

Fahrbericht mit dem SpeedTri22.

Vergleichstest von Verbrennungs- und Elektromotoren.

Die Tests mit den Elektromotoren waren zunächst nur mit Verbrennungsmotoren möglich da die beiden angesprochenen Hersteller keine Testmotoren zur Verfügung hatten.

Durch die Initiative von 3K Composite, das erforderliche Material aus eigenem Bestand und Leihgaben, zusammen zu bringen, konnten doch noch im November Testfahrten mit Elektromotoren durchgeführt werden.

Durch diese Tests wurden die Vortriebsleistungen von E-Motoren und Verbrennungsmotoren ermittelt, um sie im Vergleich gegenüber zu stellen.

Die Testfahrten mit Benzinmotoren erfolgten auf dem Ijsselmeer, um die Fahrweise des Bootes bei Welle und flachem Wasser zu erproben. Dort ist der Bedarf an Elektromotoren nicht gegeben. So wurden diese Tests auf der Feldberg-Seenplatte in Mecklenburg Vorpommern durchgeführt. Dieses Revier ist prädestiniert für das Zukunftsbild der Motorboottechnologie. Aufgrund der Umweltschutzbestimmungen ist es Booten mit Verbrennungsmotoren nicht erlaubt, diese Gewässer zu befahren. Hybridantriebe, bestehend aus Generatoren mit Verbrennungsmotoren, kleinen Batterien und Elektromotoren, sind ebenfalls untersagt. Man befürchtet, die unsinkbaren Boote könnten doch sinken und die Betriebsstoffe der Verbrennungsmotoren und der Inhalt der Treibstofftanks könnten einen Gewässerschaden herbeiführen.

Ohne Generatoren bleibt nur die Lösung, die erforderliche Batteriekapazität mit zu führen. Zur Abschätzung dieses Bedarfs sind in diesem Bericht zu den Leistungsaufnahmen auch unterschiedliche Batteriesysteme beschrieben.

Das Boot

Als Testboot wurde für alle Testfahrten, ein offener Motortrimaran (Typ SpeedTri22) aus der Produktion der Firma 3K Composite eingesetzt. Die Abmessungen sind: 6,1 m Länge, 2,07 m Breite, 0,22 m Tiefgang, 130 kg Gewicht ohne Motor, Batterie und Tank. Das Boot ist die kleinste Einheit einer Typenreihe bis 10 m Länge. Diese Modelle bestechen durch hohe Geschwindigkeit bei geringer Motorleistung. Die Wellengängigkeit ist sehr gut. Die schlanken Rümpfe schneiden gut durch die Wellen. Mit dem 9.9Yamaha hat sich bei $\frac{3}{4}$ Gasstellung eine angenehme Marschgeschwindigkeit von 13 bis 15 kn eingestellt.

(siehe Bilder 1 bis 4)



Bild 1: SpeedTri22



Bild 2: SpeedTri22

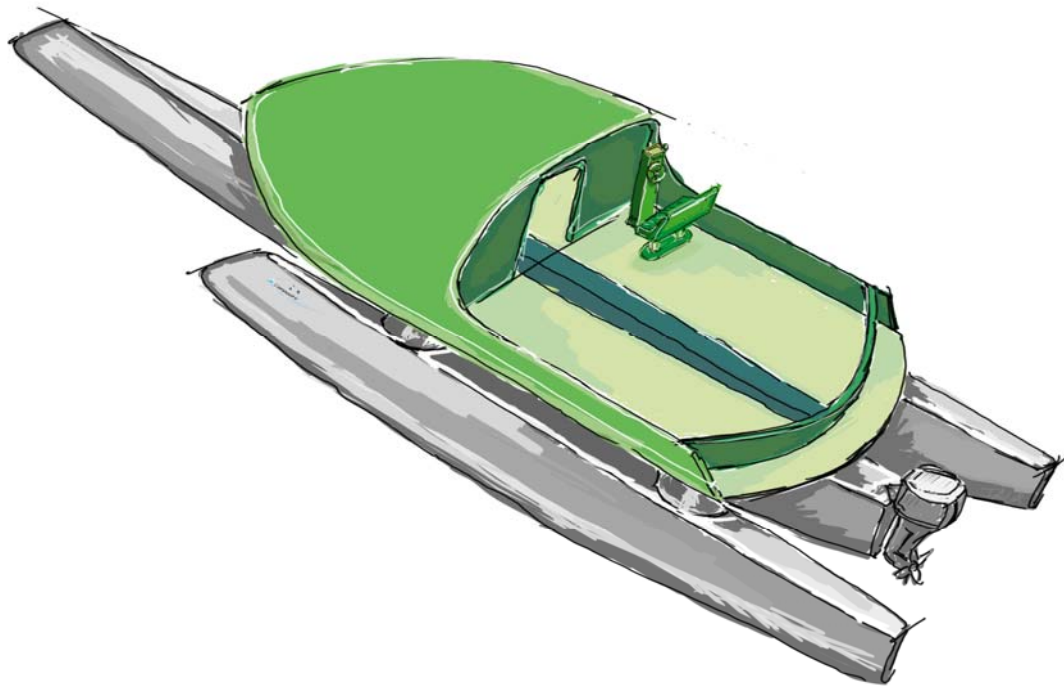


Bild 3: SpeedTri24

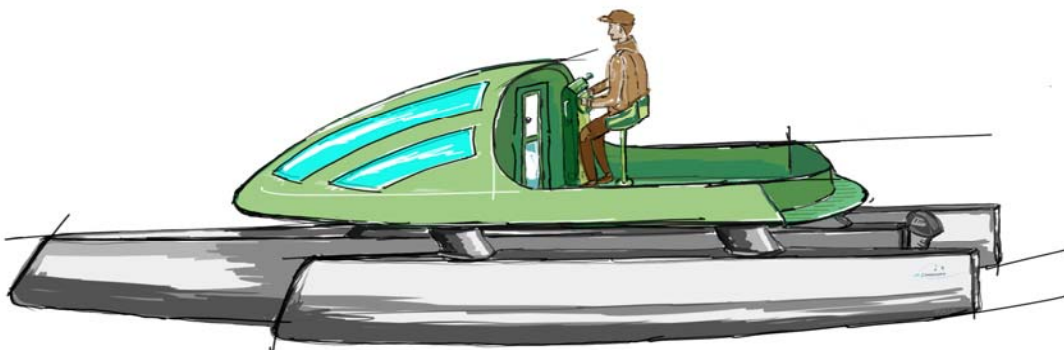


Bild 4: SpeedTri24

Die Propeller

Die Hersteller von Elektromotoren, geben an, aufgrund der hohen Drehmomente, die den Elektromotoren zu Eigen sind, Propeller mit höheren Wirkungsgraden verwenden zu können als bei Verbrennungsmotoren. Die Tests sollen zeigen wie diese Umsetzung erfolgt ist.

Torqeedo bietet neben dem Normalpropeller einen Speedpropeller an. Im Test war der Normalpropeller angebaut. Alle anderen Probanden hatten Propeller, die mehr in Richtung Geschwindigkeit ausgelegt waren. Die Umsetzung der Motorleistung in Vortrieb ist keineswegs eindeutig. Der Propeller kann auf gute Wirkung bei langsamer Fahrt, mit gutem Aufstopfverhalten oder auf Geschwindigkeit ausgelegt sein.

Die Motoren

Die Benzin-Außenbordmotoren waren:

Ein alter 2-Takt Motor mit 30 PS, von unbekanntem Hersteller.

Ein neuer 9.9 er Yamahamotor, 4-Takt

Ein neuwertiger 5 er Yamahamotor, 2-Takt

Die Elektro-Außenbordmotoren waren:

Ein neuer 10 kW AquaWatt; 48 Volt

Ein neuer 4 kW Torqeedo; 48 Volt

Die Testfahrten und Auswertung

Die Testfahrten erfolgten bei spiegelglattem Wasser und Windstille. Es wurde jeweils ein Motor angebaut. Die E-Motoren wurden mit derselben Batterie betrieben. Die Messtechnik bestand aus der Messung der Batteriespannung und der Stromaufnahme. Die Geschwindigkeit wurde mit zwei GPS gestützten Loggen durchgeführt. Es wurden mehrere wiederholte Messreihen protokolliert. Aus den Daten der zwei Loggen, die nur eine geringe Streuung aufwiesen, wurden Mittelwerte gebildet.

Mittels der Messtechnik war es bei den E-Motoren möglich im Teillastbereich Ergebnisse mit Daten zu belegen. Das ging bei den Benzinmotoren nicht. Der einzige Betriebszustand, der definiert werden konnte war Vollgas. Für die Benzinmotoren konnte die Leistungskurve mit drei Motoren unterschiedlicher Leistung erstellt werden.

Bei den Testfahrten war das Boot unterschiedlich Gewichtsbelastet. Die Gewichte von Motoren, Tanks, Batterien und Anzahl der Besatzung waren unterschiedlich. Bei dem Test der Elektromotoren war ein zweiter Mann, zur Überwachung der Instrumente und Protokollierung, an Bord. Um den daraus resultierenden unterschiedlichen hydrodynamischen Widerständen Rechnung zu tragen, wurden die Ergebnisse mittels Korrekturfaktoren normiert. Die Faktoren wurden durch weitere Testfahrten mit vorgegebenen unterschiedlichen Gewichtsbelastungen und näherungsweise Berechnungen bestimmt.

Eine weitere Einflussgröße war der Umstand, dass es sich bei den Benzinmotoren um Normalschaftmotoren, die dem Boot angemessen waren und bei den Elektromotoren um Langschafter gehandelt hat. Der erhöhte Staudruck an den Langschaftern wurde in die Korrekturfaktoren eingebracht.

Subjektive Beurteilung der Motoren

Neben den technischen Daten zum Vortrieb und der Leistungsaufnahme wurde auch eine Beurteilung eingebracht, die hier benannt wird als „maritime Robustheit“. Hinter dieser subjektiven Beurteilung stehen mehrere Betrachtungen und Ansichten. Dabei ist auch das Befahrungsrevier von Bedeutung. Es kann ein geschützter See sein oder das offene Meer. Ein Betrachtungspunkt ist auch, ob der Motor von einem durchschnittlichen Bootsmann ohne

Studium der Bedienungsanleitung in Betrieb genommen werden kann. In Grenzfällen muss auch mal ein ungeübter Mitfahrer den Motor bedienen können.

Die Abhängigkeit von Steuerelektronik beim Regeln des Motors, stellt eine größere Störquelle dar als an der mechanischen Motorpinne zu drehen. Neu für den Bootsmann ist, dass auch die modernen Batterien über eine Managementelektronik verfügen. Wie robust sich diese Technik darstellt, muss die Zukunft zeigen.

Die Beurteilung der maritimen Robustheit wurde benotet von 1 bis 6 (hoch bis niedrig).

Maritime Robustheit		
30PS 2 Takt	1	hoch
9.9 Yamaha	2	
5 Yamaha	2	
AquaWatt	3	
Torqueedo	6	niedrig

Tabelle 1: Darstellung der Robustheit

Die hier genannte Benotung basiert auf folgender Beurteilung:

Der 30PS-2Takt-Motor besticht durch seine Einfachheit und den robusten Aufbau.

Die Yamahamotoren sind bereits aufwendiger konzipiert, aber gleichwohl robust und bewährt.

Der AquaWatt wirkt ebenfalls robust hinter den Yamahamotoren.

Der Torqeedo weicht von der Linie der anderen Motoren ab. Wirkt grazil und zerbrechlich.

Der Kunststoffpropeller musste beim Transport gesondert geschützt werden. Beim Verladen war, durch geringfügiges Anheben an der Finne, diese abgebrochen. Gründe sind eine geringe Querschnittfläche an der Bruchstelle und das spröde Kunststoffmaterial. Zu dem Zeitpunkt herrschte eine Umgebungstemperatur von minus 6 Grad. Was dieses Versagen nicht entschuldigt. Des Weiteren hat sich die Kalibrierung des Fahrhebels zum Start der Fahrten verschoben. Das hatte den Einsatz zu den Testfahrten beinahe verhindert.

Bei den hier beschriebenen Motoren war die Geräuschentwicklung sehr unterschiedlich. Prospekte geben Schallpegel in Dezibel an. Damit kann der Durchschnittkunde nicht viel anfangen. So wurde auch für die Geräuschentwicklung eine subjektive Beurteilung gegeben.

Geräuschentwicklung		
AquaWatt	1	gering
Torqueedo	2	
9.9 Yamaha	2	
5Yamaha	4	

30PS 2-Takt	6	hoch
-------------	---	------

Tabelle 2: Darstellung der Geräuschwahrnehmung

Der AquaWatt schneidet mit seinem massiven Aufbau geräuschtechnisch gut ab.

9.9Yamaha und Torqeedo sind etwas geräuschvoller, aber dennoch sehr leise.

Die 2-Takter sind bereits eine andere Kategorie. Wobei der 5Yamaha noch als akzeptabel gelten kann. Der 30PS-2Takter ist so laut, dass im Hafen bereits Beschwerden vorgebracht wurden.

Die Messwerte

Die Leistungsdarstellung im Diagramm1 zeigt die gemessenen Daten. Dabei stehen die Elektromotoren deutlich hinter den Benzinmotoren zurück. Die drei Benzinmotoren sind nur mit je einem Punkt vertreten, liegen aber in einem guten Trend. Die Kurve des Torqeedomotors liegt besser als die von AquaWatt. Der Unterschied kann neben den zuvor genannten Gewichteinflüssen auch im Propeller begründet sei.

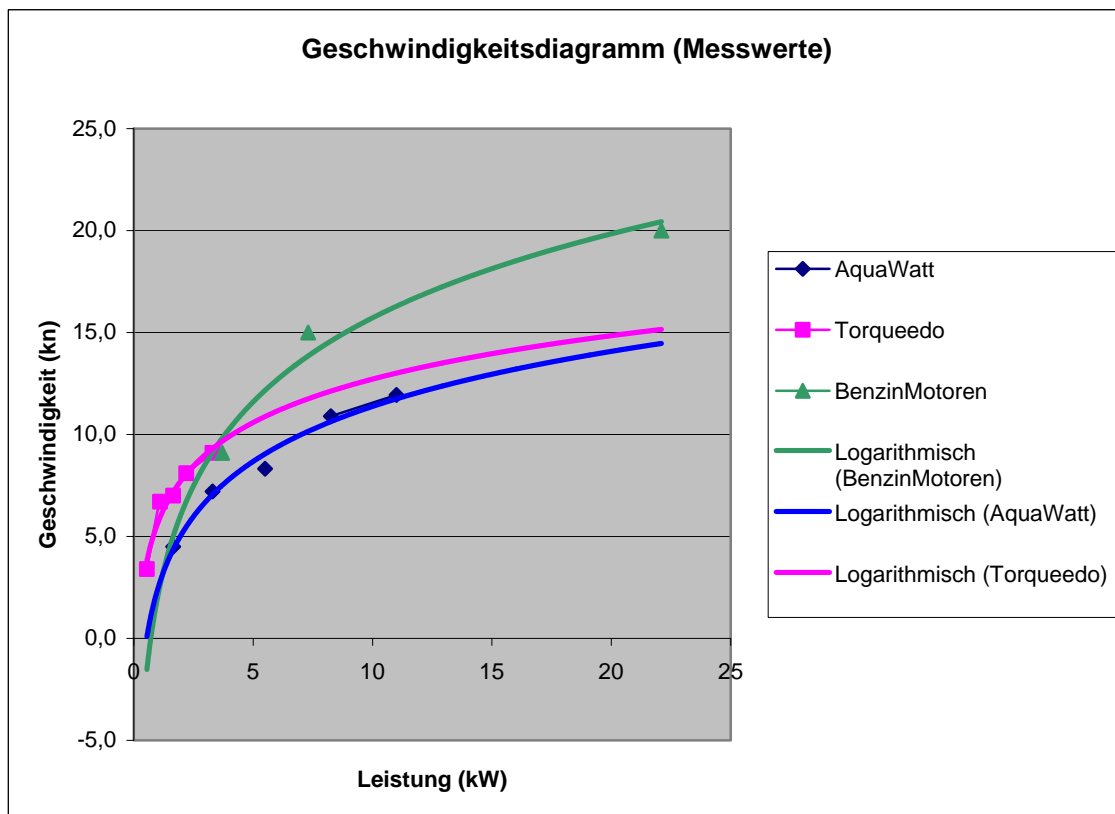


Diagramm 1: Messwerte

Die korrigierten Messwerte

Für die Unterschiede bei der Gewichtsbelastung und dem Staudruck an den Langschaffern wurden Korrekturwerte mit Berechnungsprogrammen der Boot- und Schiffbautechnologie ermittelt.

Das Diagramm 2 zeigt die Daten nach der Korrekturberechnung. Das Ergebnis ist eine überraschende Vereinigung aller Motoren in einem engen Trendbereich. Die Trendkurven der Benzinmotoren und des AquaWatt-Motors verlaufen parallel. Der Kurve des Torqueedo-Motors steigt im unteren Leistungsbereich steiler an und flacht dann ab unter die Kurven der anderen Probanden.

Die Testfahrten mit vorgegebener Beladung haben einen geringeren Einfluss der Zuladung erbracht als durch die Berechnung ermittelt. Die Wahrheit wird also eher zwischen den Werten der beiden Diagramme liegen.

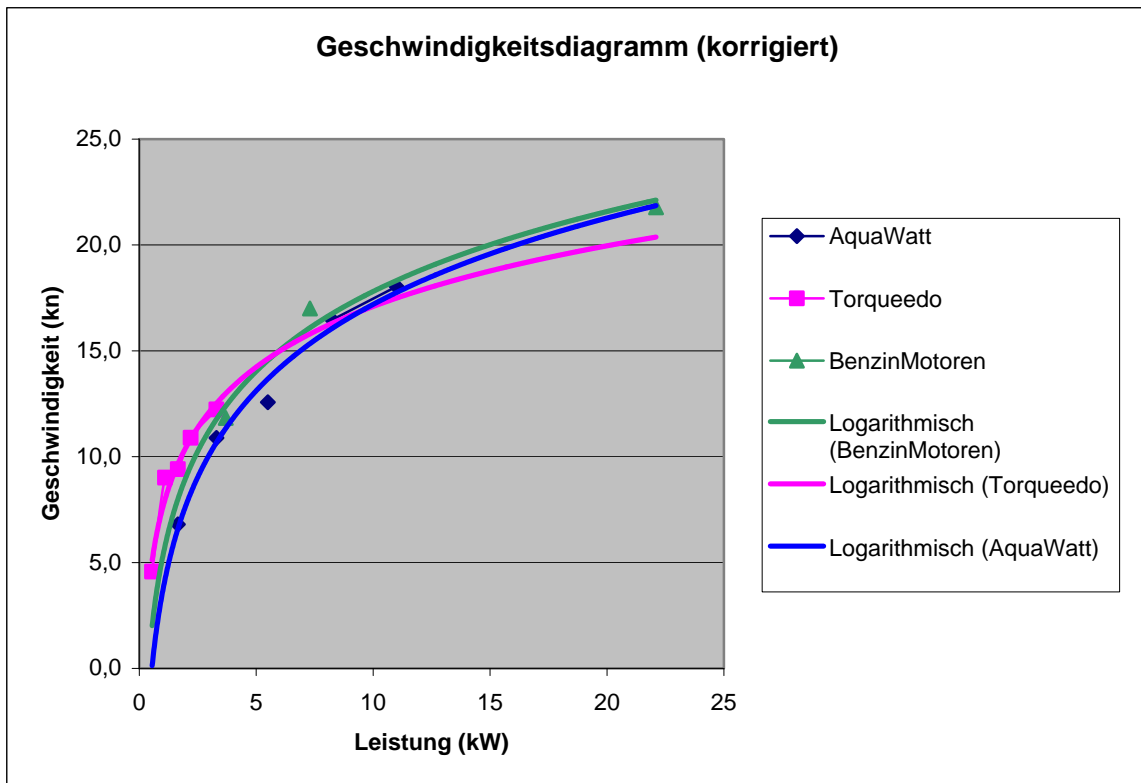


Diagramm 2: korrigierte Messwerte

Die Messwerte im Vergleich zur berechneten Geschwindigkeit

Die Berechnungsgrundlage bei Mehrumpfbooten, bezüglich der zu erwartenden Geschwindigkeit, steht nur im Status der Näherungsberechnung. Eine einfache Standardberechnung basiert auf der Bootlänge und dem Gewicht.

$$V = \sqrt{\frac{L \times P}{\Delta}}$$

worin: V = Geschwindigkeit, L = Länge; P = Leistung; Delta = Gewicht

Es wurde mit dieser Formel zu allen Messpunkten die Geschwindigkeit berechnet (Tabelle 3) und den gemessenen Werten ins Verhältnis gesetzt. Das Ergebnis steht in der Tabelle 4. Damit kann eine Einschätzung vorgenommen werden.

Messwerte					
Leistung	Geschwindigkeit	Geschwindigkeit	Geschwindigkeit	Gewicht	Geschwindigkeit nach MH-Formel
kW	kn	kn	kn	kg	kn
	AquaWatt	Torqueedo	Benzinmotoren		
0,55		3,4		345	3,6

1,1		6,7		345	5,1
1,65		7,0		345	6,2
1,65	4,5			378	6,0
2,2		8,1		345	7,2
3,3		9,1		345	8,8
3,3	7,2			378	8,4
3,7			9,1	345	9,4
5,5	8,3			378	10,9
7,3			15,0	282	14,5
8,25	10,9			378	13,3
11	11,9			378	15,4
22,1			20,0	299	24,6

Tabelle 3: gemessene und berechnete Geschwindigkeiten

Motor	Faktor v.gemessen / v.MH-Formel	Anmerkung
30PS 2-Takt	0,8	der Motor wird vermutlich auf Grund seines Alters, seine Leistung nicht mehr erbringen
Yamaha	1	die Motoren entsprechen dem Standard
AquaWatt	0,79	der Motor liegt hinter dem Standard zurück. Vermutlich ist es der Propeller
Torqueedo	1,11	der Motor ist besser als der Standard. Jedoch nur bei geringen Geschwindigkeiten. Vermutlich wegen des Propellers.

Tabelle 4: Darstellung der Beziehung gemessener zu berechneter Geschwindigkeit

Die Batterien

Bei der Batterietechnologie hat sich viel getan. Die Gewichte haben sich reduziert und die Kapazität hat sich erhöht. Des Weiteren gibt es Fortschritt bei der Anzahl der Ladezyklen und Entladungstiefe. Die Prophezeiung der Batteriehersteller lautet, in einem Kilo Batterie mehr Energie unter zu bringen als in einem Kilo Treibstoff.

Nach aktuellem Stand ergibt sich folgender beispielhafter Vergleich. Darin hat sich das Gewichtsverhältnis Benzin / Batterie von 1 / 29 auf 1 / 6 verbessert.

Die beim Test benutzte Batterie war vom neusten Standard. Es war eine Lithium-Polymer-Batterie, mit den Daten: 55 Volt; 80 Ah; max.Strom 270 A.; Gewicht 23 kg. Bild 5



Bild 5: Testbatterie

Die Tabelle 5 zeigt einen Querschnitt durch die aktuelle Batterietechnologie. Die Unterschiede der dargestellten Eigenschaften sind sehr groß. Das Bild wird sich im weiteren Verlauf von Forschung und Entwicklung abrunden.

	12 Volt	Kapazität	Gewicht	Preis	Ladezyklen	Entladungstiefe
Hersteller	Typ	ah	kg	€		%DOD
AGM	Spiralzellen	50	17,4	210,00	200	60
AGM	Spiralzellen	75	26,5	297,00	20	60
Banner	Running Bull	95	22,8	223,00	500	20
Banner	Power Bull	74	24	104,00	500	20
Vetus	Schiffbatterien	70	16,4	126,00	---	---
Exide	Gel	80	26,8	263,00	800	60
Axxellon	Lithium	100	21,3	4.210,00	---	---
Clayton	Lithium	100	26,3	5.201,00	3000	---
E-Pochè	LiFePO4	100	12,3	980,00	2000	70
E-Pochè	LiPoN	100	7,4	1.450,00	1200	70

Tabelle 5: Zusammenstellung diverser Batteriesysteme.

Der aktuelle Entwicklungstrend der sicherlich von der Autoindustrie gezündet wurde, lässt für die Zukunft auf weitere Verbesserungen hoffen.

Die Preise und Gewichte

Neben der Leistung eines Motors sind der Preis und die Kosten von Bedeutung. In der

folgenden Tabelle 5 sind die derzeitigen Kaufpreise der Motoren und der Energieeinheiten aufgeführt. Des Weiteren wurde ein Aufriss der Betriebskosten gemacht. Die Anschaffungskosten der E-Motoren sind erheblich höher als die der Benzinmotoren. Hingegen sind die Energiekosten der E-Motoren geringer. Um auf eine vergleichbare Basis zu kommen wurden die Preise und Kosten pro Seemeile auf der Basis von 100 Betriebsstunden ermittelt. Nun stellen sich ähnliche Kosten im Vergleich vom 5PS Yamaha und 4kW Torqeedo ein (4,90 zu 5,62 Euro). Sowie gelingt der Vergleich 9.9 Yamaha mit dem 10 kW AquaWatt (11,21 zu 29,84 Euro). Gleichwohl schneiden die Benzinmotoren besser ab. Bei den Reichweiten lässt sich dann keine Ähnlichkeit mehr finden. Die Reichweiten der E-Motoren sind zu gering.

Hersteller	Leistung	Geschwindigkeit	Verbrauch	Reichweite	Preis Motor	Preis Batterien	Preis Summe	Kosten/sm bez. auf 100Betriebsstunden
	kW	kn	l/h oder Amp.	sm	Euro	Euro	Euro	Euro
unbekannt	22,1	21,8	12	32	4.500	enthalten	4.500	53,91
Yamaha	3,7	11,8	2,1	67	1.450	enthalten	1.450	4,60
Yamaha	7,3	17	3,9	52	3.675	enthalten	3.675	11,21
AquaWatt	11	18	229	9	8.400	1.960	10.360	29,84
Torqeedo	3,3	12,2	69	18	3.200	1.960	5.160	5,62

Tabelle 6: Daten und Preise zu den Motoren

Eine Beispielberechnung soll an zwei Batterietypen das Verhältnis von Energiegewicht und Preis zum Benzinmotor darstellen. Die Basis war der Standard 12Liter Tank des Benzinmotors, die Geschwindigkeit und Reichweite unter Vollgas. Dazu wurde die erforderliche Batteriekapazität für zwei Batterietypen errechnet (Tabelle 7, roter Bereich).

Um die extremen Vollgasdaten nicht allein stehen zu lassen, wurde dieselbe Berechnung mit der Marschfahrt von 6,2 kn hinzugefügt (Tabelle 7, grüner Bereich).

Hersteller	Typ	Leistung	Geschwindigkeit	Reichweite	Batterie Type	Gewicht Energie /Tank	Preis Energie /Tank
		kW	kn	sm		kg	Euro
Yamaha	9.9 PS	7,3	17	52		15	---
AquaWatt	AB 10R	11	18	52	Power Bull	429	1.860
AquaWatt	AB 10R	11	18	52	LiPoN	98	19.199

AquaWatt	AB 10R	3,3	6,2	52	Power Bull	319	1.384
AquaWatt	AB 10R	3,3	6,2	52	LiPoN	73	14.276

Tabelle 7: Rechenbeispiel, Gewichte und Kosten der Energie

Die Gewichts- und Preisdifferenzen kann man als erheblich bezeichnen. Der Gesamtkaufpreis eines Bootes lässt sich durch den Wechsel vom Verbrennungsmotor zum Elektromotor verdoppeln.

Schlussbetrachtung

Der Vergleich der erzeugten Geschwindigkeiten hat ein relativ geschlossenes Bild aller Systeme gezeigt. Somit ist das Argument der höheren Leistungsfähigkeit der E-Motoren nicht bestätigt. Zum Teil sind die Benzinmotoren im Vorteil. In diesem Test konnten die Wirkungsgrade der Propeller nicht ermittelt werden. Es wird aber deutlich, dass sich ein höherer Wirkungsgrad nicht über einen größeren Geschwindigkeitsbereich umsetzen lässt.

Noch vor einem Jahr waren Preise und Gewichte der Elektromotoren so hoch und die Reichweite so gering, dass ein Vergleich dieser Art eher sinnlos erschien. Mittlerweise haben die E-Motorsysteme aufgeholt. Die Gründe liegen in dem Fortschritt bei der Batterietechnologie. So haben sich die Gewichte auf weniger als ein Drittel reduziert. Die Preise stehen noch in einer konfusen Relation, von beispielsweise 100 : 4000 Euro. Die erforderliche Reichweite ist abhängig vom Befahrungsrevier. Auf kleinen Seen kann eine kleine Batterie ausreichen, während im Küstenbereich ein Sportboot mit der fahrtechnisch angemessenen Batteriekapazität, von deren Gewicht überfordert wäre. Die Preise der E-Motoren sind noch sehr hoch, obgleich die E-Motoren maschinentechnisch erheblich simpler sind als die Verbrennungsmotoren.

Die Energie aus Solarmodulen zu gewinnen, ist noch keine praktikable Lösung. Die erforderlichen Flächen stehen auf normalen Booten nicht zur Verfügung.

Eine gute Gewicht sparende Lösung für große Reichweiten, wäre ein Hybridantrieb mit einer Generatoreinheit. Diese Lösung würde eventuell auch geringere Investitionskosten verursachen. Vielleicht kann es den Generatorherstellern gelingen gekapselte Einheiten zu fertigen, die sinken und wieder geborgen werden können ohne das Gewässer zu verschmutzen. Der einzige Grund für den Einsatz der Elektromortertechnologie kann nur durch Umweltbestimmungen geliefert werden. Ob auf diese Weise der Umwelt gedient wäre, wurde hier nicht betrachtet.

3K Composite, Ennigerloh

Karl-Heinz Kukuck