

Modellentwicklung und techno-ökonomische Analyse eines hybrid-elektrischen Antriebssystems für die Binnenschifffahrt anhand konkreter Routenprofile

Tobias Reidl¹, Anton Haumer², Belal Dawoud^{1*}

¹Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg (OTH Regensburg), Fakultät Maschinenbau, Labor Sorptionsprozesse, Galgenbergstraße 30, 93053 Regensburg, Deutschland

²Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg (OTH Regensburg), Fakultät Elektro- und Informationstechnik, Labor Elektrische Maschinen und Antriebstechnik, Seybothstraße 2, 93053 Regensburg, Deutschland

*Korrespondierender Autor: Prof. Dr.-Ing. Belal Dawoud
belal.dawoud@oth-regensburg.de

Abstract—Die Pariser Klimaziele können nur durch eine vollständige Dekarbonisierung aller Energiesektoren erreicht werden. Im Verkehrssektor wird der Großteil der Güter derzeit noch mit LKWs transportiert, obwohl diese deutlich höhere Emissionen pro beförderter Tonne an Fracht, verglichen mit Bahn oder Containerschiffen, aufweisen. Die Verlagerung des Güterverkehrs von der Straße auf die Binnenschifffahrt bietet daher ein großes Potenzial zur Einsparung umweltschädlicher Emissionen. Darüber hinaus bieten hybride Antriebssysteme mit wasserstoffbetriebenen Brennstoffzellen Chancen für die vollständige Dekarbonisierung der Schifffahrt.

Durch Modellierung relevanter Komponenten eines hybrid-elektrischen Antriebssystems in Modelica/Dymola und anschließender Simulation soll eine Aussage über die technische und wirtschaftliche Machbarkeit von emissionsfreien Binnenschub-schiffen getroffen werden. Dabei werden Brennstoffzellen im Zusammenspiel mit Akkumulatoren und einer Photovoltaikanlage betrachtet. Ausgehend von der wichtigsten Route für den Gütertransport auf der Binnenwasserstraße zwischen Duisburg und Rotterdam, werden zwei Leistungsklassen von Binnenschub-schiffen untersucht.

Die Dimensionierung der einzelnen Komponenten ist ein entscheidender Faktor für die ökonomische Realisierbarkeit solcher Antriebssysteme. Es zeigt sich, dass ein wirtschaftlicher Einsatz solcher Hybrid-Antriebssysteme bereits in wenigen Jahren möglich ist. Lediglich die Produktionskosten der Komponenten und vor allem die des Wasserstoffs müssen in den nächsten Jahren und Jahrzehnten weiter fallen, damit hybrid-elektrische Antriebssysteme eine Alternative zu konventionellen Verbrennungsmotoren bilden.

I. EINLEITUNG

Die wachsende Energienachfrage und der zunehmende internationale Handel führen zu immer höheren Schadstoffemissionen und der damit verbundenen globalen Erwärmung. In internationalen Verträgen, wie dem Pariser Klimaabkommen, haben sich nahezu 190 Länder dazu verpflichtet, ihre Schadstoffemissionen in den nächsten Jahrzehnten deutlich zu reduzieren, mit dem Ziel die globale Erwärmung unter 1,5 Grad Celsius zu halten. Konkret bedeutet dies eine Dekarbonisierung in den Energiesektoren Strom, Wärme und Verkehr. Sollen diese Ziele

eingehalten werden, muss in Zukunft verstärkt auf ressourcenschonende Verkehrsträger, wie Bahn oder Binnenschiffe für Personen- und Güterverkehr gesetzt werden.

Im Jahr 2020 betrug der Anteil des Güterverkehrs mittels Binnenschifffahrt lediglich 6,9% gegenüber dem Straßengüterverkehr mit 72,5% [1]. Bereits heute bietet der Gütertransport mit dieselbetriebenen Binnenschiffen gegenüber dem Frachtverkehr auf der Straße große Potentiale zur Emissionsreduktion. Die CO₂-Emissionen durch Lastkraftwagen (LKW) pro Kilometer und transportierter Tonne an Fracht (Tonnenkilometer) übersteigen das Fünffache der Emissionen pro Tonnenkilometer in der Binnenschifffahrt [2]. Trotz dieses Vorteils steigt das Interesse an emissionsfreien Antriebssystemen für die Binnenschifffahrt zunehmend.

Um solche Antriebssysteme zu realisieren, wurden vermehrt Studien und Projekte zur Brennstoffzellenanwendungen in der Schifffahrt durchgeführt, da diese eine Reihe von Vorteilen bieten, wie beispielsweise keine lokalen Emissionen, hohe Energie- und Leistungsdichte und geringe Lärmbelastigung [3]. Die größte Herausforderung bei dieser Technologie besteht derzeit darin, die Lebensdauer zu erhöhen und sie wirtschaftlich konkurrenzfähig zu herkömmlichen Antrieben zu machen.

Um das Ziel eines emissionsfreien und wirtschaftlich konkurrenzfähigen Hybridantriebs zu erreichen, wird für die Untersuchungen in dieser Arbeit ein Simulationsmodell entwickelt. Dieses Modell ermöglicht eine vereinfachte energetische Betrachtung eines hybriden Schiffsantriebs, der die Komponenten Brennstoffzelle, Akkumulator und Photovoltaik beinhaltet. Das Modell besitzt zwei verschiedene Energiemanagementstrategien, die untersucht und in Bezug auf Endenergieverbrauch optimiert werden. Dadurch kann individuell für die Leistungsanforderungen verschiedener Schiffstypen eine Analyse erfolgen. Mithilfe dieses Modells soll anschließend eine Aussage zur technischen Machbarkeit eines hybriden und emissionsfreien Antriebs getroffen werden. Des Weiteren werden die Betriebs- und Investitionskosten dieses Antriebssystems mit einem konventionellen Antrieb ähnlicher Leistungsklasse verglichen.

Wasserstoff stellt ein großes Potential für die Substitution konventioneller Energieträger dar. Dieser kann sowohl in einem dafür angepassten Verbrennungsmotor, als auch mithilfe einer Brennstoffzelle in mechanische, thermische oder elektrische Energie gewandelt werden. Dabei werden keine umweltschädlichen Emissionen ausgestoßen. Mit dem Ausbau erneuerbarer Energien, steigt auch der Bedarf an Langzeitspeichern, um Fluktuationen in der Energieproduktion zeitlich auszugleichen. Mithilfe von Elektrolyseuren kann diese überschüssige elektrische Energie zu chemischer Energie in Form von Wasserstoff gewandelt und in großen Kavernenspeichern gelagert werden, bis erneut Energiebedarf besteht. Folgend werden wichtige Rahmenbedingungen zum Thema Wasserstoff erläutert.

II. WASSERSTOFF ALS ENERGIETRÄGER

A. Energiewirtschaft und Produktion

Für die vollständige Dekarbonisierung des Energiesystems, spielt Wasserstoff eine entscheidende Rolle. Ein wesentliches Argument für die Einführung von Wasserstoff ist die Möglichkeit der Sektorenkopplung. Durch den intensiven Ausbau erneuerbarer Energien können zeitliche Fluktuationen in der Energiebereitstellung entstehen, welchen durch flexiblen Einsatz von Elektrolyseuren, begegnet werden kann. Des Weiteren bieten Brennstoffzellen eine effiziente und emissionsfreie Möglichkeit, diesen H_2 wieder in elektrische Energie zu wandeln. Bei der Einspeicherung elektrischer Energie durch Elektrolyse, sowie bei der Rückwandlung treten jedoch Verluste auf, welche sich auf die Gesamteffizienz auswirken. Dennoch ist das Ziel der europäischen Kommission bis zum Jahr 2030 die installierte Leistung von Elektrolyseanlagen von 3,2 GW auf 8,2 GW zu steigern, um eine umweltfreundliche Produktion von Wasserstoff sicher zu stellen [4]. Nach dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz soll auch intensiv am Einsatz von Wasserstoff und Brennstoffzellen im Wärmesektor gearbeitet werden [5].

Eine Gegenüberstellung der erläuterten Klassifizierungen, deren Ausstoß an CO_2 -Äquivalent und den spezifischen Produktionskosten ist in Tabelle I dargestellt. Anzumerken ist hierbei, dass bei blauem Wasserstoff das angeführte CO_2 -Äquivalent dem von grauem Wasserstoff entspricht, da die Einsparung durch CSS nicht allgemein angegeben werden kann.

Nach der Well-to-Tank Analyse von Zerta et al. [6] entspricht der angegebene Preis für grünen Wasserstoff, einem Dieseläquivalent von 2,6 € pro Liter im Jahr 2020. Für das Jahr 2030 werden Preise von 6,2 €/kg und dadurch 1,85 €/l angegeben. Dies würde den Tankstellenpreis für Diesel vom 01.04.2022 mit 1,968 € pro Liter (inkl. Steuer) unterschreiten [7]. Diese Kalkulation beinhaltet, im Gegensatz zu den, in Tab. I gezeigten spezifischen Produktionskosten, zusätzlich die dafür benötigten Investitionen für Peripheriekomponenten der Tankstellenanlagen. Die in Tab. I dargestellten Preise beziehen sich jedoch lediglich auf die Kosten zur Gewinnung von Wasserstoff. Die Produktion des H_2 in dieser Betrachtung erfolgt durch Power-to-X- (PtX) Anlagen und bei Kosten für erneuerbaren Strom von 9,4 ct/kWh_{el} im Jahr 2020 und 8,6

ct/kWh_{el} im Jahr 2030. Das Dieseläquivalent ($D\ddot{A}$) ergibt sich aus Gleichung (1).

$$D\ddot{A} = \frac{\beta_{H_2} \cdot w_{V,Diesel}}{LHV_{H_2}} \quad (1)$$

Die Berechnung erfolgt dabei mit der volumetrischen Energiedichte von Diesel $w_{V,Diesel}$ mit 9,96 kWh/dm³, dem unterem Heizwert von Wasserstoff LHV_{H_2} mit 33,33 kWh/kg und dem spezifischen Preis für die H_2 -Produktion β_{H_2} [8].

B. Speicherung von Wasserstoff für den mobilen Einsatz

Als Speichertechnologie wird die gasförmige Wasserstoffspeicherung in Drucktanks (engl. compressed hydrogen; CH₂) gewählt. Dabei wird der Wasserstoff komprimiert und in Druckbehälter vom

Typ III, oder Typ IV gelagert. Der Typ III Speicherzylinder ist ein zwei-Komponenten Behälter mit Kohlefaserverbundmaterial zur Stabilisierung der Aluminiumummantelung des Tanks und Typ IV besteht aus thermoplastischen Kunststoff, verstärkt durch Fasermaterial. Der Einsatz von Typ IV Speicherzylinder kommt bisher nur begrenzt für kleine Tankvolumen, wie beispielsweise in der Automobiltechnik zum Einsatz und bietet einen Gewichtsvorteil gegenüber den anderen Bauformen. Für größere Anlagen wird meist, aufgrund eines guten Verhältnisses zwischen Dichtigkeit und Produktionskosten, ein Speichertank Typ III verwendet. [12] Kommerziell verfügbar sind derzeit 350 bar und 700 bar Drucktank-Systeme. An einer 1.000 bar Technologie wird derzeit vom Fraunhofer-Institut geforscht [13].

Die Dichte von realem Wasserstoff in Abhängigkeit von dem Druck zeigt einen nicht-linearen Zusammenhang. Es ergeben sich die in Tabelle II aufgeführten Werte für die Dichte und der, auf den LHV bezogenen, volumetrischen Leistungsdichte. So zeigt sich eine deutliche Zunahme der Leistungsdichte mit zunehmenden Systemdrücken. Problematisch bei hohen Drücken ist die Dichtigkeit der Tanksysteme und die aufzubringende Kompressionsarbeit. Betrachtet man die Energiebilanz eines 700 bar Tanks, so werden bis zu 15 % der darin gespeicherten Energie für die Komprimierung benötigt [15].

III. SYSTEMDESIGN

Laut der Studie zum Emissionsreduktionspotential im Schiffsektor von Bouman et al. [16] können signifikante Anteile durch den Einsatz alternativer Energiequellen und Antriebe eingespart werden. Darunter wird dem Einsatz von ökologischen Kraftstoffen ein Einsparpotential von 25–84% CO_2 -Äq. und dem Einsatz von Brennstoffzellen allgemein 2–20% CO_2 -Äq. zugeschrieben. Weiterhin kann durch hybride Antriebssysteme mit Photovoltaik bis zu 12 % und mit Akkumulatoren bis zu 45 % der Endenergie eingespart werden.

Die Ausführung der Hybridisierung des Antriebssystems mit den Komponenten Brennstoffzelle, Akku und Photovoltaik kann durch das Full-Converter-based DC Integration Scheme (deutsch: Vollständig umrichterbasiertes DC- Integrationschema) realisiert werden und ist nach Haxhiu et al. [17] den

Tabelle I
GEGENÜBERSTELLUNG AUSGEWÄHLTER PRODUKTIONSVERFAHREN VON WASSERSTOFF [9]

Farbe	Verfahren	CO ₂ Äqu. in tCO ₂ /tH ₂	spezifische Kosten in €/kg H ₂	Diesel- äquivalent in €/l
grün	Elektrolyse aus erneuerbaren Energien	0 ⁽¹⁾	2,5 – 5,5 ⁽²⁾	0,73 – 1,62 ⁽²⁾
türkis	Methanpyrolyse	variabel ⁽³⁾	2 – 5 ⁽⁴⁾	0,59 – 1,47 ⁽²⁾
blau	Dampf- formierung mit CSS	5 – 7 ⁽¹⁾ ohne CSS	2 ⁽²⁾	0,59 ⁽²⁾
grau	Kohlevergasung	13,3 ⁽³⁾ – 25,56 ⁽¹⁾ grau – schwarz	1,5 ⁽²⁾	0,44 ⁽²⁾

⁽¹⁾ aus Horng and Kalis [9]; ⁽²⁾ aus Europäische Kommission [4]; ⁽³⁾ aus Greenpeace Energy eG [10]; ⁽⁴⁾ aus Koller [11];

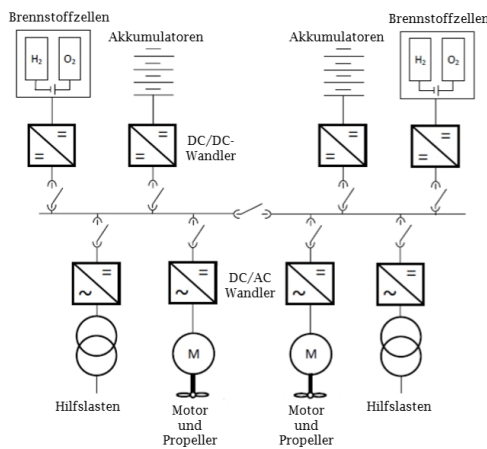


Abbildung 1. Integrationsschema der Full-Converter-Based Hybridisierung [17]

Anforderungen der Marine-Schifffahrt entsprechend am besten geeignet. Dieses Schema ist in Abbildung 1 dargestellt.

Um eine uneingeschränkte Manövrierfähigkeit zu gewährleisten, werden zwei getrennte Motorsteuerungen (vgl. DC/AC-Wandler in Abb. 1) vorgesehen. Die schiffsinternen Hilfslasten sind, wie die Elektromotoren, mit eigenen DC/AC-Wandler an die Sammelschiene angeschlossen. Für beidseitige Motor-

Tabelle II
DICHTE UND ENERGIEDICHTE ABHÄNGIG VON SPEICHERDRUCK
(NACH [14])

Druck in bar	Dichte in kg/m ³	Energiedichte in kWh/m ³
1	0,083	3
350	24	ca. 800
700	40	ca. 1.330
1.000	49	ca. 1.630

Propeller-Kombinationen gibt es Subsysteme aus Brennstoffzelle und Batterie. Diese sind jeweils an einen DC/DC-Wandler gekoppelt und über Schalter, bzw. Sicherheitseinrichtungen, an den gemeinsamen DC-Bus angeschlossen. Sollte in einem der Erzeugerzweige ein Fehler auftreten, so besteht eine Absicherung gegen kompletten Ausfall des Antriebssystems. Es wird sodann ein Betrieb mit reduzierter Leistungsfähigkeit gewährleistet.

Das in Abb. 1 dargestellte Integrationsschema bildet die Vorlage für eine Realisierung in Modelica/DYMOLA Software-Umgebung. Die Systemintegration der Photovoltaik-Anlage wird identisch durchgeführt. Für eine vereinfachte Implementierung wird die in Abb. 1 dargestellte Hybridisierung reduziert auf einen Verbraucher, eine Brennstoffzelle, einen Akkumulator, ein PV-System und dem Energiemanagementsystem (Abk.: EMS), welches die nötigen Wandler beinhaltet. Dieses vereinfachte Schema ist in Abb. 2 dargestellt. Die Pfeile zeigen dabei die möglichen Richtungen der Energieflüsse. Falls Informationen über den Bedarf an Hilfsenergie vorhanden sind, so können diese dem Lastgang nachträglich hinzugefügt werden. Häufig werden jedoch keine Daten bezüglich des schiffsinternen Verbrauchs erhoben oder bereitgestellt.

IV. GRUNDLAGEN UND EINSCHRÄNKUNGEN DES MODELLS

A. Brennstoffzelle

Das elektrische Verhalten der Brennstoffzelle wird durch eine Approximation der Kennlinie einer PEM-Brennstoffzelle erzeugt. Hierfür wird das *Horizon Fuel Cell Technologies H3000* Benutzerhandbuch verwendet, da dort detaillierte Kennlinien bereitgestellt werden.

Um eine Skalierbarkeit des Datensatzes zu gewährleisten, können Spannung und Strom des gesamten Datensatzes auf den Nennbetriebspunkt der Brennstoffzelle normiert werden (gemäß Gl. 2 und 3).

$$u'_{fc}(I) = \frac{U(I)}{U_{nom}} \quad (2)$$

$$i'_{fc}(t) = \frac{I(t)}{I_{nom}} \quad (3)$$

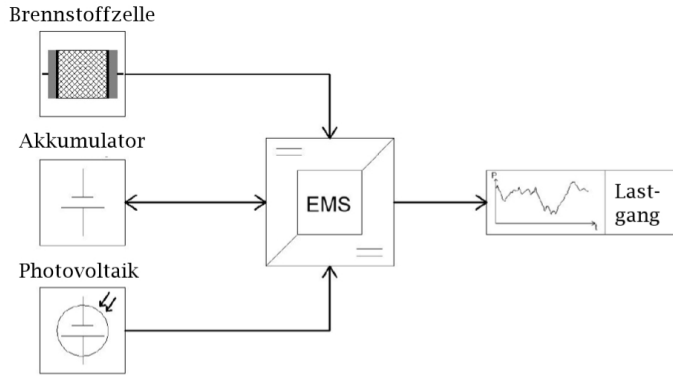


Abbildung 2. Vereinfachtes Schema der parallelen Hybridisierung inklusive Photovoltaik und Energiemanagementsystem als Vorlage zur Modelica/DY-MOLA Implementierung

$$\begin{aligned} u'_{fc}(I) &\hat{=} \text{Normierte Spannung} \\ U_{nom} &\hat{=} \text{Nennspannung in V} \\ i'_{fc}(t) &\hat{=} \text{Normierter Strom} \end{aligned}$$

Die normierten Werte für Spannung u'_{fc} und Strom i'_{fc} erhält man durch Division mit nomineller Spannung U_{nom} und nominellen Stroms I_{nom} aus den Datenblattinformationen.

Der Zusammenhang aus Leistung P und Wasserstoff-Volumenstrom \dot{V}_{H_2} resultiert aus einer weiteren Kennlinie in dem Benutzerhandbuch der *Horizon H3000*. Die Implementierung erfolgt analog zum elektrischen Kreis, mit normierten Werten für Leistung und Volumenstrom. Es wird angenommen, dass eine Skalierung dieser exemplarischen Kennlinien das Verhalten einer PEMFC ausreichend genau nachbildet.

Die Reaktionszeit der Brennstoffzelle wird durch ein PT_1 -Glied mit der Zeitkonstante $T_I = 0,1$ s gedrosselt. Aus dem Datenblatt der 200 kW *FCwave™* von Ballard Power kann entnommen werden, dass diese zu einer dynamischen Änderung der Ausgangsleistung von 80 % der Nennleistung P_{nom} in 10 s imstande ist. Dieser maximale Leistungsgradient ergibt sich aus Gleichung (4) und bildet die Vorlage aller zu untersuchenden Brennstoffzellen.

$$\frac{dP}{dt} = \frac{0,8 P_{nom}}{10 \text{ s}} = 0,08 P_{nom} \text{ s}^{-1} \quad (4)$$

Der aus dem Datensatz resultierende Volumenstrom \dot{V}_{H_2} gibt den Stoffaustausch zwischen einem exemplarischen 700 bar Druck-Speicher mit variablen Volumen und der Anode der Brennstoffzelle vor. Dabei wurden, unabhängig der Betriebsbedingungen der PEMFC, die Stoffdaten von H_2 bei Umgebungstemperatur und -druck angenommen.

B. Akkumulator

Die Approximation des elektrischen Verhaltens der Spannung in Abhängigkeit von der Entladetiefe erfolgt durch Einlesen und Skalieren der Entladecharakteristik des Datenblatts einer $LiFePO_4$ Batterie. Anschließend kann wie bei der PEMFC eine Datentabelle erstellt werden, welche durch Modelica interne Interpolation zu einer zeitkontinuierlichen Tabelle wird. Hier

wurde vereinfacht das Verhalten bei einer Ausspeicherung von 6,25 A (entspricht 2,5 C-Rate) und 23°C gewählt. Die Änderungen des elektrischen Verhaltens bei unterschiedlichen Temperaturen und C-Raten werden vernachlässigt und es wird ein ideales Verhalten vorausgesetzt. Die C-Rate stellt dennoch einen entscheidenden Wert für die Betrachtung von Akkumulatoren dar. Diese Ersatz-Wärmekapazität gibt an, wie schnell die Batterie ge- oder entladen wird und ist ausschlaggebend für die erreichten Lade- und Entladezyklen hin zum Betriebsende (engl. end-of-life; EOL). Es ergibt sich der jeweilige Strom I_{bat} abhängig der C-Rate zu

$$I_{bat} = C \cdot Q \quad (5)$$

mit

$$\begin{aligned} C &\hat{=} \text{C-Rate für Ein- oder Ausspeicherung in 1/h} \\ Q &\hat{=} \text{Kapazität der Batterie in Ah.} \end{aligned}$$

Typische C-Raten auf Basis verschiedener Datenblattinformationen liegen bei etwa 1–3 C für optimale Entladung und 0,5–1 C für Ladeströme.

Die Berechnung des Ladezustands (engl. state-of-charge; SOC) in Abhängigkeit der Zeit erfolgt, ausgehend vom Start-Ladezustand SOC_0 , nach Gl. (6).

$$SOC(t) = \frac{SOC_0 Q_{bat,0} - \int I_{bat}(t) dt}{Q_{bat,0}} \quad (6)$$

mit

$$\begin{aligned} Q_{bat,0} &\hat{=} \text{verf. Kapazität der Batterie in Ah} \\ I_{bat}(t) &\hat{=} \text{zeitabh. Strom aus Batterie in A} \end{aligned}$$

Analog zur PEMFC wird hier die aus der Tabelle ermittelte Spannung rücktransformiert und an eine ideale Spannungsquelle übergeben. Lediglich ein Ersatz-Innenwiderstand ist hier in Reihe zu dieser vorgesehen, um das elektrische Verhalten einer Batterie besser zu approximieren.

C. Photovoltaik

Für das Erstellen einer skalierbaren Stromproduktion durch Photovoltaik (Abk.: PV), wurde die Software PV*SOL von Valentin Software GmbH verwendet. Da es sich bei dem später detailliert betrachteten Schiff um ein Binnen-Schubboot, bzw. Binnenfrachter handelt, wurde für die dreidimensionale Nachbildung in PV*SOL ein vergleichbares Schubboot gewählt. Abbildung 3 (A) zeigt den Nachbau des Schubbootes, inklusive Schubleichter. Zum Vergleich ist ein Foto des Schubverbundes aus HERKULES IX und zwei Schwergutleuchtern in Abb. 3 (B) abgebildet. Die auf dem Schubleichter verfügbare Fläche für Photovoltaik ist begrenzt auf die Abdeckungen der Güterräume. Es wird angenommen, dass für die PV-Module zwischen den verschiebbaren Deckeln ausreichend Platz vorhanden ist. Voraussetzung für eine praktische Umsetzung eines solchen Systems sind bauliche Anpassungen an den Abdeckungen. Dabei könnte das PV-System beispielsweise in die Deckel integriert werden oder diese gänzlich ersetzen. Dadurch können Schäden an Modulen, oder Kabeln vermieden werden.

Für die Simulation wurde das PV Modul *LR4-72 HBD 450M G2* der Firma LONGI Solar mit einer spezifischen



(A) Nachbildung eines Schubverbunds in PV*SOL Umgebung



(B) Beispielbild für einen Verbund aus Schubboot und -leichter

Abbildung 3. (A) Dreidimensionale Darstellung eines nachgebildeten Schiffes in PV*SOL Umgebung; (B) Beispielbild eines Schubverbundes mit dem HERKULES IX Schubboot [18]

Leistung von 207 Wp/m^2 und der Wechselrichter (Abk.: WR) *SUN2000-100KTL-M1* der Firma Huawei Technologies mit einer maximalen DC-Leistung von 100 kW gewählt. Wie in Abb. 3 (A) zu erkennen, müssen Abstände zu den Rändern der beweglichen Abdeckungen eingehalten werden. Bei einer Schubleichter-Größe der Klasse V mit einer Länge zwischen $95-110 \text{ m}$ und einer maximalen Breite von $11,4 \text{ m}$ resultiert eine installierte PV-Leistung auf der Fläche eines Schubleichters von 117 kWp [19]. Die dabei nutzbare Belegungsfläche ergibt sich zu $74 \times 9 \text{ m}$. Es ist zu beachten, dass zwei gering unterschiedliche Neigungen der Modulflächen vorhanden sind. So müssen diese getrennt voneinander auf die Maximum-Power-Point-Tracker (MPPT) des Wechselrichters aufgeteilt werden. Der *SUN2000-100KTL-M1* besitzt zehn MPPTs, mit jeweils zwei parallel geschalteten Strängen. Es sind fünf Modulfelder zu jeweils 26 Module pro Ausrichtung. Dies erlaubt eine homogene Verschaltung der Module auf jeweils 2×13 pro MPPT. Da die Module unterschiedlich ausgerichtet sind, kann auch ein WR mit geringerer installierter DC-Leistung gewählt werden. Eine komplette Ausnutzung der installierten Leistung findet pro Jahr nur sehr selten bis nie statt, da der Winkel des eintreffenden Sonnenlichts zur Mittagszeit für keines der beiden Ausrichtungen ideal ist.

D. Schiff

In Modelica/DYMOLA wird das zu untersuchende Schiff mithilfe eines eigenen Modells beschrieben. Hierfür können die maßgeblichen Parameter des Schiffes eingetragen werden und beeinflussen die jeweiligen normierten Lastgänge. Allgemein werden Schifffdaten via AIS- (engl.: Automatic Identification System) Positionen aufgezeichnet. Dabei wird lediglich die Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Zeit und nicht die Leistung des Schiffes aufgezeichnet. Der Zusammenhang aus

Geschwindigkeit und benötigter Leistung kann vereinfacht nach [20] folgendermaßen formuliert werden:

$$P(t) = \left(\frac{v(t)}{v_{max}} \right)^3 P_{inst} \quad (7)$$

mit

$$\begin{aligned} P(t) &\hat{=} \text{Antriebsleistung in kW} \\ v(t) &\hat{=} \text{Geschwindigkeit in km/h} \\ v_{max} &\hat{=} \text{max. Geschwindigkeit in km/h} \\ P_{inst} &\hat{=} \text{max. installierte Motorenleistung in kW} \end{aligned}$$

Die generierten oder eingeholten Geschwindigkeitsprofile können auf die maximale Geschwindigkeit normiert werden. Somit können diese unabhängig von den Schiffsparametern verwendet werden. Die ausschlaggebenden Parameter für den resultierenden Energiebedarf sind also die Maximalgeschwindigkeit v_{max} und installierte Antriebsleistung P_{inst} des Schiffes. Im Modell wird weiterhin angenommen, dass die Antriebsleistung der elektrisch benötigten entspricht. Dabei wird der Wirkungsgrad der Propulsoren und Elektromotoren außer acht gelassen.

Ein weiterer relevanter Punkt für die Machbarkeitsanalyse stellt das zur Verfügung stehende Gewicht und der Platz für das Antriebssystem dar. Die in den Gleichungen (8) und (9) dargestellten Näherungen beziehen sich dabei auf einer Linearisierung der Daten von bereits operierenden Schiffen, ohne einer Umgestaltung der Schiffshülle.

$$m_{Mot} = \frac{P_{inst} - 1,194}{0,0706} \quad (8)$$

$$V_{Mot} = \frac{P_{inst} - 1,462}{0,02197} \quad (9)$$

mit

$$\begin{aligned} m_{Mot} &\hat{=} \text{Masse des Motors in kg} \\ V_{Mot} &\hat{=} \text{Volumen des Motors in m}^3 \\ P_{inst} &\hat{=} \text{Installierte Motorleistung in MW} \end{aligned}$$

Vorausgesetzt für die Anwendung dieser Linearisierung wird eine installierte Leistung von P_{inst} größer als $1,462 \text{ MW}$.

E. Energiemanagementsystem

Durch die parallele Ausführung in der Hybridisierung ist ein Energiemanagementsystem obligatorisch. Die Ansteuerung der Erzeugereinheiten ist abhängig von den optimalen Betriebspunkten der FC (bei $0,6 P_{nom}$) und Batterie (bei $1 C$). Die bei einer ersten Parametrierung der Komponenten festgelegten Betriebspunkte vermeiden den Betrieb bei geringer Systemeffizienz. Weitere Einflussfaktoren sind der Ladezustand der Batterie und die benötigte Last abzüglich der aus PV generierten Leistung. Bassam et al. [21] untersuchte vier verschiedene EMS und deren Kombination, das Multi-Scheme-EMS, im Hinblick auf Reduktion des Gesamtenergieverbrauchs. Dabei geht hervor, dass der Wasserstoffverbrauch bei der CDCS- (engl. charge-depleting charge-sustaining) Strategie am geringsten ist. Dieses EMS forciert eine maximale Auslastung des Akkumulators. In Bezug auf die Wirtschaftlichkeit und den

derzeitig hohen Preisen von grünem H_2 , wird diese Strategie für das Modell vorgesehen (fortan als EMS-A bezeichnet). Darüber hinaus wurde ein klassisches statusbasierte (engl. state-based) System, welches im Folgenden als EMS-B bezeichnet wird, gewählt, da dies viel Variationsspielraum bietet. Hier handelt es sich um eine Mischung aus SOC- und lastabhängiger Regelung.

V. AUSWAHL DER SCHIFFSART UND -ROUTE

Das Binnenschubschiff HERKULES IX wird derzeit auf dem Rhein zwischen Duisburg und Rotterdam, sowie Amsterdam eingesetzt. In Abbildung 4 ist ein Foto des Schubbootes, ohne die Schwergutleichter aus Abb. 3 (B). Das Schiff ist 32 m lang, 11,4 m breit und weist einen Tiefgang von etwa 1,85 m auf.



Abbildung 4. Foto des HERKULES IX Schubbootes ohne Schwergutleichter [22]

Im Gegensatz zur RiverCell/ELEKTRA, einem Pilotprojekt zur Realisierung eines hybrid-elektrischen Schubbootes, hat das HERKULES IX eine wesentlich höhere installierte Antriebsleistung von $2 \times 1.100 \text{ kW}$ in Form zweier *Caterpillar 3512 (CAT 35)* Dieselmotoren. Insgesamt können 12.000 t Schublast transportiert werden, was etwa dem zehnfachen Gewicht der ELEKTRA Transportfähigkeit entspricht. Diese 12.000 t sind aufgeteilt auf bis zu vier Schwergutleichter mit den Maßen von jeweils maximalen $110 \text{ m} \times 11,4 \text{ m}$ bei einem Tiefgang von maximal 4,5 m. Die Nenn- und Maximalgeschwindigkeit betragen 10 km/h und 21 km/h . [23, 24]

Die Anforderungen des HERKULES IX an den Antriebstrang sind in Tab. III zusammengefasst. Dabei ist ebenso der durchschnittliche Energieverbrauch, resultierend aus der Simulation und Leistungsbestimmung nach Gl. (7), vorweggenommen. Die Gewichts- und Platzbedürfnisse des Antriebssystems wurden aus einer zuvor erstellten Trendlinie¹ berechnet.

Für eine Untersuchung von regulärem Betrieb des Schiffes wurden von *VesselFinder*² die AIS Daten für den Zeitraum von 10.12.2021 bis 14.12.2021 eingeholt. Dabei reist das Schiff, ausgehend von Duisburg, entlang dem Rhein mit den Zielhäfen Rotterdam und Amsterdam.

Am Beispiel eines operierenden Großmotorschiffes auf dem Niederrhein mit einer Länge über 100 Meter, geht aus der Studie von Aleksandar Simić [26] hervor, dass die Bergfahrt im Vergleich zur Talfahrt etwa das vierfache an Energie benötigt.

Die Fließrichtung wird in der Abschätzung zur benötigten Leistung aus Gl. (7) nicht berücksichtigt. Man könnte dies berücksichtigen, indem man für die jeweiligen Streckenabschnitte Anpassungen an den Schiffsparametern vornimmt. Es müsste für Fahrten flussaufwärts die benötigte Leistung erhöht, oder flussabwärts verringert werden. Da die Streckenabschnitte hier jedoch in ausgewogenen Längen vorkommen, wird ein Kompromiss beider Geschwindigkeitsprofile getroffen. Dadurch entsteht ein homogeneres Geschwindigkeitsprofil. Die Maximalgeschwindigkeit des Schiffes variiert demnach um etwa 6 km/h , abhängig von der Fahrtrichtung. Im Modell wird die maximale Geschwindigkeit des Schiffes von 21 km/h auf 18 km/h reduziert, um diesen Effekt zu kompensieren. Dadurch ist nach Formel (7) der generelle Leistungsbedarf höher. Der normierte Geschwindigkeitsverlauf ist in Abb. 5 dargestellt.

Dieses Routenprofil kann anschließend in Modelica/DY-MOLA eingelesen und als zeitkontinuierliche Variable dem Algorithmus zur Leistungsbestimmung übergeben werden. Dadurch können diese Streckenabschnitte für verschiedene Schiffsklassen und deren Parametern Maximalgeschwindigkeit v_{max} und installierter Motorleistung P_{inst} analysiert werden.

Da keine Informationen zu Tankvolumen und -gewicht zur Verfügung stehen, muss hierfür eine Näherung gefunden werden. Durch Normierung von Gewicht- und Volumenbedarf des Kraftstofftanks auf die benötigte Energiemenge für die Reise eines vergleichbaren Schiffes (hier: Atlantic Dawn mit 95.700 kWh durchschnittlicher Energiebedarf), kann ein Faktor zur Abschätzung des zur Verfügung stehenden Platzes und Gewichts für die Wasserstoffspeicherung ermittelt werden. Somit ergibt sich für das HERKULES IX ein verfügbares Volumen von $217,4 \text{ m}^3$ und Gewicht von $200,8 \text{ t}$.

VI. TECHNO-ÖKONOMISCHE ANALYSE

A. Technische Analyse

Fortlaufend wird das Routenprofil des HERKULES IX von Duisburg nach Veld/Rotterdam (Reisedauer 22 h; Distanz 137 km) als Mittelstrecke bezeichnet. Das zu untersuchende Schiff wird auf dieser detaillierter untersucht, da sich hier ein Kompromiss aus Simulationszeit, Energieverbrauch und dynamischen Verhalten des Antriebs finden lässt. Für die Vorgabe, dass das Schubschiff für vier Stunden bei P_{avg} betrieben werden kann (vgl. [19]), resultiert hierfür eine minimale Akkukapazität von 1.960 kWh bei $SOC = 40 \%$. Dies ergibt eine minimal geforderte Akkukapazität von 4.900 kWh .

In einem vorhergehenden Testdurchlauf wurde ein Verbrauchsoptimum in Abhängigkeit der Regelparameter der EMS³ gefunden. Die Simulationen bestehen aus jeweils acht Varianten pro EMS, mit unterschiedlicher Dimensionierung des Akkumulators und der Brennstoffzelle. Daraus ergibt sich stellvertretend eine Variante je EMS hinsichtlich H_2 -Verbrauch, benötigtem Platz und Gewicht des Antriebssystems, welche für die weitere ökonomische Betrachtung genutzt werden soll.

¹Linearisierung von 10 Datenpunkten real operierender Frachtschiffe

²<https://www.vesselfinder.com>; Stand: 27.04.2022

³Ober-, Unter- und Haltegrenze (Threshold) des Ladezustandes; Leistungsgrenzen von Brennstoffzelle und Lastgang

Tabelle III
TECHNISCHE ANFORDERUNGEN DES HERKULES IX SCHUBBOOTES [23, 24]

Komponente	Spezifikationen
Installierte Motorleistung	2 x 1.100 kW 10.408 kg ^[25]
Fördergewicht	12.000 t
Durchschnittsgeschwindigkeit	10 km/h
Maximalgeschwindigkeit	21 km/h
Durchschnittlicher Energieverbrauch ⁽¹⁾	673,9 kWh/h 58,7 kWh/km
Zur Verfügung stehendes Gewicht für Antrieb ⁽²⁾	14,2 t
Zur Verfügung stehendes Volumen für Antrieb ⁽²⁾	33,6 m ³ x 5

- ⁽¹⁾ Ermittelt durch Simulation aus dem gesamten und angepassten Lastgang (vgl. Abb. 5) des HERKULES IX
⁽²⁾ Ermittelt aus Gl. (8) und Gl (9) inkl. Faktor, um den Motorraum, inklusive der Wartungsgänge zu beachten

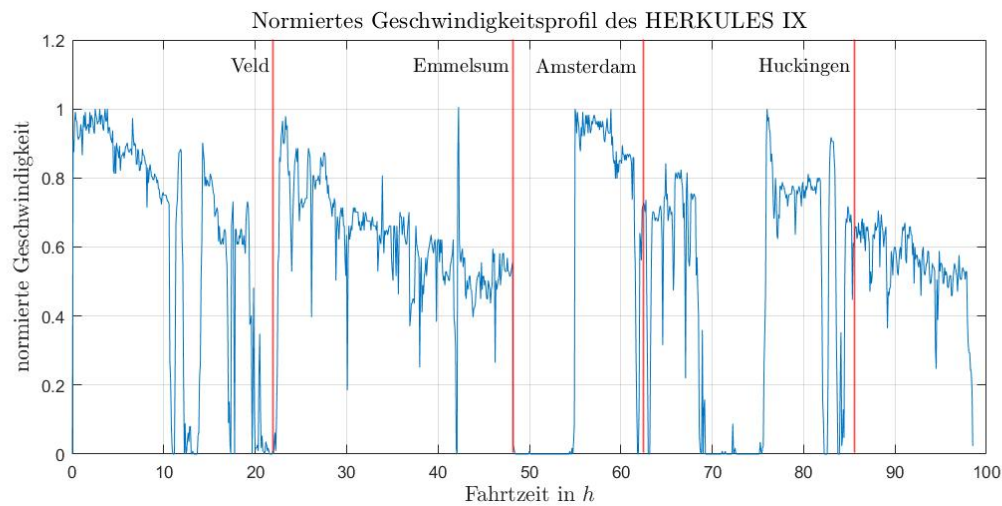


Abbildung 5. Normiertes Geschwindigkeitsprofil der Gesamtstrecke des HERKULES IX unterteilt in die jeweiligen Abschnitte der Zielhäfen

Ausgehend von der PV*SOL Analyse wird für die Simulation ein Wert eines repräsentativen Tages im Frühling (20.04; gemittelt aus den Meteonormdaten von 1996–2015) von 5,9 kWh pro Kilowatt installierter PV Leistung und Tag gewählt. Es wird angenommen, dass das HERKULES IX vier Schubleichter mit verschließbaren Abdeckungssystemen transportiert. Dadurch können etwa 468 kWp Photovoltaik zur Leistungsbereitstellung beitragen. Der aus der PV-Simulation generierte Lastgang wird für alle folgenden Simulationen angewandt. Der Startzeitpunkt der Reise und somit des PV Lastgangs ist für 08:00 Uhr angesetzt. Aus einer ersten Simulation resultiert ein Energiebedarf von 20.714 kWh für diese Route, da durch die Anpassung des Lastgangs, durchgängig mit höherer Geschwindigkeit gefahren wurde. Es ist anzumerken, dass aufgrund des hohen tatsächlichen Verbrauchs die Akkumulatoren generell etwas größer ausgelegt werden müssen, um den kritischen SOC-Wert (Abbruchbedingung der Simulation) von 10% nicht zu erreichen.

Um den Einfluss der PV zu veranschaulichen, ist in Abb. 6 der Lastgang und die komplementäre PV Energieproduktion exemplarisch für Variante D8 (vgl. Tab. IV) dargestellt. Die Leistung der Photovoltaik zu Beginn der Route beträgt bereits etwa 200 kW elektrischer Leistung. Dies führt zu einem Verschieben der Bedarfskennlinie nach unten. In Abb. 6 unten sieht man den dynamischen Verlauf von Batterie- und Brennstoffzellenleistung. Im dynamischen Fall reagiert der Akkumulator innerhalb kurzer Zeit auf die mangelnde Dynamik der Brennstoffzelle, wodurch schnelle Leistungsschwankungen in der Soll-Leistung der Batterie auftreten. Dabei summiert sich Leistung aus FC und Akku exakt zur resultierenden und geforderten Antriebsleistung.

In Tabelle IV sind die Endresultate der Simulationen bezogen auf Platzbedarf und Gewicht dargestellt⁴. Das verfügbare Volumen des HERKULES IX beträgt, unter Berücksichtigung

⁴Die Ergebnisse in Bezug auf Kraftstoff- Energieverbrauch, etc. sind in der ausführlichen Fassung dieser Arbeit zu finden

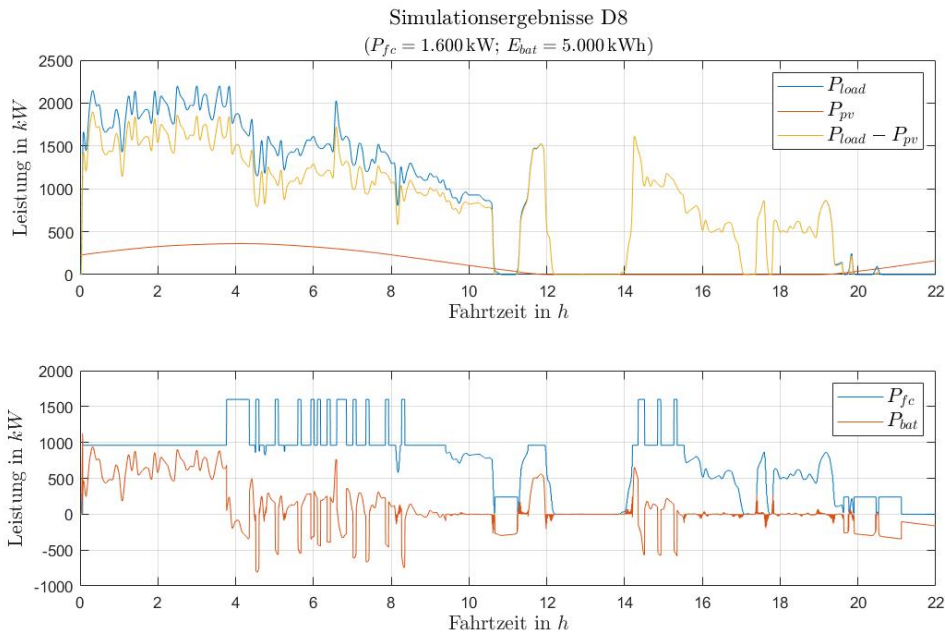


Abbildung 6. Zeitabhängige Leistungsreduktion durch Photovoltaik mit den resultierenden Anteilen an Brennstoffzellen- und Akkumulatorleistung in Abhängigkeit der Fahrtzeit

der Zu- und Wartungsgänge, 168 m^3 . Berechnet man für die Brennstoffzellensysteme einen zusätzlichen Faktor von 2,5 [20] für Wartungsgänge mit ein, so erhält man die möglichen Kombinationen C6–8, D7–8 aus Tab. IV. In Bezug auf das verfügbare Gewicht von $14,2 \text{ t}$ für den Antrieb ist deutlich zu sehen, dass das Hybridsystem wesentlich mehr in Anspruch nimmt als das konventionelle. Es besteht jedoch Potential, wenn der Kraftstofftank des konventionellen Antriebs mit einbezogen wird. Das Speichersystem mit einem benötigten Fassungsvermögen von etwa 1.000 kg H_2 trägt, im Vergleich zu Dieseltanks, nur wenig zum Gesamtgewicht des Antriebssystems bei. Es resultiert ein Systemgewicht von etwa $28,2 \text{ t}$ für das 700 bar CH_2 System inklusive Wasserstoff, wohingegen nach [20] bei einer vergleichbaren Schiffsdimension ein Gewicht von circa 200 t zur Verfügung steht. Dadurch ergibt sich ein erheblicher Spielraum von $171,8 \text{ t}$. Betrachtet man die volumetrischen Eigenschaften der Tanks, so benötigt der Wasserstoffspeicher mit $88,3 \text{ m}^3$ nur marginal mehr Platz als der Dieseltank mit 85 m^3 .

Unter diesen Gesichtspunkten werden also die Varianten C4 und D8 in Bezug auf Wirtschaftlichkeit weiter untersucht. Hier findet sich ein Kompromiss aus effizientem Verbrauch sowie gutem Verhalten des Batterie SOC und dem Gewichts- und Platzbedarf der Komponenten. Es stellt sich bei dieser Untersuchung heraus, dass die minimale installierte Brennstoffzellenleistung 1.200 kW beträgt, um unabhängig der PV Energie den Betrieb des Schiffes auf dieser Strecke zu garantieren.

B. Ökonomische Analyse

Ziel dieser ökonomischen Betrachtung ist es, einen spezifischen Preis pro Kilometer für den Betrieb verschiedener

Antriebssysteme zu definieren, um somit einen Vergleich je Leistungsklasse möglicher Schiffe und eingesetzten Kraftstoff zu ermöglichen.

Die Endenergiepreise für grünen und grauen Wasserstoff, Schiffsdiesel und Strom aus dem deutschen Energiemix für das Jahr 2020, sowie die Prognosen für die Jahre 2030 und 2050 werden bei der Kalkulation berücksichtigt. Anfallende Kosten bezüglich Versicherung, Wartung und Instandhaltung werden nicht berücksichtigt. Eine potentielle Effizienzsteigerung der einzelnen Komponenten wird nicht betrachtet und es wird der derzeitige Stand der Technik angenommen. Als Referenz dient das HERKULES IX und der aus der Simulation resultierende Gesamtenergiebedarf. Der Dieselverbrauch ergibt sich aus einem durchschnittlichen Wirkungsgrad von 40% [29]. Die Dieselpreisentwicklung basiert auf der Annahme eines rasch steigenden CO_2 -Preises und soll den Tankstellenpreis darstellen [30]. Dies bedeutet einen CO_2 -Preis von $35 \text{ €/t}_{\text{CO}_2}$ im Jahr 2030 und $95 \text{ €/t}_{\text{CO}_2}$ im Jahr 2050. Da Wasserstofftankstellen noch selten zur Verfügung stehen, werden Richtwerte aus Studien gewählt, um die Peripheriekosten abzuschätzen.

Im Falle des grünen H_2 ergibt sich für den Tankstellenpreis mit Druckspeichersystemen nach Zerta et al. [6] im Jahr 2020 ein Aufpreis von etwa $3,17 \text{ €}$ pro Kilogramm, gegenüber dem Erzeugungspreis von etwa $5,50 \text{ €}$ [31]. Diese Kosten für Peripherie werden für die Folgejahre bis 2050 als konstant betrachtet und es resultiert der Tankstellenpreis des grauen Wasserstoff aus prognostizierten Produktionskosten und genanntem Aufpreis. Der Mittelwert der Herstellungskosten von grünem Wasserstoff aus Tab. I, stellt den hier angenommenen Preis dar. Die Kostenentwicklung für die Produktion von blauem Wasserstoff lässt darauf schließen, dass sich dessen spezifischer

Tabelle IV
 ÜBERBLICK NICHT AUSGESCHLOSSENER VARIANTEN DER HERKULES IX MITTELSTRECKEN-UNTERSUCHUNG, INKLUSIVE ABSCHÄTZUNG DES
 GEWICHTS- UND PLATZBEDARFS DES ERZEUGERSYSTEME

	γ_{fc}	$E_{bat,nom}$	$M_{fc}^{(1)}$	$V_{fc}^{(1)}$	$V_{fc,sys}^{(1)}$	$M_{bat}^{(2)}$	$V_{bat}^{(2)}$	$M_{ges,sys}$	$V_{ges,sys}$
		kWh	t	m ³	m ³	t	m ³	t	m ³
EMS-A									
C2	0,45	7.500	6,0	10,9	27,3	28,5	180	34,5	207,2
C4	0,6	6.250	8,1	14,5	36,3	23,8	150	31,8	186,3
C5	0,6	7.500	8,1	14,5	36,25	28,5	180	36,6	216,3
C6	0,75	2.500	10,1	18,2	45,5	9,5	60	19,6	105,4
C7	0,75	3.750	10,1	18,2	45,5	14,3	90	24,3	135,4
C8	0,75	5.000	10,1	18,2	45,5	19,0	120	29,1	165,4
EMS-B									
D5	0,6	7.500	8,1	14,5	36,3	28,5	180	36,6	216,3
D7	0,75	3.750	10,1	18,2	45,5	14,3	90	24,3	135,4
D8	0,75	5.000	10,1	18,2	45,5	19	120	29,1	165,4

⁽¹⁾ spez. Gewichts- und Volumenparameter der FC: 6,1 kg/kW, 0,011 m³/kW (vgl. Datenblatt der Ballard Power FCWave®);

⁽²⁾ spez. Gewichts- und Volumenparameter Akkumulator: 3,8 kg/kWh, 0,024 m³/kWh (vgl. [27, Kap. 6] und [28])

γ_{fc} $\hat{=}$ Leistungsverhältnis aus nomineller Motorleistung
 $V_{fc,sys}$ $\hat{=}$ Platzbedarf des Brennstoffzellensystems inkl. Wartungsgänge
 $V_{ges,sys}$ $\hat{=}$ Gesamter Platzbedarf des Antriebssystems
 $M_{ges,sys}$ $\hat{=}$ Gesamtgewicht des Antriebssystems

Preis ähnlich zum grauen Wasserstoff verhalten wird. Daher wird im Folgenden der blaue Wasserstoff nicht mehr gesondert erwähnt. Der Strompreis entspricht dem Endabnehmerpreis auf Mittelspannungsebene im Januar 2022 und wird für die Folgejahre als konstant betrachtet. In Tabelle V sind die hier getroffenen Annahmen zu Endenergieträgerpreisen zusammengefasst. Die Kosten für die Hybridmodelle resultieren aus den jeweiligen Anteilen der Energieträger und deren spezifischen Kosten. Der Energieaufwand zur Einspeicherung in einem 700 bar Drucktank bei der Betankung wird mit einem Faktor von 15% in Bezug auf den gesamt eingespeicherten Wasserstoffinhalt berücksichtigt. Anhand dieser Annahmen und den Simulationsergebnissen kann eine Aussage zur ökonomischen Machbarkeit der untersuchten Antriebssysteme für heute und in naher Zukunft getroffen werden.

Tabelle V
 ANNAHMEN ZUR PREISENTWICKLUNG VERSCHIEDENER
 ENDENERGIETRÄGER

	2020 €/kWh	2030 €/kWh	2050 €/kWh	Ref.
H ₂ (grün)	0,261	0,186	0,171	[6]
H ₂ (grau/blau)	0,159	0,228	0,270	[31]
Schiffsdiesel	0,152	0,190	0,220	[30]
Strompreis	0,229	0,229	0,229	[32]

Die Resultate der Analyse sind in Abb. 7 dargestellt. Im Jahr 2020 ergeben sich Betriebskosten von 19,30€ bis 20,90€ pro Kilometer für den Einsatz von grauem Wasserstoff. Dies liegt bereits etwa 7,00€ unterhalb der Betriebskosten mit Diesel als Energieträger. Mit der angenommenen Preiszunahme von emissionsbehafteten Kraftstoffen, kann unter den getätigten Annahmen ein ökologischer und ökonomischer Betrieb mit grünem H₂ ab dem Jahr 2030 erfolgen. Im Jahr 2050 kann die Hälfte der spezifischen Betriebskosten von Diesel erreicht werden.

Wird der Antrieb eines solchen Schiffes vorübergehend mit grauem Wasserstoff durchgeführt, so kann zur Überbrückung, bis der Preis von grünem Wasserstoff den des grauen unterschreitet, schon jetzt ein ökonomischer Betrieb gegenüber konventionellen Antrieben, erreicht werden.

Unter den betrachteten Varianten, ist D8 die wirtschaftlich effizienteste. Diese soll nun im Vergleich zu einem konventionellen Schiff, anhand der kumulierten Kosten von Investition, bis hin zu 30 Jahren Betrieb, untersucht werden. Hierbei wird nun die Photovoltaikanlage miteinbezogen. Potentiell nötige Substitutionen der Komponenten durch Alterung bei dem hybriden Antriebssystem werden außer Acht gelassen. Aufgrund schlechter Datenlage zu den Installationskosten von konventionellen Antrieben, wird nach Fiedler et al. [19] vereinfacht die Annahme getroffen, dass diese etwa einem Drittel des hybriden Antriebssystem entsprechen. Neben der Preisentwicklung der betrachteten Energieträger, sind die

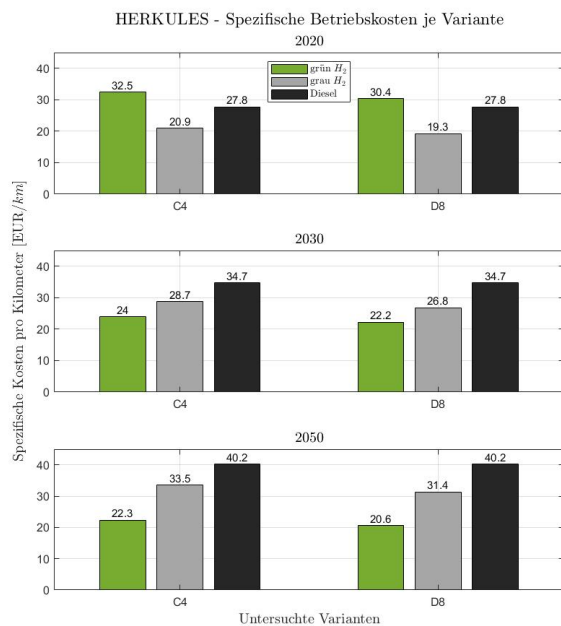


Abbildung 7. Spezifische Kosten je Kilometer für den hybriden Betrieb des HERKULES IX, inklusive Referenzwert eines konventionellen Schubschiffes

spezifischen Kosten der einzelnen Komponenten aus Tab. VI genutzt.

Um Peripheriegeräte, wie EMS und Wärmemanagement, mit zu berücksichtigen, werden die Gesamtkosten des Hybridsystems mit dem Faktor 1,5 multipliziert. Dies sollte vereinfacht die Zusatzkosten der Hilfssysteme abdecken.

Die Ermittlung der jährlichen Kosten bei beiden Untersuchungen resultiert aus den Preisen des jeweiligen Wasserstoffs aus Tab. V. Unter der Annahme, dass das HERKULES IX im Jahr durchschnittlich 15.000 km zurücklegt, werden die spezifischen Kosten von Variante D8 und dem konventionellen Dieselantrieb aus Abb. 7 verwendet. Diese jährliche Strecke entspricht etwa 55 mal dem Hin- und Rückweg zwischen Duisburg und Rotterdam und entspricht somit einer Häufigkeit von etwa ein bis zwei mal pro Monat.

Die Ergebnisse der Jahre 2030 bis 2060, sowie 2050 bis

Tabelle VI
ANNAHMEN ZUR PREISENTWICKLUNG VERSCHIEDENER KOMPONENTEN

	2020	2030	2050	Ref.
PEMFC in €/kW	47,50	38,00	30,00	[33]
Li-Ion Großbatterien in €/kWh	232,00	134,00	70,00	[34] [35]
PV-System inkl. WR in €/kWp	907,00	737,00	397,00	[34]
700 bar Drucktank in €/kWh	14,25	14,25	14,25	[36]

2080 sind in Abbildung 8 dargestellt. Bei den getätigten Annahmen erfolgt mit grünem H₂ ausgehend vom Jahr 2030 ein Amortisationszeitpunkt nach etwa 13 Jahren. Da im Jahr 2030 der spezifische Betrieb mit grauem Wasserstoff zwischen grünem Wasserstoff und Diesel liegt, erfolgt hier eine spätere Amortisation nach etwa 20 Jahren. Durch ein weiteres Sinken der Installations- und Wasserstoffkosten bis zum Jahr 2050, kann hier gegenüber konventionellen Dieselantrieben bereits nach sechs Jahren ein wirtschaftlich effizienterer Betrieb erfolgen.

Zusätzlich ergibt sich durch die PV*SOL Simulation ein jährliches PV Ertragspotential von 432,6 MWh. Angenommen es können davon 20% zur Ladung der Batterie und 80% zur Reduktion der Antriebsleistung verwendet werden, so reduziert sich der eingesetzte Wasserstoff mit einer Nutzenergie von etwa 1.600 MWh auf 1.250 MWh. Dadurch können jährlich Wasserstoffkosten von etwa 64.300 € und Stromkosten von etwa 19.800 € eingespart werden. Insgesamt können dadurch, ausgehend vom Jahr 2030, die jährlichen Betriebskosten von 333.200 € auf 250.000 € reduziert werden. Betrachtet man die angenommenen Installationskosten der Photovoltaikanlage von etwa 186.000 €, so amortisiert sich diese bereits nach ca. vier Jahren. Nimmt man an, dass aufgrund der Betriebszeiten des Schiffes nur 50% der erzeugten PV Energie genutzt werden kann, so ergibt sich eine Amortisation nach acht Jahren. Photovoltaik kann also bei einer Installation auf Schubleichtern eine bedeutende Rolle in der emissionsreduzierten Binnenschifffahrt spielen.

Die Ermittlung des CO₂-Äquivalents dieses Hybridsystems erfolgt unter der Annahme heutiger Werte für grauen Wasserstoff (vgl. Tab. I mit Umrechnung der 6 t_{CO₂}/t_{H₂} auf 0,18 kg_{CO₂}/kWh). Der grüne Wasserstoff wird ausschließlich aus erneuerbaren Energien gewonnen und verantwortet daher keinen CO₂-Ausstoß. Lediglich die genutzte Batteriekapazität trägt, unter der Annahme von 0,37 kg_{CO₂}/kWh Schadstoffausstoß des deutschen Energiemixes, zu Abgasemissionen bei. Durch einen steigenden Anteil erneuerbarer Energien, wird dieser Wert jedoch in den kommenden Jahren abnehmen. Das CO₂-Äquivalent von Diesel entspricht etwa 0,27 kg_{CO₂}/kWh. [37] Abbildung 9 zeigt einen deutlichen Unterschied in Bezug auf Emissionen je Endenergieträger. In diesem Beispiel entspricht dies, im Fall von Diesel, einer jährlichen Menge von etwa 14 t CO₂. Durch den Einsatz von grauem Wasserstoff können diese Emissionen halbiert werden. Ein Antrieb mit grünem Wasserstoff und dem aktuellen Strommix, resultiert in einem jährlichen CO₂ Ausstoß von etwa 900 kg.

Neben einer drastischen Reduktion von Treibhausgasemissionen, kann mit diesem Antriebssystem bereits in absehbarer Zeit ein ökonomischer Betrieb erfolgen. Sollte ein Schiff bereits vor Erzielen des angenommenen Wasserstoffpreises für grünen Wasserstoff in Betrieb gehen, so kann in der Überbrückungszeit der noch deutlich günstigere graue Wasserstoff verwendet werden. Dadurch können schon jetzt die Emissionen der Schifffahrt ökonomisch sinnvoll reduziert werden.

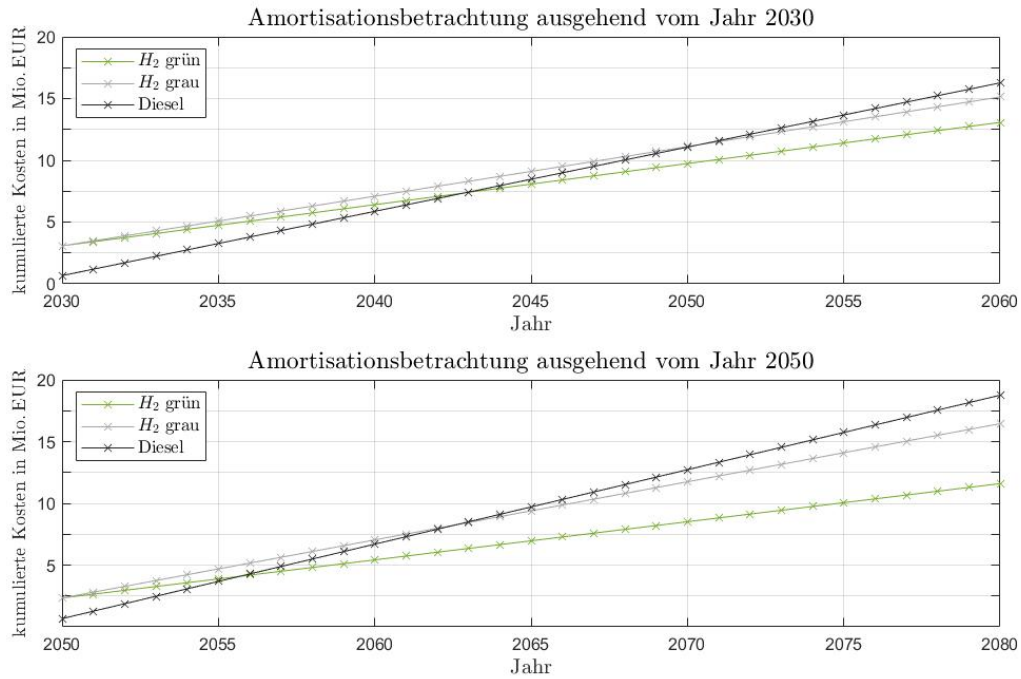


Abbildung 8. Amortisationsbetrachtung von Variante D8 bei Betrieb mit grünem und grauen Wasserstoff gegenüber dem konventionellen Dieselantrieb

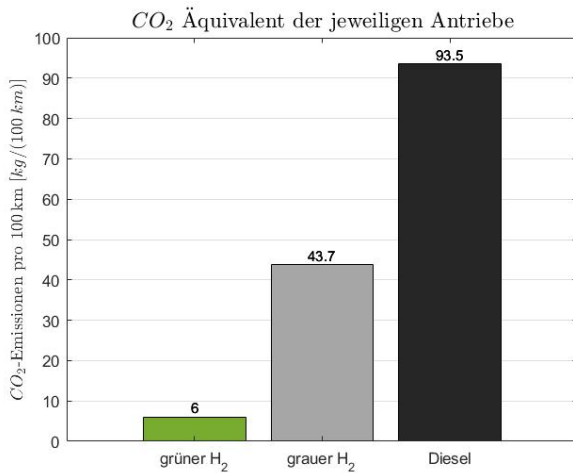


Abbildung 9. CO₂-Äquivalent der betrachteten Antriebe in Kilogramm pro 100 km am Beispiel der Variante D8 im Jahr 2020

VII. ZUSAMMENFASSUNG

Das generierte Modelica/DYMOLA Simulationsmodell ist geeignet für eine erste Machbarkeitsanalyse von hybrid betriebenen Binnenschiffen und kann mit verhältnismäßig wenig Parametern an variierende Betriebsbedingungen angepasst werden. Es resultiert eine ausreichend präzise Näherung des elektrischen und thermodynamischen Verhaltens, um eine Aussage über das Verbrauchsverhalten jeweiliger Komponenten und der generellen technischen Machbarkeit zu treffen. Außerdem

können mithilfe dieses Modells, abhängig vom Betriebsverhalten, verschiedene Energiemanagementsysteme untersucht werden. Dadurch entsteht weiteres Optimierungspotential in Bezug auf den Endenergieverbrauch.

Es mussten einige Annahmen getroffen werden, um den zeitlichen Rahmen der Modellentwicklung nicht zu überschreiten. Dennoch bietet dieses Modell eine solide Basis für potentielle Weiterentwicklungen und Anpassungen. Ein großes Problem zur Verifizierung und Einordnung des Modells stellt die fehlende Datenlage von Schiffsantrieben dar. Das größte Potential für Verbesserungen bietet die Ermittlung der tatsächlich vom Schiff benötigten Leistung anhand von AIS Daten. Eine Erweiterung des Modells um weitere EMS, bietet die Möglichkeit, je nach Lastfall eine möglichst effiziente Strategie zu finden.

Die betrachteten Komponenten für einen alternativen Schiffsantrieb zeigen eine hohe technologische Reife. Allen voran bietet die Kombination aus Brennstoffzelle und Akkumulator eine gute Synergie aus dynamischen Verhalten auf Lastwechsel und Reichweite bei begrenztem Platz zur Installation. Dabei ist festzustellen, dass das Akkumulatorsystem deutlich mehr Platz und Gewicht, verglichen mit Brennstoffzelle zuzüglich Wasserstoffspeicher, in Anspruch nimmt. Daher ist eine Abwägung derer Zusammensetzung von großer Bedeutung.

Die ungekürzte Version dieser Arbeit beinhaltet ein Anwenden des Modells auf eine weitere Leistungsklasse. Dabei zeigt sich, dass für Binnenschubboote der kleineren Leistungsklasse unter Anwendung der hier implementierten EMS kein ökonomischer Betrieb absehbar ist. Daher ist es empfehlenswert, die Antriebsenergie jener Leistungsklasse in

erster Linie durch Akkumulatoren bereitzustellen und das Brennstoffzellensystem lediglich für längere Fahrten zu nutzen.

Bei der größeren Leistungsklasse zeigt sich bereits jetzt ein nahezu wirtschaftlich sinnvoller Betrieb mit Wasserstoff. Betrachtet man die Investitions- und Betriebskosten beim Einsatz von grünem Wasserstoff unter den gegebenen Voraussetzungen, so kann ab dem Jahr 2030 eine Amortisation gegenüber dem konventionellen Antrieb nach etwa 13 Jahren erreicht werden. Des Weiteren kann bereits jetzt durch Brennstoffzellenantrieb ein ökologischer Schiffsbetrieb erreicht werden. Die Emissionen werden durch den Einsatz von grauem Wasserstoff gegenüber Dieselantrieb halbiert. Ein solcher Hybridantrieb kann folglich einen großen Beitrag zur Dekarbonisierung des Schiffsverkehrs und damit zur Energiewende leisten.

Abschließend kann festgestellt werden, dass Photovoltaik am oberen Beispiel eine Antriebsenergieeinsparung von etwa 25% bewirken kann. Dabei amortisiert sich diese nach vier bis acht Jahren, abhängig von der tatsächlich nutzbaren Energie.

Die emissionsfreie Binnenschifffahrt ist also nicht mehr in weiter Ferne und kann aus technischer Sicht bereits heute realisiert werden. Lediglich die Produktionskosten der Komponenten und vor allem des Wasserstoffs müssen in den nächsten Jahren und Jahrzehnten weiter fallen, um somit mit den fossilen Energieträgern konkurrieren zu können.

LITERATUR

- [1] Bundesverband der Deutschen Binnenschifffahrt e.V., “Daten und Fakten: 2020 / 2021,” https://www.binnenschiff.de/wp-content/uploads/2021/11/211104-Broschuere-Daten-Fakten_2020-21.pdf, 05.05.2022.
- [2] P. Wittenbrink, *Green Logistics*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015.
- [3] Y. Wang, K. S. Chen, J. Mishler, S. C. Cho, and X. C. Adroher, “A review of polymer electrolyte membrane fuel cells: Technology, applications, and needs on fundamental research,” vol. 88, no. 4, pp. 981–1007, 2011.
- [4] Europäische Kommission, “A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe,” https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/hydrogen_strategy.pdf, 11.04.2022.
- [5] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. Wasserstoff: Schlüsselement für die Energiewende [Pressemitteilung]. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/wasserstoff.html>. 11.04.2022.
- [6] M. Zerta, P. Schmidt, W. Weindorf, U. Bünger (LBSt), L. Langfeldt, B. Scholz, L.-V. Giebel (DNV GL), P. Klemm, and G. Sattler (IfS), “SHIPFUEL - Strombasierte Kraftstoffe für Brennstoffzellen in der Binnenschifffahrt: Studie im Auftrag der Nationalen Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW) für das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI),” München/Hamburg/Berlin.
- [7] Statista. (16.04.2022) Durchschnittlicher Dieselpreis bis April 2022. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/224105/umfrage/durchschnittlicher-preis-fuer-dieselskraftstoff/>. 16.04.2022.
- [8] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle, “Merkblatt zur Ermittlung des Gesamtenergieverbrauchs: Informationen für zum Energieaudit verpflichtete Unternehmen unterhalb/oberhalb der Bagatellschwelle und für Energieauditoren,” 17.04.2022.
- [9] P. Horng and M. Kalis, “Wasserstoff-Farbenlehre: Rechtswissenschaftliche und rechtspolitische Kurzstudie,” https://www.ikem.de/wp-content/uploads/2021/01/IKEM_Kurzstudie_Wasserstoff_Farbenlehre.pdf, 11.04.2022.
- [10] Greenpeace Energy eG, “Blauer Wasserstoff: Lösung oder Problem der Energiewende?” https://green-planet-energy.de/fileadmin/user_upload/broschuere-wasserstoff.pdf, 12.04.2022.
- [11] P. Koller. (2022) Türkis ist das bessere Grün bei Wasserstoff [Pressemitteilung]. <https://www.energie-und-management.de/nachrichten/detail/tuerkis-ist-das-bessere-gruen-bei-wasserstoff-142738>. 12.04.2022.
- [12] D. Pace, “Analyse verschiedener Wasserstoff-Speichertechnologien für einen emissionsfreien Schiffsantrieb,” OTH Regensburg.
- [13] Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen, “Sichere und leichte Hochdrucktanks für Speicherung und Transport von Grünem Wasserstoff [Pressemitteilung],” <https://www.imws.fraunhofer.de/de/presse/pressemitteilungen/wasserstoff-hochdrucktank-1000bar-leichtbau.html>, 12.04.2022.
- [14] Ingenieurbüro für Brennstoffzelle, Wasserstofftechnologie und Elektromobilität. Warum fasst ein Wasserstofftank bei 700 bar nicht doppelt so viel wie bei 350 bar? <https://emcel.com/de/warum-fasst-ein-wasserstofftank-bei-700-bar-nicht--doppelt-so-viel-wie-bei-350-bar/>. 12.04.2022.
- [15] M. Müller, “Entwicklung und Betrieb einer Anlage zur kontinuierlichen Hydrierung von flüssigen organischen Wasserstoffträgern im Technikumsmaßstab,” Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Nürnberg, 2018.
- [16] E. A. Bouman, E. Lindstad, A. I. Riialand, and A. H. Stromman, “State-of-the-art technologies, measures, and potential for reducing GHG emissions from shipping - A review,” 05.10.2020.
- [17] A. Haxhiu, A. Abdelhakim, S. Kanerva, and J. Bogen, “Electric Power Integration Schemes of the Hybrid Fuel Cells and Batteries-Fed Marine Vessels – An Overview,” *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, p. 1, 2021.
- [18] Interreg Danube Transnational Programme, “Elaboration of PP specific Danube navigation promotion related themes: Overview Vessel Types on the Danube,” www.interreg-danube.eu/danube-skills, 19.04.2022.
- [19] M. Fiedler, R. Kutz, and G. Metropoulos, “Schlussbericht Demonstrationsprojekt RiverCell/ELEKTRA: Schubschiff mit Brennstoffzellen-Hybridanlage.”
- [20] J. J. Minnehan and J. W. Pratt, “Practical Application Limits of Fuel Cells and Batteries for Zero Emission

- Vessels: Sandia Report,” Albuquerque, New Mexico.
- [21] A. M. Bassam, A. B. Phillips, S. R. Turnock, and P. A. Wilson, “Development of a multi-scheme energy management strategy for a hybrid fuel cell driven passenger ship,” vol. 42, no. 1, pp. 623–635, 2017.
- [22] FleetMon.com. (21.04.2022) HERKULES IX (Pushboat). https://www.fleetmon.com/vessels/herkules-ix_0_9155888/#tab-datasheet. 21.04.2022.
- [23] k.A. Herkules IX: Schiffsdaten. <http://www.schiffundtechnik.com/plaintext/lexikon/h/herkules-ix.html>. 20.04.2022.
- [24] VesselFinder. Herkules IX: Cargo ship, MMSI 211476050. <https://www.vesselfinder.com/vessels/HERKULES-IX-IMO-0-MMSI-211476050>. 19.04.2022.
- [25] Caterpillar. (23.04.2022) 3512 Mechanische Landbohrmotoren — Cat — Caterpillar. https://www.cat.com/de_DE/products/new/power-systems/oil-and-gas/land-mechanical-engines/18448327.html. 23.04.2022.
- [26] Aleksandar Simić, “Energy Efficiency of Inland Waterway Self-Propelled Cargo Ships.”
- [27] H. Tschöke, P. Gutzmer, and T. Pfund, “Elektrifizierung des Antriebsstrangs: Grundlagen - vom Mikro-Hybrid zum vollelektrischen Antrieb: 1st ed. 2019, ATZ/MTZ-Fachbuch.”
- [28] MAN Energy Solutions, “Batteries on board ocean-going vessels: Investigation of the potential for battery propulsion and hybridisation by the application of batteries on board,” https://www.man-es.com/docs/default-source/marine/tools/batteries-on-board-ocean-going-vessels.pdf?sfvrsn=deaa76b8_12, 23.04.2022.
- [29] W. Schellong, *Analyse und Optimierung von Energieverbundsystemen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016.
- [30] A. Kremmler, A. Kirchner, A. auf der Mauer, F. Ess, S. Kreidelmeyer, A. Piégsa, T. Spillmann, M. Wunsch, and I. Ziegenhagen, “Energiewirtschaftliche Projektionen und Folgeabschätzungen 2030/2050: Dokumentation von Referenzszenario und Szenario mit Klimaschutzprogramm 2030,” https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Wirtschaft/klimagutachten.pdf?__blob=publicationFile&v=8, 29.04.2022.
- [31] Greenpeace Energy eG, “Kosten der Produktion von grünem Wasserstoff: Dokumentation: WD 5 - 3000 - 029/20,” <https://www.bundestag.de/resource/blob/691748/01a954b2b2d7c70259b19662ae37a575/WD-5-029-20-pdf-data.pdf>, 16.04.2022.
- [32] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (2022) BDEW-Strompreisanalyse Januar 2022: Haushalte und Industrie. https://www.bdew.de/media/documents/220124_BDEW-Strompreisanalyse_Januar_2022_24.01.2022_final.pdf. 29.04.2022.
- [33] S. T. Thompson, B. D. James, J. M. Huya-Kouadio, C. Houchins, D. A. DeSantis, R. Ahluwalia, A. R. Wilson, G. Kleen, and D. Papageorgopoulos, “Direct hydrogen fuel cell electric vehicle cost analysis: System and high-volume manufacturing description, validation, and outlook,” *Journal of Power Sources*, vol. 399, pp. 304–313, 2018.
- [34] M. Ram, D. Bogdanov, A. Aghahosseini, A. Gulagi, A. S. Oyewo, M. Child, U. Caldera, K. Sadvoskaia, J. Farfan, Barbosa LSNS., M. Fasihi, S. Khalili, B. Dalheimer, G. Gruber, T. Traber, F. de Caluwe, H.-J. Fell, and D. Breyer, “Global Energy System based on 100% Renewable Energy: Power, Heat, Transport and Desalination Sectors,” Lappeenranta, Berlin.
- [35] P. Sterchele, J. Brandes, J. Heilig, D. Wrede, C. Kost, T. Schlegl, A. Bett, and H.-M. Henning, “Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem: Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen,” Freiburg.
- [36] D. Pace, “Untersuchung des Wasserstoff-Gesamtkonzeptes für den emissionsreduzierten, maritimen Schiffsverkehrs, anhand eines konkreten Routenprofils.”
- [37] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle, “Informationsblatt CO₂-Faktoren,” 30.04.2022.