

Beitrag zur Auslegung von Querschubanlagen mit Propeller für Schiffe ¹⁾

Contribution to the Dimensioning of Transverse Thruster with propeller for ships

Klaus-Jürgen Bladt
Rostock
www.jbladt.jimdo.com
www.jbladt.de
Stand: 27.04.2018

- 1) Die jahrelange Mitarbeit bei der Entwicklung, Auslegung, Konstruktion und Inbetriebnahme von Querschubanlagen im Dieselmotorenwerk Rostock hat mich dazu veranlasst, *aus der Sicht des Maschinenbauers* das dabei gewonnene Wissen zusammenfassend niederzulegen. Viele dieser Erkenntnisse verdanke ich den Kollegen, die die Hydrodynamik bearbeiteten, insbesondere Herrn Dr. Klaus Wagner.
Der Maschinenbauer steht häufig vor der Aufgabe, die wesentlichen Kenngrößen einer Querschubanlage (Leistung, Durchmesser, Drehzahl u. a.) im Projektstadium auf der Grundlage einer vorgegebenen Lateralkraft festlegen zu müssen. Es wird eine Möglichkeit vorgestellt, diese Kenngrößen auf einfachem Weg zu ermitteln.
Der folgende Beitrag befindet sich noch in der Bearbeitung und wird im Laufe der Zeit durch Anlagen ergänzt.

Die Dokumentation wurde mit bestem Wissen und Gewissen erarbeitet. Trotz sorgfältiger inhaltlicher Kontrolle erhebt die Dokumentation keinen Anspruch auf Vollständigkeit und Richtigkeit. Unbeabsichtigte Fehler können auftreten. Hinweise auf inhaltliche Verbesserungen sind erwünscht.
Für die Vervielfältigung des Dokumentes und die Übernahme von Auszügen ist die Zustimmung des Autors erforderlich.
Für den Inhalt verlinkter Seiten sind ausschließlich deren Betreiber verantwortlich.

The paper was prepared to best of one's knowledge. The paper makes no claim to be complete and correct in spite of the careful control. References for improvements with regard to the content are welcome.

The duplication of the document and the taking over of abridges require the approval of the author.
The linked WEB-Site operators are responsible for contents of their own sites.

0 Problem und Zielstellung

Querschubanlagen (Bugstrahlruder, Heckstrahlruder) sind häufig verwendete, aktive Manövrier- und Positionierhilfen für Schiffe. Sie werden meist ausgeführt als ein in einem Querkanal (Tunnel) im Bug oder Heck des Schiffes arbeitender Fest- oder Verstellpropeller, der über ein Winkelgetriebe angetrieben wird. Eine schematische Darstellung ist in Bild 1 gegeben.

Entscheidende Auswahlkriterien für Querschubanlagen sind Schub, Antriebsleistung, Ausführung der Anlage (Fest- oder Verstellpropeller), verfügbarer Bauraum und Kosten. Lieferanfragen der Werften enthalten häufig keine ausreichenden Informationen über die Einbaubedingungen einer Anlage, bei denen die vorgegebene Leistung in den erforderlichen Schub zu wandeln ist. In den Angaben einiger Hersteller bleibt das Problem, für welche Einbaubedingungen das angegebene Schub-Leistungsverhältnis erreicht wird, ebenfalls offen.

Baureihen wurden von einer Vielzahl von Herstellern entwickelt. Es zeichnet sich eine Tendenz zur Leistungskonzentration (kleine Propellerdurchmesser, hohe Leistung, hohe Drehzahl) ab, die die Anschaffungskosten günstig erscheinen lässt aber die Effektivität der Anlage reduziert.

In den folgenden Betrachtungen soll deshalb auf die Umsetzung von Leistung in Schub unter Berücksichtigung der Ausführung und der Einbaubedingungen eingegangen werden.

Die folgenden Ausführungen sind unter Verwendung der im Quellenverzeichnis aufgeführten Literatur entstanden. Die Quellen werden deshalb nicht immer im Einzelnen angeführt.

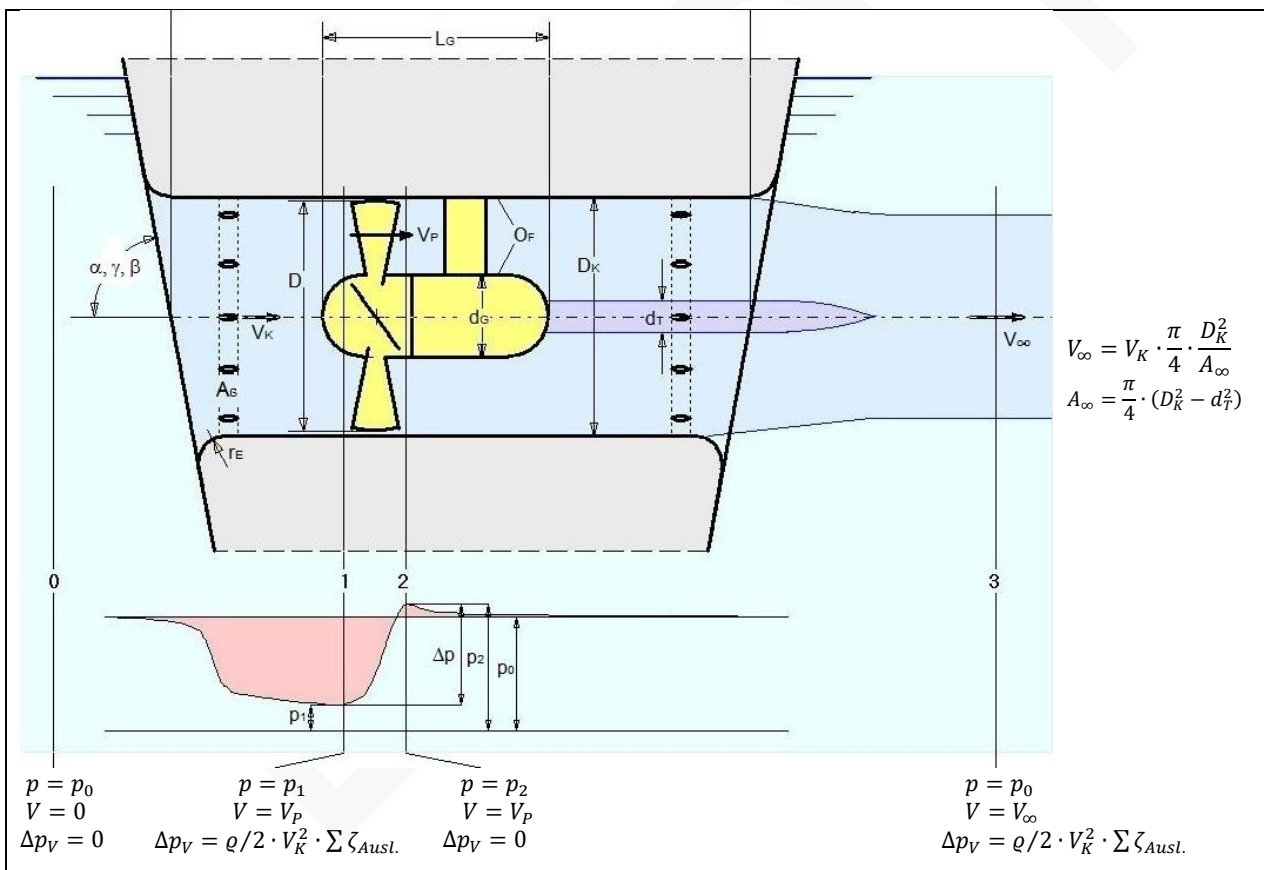


Bild 1: Querschubanlage (Geometrie, Druckverlauf und Strömungsverhältnisse)

1 Umsetzung von Leistung in Schub

Die analytische Ermittlung der Umsetzung von Leistung in Schub basiert auf den aus der Schiffspropellerdimensionierung bekannten, dimensionslosen Kenngrößen

Momentenbeiwert
$$K_Q = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot D^5} \cdot \frac{1}{n^3} \quad [1]$$

Schubbeiwert

$$K_{T\Sigma} = \frac{T_\Sigma}{\rho \cdot D^4 \cdot n^2} \quad [2]$$

Der Zusammenhang zwischen diesen Kenngrößen kann im Modellversuch oder durch Messungen am Schiff ermittelt werden, wobei sich zeigt, dass die die Einbaubedingungen und die Ausführung einer Anlage charakterisierende

Schubanteilziffer

$$\tau = \frac{T}{T_\Sigma} \quad [3]$$

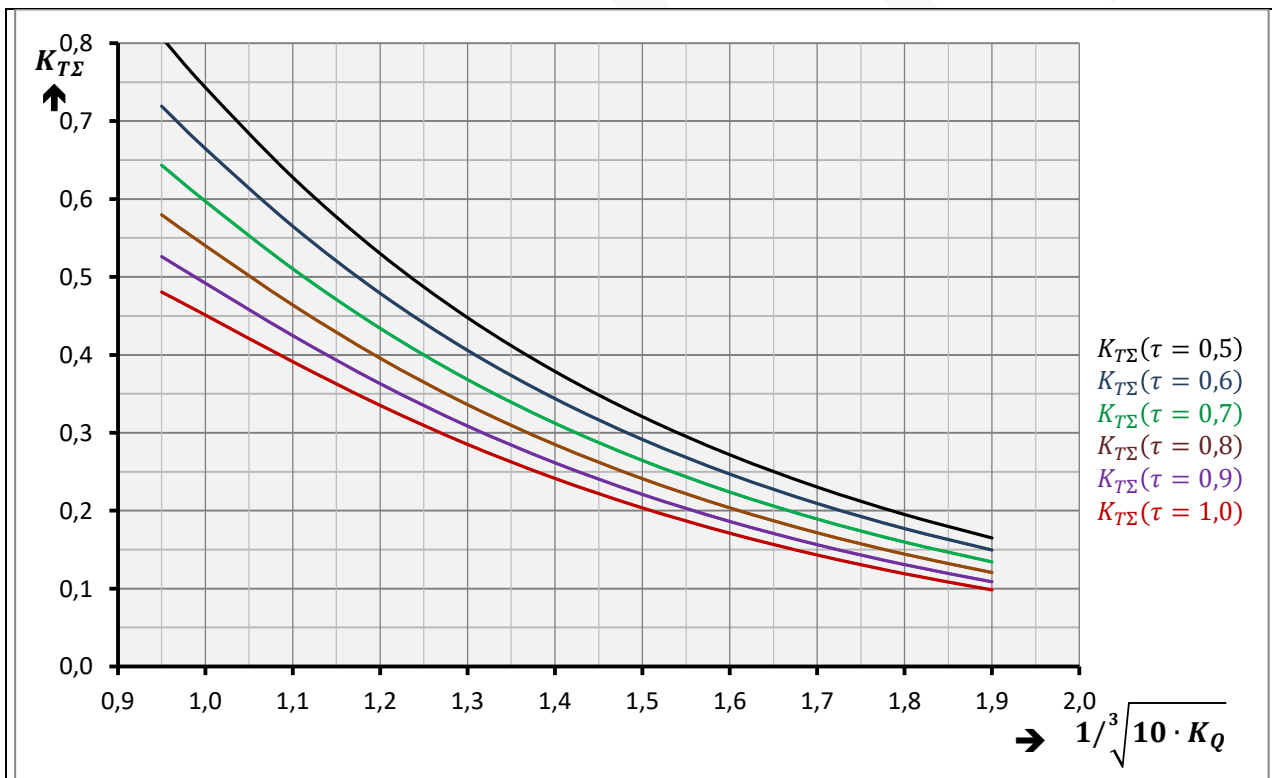
diesen Zusammenhang wesentlich beeinflusst /1/, /2/, /3/, /4/, /6/. Der Schubbeiwert ist also eine Funktion von

$$K_{T\Sigma} = f(K_Q, \tau) \quad [4]$$

Die Schubanteilziffer kennzeichnet den Anteil des Propellerschubes am Gesamtschub des Systems. Sie liegt im Idealfall bei $\tau = 0,5$ und erhöht sich durch schubmindernde Einflüsse, die hauptsächlich entstehen durch:

- Totwasserbildung durch die Gondel (Propellernabe und Getriebegehäuse),
- Zulaufbedingungen, hauptsächlich durch Einlaufgestaltung und Bordwandschräge,
- Querschnittsänderungen und -versperrungen,
- Oberflächenrauheit.

Im Bild 2 sind die Ergebnisse von Modellversuchen in einem Diagramm nach /5/ dargestellt.



<p>Spezifikationschub in Abhängigkeit von:</p> <p>Antriebsleistung am Propeller P [KW] Drehzahl des Propellers n [s⁻¹] Propellerdurchmesser D [m] Kanaldurchmesser D_K [m] Wasserdichte ρ [kg/m³] unterschiedlichen Einbaubedingungen τ [-]</p>	<p>Standardeinbaubedingungen</p>	<p>Das Diagramm:</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ wurde abgeleitet aus Versuchen mit dem Modellquerstrahlruder VP 3024 (Typ QRV 160 nach SVA-Bericht-Nr. 1476), ○ wurde umbewertet auf die Großausführung und enthält deshalb 9% Reserve gegenüber Modellversuchsergebnissen, ○ ist deshalb für die Ermittlung von Projektangaben geeignet.
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Bild 2: Diagramm zur Bestimmung des Spezifikationsschubes von Querschubanlagen [5]

Die im Diagramm dargestellte Kurvenschar, die den Zusammenhang $K_{T_\Sigma} = f(K_Q, \tau)$ widerspiegeln, kann mit dem folgenden Potenzansatz in eine analytisch zugängliche Form gebracht werden:

$$K_{T_\Sigma} = a(\tau) \cdot (\sqrt[3]{10 \cdot K_Q})^1 + b(\tau) \cdot (\sqrt[3]{10 \cdot K_Q})^2 + c(\tau) \cdot (\sqrt[3]{10 \cdot K_Q})^3 \quad [5]$$

$$\frac{T_\Sigma}{\rho \cdot D^4} = a(\tau) \cdot n \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{5 \cdot P}{\pi \cdot \rho \cdot D^5}} \right)^1 + b(\tau) \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{5 \cdot P}{\pi \cdot \rho \cdot D^5}} \right)^2 + \frac{c(\tau)}{n} \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{5 \cdot P}{\pi \cdot \rho \cdot D^5}} \right)^3 \quad [6]$$

$$\frac{T_\Sigma}{\rho \cdot D^4} = a(\tau) \cdot n \cdot W^1 + b(\tau) \cdot W^2 + \frac{c(\tau)}{n} \cdot W^3 \quad [7]$$

mit $W = \sqrt[3]{\frac{5 \cdot P}{\pi \cdot \rho \cdot D^5}}$ [8]

und $a = a(\tau) = a_1 \cdot \tau^{-2} + a_2 \cdot \tau^{-1} + a_3$ [9]

$$b = b(\tau) = b_1 \cdot \tau^{-2} + b_2 \cdot \tau^{-1} + b_3 \quad [10]$$

$$c = c(\tau) \quad [11]$$

Folgende Koeffizienten wurden für die in Bild 2 dargestellte Kurvenschar (Querschubanlagen mit Verstellpropeller mit einem Durchmesser Verhältnis $\frac{D}{D_K} = 0,985$) Koeffizienten ermittelt:

$$a_1 = -0,0263 \quad a_2 = +0,0218 \quad a_3 = -0,5555 \quad [12]$$

$$b_1 = -0,0589 \quad b_2 = +0,5258 \quad b_3 = +1,4052 \quad [13]$$

$$c = -0,8610 \quad [14]$$

Diese Werte gelten für die Großausführung von Querstrahlenanlagen mit Verstellpropeller. Die Werte aus dem Modellversuch sind um das 1,09 fache höher. Die Koeffizienten wären für die *Ermittlung des Modellschubes mit dem Faktor 1,09 zu multiplizieren*. Für Festpropeller ist ein ca. 5% höherer Schub aufgrund der besseren örtlich angepassten Flügelsteigung zu erwarten, so dass die Koeffizienten auch für diesen Fall entsprechend angepasst werden können.

Auf der Grundlage der Gleichungen 6 bzw. 7 lassen sich für die Einschätzung des Einflusses einzelner Parameter auf die Wirksamkeit der Anlage folgende Gleichungen ableiten:

1.1 Ermittlung des Schubes

Bei Vorgabe von Leistung, Drehzahl, Durchmesser, Dichte und Schubanteiliziffer lässt sich aus Gleichung 6 der Gesamtschub durch eine Umstellung ermitteln:

$$T_\Sigma = \rho \cdot D^4 \cdot \left[a \cdot n \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{5 \cdot P}{\pi \cdot \rho \cdot D^5}} \right)^1 + b \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{5 \cdot P}{\pi \cdot \rho \cdot D^5}} \right)^2 + \frac{c}{n} \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{5 \cdot P}{\pi \cdot \rho \cdot D^5}} \right)^3 \right] \quad [15]$$

$$T_\Sigma = \rho \cdot D^4 \cdot \left[a \cdot n \cdot W^1 + b \cdot W^2 + \frac{c}{n} \cdot W^3 \right] \quad [16]$$

1.2 Ermittlung der Drehzahl

Bei Vorgabe von Gesamtschub, Leistung, Durchmesser, Dichte und Schubanteiliziffer lässt sich aus Gleichung 6 die Drehzahl ermitteln durch Umformen in eine quadratische Gleichung:

$$n_{1/2} = -\frac{1}{2} \cdot \left[\frac{b}{a} \cdot \sqrt[3]{\frac{5 \cdot P}{\pi \cdot \rho \cdot D^5}} - \frac{T_\Sigma}{a \cdot \rho \cdot D^4} \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{5 \cdot P}{\pi \cdot \rho \cdot D^5}} \right)^{-1} \right] \pm \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \left[\frac{b}{a} \cdot \sqrt[3]{\frac{5 \cdot P}{\pi \cdot \rho \cdot D^5}} - \frac{T_\Sigma}{a \cdot \rho \cdot D^4} \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{5 \cdot P}{\pi \cdot \rho \cdot D^5}} \right)^{-1} \right]^2 - \frac{c}{a} \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{5 \cdot P}{\pi \cdot \rho \cdot D^5}} \right)^2} \quad [17]$$

$$n_{1/2} = -\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{b}{a} \cdot W - \frac{T_\Sigma}{a \cdot \rho \cdot D^4} \cdot W^{-1} \right) \pm \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \left(\frac{b}{a} \cdot W - \frac{T_\Sigma}{a \cdot \rho \cdot D^4} \cdot W^{-1} \right)^2 - \frac{c}{a} \cdot W^2} \quad [18]$$

1.3 Ermittlung der Leistung

Bei Vorgabe von Gesamtschub, Drehzahl, Durchmesser und Dichte und lässt sich aus Gleichung 6 die Leistung (kubische Gleichung / Casus irreducibilis) ermitteln:

$$0 = a \cdot n \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{5 \cdot P}{\pi \cdot \rho \cdot D^5}} \right)^1 + b \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{5 \cdot P}{\pi \cdot \rho \cdot D^5}} \right)^2 + \frac{c}{n} \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{5 \cdot P}{\pi \cdot \rho \cdot D^5}} \right)^3 - \frac{T_\Sigma}{\rho \cdot D^4} \quad [19]$$

$$0 = a \cdot n \cdot W^1 + b \cdot W^2 + \frac{c}{n} \cdot W^3 - \frac{T_\Sigma}{\rho \cdot D^4}$$

$$0 = \left(\sqrt[3]{\frac{5 \cdot P}{\pi \cdot \rho \cdot D^5}} \right)^3 + \frac{b \cdot n}{c} \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{5 \cdot P}{\pi \cdot \rho \cdot D^5}} \right)^2 + \frac{a}{c} \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{5 \cdot P}{\pi \cdot \rho \cdot D^5}} \right)^1 - \frac{T_\Sigma \cdot n}{c \cdot \rho \cdot D^4}$$

$$0 = W^3 + \frac{b \cdot n}{c} \cdot W^2 + \frac{a}{c} \cdot W^1 - \frac{T_\Sigma \cdot n}{c \cdot \rho \cdot D^4}$$

$$P = \frac{\pi \cdot \rho \cdot D^5}{5} \cdot \left\{ -\frac{b \cdot n}{3 \cdot c} + 2 \cdot \sqrt{\frac{b^2 \cdot n^2}{9 \cdot c^2} - \frac{a \cdot n^2}{3 \cdot c}} \cdot \cos \left[\frac{4 \cdot \pi}{3} + \frac{1}{3} \cdot \arccos \left(\frac{\frac{T_\Sigma \cdot n}{2 \cdot c \cdot \rho \cdot D^4} + \frac{a \cdot b \cdot n^3}{6 \cdot c^2} + \frac{b^3 \cdot n^3}{27 \cdot c^3}}{\sqrt{\left(\frac{b^2 \cdot n^2}{9 \cdot c^2} - \frac{a \cdot n^2}{3 \cdot c} \right)^3}} \right) \right] \right\}^3 \quad [20]$$

1.4 Ermittlung der optimalen Drehzahl

Bei Vorgabe von Leistung, Durchmesser und Dichte wird der Gesamtschub maximal für die Drehzahl n_{opt} .

$$\frac{dT_\Sigma}{dn} = 0 = a \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{5 \cdot P}{\pi \cdot \rho \cdot D^5}} \right)^1 - \frac{c}{n^2} \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{5 \cdot P}{\pi \cdot \rho \cdot D^5}} \right)^3 = a \cdot W^1 - \frac{c}{n^2} \cdot W^3 \quad [21]$$

$$n_{opt} = \sqrt[2]{\frac{c}{a}} \cdot \sqrt[3]{\frac{5 \cdot P}{\pi \cdot \rho \cdot D^5}} = \sqrt[2]{\frac{c}{a}} \cdot W \quad [22]$$

1.5 Ermittlung des maximal möglichen Schubes

Durch Einsetzen der optimalen Drehzahl n_{opt} in Gleichung 6 ergibt sich der maximal mögliche Gesamtschub bei Vorgabe von Leistung, Durchmesser, Dichte und Schubanteilsziffer:

$$T_{\Sigma/\max} = \rho \cdot D^4 \cdot (b - 2 \cdot \sqrt[2]{a \cdot c}) \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{5 \cdot P}{\pi \cdot \rho \cdot D^5}} \right)^2 = \rho \cdot D^4 \cdot (b - 2 \cdot \sqrt[2]{a \cdot c}) \cdot W^2 \quad [23]$$

1.6 Ermittlung der minimal erforderlichen Leistung bei optimaler Drehzahl

Durch Einsetzen der optimalen Drehzahl n_{opt} in Gleichung 6 bei Vorgabe von Gesamtschub, Durchmesser, Dichte und Schubanteilsziffer ergibt sich die erforderliche minimale Leistung:

$$P_{min} = \frac{\pi \cdot \rho}{5 \cdot D} \cdot \left(\frac{T_\Sigma}{\rho \cdot (b - 2 \cdot \sqrt[2]{a \cdot c})} \right)^{\frac{3}{2}} \quad [24]$$

1.7 Ermittlung des minimal erforderlichen Durchmesser

Durch Einsetzen der optimalen Drehzahl n_{opt} in Gleichung 6 bei Vorgabe von Leistung, Gesamtschub, Dichte und Schubanteilsziffer ergibt sich ein erforderlicher minimaler Durchmesser:

$$D_{min} = \frac{\pi \cdot \rho}{5 \cdot P} \cdot \left(\frac{T_\Sigma}{\rho \cdot (b - 2 \cdot \sqrt[2]{a \cdot c})} \right)^{\frac{3}{2}} \quad [25]$$

1.8 Restriktion - Plausibilitätsprüfung

Ein technisch-physikalisch sinnvolles Ergebnis wird nur erreicht, wenn das Schub-Leistungsverhältnis nicht überschritten wird:

$$\begin{aligned} \frac{T_\Sigma}{P} &\leq \left(\frac{T_\Sigma}{P} \right)_{\max} = (b - 2 \cdot \sqrt[2]{a \cdot c}) \cdot \frac{\rho \cdot D^4}{P} \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{5 \cdot P}{\pi \cdot \rho \cdot D^5}} \right)^2 \\ \frac{T_\Sigma}{P} &\leq \left(\frac{T_\Sigma}{P} \right)_{\max} = (b - 2 \cdot \sqrt[2]{a \cdot c}) \cdot \frac{\rho \cdot D^4}{P} \cdot W^2 \end{aligned} \quad [26]$$

oder
$$\frac{T_\Sigma}{P} \leq \left(\frac{T_\Sigma}{P} \right)_{\max} = \frac{5 \cdot D}{\pi} \cdot \sqrt[2]{\frac{\rho}{T_\Sigma}} \cdot (b - 2 \cdot \sqrt[2]{a \cdot c})^{3/2}$$

1.9 Ermittlung Schubanteilsziffer aus den Werten der Schubmessung


Sind aus der Schubmessung Gesamtschub, Leistung, Drehzahl, Durchmesser, Dichte bekannt, kann die Schubanteilsziffer, die die Einbaubedingungen widerspiegelt, ermittelt werden:

$$a = a_1 \cdot \tau^{-2} + a_2 \cdot \tau^{-1} + a_3, \quad b = b_1 \cdot \tau^{-2} + b_2 \cdot \tau^{-1} + b_3, \quad c = \text{const} \quad [9], [10], [11]$$

$$\frac{T_\Sigma}{\rho \cdot D^4} = (a_1 \cdot \tau^{-2} + a_2 \cdot \tau^{-1} + a_3) \cdot n \cdot W + (b_1 \cdot \tau^{-2} + b_2 \cdot \tau^{-1} + b_3) \cdot W^2 + \frac{c}{n} \cdot W^3 \quad [27]$$

$$\frac{1}{\tau} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{a_2 \cdot n \cdot W + b_2 \cdot W^2}{a_1 \cdot n \cdot W + b_1 \cdot W^2} \pm \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \left(\frac{a_2 \cdot n \cdot W + b_2 \cdot W^2}{a_1 \cdot n \cdot W + b_1 \cdot W^2} \right)^2 - \frac{a_3 \cdot n \cdot W + b_3 \cdot W^2 + \frac{c}{n} \cdot W^3 - \frac{T_\Sigma}{\rho \cdot D^4}}{a_1 \cdot n \cdot W + b_1 \cdot W^2}} \leq 2 \quad [28]$$

1.10 Beispiele

<p>Daten eines Querstrahlruders mit CP-Propeller *) Daten (Nennbedingungen bei Volllast) $P = 35000 \text{ W}$, $T_{\Sigma} = 5870 \text{ N}$, $D = 0,591 \text{ m}$, $\tau = 0,8$, $n = 720 \text{ min}^{-1} = 12 \text{ s}^{-1}$, $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$</p>
<p>Zwischen- und Kontrollgrößen</p> $W = \sqrt[3]{\frac{5 \cdot P}{\pi \cdot \rho \cdot D^5}} = \sqrt[3]{\frac{5 \cdot 35000}{\pi \cdot 1025 \cdot 0,591^5}} = 9,1007$ $a = a_1 \cdot \tau^{-2} + a_2 \cdot \tau^{-1} + a_3 = -0,0263 \cdot \tau^{-2} + 0,0218 \cdot \tau^{-1} - 0,5555 = -0,56934$ $b = b_1 \cdot \tau^{-2} + b_2 \cdot \tau^{-1} + b_3 = -0,0589 \cdot \tau^{-2} + 0,5258 \cdot \tau^{-1} + 1,4052 = +1,97042$ $c = -0,8610$ $\left((b - 2 \cdot \sqrt[2]{a \cdot c}) = 1,97402 - 2 \cdot \sqrt[2]{0,56934 \cdot 0,8610} \right) = 0,57373$
<p>Prüfen, ob Daten technisch-physikalisch sinnvoll sind (Plausibilitätsprüfung)</p> $\frac{T_{\Sigma}}{P} \leq \left(\frac{T_{\Sigma}}{P} \right)_{\max} = (b - 2 \cdot \sqrt[2]{a \cdot c}) \cdot \frac{\rho \cdot D^4}{P} \cdot W^2$ $\frac{T_{\Sigma}}{P} = 0,1677 \leq \left(\frac{T_{\Sigma}}{P} \right)_{\max} = 0,57373 \cdot \frac{1025 \cdot 0,591^4}{35000} \cdot W^2 = 0,1698 \frac{\text{N}}{\text{W}}$
<p>Ermittlung des Schubes (gegeben: P, D, n, τ, ρ)</p> $T_{\Sigma} = \rho \cdot D^4 \cdot \left[a \cdot n \cdot W^1 + b \cdot W^2 + \frac{c}{n} \cdot W^3 \right]$ $T_{\Sigma} = 1025 \cdot 0,591^4 \cdot \left[-0,56934 \cdot 12 \cdot 9,1007^1 + 1,97042 \cdot 9,1007^2 - \frac{0,8610}{12} \cdot 9,1007^3 \right] = \mathbf{5869,4 \text{ N}}$
<p>Ermittlung der Drehzahl (gegeben: $T_{\Sigma}, P, D, \tau, \rho$)</p> $n_{1/2} = -\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{b}{a} \cdot W - \frac{T_{\Sigma}}{a \cdot \rho \cdot D^4} W^{-1} \right) \pm \sqrt[2]{\frac{1}{4} \cdot \left(\frac{b}{a} \cdot W - \frac{T_{\Sigma}}{a \cdot \rho \cdot D^4} W^{-1} \right)^2 - \frac{c}{a} \cdot W^2}$ $n_{1/2} = -\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1,97042}{-0,56934} \cdot 9,1007 - \frac{5870}{-0,56934 \cdot 1025 \cdot 0,591^4} W^{-1} \right) \pm \sqrt[2]{\frac{1}{4} \cdot \left(\frac{1,97042}{-0,56934} \cdot 9,1007 - \frac{5870}{-0,56934 \cdot 1025 \cdot 0,591^4} W^{-1} \right)^2 - \frac{-0,8610}{-0,56934} \cdot 9,1007^2}$ <p>$n_1 = n_{\min} = 10,44 \text{ s}^{-1} = 626,4 \text{ min}^{-1}$ $n_2 = n_{\max} = 11,996 \text{ s}^{-1} = \mathbf{719,8 \text{ min}^{-1}}$</p>
<p>Ermittlung der Leistung (gegeben: $T_{\Sigma}, D, n, \tau, \rho$)</p> $P = \frac{\pi \cdot \rho \cdot D^5}{5} \cdot \left\{ \frac{b \cdot n}{3 \cdot c} + 2 \cdot \sqrt[2]{\frac{b^2 \cdot n^2}{9 \cdot c^2} - \frac{a \cdot n^2}{3 \cdot c}} \cdot \cos \left[\frac{4 \cdot \pi}{3} + \frac{1}{3} \cdot \arccos \left(\frac{\frac{T_{\Sigma} \cdot n}{2 \cdot c \cdot \rho \cdot D^4} + \frac{a \cdot b \cdot n^3}{6 \cdot c^2} - \frac{b^3 \cdot n^3}{27 \cdot c^3}}{\sqrt[2]{\left(\frac{b^2 \cdot n^2}{9 \cdot c^2} - \frac{a \cdot n^2}{3 \cdot c} \right)^3}} \right) \right] \right\}^3 = \mathbf{35.000 \text{ W}}$ $P = \frac{\pi \cdot 1025 \cdot 0,591^5}{5} \cdot \left\{ \frac{1,97042 \cdot 12}{3 \cdot 0,8610} + 2 \cdot \sqrt[2]{\frac{1,97042^2 \cdot 12^2}{9 \cdot 0,8610^2} - \frac{0,56934 \cdot 12^2}{3 \cdot 0,8610}} \cdot \cos \left[\frac{4 \cdot \pi}{3} + \frac{1}{3} \cdot \arccos \left(\frac{\frac{5869,4 \cdot 12}{2 \cdot 0,8610 \cdot 1025 \cdot 0,591^4} - \frac{0,56934 \cdot 1,97042 \cdot 12^3}{6 \cdot 0,8610} + \frac{1,97042^3 \cdot 12^3}{27 \cdot 0,8610^3}}{\sqrt[2]{\left(\frac{1,97042^2 \cdot 12^2}{9 \cdot 0,8610^2} - \frac{0,56934 \cdot 12^2}{3 \cdot 0,8610} \right)^3}} \right) \right] \right\}^3$ $P = 46,434539 \cdot \left\{ 9,1540999 + 14,4301598 \cdot \cos \left[\frac{4 \cdot \pi}{3} + \frac{1}{3} \cdot \arccos \left(\frac{-327,09056 - 435,829566 + 767,09109}{379,25405} \right) \right] \right\}^3 = \mathbf{35.000 \text{ W}}$
<p>Ermittlung der optimalen Drehzahl (gegeben: $P, T_{\Sigma}, D, \tau, \rho$)</p> $n_{\text{opt}} = \sqrt[2]{\frac{c}{a}} \cdot W = \sqrt[2]{\frac{0,8610}{0,56934}} \cdot 9,1007 = 11,19 \text{ s}^{-1} = \mathbf{671,5 \text{ min}^{-1}}$
<p>Ermittlung des maximal möglichen Schubes (gegeben: $P, D, n_{\text{opt}}, \tau, \rho$)</p> $T_{\Sigma/\max} = \rho \cdot D^4 \cdot (b - 2 \cdot \sqrt[2]{a \cdot c}) \cdot W^2 = 1025 \cdot 0,591^4 \cdot 0,57373 \cdot 9,1007^2 = \mathbf{5.905 \text{ N}}$
<p>Ermittlung der minimal erforderlichen Leistung (gegeben: $T_{\Sigma}, n_{\text{opt}}, D, \tau, \rho$)</p> $P_{\min} = \frac{\pi \cdot \rho}{5 \cdot D} \cdot \left(\frac{T_{\Sigma}}{\rho \cdot (b - 2 \cdot \sqrt[2]{a \cdot c})} \right)^{\frac{3}{2}} = \frac{\pi \cdot 1025}{5 \cdot 0,591} \cdot \left(\frac{5870}{1025 \cdot 0,57373} \right)^{\frac{3}{2}} = \mathbf{34.366 \text{ W}}$
<p>Ermittlung des minimal erforderlichen Durchmessers (gegeben: $P, T_{\Sigma}, n_{\text{opt}}, \tau, \rho$)</p> $D_{\min} = \frac{\pi \cdot \rho}{5 \cdot P} \cdot \left(\frac{T_{\Sigma}}{\rho \cdot (b - 2 \cdot \sqrt[2]{a \cdot c})} \right)^{\frac{3}{2}} = \frac{\pi \cdot 1025}{5 \cdot 35000} \cdot \left(\frac{5870}{1025 \cdot 0,57373} \right)^{\frac{3}{2}} = \mathbf{0,580 \text{ m}}$
<p>*) Projekt der  für ein Minensuch- und -räumboot</p>

Die Beispiele zeigen, dass mit relativ einfachen Mitteln die Möglichkeit gegeben ist, eine Querstrahlruderanlage einschließlich der Einbaubedingungen zu konzipieren, dimensionieren, optimieren bzw. einzuschätzen. Die Kenntnis bzw. die Vorgabe von Ausführung und Einbaubedingungen, d.h. die Kenntnis der Schubanteilsziffer, ist dafür eine wesentliche

Voraussetzung. Für den häufigen Gebrauch ist eine Programmierung auf einfachem Wege (EXCEL) möglich.

2. Der Einfluss von Ausführung und Einbaubedingungen einer Querschubanlage auf Umsetzung von Leistung in Schub

Ausführung und Einbaubedingungen werden mit Hilfe der Schubanteilsziffer τ /1/, /2/, /3/, /4/, /5/, /6/ erfasst, wobei τ das Verhältnis von Propellerschub zu Gesamtschub ist:

$$\tau = \frac{T}{T_{\Sigma}} = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{1}{1 - \left(\frac{d_T}{D_K}\right)^2} + \left(1 - \left(\frac{d_T}{D_K}\right)^2\right) \cdot \Sigma \zeta \right] \geq \frac{1}{2} \quad [28]$$

Der Gesamtverlust $\Sigma \zeta$ ist die Summe der Einzelverluste.

$$\Sigma \zeta = \zeta_{\beta} + \zeta_E + \zeta_{2G} + \zeta_K \quad [29]$$

In Ergänzung zu den folgenden Ausführungen sind im Bild 1 die verwendeten geometrischen Größen dargestellt. Im Bild 3 werden Richtwerte für den Einbau und die Ausführung von Querstrahlanlagen gegeben /1/, /5/, /6/.

2.1 Verlust durch die Bordwandschräge ζ_{β}

Die Neigung der Bordwand, die Bordwandschräge β , wirkt sich negativ auf die Zuströmung aus. Die Bordwandschräge wird für die Kanalmittellinie aus der Neigung der Wasserlinie (horizontaler Schnitt) α und der Neigung der Spantlinie (vertikaler Schnitt) γ ermittelt. Der Verlust ermittelt sich dann aus:

$$\zeta_{\beta} = 0,3 \cdot \cos \beta + 0,2 \cdot \cos^2 \beta \quad [30]$$

$$\text{mit } \beta = \arctan \frac{\tan \alpha \cdot \tan \gamma}{\sqrt{\tan^2 \alpha + \tan^2 \gamma}} = \arctan \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\tan^2 \alpha} + \frac{1}{\tan^2 \gamma}}} \quad [31]$$

2.2 Eintrittsverlust (Übergang von Außenhaut zu Kanal/Tunnel)

$$\text{Für Rundungen: } \zeta_E = 0,5 \cdot e^{-16,1 \cdot (r_E/D_K)} \quad [32]$$

$$\text{Für } 45^\circ\text{-Konus: } \zeta_E = 0,35 \cdot e^{-12,5 \cdot (k_E/D_K)} + 0,15 \quad [33]$$

2.3 Verlust durch Schutzgitter

$$\zeta_{2G} = 2 \cdot \left(\frac{4 \cdot \frac{A_G}{\pi \cdot D_K^2}}{1 - 4 \cdot \frac{A_G}{\pi \cdot D_K^2}} \right)^2 \quad [34]$$

2.4. Verlust durch Reibung

$$\zeta_K = \lambda \cdot \frac{L_K}{D_K} \cdot \left[1 + \frac{L_G}{L_K} \cdot \frac{\frac{d_G}{D_K}}{1 - \frac{d_G}{D_K}} \right] \quad [35]$$

$$\text{mit } \lambda = [1,14 - 2 \cdot \lg(O_F/D_K)]^{-2} \quad [36]$$

2.5 Weitere Verluste

Weitere mögliche Verluste, wie sie z. B. entstehen aus Querschnittsänderungen, Krümmungen, Knicken in der Kanalführung entstehen, können auf der Grundlage der in der Literatur hinreichend beschriebenen Strömungsverluste in Rohrleitungen ermittelt werden.

Das Nabantotwasser kann näherungsweise erfasst werden durch

$$d_T/D_K \approx 0,5 \cdot d_G/D_K \quad [37]$$

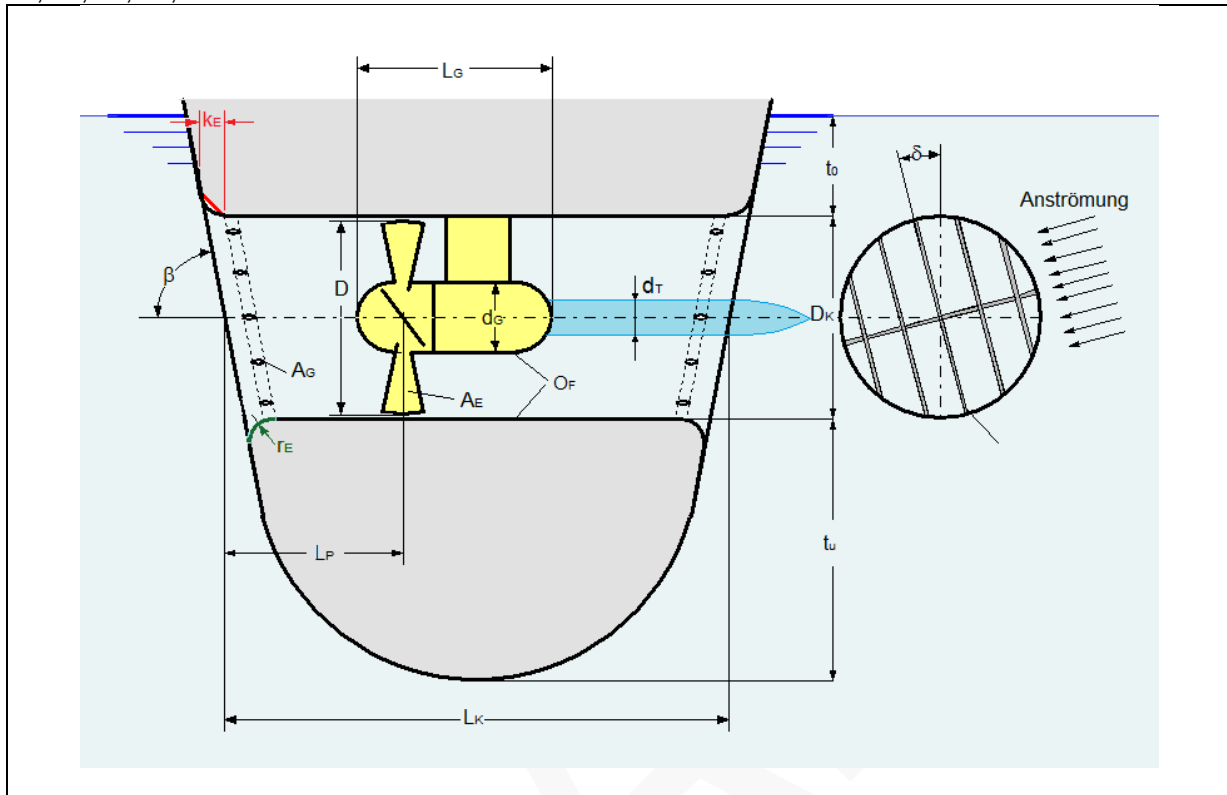
Bei der Umsetzung der Motorleistung P_M in die vom Propeller aufgenommene Leistung P durch das die Drehzahl anpassende Getriebe ist mit einem Leistungsverlust verbunden:

$$\eta = \frac{P}{P_M} \approx 0,95$$

[38]

3. Richtwerte für die Auslegung von Querschubanlagen mit Propeller

Im folgenden Bild werden Richtwerte für die Ausführung und Einbau von Querschubanlagen gegeben /3/, /5/, /6/, /7/, /8/, /9/.



	Propeller- durchmesser	Kanallänge	Propellerabstand	Getriebegondellänge	Gondeldurchmesser
	D [m]	L _K [m]	L _P [m]	L _G [m]	d _G [m]
Richtwert	(0,985...0,990) · D _K	-	L _P > D _K	(0,8...1,2) · D _K	d _G < 0,42 · D _K
optimal	-	(2...3) · D _K	(1,5...2) · D _K	-	-
	Tauchtiefe der Kanaloberkante		Abstand der Kanalunterkante		Propellerflächenverhältnis
	t _o [m]		t _u [m]		A _E /A ₀ [-]
Richtwert	D – klein, P - groß t _o ≥ 0,4 · D _K	D – groß, P - klein t _o ≥ 0,3 · D _K	L _K = (1... 3) · D _K t _u > 0,5 · D _K	L _K > 3 · D _K t _u ≥ 0,2 · D _K	0,45...0,65
	t _o ≥ 0,35 · D _K				
	Drehzahl (Schub ⇒ max.)		Vermeidung von Kavitation Umfangsgeschwindigkeit		
	n [s ⁻¹]		π · D · n < (30 ... 35) $\frac{m}{s}$		
optimal	n = (1,4 ... 1,5) · $\sqrt[3]{P/(\rho \cdot D^5)}$				
	Bordwandneigung	Gitterverdeckungsgrad	Gitterwinkel	Gitterausführung	
	β [°]	A _G /A _K [-]	δ [°]		
Richtwert	-	0,10...0,15	~ 15°		
optimal	90°	-	senkrecht zur Anströmung	- elliptischer Querschnitt 0,05 · D _K x 0,01 · D _K - konzentrische Ringe verbessern die Zuströmung zum Propeller	

Bild 3: Richtwerte für den Einbau von Querschubanlagen

4 Kenngrößen und Symbole

Symbol	Dimension	Benennung
A	m^2	Fläche
A_0	m^2	Propellerfläche (Kreisfläche)
A_E	m^2	Projizierte Propellerflügelfläche
A_E/A_0	m^2	Flächenverhältnis des Propellers
A_K	m^2	Querschnittsfläche des Querkanals
A_G	m^2	Projizierte Gitterquerschnittsfläche
a, a_1, a_2, a_3	-	Koeffizienten zur Bestimmung der Schubanteilziffer
b, b_1, b_2, b_3	-	Koeffizienten zur Bestimmung der Schubanteilziffer
c	-	Koeffizient zur Bestimmung der Schubanteilziffer
C	N	Dynamische Tragzahl für Wälzlager
D	m	Propellerdurchmesser
D_K	m	Kanaldurchmesser (Tunneldurchmesser)
d_G	m	Gondeldurchmesser des Getriebes
d_T	m	Totwasserdurchmesser
d_H	m	Hydraulisch gleichwertiger Durchmesser
F	N	Lagerkraft
I	A	Strom
I_N	A	Nennstrom
K_Q	-	Momentenbeiwert
K_T	-	Schubbeiwert
k_E	m	Einlaufkonustiefe am Querkanal
L_K	m	Kanallänge
L_G	m	Länge der Gondel (Getrieb + Propellernabe)
L_H	h	Lebensdauer von Wälzlagern
m	-	Geschwindigkeitsverhältnis
n	s^{-1}	Drehzahl
P	W	Leistungsaufnahme des Propellers
P_M	W	Leistungsabgabe des Antriebsmotors
p	N/m^2	Druck
O_F	m	Oberflächenrauheit
r_E	m	Einlaufradius am Querkanal
T	N	Propellerschub
T_Σ	N	Gesamtschub der Anlage (Propeller und Querkanal)
v	m/s	Schiffsgeschwindigkeit
v_S	m/s	Strahlgeschwindigkeit
W	s^{-1}	Kennziffer
z	$[-]$	Flügelzahl
α	rad	Spantneigungswinkel
β	rad	Winkel der Bordwandschräge
γ	rad	Wasserlinienneigungswinkel
η	-	Wirkungsgrad des Getriebes (P/P_M)
λ	-	Rohrreibungsbeiwert
ϕ	$[-^\circ]$	Flügelwinkel
ζ_E	-	Verlustbeiwert durch Einlauf
ζ_{2G}	-	Verlustbeiwert durch Gitter
ζ_β	-	Verlustbeiwert durch Bordwandschräge
ζ_K	-	Verlustbeiwert durch Reibung
ϱ	kg/m^3	Dichte des Wassers (1025)
τ	-	Schubanteilziffer (Kanalwirksamkeit)

Indices

- $-P$ Propeller
 $-K$ Kanal (Tunnel)

Weitere Formelzeichen einschließlich Indices ergeben sich aus den speziellen Ausführungen 'vor Ort'

5 Quellenverzeichnis

- /1/ Lebedev: E. P. u. a.: Sredstva aktivnowo upravlenija sudami,
Verlag Sudostroenie, Leningrad 1969, S. 88 – 97
- /2/ Vollheim, R.: Modellversuche zur Entwicklung eines Bugstrahlruders
Schiffbauforschung 18 1/2/1979
- /3/ Pieper, W.: Zur Auslegung von Querstrahlsteuern,
Schiff und Hafen/Kommandobrücke, H. 4/1980, 32. Jg. S. 90 - 100
- /4/ Bohl, w.: Technische Strömungslehre,
VEB Fachbuchverlag Leipzig, 6. Auflage 1984
- /5/ Wagner, K.: Diagramm zur Bestimmung des Spezifikationsschubes von DMR-
Querstrahlrudern Typ QRV,
Dieselmotorenwerk Rostock, Skizzen-Nr. 90.000-1119
- /6/ Wagner, K. Vorläufige Methode zur Abschätzung der Kanalwirksamkeit,
Anhang zum Bericht Sach-Nr. 90.000-2177,
Dieselmotorenwerk Rostock
- /8/ Wagner, K. Grenzlinie für Luftenbruch nach Form 2 bei Querstrahlrudern,
Skizzen-Nr. 90.000-1136
- /7/ Jastram, P.: Einige praktische Hinweise zum Einbau von Bugstrahlrudern,
Hansa-Schiffahrt-Schiffbau-Hafen, 116. Jg. 1979 - Nr. 20
- /8/ Brix, J.: Strahlsteuer,
Handbuch der Werften, Bd. XVIII
Schiffahrtsverlag „Hansa“, Hamburg, 1986
- /9/ Brix, J.: Manoeuvring Technical Manual,
Schiff und Hafen / Kommandobrücke, H. 5, 7, 9, 10, 11 / 1987
- /10/ Truckenbrodt, E. Strömungsmechanik,
Springerverlag, Berlin/Heidelberg/New York, 1968, S 198 -100
- / 11/ Wagner, K. Steigungswinkelabhängigkeit der Flügeltorsionsmomente von QRV,
Mitteilung EVH1 an EVE3, 29.04.85
Steigungswinkelabhängigkeit des Schubes und der
Leistungsaufnahme von QRV,
Mitteilung EVH1 an EVE3, 05.06.86
Anfrage WW über Querschubabfall bei QRV 200 auf Äquator
Mitteilung EVH1 an EVE3, 30.04.87
- /12/ Brix, J.: Modellversuche mit der SCHOTTEL-Querstrahlanlage S500L
365. Mitteilung der HSVA GmbH in Zusammenarbeit mit der
SCHOTTEL-Werft, Josef Becker GmbH
- /13/ Nikolaev E.P., Persic R. Ja., Rusekij A.A., Zentrales Wissenschaftliches
Forschungsinstitut „Akademi Krylow“, Einige Fragen der
Steuerbarkeit von Schiffen mit Querstrahlruder“

- /14/ Beyer, R.: Querstrahlsteuer bei extremen Einsatzbedingungen im Eis und neu entwickelter Geräuschdämpfung
 Schiff und Hafen / Kommandobrücke, H. 10 / 1987, 30. Jg.
- /15/ Gleß, B. / Kowalewski, K.: Erhöhung des Gebrauchswertes von Querstrahlsteueranlagen
 Seewirtschaft 13 10 / 1981

Anlage 1: Schubanteilziffer τ (Zusammenfassung)

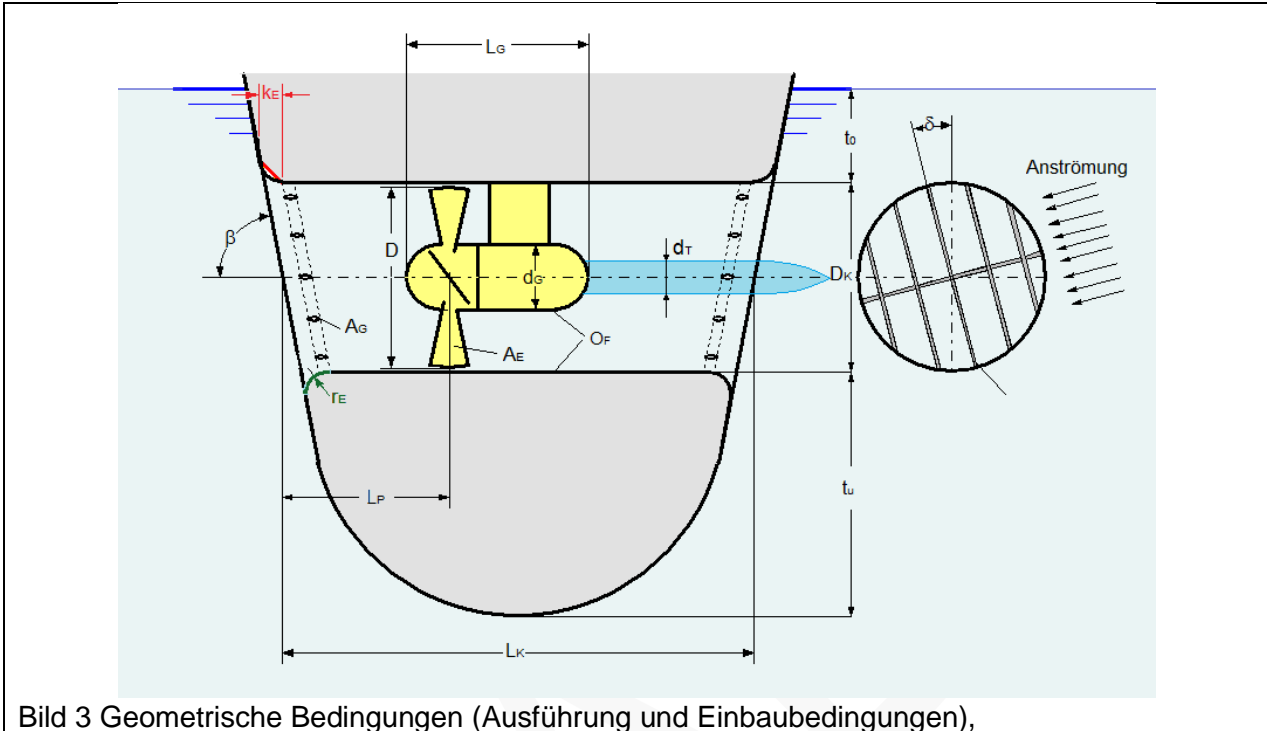


Bild 3 Geometrische Bedingungen (Ausführung und Einbaubedingungen),

Schubanteilziffer

$$\tau = \frac{T}{T_{\Sigma}} = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{1}{1 - \left(\frac{d_T}{D_K}\right)^2} + \left(1 - \left(\frac{d_T}{D_K}\right)^2\right) \cdot \Sigma \zeta \right]$$

Propellerschub:

$$T = (p_2 - p_1) \cdot \pi \cdot \frac{D_K^2}{4}$$

Gesamtschub:

$$T_{\Sigma} = \frac{T}{\tau}$$

Nabentotwasser:

$$\frac{d_T}{D_K} \approx 0,5 \cdot \frac{d_G}{D_K}$$

Verlustbeiwert:

$$\zeta = \zeta_E + \zeta_{2G} + \zeta_{\beta} + \zeta_K$$

Eintrittsverlust

für gerundeten Einlauf:

$$\zeta_E = 0,5 \cdot e^{-16,1 \left(\frac{r_E}{D_K}\right)}$$

für konischer Einlauf:

$$\zeta_E = 0,35 \cdot e^{-12,5 \left(\frac{k_E}{D_K}\right)} + 0,15$$

Verlust durch Eintrittsgitter:

$$\zeta_{2G} = 2 \cdot \left(\frac{A_G / \left(\frac{\pi D_K^2}{4}\right)}{1 - A_G / \left(\frac{\pi D_K^2}{4}\right)} \right)^2$$

Verlust durch Bordwandschräge:

$$\zeta_{\beta} = 0,3 \cdot \cos \beta + 0,2 \cdot \cos^2 \beta$$

$$\beta = \arctan \frac{\tan \alpha \cdot \tan \gamma}{\sqrt{\tan^2 \alpha + \tan^2 \gamma}} = \arctan \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\tan^2 \alpha} + \frac{1}{\tan^2 \gamma}}}$$

α – Spantneigungswinkel

γ – Wasserlinienneigungswinkel

α oder $\gamma = 90^\circ$, dann $\beta = \gamma$ bzw. α

Verlust durch Wandreibung:

$$\zeta_K = \lambda \cdot \left(1 + \frac{L_G}{L_K}\right) \cdot \frac{L_K}{D_K}$$

$$\lambda = \left(1,14 - 2 \cdot \log \frac{O_F}{D_K}\right)^{-2}$$

O_F : Rauheit ($\approx 0,2\text{mm} = 2 \cdot 10^{-4}\text{m}$)

Beispiel							
$\frac{d_G}{D_K} = 0,35$	$\frac{r_e}{D_K} = 0,1$	$\alpha = 75^\circ$ $\gamma = 90^\circ$	$\frac{A_G}{A_K} = 0,125$	$\frac{O_F}{D_K} = 1,25 \cdot 10^{-4}$	$\frac{L_G}{L_K} = 0,42$	$\frac{L_K}{D_K} = 2,4$	$\frac{d_T}{D_K} = 0,175$
	$\zeta_E = 0,100$	$\zeta_B = 0,091$	$\zeta_{2G} = 0,041$	$\zeta_K = 0,043$	$\zeta_K = 0,043$	$\Sigma \zeta = 0,275$	$\tau = 0,649$

Anlage 2: Zur Abschätzung der Verluste durch Wandreibung und Einlauf

1 Zur Abschätzung der Verluste durch Wandreibung

Lit.: Bohl, W. Technische Strömungslehre, VEB Verlag Technik, Leipzig, 6. Auflage, S. 100 -108 /4/

Widerstandsbeiwert	$\zeta = \lambda \cdot \frac{L}{d_h} [-]$	
Rohrreibungszahl	$\lambda [-]$	
Rohrlänge	$L [-]$	
hydraulisch gleichwertiger Durchmesser	$d_h = 4 \cdot \frac{A}{U} [m]$	
Flüssigkeitsquerschnitt benetzter Umfang	$A [m^2]$ $U [m]$	

$\lambda = \left(1,14 + 2 \cdot \log \frac{D_K}{O_F}\right)^{-2} = \left(1,14 - 2 \cdot \log \frac{O_F}{D_K}\right)^{-2}$ nach Nikuradse $L_1 = L_K - L_G, \quad d_{h1} = D_K$ im Bereich ohne Gondel $L_2 = L_G, \quad d_{h2} = \frac{D_K^2 - d_G^2}{D_K + d_G}$ im Bereich mit Gondel	
$\zeta_K = \lambda \cdot \left(\frac{L_1}{d_{h1}} + \frac{L_2}{d_{h2}}\right) = \lambda \cdot \left(\frac{L_K - L_G}{D_K} + \frac{L_G \cdot (D_K + d_G)}{(D_K^2 - d_G^2)}\right) = \lambda \cdot \frac{L_K}{D_K} \cdot \left[1 - \frac{L_G}{L_K} + \frac{L_G}{L_K} \cdot \frac{\left(1 + \frac{d_G}{D_K}\right)}{\left(1 - \frac{d_G^2}{D_K^2}\right)}\right]$	
mit $\left(1 - \frac{d_G^2}{D_K^2}\right) \Rightarrow 1$ mit $\left(\frac{d_G}{D_K}\right)_{max} \Rightarrow 1$	$= \lambda \cdot \frac{L_K}{D_K} \cdot \left[1 - \frac{L_G}{L_K} + 2 \cdot \frac{L_G}{L_K}\right]$ $= \lambda \cdot \frac{L_K}{D_K} \cdot \left[1 + \frac{L_G}{L_K}\right]$
oder ohne weitere Vereinfachungen:	$\zeta_K = \lambda \cdot \frac{L_K}{D_K} \cdot \left[1 + \frac{L_G}{L_K} \cdot \frac{\frac{d_G}{D_K}}{1 - \frac{d_G}{D_K}}\right]$
	<i>gültig für $d_G \leq 0,4 \cdot D_K$</i>

2 Eintrittsverlust für konischen Einlauf 45°

Bekannt: für Konus $\zeta_E(k_E/D_K = 0,1) = 0,25$ Annahme: $k_E/D_K \Rightarrow \infty \quad \zeta_E \Rightarrow 0,15$ scharfkantig: $k_E/D_K \Rightarrow 0 \quad \zeta_E \Rightarrow 0,5$ $\zeta_E = 0,35 \cdot e^{x \cdot k_E/D_K} + 0,15$ $0,25 = 0,35 \cdot e^{x \cdot 0,1} + 0,15$ $\Rightarrow \zeta_E = 0,35 \cdot e^{-12,5 \cdot k_E/D_K} + 0,15$	
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

3 Winkel der Flächennormalen N zur Bestimmung des Einflusses der Bordwandschräge

$$H = N \cdot \sin\beta ; \quad S_\alpha = H/\tan\alpha ; \quad S_\gamma = H/\tan\gamma$$

$$\tan\beta = \frac{H}{\sqrt{S_\alpha^2 + S_\gamma^2}} = \frac{H}{\sqrt{H^2/\tan^2\alpha + H^2/\tan^2\gamma + \dots}}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{1/\tan^2\alpha + 1/\tan^2\gamma}} = \frac{\tan\alpha \cdot \tan\gamma}{\sqrt{\tan^2\alpha + \tan^2\gamma}}$$

$$\beta = \arctan \frac{1}{\sqrt{1/\tan^2\alpha + 1/\tan^2\gamma}} = \arctan \frac{\tan\alpha \cdot \tan\gamma}{\sqrt{\tan^2\alpha + \tan^2\gamma}}$$

Anlage 3

1 Schubabfall bei Schiffsgeschwindigkeit /11/, /13/

(Reduzierung der Wirksamkeit der Querschubanlage bei Schiffsgeschwindigkeit)

$$T_{\Sigma V} = T_{\Sigma 0} - F_S$$

$$F_S = 1,4 \cdot m \cdot (m + 1)^2 \cdot T_{\Sigma 0} \quad \text{für } 0 \leq m \leq 0,3$$

$$F_S = 0,71 \cdot T_{\Sigma 0} \quad \text{für } m > 0,3$$

$$m = \frac{V}{V_S}$$

$$V_S = \sqrt[2]{\frac{T_{\Sigma 0}}{\rho \cdot \pi \cdot D_K^2 / 4}} \quad \text{aus dem Impulssatz}$$

$T_{\Sigma V}$ - Schub bei Schiffsgeschwindigkeit $V \neq 0$

$T_{\Sigma 0}$ - Schub bei Schiffsgeschwindigkeit $V = 0$

F_S - schubreduzierende Kraft am Schiffskörper bei Schiffsgeschwindigkeit V
(Angriffspunkt liegt ca. $20 \cdot D_K$ hinter Mitte Kanal)

m - Geschwindigkeitsverhältnis

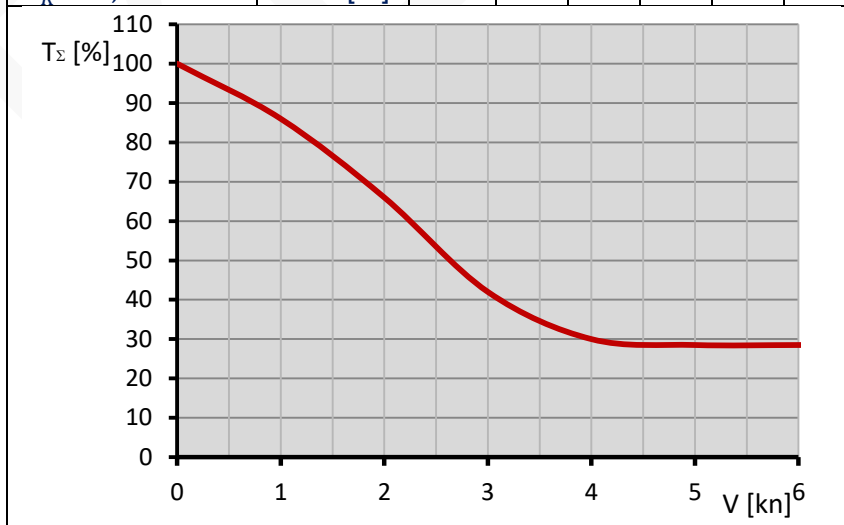
V - Schiffsgeschwindigkeit

V_S - Strahlgeschwindigkeit

D_K - Kanaldurchmesser (Tunneldurchmesser)

ρ - Dichte des Wassers

Beispiel:	$T_{\Sigma 0} = 112 \text{ kN}$	$V \text{ [kn]}$	0	1	2	3	4	5
	$\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$	$T_\Sigma \text{ [kN]}$	112	96	74	47	32	32
	$D_K = 2,0 \text{ m}$	$T_\Sigma \text{ [%]}$	100	86	66	42	29	29

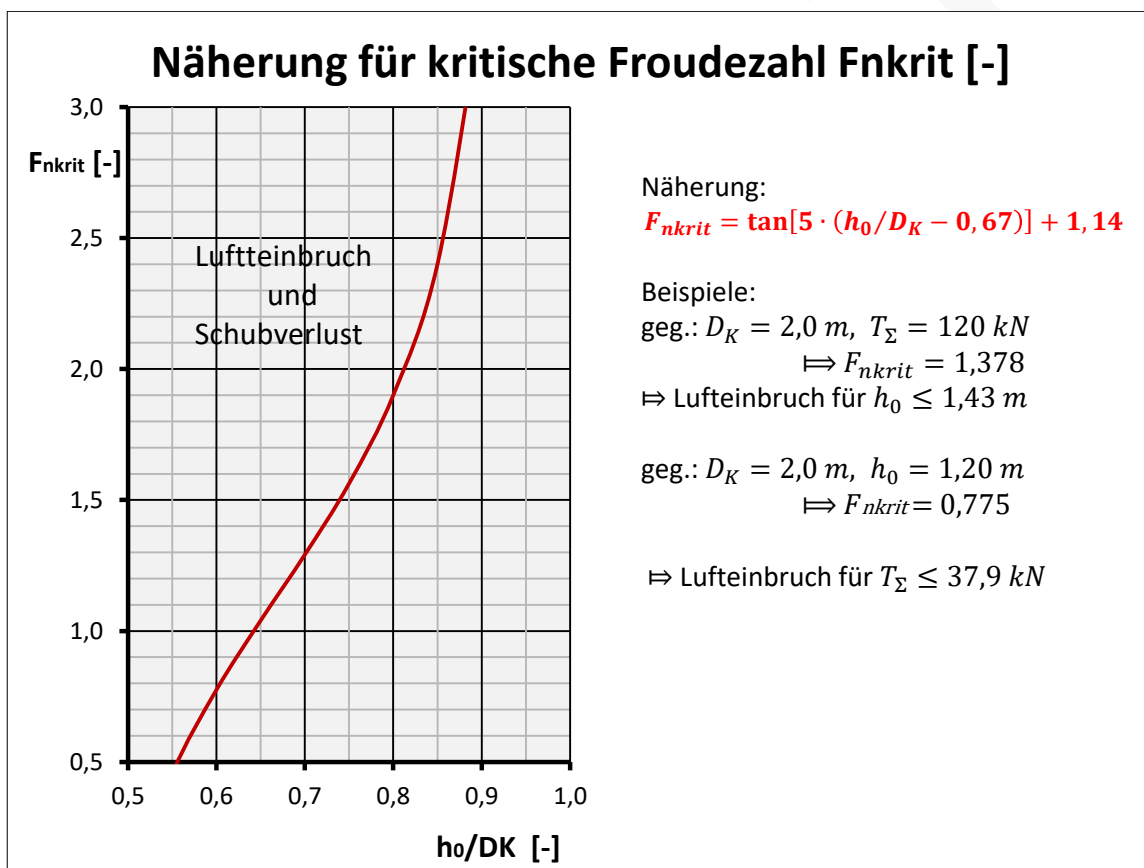


Anlage 4

Grenzlinie für Lufteinbruch bei einer Querschubanlage

Luftansaugen ohne Wirbeltrichter

Nach Artjuškov L.S., u. a, Trudy LKI, Leningrad 1981



Kritische Froudezahl

$$F_{nkrit} = \frac{V_S}{\sqrt{g \cdot D_K}} = \sqrt[2]{\frac{4 \cdot T_\Sigma}{\pi \cdot \rho \cdot g \cdot D_K^3}} \quad [-]$$

Mittlere Geschwindigkeit im Kanal (Tunnel)

$$V_S = \sqrt[2]{\frac{4 \cdot T_\Sigma}{\pi \cdot \rho \cdot D_K^2}} \quad \left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$$

Tauchung bis Mitte Kanal

$$h_0 \quad [\text{m}]$$

Kanaldurchmesser

$$D_K \quad [\text{m}]$$

Gesamt Schub im Stand ($V=0 \text{ m/s}$)

$$T_\Sigma \quad [\text{N}]$$

Erdbeschleunigung

$$g \quad \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right]$$

Dichte des Wassers $\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]$

$$\begin{aligned} \text{Gegeben: } D_K; T_{\Sigma \text{krit}} &\Rightarrow h_{0 \text{krit}} = D_K \cdot \left(\frac{\arctan(F_{n \text{krit}} - 1,14)}{5} + 0,67 \right) \\ D_K; h_0 &\Rightarrow T_{\Sigma \text{krit}} = \frac{\pi \cdot \rho \cdot g \cdot D_K^3}{4} \cdot \{ \tan[5 \cdot (h_0/D_K - 0,67)] + 1,14 \}^2 \end{aligned}$$

Anlage 5

1 Weitere Kenngrößen für Querschubanlagen mit Propeller

Strömungsgeschwindigkeit im Kanal/Tunnel	$V_K \left[\frac{m}{s} \right]$
Strahlimpuls für konstante Strahlgeschwindigkeit	$I = \dot{m} \cdot V_S$
Kraft aus dem Strahlimpuls	$\frac{d(m \cdot V_K)}{dt} = \dot{m} \cdot V_K = \rho \cdot \frac{\pi \cdot D_K^2}{4} \cdot V_K^2 \quad [N]$
Fortschrittsgrad eines Propellers:	$J_K = \frac{V_K}{D \cdot n} \quad [-]$
Schubanteilziffer:	$\tau = \frac{T_P}{T_\Sigma} = \frac{T_P}{\rho \cdot \frac{\pi \cdot D_K^2}{4} \cdot V_K^2} = \frac{4}{\pi} \cdot \left(\frac{D}{D_K} \right)^2 \cdot \frac{K_{TP}}{J^2} \quad [-]$
Propellerschubbeiwert	$K_{TP} = \frac{T_P}{\rho \cdot D^4 \cdot n^2} \quad [-]$
Momentbeiwert des Propellers	$K_Q = \frac{Q}{\rho \cdot D^5 \cdot n^2} = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot D^5 \cdot n^2} \quad [-]$
Propellerwirkungsgrad	$\eta = \frac{J_K}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{K_{TP}}{K_Q} = 2 \cdot \left(\frac{D}{D_K} \right)^2 \cdot \sqrt{\frac{K_{TP}}{\pi \cdot \tau}}$
Güteziffer	$\frac{T_\Sigma}{P_D} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot D \cdot n} \cdot \frac{K_{TP}}{\tau \cdot K_Q}$

2 Kavitationsziffer

Atmosphärischer Druck	$p_{atm} = 101325 \frac{kg}{m \cdot s^2}$
Verdampfungsdruck (temperaturabhängig)	$p_V \approx 1962 \frac{kg}{m \cdot s^2}$
Druck in der Propellerebene	$p_E = p_{atm} + \rho \cdot g \cdot t_o - \frac{T_P}{\frac{\pi \cdot D_K^2}{4}} \left[\frac{kg}{m \cdot s^2} \right]$
Tauchtiefe der Oberkante des Kanals	$t_o \quad [m]$
Tauchtiefe, bei der Kavitation beginnen kann	$t_{okrit} \quad [m]$
Erdbeschleunigung	$g = 9,81 \frac{m}{s^2}$
Kavitationsziffer	$\sigma_n = \frac{p_{atm} + \rho \cdot g \cdot t_o - p_V}{\frac{\rho}{2} \cdot D^2 \cdot n^2} > \sigma_{n \text{krit}} \approx 0$
Kritische Kavitationsziffer	$\begin{aligned} \sigma_{n \text{krit}} &= \sigma_n - \frac{\pi}{8} \cdot \left(\frac{D}{D_K} \right)^2 \cdot K_{TP} \\ &= \frac{p_{atm} + \rho \cdot g \cdot t_{okrit} - p_V}{\frac{\rho}{2} \cdot D^2 \cdot n^2} - \frac{\pi}{8} \cdot \left(\frac{D}{D_K} \right)^2 \cdot K_{TP} \end{aligned}$
Kritische Tauchtiefe (möglicher Kavitationsbeginn)	$t_{okrit} = \frac{\frac{\pi}{8} \left(\frac{D}{D_K} \right)^2 \cdot K_{TP} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot D^2 \cdot n^2 + p_V - p_{atm}}{\rho \cdot g}$

$$\boxed{t_o > t_{okrit}}$$

Flächenverhältnis für minimale Kavitation
für symmetrische Flügel

$$\left(\frac{A_E}{A_0}\right)_{erf} \approx 4,5 \cdot \left(\left(\frac{K}{J_K^2}\right)^{0,8}\right) / \left(\frac{\sigma_{nk}}{J_K^2}\right)$$

3 Einige weitere grobe Abschätzungen für den CP-Propeller

Masse eines Flügels / hersteller- / klasseabhängig. In diesem speziellen Fall ergibt sie sich zu:

Material Ni-Al-Bronze

Flügelmasse (1 von 4):

$$m_{FL} \approx A_E/A_0 \cdot 15,4 \cdot D^3 [kg] \pm 15\%$$

Flügelfußmasse (1 von 4):

$$m_F \approx 4,1 \cdot D^3 [kg] \pm 10\%$$

Flügelgesamtmasse (1 von 4):

$$m \approx m_{FL} + m_F$$

Bsp.: $D = 1,97 \text{ m}$, $A_E/A_0 = 0,55$,

$$m \approx m_{FL} + m_F = 64,8 + 31,3 \approx 96,1 \text{ kg}$$

Flügelwinkel für Nennleistung:

$$\phi_{0,7} \approx \frac{d}{1/\sqrt[3]{10 \cdot K_Q}} + \frac{e}{(1/\sqrt[3]{10 \cdot K_Q})^2} + \frac{f}{1/\sqrt[3]{10 \cdot K_Q}^3} [^\circ]$$

mit:

$$d = -128,672 \cdot \tau^2 + 238,322 \cdot \tau - 102,472$$

$$e = +423,698 \cdot \tau^2 - 802,544 \cdot \tau + 424,418$$

$$f = -329,750 \cdot \tau^2 + 620,775 \cdot \tau - 314,922$$

Beiwert für Flügelträgheitsmoment: $K_{SC} \approx -2,9 \cdot (1 + 12 \cdot (0,5 - \bar{K}_F)^2) \cdot \frac{m_{FL}}{\rho \cdot D^3} \cdot \left(\frac{A_E/A_0}{(1-d_N/D) \cdot z}\right)^2 \cdot \sin|2 \cdot \phi|$

mit $\bar{K}_F = 0 \dots 1,0$, Symmetrie für $\bar{K}_F = 0,5$

Beiwert für hydrodynamisches Verstellmoment

$$K_{SH} \approx 2,5 \cdot (\bar{K}_F - 0,1) \cdot \left(\frac{A_E/A_0}{z}\right)^2 \cdot \sqrt{\phi_{0,7} [^\circ]} \cdot \frac{K_{TP}}{z}$$

Flügelträgheitsmoment

$$Q_{SC} = K_{SC} \cdot \rho \cdot D^5 \cdot n^2$$

Hydrodynamisches Verstellmoment

$$Q_{SH} = K_{SH} \cdot \rho \cdot D^5 \cdot n^2$$

Gesamtverstellmoment

$$Q_S = Q_{SC} + Q_{SH}$$

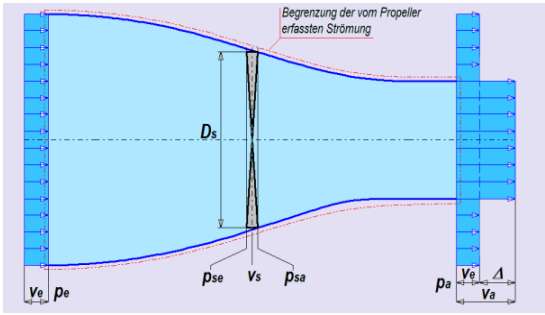
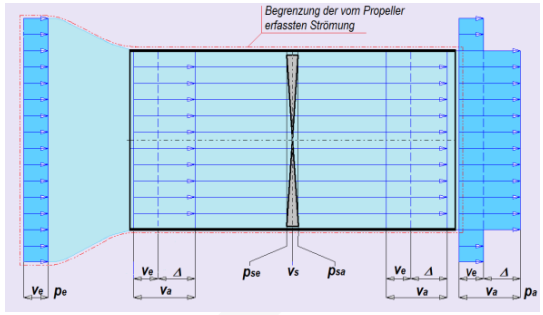
Leerlaufleistung des Propellers

$$P_{00} \approx \left(0,004 \cdot \frac{A_E/A_0}{0,55} + 0,0002\right) \cdot 2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot D^5 \cdot n^3 [W]$$

Man beachte bei Messungen an Bord, dass ein E-motor bei Leerlauf bis zu 30% des Nennstromes aufnehmen kann. Nur wenn eine Kennlinie des Motors vorliegt, ist mit einer Strommessung eine Aussage über das vom Propeller aufgenommene Moment / die aufgenommene Leistung möglich.

http://tu-freiberg.de/fakult4/et/studium/download/V-ProfBeckert-Website/ASM_lbisVIII.pdf - s. 18/19, Bild 19

Anlage 6: Vergleich freier Propeller / ummantelter Propeller - Definition der Schubanteiziffer

00	Strahl im freien Propeller		Strahl im ummantelten Propeller (Rohr)				
01							
02	<p>Annahmen:</p> <ul style="list-style-type: none"> - In der Propellerebene wird Energie zugeführt - Durch diese Energiezufuhr wird ständig Flüssigkeit angesaugt und in einem den Propeller umhüllenden, freien Strahl beschleunigt - Der Propeller ist idealisiert durch eine Scheibe (Flügelzahl $\Rightarrow \infty$) - Vernachlässigung der Drehung des Propellers - Es wird nur die schuberzeugende, axiale Komponente der Strömung betrachtet - Keine Rückwirkungen des Fahrzeuges - Reibungsfreie, inkompressible Strömung - Kontinuitätsgesetz und Impulssatz gelten - Der Volumenstrom des erzeugten Strahls ist konstant 		<p>Annahmen:</p> <ul style="list-style-type: none"> - In der Propellerebene wird Energie zugeführt - Durch diese Energiezufuhr wird ständig Flüssigkeit angesaugt und in einem den Propeller umhüllenden Rohr / Mantel beschleunigt - Der Propeller ist idealisiert durch eine Scheibe (Flügelzahl $\Rightarrow \infty$) - Vernachlässigung der Drehung des Propellers - Es wird nur die schuberzeugende, axiale Komponente der Strömung betrachtet - Keine Rückwirkungen des Fahrzeuges - Reibungsfreie, inkompressible Strömung - Kontinuitätsgesetz und Impulssatz gelten - Der Volumenstrom des erzeugten Strahls ist konstant - Der Spalt zwischen Rohr (Mantel) und Propeller ist vernachlässigbar 				
03	Formelzeichen						
04	A_e [m ²]	Strahlfläche weit vor dem Propeller (Eintritt)	A_s [m ²]	Rohrquerschnittsfläche, Strahlfläche in der Propellerebene			
05	A_s [m ²]	Strahlfläche in der Propellerebene					
06	A_a [m ²]	Strahlfläche weit hinter dem Propeller (Austritt)					
07	Vergleich	$A_e \geq A_s \geq A_a$		$A_s = A_a$			
08	D_s [m]	Strahldurchmesser in der Propellerebene	D_s [m]	Rohrdurchmesser, Strahldurchmesser			
09	T [N] = $\frac{kg \cdot m}{s^2}$	Schubkraft des freien Propellers	T_Σ [N] = $\frac{kg \cdot m}{s^2}$	Schubkraft des ummantelten Propellers			
10	\dot{V} [m ³ /s]	Volumenstrom in Strahl	\dot{V}_Σ [m ³]	Volumenstrom durch das Rohr			
11	v_e [m/s]	Strahlgeschwindigkeit weit vor dem Propeller	v_e [m/s]	Geschwindigkeit vor dem Rohr			
12	v_s [m/s]	Strahlgeschwindigkeit in der Propellerebene	v_s [m/s]	Geschwindigkeit in der Propellerebene			
13	v_a [m/s]	Strahlgeschwindigkeit weit hinter dem Propeller	v_a [m/s]	Geschwindigkeit hinter dem Rohr			
14	p_e [$\frac{N}{m^2}$] = $\frac{kg}{m \cdot s^2}$	Druck weit vor dem Propeller	p_e [$\frac{N}{m^2}$] = $\frac{kg}{m \cdot s^2}$	Druck vor dem Rohr			
15	p_{se} [$\frac{N}{m^2}$] = $\frac{kg}{m \cdot s^2}$	Druck unmittelbar vor dem Propeller	p_{se} [$\frac{N}{m^2}$] = $\frac{kg}{m \cdot s^2}$	Druck unmittelbar vor dem Propeller			
16	p_{sa} [$\frac{N}{m^2}$] = $\frac{kg}{m \cdot s^2}$	Druck unmittelbar hinter dem Propeller	p_{sa} [$\frac{N}{m^2}$] = $\frac{kg}{m \cdot s^2}$	Druck unmittelbar hinter dem Propeller			
17	p_a [$\frac{N}{m^2}$] = $\frac{kg}{m \cdot s^2}$	Druck weit hinter dem Propeller	p_a [$\frac{N}{m^2}$] = $\frac{kg}{m \cdot s^2}$	Druck hinter dem Rohr			
18	vor dem Propeller	$v = v_e$	Vor dem Rohr	$v = v_e$	Kontinuitätsgesetz im freien Strahl (Stromröhre)		
19	in der Propellerebene	$v = v_s$				in der Propellerebene im Rohr	$v = v_s = v_a$
20	hinter dem Propeller	$v = v_a$				hinter dem Rohr	$v = v_a = v_s$
21	$A_e \geq A_s \geq A_a$		$A_s = A_a = \pi \cdot \frac{D_s^2}{4}$				
22	Schubkraft aus der Impulsänderung $T = \rho \cdot \dot{V} \cdot v_a - \rho \cdot \dot{V} \cdot v_e$ $T = \rho \cdot \dot{V} \cdot (v_a - v_e) = \dot{m} \cdot (v_a - v_e)$		Schubkraft aus der Impulsänderung $T_\Sigma = \rho \cdot \dot{V}_\Sigma \cdot v_a - \rho \cdot \dot{V}_\Sigma \cdot v_e$ $T_\Sigma = \rho \cdot \dot{V}_\Sigma \cdot (v_a - v_e) = \dot{m}_\Sigma \cdot (v_a - v_e)$				
23	Volumenstrom durch die Propellerebene		Volumenstrom durch die Propellerebene $\dot{V}_\Sigma = A_s \cdot v_s = A_s \cdot v_a = \pi \cdot \frac{D_s^2}{4} \cdot v_s = \pi \cdot \frac{D_s^2}{4} \cdot v_a$		Siehe Bild u. Z. 20		

	$\dot{V} = A_s \cdot v_s = \pi \cdot \frac{D_s^2}{4} \cdot v_s$		
24	Schub in der Propellerebene $T = \rho \cdot A_s \cdot v_s \cdot (v_a - v_e)$	Schub in der Propellerebene $T_\Sigma = \rho \cdot A_s \cdot v_a \cdot (v_a - v_e)$	
25	Ermittlung von v_s	Infolge der Ummantelung (Rohr) ist: $v_s = v_a$	Siehe Bild u. Z. 20
26	Energiegleichung vor dem Propeller (Bernoulli) $\frac{p_e}{\rho} + \frac{v_e^2}{2} = \frac{p_{se}}{\rho} + \frac{v_s^2}{2}$	Energiegleichung vor dem Propeller (Bernoulli) $\frac{p_e}{\rho} + \frac{v_e^2}{2} = \frac{p_{se}}{\rho} + \frac{v_s^2}{2}$	
27	Energiegleichung hinter dem Propeller (Bernoulli) $\frac{p_a}{\rho} + \frac{v_a^2}{2} = \frac{p_{sa}}{\rho} + \frac{v_s^2}{2}$	Energiegleichung hinter dem Propeller (Bernoulli) $\frac{p_a}{\rho} + \frac{v_a^2}{2} = \frac{p_{sa}}{\rho} + \frac{v_s^2}{2}$	
28	Der Druck weit vor und weit hinter dem Propeller ist gleich $p_a = p_e$ Die Geschwindigkeiten sind unterschiedlich $v_e \leq v_s \leq v_a$	Der Druck vor und hinter dem Rohr ist gleich: $p_a = p_e$ Geschwindigkeit des Strahls im Rohr, vor und hinter dem Propeller sowie in der Propellerebene ist $v_s = v_a$	
29	Durch Subtraktion entsteht $\frac{p_a}{\rho} - \frac{p_e}{\rho} + \frac{v_a^2}{2} - \frac{v_e^2}{2} = \frac{p_{sa}}{\rho} - \frac{p_{se}}{\rho} + \frac{v_s^2}{2} - \frac{v_s^2}{2}$	Durch Subtraktion entsteht $\frac{p_a}{\rho} - \frac{p_e}{\rho} + \frac{v_a^2}{2} - \frac{v_e^2}{2} = \frac{p_{sa}}{\rho} - \frac{p_{se}}{\rho} + \frac{v_s^2}{2} - \frac{v_s^2}{2}$	
30	Der Druckunterschied unmittelbar vor und hinter dem Propeller (idealisierte Scheibe) ist dann $\frac{p_{sa}}{\rho} - \frac{p_{se}}{\rho} = \frac{v_a^2}{2} - \frac{v_e^2}{2}$ $\Delta p = p_{sa} - p_{se} = \frac{\rho}{2} \cdot (v_a^2 - v_e^2)$	Die Druckdifferenz unmittelbar vor und hinter dem Propeller (idealisierte Scheibe) ist dann $\frac{p_{sa}}{\rho} - \frac{p_{se}}{\rho} = \frac{v_a^2}{2} - \frac{v_e^2}{2}$ $\Delta p = p_{sa} - p_{se} = \frac{\rho}{2} \cdot (v_a^2 - v_e^2)$	
31	Der Schub ergibt sich zu $T = \Delta p \cdot A_s = \frac{\rho}{2} \cdot (v_a^2 - v_e^2) \cdot A_s$	Der Schub ergibt sich zu $T_\Sigma = \Delta p \cdot A_s = \frac{\rho}{2} \cdot (v_a^2 - v_e^2) \cdot A_s$	
32	Zusammen mit der aus dem Impulssatz ermittelten Gleichung ergibt sich: $T = \frac{\rho}{2} \cdot (v_a^2 - v_e^2) \cdot A_s = \rho \cdot A_s \cdot v_s \cdot (v_a - v_e)$		
33	und daraus die Strahlgeschwindigkeit im Propeller (Froude) $v_s = \frac{v_a + v_e}{2}$	Infolge der Ummantelung (Rohr) ist die Strahlgeschwindigkeit $v_s = v_a$	Siehe Bild, u. Z. 20, 23
34	$T = \rho \cdot A_s \cdot \frac{v_a + v_e}{2} \cdot (v_a - v_e)$	$T_\Sigma = \rho \cdot A_s \cdot v_s \cdot (v_s - v_e) = \rho \cdot A_s \cdot v_a \cdot (v_a - v_e)$	Siehe Z. 24
35	$v_e = 0$: $T = A_s \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_a^2$	$v_e = 0$: $v_s = v_a \rightarrow T_\Sigma = \rho \cdot A_s \cdot v_a^2$	
36	$\frac{\text{freier Propeller}}{\text{ummantelter Propeller}} = \tau = \frac{T}{T_\Sigma} = \frac{A_s \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_a^2}{A_s \cdot \rho \cdot v_a^2} = \frac{1}{2}$	← Schubanteiziffer für Querschubanlage im Idealfall	
37	Quelle: Willi Bohl: Technische Strömungslehre, VEB Fachbuchverlag Leipzig und Vogel-Buchverlag, 6. Auflage 1984	. / .	

Anlage 7:

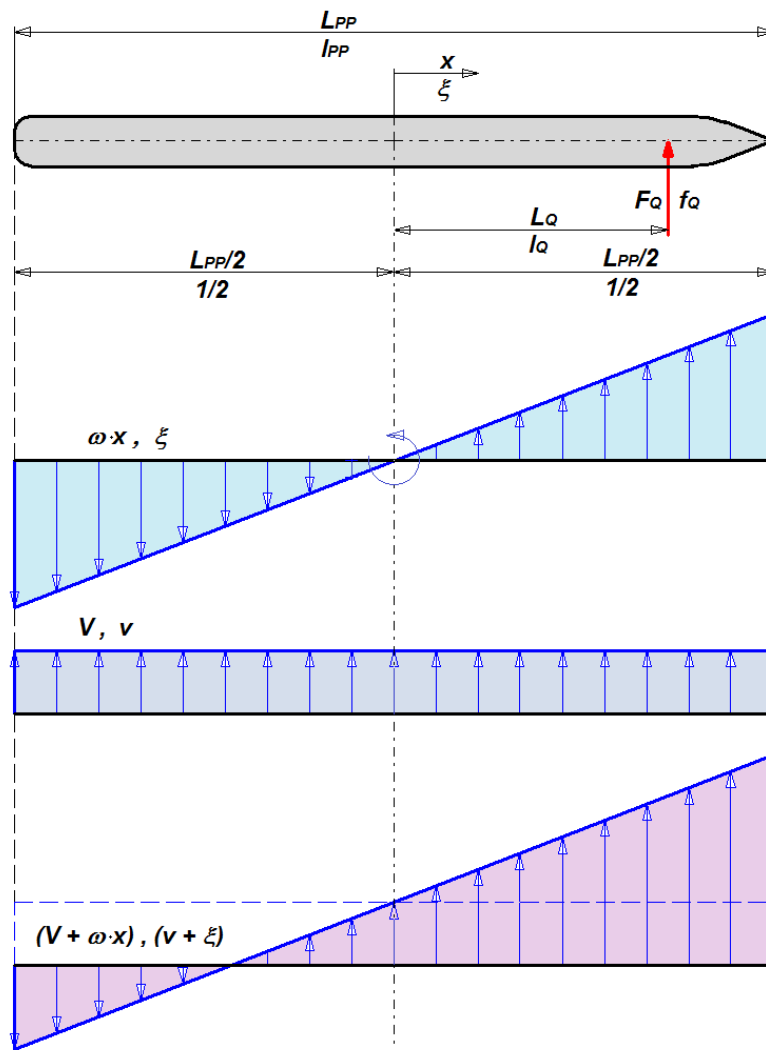
Versuch einer groben Abschätzung des Mindestschubes für ein Querstrahlruder

auf der Grundlage des Wasserwiderstandes mit einfachen, überschaubaren, ingenieurtechnischen Mitteln*)

1. Formelzeichen

Schiffslänge zwischen den Loten	L_{PP} [m]	
Abstand der Querstrahlruderanlage von der Schiffsmitte	L_Q [m]	
Dimensionsloser Abstand der Querstrahlanlage von der Schiffsmitte	l_Q [-]	
Unterwasserlateralfäche des Schiffs	A_{UWL} [m ²]	
Längenkoordinate	x [m]	
Dimensionslose Längenkoordinate	ξ [m]	
Winkelgeschwindigkeit (Drehgeschwindigkeit) des Schiffs um die Schiffsmitte	ω [rad/s]	
Translationsgeschwindigkeit des Schiffs (Querversatz)	V [m/s]	
Dimensionslose Translationsgeschwindigkeit (Querversatz)	v [-]	
Widerstandsbeiwert in Querrichtung des Schiffs (Lateralwiderstand)	C_W [-]	
Dichte des Wassers	ρ_W [kg/m ³]	
Querkraft der Querschubanlage, die auf das Schiff wirkt	F_Q [N] = T_Σ	
Dimensionslose Querkraft	f_Q [-]	
Moment, das zur Drehung des Schiffs um die Schiffsmitte führt	M_Q [Nm]	
Dimensionsloses Moment, das zur Drehung des Schiffsführt	m_Q [-]	

2. Skizze zur Erläuterung des Berechnungsmodells



***) Annahmen und Berechnung**

- Das Schiff ist ein langer, symmetrischer Körper und entspricht hinsichtlich seines Widerstandswertes annähernd dem eines langen, prismatischen Stabes, der bei senkrechter Anströmung in erster Annahme einen Widerstandsbeiwert $C_w \approx 2,0$ hat.
- Die Schiffsbewegung setzt sich zusammen aus einer Drehung $\omega \cdot x$ um die Schiffsmitte ($x=0$) und einer Translationsbewegung V quer zum Schiff.
Es wird von einer quasistationären Betrachtungsweise ausgegangen.
- Massenkräfte werden nicht berücksichtigt.
- Der Ursprung des Koordinatensystems befindet sich auf Schiffsmitte, so das $-\frac{L_{PP}}{2} \leq x \leq \frac{L_{PP}}{2}$ ist.
- Grundsätzlich wird für den Schiffswiderstand von folgender Gleichung ausgegangen, die dann zu einer Querkraft führt:

$$dF_Q = \frac{\rho}{2} \cdot C_w \cdot \frac{A_{UWL}}{L_{PP}} \cdot dx \cdot (V + \omega \cdot x)^2$$

- Mit den dimensionslosen Größen $x = L_{PP} \xi$ für $-\frac{1}{2} \leq \xi \leq +\frac{1}{2}$ und $v = \frac{V}{L_{PP} \cdot \omega}$ ergibt sich:

$$dF_Q = \frac{\rho}{2} \cdot C_w \cdot A_{UWL} \cdot L_{PP}^2 \cdot d\xi \cdot (v + \xi)^2 \quad \text{und} \quad df_Q = \frac{dF_Q}{\frac{\rho}{2} \cdot C_w \cdot A_{UWL} \cdot \omega^2 \cdot L_{PP}^2} = d\xi \cdot (v + \xi)^2$$

Die Gleichung kann über zwei (2) Bereiche integriert werden zu f_Q :

$-v \leq \xi \leq +\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2} \leq \xi \leq -v$
$df_{Q1} = +d\xi \cdot (v + \xi)^2$	$f_{Q2} = d\xi \cdot (v + \xi)^2$
$f_{Q1} = + \int_{-v}^{+\frac{1}{2}} (v + \xi)^2 \cdot d\xi$	$f_{Q2} = - \int_{\frac{1}{2}}^{-v} (v + \xi)^2 \cdot d\xi$
$f_{Q1} = v^2 \cdot \xi + v \cdot \xi^2 + \frac{\xi^3}{3} \Big _{-v}^{+\frac{1}{2}}$	$f_{Q2} = - \left(v^2 \cdot \xi + v \cdot \xi^2 + \frac{\xi^3}{3} \right) \Big _{\frac{1}{2}}^{-v}$
$f_{Q1} = \left(\frac{v^2}{2} + \frac{v}{4} + \frac{1}{24} \right) - \left(-v^3 + v^3 - \frac{v^3}{3} \right)$	$f_{Q2} = - \left[\left(-v^3 + v^3 - \frac{v^3}{3} \right) - \left(-\frac{v^2}{2} + \frac{v}{4} - \frac{1}{24} \right) \right]$
$f_{Q1} = \frac{v^3}{3} + \frac{v^2}{2} + \frac{v}{4} + \frac{1}{24}$	$f_{Q2} = + \frac{v^3}{3} - \frac{v^2}{2} + \frac{v}{4} - \frac{1}{24}$
$f_Q = f_{Q1} + f_{Q2}$	
$f_Q = \frac{2}{3}v^3 + \frac{v}{2}$	

- Das differenzielle Moment um die Schiffsmitte ($x = 0, \xi = 0$) ist dann

$$dM_Q = \frac{\rho}{2} \cdot C_w \cdot \frac{A_{UWL}}{L_{PP}} \cdot dx \cdot (V + \omega \cdot x)^2 \cdot x$$

$$dM_Q = \frac{\rho}{2} \cdot C_w \cdot A_{UWL} \cdot L_{PP}^3 \cdot d\xi \cdot (v + \xi)^2 \cdot \xi \quad \text{und} \quad dm_Q = \frac{dM_Q}{\frac{\rho}{2} \cdot C_w \cdot A_{UWL} \cdot \omega^2 \cdot L_{PP}^3} = d\xi \cdot (v + \xi)^2 \cdot \xi$$

Die Gleichung kann über zwei (2) Bereiche integriert werden zu m_Q :

$-v \leq \xi \leq +\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2} \leq \xi \leq -v$
$dm_{Q1} = +d\xi \cdot (v + \xi)^2 \cdot \xi$	$dm_{Q2} = -d\xi \cdot (v + \xi)^2 \cdot \xi$
$m_{Q1} = + \int_{-v}^{+\frac{1}{2}} (v + \xi)^2 \cdot \xi \cdot d\xi$	$m_{Q2} = - \int_{\frac{1}{2}}^{-v} (v + \xi)^2 \cdot \xi \cdot d\xi$
$m_{Q1} = + \int_{-v}^{+\frac{1}{2}} (v^2 \cdot \xi + 2 \cdot v \cdot \xi^2 + \xi^3) \cdot d\xi$	$m_{Q2} = - \int_{\frac{1}{2}}^{-v} (v^2 \cdot \xi + 2 \cdot v \cdot \xi^2 + \xi^3) \cdot d\xi$
$m_{Q1} = \left(v^2 \cdot \frac{\xi^2}{2} + 2 \cdot v \cdot \frac{\xi^3}{3} + \frac{\xi^4}{4} \right) \Big _{-v}^{+\frac{1}{2}}$	$m_{Q2} = - \left(v^2 \cdot \frac{\xi^2}{2} + 2 \cdot v \cdot \frac{\xi^3}{3} + \frac{\xi^4}{4} \right) \Big _{\frac{1}{2}}^{-v}$
$m_{Q1} = \left(\frac{v^2}{8} + \frac{v}{12} + \frac{1}{64} \right) - \left(\frac{v^4}{2} - \frac{2 \cdot v^4}{3} + \frac{v^4}{4} \right)$	$m_{Q2} = - \left(\frac{v^4}{2} - \frac{2 \cdot v^4}{3} + \frac{v^4}{4} \right) + \left(\frac{v^2}{8} - \frac{v}{12} + \frac{1}{64} \right)$
$m_{Q1} = \frac{v^2}{8} + \frac{v}{12} + \frac{1}{64} - \frac{v^4}{12}$	$m_{Q1} = \frac{v^2}{8} + \frac{v}{12} + \frac{1}{64} - \frac{v^4}{12}$
$m_Q = m_{Q1} + m_{Q2}$	

$$m_Q = -\frac{1}{6} \cdot v^4 + \frac{1}{4} \cdot v^2 + \frac{1}{32}$$

Angriffspunkt der Kraft (Anstand von Schiffsmitte) bzw. Hebelarm:

dimensionslos: $\frac{m_Q}{f_Q} = l_Q = \frac{-\frac{1}{6}v^4 + \frac{1}{4}v^2 + \frac{1}{32}}{\frac{2}{3}v^3 + \frac{v}{2}} = \frac{L_Q}{L_{PP}}$ im Bereich $0 < l_Q < \frac{1}{2}$

dimensionsbehaftet: $\frac{M_Q}{F_Q} = \frac{m_Q}{f_Q} \cdot L_{PP} = L_Q = \frac{-\frac{1}{6}v^4 + \frac{1}{4}v^2 + \frac{1}{32}}{\frac{2}{3}v^3 + \frac{v}{2}} \cdot L_{PP}$ im Bereich $0 < L_Q < \frac{1}{2} \cdot L_{PP}$

Die inverse Funktion $v(r)$, genähert durch eine Polynomregression im Bereich $1/4 \leq l_Q \leq 1/2$, ist:

$$v(\xi) = 93,30098 \cdot l_Q^4 - 174,07356 \cdot l_Q^3 + 122,73086 \cdot l_Q^2 - 39,20727 \cdot l_Q + 4,98941,$$

3. Frei gewähltes Beispiel:

$$F_Q = f_Q \cdot \frac{\rho}{2} \cdot C_W \cdot A_{UWL} \cdot \omega^2 \cdot L_{PP} = \left(\frac{2}{3}v^3 + \frac{v}{2}\right) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot C_W \cdot A_{UWL} \cdot \omega^2 \cdot L_{PP}$$

Vorgabe						Zwischenwerte				Ergebnis	
A_{UL}	L_{PP}	L_Q	ρ_W	C_W	Drehkreis 360°	ω	ω	l_Q	v	V	$F_Q=T_\Sigma$
m^2	m	m	kg/m^3	-	min	$grad/s$	rad/s	-	-	m/s	N
-	-	-	-	-	-	-	-	L_Q/L_{PP}	$f(l_Q)$	-	-
950	150	71,25	1025	2,0 2,3	13,33	0,450	0,00786	0,475	0,151	0,178	105.154 120.787

*) 2,3 zur Berücksichtigung zusätzlicher widerstandserhöhender Schiffsanhänge (Düse, Ruder, Schiffsbreite, Bugwulst, ...) sowie von Wind, Wellen, Strömungen, Massenkräften

$$F_Q = \left(\frac{2}{3}v^3 + \frac{v}{2}\right) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot C_W \cdot A_{UWL} \cdot \omega^2 \cdot L_{PP}^2 = \left(\frac{2}{3} \cdot 0,151^3 + \frac{0,151}{2}\right) \cdot \frac{1025}{2} \cdot C_W \cdot 950 \cdot 0,00786^2 \cdot 150^2,$$

$$V = v(l_Q) \cdot \omega \cdot L_{PP}$$

$$F_Q(C_W = 2,0) = 0,00778 \cdot 512,5 \cdot 2,0 \cdot 950 \cdot 6,169 \cdot 10^{-5} \cdot 22500 = 105.032 \text{ N}$$

$$F_Q(C_W = 2,3) = 0,00778 \cdot 512,5 \cdot 2,3 \cdot 950 \cdot 6,169 \cdot 10^{-5} \cdot 22500 = 120.787 \text{ N}$$

4. Hinweis

Es gibt sicherlich wesentlich anspruchsvollere Verfahren, die eine genauere Ermittlung des erforderlichen Schubes einer QS-Anlage gestatten, die dann mit einer größeren Anzahl von Parametern einzelne Einflüsse berücksichtigen aber mit einem erheblich höheren Aufwand verbunden sind. Die hier dargestellte, recht einfache Methode zur Abschätzung gibt die Möglichkeit, sich schnell einen Überblick zu verschaffen insbesondere dann, wenn man sich in einem frühen Projektstadium befindet.

Nachtrag:

Recherche: RoRo 152 der Warnowwerft Bj. 1983, 14009 BRZ, 19252 t, L 162 m, B=22,9m, T=9,9 m,

Aus: [Die Schiffe in Hamburg und auf der Elbe - Seite 63 - Google Books-Ergebnisseite](#)

books.google.de/books?isbn=3938017589

Thomas Kunadt - 2006

Stückgut-RoRo-Frachter, Russland-Linie zum Südwestterminal; seit 1990 9 x in ...Gebaut 1983 auf der Warnowwerft

Mit QS-CP-Anlage des DMR: P_{QSA} =740 kW, T_Σ=112 kN, L_Q=77m?, D_K=2,00m

Anlage 8: Einiges zum Informationsaustausch zwischen Werft (W) und QSA-Hersteller(Q) Voraussetzung für eine technische Spezifikation und eventuell hilfreich bei der Lösung aufgetretener Probleme

W	Schiffstyp			W	Tunnelgeometrie		
W	Bauwerft			W	Tunneldurchmesser - werftseitig	D_{KW} [m]	
W	Obj.-Nr.			Q	Tunneldurchmesser - QSA-seitig	D_K [m]	
				W	Tunnellänge	L_K [m]	
W	Klassifikationsgesellschaft			Q	Länge des Tunnelsegmentes	L_S [m]	
W	Eisklasse			Q	Gondellänge	L_G [m]	
W	Desplacement des Schiffes	Δ [t]		Q	Propellerlänge	L_P [m]	
W	Fahrgebiet (Temperatur)	t_w [°C]		Q	Propellerabstand	L_a [m]	
				W	Einlaufänge	L_e [m]	
	Bordnetz / Motor			W	Spantneigungswinkel	α [-°]	
Q	- Motortype			W	Wasserlinienneigungswinkel	γ [-°]	
W	- Spannung	U [V]		W	Gitterversperrungsgrad	A_G/A_K [%]	
Q	- Nennstrom	I_N [A]					
W	- Frequenz	f [Hz]			Tunneleinlaufbedingungen		
Q	- Nennleistung	P_N [kW]		W	- Übergangsradius ¹⁾	r [m]	
Q	- Anlassverfahren / Regelung				- Übergangskonus		
Q	- Motordrehzahl	n_M [1/min]		W	o Einlaufkonushöhe	K_1 [m]	
Q	- Propellerdrehzahl	n_P [1/min]		W	o	K_2 [m]	
Q	- Betriebsart			W	o	K_3 [m]	
				W	o	K_4 [m]	
	QSA-Schiffsbetrieb			W	o Einlaufkonuswinkel	κ_1 [-°]	
	Betriebsart [Zeit / Jahr]	t_{DP} [h/a]		W	o	κ_2 [-°]	
W	- Positionieren (DP)	t_{DP} [h/a]		W	o	κ_3 [-°]	
W	- Manövrieren	t_{MAN} [h/a]		W	o	κ_4 [-°]	
Q	Vereinbarter Standschub	T_Σ [kN]			Wanddicken		
Q	Umsteuerzeit Bb. → Stb. u. u.	t_u [s]		W	- Außenhaut	s_A [mm]	
				W	- Übergang zum Kanal	s_U [mm]	
	Angaben zum Schiff			W	- werftseitiges Kanalstück	s_K [mm]	
W	- Unterwasserfläche (beladen)	A_{UW} [m²]		Q	- QSA-Tunnelsegment	s [mm]	
W	- Überwasserfläche (beladen)	A_{OW} [m²]			Werkstoffkategorie für		
W	- Länge zwischen den Loten	L_{PP} [m]		W	- s_A :		
W	- Position der Anlage im Schiff	ΔL (m)		W	- s_U :		
				W	- s_K :		
				W	- s :		
					Weitere Vereinbarungen		
				Q	Hydraulikaggregat / Pumpenleistung / Öle		
				Q	Rohrleitungen / Hochtank		
				Q	Tunnelkonstruktion		
				W	Schweißnahtübergänge		
				Q	Fernbedienung / Ansprechempfindlichkeit		
				Q	Korrosionsschutz / Anodenschutz		
				Q	Betriebsstundenzähler		
				Q	Montage, Service, Gewährleistung		
					Wenn eine andere Kanal-/Tunnelgestaltung (gestufter Durchmesser, abgeknickter Tunnel usw.) vorgesehen ist, dann ist das mitzuteilen.		

1) Nur wenn Einlaufradius vorgesehen ist, dann Konus " - "

