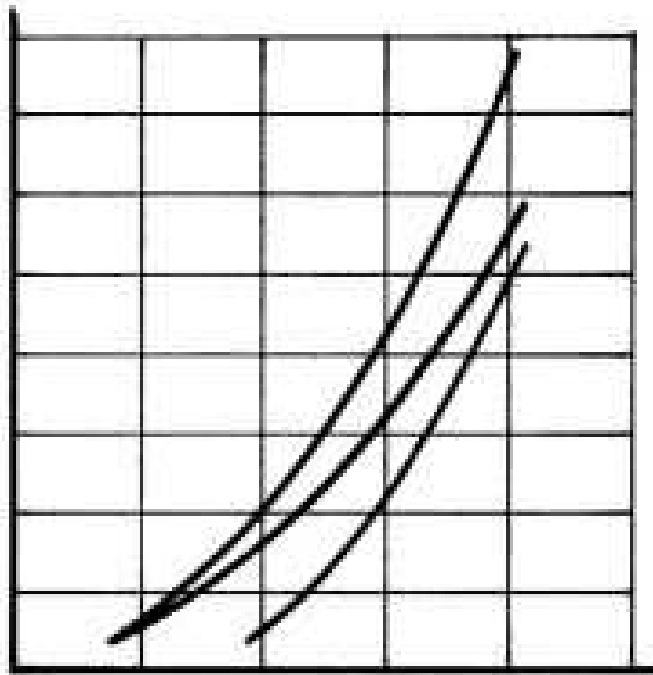


Wolfgang Walter

Lenkdrachen als Schiffs-Zusatzantrieb



Bremen 2011

Wolfgang Walter

Lenkdrachen als Schiffs-Zusatzantrieb

The paper considers the actual wind distribution available for ships equipped with a traction kite as an auxiliary means of propulsion on various routes. It also investigates the practical and legal effects kite propulsion may have. Finally it states that auxiliary kite propulsion cannot achieve a reasonable commercial return on its investment, because various factors restrict its use. These factors are addressed.

Vorbemerkungen

In der Diskussion um den möglichen Nutzen eines Lenkdrachens als Zusatzantrieb für Seeschiffe tauchten in den letzten Jahren zahlreiche Argumente auf, die in ähnlicher Form bereits vor 150 Jahren besprochen worden sind. Dies ist insofern interessant, als demnach auch bei der Lösung moderner Umweltprobleme immer noch Erkenntnisse aus längst vergangenen Zeiten relevant sind. Es geht hier vorrangig um Fragen, die vor Zeiten beim Betrieb von großen Segelschiffen eine wichtige Rolle gespielt haben. Genau diese Fragen sind aber auch heute noch wichtig, weil der Wind als Antriebsquelle, jetzt zwar als untergeordnete Hilfsquelle, immer noch den Gesetzen aus Urzeiten gehorcht.

Diese früheren Diskussionen und Untersuchungen sind heute naturgemäß weitgehend in Vergessenheit geraten. Da sie aber immer noch einen großen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit von Windantriebs-Systemen von Schiffen haben können, sollen hier einige dieser alten Erkenntnisse wieder ins Bewusstsein gerufen werden. Sie alle münden in der äußerst bedeutsamen Aussage, dass der Wind als Antriebsquelle für Schiffe eine höchst ungewisse Kraftquelle ist, weil seine Stärke und Richtung unberechenbar und selten stetig sind. Dies gilt vor allem dann, wenn das Schiff nicht seinen günstigsten Wind suchen kann, weil es an einen starren Kurs gebunden ist.

So war beispielsweise die Dauer einer Segelschiffsreise unvorhersehbar, weil die tatsächlich in den Segeln nutzbare Leistung des Windes nicht konstant war wie heute die Leistung einer Hauptmaschine. Damit war auch die Geschwindigkeit eines Seglers nicht vorhersehbar. In der Diskussion von Segelschiffsreisen wurden daher allgemein nur noch besonders große, ins Auge fallende Geschwindigkeiten betrachtet. Ein ums andere Mal wurde auf diese Weise nicht mehr das Gesamtbild der Leistungsfähigkeit eines Segelschiffes diskutiert, sondern es wurden nur Ausschnitte dieses Bildes beleuchtet und das Gesamtbild selbst als unabänderlich hingenommen. So wurde dann die Dauer der Reise schon früher schöngeredet: "wenn da nicht die Flaudentage in den Doldrums¹ gewesen wären ...", oder "das schlechte Wetter im Atlantik ..."

Genau das gleiche Bild bietet sich heute bei den Diskussionen zum Lenkdrachen als Schiffs-Zusatzantrieb unter dem modernen Schlagwort "Umweltschonung". In den spärlichen Berichten über tatsächliche Betriebseinsätze dienen jetzt Aussagen² wie "zu heftige Dünung", "schwere See", "das Schiff spielte im Seegang verrückt" oder "Flaute" dazu, das ganz normale Verhalten eines Schiffes im Seegang als Hinderungsgrund für den Einsatz eines Lenkdrachens vorzuschieben. Stattdessen werden "Ersparnisse" ohne jeden Bezug zu realen Messwerten hochgerechnet.

¹ Den Zonen der Windstille beiderseits des Äquators

² Weser-Kurier, März/April 2008.

Der Lenkdrachen kann unter idealen Bedingungen beachtliche Leistungen erzielen. Aber auch er muss sich den unkontrollierbaren Kräften der Natur fügen. Im Folgenden sollen nun einige aus der Segelschiffszeit bekannte Tatsachen erneut dargestellt werden, die zum Teil erheblichen Einfluss auf den Erfolg eines Lenkdrachens als Schiffs-Zusatzantrieb haben werden. Die nachfolgenden Ausführungen stützen sich im Wesentlichen auf die Arbeit von Naaijen/Koster/Dallinga³ über Lenkdrachen, auf die Gedanken von Maury und Prager zum Betrieb von Segelschiffen sowie auf einige eigene Arbeiten.

Der Autor dankt speziell Mr. P. Naaijen, Delft University of Technology, für die freundliche Genehmigung zur Benutzung seiner Arbeit für die hier weiterführenden Untersuchungen.

Die Arbeit wurde noch nach den früher gültigen Einheiten kg und t für die Kraft konzipiert. Für die Umrechnung in die heute gültigen Maßeinheiten N und kN kann überschlägig gerechnet werden : 1 kg \approx 10 N bzw. 1 t \approx 10 kN.

Die Häufigkeit des Windes

Wenn ein Antriebssystem für Schiffe vom Wind abhängig ist, dann ist die erste und wichtigste Frage zu seinem Nutzen, wie viel Wind auf der bevorstehenden Reise zu erwarten ist. Das konnte früher niemand genau sagen, und auch heute ist eine Vorhersage für längere Reisen nicht möglich. Dagegen gibt es aber als Hilfsmittel heute sowohl statistische Untersuchungen über die Windverhältnisse auf den Weltmeeren als auch Auswertungen tatsächlicher Schiffsreisen, die eine durchaus plausible Aussage zunächst zur Häufigkeit der Windstärken auf den Weltmeeren ermöglichen⁴.

Eine Zusammenstellung der relativen Windverteilung in verschiedenen Fahrtgebieten bietet Tabelle 1 auf der nächsten Seite. Die Zahlen geben den prozentualen Anteil der jeweiligen Windstärke an der Gesamtzahl der Beobachtungen bzw. Wachen wieder. Die Werte der Spalten 4 bis 7 aus der Praxis wurden sorgfältig geprüft und hier nur dann verwendet, wenn die Windstärke während einer Wache praktisch konstant war. Dies war nur bei etwa der Hälfte der vorhandenen Beobachtungen der Fall, bei den übrigen änderte sich die Windstärke signifikant selbst innerhalb einer Wache von vier Stunden Dauer.

Die einzelnen Spalten gehören zu:

1. 3535 Wetterbeobachtungen in Ostsee, Nordsee und im Europäischen Nordmeer, 1949⁵
2. 7583 Wetterbeobachtungen im Nordatlantik zwischen Grönland und Biskaya, 1949
3. 2130 Wetterbeobachtungen im Mittelatlantik bis zur Küste der USA, 1949
4. 2267 Wachen Feederschiff RABAT im Fahrtgebiet Europa – Marokko, 1994⁶
5. 3000 Wachen Viermastbarken HERZOGIN CECILIE und PLACILLA, 1932, 1892
6. 1000 Wachen Fünfmastvollschiff PREUSSEN, 1903-1910⁷
7. 2640 Wachen von 4 VLCCs⁸, Rotterdam–Ras Tanura um das Kap der Guten Hoffnung, 1971/72
8. Nach Zahl der Beobachtungen gewichtetes Mittel der Spalten 1 bis 4
9. Mittlere Windgeschwindigkeit in m/sec

³ Einzelheiten siehe Literaturverzeichnis am Schluss der Arbeit

⁴ Im Folgenden wird als Bezugsgröße für die Windstärke der Wert nach Beaufort verwendet. Für die Umrechnung in andere Dimensionen gilt näherungsweise für eine Höhe von 10 m über Niveau nach wikipedia.org/wiki/Beaufortskala

Windstärke in m/sec:	$v = 0,836 * Bft^{1,5}$
Windstärke in kn:	$v = 1,625 * Bft^{1,5}$
Windstärke in km/h:	$v = 3,01 * Bft^{1,5}$

⁵ Werte der Spalten 1 bis 3 nach Bruns, durch den Autor bearbeitet für Windstärken unter 2 und über 10.

⁶ Spalten 4 und 7 nach Journalauszügen bearbeitet durch den Autor.

⁷ Bearbeitet durch den Autor nach Angaben in Hamecher.

⁸ Very Large Crude Carrier = Großtanker

Tabelle 1
Windhäufigkeit in % der Beobachtungen

Beaufort\Spalte	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	3,54	0,50	1,17	0,4	3,7	4,1	2,7	1,28	0,00
1	5,01	1,49	3,29	0,7	5,9	5,0	1,8	2,43	0,84
2	7,50	4,10	6,90	4,6	9,3	8,2	16,1	5,33	2,36
3	14,91	8,40	14,04	20,1	16,2	14,1	19,8	12,37	4,34
4	21,75	15,15	18,12	26,6	19,8	19,1	27,0	18,73	6,69
5	22,46	23,01	23,43	21,2	19,4	19,5	15,0	22,68	9,35
6	12,39	20,72	16,57	12,4	13,1	14,4	9,3	17,04	12,29
7	7,55	14,60	9,01	7,0	6,1	7,7	4,5	11,12	15,48
8	2,94	8,15	5,87	5,2	4,7	4,3	3,1	6,22	18,92
9	0,93	2,22	1,27	1,5	2,0	2,8	0,7	1,69	22,57
10	0,51	1,00	0,33	0,2	0,3	0,9	0	0,68	26,44
11	0,28	0,45	0	0	0	0	0	0,28	30,50
12	0,20	0,21	0	0	0	0	0	0,15	34,75

Für die weiteren Untersuchungen wird das gewichtete Mittel in Spalte 8 verwendet, das in etwa den Windverhältnissen im Atlantik nördlich der Passatzzone entspricht. Eine Untersuchung für andere Fahrtgebiete wurde nicht durchgeführt. Es ist jedoch anzunehmen, dass auch dort der Jahresdurchschnitt in den für die Schifffahrt interessanten Seegebieten mit Ausnahme der Äquatorialgebiete im Pazifik und der Monsungebiete im Indischen Ozean und der fernöstlichen Gewässer nicht wesentlich von den so ermittelten Mittelwerten abweichen wird.

Bei den Werten der drei Segelschiffe in den Spalten 5 und 6 ist zu bedenken, dass diese Schiffe vorwiegend den für sie günstigen Wind sowie Seegebiete ohne widrige Strömungen suchten. Dazu fuhren sie auf Routen abseits der Dampfertracks, also den wie mit dem Lineal gezogenen Kurslinien der Dampfer von einem Ansteuerungspunkt zum nächsten. Eine ebenso merkbare Abweichung von den Werten des Nordatlantik zeigen die Messungen aus den Journalen der VLCCs für die Fahrt um Afrika und im Golf. Dieser generelle Unterschied der Fahrtgebiete ist besonders deutlich bei den Werten für Windstärke 5 zu erkennen.

Nach den obigen Untersuchungen ergibt sich die wahrscheinlich zu erwartende Windhäufigkeit der für einen Lenkdrachen wichtigen Stärken Bft 4 bis 7 für das Seegebiet des Nordatlantik wie folgt:

Tabelle 2
Generelle Windhäufigkeit im Nordatlantik in % der Zeit

Beaufort	4	5	6	7
Windhäufigkeit %	18,73	22,68	17,04	11,12

Der Vollständigkeit halber seien noch die relativ niedrigen Windgeschwindigkeiten und ihre Häufigkeiten in den Passatzonen des Atlantik angeführt. Wegen der niedrigen Gesamtzahl von 84 Beobachtungen wurde hier auch die durchschnittliche Häufigkeit der Beobachtungen ermittelt. Dies ergab ein Maximum bei Bft 2-3 mit einer Anzahl von eben über 8 Beobachtungen. Bei dem relativ kleinen Beispiel wäre ein Lenkdrachen etwa während einem Drittel der Zeit im Passat einsetzbar.

Tabelle 3
Anzahl von Windbeobachtungen konstanter Stärke im Passat

Bft 0-1	1	1-2	2	2-3	3	3-4	4	4-5	5	5-6	6	
n	9	5	10	6	5	9	12	8	8	3	7	2

Mit der Kenntnis der Häufigkeit der Windstärken ist nun noch nichts darüber gesagt, aus welcher Richtung dieser Wind wehen wird und wie er dabei ausgenutzt werden kann. Es ist davon auszugehen, dass das Lenkdrachenschiff auf dem starren Kurs der kürzesten Wegstrecke fahren wird. Damit lässt sich eine halbwegs sichere Aussage über die auf diesem Kurs zu erwartende Windrichtung nur an Hand von Windkarten machen, wie sie Maury vor 150 Jahren veröffentlicht hat, oder nach speziellen Prognosen für eine Jahreszeit und den speziellen Kurs.

Für die weiter unten angestellten Berechnungen wurde hier vereinfachend angenommen, dass der Wind einer gegebenen Stärke aus jedem Quadrant der Windrose mit zeitlich gleichen Anteilen wehen wird. Das bedeutet, dass während der Hälfte der oben ermittelten Zeit der Wind aus einem der vorderen Quadranten kommen wird und damit der Lenkdrachen nicht einsetzbar ist. Der Wind von querab und von achtern wird nur seine reduzierte Zugkraft entsprechend seiner unten dargestellten Wirkrichtung ausüben können. Alles in allem wird also der Wind in weniger als der Hälfte der oben ermittelten Zeit in der jeweiligen Stärke für die Propulsion des Schiffes verfügbar sein.

Hier sei nur zur Illustration erwähnt, dass Segelschiffe ihren Kurs überwiegend nach dem für sie nutzbaren Wind ausrichteten. Dies galt selbst für den Fall, dass dieser Kurs von dem angestrebten Ziel wegführte. So konnten Segelschiffe beispielsweise den direkten Weg vom Englischen Kanal nach Kapstadt und zurück von etwa 6000 sm Länge nicht nutzen, weil sie auf diesem Weg keinen für sie brauchbaren Wind, dafür aber zusätzliche Gegenströmungen fanden. Sie fuhren stattdessen heimkehrend von Kapstadt eine Distanz von etwa 7300 sm, ausgehend waren dies nach Kapstadt etwa 7600 sm. Das Verhältnis dieser Entfernungszahlen zu der kürzesten Entfernung illustriert im übrigen eindrucksvoll, welchen auf den ersten Blick nicht erkennbaren Preis die Nutzung der Windkraft fordern kann. Die Zahlen machen auch deutlich, dass auf diesem Wege, nämlich der Verlängerung der Fahrstrecke zugunsten besserer Windverhältnisse, eine Verbesserung der Nutzung des Lenkdrachens nicht zu erreichen ist.

Zugkraft des Lenkdrachens

Generell arbeiteten die Rahsegel eines früheren Seglers nach dem gleichen Prinzip wie der Lenkdrachen heute. In beiden Fällen ist es nicht der Staudruck des Windes allein, der den Vortrieb für das Schiff erzeugt. Hinzu kommt in beiden Fällen der Auftrieb, den eine schräg angeströmte, gewölbte Fläche erzeugt.

Beim Segelschiff war der Umgang mit diesem Phänomen eine Erfahrungssache, die buchstäblich im Laufe von Jahrtausenden gewachsen war. Es brauchte außerdem jahrelange Erfahrung, dauernd zu ahnen, wie die unsichtbaren Strömungen um die komplizierte Takelage eines großen Segelschiffes zu einem nutzbringenden Ergebnis gebracht werden konnten. Beim Lenkdrachen spielen diese Dinge keine Rolle. Er wird an einem Fesselkabel zur Stromversorgung geführt und nach einem vorgegebenen Programm auf der Flugbahn einer liegenden Acht gelenkt. Dabei ist er dann von seinem Steuerprogramm, von konstanter Stromversorgung und vom Wind abhängig. Allerdings kann er wegen seiner aktiven Steuerung unter idealen Voraussetzungen einen höheren Vortrieb erzeugen als ein Segel gleicher Fläche.

Naaijen et al. stellen in ihrer Arbeit eine Abschätzung für die Zugkraft eines Lenkdrachens von 500 m² Fläche bei 150 m Länge des Fesselkabels und günstigstem Wind unter 45° von achtern für einen Tanker von 65000 m³ Verdrängung vor. Sie geben sie in % des Schiffswiderstandes an.⁹ Diese Zugkraft ist stark abhängig von der Richtung des Windes relativ zum Lenkdrachen und zum Schiff. Danach ist sie aber zusätzlich zu den genannten Parametern auch abhängig von der Länge des Fesselkabels und steigt mit dessen wachsender Länge.

In der nachfolgenden Tabelle ist die relative günstigste maximale Zugkraft des genannten Lenkdrachens nach Fig. 15 Naaijen et al. dargestellt:

⁹ Dabei machen sie folgende, äußerst wichtige Einschränkung: "Die wesentlichen Unsicherheiten in der vorgestellten Untersuchung ergeben sich durch die Berechnung der Lenkdrachenkräfte. Es ist nicht bekannt, wie weit die praktisch statische Betrachtungsweise [der Untersuchung] gültig ist, weshalb die vorgestellten Angaben zur Brennstoffersparnis mit Vorsicht zu betrachten sind." [Übersetzung des Autors].

Tabelle 4

Relativ günstigste theoretische Zugkraft eines Lenkdrachens in % des Schiffswiderstandes

Beaufort	4	5	6	7
Zugkraft %	1,4	7,1	15,8	28,8

Diese Werte sind, das sei nochmals betont, zunächst rein theoretischer Natur und gelten für ungestörte, ideale Strömungsverhältnisse um den Lenkdrachen herum und für ihre Übertragung auf ein kleineres Schiff von etwa 12000 m³ Verdrängung. Für diese Übertragung und reale Verhältnisse wird zunächst ein Schiff von der Größe der BELUGA SKYSAILS, nämlich dessen Schwesterschiff VOLMEBORG der niederländischen Schiffswerft Bodewes¹⁰, zu Grunde gelegt.

Dabei ergibt sich die günstigste theoretische Zugkraft eines Lenkdrachens, bei einer Fläche von 160 m² und einer Länge des Fesselkabels von 150 m, unter ansonsten idealen Verhältnissen, angenähert wie auf der folgenden Abbildung 1 dargestellt. Zum Vergleich ist hier auch der wesentlich sanfter ansteigende Staudruck auf einer gleich großen Fläche gezeigt.

Maximale Zugkraft eines Lenkdrachens von 160 m² in t gegenüber Staudruck auf einer Fläche von 160 m² in t

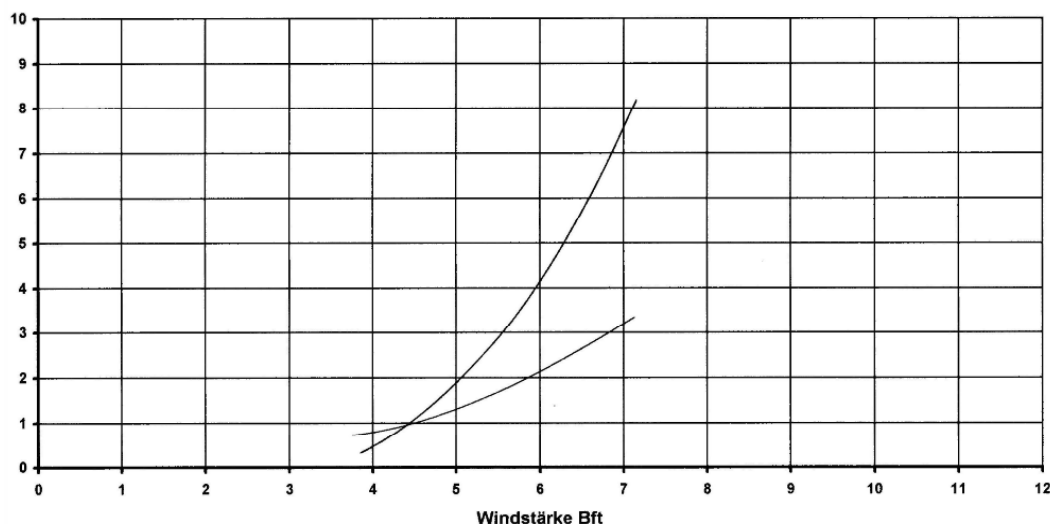


Abbildung 1

Ideale Zugkraft eines Lenkdrachens von 160 m² (steile Kurve) und Staudruck auf einer Fläche von 160 m² (flache Kurve). Die Steilheit der Kurve des Lenkdrachens bedeutet, dass bereits kleinere Änderungen der Windstärke erhebliche Änderungen der Zugkraft zur Folge haben.

Bei der Betrachtung der Abbildung fällt zunächst auf, dass erst ab Windstärke 4 überhaupt eine Zugkraft des Lenkdrachens, und zwar von rund 0,5 t, zu erwarten ist. Ganz offensichtlich fängt hier erst der Bereich an, in dem sich der Lenkdrachen mit seinem eigenen Geschirr in der Luft halten kann. Bei 14,5 kn Fahrt und etwa 6,70 m Tiefgang beträgt der Schiffswiderstand etwa 26 t. In Anbetracht des bei Windstärke 4 geringen möglichen Zuges von 0,5 t fragt es sich bereits hier, ob sich der Einsatz des Lenkdrachens unter diesen Bedingungen lohnt.

Als Diskussionsgrundlage für die mögliche Zugkraft eines Lenkdrachens unter idealen Strömungsbedingungen bei nicht idealen Windrichtungen sollen zunächst die Werte der nachfolgenden Tabelle gelten. Sie sind aus der bereits erwähnten Abbildung bei Naaijen et al. abgeleitet:

¹⁰ Lpp = 123,48m, B Spt = 15,87m, SH OKK = 9,65m, Tg max 7,75m, Tg design 6,7m, Depl. 6,7m = 10305 mt.

Tabelle 5

Theoretische Zugkraft in t, Lenkdrachen 160 m², ideale Strömungsbedingungen, MS VOLMEBORG

Beaufort	4	5	6	7
Wind von achtern	---	0,57	2,13	4,84
Backstagswind 45°	0,46	1,89	4,17	7,60
Wind querab 90°	0,51	1,59	3,17	5,45

Die Werte aus dieser Tabelle sind nachfolgend in Abbildung 2 dargestellt. Sie umreißen das mögliche Einsatzprofil eines Lenkdrachens, das praktisch nur zwischen den beiden Kurven für die Windrichtungen von 0° und 45° liegt. Außerhalb dieses schmalen Bandes ist der Lenkdrachen nicht nutzbar. Dabei sei wiederholt, dass die Kurven **keine** Prognose der tatsächlichen Zugkraft darstellen. Die Kurven zeigen lediglich die wahrscheinliche Tendenz des Beitrages, den ein Lenkdrachen möglicherweise zur Propulsion eines Seeschiffes leisten kann. Dazu wird weiter unten noch detailliert Stellung genommen.¹¹

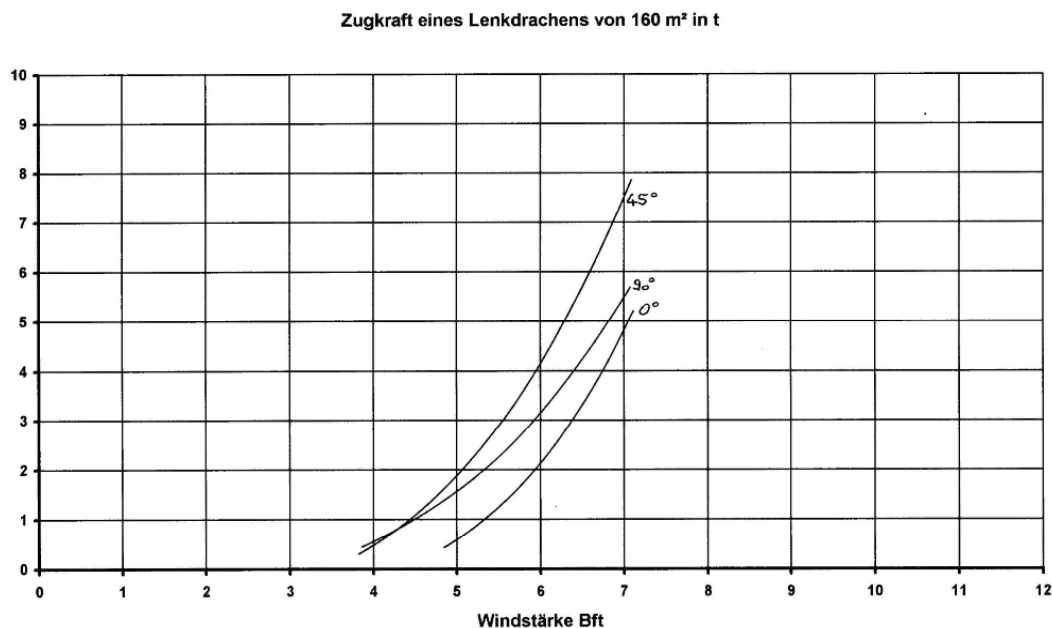


Abbildung 2

Zugkraft und Windrichtung. Die Kurven für Wind von achtern (0°), Wind von querab (90°) und Backstagswind (45°) zeigen, dass bereits kleinere Änderungen der Windrichtung relativ zum Schiff erhebliche Änderungen der Zugkraft zur Folge haben. Bei Windrichtungen vorlicher als querab (Winkel > 90°) ist der Lenkdrachen nicht einsetzbar.

Der Einsatz des Lenkdrachens im Schiffsbetrieb

Wenn der Wind als zusätzliche Antriebsquelle für ein modernes Frachtschiff mit Lenkdrachen ausgenutzt werden soll, dann gelten bei seinem Einsatz notwendigerweise auch für dieses heutige Schiff die gleichen Prinzipien, die einst für den Betrieb eines herkömmlichen Segelschiffes galten.

Wind und Wetter waren zur Segelschiffszeit das Lebenselixier für alle an Bord. Heute sind sie dagegen an Bord eines modernen Schiffes nur noch meist unbequeme Randerscheinungen eines monotonen Bordalltags. Für den Schiffsführer eines Segelschiffes bedeutete seine Abhängigkeit von der Natur eine fast körperliche Nähe zu dem ihm anvertrauten Segler. Gute Reisen, also das Ergebnis maximalen Vortriebs aus den Segeln, konnte er nur machen, wenn er sich Tag und

¹¹ Bei Frachtsegelschiffen normaler Größe hörte übrigens der Bereich nutzbaren Windes bei etwa Windstärke 8 auf. Bei stärkerem Wind musste sich das Schiff den Gewalten der Natur ergeben.

Nacht ohne Unterlass um seine Segel kümmerte. Bei schlechter werdendem Wetter mussten die Segel bis zum allerletzten Moment stehen bleiben. Wenn der Wind dann auch nur ein wenig nachließ, mussten sie sofort wieder gesetzt werden. Unabhängig von Wetter, Seegang oder Tageszeit war es oberstes, selbstverständlich empfundenes Gebot, die Segel zum Nutzen des Schiffes zu jeder Tages- und Nachtzeit zu bedienen. Dieser Zwang zu körperlich höchst unbequemem Einsatz für sein Schiff ist heute für den Seefahrer nicht mehr vorhanden, es sei denn in absoluten Notlagen seines Schiffes.

Der Lenkdrachen mit seinen steilen Zugkraftkurven ist ein ganz besonders schwierig zu handhabendes Vortriebsorgan. Sollen damit auch die geringen Zugkräfte bei Windstärke 4 ausgenutzt werden, dann muss der Lenkdrachen an der Grenze zum Absturz wegen Windmangels gefahren werden. Ähnlich schwerwiegende Probleme entstehen für höhere Windstärken am oberen Ende der Zugkraftkurven. Sollen hier die dann größeren und am ehesten Nutzen versprechenden Zugkräfte des Lenkdrachens voll ausgenutzt werden, dann muss er erst recht an der Grenze zum Absturz gefahren werden. Dazu kommt hier noch erschwerend, dass Wind dieser Stärke einen erheblichen Anteil an Böen hat. Dabei ändert sich dann nicht nur die Windstärke plötzlich und unberechenbar, sondern auch seine Richtung. Gegen beides ist der Lenkdrachen empfindlich. Noch schlimmer wird es sich aber auswirken, wenn dieser starke Wind mit plötzlichem Regen, Schnee oder Hagel einhergeht. Ob ein Lenkdrachen einen plötzlichen schweren Regenguss oder einen Hagelschauer überleben kann ist mit Fug und Recht zu bezweifeln.

Fahrtberichte von Segelschiffen erwähnen immer wieder diese plötzlich auftretenden Böen, die entweder aus einer unerwarteten Richtung auftraten oder deren Stärke wesentlich größer oder kleiner war als die vorherrschende Windstärke. Beim Segelschiff führte dies zum Verlust einzelner Segel oder zu teilweisen Entmastungen. Beim Lenkdrachenschiff wird dies sehr wahrscheinlich zum Verlust des Geschirrs und Schäden an dessen Infrastruktur führen.

Ein modernes Schiff fährt heute weitgehend automatisiert ohne menschliches Zutun. Aus den windbedingten Gründen ist daher zu erwarten, dass der Lenkdrachen selbst bei gutem Wetter während eines normalen Tages auf See im Mittelpunkt des Interesses der Schiffsführung stehen muss. Bei schlechtem Wetter dürfte der Lenkdrachen dagegen sogar mehr Aufmerksamkeit erfordern als das Schiff selbst. So, wie beim Segelschiff die Besatzung Tag und Nacht zur Bedienung der Segel bereit war, muss auch auf einem Lenkdrachenschiff Tag und Nacht seine Bedienung bereitstehen, wenn der Wind in die Nähe der Einsatzgrenzen des Lenkdrachens kommt. Bei einer Schiffsgeschwindigkeit von 14,5 kn bleiben übrigens bei einer Länge des Fesselkabels von 150 m genau 20 Sekunden, bis das Schiff die Absturzstelle passiert und das Fesselkabel hoffentlich nicht in den Propeller des mit voller Fahrt weiterfahrenden Schiffes gezogen wird.

Das Segelschiff war gegenüber einem modernen Frachter relativ langsam. Es war demgemäß auch länger in einem Windgebiet konstanter Stärke unterwegs als heute ein modernes Frachtschiff. Dennoch kam es auch damals durchaus häufiger vor, dass der Wind innerhalb von Stunden stark aufbriste oder schnell nachließ. Beim Lenkdrachenschiff erfordert eine ähnlich starke Veränderung der Windstärke das Bergen oder das erneute Ausbringen des Geschirrs, sobald der Wind unterhalb Bft 4 zu sinken oder über Bft 7 zu steigen droht. Und das eben nicht erst dann, wenn der Wind die Einsatzgrenzen überschritten hat. Denn dann ist das Geschirr bereits weg ...

Heutzutage weisen auch längere Fahrstrecken über See mitunter starken Schiffsverkehr auf. Der allein auf der Brücke befindliche Wachhabende muss dann nicht nur den übrigen Schiffsverkehr im Auge haben. Er muss auch noch dauernd auf seinen Lenkdrachen achten, um nicht andere Schiffe durch eine bedrohlich wirkende Situation zu beunruhigen oder gar bei einem erforderlichen Kurswechsel an einem way point¹² zu gefährden.

¹² Ein von den internationalen Vorschriften oder vom Fahrtprogramm vorgegebener Kurswechsellpunkt

Weather Routing¹³

Gelegentlich wird in Unkenntnis der tatsächlichen Verhältnisse davon gesprochen, durch Ausnutzen eines negativen weather routing den Einsatz eines Schiffes mit Lenkdrachen zu verbessern. Dabei soll das Lenkdrachenschiff gezielt in ein Schlechtwettergebiet fahren, um die dort höheren Windstärken ausnutzen zu können.

Dazu sind auf jeden Fall einige grundsätzliche Überlegungen nötig, die allesamt die Pflichterfüllung des Kapitäns betreffen. Die gesetzlichen Vorschriften des HGB verpflichten einen Kapitän, sein Reiseziel auf dem kürzesten Weg zu erreichen. So muss er beispielsweise auch dafür sorgen, dass für die bevorstehende Reise genügend Brennstoff an Bord ist, um so das Anlaufen eines zusätzlichen Bunkerhafens zu vermeiden. Deviationen von seinem kürzesten Reiseweg sind ihm nur erlaubt, um zum Schutze von Schiff und Ladung ein Schlechtwettergebiet zu umgehen, um einen Kranken abzusetzen, zur Hilfeleistung auf See oder für einige eng umrissene Notfälle.

Wäre der Kapitän allerdings auf Grund des Chartervertrages seines Schiffes¹⁴ und der Konossementsklauseln seiner Ladung¹⁵ berechtigt, zur besseren Ausnutzung seines Lenkdrachens von dem kürzesten Weg abzuweichen, dann würde jede Abweichung von der kürzesten Verbindung zwischen zwei way points zunächst einmal automatisch eine zusätzliche Fahrstrecke bedeuten. Das beinhaltet einen zusätzlichen Brennstoffverbrauch auf der längeren Umwegstrecke, dem eine vielleicht mögliche Brennstoffersparnis auf der Starkwindstrecke mit Lenkdrachen gegenüberstehen könnte.

Anders sähe es aus, wollte der Kapitän während der Fahrt mit dem bereits gesetzten Lenkdrachen ein Seegebiet mit noch stärkerem als dem augenblicklichen Wind aufsuchen. In diesem Falle verließ das Schiff eine Fahrtroute mit einer wegen des vorhandenen Seegangs ohnehin schon niedrigen Geschwindigkeit und suchte dafür eine Fahrtroute auf, auf der die Schiffsgeschwindigkeit grundsätzlich noch niedriger sein würde. Sollte dann während dieser Zeit ein Schaden an der Ladung auftreten, dann brauchte der Kapitän sicherlich eine sehr gute juristische Beratung, um erklären zu können, warum er vorsätzlich ein Schlechtwettergebiet aufgesucht hat, wenn in seinem Schiffstagebuch bereits der gängige Passus "Brecher über Deck und Luken" steht.

Windstärken um Bft 6 oder 7 stellen für ein modernes Seeschiff keinerlei Gefahr dar, der dabei auftretende Seegang hat jedoch immerhin schon die offizielle Bezeichnung "sehr grobe See". In Anbetracht des zu erwartenden Fahrtverlustes bei höheren Windstärken wird der Schiffsleitung die Entscheidung sicherlich nicht leicht fallen, gezielt ein Seegebiet größerer Windstärke, höherer Wellen und niedrigerer Schiffsgeschwindigkeit aufzusuchen, um dort vorher noch ungewisse, vielleicht unter Umständen bessere Windverhältnisse am Lenkdrachen und eine marginal höhere Zugkraft ausnutzen zu können.

Einen Überblick über die vom Seegang verursachte Fahrtreduzierung verschieden großer Schiffe gibt die nachfolgende Tabelle. Die Werte wurden parallel zu den Windaufschreibungen der Tabelle 1 für ein Feederschiff (Spalte 1) und vier VLCCs¹⁶ (Spalte 2) gewonnen. Die Werte stellen das Verhältnis der mittleren Geschwindigkeit über Grund zu der Probefahrts-Geschwindigkeit des Schiffes dar. Sie enthalten somit bereits alle störenden Einflüsse, die normalerweise auf ein Schiff im Laufe einer durchschnittlichen Reise einwirken können. In der Spalte 3 ist die zu erwartende Geschwindigkeit des MS VOLMEBORG im Seegang eingetragen, wenn man eine Grundgeschwindigkeit von 14,5 kn bei voller Maschinenleistung annimmt.

¹³ Ein moderner Begriff in der Nautik, den Kurs auch nach den günstigeren Wetterbedingungen auszurichten

¹⁴ Der das Rechtsverhältnis zwischen Reeder und Eigentümer des Schiffes regelt

¹⁵ Die die Einzelheiten der Beförderung der Ware durch das Schiff regeln

¹⁶ Feederschiff: Lpp = 84,14m, B Spt = 14,50m, SH OKK = 8,60m, Tg max 6,27m, Depl. = 5752 mt.
VLCCs: Lpp = 329,20m, B Spt = 51,80m, SH OKK = 25,60m, Tg max 19,96m, Depl. = 291370 mt.

Tabelle 6

Verhältnis tatsächliche Geschwindigkeit zu Probefahrts-Geschwindigkeit

Beaufort\Schiff	1	2	3 kn
0 bis 3	1,000	1,000	14,5
4	0,985	0,982	14,3
5	0,954	0,972	13,9
6	0,903	0,955	13,3
7	0,831	0,902	12,3
8	0,735	0,831	10,9
9	0,611	0,700	--

Bei den Zahlen fällt zunächst eine erstaunliche Übereinstimmung der Spalten 1 und 2 auf, obwohl die Schiffe so außerordentlich verschieden groß sind. Diese Verschiedenheit zeigte sich besonders deutlich im Seeverhalten der beiden Schiffe. Das Feederschiff rannte sich bei zunehmend schlechtem Wetter in den immer höher auflaufenden Wellen förmlich fest, was sich in pittoresken Wasserkaskaden, jedoch auch in großflächigen Verformungen der Vorschiffskonstruktion auswirkte. Dagegen zeigten die VLCCs in etwa das Seeverhalten einer Mole und bewegten sich seegangsbedingt kaum. Offensichtlich tragen bei Seegang die periodischen Störungen der Strömungsverhältnisse am Propeller mehr zu dem Fahrtverlust eines großen Schiffes bei als die bei kleineren Schiffen so ins Auge fallenden Bewegungen in schwerer See.

Nutzanwendung

Beurteilt man die bisher gemachten Feststellungen kritisch, dann sind einige von ihnen relativ gesichert, andere sind wenigstens auf theoretischer Basis untermauert, wieder andere entziehen sich weitgehend einer technisch fundierten Bewertung und stehen zunächst nur als Behauptung im Raum. Des Weiteren darf der Betrieb eines Lenkdrachens grundsätzlich nicht losgelöst von den Wetterbedingungen betrachtet werden. Bei Windstärken 6 bis 7, dem Bereich größten Nutzens des Lenkdrachens, wird sich das Schiff im Seegang bereits so heftig bewegen, dass allein durch die weit ausgreifenden, unkontrollierten Bewegungen des Bugs, wo das Fesselkabel angreift, ungewollte Einflüsse auf das Fesselkabel ausgehen werden, die den Weg des Lenkdrachens am Himmel beeinflussen werden.

Vor der Darstellung des möglichen Nutzens beim Einsatz eines Lenkdrachens sind also zunächst die bisher getroffenen Annahmen daraufhin zu beurteilen, wie weit sie als gesichert anzusehen sind.

Gesicherte Annahmen

Die Aussagen zur Windhäufigkeit beruhen auf Auswertungen der Praxis und sind somit gesichert. Sie können auf einzelnen Reisen kurzfristig stark von den genannten Mittelwerten abweichen, im Jahresdurchschnitt aber können sie als brauchbare Grundlage für eine Prognose dienen. Als ebenso gesichert ist die Aussage von Naaijen et al. anzusehen, bei welcher Windrichtung relativ zum Schiff der Lenkdrachen einen Beitrag zur Propulsion leisten kann und wie groß dieser Beitrag theoretisch im Prinzip sein kann.

Fragwürdige Annahmen

Hier sind zunächst die Einschränkungen zu erwähnen, die Naaijen et al. selbst zu ihren Aussagen machen:

- Der Lenkdrachen muss im praktischen Bordbetrieb einsetzbar sein und [seine Steuerung] muss auch bei Schlechtwetter so funktionieren, wie sie gedacht ist
- Das Fesselkabel wird unter hoher Zugspannung vibrieren. Die dadurch entstehende Widerstandserhöhung des Fesselkabels wurde in den Untersuchungen nicht berücksichtigt

- Die vorgegebene Flugbahn des Lenkdrachens in einer weiten, liegenden Acht resultiert in einer Zugkraft, die bei jedem Umlauf zweimal zwischen einem Höchstwert und einem Minimalwert schwankt. Dies wird das Fesselkabel, das wie eine zwischen Schiff und Lenkdrachen geschaltete Feder wirkt, abwechselnd mehr und weniger spannen. Dieser Einfluss der Zugkraftschwankung wurde in den Untersuchungen nicht berücksichtigt
- Der Auftrieb des Lenkdrachens, und damit seine Zugkraft, wurden unter der Annahme einer stetigen, ungestörten Umströmung des Drachens ermittelt. Vor allem bei stärkerem Wind wird diese Annahme sowohl der Stärke wie auch der Richtung nach nicht zutreffen
- Die Fähigkeit des Lenkdrachens, sich und sein eigenes Geschirr in der Luft zu halten, muss für die niedrigste und höchste zulässige Windgeschwindigkeit praktisch im Schiffsbetrieb nachgewiesen sein. Desgleichen muss gesichert sein, dass der Lenkdrachen beim Erreichen der höchsten zulässigen Windgeschwindigkeit noch sicher eingeholt werden kann. Beide Tests müssen den Absturz des Lenkdrachens riskieren und sind nur aussagekräftig, wenn sie mit dem dafür vorgesehenen Schiff bei den aktuellen Windverhältnissen gemacht werden. Ansonsten wird der Schiffsführer mit seiner Entscheidung allein gelassen, wann er den Einsatz des Lenkdrachens abbrechen muss
- Der Brennstoffverbrauch der Hauptmaschine wird in der Firmen-Druckschrift mit 173-175 g/kWh unter ISO-Bedingungen angegeben. Für den praktischen Betrieb und die durchschnittliche Brennstoffqualität wird hier zunächst ein Verbrauch von 190 g/kWh unter Vollast angenommen. Für Teillast wird ein parabolischer Verlauf der Verbrauchskurve angesetzt, der bis auf 220 g/kWh bei 0,6 MCR¹⁷ ansteigt¹⁸

Ungesicherte Einflüsse

Höhere Zugkräfte des Lenkdrachens sind nur bei größerem Seegang erzielbar.

- Beim Stampfen des Schiffes im normalerweise schräg anlaufenden Seegang bleibt der Schwerpunkt des Schiffes auf seinem Kurs, während die Richtung des Kiels beim Ansteigen auf den Wellenberg und beim Abfallen ins Wellental periodisch um die Kurslinie schwankt. Die Zugkraft des Lenkdrachens greift ganz vorn am Schiff an. Ihre Querkomponente wird den Bug des Schiffes gerade dann aus dem Kurs ziehen, wenn das Vorschiff beim Stampfen austautcht und das Schiff dieser Querkomponente den geringsten Widerstand entgegensetzt. Dieser periodische Querszug kann nur durch eine zusätzliche Ruderlage ausgeglichen werden, was den Schiffswiderstand vermehrt
- Moderne Schiffsmaschinenanlagen sind technisch hoch gezüchtet, um bei Vollast ihren besten Wirkungsgrad zu entfalten. Alle Abweichungen von diesem Betriebspunkt haben in jedem Falle negative Auswirkungen auf den Maschinenbetrieb und den Brennstoffverbrauch. Vor allem bei den höheren Zugkräften des Lenkdrachens arbeitet die Hauptmaschine und mit ihr der Verstellpropeller wegen des starken Seegangs schwerer als in Glattwasser
- Längere Betriebszeiten eines modernen Dieselmotors unter Teillast vor allem im Schwerölbetrieb wirken sich negativ auf seine Betriebssicherheit aus, da die Aufladung und das Kühlsystem dann unter stark verschlechterten Betriebsbedingungen arbeiten müssen
- Bei einem Festpropeller steigt der Propellerwirkungsgrad, wenn der Propeller durch eine Reduktion des Schiffswiderstandes weniger belastet wird. Wie sich allerdings der Wirkungsgrad eines Verstellpropellers ändert, der bei schwerer See und ohnehin deutlich reduzierter Fahrt mit konstanter Drehzahl läuft und mit einem Wellengenerator gekuppelt ist, lässt sich in einer Prognose nicht adäquat berücksichtigen
- Es lässt sich nicht abschätzen, ob für den Einsatz des Lenkdrachens geeignetes zusätzliches Personal erforderlich werden kann

¹⁷ Maximum continuous rating = Dauer-Höchstlast

¹⁸ In Wirklichkeit wird der Brennstoffverbrauch etwas geringer sein als so berechnet, weil die Belastung der Hauptmaschine aus dem Wellengenerator durch den Einsatz des Lenkdrachens nicht reduziert werden kann.

- Es lässt sich auch nicht abschätzen, wie oft ein Lenkdrachen in den Grenz-Windstärken 4 und 7 eingesetzt werden wird, wenn er mit dem Auge nicht verfolgt werden kann. Dies gilt vor allem bei Dunkelheit, Regen, Schneefall und eventuell Nebel

Fasst man die Windhäufigkeit nach Tabelle 2 und die Zeiten des möglichen Einsatzes eines Lenkdrachens auf Grund der Windrichtung sowie die theoretischen Zugkräfte nach Tabelle 5 zusammen, dann lässt sich der theoretische Brennstoffverbrauch für ein Schiff von der Art der VOLMEBORG mit und ohne Lenkdrachen überschlagen. In Tabelle 7 bedeuten:

Spalte 1	Windstärke Beaufort
Spalte 2	Anteil der Windstärke im Jahresmittel in %
Spalte 3	Betriebsstunden dieser Windstärke bei 6000 h im Jahr
Spalte 4	Brennstoffverbrauch für Propulsion ohne Lenkdrachen
Spalte 5	Brennstoffverbrauch für Propulsion mit Lenkdrachen bei 150 m Fesselkabel
Spalte 6	Brennstoff-Ersparnis bei 150 m Fesselkabel
Spalte 7	Brennstoff-Ersparnis bei 350 m Fesselkabel ¹⁹

Tabelle 7
Brennstoffverbrauch für Propulsion im Jahr, t

1	2	3	4	5	6	7
0	3,54	77	45	45		
1	5,04	146	86	86		
2	7,50	320	189	189		
3	14,91	742	439	439		
4	21,75	702	664	658	6	15
5	22,46	680	804	775	29	57
6	12,39	511	604	558	46	76
7	7,55	334	394	344	50	80
8	2,94	373	221	221		
9	0,93	101	60	60		
10	0,51	41	24	24		
11	0,28	17	10	10		
12	0,20	9	5	5		
	100	6000	3547	3415	131	228

Die Zahlen für den Brennstoffverbrauch beziehen sich ausdrücklich nur auf den Anteil für die Propulsion des Schiffes. Der Anteil des Energieaufwandes für den durch den Wellengenerator versorgten Bordbetrieb wird durch das Fahren des Lenkdrachens nicht beeinflusst. Die Ergebnisse gelten ausdrücklich auch nur für den Fall, dass der Lenkdrachen konsequent im vollen zeitlichen Umfang gefahren wird, zu dem der zulässige Wind vorhanden ist, bei Tag und bei Nacht und bei jedem Wetter. Wegen des Risikos seines Absturzes kann der Lenkdrachen bei Windstärken 4 und 7 realistischerweise nur mit der halben Einsatzzeit und damit den halben Ersparnissen angesetzt werden. Dadurch wird für die obigen Verhältnisse die Brennstoff-Ersparnis von 131 t im Jahr auf 103 t pro Jahr reduziert. Sollte das Fesselkabel 350 m lang sein, so ist im Nordatlantik im günstigsten Falle eine jährliche Einsparung von 228 t zu erwarten.

Die Größenordnung der möglichen Brennstoff-Einsparungen für ein Schiff von der Art der VOLMEBORG lässt sich mit den vorhandenen Zahlenwerten der Tabelle 1 Spalte 4 und 7 auch unter anderen Windverhältnissen darstellen. Die einzelnen Spalten gehören hier zu:

¹⁹ Naaijen et al. machen keine Angaben über die zu erwartenden Zugkräfte des Lenkdrachens bei einer Länge des Fesselkabels von 350 m. Dafür aber machen sie in den Fig. 13 und 14 Angaben zu den nach ihrem Ansatz idealerweise zu erwartenden Brennstoff-Ersparnissen bei Leinenlängen von 350 und 150 m und den Windstärken 4 bis 7. Die sich daraus ergebenden Verhältniswerte der Ersparnisse wurden vom Autor geglättet und damit die Werte in Spalte 7 aus Spalte 6 ermittelt.

- 1 Windverhältnisse im Nordatlantik, wie oben
- 2 Windverhältnisse in der europäischen Fahrt (MS RABAT)
- 3 Windverhältnisse in der weltweiten Fahrt (VLCCs)

Tabelle 8

Potenzial für Brennstoffersparnis im Jahr bei einem Preis von 520 \$/t, in t

	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>
Ersparnis in t	131	101	74
Ersparnis in % des Gesamtverbrauchs	3,71	2,85	2,07
Ersparnis in \$	68000	52000	38000

Zum Schluss sei hier nochmals darauf hingewiesen, dass alle hier genannten Zahlen zu Einsparungen beim Brennstoffverbrauch nur unter allseits idealen Bedingungen gelten. Sie stellen also im Grunde nur das Potenzial möglicher Einsparungen dar. Die tatsächlichen Einsparungen werden, je nach den Betriebsbedingungen an Bord, **sicherlich erheblich** darunter liegen.

Den oben ermittelten Zahlen steht eine öffentlich genannte Investitionssumme von etwa 500.000 € oder rund 650.000 \$ für eine Lenkdrachenanlage gegenüber.

Schlussfolgerungen

Der Einsatz eines Lenkdrachens als Zusatzantrieb für ein Seeschiff ist möglich. Er unterliegt schwerwiegenden Einschränkungen verschiedener Genese, die seinen Einsatz unwirtschaftlich machen. Diese Einschränkungen wirken allesamt unabhängig von der Tatsache, dass die theoretischen Untersuchungen von Naaijen et al. noch nicht durch nachprüfbare Testreihen untermauert sind.

Der Lenkdrachen braucht zur Erzeugung einer nutzbaren Vortriebskraft für das Schiff einen Wind von wenigstens Bft 4 und maximal Bft 7. Wind dieser Stärken steht im Nordatlantik im Jahresdurchschnitt nur an etwa 70% der Seetage eines Schiffes zur Verfügung. In der europäischen Fahrt reduziert sich dieser Anteil auf rund 67%, in der weltweiten Fahrt auf 56%.

Die Wirksamkeit des Lenkdrachens ist durch steil ansteigende Zugkraft-Kurven innerhalb seines Einsatzbereiches von Bft 4 bis Bft 7 gekennzeichnet. Im praktischen Einsatz an Bord besteht das Haupthindernis für den dauerhaft erfolgreichen Einsatz eines Lenkdrachens darin, dass sowohl am unteren wie am oberen Rand des Bereiches seiner nutzbaren Windstärken die reale Gefahr seines Absturzes droht. In diesem Fall wird ein einziger Verlust des Geschirrs teurer sein als der theoretisch mögliche Gewinn eines ganzen Jahres und zusätzlich sein Schiff gefährden, wenn es das Fesselkabel in seinen eigenen Propeller zieht.

Die hier vorgestellten Untersuchungen sind eher pragmatischer Natur. Dennoch ist nach den oben dargelegten Ausführungen eine Wirtschaftlichkeit beim Einsatz des Lenkdrachens für ein Schiff von der Größe der VOLMEBORG nicht zu erkennen.

Dipl.-Ing.
Wolfgang Walter
wwalterbremen@gmx.de
Konzipiert 2008, überarbeitet 2010

Literatur

- Bruns, Erich: Handbuch der Wellen der Meere und Ozeane. Berlin 1955
Chapelle, Howard Irving: The Search for Speed under Sail 1700 – 1855. New York 1967
Hamecher, Horst: Fünfmast-Vollschiff "Preussen". Kassel 1993
Lubbock, Basil: The Log of the "Cutty Sark". Glasgow 1924/1974
Maury, Matthew Fontaine: Die Physische Geographie des Meeres. Leipzig 1856
Naaijen, P./Koster, V./Dallinga, R.P.: On the power savings by an auxiliary kite propulsion system. International Shipbuilding Progress 53 (2006) pp. 255-279. IOS Press
Paulus, A.: Die Reisen deutscher Segelschiffe in den Jahren 1893 – 1904 und ihre mittlere Dauer, in: Aus dem Archiv der Deutschen Seewarte 1907
Prager, M.: Die Fahrtgeschwindigkeit der Segelschiffe auf großen Reisen. Annalen der Hydrographie und Maritimen Meteorologie. Berlin 1905
Shewan, Andrew: The Great Days of Sail, Reminiscences of a Tea-clipper Captain. London 1927/1996
Thieme, H.: Mechanik des Segelantriebes, Beitrag zu einer Untersuchung der Leistungsmöglichkeiten des Segelschiffes. Institut für Schiffbau der Universität Hamburg, 1955
Wagner, B.: Fahrtgeschwindigkeitsberechnung für Segelschiffe, in: Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft. Hamburg 1967
Walter, Wolfgang: Die Geschwindigkeit der Rahsegler. Symposium Yachtentwurf und Yachtbau. Hamburg 1993
-: Downeasters und Nova-Scotians, Amerikanische und kanadische Segler von der Weser. Bremerhaven 2003
-: The Speed of the Tea Clippers and Other Square Rigged Sailing Ships. Bremen 2000, unpublished