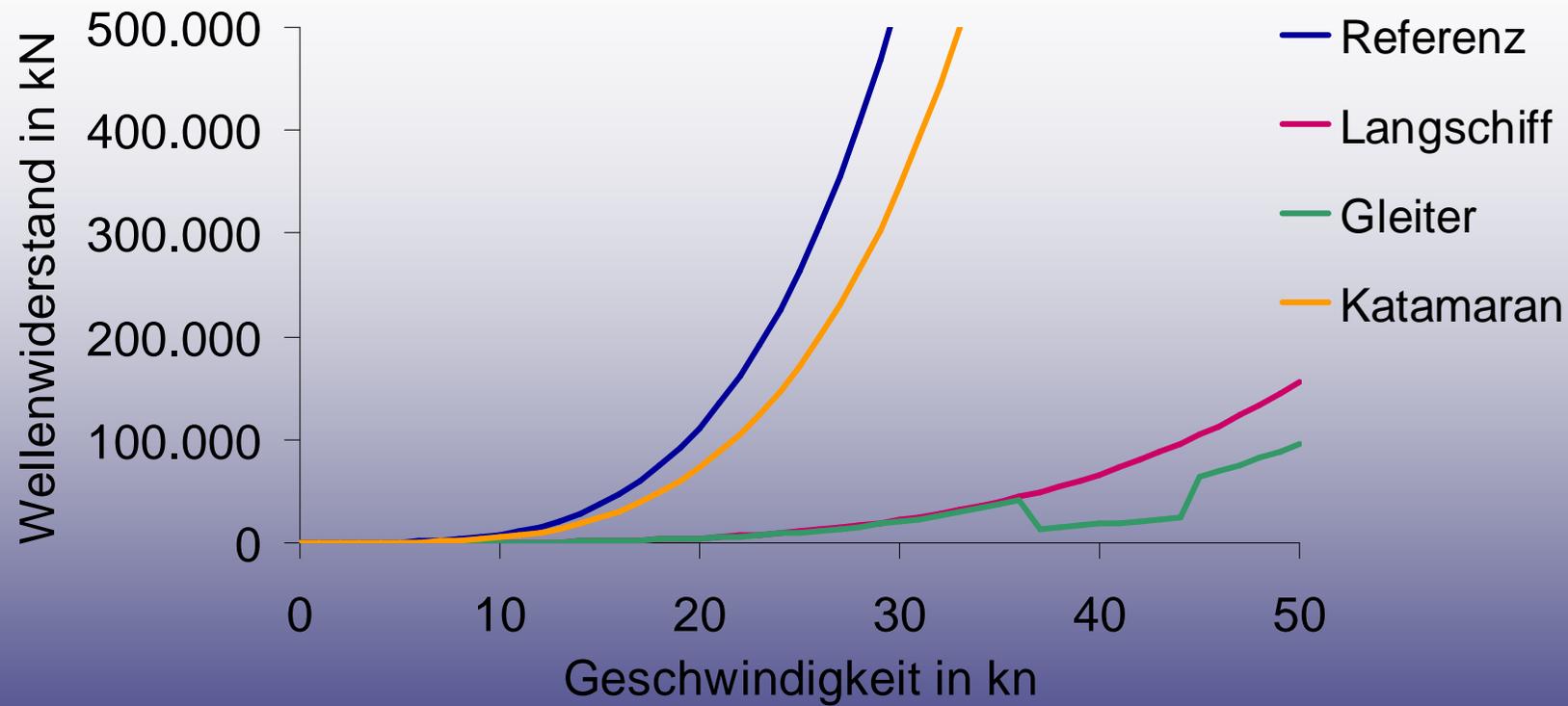
	Referenzfrachter mit Knickrumpf	Langer Rumpf	Gleiter	Katamaran
Länge	180 m	360 m	180 m	180 m
Breite	27 m	13,5 m	27 m	2 * 13,5 m
Tiefgang	11 m	11 m	1,1 m	8,8 m
Verdrängung	25.000 t	25.000 t	2.500 t	2 * 12.500 t
Rumpf- geschwindigkeit	32,5 kn	45,9 kn	32,5 kn	32,5 kn

Gliederung

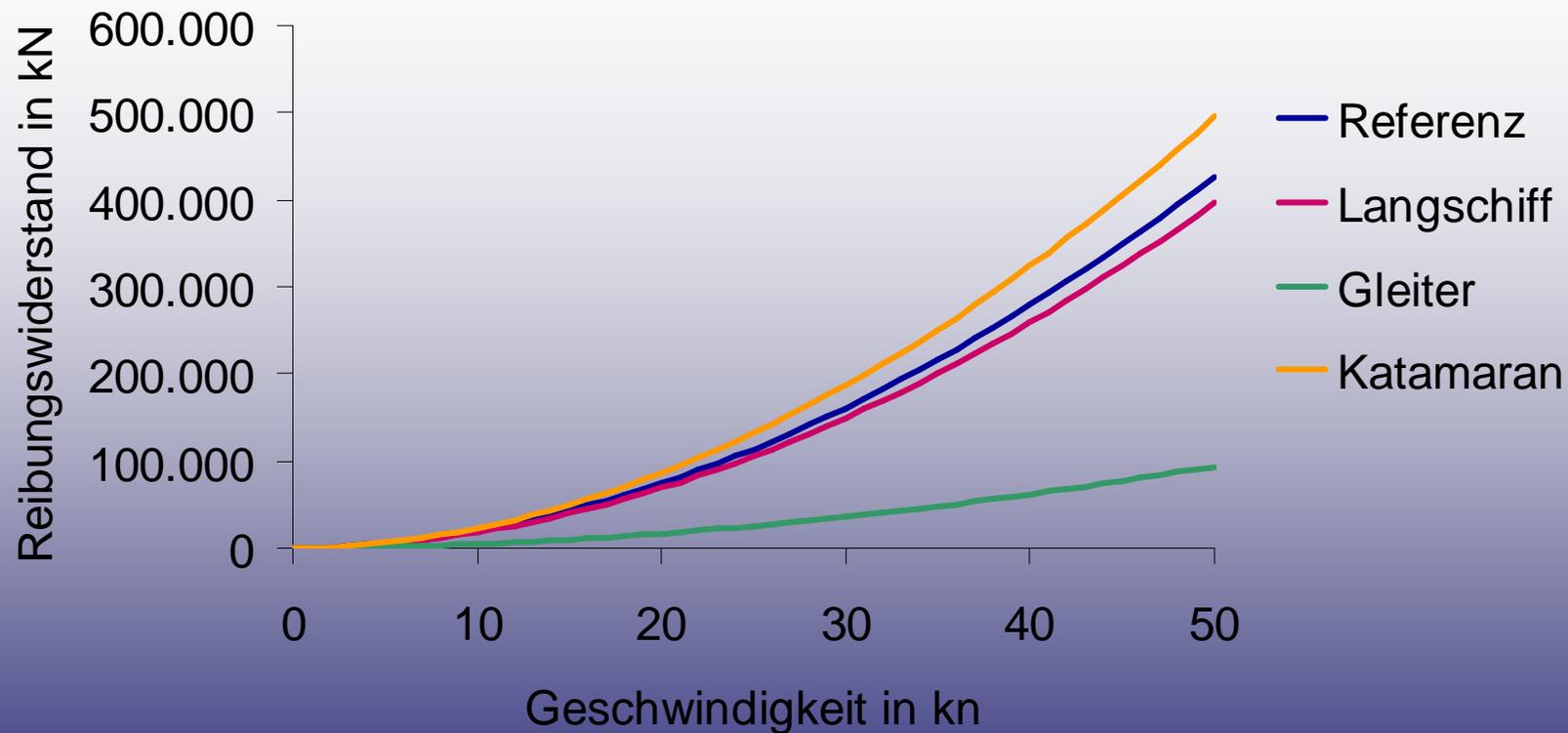


- Schifffahrt – Anwendungen und Anforderungen
- Schiffsantrieb
 - Wirkungsgradeinflüsse
 - Widerstandsanteile
 - Rumpfwiderstand
 - Propulsor
- Höchstgeschwindigkeit des Containertransports
 - Rumpfformen
 - **Vergleich der Alternativen**
- Fazit

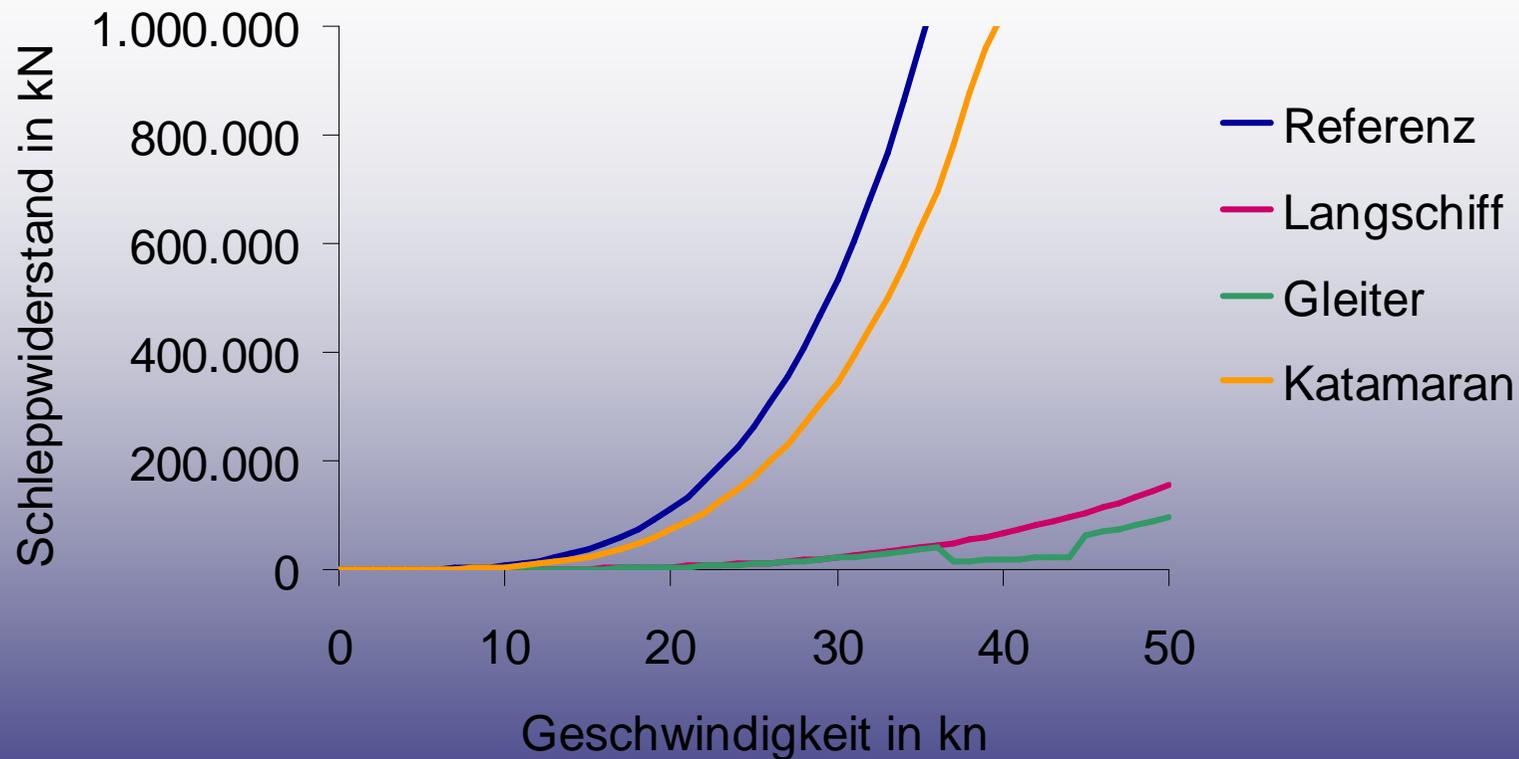
Wellenwiderstand der Entwürfe



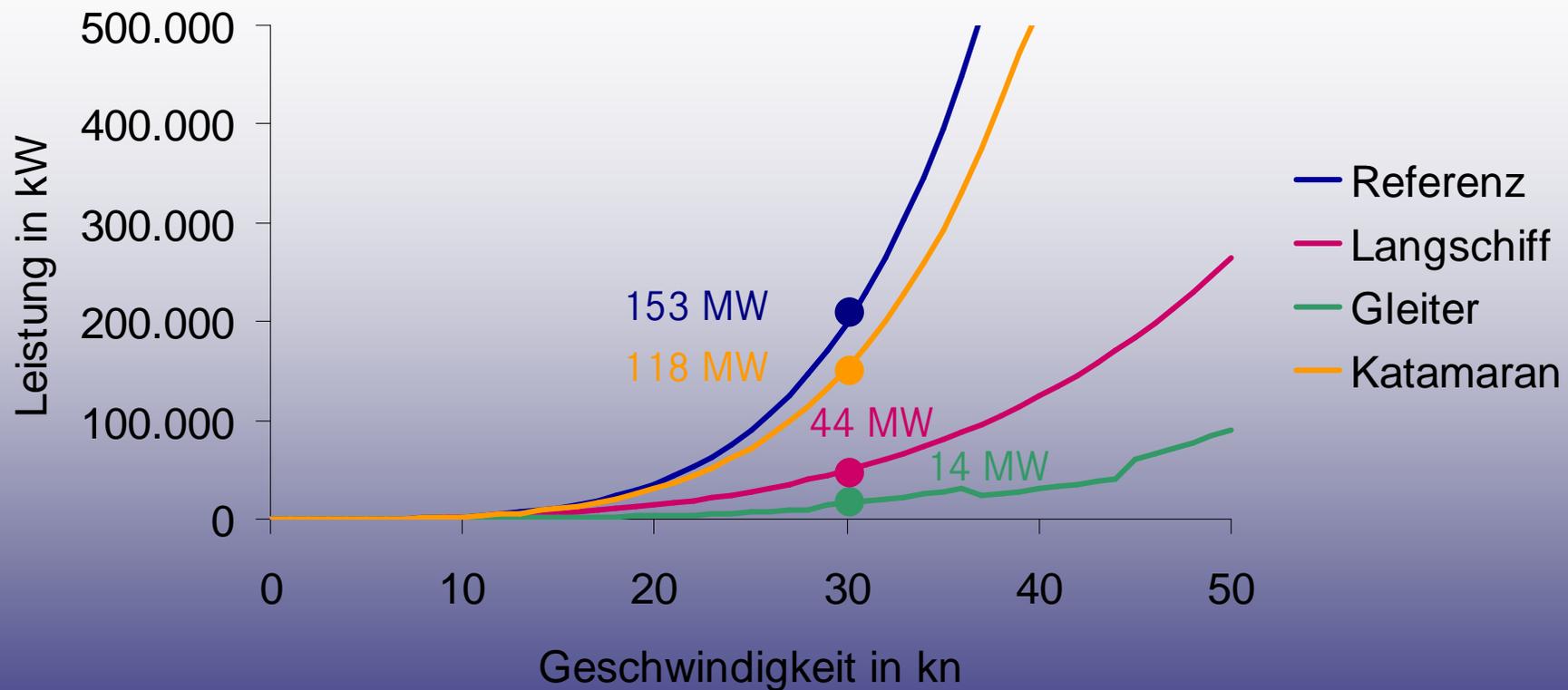
Reibungswiderstand der Entwürfe



Schleppwiderstand der Entwürfe



Antriebsleistung der Entwürfe

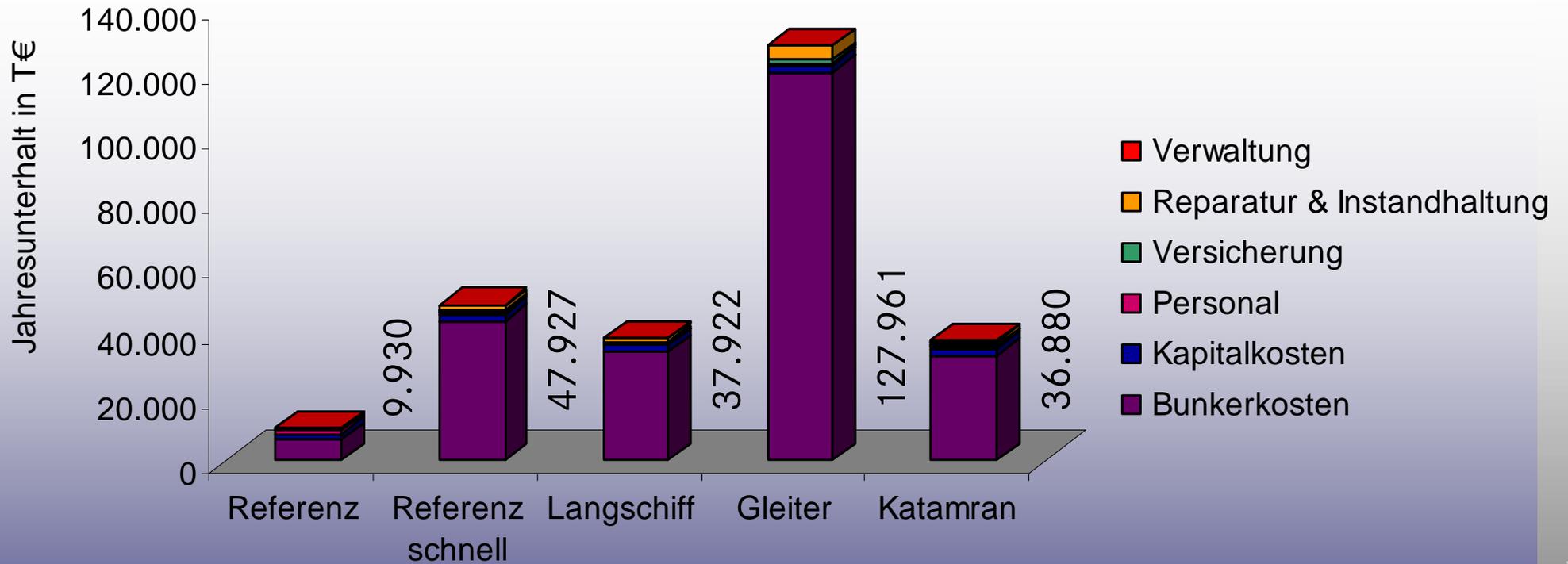


Leistungsmerkmale der Entwürfe



	Referenzfrachter mit Knickrumpf	Langer Rumpf	Gleiter	Katamaran
V_{Ref} (bei 32.300 kW)	20,7 kn	27,4 kn	43,0 kn	21,6 kn
V_{max}	32,5 kn	45,9 kn	100 kn	32,5 kn
P_{max}	216.100 kW	168.100 kW	530.000 kW	163.200 kW
Breite	27 m	13,5 m	27 m	40,5 m
Spez. Transport- energiebedarf	$2 * 10^{-2}$ (20,7 kn)	$1,5 * 10^{-2}$ (27,4 kn)	$1 * 10^{-1}$ (43 kn)	$1,9 * 10^{-2}$ (21,6 kn)

Kostenvergleich



Gliederung



- Schifffahrt – Anwendungen und Anforderungen
- Schiffsantrieb
 - Wirkungsgradeinflüsse
 - Widerstandsanteile
 - Rumpfwiderstand
 - Propulsor
- Höchstgeschwindigkeit des Containertransports
 - Rumpfformen
 - Vergleich der Alternativen
- **Fazit**

Spezifischer Transport Energiebedarf



P / (m * v)	10 kn	20 kn	50 kn	100 kn	200 kn	500 kn
See (100.000 t)	$7 * 10^{-4}$	$3 * 10^{-3}$				
See (10.000 t)	$2 * 10^{-3}$	$2 * 10^{-2}$	$5 * 10^{-2}$			
See (1.000 t)			10^{-1}	$7 * 10^{-1}$		
Schiene			$6 * 10^{-3}$	10^{-2}	$3 * 10^{-2}$	
Straße	$2 * 10^{-2}$	$2,2 * 10^{-2}$	$3,7 * 10^{-2}$	$8 * 10^{-2}$		
Luft (10 t)				$2,5 * 10^{-1}$	$9 * 10^{-2}$	$1,5 * 10^{-1}$
Luft (300 t)					$2 * 10^{-1}$	$5,5 * 10^{-2}$

Fazit



- Seetransport ist sehr energieeffizient
- Transportgeschwindigkeit ist durch Wellenbildung begrenzt
- Optimierung der Effizienz ist insbesondere durch Formgebung des Rumpfs möglich
- Gleitschiffe könnten 60 kn erreichen (10 % der Lufttransportgeschwindigkeit)
- Schneller Transport durch Gleitschiffe ist ca. 2,5 mal so energieintensiv wie Lufttransport

Geschwindigkeit der Schiffe wird mit deren Größe weiter steigen.
Dienstgeschwindigkeit wird auch in Zukunft 30 kn nicht übersteigen.