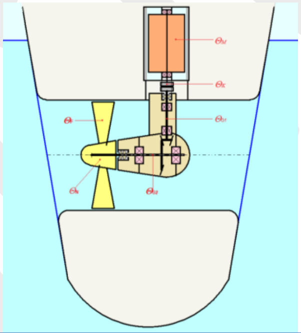
Versuch einer Abschätzung des Auslaufverhaltens von Querschubanlagen mit Festpropeller in Schiffen

An attempt of the estimation of the running-down of transverse thruster with fix-propeller in ships

Klaus-Jürgen Bladt

2012-12-11



K.-J. Bladt
Streuwiesenweg 60
18119 Rostock
Germany

Versuch einer Abschätzung des Auslaufverhaltens von Querschubanlagen mit Festpropeller in Schiffen

Klaus-Jürgen Bladt
www.jbladt.de

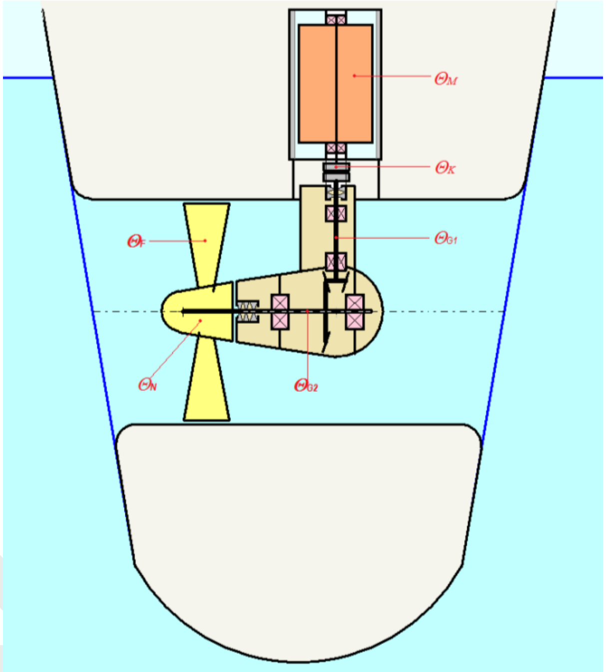
Rostock, den 12. Dezember 2012

1. Formelzeichen

a	[--]	Koeffizient bei der Lösung des Integrals	
b	[--]	Koeffizient bei der Lösung des Integrals	
c	[--]	Koeffizient bei der Lösung des Integrals	
h	[--]	Faktor zur Berücksichtigung des Massenträgheitsmomentes des Wassers (Wasserzuschlag)	
	[--]		
n(t)	[min^{-1}]	Motordrehzahl während des Auslaufvorganges	
n_M	[min^{-1}]	Motordrehzahl bei Nennleistung zum Zeitpunkt des Abstellens des Motors	
n_P	[min^{-1}]	Propellerdrehzahl bei Nennleistung zum Zeitpunkt des Abstellens des Motors	
P(t)	[Nms^{-1}]	Leistung zum Zeitpunkt *t* nach dem Abstellen des Motors	
P_M	[Nms^{-1}]	Nennleistung an der Kupplung bei Nenndrehzahl zum Zeitpunkt des Abstellens des Motors	
P_P	[Nms^{-1}]	Vom Propeller aufgenommene Leistung bei Nennleistung des Motors	
t	[s]	Zeit	
t_A	[s]	Auslaufzeit $t(n_M \rightarrow 0)$	
u	[--]	Untersetzungsverhältnis, allgemein: $u = \omega_P/\omega_M = n_P/n_M \leq 1$	
Θ	[kgm²]	Gesamtmassenträgheitsmoment	
Θ_{G1}	[kgm²]	Massenträgheitsmoment der Getriebeteile mit Motordrehzahl n_M	
Θ_{G2}	[kgm²]	Massenträgheitsmoment der Getriebeteile mit Propellerdrehzahl n_P	
Θ_h	[kgm²]	Massenträgheitsmoment der hydrodynamischen Masse bei Nennleistung bezogen auf Motordrehzahl n_M	
Θ_K	[kgm²]	Massenträgheitsmoment der Kupplung bezogen auf Motordrehzahl n_M	
Θ_M	[kgm²]	Massenträgheitsmoment des Motors	
Θ_P	[kgm²]	Massenträgheitsmoment des Propellers (Nabe, Flügel) mit Propellerdrehzahl n_P	
Θ_f	[kgm²]	Massenträgheitsmoment aller rotierenden Bauteile bezogen auf die Motordrehzahl n_M	
Θ_h	[kgm²]	Massenträgheitsmoment der hydrodynamischen Masse bei Motordrehzahl n_M	
η	[--]	Wirkungsgrad bei der Umsetzung der Nennleistung des Motors in die Propellerleistung	
μ_0	[--]	Koeffizient für konstanter Reibungsanteil	
μ_1	[--]	Koeffizient für variablen Reibungsanteil (linear)	
μ_2	[--]	Koeffizient für variablen Reibungsanteil (quadratisch)	
$\omega_m(t)$	[s^{-1}]	Winkelgeschwindigkeit des Motors während des Auslaufvorganges	
ω_M	[s^{-1}]	Winkelgeschwindigkeit des Motors bei Nennleistung	
$\omega_p(t)$	[s^{-1}]	Winkelgeschwindigkeit des Propellers während des Auslaufvorganges	
ω_P	[s^{-1}]	Winkelgeschwindigkeit des Propellers bei Nennleistung P_0	
$\dot{\omega}_m(t)$	[s^{-2}]	Winkelbeschleunigung $\dot{\omega} = \frac{d\omega}{dt}$ für den Motor	
$\overline{\omega}(t)$	[--]	Dimensionslose Geschwindigkeit während des Auslaufvorganges: $\omega(t)/\omega_M \leq 1$	
$\frac{\overline{\omega}(t)}{dt}$	[s^{-1}]	Winkelbeschleunigung	
τ	[--]	Dimensionslose Zeit während des Auslaufvorganges	
		x	

K.-J. Bladt
Streuwiesenweg 60
18119 Rostock
Germany

2. Problem und Zielstellung



Der Einsatz von Querschubanlagen mit Festpropeller wird unter anderem vom Umsteuerverhalten – Schubrichtungsänderung des Propellers – mitbestimmt. Hierbei kommt dem Zeit- und Auslaufverhalten der Anlage eine gewisse Bedeutung zu, da das Auslaufen (Drehzahlabnahme) einen Teil des Umsteuerns umfasst. Unter Auslaufverhalten wird der zeitabhängige Drehzahlabfall verstanden, der auftritt, wenn die Energiezufuhr durch den Motor abgeschaltet wird. Dieses Auslaufverhalten soll unter Zuhilfenahme geeigneter Annahmen abgeschätzt werden.

3. Lösungsweg

Durch die Betrachtung der Leistungsbilanz und dem Zusammenhang von Leistung und Drehzahl eines Propellers soll eine Gleichung aufgestellt werden, deren Lösung den Zusammenhang zwischen Drehzahl und Zeit in Abhängigkeit von anlagenspezifischen Parametern während des Auslaufs wiedergibt. Während des Auslaufvorgangs ergibt sich diese zeitabhängige Leistungsbilanz aus dem durch die Massenträgheit entstehende, nutzbare Leistung, der vom Propeller aufgenommenen Leistung und der Verlustleistung.
Die einzelnen, stets auf die Motordrehzahl bezogenen Anteile der Leistungsbilanz werden wie folgt beschrieben:

1. <u>Verfügbare Leistung infolge Massenträgheit:</u>

Dieses Moment ist das Produkt aus Massenträgheitsmoment, Winkelbeschleunigung und Winkelgeschwindigkeit. Das Massenträgheitsmoment ist die Summe *aller* Trägheitsmomente der Anlage und berücksichtigt den Drehzahlsprung im Getriebe. Das Massenträgheitsmoment setzt sich aus dem Moment der \`festen´, d. h. konstanten Massen und dem Moment der durch den Propeller mitbewegten, veränderlichen*) Wassermasse (hydrodynamische Masse) zusammen:

- Leistung infolge der konstanten Massen (\`fest´)

$$P_{\theta f} = \omega_m(t) \cdot \dot{\omega}_m(t) \cdot \theta_f \qquad [1]$$

mit dem Massenträgheitsmoment

$$\theta_f = \theta_M + \theta_K + \theta_{G1} + u^2 \cdot (\theta_{G2} + \theta_P)$$

- Leistung infolge der veränderlichen, hydrodynamischen Masse (\`flüssig´)
Das Trägheitsmoment der hydrodynamischen Masse ist drehzahlabhängig *). Für den Entwurfspunkt (Nennleistung P_M, Nenndrehzahl n_M) eines Propellers wird häufig in erster Näherung ein Erfahrungswert von $h \cdot \theta_P = (0{,}2 \ldots 0{,}3) \cdot \theta_P$ für die Massenträgheit der vom Propeller in Rotation versetzten Masse angesetzt. Dieser Zusammenhang wird in der Berechnung benutzt. Der von der Nenndrehzahl abweichende Zustand wird durch eine quadratische Anhängigkeit von der Propellerdrehzahl erfasst:

$$P_{\theta h} = \omega_m(t) \cdot \dot{\omega}_m(t) \cdot \theta_h \cdot \left(\frac{\omega_m(t)}{\omega_M}\right)^2 \qquad [2]$$

Das bei Motornenndrehzahl vorhandene Massenträgheitsmoment ist:

$$\theta_h = u^2 \cdot h \cdot \theta_P \qquad [3]$$

Insgesamt ergibt sich aus der Massenträgheit folgendes Leistungspotenzial (zugeführte Leistung):

$$P_\theta = \omega_m(t) \cdot \dot{\omega}_m(t) \cdot \left(\theta_f + \theta_h \cdot \left(\frac{\omega_m(t)}{\omega_M}\right)^2\right) \qquad [4]$$

---

*) *wird in der Hydrodynamik allgemein als konstant angenommen, dann ist* $\left(\frac{\omega_m(t)}{\omega_M}\right)^2 = 1$

K.-J. Bladt
Streuwiesenweg 60
18119 Rostock
Germany

2. Am Propeller umgesetzte Leistung:

Die von einem Festpropeller aufgenommene Leistung ist die um die Verlustanteile reduzierte Leistung, die sich aus der Massenträgheit ergibt, und folgt der nachstehenden Gesetzmäßigkeit:

$$P_p(t) = P_P \cdot \left(\frac{\omega_P(t)}{\omega_P}\right)^3 = \eta \cdot P_M \cdot \left(\frac{\omega_P(t)}{\omega_P}\right)^3 = \eta \cdot P_M \cdot \left(\frac{\omega_m(t)}{\omega_M}\right)^3 = \omega_m(t) \cdot \frac{\eta \cdot P_M}{\omega_M} \cdot \left(\frac{\omega_m(t)}{\omega_M}\right)^2 \qquad [5]$$

Mit der dimensionslosen Drehzahl $\frac{\omega_m(t)}{\omega_M} = \varpi(t) = \varpi$ kann geschrieben werden [6]

$$P_p(t) = P_P \cdot \varpi^3(t) = \eta \cdot P_M \cdot \varpi^3 \qquad [7]$$

3. Verlustmomente:

Die Verluste bei Nennleistung P_M und Nenndrehzahl n_M liegen für eine Festpropelleranlage bei ca. 2%...6% der Nennleistung des Motors.
Die Verlustanteile entstehen einerseits durch ein Moment, welches drehzahlunabhängig ist und durch den Koeffizienten μ_0 charakterisiert werden soll, und andererseits durch Momente, die drehzahlabhängig sind und durch die Koeffizienten μ_1 und μ_2 charakterisiert werden sollen. Bei Nennleistung des Propellers findet sich ihre Summe ($\mu_0 + \mu_1 + \mu_2$) in der Verlustkennziffer $(1-\eta)$ wieder. Dieser für die Nennleistung bekannte Gesamtverlust $(1-\eta)$ wird näherungsweise aufgeteilt und in dieser Aufteilung in die folgenden Betrachtungen eingeführt. Er ist eine Grundlage für die weiteren Berechnungen:
Die Verlustanteile bei Nennleistung:

$$(1-\eta) = \mu_0 + \mu_1 + \mu_2 = 0{,}02\ldots0{,}06 \approx \underbrace{(0{,}0005 \ldots 0{,}010)}_{\mu_0} + \underbrace{(0{,}010 \ldots 0{,}030)}_{\mu_1} + \underbrace{(0{,}010 \ldots 0{,}030)}_{\mu_2} \qquad [8]$$

bzw. $\eta + \mu_0 + \mu_1 + \mu_2 = 1$ [8a]

- Konstantes Verluste
  Unabhängig von den Verlustmomenten infolge Rotation muss von einem annähernd konstanten Verlustmoment ausgegangen werden, welches hauptsächlich durch die Reibung in den Dichtsystemen und die durch Eigengewicht verursachten Lagerkräfte und der damit verbundenen Reibung entsteht und sich insbesondere bei gegen Null gehender Drehzahl bemerkbar macht und messbar ist (feststellbar beim Drehen einer Anlage von Hand). Die Verlustleistung aus diesem Moment ergibt sich zu

$$P_{\mu 0} = \mu_0 \cdot \frac{P_M}{\omega_M} \cdot \omega_m(t) = \mu_0 \cdot P_M \cdot \varpi \qquad [9]$$

- Drehzahlabhängige Verluste
  Linear drehzahlabhängige Verluste
  Verlustmomente, die abhängig vom durch die Verzahnung geleiteten und gewandelten Moment in den Lagern durch Reibung entstehen, und Reibmomente, die in den Dichtungen entstehen, werden als annähernd linearabhängig von der Drehzahl angesehen. Sie werden deshalb mit einem konstanten Verlustkoeffizienten und einer linearen Drehzahlabhängigkeit in die Berechnung eingeführt und ergeben eine Verlustleistung

$$P_{\mu 1} = \mu_1 \cdot \frac{P_M}{\omega_M} \cdot \left(\frac{\omega_m(t)}{\omega_M}\right) \omega_m(t) = \mu_1 \cdot P_M \cdot \varpi^2 \qquad [10]$$

  Quadratisch drehzahlabhängige Verluste
  Die durch Ölverwirbelung (Planschen) im Getriebe entstehen Verlustmomente werden annähernd mit einem konstanten Verlustkoeffizienten und einer quadratischen Abhängigkeit von der Drehzahl erfasst und ergeben die Verlustleistung:

$$P_{\mu 2} = \mu_2 \cdot \frac{P_M}{\omega_M} \cdot \left(\frac{\omega_m(t)}{\omega_M}\right)^2 \cdot \omega_m(t) = \mu_2 \cdot P_M \cdot \varpi^3 \qquad [11]$$

Als Leistungsbilanz ergibt sich folgende Gleichung:

$$P_\theta + P_P + P_{\mu 0} + P_{\mu 1} + P_{\mu 2} = 0 \qquad [12]$$

$$-\omega_m(t) \cdot \dot{\omega}_m(t) \cdot \left(\theta_f + \theta_h \cdot \varpi^2\right) = \eta \cdot P_M \cdot \varpi^3 + \mu_0 \cdot P_M \cdot \varpi + \mu_1 \cdot P_M \cdot \varpi^2 + \mu_2 \cdot P_M \cdot \varpi^3 \qquad [13a]$$

Daraus ergibt sich eine Momentengleichung mit $\omega_m(t) \cdot \dot{\omega}_m(t) = \omega_M^2 \cdot \varpi \cdot \frac{d\varpi}{dt}$ [13]

K.-J. Bladt
Streuwiesenweg 60
18119 Rostock
Germany

$$-\frac{d\overline{\omega}}{dt}\cdot\left(\theta_f+\theta_h\cdot\overline{\omega}^2\right)=\eta\cdot\frac{P_M}{\omega_M^2}\cdot\overline{\omega}^2+\mu_0\cdot\frac{P_M}{\omega_M^2}+\mu_1\cdot\frac{P_M}{\omega_M^2}\cdot\overline{\omega}^1+\mu_2\cdot\frac{P_M}{\omega_M^2}\cdot\overline{\omega}^2 \qquad [14]$$

$$-\frac{d\overline{\omega}}{dt}\cdot\left(1+\frac{\theta_h}{\theta_f}\cdot\overline{\omega}^2\right)=(\eta+\mu_2)\cdot\frac{P_M}{\theta_f\cdot\omega_M^2}\cdot\overline{\omega}^2+\mu_0\cdot\frac{P_M}{\theta_f\cdot\omega_M^2}+\mu_1\cdot\frac{P_M}{\theta_f\cdot\omega_M^2}\cdot\overline{\omega}^1 \qquad [14a]$$

$$\frac{d\overline{\omega}}{dt}=-\frac{\mu_0\cdot\frac{P_M}{\theta_f\cdot\omega_M^2}+\mu_1\cdot\frac{P_M}{\theta_f\cdot\omega_M^2}\cdot\overline{\omega}+(\eta+\mu_2)\cdot\frac{P_M}{\theta_f\cdot\omega_M^2}\cdot\overline{\omega}^2}{\left(1+\frac{\theta_h}{\theta_f}\cdot\overline{\omega}^2(t)\right)} \qquad [14b]$$

$$dt=-\frac{\left(1+\frac{\theta_h}{f}\cdot\overline{\omega}^2\right)}{\mu_0\cdot\frac{P_M}{\theta_f\cdot\omega_M^2}+\mu_1\cdot\frac{P_M}{\theta_f\cdot\omega_M^2}\cdot\overline{\omega}+(\eta+\mu_2)\cdot\frac{P_M}{\theta_f\cdot\omega_M^2}\cdot\overline{\omega}^2}\cdot d\overline{\omega} \qquad [15]$$

Welche zu dem folgenden Integral führt:

$$t=-\frac{\theta_f\cdot\omega_M^2}{P_M}\cdot\int\frac{\left(1+\frac{\theta_h}{f}\cdot\overline{\omega}^2\right)}{(\eta+\mu_2)\cdot\overline{\omega}^2+\mu_1\cdot\overline{\omega}+\mu_0}\cdot d\overline{\omega}+C \qquad [16]$$

mit $a=(\eta+\mu_2)\,,\ b=\mu_1\,,\ c=\mu_0\ ,\ \Delta=4\cdot a\cdot c-b^2$ [17]

$$t=-\frac{\theta_f\cdot\omega_M^2}{P_M}\cdot\left\{\int\frac{1}{a\cdot\overline{\omega}^2+b\cdot\overline{\omega}+\mathrm{c}}\cdot d\overline{\omega}+\frac{\theta_h}{\theta_f}\cdot\int\frac{\overline{\omega}^2}{a\cdot\overline{\omega}^2(t)+b\cdot\overline{\omega}+\mathrm{c}}\cdot d\overline{\omega}+C\right\} \qquad [18]$$

Die allgemeine Lösung ist:

Bronstein, Semendjajew, Musiol, Mühlig: Taschenbuch der Mathematik, 4., überarbeitete und erweiterte Auflage 1999, Verlag Harri Deutsch, Frankfurt a. M.

$$t=-\frac{\theta_f\cdot\omega_M^2}{P_M}\cdot\left\{\frac{2}{\sqrt[2]{\Delta}}\cdot\arctan\left(\frac{2\cdot a\cdot\overline{\omega}+b}{\sqrt[2]{\Delta}}\right)+\frac{\theta_h}{f}\cdot\left(\frac{\overline{\omega}}{a}-\frac{b}{2\cdot a^2}\cdot\ln(a\cdot\overline{\omega}^2+a\cdot\overline{\omega}+\mathrm{c})-\frac{b^2-2\cdot a\cdot c}{2\cdot a^2}\cdot\frac{2}{\sqrt[2]{\Delta}}\cdot\arctan\left(\frac{2\cdot a\cdot\overline{\omega}+b}{\sqrt[2]{\Delta}}\right)\right)+C\right\} \qquad [19]$$

$$t=-\frac{\theta_f\cdot\omega_M^2}{P_M}\cdot\left\{\frac{2}{\sqrt[2]{\Delta}}\cdot\left(1-\frac{\theta_h}{\theta_f}\cdot\frac{b^2-2\cdot a\cdot c}{2\cdot a^2}\right)\cdot\arctan\left(\frac{2\cdot a\cdot\overline{\omega}+b}{\sqrt[2]{\Delta}}\right)+\frac{\theta_h}{\theta_f}\cdot\left(\frac{\overline{\omega}}{a}-\frac{b}{2\cdot a^2}\cdot\ln(a\cdot\overline{\omega}^2+b\cdot\overline{\omega}+\mathrm{c})\right)+C\right\} \qquad [19a]$$

Für die Integrationskonstante gilt: $t=0,\ \overline{\omega}=1$ [20]

$$C=-\left\{\frac{2}{\sqrt[2]{\Delta}}\cdot\left(1-\frac{\theta_h}{\theta_f}\cdot\frac{b^2-2\cdot a\cdot c}{2\cdot a^2}\right)\cdot\arctan\left(\frac{2\cdot a+b}{\sqrt[2]{\Delta}}\right)+\frac{\theta_h}{f}\cdot\left(\frac{1}{a}-\frac{b}{2\cdot a^2}\cdot\ln(a+b+\mathrm{c})\right)+C\right\} \qquad [21]$$

Die spezielle Lösung ist dann:

$$t=-\frac{\theta_f\cdot\omega_M^2}{P_M}\cdot\left\{\frac{2}{\sqrt[2]{\Delta}}\cdot\left(1-\frac{\theta_h}{\theta_f}\cdot\frac{b^2-2\cdot a\cdot c}{2\cdot a^2}\right)\cdot\left[\arctan\left(\frac{2\cdot a\cdot\overline{\omega}+b}{\sqrt[2]{\Delta}}\right)-\arctan\left(\frac{2\cdot a+b}{\sqrt[2]{\Delta}}\right)\right]+\frac{\theta_h}{\theta_f}\cdot\left[\frac{\overline{\omega}-1}{a}-\frac{b}{2\cdot a^2}\cdot\left(ln(a\cdot\overline{\omega}^2+b\cdot\overline{\omega}+c)-ln(a+b+c)\right)\right]\right\} \qquad [23]$$

Die Auslaufzeit bis zum Stillstand der Anlage ergibt sich mit $\overline{\omega}(t=t_A)=0$ zu: [24]

$$t_A=-\frac{\theta_f\cdot\omega_M^2}{P_M}\cdot\left\{\frac{2}{\sqrt[2]{\Delta}}\cdot\left(1-\frac{\theta_h}{\theta_f}\cdot\frac{b^2-2\cdot a\cdot c}{2\cdot a^2}\right)\cdot\left[\arctan\left(\frac{b}{\sqrt[2]{\Delta}}\right)-\arctan\left(\frac{2\cdot a+b}{\sqrt[2]{\Delta}}\right)\right]-\frac{\theta_h}{\theta_f}\cdot\left[\frac{1}{a}+\frac{b}{2\cdot a^2}\cdot\left(ln(c)-ln(a+b+c)\right)\right]\right\} \qquad [25]$$

Noch einmal: $a=(\eta+\mu_2)\,,\ b=\mu_1\,,\ c=\mu_0\ ,\ \Delta=4\cdot a\cdot c-b^2$ [17]

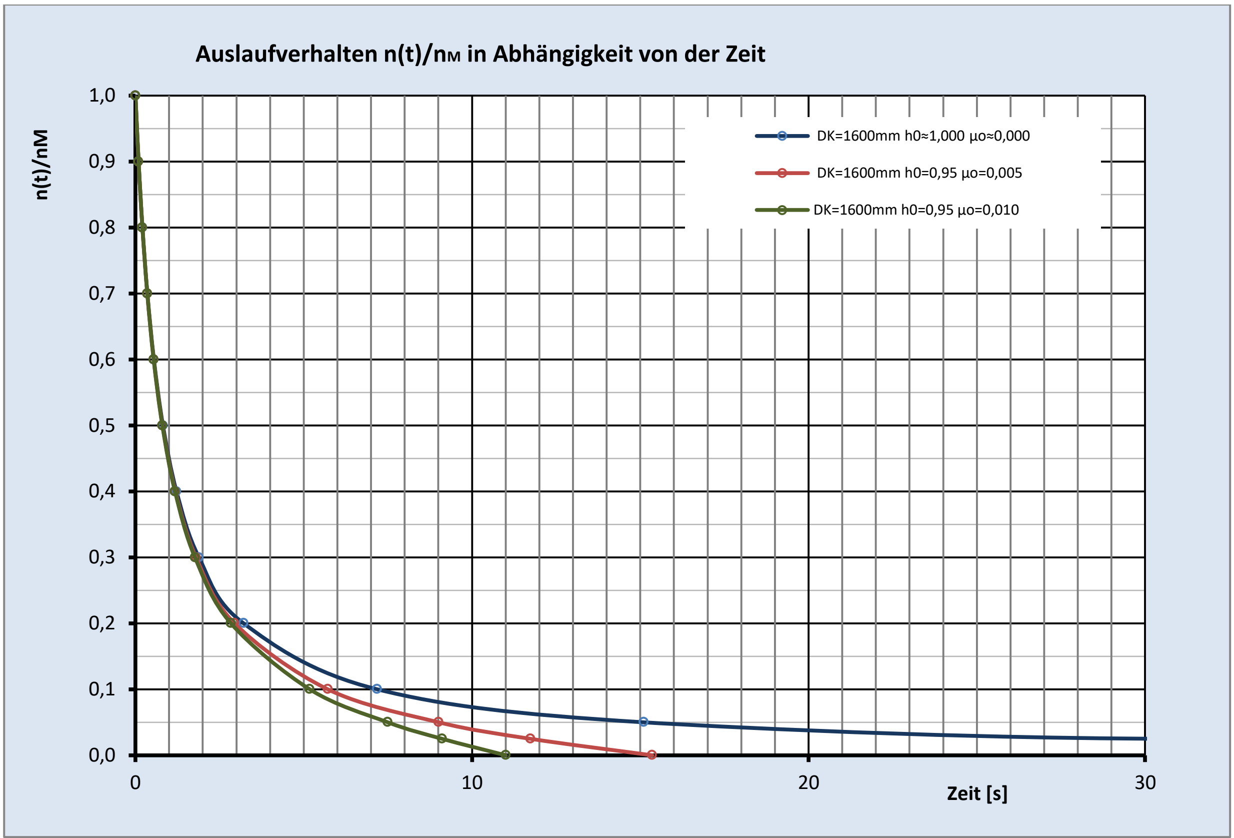
Die Umkehrfunktion $\overline{\omega}_m(t)$ lässt sich nicht eliminieren. Da die Auslaufzeit bekannt ist, ergibt sich der zu betrachtende Funktionsbereich.

K.-J. Bladt
Streuwiesenweg 60
18119 Rostock
Germany

4. Beispiele

Es werden drei Beispiele gleicher Baugröße und Drehzahl mit unterschiedlichen Verlustkoeffizienten vorgestellt:

Tunnel-durchmesser	P_M	ω_M	ω_P	$\eta = h_0$	μ_0	μ_1	μ_2	θ_M	θ_K	θ_{G1}	θ_{G2}	θ_P	t_A
[mm]	$[kW]$	$[s^{-1}]$	$[s^{-1}]$	[--]	[--]	[--]	[--]			$[kgm^2]$			[s]
1600	450	154	34,0	0,99999 → 1	0,00001→ 0	0,000	0,000	9,0	0,3	1,2	17,2	77	394
				0,950	0,005	0,025	0,020						15,4
				0,950	0,010	0,025	0,015						11,0



5. Ergebnisse

Der beschrieben Lösungsweg führt einem plausiblen Zusammenhang zwischen Winkelgeschwindigkeit und Zeit.

Die Verlustkoeffizienten beeinflussen stark die Auslaufzeit:

- Der Koeffizient für drehzahlunabhängige Verluste beeinflusst maßgeblich die Auslaufzeit t_A. Er bewirkt, dass die Anlage überhaupt zum Stillstand kommt.
- Die drehzahlabhängigen Verluste haben einen relativ geringen Einfluss auf die Auslaufzeit t_A.
- Ein offensichtliches Auseinanderdriften des Auslaufverhaltens ist erst unterhalb einer Drehzahl von ≈30% der Nenndrehzahl erkennbar.

Qualitativ war Lösung vorhersehbar. Es wird davon ausgegangen, dass der drehzahlunabhängige Verlust messbar ist, indem das Moment gemessen wird, welches die Anlage aus dem Stillstand in Bewegung bringt. Daraus lässt sich die Größe μ_0 ermitteln. Die ungefähre Kenntnis dieses Wertes ist entscheidend für die Ermittlung der Auslaufzeit. Der ermittelte Wert für μ_0 ist näherungsweise auch auf andere Anlagen übertragbar.

K.-J. Bladt
Streuwiesenweg 60
18119 Rostock
Germany