

**PRAXISWISSEN**

JENS FEDDERN

# **E-MOBILITÄT AUF DEM WASSER**

**EMISSIONSFREI UNTERWEGS  
MIT SEGEL- UND MOTORBOOTEN**

**Delius Klasing Verlag**

# Inhaltsverzeichnis

|           |       |  |           |       |  |
|-----------|-------|--|-----------|-------|--|
| <b>6</b>  |       | Vorwort  | <b>30</b> | 3.5.3 | Fahrtwiderstand                        |
| <b>8</b>  | 1     | Warum ist Elektromobilität auf dem Wasser wichtig?                                     | <b>32</b> | 3.6   | Propeller: das unbekannte Wesen        |
| <b>9</b>  | 1.1   | Was denken die anderen von mir?  | <b>35</b> | 4     | Wie funktioniert der Elektromotor?     |
| <b>10</b> | 1.2   | Wie verändert diese neue Technologie das Erlebnis »Bootfahren«?                        | <b>35</b> | 4.1   | Gleichstrommotor                       |
| <b>11</b> | 1.3   | Wie kann die Elektro-Mobilität mein Leben an Bord leichter machen?                     | <b>36</b> | 4.2   | Asynchronmotor                         |
| <b>11</b> | 1.4   | Wie viel muss ich investieren und was kostet mich der Betrieb?                         | <b>37</b> | 4.3   | Synchronmotor                          |
| <b>12</b> | 1.5   | Wie sicher ist die Technologie, und wie vermeide ich, mit leerem Akku liegenzubleiben? | <b>38</b> | 4.4   | Bauformen                              |
| <b>13</b> | 1.6   | Wie verändert sich mein ökologischer Fußabdruck?                                       | <b>38</b> | 4.4.1 | Innenläufer                            |
| <b>16</b> | 2     | Wie funktioniert das mit dem Strom?  | <b>39</b> | 4.4.2 | Scheibenläufer                         |
| <b>16</b> | 2.1   | Elektrik: Strom, Spannung, Leistung und Kapazität                                      | <b>39</b> | 4.4.3 | Außenläufer                            |
| <b>20</b> | 2.2   | Stromarten   | <b>39</b> | 4.5   | Steuerung und Drehzahlregelung         |
| <b>20</b> | 2.2.1 | Gleichstrom  | <b>39</b> | 4.5.1 | Steuerung Verbrennungsmotor            |
| <b>21</b> | 2.2.2 | Wechselstrom   | <b>40</b> | 4.5.2 | Steuerung Elektromotor                 |
| <b>22</b> | 2.2.3 | Drehstrom  | <b>43</b> | 5     | Wie kann der Strom gespeichert werden? |
| <b>24</b> | 3     | Watt, Newtonmeter, Schlupf - wer blickt da noch durch?                                 | <b>43</b> | 5.1   | Batteriearten                          |
| <b>24</b> | 3.1   | Leistung   | <b>44</b> | 5.1.1 | Bleiakkus                              |
| <b>25</b> | 3.2   | Wirkungsgrad   | <b>46</b> | 5.1.2 | Lithium-Ionen-Batterien                |
| <b>26</b> | 3.3   | Kraft  | <b>48</b> | 5.2   | Batterieschaltungen                    |
| <b>27</b> | 3.4   | Drehmoment   | <b>50</b> | 5.3   | Hochvoltbatterien                      |
| <b>28</b> | 3.5   | Rumpfgeschwindigkeit, Rumpftypen und Fahrtwiderstand                                   | <b>51</b> | 5.4   | Speicherkonzepte der Zukunft           |
| <b>28</b> | 3.5.1 | Theoretische Rumpfgeschwindigkeit  | <b>51</b> | 5.4.1 | Neue Batteriekonzepte                  |
| <b>30</b> | 3.5.2 | Rumpftypen   | <b>51</b> | 5.4.2 | Wasserstoff                            |
|           |       |  | <b>55</b> | 6     | Wie tankt man ein Elektroboot?         |
|           |       |  | <b>56</b> | 6.1   | Landanschluss                          |
|           |       |  | <b>57</b> | 6.1.1 | Ladearten und Steckverbindungen        |
|           |       |  | <b>61</b> | 6.2   | Solar, Wind und Wasser                 |
|           |       |  | <b>62</b> | 6.2.1 | Solaranlagen                           |
|           |       |  | <b>63</b> | 6.2.2 | Windgenerator                          |
|           |       |  | <b>64</b> | 6.2.3 | Rekuperation                           |
|           |       |  | <b>66</b> | 6.3   | Brennstoffzelle                        |

|           |       |   |            |        |  |
|-----------|-------|---|------------|--------|--|
| <b>66</b> | 6.3.1 | Methanol-Brennstoffzelle                    | <b>95</b>  | 9.5    | Eignerhandbuch und Anweisung für den Schiffsführer                 |
| <b>66</b> | 6.3.2 | Wasserstoff-Brennstoffzelle                 | <b>96</b>  | 10     | Was muss ich bei Wartung und Unterhalt berücksichtigen?            |
| <b>67</b> | 6.4   | Generator                                   | <b>96</b>  | 10.1   | Korrosion  |
| <b>69</b> | 7     | Welche elektrischen Antriebe gibt es?       | <b>96</b>  | 10.1.1 | Elektrochemische Korrosion   |
| <b>69</b> | 7.1   | SUP mit Elektroantrieb                      | <b>97</b>  | 10.1.2 | Galvanische Korrosion  |
| <b>70</b> | 7.2   | Außenbordmotor                              | <b>98</b>  | 10.1.3 | Elektrolytische Korrosion  |
| <b>72</b> | 7.3   | Bugmotor                                    | <b>99</b>  | 10.2   | Motor  |
| <b>72</b> | 7.4   | Pod-Antrieb                                 | <b>100</b> | 10.3   | Antrieb  |
| <b>74</b> | 7.5   | Innenbordmotor                              | <b>100</b> | 10.4   | Batterien und Elektronik   |
| <b>74</b> | 7.5.1 | Saildrive                                   | <b>102</b> | 11     | Wie sieht die Umsetzung in der Praxis aus?                         |
| <b>75</b> | 7.5.2 | Wellenantrieb                               | <b>102</b> | 11.1   | Umrüstung von Verbrenner- auf Elektroantrieb                       |
| <b>76</b> | 7.5.3 | Hybridantrieb                               | <b>102</b> | 11.1.1 | Klassiker mit modernem Elektroantrieb                              |
| <b>77</b> | 8     | Welcher Antrieb passt zu mir?               | <b>104</b> | 11.1.2 | Ersatz eines 25-PS-Dieselmotors auf einem Motorboot                |
| <b>77</b> | 8.1   | Vergleich Verbrenner versus Elektroantrieb  | <b>105</b> | 11.1.3 | Flotte Holzschiffe   |
| <b>80</b> | 8.2   | Dimensionierung                             | <b>107</b> | 11.2   | Elektroantrieb ab Werk   |
| <b>80</b> | 8.2.1 | Motordimensionierung                        | <b>107</b> | 11.2.1 | BENETEAU GROUP steigt in die Entwicklung emissionsfreier Boote ein |
| <b>83</b> | 8.2.2 | Batteriedimensionierung                     | <b>108</b> | 11.2.2 | X Shore - der Tesla auf dem Wasser                                 |
| <b>84</b> | 8.3   | Investitions- und Betriebskosten            | <b>109</b> | 11.2.3 | Elektro-Hausboot mit Generator                                     |
| <b>86</b> | 8.4   | Für was soll ich mich entscheiden?          | <b>110</b> | 11.2.4 | J/9 Daysailer mit werkseitig installiertem Pod-Antrieb             |
| <b>88</b> | 9     | Was muss ich beim Einbau beachten?          | <b>111</b> | 11.2.5 | Greenline Yachts   |
| <b>88</b> | 9.1   | Vorschriften und ihre Anwendung             | <b>112</b> | 11.2.6 | Silent-Yachts  |
| <b>89</b> | 9.2   | Elektrische Installation wie bei den Profis | <b>115</b> | 11.2.7 | Elan-Yachts mit einer elektrischen Flotte                          |
| <b>89</b> | 9.2.1 | Kabel und Leitungen                         | <b>118</b> |        | Bildverzeichnis  |
| <b>90</b> | 9.2.2 | Schutzerdung                                | <b>123</b> |        | Literatur  |
| <b>91</b> | 9.2.3 | Fehlstromschutzschalter (RCCB)              | <b>124</b> |        | Stichwortverzeichnis   |
| <b>91</b> | 9.2.4 | Sicherungen und Leitungsschutzschalter      |            |        |  |
| <b>92</b> | 9.2.5 | Montage und Anschluss der Batterien         |            |        |  |
| <b>93</b> | 9.3   | Kühlung von Elektroantrieben                |            |        |  |
| <b>94</b> | 9.4   | Bedien- und Anzeigeeinrichtungen            |            |        |  |

# Vorwort

Ich bin seit vielen Jahren eng mit dem Wasser verbunden und auf ihm unterwegs, sowohl unter Motor als auch unter Segel. Unter anderem durfte ich als Wachoffizier der Deutschen Marine die vier 4.500-PS-MTU-Dieselmotoren auf einem Schnellboot kommandieren, mit deren Hilfe unser Boot mit 36 Knoten über die Ostsee bretterte. Was für ein Gefühl! Ein ähnlich tolles Erlebnis ist es für mich immer wieder, auf See hoch am Wind mit mehr als 10 Knoten Fahrt zu segeln, angetrieben nur durch den Wind.

Mit der Zeit habe ich einige Scheine gesammelt, so auch die Qualifikation als Maschinist und Schiffsführer auf Traditionsschiffen in weltweiter Fahrt. Das Thema E-Mobilität in Verbindung mit Wassersport war hierbei selten ein Thema. Klar kennt man die elektrischen Flautenschieber, aber sind die wirklich mehr als ein Spielzeug? Ich hatte von Exoten auf den Alpenseen in Süddeutschland und Österreich gehört, mir jedoch wenig Gedanken gemacht, ob das auch etwas für andere Reviere sein könnte. Es war eigentlich klar, dass ein Außenborder mit einem Benzinmotor und ein Innenborder mit einem Diesel ausgerüstet ist - bis auf schnelle Motorboote, die über einen hubraumstarken Benziner verfügen.

Nicht, dass mir elektrische Antriebe fremd sind. Als Elektronikingenieur habe ich diverse Systeme selbst konstruiert und behauptete, die Elektrotechnik auf Booten und Schiffen recht gut zu

kennen. Zudem habe ich beruflich viel mit Steigerung der Energieeffizienz, Emissionsreduzierung und Verbesserung der Nachhaltigkeit von komplexen Infrastrukturen zu tun. Aber lässt sich dieses nun ernsthaft auf den Wassersport übertragen? Ich bin der Meinung: Ja!

Die Freizeit auf dem Wasser zu verbringen, soll und darf in erster Linie Spaß machen, der dann aufhört, wenn er zu einer deutlichen Belastung für andere wird. Abgase, Ölfilm und Motorlärm wollen irgendwie nicht zu einer Freizeitbeschäftigung in der Natur passen, oder?

Nachdem in den letzten Jahrzehnten die maritimen Antriebssysteme eher von homöopathischen Evolutionen geprägt waren, stehen wir nun am Anfang einer Revolution: elektrische Antriebssysteme für alle Arten von Segel- und Motorbooten.

Nicht, dass die Idee vollständig neu ist, doch fristete sie bisher nur ein Schattendasein für ausgewählte Wasserstraßen und Idealisten. Die Elektrifizierung der gesamten Flotte auf den Seen in Süddeutschland und Österreich hat bewiesen, dass die Technik ausgereift ist.

Ein deutliches Zeichen, dass es nun ernst wird, sind die Investitionstätigkeiten großer Konzerne. Aus kleinen Garagenfirmen und Start-ups sind internationale Marktführer wie die

Firma Torqeedo entstanden, die 2017 vom Diesel-Spezialisten Deutz gekauft wurde. Neben Deutz befasst sich u. a. der Platzhirsch der Marinemotoren Volvo-Penta intensiv mit elektrischen Bootsantrieben und nimmt zeitgleich seinen weitverbreiteten D3-Diesel aus dem Programm. Parallel dazu fokussieren sich namhafte Yachtwerften auf den Trend des emissionsfreien Reisens und bieten ihre Flotte mit elektrischen Antriebssystemen oder ganz neue Bootskonzepte, wie z. B. Silent-Yachts, für diese Antriebsart an.

Es findet ein leiser, aber deutlicher Systemwechsel statt und jeder, der mit Wassersport zu tun hat, sollte sich damit auseinandersetzen: ob Schiffswerft, Hafenbetreiber, Vercharterer oder Skipper - keiner kann sich dem Trend entziehen.

Truls Tveitdal studierte an der Norwegischen Universität für »Science & Technology« und hat 2021 erforscht, dass neben technischen Themen mangelndes Bewusstsein sowie fehlendes Wissen Hauptgründe für die geringe Akzeptanz von elektrischen Bootsantrieben sind.<sup>1</sup>

Also lassen Sie uns mit diesem Buch den Wissensaufbau starten:

- Was ist bei einem elektrischen Antriebssystem anders als heute?
- Wie verändert sich das Erlebnis Bootsfahren?

- Was kostet das Ganze, und lohnt sich die Investition?
- Welchen Einfluss hat ein elektrischer Bootsantrieb auf den ökologischen Fußabdruck?
- Wie installiert man so ein System, und was ändert sich in Betrieb und Unterhalt?
- Anhand welcher konkreten Beispiele kann ich mir die praktische Anwendung vorstellen?

Kommt Ihnen die ein oder andere Frage bekannt vor? Dann willkommen an Bord: Hier bekommen Sie Antworten.

Nach einer kurzen Übersicht der technischen Grundlagen beschreibe ich zunächst die verschiedenen Komponenten der elektrischen Antriebssysteme. Praxistipps sollen Ihnen hier bei der Auswahl und Bewertung Ihres individuellen Systems helfen. Danach gehe ich neben einer Betrachtung der Wirtschaftlichkeit und Investitionsrechnung auf die Installation sowie den Betrieb und Unterhalt ein. Anhand diverser Praxisbeispiele verdeutliche ich schließlich die konkrete Umsetzung in der Praxis - von der Umrüstung eines kleinen Segelboots bis hin zur Blauwasseryacht.

Ich wünsche Ihnen viel Spaß beim Lesen und noch mehr Spaß beim emissionsfreien Reisen, egal ob mit Motor- oder Segelboot!

*Jens Feddern*

# 1 Warum ist Elektromobilität auf dem Wasser wichtig?



**Abbildung 1-1:** Ein Elektroantrieb kann das Leben an Bord deutlich einfacher machen. [bht2000/Shutterstock.com]

Es liegt im Trend, seine Freizeit auf dem Wasser zu verbringen. Allein in Deutschland gibt es über 30.000 km befahrbare Wasserwege und eine Küstenlänge von fast 2.400 km.<sup>2</sup> Auf diesen Strecken gibt es zahlreiche Möglichkeiten für einen aufregenden Segeltörn, spannende Wasserskierlebnisse und gemütliche Reisen durch die Kanäle und Flüsse. In Europa lieben es ca. 48 Millionen Menschen<sup>3</sup>, die Kräfte der Natur in den Segeln zu spüren, im uns umgebenden Nass zu plantschen und durch scheinbar unberührte Wildnis zu schippern.

Wie passt in dieses Bild der mit Abgasen versehene Kühlwasserstrahl, der aus der Bordwand austritt, der leichte Ölfilm, der sich in der Bilge gesammelt hat, und das Knattern des Diesels oder Benziners? Eines vorweg: Dies ist keine Frage der politischen Gesinnung. Es entspricht dem aktuel-

len Zeitgeist zu hinterfragen, welchen ökologischen Fußabdruck wir hinterlassen und wie z. B. der technische Fortschritt negative Auswirkungen verringern kann, ohne uns den Spaß zu nehmen.

Betrachten Sie das Buch, das Sie gerade in Ihren Händen halten: Es sieht ansprechend aus, liefert Ihnen (hoffentlich) interessante Informationen und wurde CO<sub>2</sub>-neutral produziert. Die ersten beiden Eigenschaften sollte ein Buch schon immer erfüllen, die dritte entspricht dem aktuellen Zeitgeist. Noch vor wenigen Jahren hätte diese Information nur wenige interessiert. Heute hat sich das Bewusstsein in der Gesellschaft verändert und beeinflusst unser Denken und Handeln.

Die Elektro-Mobilität auf der Straße ist mehr eine Revolution als eine Evolution im individuellen Nahverkehr. Die Lenker führender Autokonzerne kündigen den kompletten Produktionsstopp von Verbrennungsmotoren an und investieren Milliarden Euros in die Entwicklung und Produktion von Elektroautos. Das ist mehr als Kosmetik oder Opportunismus, hier geht es ums Überleben.

Und wie sieht es auf dem Wasser aus? Es ist erstaunlich, welche Dynamik die Elektro-Mobilität hier bereits angenommen hat. Viele der heute führenden Firmen dieser Branche kommen aus Süddeutschland und Österreich, denn auf vielen Seen in dieser Region ist ein elektrischer Antrieb bereits vorgeschrie-

ben bzw. die Nutzung von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor deutlich eingeschränkt. Diese Region kann man deshalb als erfolgreichen Feldversuch für die E-Mobilität auf dem Wasser sehen. Es ist erwiesen, dass die gesamte Bandbreite des Wassersports elektrisch betrieben werden kann: vom kleinen elektrischen Flautenschieber bis hin zum elektrifizierten *Riva*- oder *Boesch*-Speedboot zum Wasserskifahren. Die dafür notwendige Ladeinfrastruktur ist in dieser Region bereits relativ gut ausgebaut.

In weiteren Regionen Europas sind ähnliche Tendenzen absehbar: Ab 2025 werden aus der gesamten Innenstadt von Amsterdam Boote mit Verbrennungsmotoren verbannt. Um dieses Ziel zu erreichen, wurden bis Ende 2021 mehr als 100 Ladestationen installiert.<sup>4</sup> Auch im Blauwasserbereich gibt es diverse Beispiele, die beweisen, dass die Technologie ausgereift und zuverlässig ist.

Es gibt heute mehr als 100 Hersteller von Elektrobooten und -schiffen. Die Studie »Electric Boats and Ships 2017-2027« prognostiziert, dass der Markt für hybride und rein elektrische Boote und Schiffe bis 2027 weltweit auf über 20 Milliarden Dollar steigen wird. Gemäß dieser Studie sind Freizeitboote der größte und am schnellsten wachsende Markt.<sup>5</sup>

Vor diesem Hintergrund sollte sich jeder Skipper Gedanken machen, ob er oder sie auch von diesem Trend betroffen ist. Es gibt diverse Argumente dafür und dagegen, sodass ich im Folgenden unterschiedliche Diskussionspunkte beleuchten möchte.

### 1.1 Was denken die anderen von mir?

Es ist interessant zu verfolgen, welche Elektro-Modelle auf der Straße erfolgreich sind. Die Firma *Tesla* hat als Neueinsteiger die gesamte ehrwür-



Abbildung 1-2: Die Eelex 8000s als Kandidat für den Tesla auf dem Wasser. [X Shore]

dige Automobilindustrie aufgemischt und in 2021 die Zulassungszahlen von Deutschlands meistgekauftem Auto - dem VW Golf - überholt. Die Zielgruppe, die Tesla anspricht, sind keine ökologischen Außenseiter, die einen Ersatz für ihr Lastenrad suchen, sondern gutverdienende Automobilisten jedweder politischer und gesellschaftlicher Couleur. *Tesla* hat es geschafft, dass das Elektroauto nicht nur als ernstzunehmende Alternative akzeptiert wird, sondern zum Statussymbol für innovative und wohlhabende Fahrzeuglenker avanciert ist.

Dieses Rennen ist auf dem Wasser noch nicht entschieden, doch es gibt diverse Firmen, die diese Position einnehmen möchten. Die Firma *X Shore* aus



**Abbildung 1-3:** Der Elektromotor ist deutlich kleiner als ein Verbrenner und kann trotzdem richtig viel Power auf die Welle bringen. [Silent-Yachts]

Schweden, die mit ihrem *Eelex 8000s* ein elektrisches Luxus-Speedboot auf den Markt gebracht hat, wird bereits als »Tesla auf dem Wasser« bezeichnet. Es ist daher nur eine Frage der Zeit, bis elektrische Antriebe auch an Bord zum Statussymbol werden und das Fehlen des Motorendröhnens nicht als Mangel, sondern als Anerkennung gesehen wird. Mit der Aussage »Ich habe Benzin im Blut« wird der motorisierte Skipper in absehbarer Zeit einer Randgruppe angehören.

## 1.2 Wie verändert diese neue Technologie das Erlebnis »Bootfahren«?

Boote mit Elektroantrieb sind grundsätzlich keine neue Erfindung. Die Innovationen liegen in den modifizierten Elektromotoren und ihren Propellern, der verwendeten Elektronik zur Drehzahlregelung und Ladung sowie in der Speicherung der elektrischen Energie.

Im praktischen Betrieb ist es beeindruckend, dass das volle Drehmoment eines Elektroantriebes bereits bei sehr geringer Drehzahl zur Verfügung steht und somit die Manövrierbarkeit vereinfacht. Die Geräuschentwicklung ist dabei minimal, und zumindest im Betrieb sollte es keine Emissionen geben.

Der eigentliche Antrieb, also der Elektromotor, ist so klein, dass man ihn fast für den Anlasser des Verbrenners halten könnte. Dafür braucht aber die Elektronik ein paar Kästen, und insbesondere die Batterien wollen verstaut werden. Diese Geräte können verteilt an Bord untergebracht werden, da sie lediglich mit Kabeln verbunden werden.



Die Geschwindigkeiten, die mit E-Antrieben erreicht werden können, sind mindestens so hoch wie bei den Verbrennern, wobei die Beschleunigung aufgrund des hohen und konstanten Drehmoments deutlich stärker ist. Für Spaß ist also definitiv gesorgt - praktisch lautlos!

### **1.3 Wie kann die Elektro-Mobilität mein Leben an Bord leichter machen?**

Um diese Frage zu beantworten, sollte man sich vor allem Gedanken machen, was einem bezüglich der Antriebstechnik an Bord das Leben schwer machen kann. Dieses können z. B. die Zuverlässigkeit sein (Springt mein Motor an, wenn ich ihn brauche?), der Wartungsaufwand und die damit verbundenen Kosten (Was muss wie oft periodisch gewartet werden?), die Handhabung (Welche Vorbereitungen muss ich beim Seeklarmachen treffen?), das Ein- und Auswintern (Wer macht den Motor wie winterfest?) sowie die Geräusche und Emissionen.

Für diese aufgeführten Beispiele kann ein elektrisches Antriebssystem deutliche Erleichterung bringen. Die Komplexität der Antriebseinheit ist geringer, sodass diese Systeme nach erfolgreicher Installation grundsätzlich sehr zuverlässig arbeiten. Durch Seegang verstopfte Kraftstofffilter gibt es nicht. Auch der periodische Wartungsaufwand ist signifikant kleiner. Das Seeklarmachen kann sich auf die Betätigung eines Schalters beschränken, wobei größere Systeme ebenfalls eine Wasserkühlung für den Elektromotor

und die Elektronik benötigen. Dieses kann einen Einfluss auf das Ein- und Auswintern haben.

Je weniger der konventionelle (Hilfs-) Motor regelmäßig verwendet wird, desto größer können die Vorteile eines elektrischen Antriebssystems bezüglich Zuverlässigkeit und reduziertem Wartungsaufwand sein.

### **1.4 Wie viel muss ich investieren und was kostet mich der Betrieb?**

Die gute Nachricht ist, dass der Elektromotor nicht nur kleiner, sondern in der Regel auch günstiger als sein Verbrenner-Kollege ist. Werden die weiteren, notwendigen Komponenten des Gesamtsystems wie Regler und Batterien hinzugefügt, schmilzt der Kostenvorteil wie Butter in der Sonne, sodass die Investitionskosten (noch) deutlich höher sind.

In dieser Situation argumentieren clevere Verkäufer mit den Lebenszykluskosten: Man müsse das große Ganze betrachten inklusive der gesparten Wartungskosten, der nicht notwendigen Treibstoffkosten (die in den nächsten Jahren mit Sicherheit enorm steigen werden) und den gesteigerten Wiederverkaufswert. Diese Argumentation ergibt durchaus Sinn.

Was man zusätzlich betrachten sollte, sind die Kosten für die Ladeinfrastruktur. Eine einfache 230-V-Steckdose am Liegeplatz ist ggf. bereits vorhanden, sodass das langsame Laden über Nacht einfach und kostengünstig zu lösen ist.

Eine Schnellladestation, für die eine Drehstromleitung installiert werden

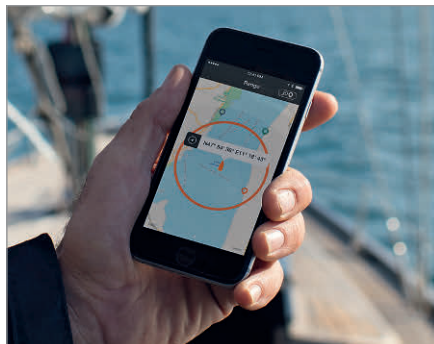
muss, kann schnell Kosten in Höhe von mehreren Tausend Euro verursachen.

### 1.5 Wie sicher ist die Technologie, und wie vermeide ich, mit leerem Akku liegenzubleiben?

Strom und Wasser vertragen sich nicht wirklich. Je höher die elektrische Spannung wird, desto kritischer wird es. Je größer die geforderte Leistung der elektrischen Antriebssysteme ist, desto höher muss die Spannung gewählt werden. Bis zu einer Leistung von ca. 20 kW werden Spannungen zwischen 24 V und 48 V verwendet. Darüber hinaus kommen z. B. Systeme aus der Automobilindustrie mit Spannungen von bis zu 400 V zum Einsatz. Diese Risiken können mit einer fachgerechten Installation unter Beachtung der einschlägigen Normen minimiert werden.

Man liest und hört häufig von verheerenden Fahrzeugbränden oder der Selbstentzündung von Lithium-Akkus in Mobiltelefonen. Dieses Erlebnis möchte man an Bord nicht haben. Aus diesem Grund werden für Antriebssysteme an Bord Lithium-Eisenphosphat-Batterien empfohlen, da diese weniger leicht entzündlich sind. Die Antriebsbatterien werden mit einem Batterie-Management-System (BMS) versehen, welches die korrekte Ladung und Entladung überwacht sowie eine gefährliche Überladung verhindert.

Die Brandlast, die ein gefüllter Diesel- oder Benzintank an Bord verursacht, ist häufig deutlich größer als die der Batteriespeicher. Zusätzlich gibt es hier mehr Fehlerquellen, die einen



**Abbildung 1-4:** Das integrierte Messsystem gibt eine recht zuverlässige Prognose der verbleibenden Reichweite. [Torqeedo]

Austritt des Kraftstoffes verursachen könnten.

Die Zuverlässigkeit elektrischer Antriebssysteme ist bei korrekter Dimensionierung und Installation sehr hoch. Am Antriebsstrang können kaum Standschäden auftreten. Die Komponenten sind sehr gut gekapselt und geschützt, und es gibt wenig Verschleißteile.

Der kritische Pfad ist dagegen der Energiespeicher. Obwohl Elektro-Motoren einen deutlich besseren Wirkungsgrad als ihre Verbrenner-Kollegen haben, ist die Energiedichte im flüssigen Treibstoff um Zehnerpotenzen höher, als in einer Batterie gespeichert werden kann. Somit wird die Reichweite durch die verfügbare Batteriekapazität begrenzt, und diese wiederum bestimmt das Gewicht und die Investitionskosten sowie die Geschwindigkeit, mit der wir unterwegs sind.

Gibt es die Möglichkeit, unterwegs Strom zu tanken, wirkt sich dieses positiv auf die Reichweite aus. Stromerzeugung mit Solar und Wind bieten

sich hierfür an. Bei Seglern zusätzlich die Rekuperation, indem der Antriebsmotor als Generator wirkt und so Strom erzeugt.

Die Reichweite kann durch einen Generator vergrößert werden, der durch einen Verbrennungsmotor angetrieben wird. Dieses kann durch einen tragbaren Inverter-Generator gelöst werden, der in der abgelegenen Ankerbucht ein paar Stunden knattern muss oder einen vollständigen Hybridantrieb, der sowohl elektrischen als auch konventionellen Vortrieb ermöglicht.

Durch die integrierten Messsysteme ist die Vorhersage der Reichweite relativ genau möglich. Im freien Gewässer kann man durch die Wahl einer effizienten Geschwindigkeit die Reichweite positiv beeinflussen. Muss man jedoch gegen Wind oder Strom andampfen, kann die Reichweite etwas knapper ausfallen.

## 1.6 Wie verändert sich mein ökologischer Fußabdruck?

Ich wage die Behauptung, dass (fast) alle Wassersportler ihr Hobby im Einklang mit der Natur ausführen möchten. Es entspricht also dem Zeitgeist zu hinterfragen, wie es um die Ökobilanz dieses Hobbys steht. Insbesondere steht die Frage im Raum, ob und wenn ja, bis wann der Wassersport klimaneutral sein wird.

In 2012 hat die EU das Forschungsprojekt »Boatcycle« gefördert, in dem die Umweltbelastung durch Boote über ihren gesamten Lebenszyklus betrachtet wurde.<sup>6</sup> Um eine Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Phasen ihres Bestehens zu ermöglichen, wurden u. a. jeweils die CO<sub>2</sub>-Emissionen ermittelt und ins Verhältnis gesetzt. Ca. 1/3 ergeben sich aus den Bestandteilen der Yacht



**Abbildung 1-5:** Der Umwelteinfluss des Bootes betrifft den gesamten Lebenszyklus, vom Bau bis zum Abwracken. [Dark\_Side/Shutterstock.com]

sowie ihrer Herstellung und ca. 5 % aus der Entsorgung. Hier spielen die verwendeten Materialien und ihre Recyclingfähigkeit eine besondere Rolle. Ca. 20 % werden während der Nutzung durch Unterhalt und Pflege verursacht, und rund 45 % gehen auf das Konto des Betriebs.<sup>7</sup>

Die Art, wie und womit wir unser Boot bewegen, hat einen wesentlichen Einfluss auf den ökologischen Fußabdruck. Es ist nicht überraschend, dass der eines Motorboots deutlich größer ist als der eines Segelboots. Unter Berücksichtigung der Nutzungsdauer (Segelyacht 600 Stunden pro Jahr, Motorboot 250 Stunden) hat die Boatcycle-Studie ein Verhältnis von ca. 8:1 ermittelt. Somit erzielen elektrisch betriebene Motorboote den größten positiven Effekt auf den ökologischen Fußabdruck

des Wassersports. Bei Seglern ist die praktische Umsetzbarkeit häufig einfacher, da der Motor grundsätzlich nur zum Manövrieren und als Flautenschieber benötigt wird und somit kleiner ausfällt und weniger verwendet wird.

Die gesamten ökologischen Vorteile der Betriebsphase eines Fahrzeugs mit Elektroantrieb können mit einem einfachen Argument ausgehebelt werden: den Ressourcenbedarf und die Emissionen bei der Herstellung der Batterien. Die Produktion der Batterie macht in der Automobilindustrie heute 40 % der gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen aus, an Bord wird es nicht viel weniger sein. Darüber hinaus benötigt die Batterie wertvolle Rohstoffe wie Lithium, Kobalt, Nickel, Mangan, Kupfer, Aluminium und Graphit. Deren Abbau hinterlässt immer einen negativen ökologischen Fußab-



**Abbildung 1-6:** Bootfahren mit Verbrennungsmotor kann einen unmittelbar sichtbaren ökologischen Fußabdruck verursachen. [Alvaro Hernandez Sanchez/Shutterstock.com]

druck, wobei speziell für die Förderung von Kobalt in verschiedenen Ländern ausreichend Sozial- und Sicherheitsstandards fehlen.<sup>8</sup>

Betrachtet man auch hier das große Ganze, kann man das Argument anführen, dass 80 % der Verschmutzung der Meere von Land aus verursacht werden und dass Freizeitboote weniger als 1 % hierzu beitragen.<sup>9</sup> Der weltweite Beitrag der Schifffahrt an den vom Menschen verursachten CO<sub>2</sub>-Emissionen beträgt 3 %. Der Beitrag des Wassersports ist quasi nicht messbar. Es ist somit alles nur eine Frage der Perspektive.

Es geht jedoch nicht nur um das große Ganze, an dem wir scheinbar sowieso nichts ändern können, sondern um die unmittelbaren Auswirkungen unserer Boote auf die Umwelt:

- Es ist richtig, dass ein Boot mit elektrischem Antrieb während des Betriebs keine Emissionen verursacht. Wird die elektrische Energie zum Laden aus erneuerbaren Quellen gewonnen, so erfolgt auch das »Tanken« emissionsfrei.
- Das Bild der schwarzen Rauchwolke des wenig benutzten Diesels und die damit verbundenen schwarzen Flecken auf der Wasseroberfläche gibt es nicht.
- Die Geräuschentwicklung eines Verbrennungsmotors ist deutlich größer, sodass eine Unterhaltung bei lau-

fendem Motor oft nur eingeschränkt möglich ist. Diesen Lärm muss auch die Umwelt verkraften.

- Benzin oder Diesel an Bord erzeugen immer auch den Geruch einer mitfahrenden Bunkerstation. Die Tanks müssen entlüftet werden, und Putzlappen mit Diesel oder Benzin werden in einer Backskiste verstaut.

Weitere, unmittelbare Fragen unterstreichen die Notwendigkeit, sich mit diesem Thema aktiv auseinanderzusetzen:

- Welche Motoren werden wir an Bord noch verwenden, wenn Verbrennungsmotoren an Land eines Tages verschwinden?
- Wie entwickeln sich die Investitions- und Betriebskosten, wenn Verbrennungsmotoren zum Nischenprodukt werden?
- Welche gesetzlichen Vorgaben wird es in absehbarer Zeit für den Betrieb von Verbrennungsmotoren an Bord geben? Kann ich diese mit meiner Installation erfüllen?
- Welche Reviere darf ich bereits heute oder in Zukunft mit einem Verbrennungsmotor nicht mehr befahren?
- Wie wird die Kraftstoffversorgung in Zukunft sichergestellt?

Dieses sollte Motivation genug sein, über alternative Antriebsmöglichkeiten nachzudenken.

# Stichwortverzeichnis

## A

Abwärme 73, 79, 80  
AGM 45  
Akku 45  
Amsterdam 9  
Antriebsbatterie 51, 79, 98  
Antriebsmotor 38, 83  
Antriebsvarianten 69  
Anzeigeeinrichtungen 94  
Asynchronmotor 36  
Außenbordmotor 71, 85  
Außenbordwasser 93  
Außenläufer 39

## B

Batterie 43  
Batterie Hauptschalter 92  
Batteriekonzepte 51  
Batterie-Management-System 47  
Batterieschaltungen 48  
Betriebskosten 84  
Bleiakku 44  
Brandlast 12  
Brennstoffzelle 66  
Brennstoffzellenmodul 66  
Bugmotor 72

## D

Dieselmotor 25, 76  
Dimensionierung 80  
Drehmoment 28  
Drehstrom 22  
Drehzahlregelung 39

## E

Eignerhandbuch 95  
Einbau 88  
Eingangsleistung 68  
Elektromotor 35 ff.

Emissionen 13  
Energiedichte 12, 51, 77  
Energiegewinnung 65

## F

Fehlstromschutzschalter 91, 101  
Festkörperbatterien 51  
Flächenverhältnis 34  
Freischlag 32  
Frequenzumrichter 42

## G

Generator 68  
Geräusentwicklung 33, 72, 74  
Gesamtwiderstand 31  
Geschwindigkeit 31 ff.  
Getriebe 26, 40  
Gewicht 46, 73  
Gleichspannung 21  
Gleichstrom 21  
Gleichstrommotor 35  
Gleiter 32, 82

## H

Halbleiter 30  
Hochvoltbatterien 50  
Hybridantrieb 76

## I

Initialkosten 48  
Innenbordmotor 74  
Innenläufer 38  
Inspektion 85  
Installation 51  
Investitionskosten 11, 81

## K

Kabel 89  
Kabelschuhe 92

Kapazität 26, 43, 83  
 Kavitation 33  
 Kommutator 36  
 Korrosion 96 ff.  
 Kosten 84 ff.  
 Kraft 28  
 Kühlkreislauf 93  
 Kühlsystem 93  
 Kühlung 93 ff.  
 Kurzschluss 91 ff.

## L

Ladearten 57  
 Ladedauer 57  
 Ladegerät 56 ff., 101  
 Ladekennlinie 56  
 Ladestrom 55 ff.  
 Ladevorgang 55 ff.  
 Ladezeit 55 ff.  
 Landanschluss 56 ff.  
 Lebensdauer 48, 96, 101  
 Leistung 28  
 Leistungsaufnahme 17, 22, 83  
 Leitermaterial 89  
 Leitungsschutzschalter 91  
 Lithium-Eisen-Phosphat 47  
 Lithium-Ionen-Batterien 47  
 Lizenz 47

## M

Magnetfeld 35 ff.  
 Mehrkosten 86, 104, 117  
 Messcomputer 20  
 Methanol 66  
 Motordrehzahl 27

## N

Neutralleiter 90  
 Norm 88  
 Notstop 94 ff.  
 Nutzenergie 25

## O

Ökobilanz 13

## P

Parallelschaltung 49 ff.  
 Phasenverschiebung 36  
 Pilotkontakt 58  
 Pod-Antriebe 72, 10  
 Pouchzellen 47  
 Profilform 32  
 Propeller 32  
 Propellerflügel 32  
 Pulsweitenmodulation 36, 42

## Q

Querschnittsfläche 18

## R

Reibungswiderstand 30 ff.  
 Reichweite 79 ff.  
 Reihen-Parallelschaltung 49  
 Reihenschaltung 47  
 Rekuperation 64, 80, 108  
 Rumpfform 32, 81  
 Rumpfgeschwindigkeit 28 ff., 82  
 Rundzellen 47

## S

Saildrive 74, 116  
 Scheibenläufer 39  
 Schiffsschraube 32  
 Schleifring 35 ff.  
 Schlupf 32 ff.  
 Schnellladung 59 ff.  
 Schub 34, 75, 81  
 Schubkraft 26 ff.  
 Schutzerdung 90  
 Schutzmaßnahmen 19  
 Schutzschalter 91 ff.  
 Seeklarmachen 11  
 Sicherung 91 ff.  
 Solarmodule 62

Solarzellen 62  
Sonne 61 ff.  
Spannung 16 ff.  
Spannungsquelle 16  
Speicherkapazität 44, 76  
Stand-Up-Paddle Board 69  
Stator 35 ff.  
Steckverbindungen 57, 101  
Steuerung 40, 88  
Stromaggregat 68  
Stromarten 20 ff.  
Stromerzeugung 63  
Stromfluss 17, 22, 36  
Stromkreis 16, 91, 95  
Strommesser 20  
Super-Charger 61  
Synchronmotor 37

## T

Traktionsbatterie 46

## U

Unterhalt 96 ff.

## V

Verbrennungsmotor 77 ff.  
Verdränger 30 ff.  
Verlustleistung 25, 55, 93  
Vollzyklus 44  
Vorschriften 51, 88  
Vortriebsleistung 24 ff., 82

## W

Wartung 96 ff.  
Wartungsaufwand 11, 79  
Wartungskosten 11, 79, 85  
Wasserkühlung 78, 93  
Wasserstoff 43 ff., 66  
Wechselspannung 21, 90  
Welle 75, 100  
Wellenantrieb 75, 100  
Wellenwiderstand 28 ff.

Widerstand 17 ff.  
Widerstandskraft 30  
Wind 63  
Windgenerator 63  
Wirkungsgrad 24

## Z

Z-Antrieb 74  
Zugentlastung 89



Von Jens Feddern bereits im Delius Klasing Verlag erschienen:  
Theorie und Praxis der Bordelektrik

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek  
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in  
der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische  
Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

1. Auflage

ISBN 978-3-667-12366-4

© Delius Klasing & Co. KG, Bielefeld

Lektorat: Felix Wagner

Coverfotos: Silent-Yachts (o.), Torqeedo (u.l.+r.), bht2000/  
Shutterstock.com (u.M.)

Titelrückseite: Torqeedo (l.), Silent-Yachts (M.), aquawatt (r.)

Illustrationen: Jens Feddern

Umschlaggestaltung: Felix Kempf, [www.fx68.de](http://www.fx68.de)

Lithografie: Mohn Media, Gütersloh

Druck: Print Consult GmbH, München

Printed in Slovakia 2022

Alle in diesem Buch enthaltenen Angaben und Daten wurden von  
dem Autor nach bestem Wissen erstellt und von ihm sowie vom Ver-  
lag mit der gebotenen Sorgfalt überprüft. Gleichwohl können wir kei-  
nerlei Gewähr oder Haftung für die Richtigkeit, Vollständigkeit und  
Aktualität der bereitgestellten Informationen übernehmen.

Alle Rechte vorbehalten! Ohne ausdrückliche Erlaubnis des Verlages  
darf das Werk weder komplett noch teilweise reproduziert, übertra-  
gen oder kopiert werden, wie z. B. manuell oder mithilfe elektroni-  
scher und mechanischer Systeme inklusive Fotokopieren, Bandauf-  
zeichnung und Datenspeicherung.

Delius Klasing Verlag, Siekerwall 21, D - 33602 Bielefeld

Tel.: 0521/559-0, Fax: 0521/559-115

E-Mail: [info@delius-klasing.de](mailto:info@delius-klasing.de)

[www.delius-klasing.de](http://www.delius-klasing.de)



**Klimaneutral**

Druckprodukt

ClimatePartner.com/12515-2206-1002

