

Simulation des Notstopp-Manövers von Schiffen mit langsamlaufenden Zweitaktmotoren

Simulation of the Crash-Stop Maneuver of Vessels Employing Slow-Speed Engines

Dipl.-Ing. **Friedrich Wirz**, Prof. Dr.-Ing. **Stefan Krüger**

Technische Universität Hamburg-Harburg, Hamburg/Germany

Summary. The majority of merchant vessels features a single slow-speed two-stroke Diesel engine, delivering its torque directly to a fixed-pitch propeller. Thus, to obtain braking thrust during a crash-stop maneuver, the turning direction of the drive line, including the engine, needs to be reversed. The maneuver is a sequence of several phases, during all of which the engine is in interaction with the propeller and the vessel. The only chance to influence the sequence is to optimize the internal reversing process of the engine.

The presentation will point out possible limitations according to the system's interaction and their impact on the maneuvering performance. Alternatives will be presented and discussed, employing comparative simulations.

The motivation of this investigation is to raise the safety standard of vessels equipped with such propulsion systems by means of reducing their required stopping distance.

1 Einleitung

Bei der Entwicklung von Schiffen sind drei wesentliche Tendenzen zu beobachten: Schiffe werden größer, schneller und ihre weltweite Anzahl nimmt zu. Besonders die Entwicklung von Containerschiffen zeigt alle drei Trends vereint: Derzeit sind Schiffe mit einer Stellplatzkapazität von mehr als 13000 TEU und Dienstgeschwindigkeiten oberhalb 26 Knoten derart zahlreich bestellt, im Bau oder bereits in Dienst gestellt, dass diese Entwicklung in der letzten Zeit nochmals einen kräftigen Aufschwung erhalten hat. Die zunehmende Größe und Geschwindigkeit der Schiffe bewirkt nach dem Ansatz der kinetischen Energie

$$E_{kin} = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

dass deren Stoppwege immer länger werden. Durch die zusätzlich steigende Verkehrsdichte, insbesondere in engen, vielbefahrenen Revieren, erhöht sich die Gefahr von Schiffskollisionen.

Im vorliegenden Artikel wird deshalb das Notstopp-Manöver aus Sicht der Antriebsanlage auf Möglichkeiten untersucht, die Stoppwege zu verkürzen. Dabei werden ausschließlich Antriebsanlagen mit langsamlaufendem Zweitaktmotor und Festpropeller betrachtet, da diese auf den meisten großen Handelsschiffen anzutreffen sind und gleichzeitig die längsten Stoppwege aufweisen.

2 Das Notstopp-Manöver mit umsteuerbarem Zweitaktmotor und Festpropeller

Die Konfiguration der Antriebsanlage hat einen wesentlichen Einfluss auf den Ablauf des Notstopp-Manövers. Anlagen mit Verstellpropeller, die in der Regel mit Viertaktmotoren kombiniert werden, erreichen eine Umkehr der Schubrichtung am Propeller durch Verstellen der Propellerflügel. Der Motor ist davon nur insofern betroffen, als dass er dem Lastbedarf des Propellers während der Flügelverstellung folgen muss und dementsprechend zunächst entlastet und dann, jenseits des Nulldurchganges der Steigung, zügig wieder belastet wird. Mit dieser Konfiguration kann die Schubumkehr des Propellers sofort nach Erteilung des Stoppbefehles eingeleitet werden. Der zeitliche Verzug bis zum Erreichen des vollen Rückwärtsschubes wird lediglich durch die endliche Verstellgeschwindigkeit der Flügel und das Beschleunigungsverhalten des Motors begrenzt und liegt im Bereich unter einer Minute.

Wenn hingegen als Propulsor ein Festpropeller angewandt wird, muss zur Umkehr der Schubrichtung die Drehrichtung des Propellers verkehrt werden. Festpropeller bei Handelsschiffen werden für gewöhnlich von langsamlaufenden Zweitakt Dieselmotoren angetrieben. Propeller und

Motor sind, wie aus Abbildung 1 ersichtlich ist, ohne eine schaltbare Kupplung fest durch die Propellerwelle miteinander verbunden. Der Motor muss demnach umsteuerbar ausgeführt sein. Das heißt einerseits, dass er in beide Drehrichtungen betrieben werden kann. Andererseits ist es aber auch erforderlich, mit Hilfe des Motors aktiv die Drehrichtung ändern zu können, also das rotierende Laufzeug aus einer Drehrichtung anzuhalten und in die andere zu starten. Diese beiden Teilvorgänge werden unter dem Begriff „Umsteuern“ vereint.

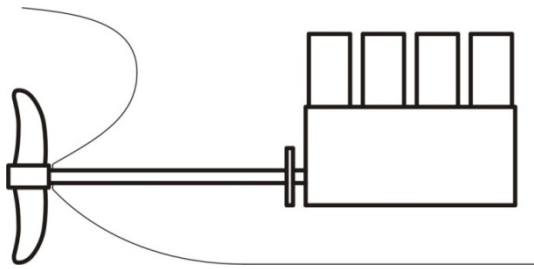


Abbildung 1. Langsamlaufender Zweitaktmotor mit Festpropeller

Verständlicherweise haben die Besonderheiten dieser Antriebskonfiguration einen Einfluss auf den Verlauf des Notstopmanövers, der qualitativ in Abbildung 2 zu sehen ist. In dieser zeitlichen Darstellung sind die bezogene Schiffsgeschwindigkeit in rot sowie die bezogene Propellerwellendrehzahl in blau aufgetragen.

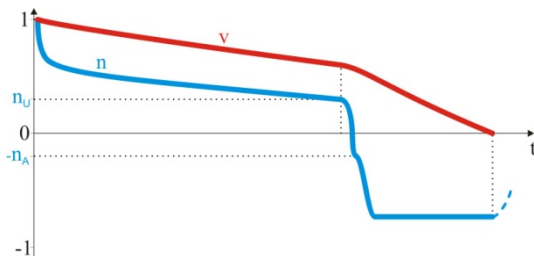


Abbildung 2. Qualitativer Verlauf des Notstop-Manövers

Auf den Befehl zum Aufstoppen des Schiffes folgt zunächst die Zurücknahme der Kraftstoffeinspritzung. Die Drehzahl fällt daraufhin rasch auf einen Wert ab, der einem Momentengleichgewicht am Propeller entspricht, und zwar aus dem hydrodynamischen Moment durch die Anströmung einerseits und dem Reibmoment aus dem Laufzeug des Motors andererseits. Nun folgt die längste Phase des Manövers: Die Schiffsgeschwindigkeit verringert sich sehr langsam, denn die hohe kinetische Energie des Schiffes wird nur durch den passiven Widerstand des Rumpfes sowie durch die geringe

Bremswirkung abgebaut, die der in der Strömung mitdrehende Propeller aufbringt. Sobald eine vom Motorenhersteller vorgegebene Drehzahl erreicht ist, wird der Antriebsstrang umgesteuert. Das geschieht mit Hilfe von Druckluft, die zu Anlass- und Umsteuerzwecken in Behältern unter einem Druck von 30 bar bereitgehalten wird und kontrolliert im Motor wirksam wird. Sobald die ebenfalls vom Motorenhersteller vorgegebene Anlassdrehzahl erreicht ist, wird die Befeuerung des Motors aufgenommen und die Anlage so weit wie möglich beschleunigt, um nun am Propeller einen hohen Bremsschub zu erzeugen, mit dem das Schiff rapide verzögert und zum Stillstand gebracht werden kann.

Aus dem langsamen Geschwindigkeits- und Drehzahlabfall zwischen dem Abstellen des Motors und dem Umsteuern mittels Druckluft bedingt sich im Wesentlichen die lange zeitliche Dauer des gesamten Manövers und, aufgrund der dabei noch sehr hohen Schiffsgeschwindigkeit, der lange Stoppweg des Schiffes. Dieser entspricht in der Darstellung aufgrund des Zusammenhanges

$$s = \int_{t_0}^{t(v=0)} v(t) dt \quad (2)$$

der Fläche unterhalb des Geschwindigkeitsverlaufes. Der genannte Abschnitt ist demnach gleichermaßen kritisch wie sensibel, so dass Maßnahmen zur Optimierung des Manövers an dieser Stelle greifen sollten.

Ein Ansatz dazu ist die Erhöhung der Umsteuerdrehzahl. Wie aus Abbildung 3 ersichtlich wird, bedingt der flache Abfall der Drehzahl, dass bereits eine geringe Erhöhung der Umsteuerdrehzahl dazu führt, dass diese zu einem deutlich früheren Zeitpunkt erreicht wird. Demnach kann der Propeller früher einen bremsenden Umkehrschub erzeugen und in Folge davon das Schiff schneller zum stehen bringen. Die Stoppstrecke, die durch diese Maßnahme eingespart wird, entspricht der grün eingefärbten Fläche zwischen dem ursprünglichen und dem veränderten Geschwindigkeitsverlauf in Abbildung 3.

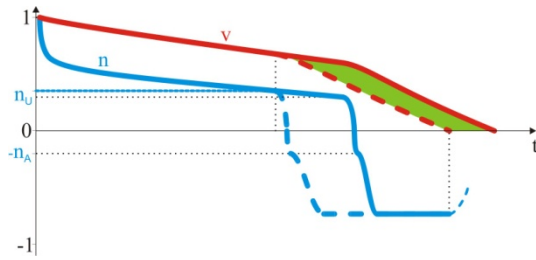


Abbildung 3. Effekt durch Erhöhung der Umsteuerdrehzahl

Ein zweiter Ansatz soll bewirken, dass die hohe Drehzahl zwischen dem Abstellen des Motors und dem Erreichen der Umsteuerdrehzahl schneller abgebaut wird (siehe Abbildung 4). Die Entwicklung von Motoren hat seit jeher u. a. das Ziel, die Reibung zwischen den beweglichen Teilen im Triebwerk zu minimieren, um den mechanischen Wirkungsgrad im Betrieb zu optimieren. Gerade diese Tendenz bewirkt aber, dass dem in der Strömung mitdrehenden Propeller kein signifikantes Bremsmoment angeboten werden kann, so dass die Drehzahl nur sehr träge abfällt. Bereits eine geringe Erhöhung des Reib- bzw. Bremsmomentes an der Welle bewirkt demnach, dass die Drehzahl deutlich schneller abfällt und die Umsteuerdrehzahl (selbst wenn deren Betrag unverändert bleibt) zu einem wesentlich früheren Zeitpunkt erreicht wird. Der Einfluss auf die Verkürzung des Stoppweges ist ähnlich zu dem zuerst beschriebenen Ansatz, wie die grüne Fläche in Abbildung 4 deutlich macht.

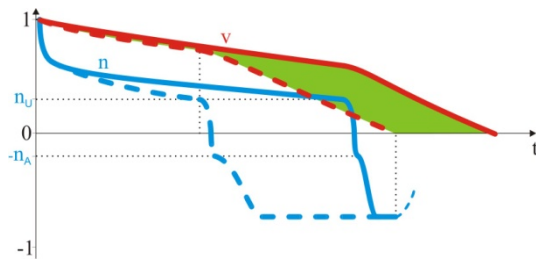


Abbildung 4. Effekt durch Erhöhung des Bremsmomentes

Im Folgenden wird nun zunächst beschrieben, wie das herkömmliche Manöver simuliert wird. Dabei stehen insbesondere die motorinternen Vorgänge während des pneumatischen Umsteuervorganges im Fokus. Anschließend werden die Optimierungsansätze wieder aufgegriffen und mögliche Lösungen vorgestellt.

3 Simulationsmodell des Motors

Die wesentlichen Bestandteile des Motors, die am pneumatischen Umsteuervorgang beteiligt sind, sind in Abbildung 5 vereinfacht dargestellt.

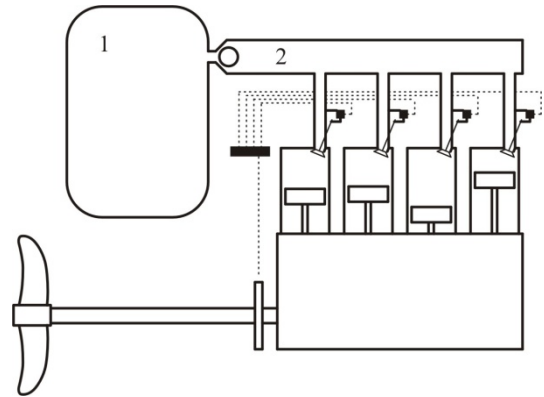


Abbildung 5. Motormodell für die Simulation des pneumatischen Betriebes

Ein pneumatischer Betrieb des Motors findet sowohl während des Anlassens aus dem Stillstand als auch während des Umsteuerns statt. Die dazu erforderliche Druckluft wird in dem bzw. den Anlassluftbehältern (1) unter einem Druck von 30 bar bereitgehalten. Das Volumen des Behälters wird durch die Bauvorschrift der Klassifikationsgesellschaft vorgeschrieben. Das zu Grunde liegende Auslegungskriterium ist eine vorgegebene Anzahl von Anlassvorgängen, die ohne Zuhilfenahme der Luftkompressoren möglich sein muss.

Der Behälter ist mit der Verteilung (2) verbunden. Zwischen beiden ist ein Rückschlagventil vorgesehen, das aus Sicherheitsgründen eine Rückströmung von Luft in den Behälter verhindern soll. Die Leitung führt am Motor entlang und verzweigt sich in Zuleitungen, die zu den Anlassluftventilen in den Zylinderdeckeln führen. Weitere Einrichtungen wie Entwässerungen und Absperrventile finden in diesem Modell keine Berücksichtigung, weil sie für die Funktion irrelevant sind. Die Volumina der einzelnen Leitungen werden für die Simulation zu einem Gesamtvolumen des Verteilers zusammengefasst. Um eine einfache Skalierung bei verschiedenen Motorgrößen zu gewährleisten, wird dieses Volumen in Bezug auf das Behältervolumen festgelegt.

Ein Anlassluftventil je Zylinder befindet sich in dem Kreisring im Zylinderdeckel, der zwischen dem großen Auslassventil und der Zylinderwand

verbleibt und in dem auch die Einspritzdüsen angeordnet sind. Der schematische Aufbau des Ventils ist in Abbildung 6 etwas detaillierter dargestellt.

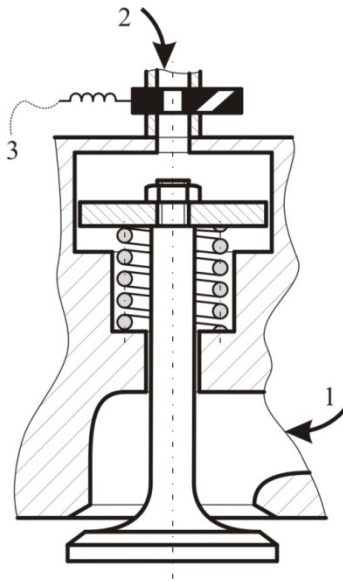


Abbildung 6. Schematische Darstellung des Anlassluftventiles

Die Oberseite des Ventiltellers wird mit dem Druck der Anlassluft (1) beaufschlagt. Die Steuerleitung (2) ist ebenfalls an den Luftverteiler angeschlossen. Im pneumatischen Betrieb bewirkt ein kurbelwinkelabhängiger Steuerimpuls (3) am Magnetventil, dass die Steuerluft auf den Steuerkolben trifft und das Anlassluftventil öffnet. Wird der Steuerimpuls unterbrochen, so wird der Steuerzylinder mit der Umgebung verbunden und das Ventil durch die Kraft der Schließfeder geschlossen.

Während das Ventil geöffnet ist, kann Luft sowohl in den Zylinder gelangen als auch in die Anlassluftleitung zurückströmen. Ausschlaggebend ist hierfür die Richtung der treibenden Druckdifferenz. Der Massenstrom am Ventil ergibt sich gemäß

$$\begin{aligned} \dot{m}_L(t) &= \alpha_v A(h(t)) \sqrt{2 \frac{p_0(t)}{v_0(t)}} \psi \left(\frac{p(t)}{p_0(t)} \right) \quad (3) \end{aligned}$$

mit einem Form- und Polytropenkoeffizienten α_v , der freigesteuerten Querschnittsfläche am Ventilteller $A(h(t))$ sowie der Stromfunktion für unterkritische Druckverhältnisse

$$\begin{aligned} \psi \left(\frac{p(t)}{p_0(t)} \right) &= \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \sqrt{\left(\frac{p(t)}{p_0(t)} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p(t)}{p_0(t)} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}}} \quad (4) \end{aligned}$$

und für überkritische Druckverhältnisse

$$\psi_{max}(t) = \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa + 1}} \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{1}{\kappa-1}} \quad (5)$$

Die mit 0 indizierten intensiven Größen stellen die Quellenseite dar, also die Seite mit höherem Druckniveau.

Die Berechnung der Drücke und Temperaturen in Behälter, Verteilersystem und Zylindern (siehe Abbildung 5) erfolgt über die zeitlich diskretisierte Lösung der thermodynamischen Hauptsätze. Änderungen ergeben sich durch die Massenströme an den Anlassventilen bzw. dem Rückschlagventil, durch Wärmeverluste über die Zylinderwände sowie durch die Bewegung der Kolben, die veränderliche Zylindervolumina zur Folge hat. Die Kolbenbewegung folgt der Triebwerkskinematik, die im Wesentlichen die Charakteristik des Kurbeltriebes sowie die Verschränkung zwischen den Kurbelkröpfungen abbildet. Die Modellierung des Triebwerkes beinhaltet ferner die Dynamik des Systems, so dass die Anlage Beschleunigungen und Verzögerungen erfahren kann.

4 Funktionsweise des pneumatischen Betriebes

Der pneumatische Betrieb bezeichnet generell einen Betriebszustand, in dem Druckluft das Geschehen in den Zylindern beeinflusst. Das geschieht entweder zum Anlassen des Motors aus dem Stillstand oder zum Umsteuern, wobei der im Leerlauf befindliche Motor aus seiner aktuellen Drehrichtung bis zum Stillstand abgebremst und anschließend in die andere Drehrichtung beschleunigt wird.

Die Wirkung der Druckluft im pneumatischen Betrieb ist derart, dass der Druckverlauf im Zylinder gegenüber dem normalen ungefeuerten Leerlauf-/Schleppbetrieb verändert wird, um eine bremsende oder beschleunigende Wirkung auf das Triebwerk auszuüben. Der Zylinderdruckverlauf während eines Arbeitsspiels beim Schleppbetrieb,

wie er etwa während der langen Auslaufphase beim Notstopmanöver entsteht, ist in Abbildung 7 zu sehen. Dort ist in der Auftragung des Zylinderdruckes über dem Kurbelwinkel zu sehen, dass der Druckanstieg zur Druckabnahme völlig symmetrisch bezüglich des Oberen Totpunktes (OT) ist. Die zur Verdichtung der Luft aufgewendete Arbeit, die der rot dargestellten Fläche unter der Verdichtungsline entspricht, wird bei der anschließenden Entspannung vollständig an das Triebwerk zurückgegeben, wie die grüne Fläche zeigt. Die Bilanz über ein Arbeitsspiel, also eine Kurbelwellenumdrehung, ist demnach null und folglich wird der Motor weder beschleunigt noch verzögert.

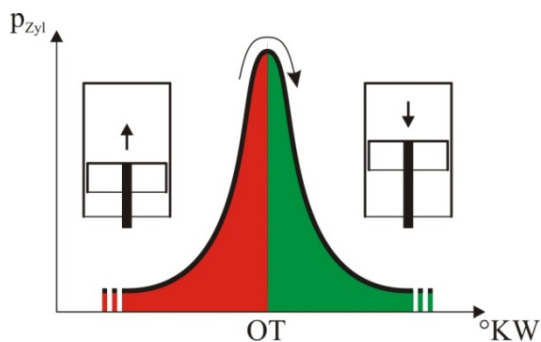


Abbildung 7. Zylinderdruckverlauf im Schleppbetrieb

Zum Zwecke des Abbremsens wird nun die Druckluft zu Hilfe genommen. Dazu wird das Anlassventil in einem Fenster in der Verdichtungs bewegung des Kolbens geöffnet, wie es in Abbildung 8 durch die gelb gestrichelten Linien gekennzeichnet ist. Der Druckverlauf im Schleppbetrieb ist dort zu Referenzzwecken gepunktet dargestellt. Sobald das Ventil öffnet, steigt der Zylinderdruck an, weil zusätzlich zur Verdichtung nun noch Luft in den Zylinder strömt. Sobald der Zylinderdruck den Druck der Anlassluft (anfänglich etwa 30 bar, im Bild als Druckniveau eingezeichnet) übersteigt, so strömt Luft aus dem Zylinder in die Leitung zurück und der Druckanstieg flacht ab. Wenn kurz vor dem OT das Ventil schließt, ist weniger Luft im Zylinder enthalten als beim Schleppbetrieb. Folglich ist der Verdichtungs enddruck im OT niedriger als im Schleppbetrieb und die anschließende Entspannung findet insgesamt auf niedrigerem Druckniveau statt, so dass die Entspannungsarbeit deutlich gegenüber der Schleppkurve verringert ist. Die Flächenfärbung ist so zu deuten, dass eine rote Fläche eine bremsende Wirkung, eine grüne Fläche hingegen eine beschleunigende Wirkung gegenüber dem Schleppverlauf darstellt. Aus der Bilanz der roten

und grünen Flächen ist nun leicht zu sehen, dass die roten Flächen überwiegen und damit, bilanziert über ein Arbeitsspiel, der Motor abgebremst wird.

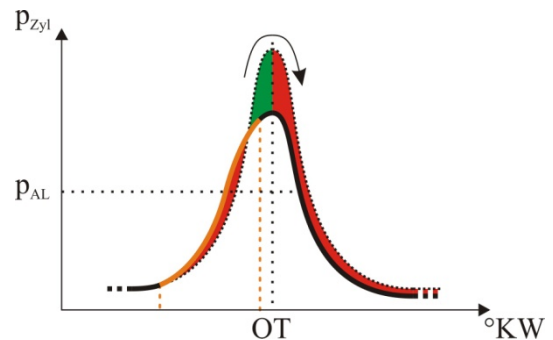


Abbildung 8. Zylinderdruckverlauf beim Abbremsen

Zum Zwecke des (Wieder-)anlassens bleiben alle Einstellungen bezüglich der Ventilsteuerzeit erhalten. Da sich der Motor nun aber andersherum drehen soll, ist damit aus Sicht des Kurbelwinkels die Ventilsteuerzeit am OT gespiegelt und befindet sich jetzt im Entspannungstakt, wie Abbildung 9 zeigt.

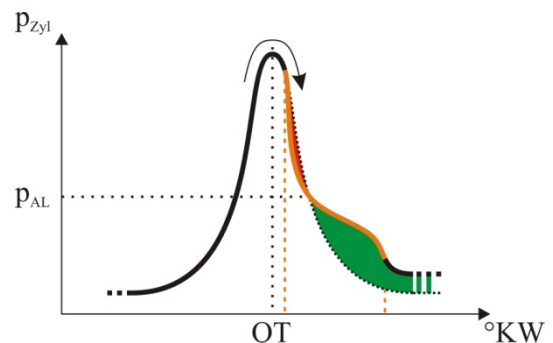


Abbildung 9. Zylinderdruckverlauf beim Anlassen

Kurz nach dem oberen Totpunkt, in dem der übliche Verdichtungs enddruck herrschte, öffnet das Anlassventil (siehe gelbe Linie). Da im Zylinder ein wesentlich höherer Druck herrscht als in der Verteilung, wird zunächst ein Teil der Luft aus dem Zylinder abgeblasen, so dass der Zylinderdruck einbricht (rote Fläche). Sobald im Zylinder der Druck der Anlassluft aber unterschritten wird, strömt nun eine deutlich größere Menge Luft in den Zylinder ein und weitet folglich den Druckverlauf auf, so dass zwischen Schlepp- und Anlassdruckverlauf die grün dargestellte Fläche aufgespannt wird. Diese überwiegt die rote Fläche, so dass die Gesamtbilanz über ein Arbeitsspiel positiv und der Motor folglich beschleunigt wird.

5 Berechnung des pneumatischen Umsteuerns

Die eben beschriebenen Vorgänge während des pneumatischen Umsteuerns, das sich aus den Teilen Abbremsen und Anlassen zusammensetzt, können mit Hilfe des Simulationsmodells berechnet werden. Ein Beispiel dafür ist in Abbildung 10 und Abbildung 11 dargestellt.

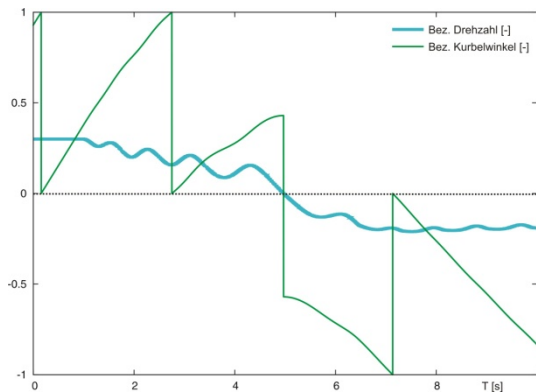


Abbildung 10. Umsteuern eines Vierzylindermotors, Drehzahl und Kurbelwinkel

In Abbildung 10 ist der Verlauf der bezogenen Drehzahl (blau) sowie des bezogenen Kurbelwinkels (grün, ein Sägezahn zwischen 0 und 1 entspricht einer Kurbelwellenumdrehung) für einen Vierzylindermotor über der Zeit aufgetragen. Etwa eine Sekunde nach dem Beginn der Aufzeichnung wird der pneumatische Betrieb ausgelöst, um den Motor aus einer Anfangsdrehzahl von 30% der Nenn Drehzahl umzusteuern. Die Druckluft sorgt dafür, dass der Motor unter einem ungleichmäßigen, stoßartigen Momentenverlauf, der durch die einzelnen Zylinder verursacht wird, innerhalb von etwa 4 Sekunden abgebremst und anschließend unter weicheren Momentenstößen wieder angehoben wird.

Am Verlauf des Kurbelwinkels ist zu erkennen, dass die Kurbelwelle von Beginn bis Stillstand nur etwas mehr als eine Umdrehung vollführt. Für das anschließende Beschleunigen wird gar weniger als eine Kurbelwellenumdrehung benötigt. Daraus wird deutlich, dass es sich bei diesen Vorgängen um hochgradig dynamische Zusammenhänge handelt. Es ist daher hier nicht nützlich, die in der Motorentechnik übliche Darstellung über dem Kurbelwinkel selbst zu wählen. Ein weiterer Grund dafür ist, dass Effekte, wie zum Beispiel der Massenstrom am Anlassventil, ausschließlich von den Druckverhältnissen und damit von der Zeit, nicht aber vom Kurbelwinkel abhängig sind. Daher

wurde hier und wird im Folgenden die Darstellung über der Zeit gewählt, in der die kurbelwinkelabhängigen Verläufe gemäß

$$y(\varphi) \xrightarrow{\varphi(t)=\varphi_0+\int_{t_0}^t \omega(t)dt} y(t) \quad (6)$$

ebenfalls in Funktionen der Zeit transformiert sind.

Abbildung 11 zeigt den Druckverlauf in einem der vier Zylinder (dunkelblau), den Massenstrom der Druckluft am Anlassventil des Zylinders (magenta), sowie die Druckverläufe des Behälters (orange) und der Verteilleitung (grün).

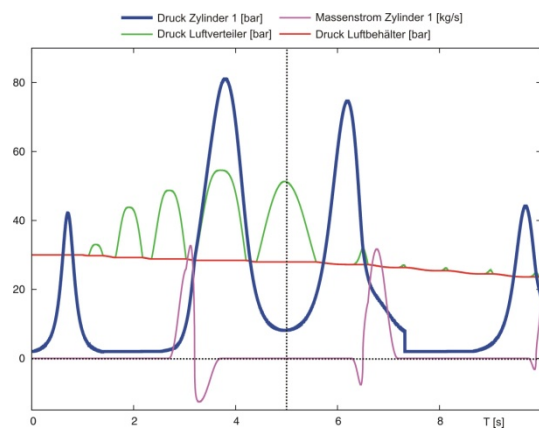


Abbildung 11. Umsteuern eines Vierzylindermotors, Druckverläufe und Ventilmassenstrom

Der Zylinderdruckverlauf zeigt zunächst einen symmetrischen Verdichtungs- und Entspannungsverlauf gemäß dem Schleppbetrieb. Der pneumatische Betrieb wird ja erst nach einer Sekunde, und damit im Entspannungstakt, ausgelöst und hat somit noch keinen Einfluss auf dieses Arbeitsspiel. Nach knapp drei Sekunden, also im darauffolgenden Verdichtungstakt, öffnet das Anlassventil. Am Massenstromverlauf ist zu erkennen, wie Luft in den Zylinder einströmt. Am Schnittpunkt des Zylinderdruckes mit dem Behälter-/Verteilerdruck wird der Massenstrom rasch negativ, es strömt also Luft zurück in die Verteilleitung. Dennoch ist zum Zeitpunkt des Ventilschlusses mehr Luft im Zylinder verblieben, als im Schleppbetrieb enthalten war. Folglich fällt der Verdichtungsdruck höher aus. Der Stillstand nach 5 Sekunden ist durch die senkrechte, gestrichelte Linie gekennzeichnet. Der Kolben befindet sich in dem Moment fast am Entspannungsende. Ab hier kehrt sich die Laufrichtung um, der Kolben verdichtet und erreicht einen Verdichtungsdruck, der gegenüber dem vorherigen etwas niedriger ist. Dies

ist bedingt durch die Wärmeverluste über die Brennraumwandung und den Kolbenboden. Kurz nach dem OT öffnet nun das Anlassventil, woraufhin zunächst etwas Luft aus dem Zylinder abgeblasen wird. Nach Unterschreitung des Verteilerdruckes im Zylinder (Schnittpunkt der blauen mit der orangefarbenen Linie) strömt nun eine große Menge Luft in den Zylinder, die etwa an dem Flächeninhalt unter der Massenstromlinie abgeschätzt werden kann. Der Druckverlauf weitet sich dadurch auf, der Motor erfährt eine Beschleunigung. Dieser berechnete Verlauf entspricht den in Abbildung 8 und Abbildung 9 schematisch erläuterten Abläufen.

Der Druck im Luftbehälter (orange) sinkt während des Verlaufes immer weiter ab, was auf einen durchgängigen Luftverbrauch während des gesamten Umsteuervorganges hindeutet. An den Stufen im Verlauf kann man erkennen, wie die einzelnen Zylinder während ihres jeweiligen Ventilöffnungsfensters Luft entnehmen. Während des Abbremsens erfährt die Verteilleitung (grün) stoßartige Druckzunahmen. Das liegt daran, dass beim Bremsen Luft in die Verteilleitung abgeblasen wird und einen Druckanstieg verursacht, der erst durch den nächsten öffnenden Zylinder wieder abgebaut wird. Da die Verteilleitung vom Zylinder durch ein Rückschlagventil getrennt ist (siehe Abbildung 5), entstehen in dem relativ kleinen Volumen der Verteilleitung recht hohe Drücke. Im Anlassbetrieb hingegen wird fast ausschließlich Luft aus der Leitung entnommen, so dass dabei nur sehr kleine Druckpulse in der Verteilleitung entstehen.

6 Berechnung des Notstopp-Manövers

Um nicht nur den eben beschriebenen Umsteuervorgang, sondern das ganze Manöver berechnen zu können, wird die Umsteuer-Simulation in das Methoden-Datenbanksystem E4 integriert, das am Institut für Entwerfen von Schiffen und Schiffssicherheit an der Technischen Universität Hamburg-Harburg entwickelt wird.

Die Berechnung wird am Beispiel eines Containerschiffes mit einer Ladekapazität von 8200 TEU gezeigt, das unter Probefahrtbedingungen aus einer Anfangsgeschwindigkeit von 25,6 kn aufgestoppt werden soll. Umgesteuert wird dabei ein Zwölfzylindermotor, der zu Beginn seine Nennleistung von etwa 64,5 MW erzeugt.

In Abbildung 12 ist der simulierte Verlauf des Notstopp-Manövers zu sehen.

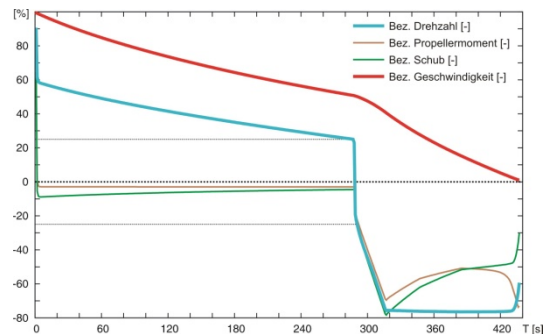


Abbildung 12. Berechneter Verlauf des Notstopp-Manövers eines 8200TEU-Containerschiffes

Die rote Linie der Schiffsgeschwindigkeit sowie die blaue Linie der Propellerwellendrehzahl zeigen eine qualitativ sehr gute Übereinstimmung mit den schematischen Verläufen aus Abbildung 2. Zudem ist in braun das Propellermoment und in grün der Propellerschub aufgetragen. Während der Auslaufphase zeigt das Propellermoment einen konstanten Wert von -3% (bezogen auf das Nennmoment des Motors), der als Randbedingung für den leerlaufenden Motor in der Simulation vorgegeben wurde und das Reib- oder Verlustmoment des Motortriebwerkes repräsentiert. Dieses geringe Reibmoment bewirkt am Propeller einen Bremsschub, der zwar im Vergleich zum Moment deutlich höher ist, aber in Bezug auf den Nennschub mit anfänglich knapp 10% recht niedrig ist und mit sinkender Schiffsgeschwindigkeit noch weiter abnimmt. Daran ist zu erkennen, dass der Propeller nur einen geringen Beitrag zur Verzögerung des Schiffes leistet, bis die Anlage umgesteuert wird.

Abbildung 13 zeigt den bei der Werftprobefahrt dieses Schiffes gemessenen Manöververlauf, in dem wieder in rot die Schiffsgeschwindigkeit sowie in blau die Propellerwellendrehzahl dargestellt ist.

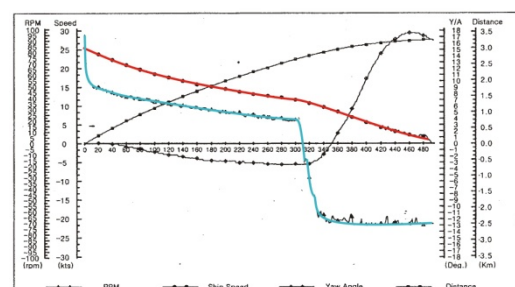


Abbildung 13. Gemessener Verlauf des Notstopp-Manövers eines 8200TEU-Containerschiffes

Hier ist neben der qualitativen auch die quantitative Übereinstimmung mit dem berechneten Verlauf zu beachten: Der Umsteuerzeitpunkt wurde nach etwas mehr als 5 Minuten gemessen und wird in der Rechnung auf 15 Sekunden genau getroffen. Der Zeitpunkt, in dem das Schiff den Stillstand erreicht, liegt in der Messung bei etwa 8 Minuten und in der Rechnung bei etwas mehr als 7,5 Minuten. Allerdings ist es in der Praxis schwierig, den absoluten Stillstand des Schiffes von sehr kleinen Geschwindigkeiten zu unterscheiden, so dass bereits in der Messung eine gewisse Ungenauigkeit zu erwarten ist. Das Schiff legte während des Manövers eine gemessene Strecke von 3,2 km zurück. Der berechnete Stopweg beträgt 3,124 km, was einer Abweichung von weniger als 2% entspricht.

7 Optimierungsansätze

In Kapitel 2 wurden zwei in Frage kommende Optimierungsansätze vorgestellt, deren mögliche Umsetzung im Folgenden diskutiert werden soll.

7.1 Erhöhung der Umsteuerdrehzahl

Als erstes wurde eine Erhöhung der Umsteuerdrehzahl vorgeschlagen, deren Auswirkungen in Abbildung 3 gezeigt sind. Grundsätzlich ist es möglich, den pneumatischen Betrieb und damit das Umsteuern beliebig früh auszulösen. Zumindest das Abbremsen des Motors aus hohen Drehzahlen dürfte auch in den meisten Fällen – wenngleich nicht so spontan - gelingen. Zwei Gründe sprechen aber gegen diesen Ansatz: Erstens sind die Zeitfenster, die für das Einströmen der Anlassluft (hier sollte besser von Bremsluft gesprochen werden) zur Verfügung stehen, bei hohen Drehzahlen recht kurz. Folglich ist das zu erzielende Bremsmoment bei hohen Drehzahlen deutlich kleiner als bei niedrigen. Zweitens wird in jedem Falle bei einem früheren Beginn des pneumatischen Betriebes bis zum Stillstand mehr Luft verbraucht. Da die Druckluft jedoch nur in endlicher Menge zur Verfügung steht, besteht die Gefahr, dass der Druck zum Anlassen des Motors in umgekehrter Drehrichtung nicht mehr ausreicht. Das Anlassen jedoch ist der Teil, der für das Aufstoppen des Schiffes wesentlich ist. Man würde also unter Umständen das Gelingen des Manövers und folglich das Schiff gefährden.

Um dennoch die mögliche Umsteuerdrehzahl zu erhöhen, ohne mehr Luft zu verbrauchen, muss ein Weg gefunden werden, wie die zur Verfügung stehende Luft effizienter genutzt werden kann.

Eine Möglichkeit ist, die Ventilsteuerung derart zu verändern, dass die Bremswirkung der Luft prinzipiell anders erzeugt wird. Dieses Prinzip soll berücksichtigen, dass während des Öffnungsfensters des Anlassventiles die treibende Druckdifferenz umgekehrt wird. Zunächst wird ja Luft in den Zylinder eingeblasen (vgl. Abbildung 8). Da der Druck im Zylinder aber bedingt durch die Kolbenbewegung rasch ansteigt, übersteigt er bald den Druck in der Verteilung und Luft strömt in dieselbe zurück. Die Änderung besteht nun darin, diesen letzten Teil zu unterbinden, indem die Konstruktion der Ventilgeometrie es ermöglicht, im Moment des Druckausgleiches zwischen Verteilung und Zylinder das Ventil zu schließen. In Abbildung 14 ist schematisch dargestellt, wie sich der weitere Zylinderdruckverlauf verhält.

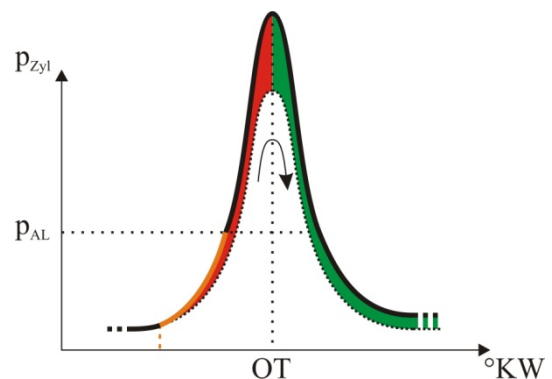


Abbildung 14. Zylinderdruckverlauf beim Abbremsen mit geänderter Steuerlogik

Der durch die eingeströmte Luft erhöhte Druck ist im Moment des Ventilschlusses im Zylinder gefangen. Anstatt nun wieder abzufließen, wird die Luft, ausgehend von diesem hohen Druck bezüglich des aktuellen Kurbelwinkels, polytrop verdichtet und somit ein Verdichtungsdruck erreicht, der deutlich höher ist als im Schlepptrieb. Der Motor erfährt folglich während dieses Taktes ein erhebliches Bremsmoment, das wesentlich wirksamer ist als nach dem herkömmlichen Verfahren. Allerdings wird die Luft jenseits des OT auch polytrop entspannt, und zwar nicht nur bis auf die ca. 30 bar der Anlassluft, sondern ganz bis zu dem Punkt, in dem das Auslassventil öffnet. Wie an den Flächenverhältnissen in Abbildung 14 zu sehen ist, ist die dabei freigegebene Arbeit deutlich größer als

die aufgenommene, sodass die Bilanz über ein Arbeitsspiel eine Beschleunigung des Motors bedeutet. Wenn also der Motor in dieser Betriebsart aufgrund seines Schwunges oder des Propellermomentes gezwungen ist, eine volle Umdrehung zu vollführen, so wird er beschleunigt anstatt gebremst. An Abbildung 10 war allerdings zu erkennen, dass das Winkelfenster zum Anhalten des Motors nur etwas mehr als eine Umdrehung beträgt. Die nach dem geänderten Verfahren erhöhte Wirksamkeit lässt demnach vermuten, dass damit das Laufzeug eben genau binnen weniger als einer ganzen Umdrehung anzuhalten sein müsste. In dem Fall würde das Bilanzproblem umgangen und die hohe Bremswirkung des Verdichtungsstaktes könnte genutzt werden. Anschließend an den Stillstand würde die gesamte Energie, die in Form von Druck als potentielle Energie in der Luft gespeichert ist, zur Beschleunigung in umgekehrter Drehrichtung freigegeben werden. Der Motor würde sich von vorwärts nach rückwärts also an der Luft „abfedern“ und es müsste zum konventionellen weiteren Beschleunigen kaum noch Anlassluft aufgewendet werden.

Abbildung 15 zeigt am Beispiel des Vierzylindermotors, wie sich das Verfahren auf den Drehzahlverlauf auswirkt.

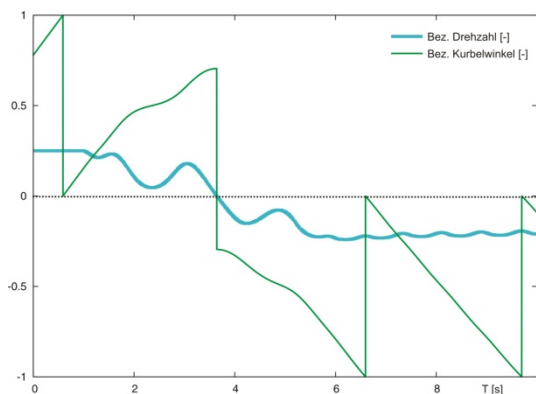


Abbildung 15. Umsteuern eines Vierzylindermotors mit geänderter Ventillogik

Die Momentenstöße beim Abbremsen sowie der erste Stoß nach dem Stillstand fallen kräftiger aus als bei dem herkömmlichen Verfahren (vgl. Abbildung 10), was die höhere Wirksamkeit bestätigt. Folglich kommt der Motor, wie erwartet, nach weniger als einer Umdrehung zum stehen. Die Anfangsdrehzahl musste hier mit 25% der Nenn Drehzahl allerdings etwas niedriger gewählt werden, als im vorangegangenen Beispiel. Bei höheren Drehzahlen wird die volle Umdrehung überschritten und der Motor, wie zu erwarten,

beschleunigt anstatt gebremst. Somit kann folgendes festgehalten werden: Das veränderte Verfahren funktioniert und ist auch wirkungsvoller bzw. effizienter als das herkömmliche. Allerdings existiert eine natürliche Drehzahlgrenze, oberhalb der mit dem veränderten Verfahren der gegenteilige Effekt erzielt wird. Bei welcher Drehzahl diese Grenze liegt, hängt von der jeweiligen Anwendung ab und kann nicht allgemein festgelegt werden. Zumindest ist eine beliebige Erhöhung der Umsteuerdrehzahl mit diesem Verfahren nicht möglich.

7.2 Erhöhung des Bremsmomentes

Der zweite Ansatz aus Kapitel 2 sah vor, das Bremsmoment an der Propellerwelle zu erhöhen, was den in Abbildung 4 gezeigten Effekt auf den Bremsweg des Schiffes hat.

Passend zu den vorherigen Untersuchungen soll auch für diesen Zweck eine motorinterne Maßnahme zum Einsatz kommen. Im Gegensatz zu den Verfahren zum pneumatischen Abbremsen aus niedrigen Drehzahlen bis zum Stillstand soll die Maßnahme in der Lage sein, über eine beliebig lange Zeit und schon bei beliebig hohen Drehzahlen ein genau kontrollierbares Bremsmoment zu erzeugen, um eben möglichst während der gesamten Auslaufphase den Propeller zu hemmen. An Abbildung 16 soll der theoretische Ablauf eines Arbeitsspieles verdeutlicht werden. Dazu ist der Zylinderdruck über dem Zylindervolumen aufgetragen, wie es bei der Darstellung von thermodynamischen Kreisprozessen üblich ist.

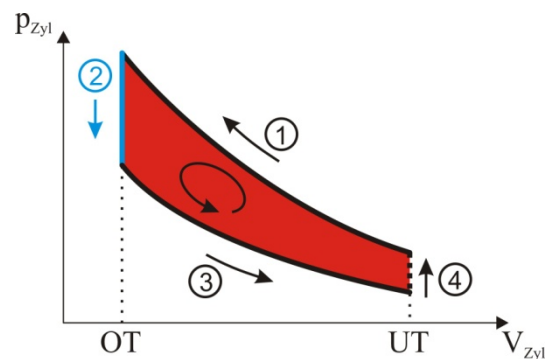


Abbildung 16. Theoretischer Kreisprozess beim Bremsen

Der Vorgang beginnt gemäß den vorangegangenen Beispielen im Unteren Totpunkt. Die Aufwärtsbewegung des Kolbens (1) bewirkt eine polytrope Verdichtung, die im Oberen Totpunkt im Verdichtungsenddruck gipfelt. Im Schlepfbetrieb

würde sich der Kolben entlang derselben Drucklinie wieder abwärts bewegen. Im gefeuerten Betrieb würde die Einspritzung und Verbrennung des Kraftstoffes für eine Temperatur- und folglich eine Druckerhöhung sorgen. Stattdessen muss nun aber genau das Gegenteil erreicht werden, nämlich dass Wärme in hohem Maße abgeführt bzw. absorbiert wird, was eine Temperatur- und damit verbunden eine Druckabnahme zur Folge hat (2). Das Hilfsmittel hierzu ist Wasser, das durch eine oder mehrere zusätzliche im Zylinderdeckel vorgesehene Einspritzdüsen im OT eingespritzt wird. Das Wasser trifft in die heiße Umgebung der hochverdichteten Luft, die eine Temperatur im Bereich von 600...800°C hat. Das Wasser verdunstet und nimmt dazu seine Verdampfungsenthalpie aus der Luft auf, in der folglich Temperatur und Druck, wie gewünscht, sinken. Die anschließende polytrope Entspannung (3) findet auf deutlich niedrigerem Druckniveau statt. Es entsteht ein linksläufiger Kreisprozess, der mechanische Energie aufnimmt und folglich das System bremst. Der Gaswechsel findet in der Darstellung näherungsweise im UT statt (4), wie es üblicherweise bei idealisierten Kreisprozessen angenommen wird.

In Abbildung 17 ist dieser Prozess zusätzlich in der gewohnten Auftragung des Druckes über dem Kurbelwinkel dargestellt. Bis zum OT entspricht der Druckverlauf dem beim Schleppbetrieb. Im OT wird der Druck durch die Wassereinspritzung und -verdunstung spontan gesenkt. Das Druckniveau der anschließenden Entspannung liegt damit niedriger als beim Schleppbetrieb. Die rot dargestellten Flächen in Abbildung 16 und Abbildung 17 entsprechen jeweils sinnhaft der je Arbeitsspiel aufgenommenen mechanischen Energie und damit der Bremswirkung.

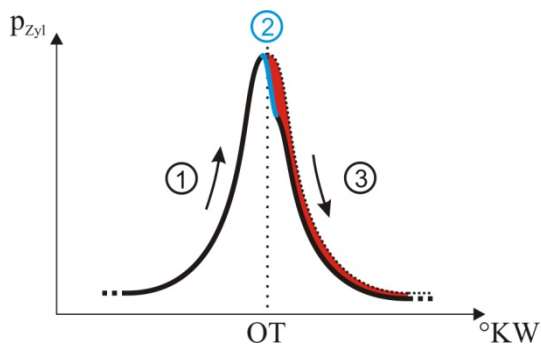


Abbildung 17. Zylinderdruckverlauf beim Abbremsen mittels Wassereinspritzung

Dieser Vorgang kann beliebig oft und lange wiederholt und so eine kontinuierliche

Bremswirkung auf die Propellerwelle ausgeübt werden, deren Höhe in direktem Zusammenhang mit der pro Arbeitsspiel und Zylinder eingespritzten Wassermenge steht.

Die wesentlichen Vorteile des Verfahrens liegen zum einen darin, dass eine äußere Kühlung umgangen wird. Eine Kühlung, die derart große Wandwärmestromdichten über die Brennraumwände realisieren kann, wie sie für einen solch raschen Druckabfall nötig wären, ist technisch nicht realisierbar. Stattdessen wird die sensible Energie in der Luft, die für den hohen Druck verantwortlich ist, in Form von latenter Energie (i. e. Verdampfungsenthalpie) gebunden. Die aufgenommene (zunächst mechanische und anschließend thermische) Energie befindet sich bis zum Gaswechsel im Zylinder und wird über die Abgasleitung an die Umwelt abgegeben. Das Kühlsystem des Schiffes wird dabei nicht belastet. Des Weiteren wirkt dieser Prozess im Gegensatz zu den bisher vorgestellten Bremsverfahren sowohl mechanisch als auch thermisch entlastend für den Motor, da die anfallende Verdichtungsarbeit zu Bremszwecken genutzt und die Entspannungsarbeit durch Druckabbau reduziert wird. Außerdem ist Wasser wegen seiner hohen Dichte wesentlich platzsparender zu speichern und stellt dabei keine Gefahr dar, wie sie von gespannter Luft ausgeht.

Um die Wirkung dieses Verfahrens zu verdeutlichen, sei auf das Beispiel des Containerschiffes aus Kapitel 6 zurückgegriffen. Das Reibmoment in dem Beispiel betrug 3% des Motor-Nennmomentes. Der Einfachheit halber wird angenommen, dass zu Bremszwecken dieselbe Menge Wasser je Arbeitsspiel und Zylinder eingespritzt wird, die im gefeuerten Betrieb bei voller Leistung in Form von Kraftstoff eingespritzt wird. Aufgrund des Verhältnisses zwischen der spez. Verdampfungsenthalpie von Wasser zum spezifischen Heizwert von Kraftstoff, das i. e. N. 1/20 beträgt, wird mit dieser Wassermenge näherungsweise ein motorisches Bremsmoment von 5% erzeugt. Das am Propeller wirkende Bremsmoment summiert sich demnach zu 8% des Nennmomentes. Auf Grundlage dieses Wertes wird das Manöver erneut berechnet und beide Verläufe zum Vergleich in Abbildung 18 dargestellt.

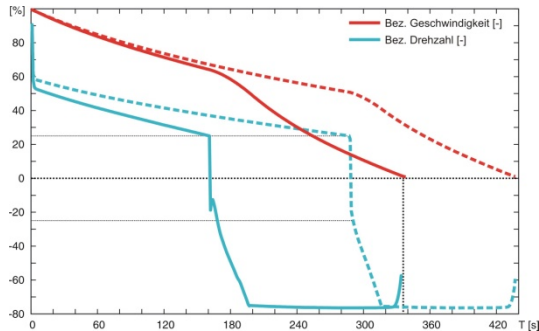


Abbildung 18. Berechneter Verlauf des Notstopp-Manövers eines 8200TEU-Containerschiffes; mit reinem Reibmoment (gestrichelt) und mit zusätzlichem Bremsmoment durch Wassereinspritzung (durchgezogen)

Dabei ist zunächst an der blauen Drehzahllinie zu erkennen, dass durch die nur moderate Erhöhung des Bremsmomentes am Propeller der Zeitpunkt, in dem die Umsteuerdrehzahl erreicht wird, bereits 130s früher erreicht wird. Das Schiff kommt dadurch 100s früher zum stehen. Das ursprüngliche Manöver dauerte etwa 440s, so dass durch die Bremsmomenterhöhung eine relative zeitliche Verkürzung von etwa 23% erreicht wird. Vor allem aber die Einsparung beim zurückgelegten Stoppweg, die an der Fläche zwischen der durchgezogenen und der gestrichelten roten Linie abgeschätzt werden kann, beträgt über 25%.

8 Zusammenfassung

Das Notstopp-Manöver von Schiffen mit langsamlaufenden Zweitaktmotoren wurde in seinen charakteristischen Phasen diskutiert und die

Zusammenhänge aufgezeigt, die hauptsächlich für die langen Stoppwege solcher Schiffe verantwortlich sind. Um die motorseitigen Vorgänge zu beleuchten, wurde ein Simulationsmodell vorgestellt, das die Bestandteile der Motorenanlage enthält, die für das pneumatische Umsteuern wesentlich sind. Deren physikalische Wirkungsweise wurde qualitativ beschrieben, um die Vorgänge beim Abbremsen und beim Anlassen des Motors zu verdeutlichen. Anschließend wurden diese Vorgänge an einem Beispiel, das mit dem Simulationsmodell berechnet wurde, demonstriert. Um auch quantitative Aussagen über deren Einfluss auf das Notstopp-Manöver treffen zu können, wurde die Motorsimulation in eine Manöversimulationsroutine eingebettet, die im Methodendatenbanksystem E4 enthalten ist. Das Notstopp-Manöver wurde am Beispiel eines Containerschiffes berechnet und mit Messergebnissen der Probefahrt verglichen. Zuletzt wurden zwei Ansätze vorgestellt, die das mögliche Optimierungspotenzial des Manöververlaufes von Seiten des Motors ausschöpfen. Zum einen sollte die Umsteuerdrehzahl erhöht werden. Über den Erfolg dieser Maßnahme kann aber pauschal keine Aussage getroffen werden, denn der möglichen Erhöhung stehen natürliche Grenzen gegenüber. Zum anderen wurde ein Vorschlag gemacht, mittels einer gezielten Wassereinspritzung in die Zylinder während der Auslaufphase ein Bremsmoment an der Propellerwelle zu erzeugen, das den Stoppweg des Schiffes wesentlich zu verkürzen vermag.

Erörterungen:

Dr.-Ing. Richard Dien, Hamburg

- Hinweis auf die Gleitkonstante des Schiffes

$$\frac{v}{v_0} = \frac{1}{1 + \frac{t}{T_0}}$$
 mit $T_0 = \frac{mv}{R}$
- Hinweis auf das 4-Quadranten-Verhalten von Propellern, Wageninger Versuche um 1920
- Hinweis auf Darstellung des Notstopp-Verlaufes in Robinson-Kurven

Prof. Dr.-Ing. Günther Ackermann, Technische Universität Hamburg-Harburg

Herr Wirz, Sie haben ausgeführt, dass selbst relativ kleine bremsende Momente wie z. B. die innere Motorreibung den Stoppweg deutlich beeinflussen. Gibt es Überlegungen, einen Wellengenerator oder auch die Einrichtungen eines Waste- Heat-Recovery Systems aktiv zu nutzen, um den Stoppweg zu verkleinern?

Dipl.-Ing. Friedrich Wirz, Hamburg (Schlusswort)

Zum Diskussionsbeitrag von Herrn Dr. Dien

Die von Ihnen erwähnten Zusammenhänge zwischen anfänglicher Schiffsgeschwindigkeit und der Auslaufdauer sind ein anschaulicher Ansatz auf Grundlage der kinetischen Energie, wie der Einfluss der Parameter Schiffsmasse und –geschwindigkeit bzw. nomineller Antriebsleistung deutlich gemacht werden kann. Allerdings bezieht sich dieser Ansatz nur auf ein Schiff, das unter abgeschalteter Antriebsanlage ohne aktive Bremshilfen seine Geschwindigkeit verringert. Das wird deutlich, wenn man den Grenzwert $v \rightarrow 0$ erreichen möchte: Dieser wird erst zur Zeit $t \rightarrow \infty$ erreicht. Der Ansatz kann also nur, und auch nur in erster Näherung, auf die Auslaufphase des Schiffes angewandt werden und auch dann nur, wenn dem im Motorleerlauf mitdrehenden Propeller keinerlei Bremswirkung zugesagt wird. Sobald die Antriebsanlage aber aktiv in das Notstopp-Manöver eingreift, wie es in der Regel der Fall ist, treffen diese einfachen Zusammenhänge nicht mehr zu.

Die Wageningen Propellerkurven sind auch heute noch ein durchaus wichtiger Bestandteil solcher Untersuchungen. Sie hinterliegen als Referenz dem Methodendatenbanksystem E4 und sind damit die Basis für die Berechnung der Momenten- und Schubbeiwerte des Propellers in der hier vorgestellten Simulation.

Die Robinsonturven hingegen verlieren in ihrer didaktischen Funktion immer mehr an Bedeutung. Sie stellen zwar die Zusammenhänge zwischen Schiffsgeschwindigkeit, Propellermoment und Propellerdrehzahl vollständig dar, allerdings vermitteln sie kaum ein Gefühl für den Einfluss der Zusammenhänge auf den zeitlichen Ablauf des Manövers. Dies ist aber für die Beurteilung des Notstopp-Manövers von entscheidender

Wichtigkeit, so dass im vorliegenden Artikel nur Darstellungen über der Zeit gewählt wurden, die jeweils Rückschlüsse auf die zurückgelegte Strecke des Schiffes erkennen lassen.

Zum Diskussionsbeitrag von Herrn Prof. Ackermann

Solche Überlegungen gibt es in der Tat. Generell gibt es diverse Ansätze, den Stoppweg mit Hilfe von Bremsvorrichtungen auf der Propellerwelle zu verkürzen. Mechanische oder hydraulische Bremsen zum Beispiel würden aber in jedem Falle dazu führen, dass spontan während der mehrminütigen Auslaufphase hohe Wärmeleistungen anfallen würden, die über eine geeignete Kühlstelle an das Kühlsystem übergeben und abgeführt werden müssten. Die anfallenden Wärmeleistungen lägen im Bereich von 5...10% der Motor-Nennleistung und damit bei mehreren Megawatt. Herkömmliche Kühlsysteme sind ohne Weiteres nicht in der Lage, solche hohen und kurzzeitig auftretenden Leistungen zu bewältigen. Eine elektrische Bremsvorrichtung, wie Sie sie angesprochen haben, müsste die anfallende Leistung entweder über Widerstände dissipieren, was in Konsequenz ebenfalls zu den oben erwähnten Kühlproblemen führen würde. Oder die erzeugte elektrische Leistung müsste im Bordnetz verbraucht werden. Dies erscheint mir aufgrund der hohen Leistung einerseits und der kurzen Auftretensdauer andererseits sowohl regelungstechnisch als auch aus Sicht des Energiemanagements schwierig. Die Energie, die durch die erwähnte innermotorische Maßnahme aufgenommen wird, wird hingegen über die Abgasleitung an die Umgebung abgeführt, ohne dabei das Kühlsystem oder das elektrische Bordnetz zu belasten.