

WASSERSTOFF SCHIFF

Technisches Buch für das Youth@STEM4SF Projekt



HYDROWAVE

Group name:

HydroWave

Author:

Maks Zagode, Anton Mlinar

Group members:

Maks Zagode, Anton Mlinar,

Eva Zvonareva, Irena Tišler, Nace Kenda

Mentor: Adela Žigert

BIC LJUBLJANA

Gimnazija in veterinarska šola

Cesta v Mestni log 47

1000 Ljubljana

Ljubljana, Avgust 2024

Einführung

In diesem technischen Buch stellen wir unser Projekt mit dem Titel „Wasserstoffschiiff“ vor. In den folgenden Kapiteln gehen wir auf das Betriebssystem des Schiffs ein, beschreiben die einzelnen Schiffskomponenten und führen theoretische Berechnungen zum Verbrauch und zur Lebensdauer des Schiffs durch. Der von uns gewählte Schiffstyp ist ein Frachtschiiff, da wir davon überzeugt sind, dass die Umstellung von Frachtschiiffen auf Wasserstoff als Kraftstoff erheblich zu einer saubereren Umwelt beitragen würde.

Schlüsselwörter:

Fachbuch, Frachtschiiff, Wasserstoffschiiff, Wasserstoff, Projekt

Kazalo

Einführung.....	3
Schlüsselwörter:	3
Kazalo.....	4
1. Deutsches Kapitel.....	6
1.1 Systembetrieb.....	6
1.2 Beschreibung der Systemkomponenten	6
1.2.1 Wasserstoff-Brennstoffzelle	7
1.2.2 Elektrolyseur.....	8
1.2.3 Wasserstofftank Typ III.....	9
1.2.4 Solarzellen auf Basis von Kohlenstoffnanofasern	9
1.2.4.1 Öffnungs-/Schließsystem von Solarzellen – Prinzip I	10
1.2.4.2 Öffnungs-/Schließsystem von Solarzellen – Prinzip II.....	10
1.2.5 Elektromotor	11
1.3 Erzeugungs-/Verbrauchsberechnungen	12
1.3.1 Schiffsmodell: Post-Panamax.....	12
1.3.2 Wasserstofferzeugung	13
1.3.3 Wirkungsgrad von PEM-Brennstoffzellen	13
1.3.4 Kräfte und Macht.....	14
1.3.5 Größe der Tanks	15
1.3.6 Autonomie	15
1.3.7 Wasserstofferzeugung	16
1.4 Vergleich von Schiffen mit Wasserstoff und fossilen Brennstoffen.....	16
1.4.1 Umweltauswirkung.....	16
1.4.2 Vergleich mit einem Schiff mit fossilen Brennstoffen	17
1.5 Indikative Berechnung des Schiffspreises	18
1.5.1 Preis für Wasserstoff-Brennstoffzellen.....	18
1.5.2 Preis des Elektrolyseurs.....	18
1.5.3 Preis für Sonnenkollektoren	19
1.5.3.1 Photovoltaik-Sonnenkollektoren.....	19
1.5.3.2 Solarzellen auf Basis von Kohlenstoff-Nanofasern	19
1.5.4 Typ III Wasserstofftank Preis.....	20
1.5.5 Preis des Elektromotors	20
1.5.6 Gesamtpreis für das Betriebssystem.....	21
1.6 Kostenanalyse für den Rumpf eines Neo-Panamax-Frachtschiffs.....	22

1.6.1	Berechnungen der Material- und Gerätekosten	22
1.6.1.1	Berechnung der Stahlkosten	22
1.6.1.2	Berechnung der Ausrüstungskosten.....	23
1.6.1.3	Geschätzter Gesamtpreis.....	23
1.6.2	Berechnungen der Herstellungs- und Montagekosten	23
1.6.2.1	Niedrigkostenregion (Asien).....	23
1.6.2.2	Gesamtnote für die Low-Cost-Region	24
1.6.2.3	Hochkostenregion (Europa, Nordamerika)	24
1.6.2.4	Gesamtpunktzahl für Hochkostenregion.....	24
1.7	Geschätzter Kaufpreis des Schiffes.....	25
Abschluss	26
Index der Bilder.....		27
Quellen		28
Quellen von Bilder		28

1. Deutsches Kapitel

Dieses technische Buch ist in drei Teile unterteilt: den slowenischen, englischen und deutschen Teil. Diese Kapitel unterscheiden sich nur in der Sprache, in der sie geschrieben sind.

1.1 Systembetrieb

Das Konzept eines Wasserstoffschiffs besteht aus einem Satz Brennstoffzellen, Wasserstofftanks, Wassertanks, einem Satz Elektrolyseure, einem Elektromotor und Solarzellen auf Basis von Kohlenstoffnanoröhren/Photovoltaikzellen. Nach diesem Prinzip verbraucht das Schiff, während es seine Wasserstoffvorräte über die Brennstoffzelle nutzt, gleichzeitig auch über die Solarzellen. Dies ermöglicht dem Schiff eine größere Autonomie, als es sonst hätte.

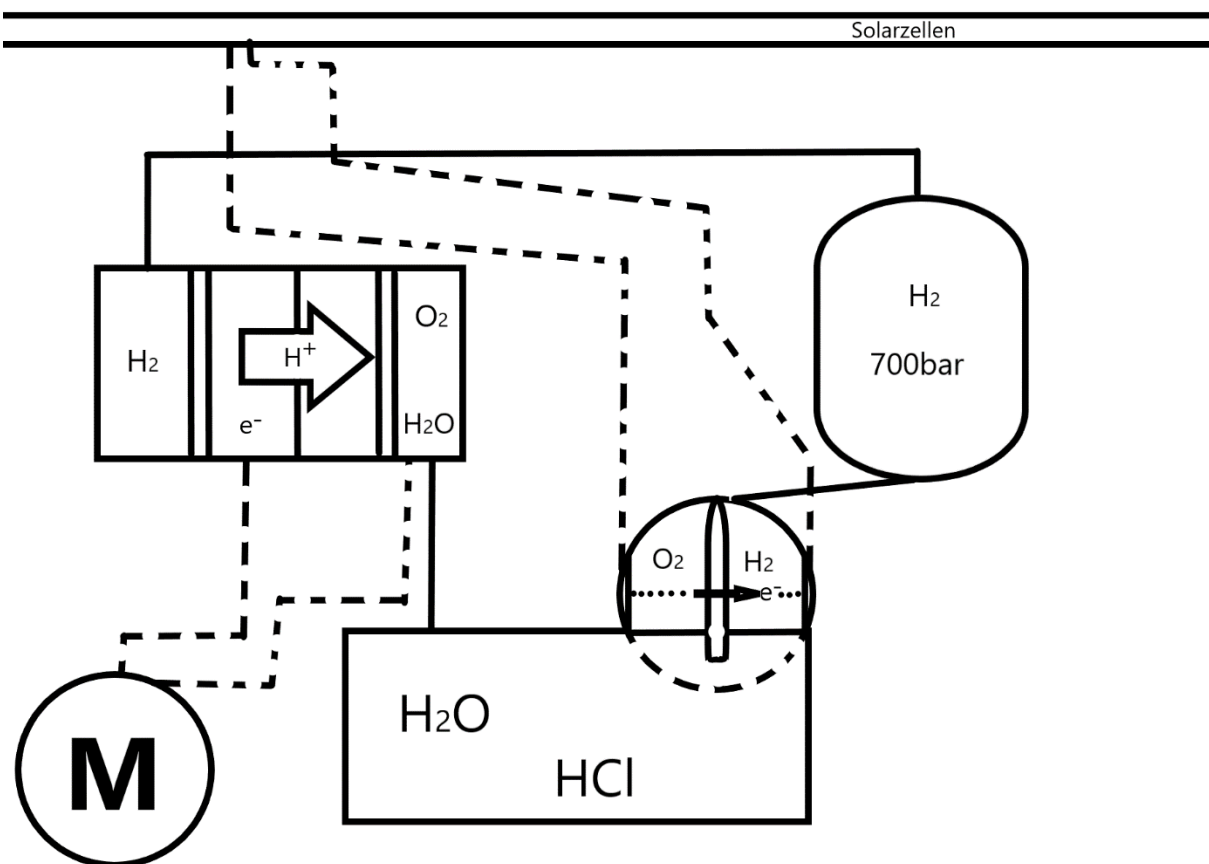


Bild 1: Schema des Schiffsbetriebssystems

1.2 Beschreibung der Systemkomponenten

In diesem Kapitel werden wir uns mit den einzelnen Teilen des Systems befassen, die im vorherigen Kapitel erwähnt wurden. Wir stellen Ihnen die Komponenten der Komponenten, ihre Aufgaben und ihre Funktionsweise vor.

1.2.1 Wasserstoff-Brennstoffzelle

Eine Wasserstoff-Brennstoffzelle wandelt die chemische Energie von Wasserstoff und Sauerstoff direkt in Strom, Wärme und Wasser um. Es funktioniert auf der Grundlage elektrochemischer Reaktionen, die in mehreren Schlüsselkomponenten ablaufen: Anode, Kathode, Elektrolyt, Membran und Katalysator.

Wasserstoff tritt an der Anode in die Zelle ein, wo der Katalysator, gewöhnlich aus Platin, den Zerfall von Wasserstoff in Protonen und Elektronen ermöglicht. Die Protonen wandern durch die Elektrolytmembran zur Kathode, während die Elektronen durch einen externen elektrischen Kreis fließen, was einen elektrischen Strom zur Versorgung von Geräten erzeugt. An der Kathode verbinden sich die Protonen, Elektronen und der Sauerstoff ebenfalls mithilfe des Katalysators zu Wasser und setzen Wärme frei.

Die gesamte chemische Reaktion lautet:



Wasserstoff-Brennstoffzellen sind sehr effizient und umweltfreundlich, da sie nur Wasser als Nebenprodukt erzeugen. Trotzdem stehen sie vor Herausforderungen wie den hohen Kosten der Katalysatoren und der schwierigen Speicherung von Wasserstoff. Trotz dieser Herausforderungen haben sie großes Potenzial für den Einsatz im Transportwesen, in stationären Energiesystemen und in tragbaren Geräten.

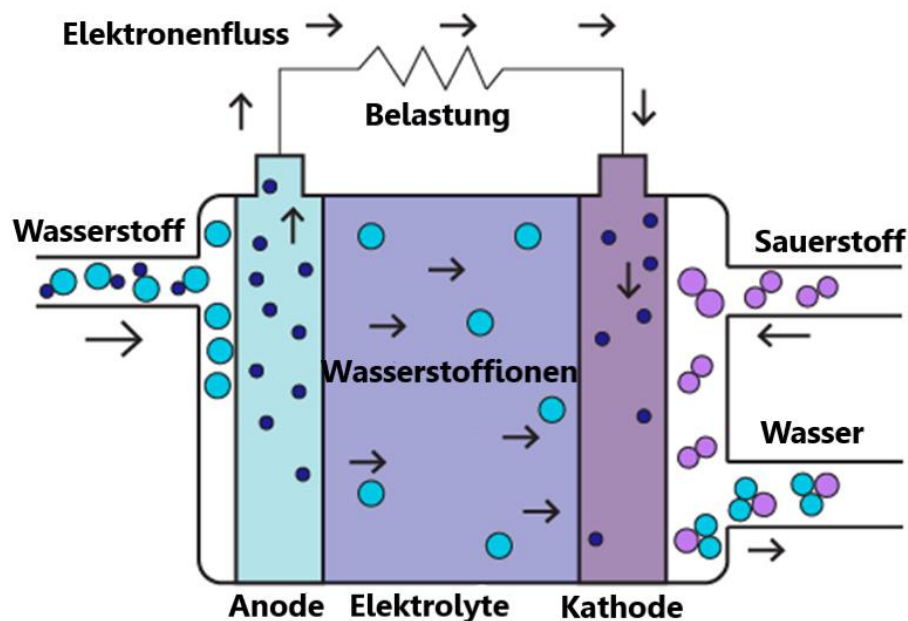


Bild 2: Schema der Wasserstoff – Brennstoffzell

1.2.2 Elektrolyseur

Ein Elektrolyseur ist ein Gerät, das elektrische Energie nutzt, um chemische Reaktionen zu fördern, die sonst nicht spontan ablaufen würden. Die Hauptkomponenten eines Elektrolyseurs sind die Stromquelle, die Elektroden und der Elektrolyt. Die Stromquelle liefert die notwendige elektrische Energie, die Elektroden (Kathode und Anode) sind in den Elektrolyten getaucht, der den Fluss des elektrischen Stroms ermöglicht.

Der Elektrolyseprozess beginnt mit dem Anschluss des Elektrolyseurs an die Stromquelle, was die Bewegung der Ionen im Elektrolyten verursacht. Positive Ionen (Kationen) wandern zur Kathode, wo sie Elektronen aufnehmen und reduziert werden, während negative Ionen (Anionen) zur Anode wandern, wo sie Elektronen abgeben und oxidiert werden. Auf diese Weise bilden sich an den Elektroden verschiedene Produkte, abhängig vom verwendeten Elektrolyten und den Elektroden.

Bei der Elektrolyse von Wasser, einem typischen Anwendungsbeispiel für einen Elektrolyseur, wird Wasser (H_2O) durch Zusatz von Säure oder Base in Wasserstoff (H_2) und Sauerstoff (O_2) zerlegt. Die Gleichungen für die Elektrolyse von Wasser lauten wie folgt:

- An der Kathode (Reduktion): $2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$
- An der Anode (Oxidation): $2H_2O \rightarrow O_2 + 4H^+ + 4e^-$

Im Elektrolyseur wird Wasser durch Zusatz einer kleinen Menge Säure oder Base zur Erhöhung der Leitfähigkeit ergänzt. Wenn Strom durch das System fließt, zerfällt das Wasser und bildet Wasserstoff an der Kathode und Sauerstoff an der Anode.

Elektrolyseure, die die Elektrolyse von Wasser durchführen, sind in verschiedenen industriellen Prozessen von entscheidender Bedeutung, wie z.B. der Produktion von Wasserstoff für Brennstoffzellen, bei denen Wasserstoff als sauberer Energiequelle verwendet wird. Sie sind auch wichtig für die Produktion von Sauerstoff für medizinische und industrielle Zwecke. Der Elektrolyseprozess von Wasser ist umweltfreundlich und bietet vielversprechende Möglichkeiten für die nachhaltige Energie- und Industriegasproduktion. 3

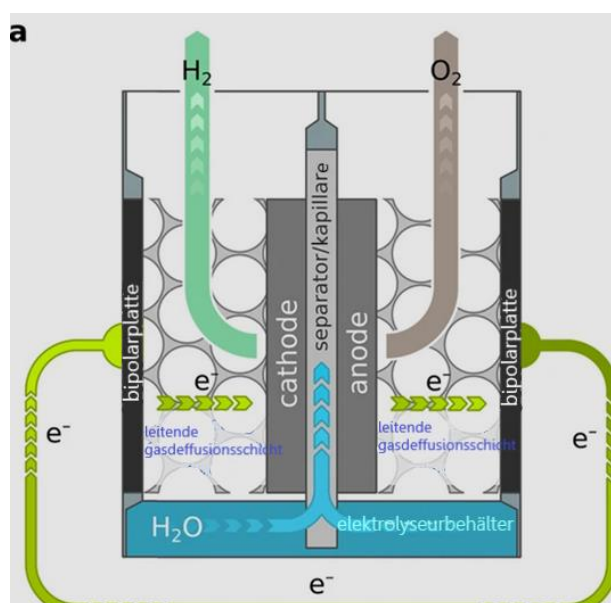


Bild 3: Scheme der PEM Elektrolyseur - Hysata

1.2.3 Wasserstofftank Typ III

Ein Wasserstofftank des Typs III ist ein fortschrittlicher Behälter zur Lagerung von komprimiertem Wasserstoff, der für hohe Drücke bis zu 700 bar ausgelegt ist. Seine Struktur umfasst einen inneren Liner aus Aluminium, der für Gase undurchlässig ist, und eine Verbundschicht aus Kohlefaser, die die Festigkeit erhöht und das Gewicht reduziert. Aufgrund dieser Eigenschaften sind Typ-III-Tanks ideal für den Einsatz in Brennstoffzellenfahrzeugen, industriellen Prozessen und stationären Energiespeichersystemen. Neben der hohen Leistungsfähigkeit sind sie auch sehr sicher, da sie widerstandsfähig gegen physische Beschädigungen und Korrosion sind und strenge Tests und Zertifizierungen bestehen. Mit der Kombination aus hoher Druckbeständigkeit und reduziertem Gewicht stellen sie einen bedeutenden Fortschritt in der Gasspeichertechnologie dar.

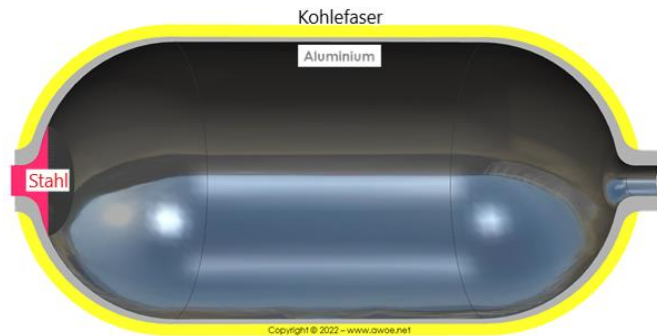


Bild 4: Scheme der Wasserstofftank Typ III

1.2.4 Solarzellen auf Basis von Kohlenstoffnanofasern

Solarzellen auf Basis von Kohlenstoffnanofasern stellen eine innovative Technologie in der Photovoltaik dar. Kohlenstoffnanofasern ermöglichen dank ihrer einzigartigen elektronischen und optischen Eigenschaften eine effiziente Umwandlung von Sonnenenergie in Elektrizität. Kohlenstoffnanofasern absorbieren effektiv ein breites Spektrum an Sonnenlicht, was zur Anregung von Elektronen und zur Bildung von Elektron-Loch-Paaren führt. Diese Paare trennen sich dann, wobei sich Elektronen und Löcher aufgrund der hohen Mobilität in den Nanofasern schnell zu den Elektroden bewegen und so einen elektrischen Strom mit minimalen Verlusten erzeugen.

Solarzellen auf Basis von Kohlenstoffnanofasern bieten mehrere Vorteile. Ihre Effizienz ist höher als die herkömmlicher Siliziumzellen, sie sind leicht, langlebig und flexibel, was die Herstellung flexibler Solarmodule ermöglicht. Sie haben auch das Potenzial für niedrigere Produktionskosten im Vergleich zu Siliziumzellen. Während sich diese Solarzellen noch in der Entwicklung befinden, zeigen Laborexperimente vielversprechende Ergebnisse. Mit kontinuierlichen Fortschritten in der Forschung könnten sie aufgrund ihrer hohen Effizienz, Flexibilität und niedrigen Kosten zu einem wichtigen Bestandteil der nachhaltigen Energieinfrastruktur werden.

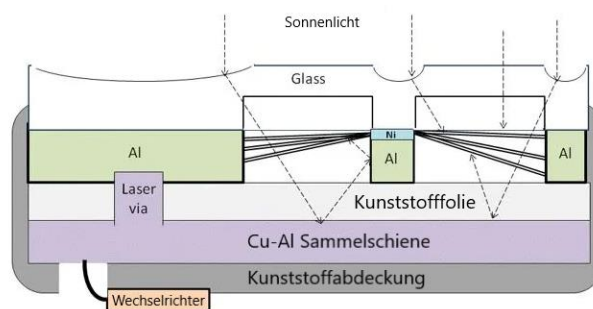


Bild 5: Scheme von Solarzellen auf Basis von Kohlenstoff-Nanoröhren - NovaSolix

1.2.4.1 Öffnungs-/Schließsystem von Solarzellen – Prinzip I

Eine Möglichkeit für ein Solarzellensystem besteht darin, die Solarzellen in Form eines Origami-Akkordeons zusammenzustapeln. Bei diesem Prinzip werden nur eine Winde zum Öffnen und Schließen der Solarzellen und zwei seitliche Hilfsseile, die als Spannseile dienen, benötigt.

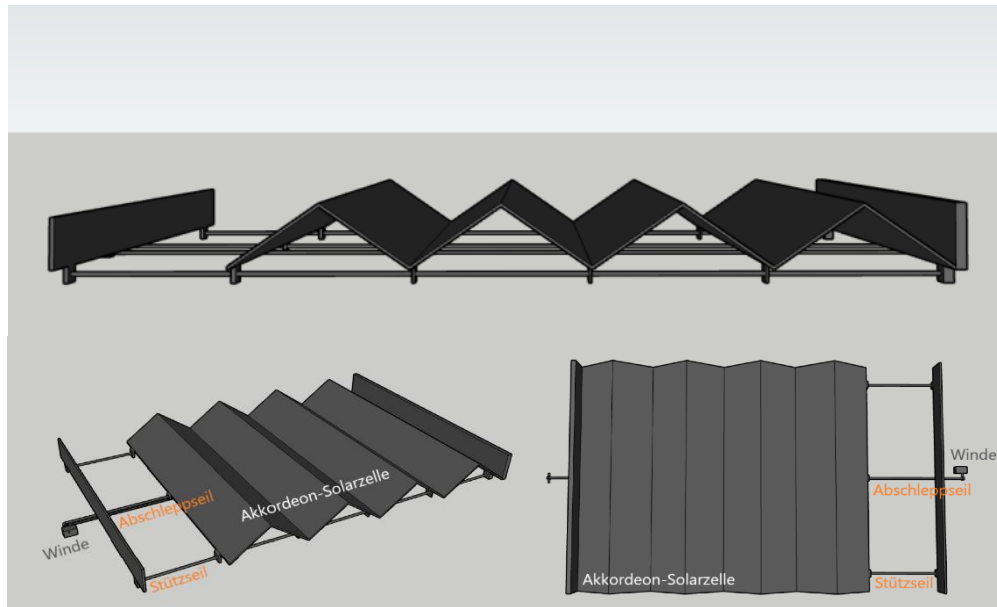


Bild 6: Schema von prinzip I - Akkordeons

1.2.4.2 Öffnungs-/Schließsystem von Solarzellen – Prinzip II

Das zweite Prinzip der Solarzellen ist Origami von Fischgrätfalten erster Ordnung. In diesem Fall müssen wir drei Winden verwenden, da diese Form des Origami im Gegensatz zum Akkordeon-Origami sowohl in der Länge als auch in der Breite reduziert ist. Dieses Prinzip ist etwas schwieriger, da sich die beiden seitlichen Stützseile ebenfalls leicht bewegen müssen, um im offenen und gefalteten Zustand der Solarzellen straff zu bleiben.

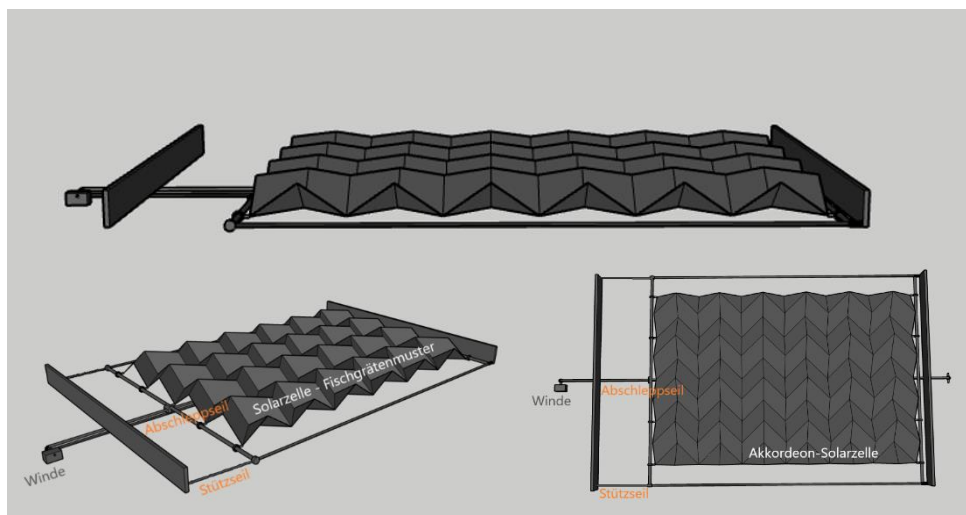


Bild 7: 3D Schema von prinzip II - Fischgrätfalten

1.2.5 Elektromotor

Elektromotoren in Schiffen funktionieren nach dem Prinzip der elektromagnetischen Induktion. Sie bestehen aus einem Stator (dem stationären Teil, der ein Magnetfeld erzeugt) und einem Rotor (dem rotierenden Teil, der sich durch die Interaktion mit dem Magnetfeld des Stators dreht). Die Rotation des Rotors überträgt kinetische Energie auf den Propeller, der das Schiff antreibt.

Elektromotoren sind effizient, umweltfreundlich, ermöglichen eine präzise Steuerung von Geschwindigkeit und Richtung und sind leiser als Dieselmotoren. Am häufigsten werden Wechselstrommotoren (AC) verwendet, insbesondere dreiphasige asynchrone oder synchrone Motoren sowie permanenterrregte Synchronmotoren (PMSM), die für ihre hohe Effizienz und Zuverlässigkeit bekannt sind.

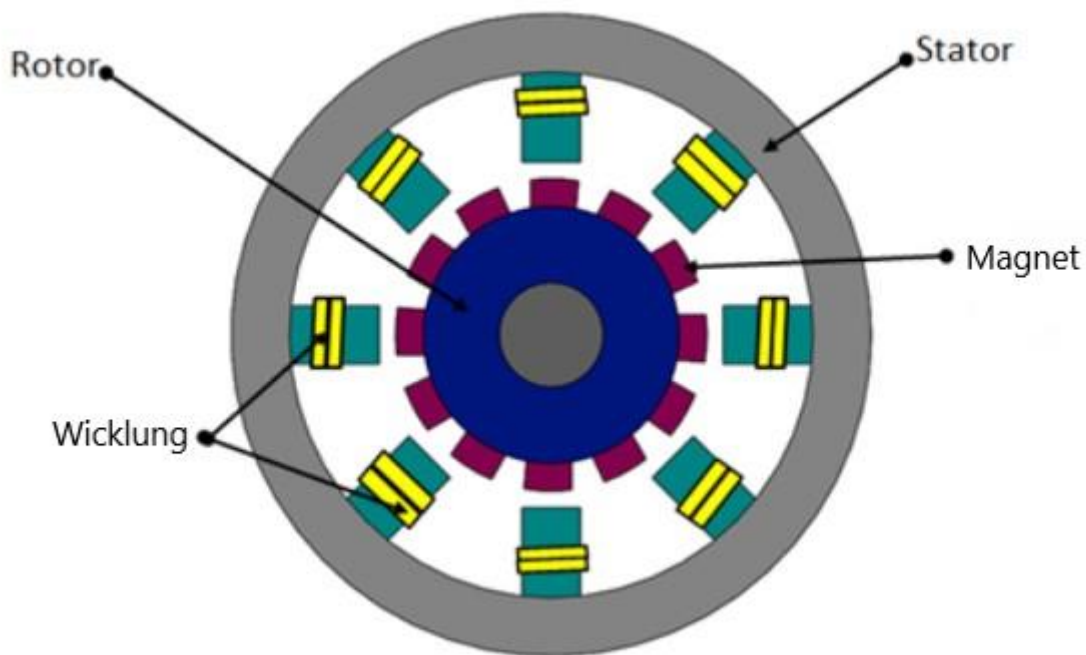


Bild 8: Schema der Elektromotor

1.3 Erzeugungs-/Verbrauchsberechnungen

In diesem Kapitel werden wir die theoretische Autonomie des Schiffes darstellen.

1.3.1 Schiffsmodell: Post-Panamax

$$\text{cca. } l = 366 \text{ m}$$

$$\text{cca. } w = 49 \text{ m}$$

$$\text{cca. } h = 31 \text{ m}$$

↳ Unter Wasser 15 m (Entwurf)

$$e = 15 \text{ m}$$

$$\text{cca. } S = l \times w + (h - e) \times l \times 2$$

$$S = 366 \text{ m} \times 49 \text{ m} + (31 \text{ m} - 15 \text{ m}) \times 366 \text{ m} \times 2$$

$$S = 17.934 \text{ m}^2 + 11.712 \text{ m}^2$$

$$S = 29.646 \text{ m}^2$$

$$\text{cca. } S_{\text{SEITE}} = 5.856 \text{ m}^2$$

$$\text{cca. } S_{\text{DECK}} = 17.934 \text{ m}^2$$

$$\text{cca. } S_{\text{ALLES}} = 29.646 \text{ m}^2$$

$$m_{\text{SCHIFF}} = 165.000 \text{ t}$$

$$m_{\text{CARGO}} = 150.000 \text{ t}$$

$$m_{\text{ALLES}} = 315.000 \text{ t}$$

$$V_{\text{SCHIFF}} = 555.954 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{CARGO}} = 174.695 \text{ m}^3$$

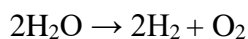
↳ Cargo über dem Rumpf

$$V_{\text{ALLES}} = 730.649 \text{ m}^3$$

	Kohlenstoff-Nanofaser-Zelle	Photovoltaik-Zellen
Wirksamkeit	Ab 90% $\eta = 0,9 \text{ kW/m}^2$	Ab 23% $\eta = 0,23 \text{ kWh/m}^2$
Die Sonne steht in einem Winkel von 30° ↳ Die Reflexion des Lichts vom Meer beträgt 65% ↳ folgt:	$2 \times 0,65 \times 0,9 \text{ kW/m}^2 \times 5.856 \text{ m}^2 = 6.851,5 \text{ kWh}$	$2 \times 0,65 \times 0,23 \text{ kWh/m}^2 \times 5.856 \text{ m}^2 = 1.750,9 \text{ kWh}$
Die Sonne steht in einem Winkel von 30° ↳ Die Reflexion des Lichts vom Meer aus beträgt 8% ↳ folgt:	$2 \times 0,08 \times 0,9 \text{ kW/m}^2 \times 5.856 \text{ m}^2 = 842,3 \text{ kWh}$	$2 \times 0,08 \times 0,23 \text{ kWh/m}^2 \times 5.856 \text{ m}^2 = 215,5 \text{ kWh}$
Es ist 12 Uhr in der Sonne	46.182,7 kWh	11.798,64 kWh
Deck Idealer 90°-Winkel ↳ Gleise (90°):	$0,9 \text{ kW/m}^2 \times 17.934 \text{ m}^2 = 16.140,6 \text{ kWh}$	$0,23 \text{ kWh/m}^2 \times 17.934 \text{ m}^2 = 4.124,8 \text{ kWh}$
Es ist 12 Uhr in der Sonne	193.687,2 kWh	49.497,6 kWh
Die Gesamtproduktion unter idealen Bedingungen beträgt	239.849,9 kWh ↳ 5.780 kg H ₂	61.296 kWh ↳ 1.477 kg H ₂

1.3.2 Wasserstofferzeugung

- Elektrolyse von Wasser
- Strom aus Solarzellen
- Wasser aus dem Tank



$$\frac{n(\text{H}_2)}{n(\text{H}_2\text{O})} = \frac{2}{2}$$

$$n(\text{H}_2) = n(\text{H}_2\text{O})$$

$$n(\text{H}_2\text{O}) = \frac{1.000 \text{ g mol}}{2,02 \text{ g}}$$

$$n(\text{H}_2\text{O}) = 495,05 \text{ mol}$$

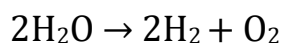
$$m(\text{H}_2\text{O}) = \frac{495,05 \text{ mol} \times 18,02 \text{ g}}{\text{mol}}$$

$$m(\text{H}_2\text{O}) = 8.920,79 \text{ g}$$

1 kg H₂ 8,92 kg H₂O
↳ 8,92 ℓ H₂O

1 kg H₂ 41,5
kWh ↳ Hysata

1.3.3 Wirkungsgrad von PEM-Brennstoffzellen



$$\Delta G = -237,13 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta H = -285,84 \text{ kJ/mol}$$

$$\eta_{\text{MAX}} = \frac{\Delta G}{\Delta H} \times 100$$

$$\eta_{\text{MAX}} = \frac{-237,13 \text{ kJ mol}}{-285,84 \text{ kJ mol}} \times 100$$

$$\eta_{\text{MAX}} = 83,32 \%$$

$$39,39 \text{ kWh} \times 0,8332 = 32,8 \text{ kWh}$$

ENERGIEWERT

1kg H₂. 39,39 kWh

MAXIMALE EFFIZIENZ

1kg H₂ 32,70 kWh

1.3.4 Kräfte und Macht

Daten

$$V = 15,28 \text{ m/s}$$

$$l = 366 \text{ m}$$

$$S = 11.715 \text{ m}^2$$

$$\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$$

$$\nu = 1,19 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

Reynolds-Zahl

$$Re = \frac{V \times l}{\nu}$$

$$Re = \frac{15,28 \text{ m} \times 366 \text{ m} \times \text{s}}{1,19 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \times \text{s}}$$

$$Re = 4,7 \times 10^9$$

Reibungskoeffizient

$$C_f = \frac{0,075}{(\log_{10}(Re) - 2)^2}$$

$$C_f = \frac{0,075}{(9,673 - 2)^2}$$

$$C_f \approx 0,00127$$

Reibung

$$R_f = \frac{1}{2} \times \rho \times V^2 \times S \times C_f$$

$$R_f = \frac{1}{2} \times 1025 \text{ kg/m}^3 \times (15,28 \text{ m/s})^2 \times 11.715 \text{ m}^2 \times 0,00127$$

$$R_f \approx 1.785.670 \text{ N} \approx 1,79 \text{ MN}$$

Leistung

$$P = R_f \times V$$

$$P = 1,79 \text{ MN} \times 15,28 \text{ m/s}$$

$$P \approx 27.281.073 \text{ W} \approx 27,28 \text{ MW}$$

MOTORKRAFT FERTIG

24h 654,72 MWh

↳ 20.022 kg H₂

Kraft am Tag

$$P_{Tag} = P \times tag$$

$$P_{Tag} = 27,28 \text{ MW} \times 24 \text{ h}$$

$$P_{Tag} \approx 654,72 \text{ MWh}$$

Wasserstoffverbrauch pro Tag

$$m_{H_2} = \frac{P_{Tag}}{\rho_E}$$

$$m_{H_2} = \frac{654,72 \text{ MWh} \times \text{kg}}{32,7 \text{ kWh}}$$

$$m_{H_2} \approx 20.022 \text{ kg}$$

1.3.5 Größe der Tanks

Wasserstofftank: 2 Millionen Gallonen ($\doteq 7.570.823,68 \text{ l}$)

Der Wassertank \rightarrow nur für die Elektrolyse vorgesehen

$$p = 700.000 \text{ kPa}$$

$$m = \frac{p \times V \times M}{T \times R}$$

$$T = 293 \text{ K}$$

$$m = 439.455,50 \text{ kg}$$

	Kohlenstoff-Nanofaser-Zelle	Photovoltaik-Zellen
H ₂	Produktion: 467,8 kg/h Verbrauch: 430 kg/h Unterschied: 37,8 kg/h	Produktion: 123,1 kg/h Verbrauch: 834,3 kg/h Unterschied: -711,2 kg/h
H ₂ O	Produktion: 4.172,8 kg/h Verbrauch: 7.441,9 kg/h Unterschied: -3.146,1 kg/h	Produktion: 1.066,8 kg/h Verbrauch: 7.441,9 kg/h Unterschied: -6.343,9 kg/h
VOLUMEN H ₂ O	1 m ³	1 m ³

*Überschüssiges Wasser wird ins Meer eingeleitet oder zur Ergänzung des Trinkwassertanks verwendet

1.3.6 Autonomie

$$m_{\text{BRENNSTOFF}} = 664.663,5 \text{ kg H}_2 \rightarrow \text{Voller Tank}$$

$$m_{\text{VERBRAUCH}} = 20.022 \text{ kg H}_2/24\text{h}$$

$$V_{\text{MAX}} = 30 \text{ knoten} \doteq 55 \text{ km/h}$$

$$M_{\text{PRODUKTION}} = 5.780 \text{ kg H}_2/12\text{h} \rightarrow 90\% \text{ Ausbeute der Zellen}$$

$$1.477 \text{ kg H}_2/12\text{h} \rightarrow 23\% \text{ Ausbeute der Zellen}$$

$$\text{Autonomie} = \frac{m_{\text{BRENNSTOFF}}}{m_{\text{VERBRAUCH}}}$$

$$\text{Autonomie} = \frac{664.663,5 \text{ kg}}{20.022 \text{ kg}}$$

$$\text{Autonomie} = 30 \text{ Tage}$$

VOLLER TANK 30 Tage
↳ 39.600 km

1.3.7 Wasserstofferzeugung

- Produziert 42 Tage
 - ↳ Die erste Stufe → den Verbrauch des anfänglich vollen Tanks → 439.500 kg
- Durchschnittliche Sonnenzeit 12h

ZYKLUS		Kohlenstoff-Nanofaser-Zellen	Photovoltaik-Zellen
	Produktion*	467,8 kg/h	119,6 kg/h
0	Ausdauer	481,6 kg/h	123,1 kg/h
1	Ausdauer	$\frac{30 \text{ dni} \times 481,6 \text{ kg} \times 12 \text{ h}}{20.022 \text{ kg h}} = 9 \text{ Tage}$ <p>Nach der ersten Etappe ist genug Treibstoff für 9 weitere Tage vorhanden</p>	$\frac{30 \text{ dni} \times 123,1 \text{ kg} \times 12 \text{ h}}{20.022 \text{ kg h}} = 3 \text{ Tage}$ <p>Nach der ersten Etappe ist genug Treibstoff für 3 weitere Tage vorhanden</p>
2	Ausdauer	$\frac{9 \text{ dni} \times 481,6 \text{ kg} \times 12 \text{ h}}{20.022 \text{ kg h}} = 3 \text{ Tage}$ <p>Nach der ersten Sekunde ist genug Treibstoff für 3 weitere Tage vorhanden</p>	$\frac{3 \text{ dni} \times 481,6 \text{ kg} \times 12 \text{ h}}{20.022 \text{ kg h}} = 7,2 \text{ h}$ <p>Nach der zweiten Stufe reicht der Treibstoff für 7,2 Stunden</p>
3	Ausdauer	$\frac{3 \text{ dni} \times 481,6 \text{ kg} \times 12 \text{ h}}{20.022 \text{ kg h}} = 1 \text{ Tag}$ <p>Nach der dritten Etappe ist genug Treibstoff für einen weiteren Tag vorhanden</p>	
	VÖLLIGE AUTONOMIE	43,3 TAGE → 57.156 km	33,3 TAGE → 43.956 km

* Mit jedem Zyklus entsteht etwas mehr Wasserstoff, den wir für die übernatürlichen Phasen verwenden

1.4 Vergleich von Schiffen mit Wasserstoff und fossilen Brennstoffen

In diesem Kapitel, wie wir bereits aus dem Titel entnehmen können, werden wir uns auf die technischen Daten des Schiffes konzentrieren und diese vergleichen.

1.4.1 Umweltauswirkung

In Bezug auf die Umweltauswirkungen können wir sagen, dass Wasserstoff betriebene Schiffe viel umweltfreundlicher sind als fossile Brennstoff betriebene Schiffe. Dies wird deutlich bei den entstehenden Produkten, da bei Wasserstoff betriebenen Schiffen nur Wasser (H₂O) entsteht, während bei fossilem Brennstoff betriebenen Schiffen Treibhausgase entstehen, die das Wasser vergiften, die Atmosphäre erwärmen und verschmutzen und auch beim Einatmen schädlich sein können. Wir müssen uns jedoch auch der Gewinnung und Produktion von fossilen Brennstoffen und Wasserstoff widmen. Die Gewinnung und Verarbeitung von fossilen Brennstoffen greift stark in die Erdkruste ein, was in diesen Gebieten zu Senkungen führen kann, und wir dürfen die Gefahren von Verschüttungen nicht vergessen, die das gesamte Ökosystem in diesem Gebiet stark schädigen können. Bei der Produktion von Wasserstoff müssen wir erwähnen, dass Strom benötigt wird, da Wasserstoff eine Art Energiespeicherung ist. Hier stoßen wir auf ein Problem, da der Großteil des weltweiten Stroms durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe erzeugt wird, was ein großer Nachteil sein kann, da wir die Produktion von Treibhausgasen nicht vermeiden. Die Lösung dafür ist der sogenannte grüne und rosa Wasserstoff. Grüner Wasserstoff bezieht sich auf Wasserstoff, der mit Strom aus natürlichen Quellen (Wasser, Luft, Sonne) erzeugt wird. Rosa Wasserstoff bezieht sich auf Wasserstoff, der mit Strom aus einem Kernkraftwerk erzeugt wird.

1.4.2 Vergleich mit einem Schiff mit fossilen Brennstoffen

	Schiff wird mit fossilen Brennstoffen betrieben	Schiff wird mit Photovoltaikzellen betrieben	Schiff wird mit Kohlenstoff-Nanofaserzellen betrieben
Motorleistung	27,28 MW	27,28 MW	27,28 MW
Anfangsmasse des Kraftstoffs	664.663,5 kg	664.663,5 kg	664.663,5 kg
Endgültige Kraftstoffmasse	664.663,5 kg	666.732,6 kg	866.952,6 kg
Kraftstoffvolumen	730,4 m ³	11.356,2	11.356,2
Kraftstoffdichte	910 kg/m ³	59 kg/m ³	59 kg/m ³
Kraftstoffpreis	560 €	1.360 €	1.360 €
(1.000 kg)	4240,6 kg	1516,8 kg	1516,8 kg
Verbrauch	2.374,736 €	2.062,848 €	2.062,848 €
Autonomie	11,9 TAGE ↳ 15.708 km	33,3 TAGE ↳ 43.956 km	43,3 TAGE ↳ 57.156 km

Ein Schiff mit fossilen Brennstoffen

Daten

$$m = 664.663,5 \text{ kg}$$

$$\rho = 910 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_E = 11,7 \text{ kWh/kg}$$

$$P = 27,28 \text{ MW}$$

Autonomie

$$\text{Autonomie} = \frac{m_{\text{VOLLEN TANK}}}{m}$$

$$\text{Autonomie} = \frac{664.663,5 \text{ kg}}{55.958,9 \text{ kg}}$$

$$\text{Autonomie} \approx 11,9 \text{ Tage}$$

$$\text{Autonomie} = 11,9 \text{ Tage} \times 24 \text{ h} \times 55 \text{ km/h}$$

$$\text{Autonomie} = 15.708$$

Tankgröße

$$V = \frac{m}{\rho}$$

$$V = \frac{664.663,5 \text{ kg}}{910 \text{ kg/m}^3}$$

$$V \approx 730,4 \text{ m}^3$$

Kraft am Tag

$$P_{\text{Tag}} = P \times \text{Tag}$$

$$P_{\text{Tag}} = 27,28 \text{ MW} \times 24 \text{ h}$$

$$P_{\text{Tag}} \approx 654,72 \text{ MWh}$$

Kraftstoffverbrauch pro Tag

$$m = \frac{P_{\text{Tag}}}{\rho_E}$$

$$m = \frac{654,72 \text{ MWh}}{11,7 \text{ kWh}}$$

$$m \approx 55.958,9 \text{ kg}$$

1.5 Indikative Berechnung des Schiffspreises

Die ungefähre Berechnung des Schiffspreises wird auf der Grundlage der Richtpreise aller Systemteile des Schiffes berechnet. Wir erhalten diese Daten, indem wir den Wert mit Daten aus dem Internet schätzen. Zu dem resultierenden Preis addieren wir dann den Hindernispreis des Schiffsrahmens.

1.5.1 Preis für Wasserstoff-Brennstoffzellen

$$P_{\text{BRENNSTOFFZELLE}} = 12,9 \text{ MW}$$

$$P_{\text{HORIZON BRENNSTOFFZELLE}} = 1 \text{ MW}$$

$$\eta_{\text{MAX}} = 85,96 \%$$

$$\text{cca. Preis}_{\text{HORIZON BRENNSTOFFZELLE}} = 500.000 \text{ €}$$

$$P_{\text{MAX}} = P_{\text{HORIZON BRENNSTOFFZELLE}} \times \eta_{\text{MAX}}$$

$$P_{\text{MAX}} = 1 \text{ MW} \times 85,96\%$$

$$P_{\text{MAX}} = 0,86 \text{ MW}$$

$$n_{\text{BRENNSTOFFZELLE}} = \frac{P_{\text{BRENNSTOFFZELLE}}}{P_{\text{MAX}}}$$

$$n_{\text{BRENNSTOFFZELLE}} = \frac{12,9 \text{ MW}}{0,86 \text{ MW}}$$

$$n_{\text{BRENNSTOFFZELLE}} = 16$$

$$\text{Preis} = \text{Preis}_{\text{HORIZON BRENNSTOFFZELLE}} \times n_{\text{BRENNSTOFFZELLE}}$$

$$\text{Preis} = 500.000 \text{ €} \times 16$$

$$\text{Preis} = 8.000.000 \text{ €}$$

1.5.2 Preis des Elektrolyseurs

$$M_{\text{WASSERSTOFF}} = 420 \text{ kg/h}$$

$$\eta_{\text{MAX}} = 41,5 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$$

$$\text{Preis}_{\text{ELEKTROLYSEUR}} = 900 \text{ €/kW}$$

$$P_{\text{ELEKTROLYSEUR}} = \eta_{\text{MAX}} \times m_{\text{WASSERSTOFF}}$$

$$P_{\text{ELEKTROLYSEUR}} = 41,5 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \times 420 \text{ kg/h}$$

$$P_{\text{ELEKTROLYSEUR}} = 17.430 \text{ kW}$$

$$\text{Cca. Preis} = \text{Preis}_{\text{ELEKTROLYSEUR}} \times P_{\text{ELEKTROLYSEUR}}$$

$$\text{Preis} = 900 \text{ €/kW} \times 17.430 \text{ kW}$$

$$\text{Cca. Preis} = 15.687.000 \text{ €}$$

1.5.3 Preis für Sonnenkollektoren

Bei der Berechnung des Richtpreises für Solarzellen haben wir zwei Optionen (Photovoltaikzellen und Kohlenstoffzellen).

1.5.3.1 Photovoltaik-Sonnenkollektoren

Cca. $l = 366 \text{ m}$

Cca. $w = 49 \text{ m}$

Cca. $h = 31 \text{ m}$

↳ Unter Wasser 15 m (Entwurf)

$e = 15 \text{ m}$

1 m² 320 €

Cca. $S = l \times w + (h - e) \times l \times 2$

$S = 366 \text{ m} \times 49 \text{ m} + (31 \text{ m} - 15 \text{ m}) \times 366 \text{ m} \times 2$

$S = 17.934 \text{ m}^2 + 11.712 \text{ m}^2$

$S = 29.646 \text{ m}^2$

Cca. $S_{\text{SEITE}} = 5.856 \text{ m}^2$

Cca. $S_{\text{DECK}} = 17.934 \text{ m}^2$

Cca. $S_{\text{ALLES}} = 29.646 \text{ m}^2$

Cca. $P = S_{\text{ALLES}} \times \frac{320 \text{ €}}{\text{m}^2}$

$P = 29.646 \text{ m}^2 \times \frac{320 \text{ €}}{\text{m}^2}$

Cca. $P = 9.486.720 \text{ €}$

1.5.3.2 Solarzellen auf Basis von Kohlenstoff-Nanofasern

Cca. $l = 366 \text{ m}$

Cca. $w = 49 \text{ m}$

Cca. $h = 31 \text{ m}$

↳ Unter Wasser 15 m (Entwurf)

$e = 15 \text{ m}$

1 m² 30 €

Cca. $S = l \times w + (h - e) \times l \times 2$

$S = 366 \text{ m} \times 49 \text{ m} + (31 \text{ m} - 15 \text{ m}) \times 366 \text{ m} \times 2$

$S = 17.934 \text{ m}^2 + 11.712 \text{ m}^2$

$S = 29.646 \text{ m}^2$

Cca. $S_{\text{SEITE}} = 5.856 \text{ m}^2$

Cca. $S_{\text{DECK}} = 17.934 \text{ m}^2$

Cca. $S_{\text{ALLES}} = 29.646 \text{ m}^2$

Cca. $P = S_{\text{ALLES}} \times \frac{30 \text{ €}}{\text{m}^2}$

$P = 29.646 \text{ m}^2 \times \frac{30 \text{ €}}{\text{m}^2}$

Cca. $P = 889.380 \text{ €}$

1.5.4 Typ III Wasserstofftank Preis

$$V_{\text{ALLES}} = 7.570,8 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{TANK}} = 6,5 \text{ m}^3$$

$$\text{Cca. Preis}_{\text{TANK}} = 12.000 \text{ €}$$

$$n_{\text{TANK}} = \frac{V_{\text{ALLES}}}{V_{\text{TANK}}}$$

$$n_{\text{TANK}} = \frac{7.570,8 \text{ m}^3}{6,5 \text{ m}^3}$$

$$n_{\text{TANK}} = 1.165$$

$$\text{Preis}_{\text{ALLES}} = \text{Preis}_{\text{TANK}} \times n_{\text{TANK}}$$

$$\text{Preis}_{\text{ALLES}} = 12.000 \text{ €} \times 1.165$$

$$\text{Preis}_{\text{ALLES}} = 13.980.000 \text{ €}$$

1.5.5 Preis des Elektromotors

$$P = 27.281 \text{ kW}$$

$$\text{cca. Preis}_{\text{ELEKTROMOTOR}} = 500 \text{ €/kW}$$

$$\text{Preis}_{\text{ZUSAMMEN}} = P \times \text{Preis}_{\text{ELEKTROMOTOR}}$$

$$\text{Preis}_{\text{ZUSAMMEN}} = 27.281 \text{ kW} \times 500 \text{ €/kW}$$

$$\text{Preis}_{\text{ZUSAMMEN}} = 13.640.500$$

1.5.6 Gesamtpreis für das Betriebssystem

$\text{Preis}_{\text{BRENNSTOFFZELLE}} = 16.000.000 \text{ €}$

$\text{Preis}_{\text{ELEKTROLYSEUR}} = 30.122.445 \text{ €}$

$\text{Preis}_{\text{SOLARZELLEN}}$:

- Photovoltaik-Zellen = 9.486.720 €
- Zellen auf Basis von Kohlenstoff-Nanofasern = 889.380 €

$\text{Preis}_{\text{TANK}} = 20.965.292 \text{ €}$

$\text{Cena}_{\text{ELEKTROMOTOR}} = 13.640.500$

1. $\text{Preis}_{\text{ALLES}} (\text{Photovoltaisch}) = 90.214.957 \text{ €}$

2. $\text{Preis}_{\text{ALLES}} (\text{Kohlenstoff-Nanofasern}) = 81.617.617 \text{ €}$

1.6 Kostenanalyse für den Rumpf eines Neo-Panamax-Frachtschiffs

1.6.1 Berechnungen der Material- und Gerätekosten

Die Berechnung des Preises für den Rumpf ohne Antriebsanlage lässt sich wie folgt berechnen:

1.6.1.1 Berechnung der Stahlkosten

Rumpffläche:

- Länge (l): 366 Meter
- Breite (b): 49 Meter
- Höhe (h): 50 Meter

$$S = 2 \times l \times b + 2 \times l \times h$$

$$S = 2 \times 17.934 \text{ m}^2 + 2 \times 18.300 \text{ m}^2$$

$$S = 72.468 \text{ m}^2$$

Volumen Stahl:

- Durchschnittliche Mächtigkeit (ds)
= 0,02 m

$$V = S \times ds$$

$$V = 72.468 \text{ m}^2 \times 0,02 \text{ m}$$

$$V = 1.452,96 \text{ m}^3$$

Masse Stahl:

Dichte

- $(\rho) = 7.850 \text{ kg/m}^3$

$$m = V \times \rho$$

$$m = 1.452,96 \text{ m}^3 \times 7.850 \text{ kg/m}^3$$

$$m = 11.405.736 \text{ kg}$$

Stahlpreis:

- Stahlpreis (st) = 850 €/t

$$\text{Preis}_{\text{STAHL}} = m \times st$$

$$\text{Preis}_{\text{STAHL}} = 11.406 \text{ t} \times 850 \text{ €/t}$$

$$\text{Preis}_{\text{STAHL}} = 9.695.100 \text{ €}$$

- Verbrauchsmaterialien (vm) =
+10%

$$\text{Cena}_{\text{ENDGÜLTIG}} = \text{Preis}_{\text{STAHL}} \times (vm + 1)$$

$$\text{Cena}_{\text{ENDGÜLTIG}} \approx 10.664.610 \text{ €}$$

1.6.1.2 Berechnung der Ausrüstungskosten

Bei der Rumpfmontage werden verschiedene Komponenten und Elemente hinzugefügt. Diese Kosten liegen etwa zwischen 100 und 150 €/m².

- Durchschnittspreis (dp) = 125 €/m²

$$Preis_{AUSRÜSTUNG} = S \times dp$$

$$Preis_{AUSRÜSTUNG} = 72.468 \text{ m}^2 \times 125 \text{ €/m}^2$$

$$Preis_{AUSRÜSTUNG} = 9.058.500 \text{ €}$$

1.6.1.3 Geschätzter Gesamtpreis

$$Preis_{ZUSAMMEN} = Preis_{AUSRÜSTUNG} + Cena_{ENDGÜLTIG}$$

$$Preis_{ZUSAMMEN} = 9.058.500 \text{ €} + 10.664.610 \text{ €}$$

$$Preis_{ZUSAMMEN} = 19.723.110 \text{ €}$$

1.6.2 Berechnungen der Herstellungs- und Montagekosten

Die geschätzten Arbeitsstunden für diese Verfahren liegen zwischen 200.000 und 400.000 Stunden, mit einem Durchschnitt von 300.000 Stunden.

1.6.2.1 Niedrigkostenregion (Asien)

Stundensatz zwischen 20 und 40 €/h:

- Gehalt (g) = 30 €/h
- Zeit (t) = 300.000 h

$$Gehalt = t \times p$$

$$Gehalt = 300.000 \text{ h} \times 30 \text{ €/h}$$

$$Gehalt = 9.000.000 \text{ €}$$

- Werftkosten (wk) = +15%

$$Gehalt_{ENDGÜLTIG} = g \times (wk + 1)$$

$$Gehalt_{ENDGÜLTIG} = 10.350.000 \text{ €}$$

1.6.2.2 Gesamtnote für die Low-Cost-Region

- Unvorhergesehene Kosten (ugk) = +5%

$$Kosten = (Gehalt_{ENDGÜLTIG} + Preis_{GESAMT}) \times (ugk + 1)$$

$$Kosten = (19.723.110 \text{ €} + 10.350.000 \text{ €}) \times (0,05 + 1)$$

$$Kosten = 30.073.000 \text{ €} \times 1,05$$

$$Kosten = 31.576.650 \text{ €}$$

1.6.2.3 Hochkostenregion (Europa, Nordamerika)

Stundensatz zwischen 50 € und 100 €/h:

- Gehalt (p) = 75 €/h
- Zeit (t) = 300.000 h

$$Gehalt = t \times p$$

$$Gehalt = 300.000 \text{ h} \times 75 \text{ €/h}$$

$$Gehalt = 22.500.000 \text{ €}$$

$$Gehalt_{ENDGÜLTIG} = g \times (wk + 1)$$

$$Gehalt_{ENDGÜLTIG} = 25.875.000 \text{ €}$$

- Werftkosten (wk) = +15%

1.6.2.4 Gesamtpunktzahl für Hochkostenregion

- Unvorhergesehene Kosten (ugk) = +5%

$$Kosten = (Gehalt_{ENDGÜLTIG} + Preis_{GESAMT}) \times (ugk + 1)$$

$$Kosten = (19.723.110 \text{ €} + 25.875.000 \text{ €}) \times (0,05 + 1)$$

$$Stroški = 45.598.110 \text{ €} \times 1,05$$

$$Stroški = 46.891.860 \text{ €}$$

1.7 Geschätzter Kaufpreis des Schiffes

- Rumpf mit Ausrüstung:
 - Niedrigpreisregion (nr): 31.576.650 €
 - Region mit hohen Kosten (hr): 46.891.860 €
- Antriebssystem:
 - Photovoltaikzellen (pz): 90.214.957 €
 - Zellen auf Basis von Kohlefaser (kz): 81.617.617 €

$$Preis_{UNTERSTER} = rn + kz$$

$$Preis_{UNTERSTER} = 31.576.650 \text{ €} + 81.617.617 \text{ €}$$

$$Preis_{UNTERSTER} = 113.194.267 \text{ €}$$

$$Preis_{OBERER} = hr + pz$$

$$Preis_{OBERER} = 46.891.860 \text{ €} + 90.214.957 \text{ €}$$

$$Preis_{OBERER} = 137.106.817 \text{ €}$$

Abschluss

In diesem technischen Buch haben wir ein umfassendes Projekt für ein wasserstoffbetriebenes Schiff vorgestellt, das sich auf die Umwandlung von Frachtschiffen konzentriert. Wir haben die wichtigsten Komponenten wie Wasserstoff-Brennstoffzellen, Elektrolyseure, Wasserstofftanks vom Typ III, Sonnenkollektoren auf Basis von Kohlenstoffnanoröhren und Elektromotoren eingehend analysiert. Dabei haben wir die Vorteile wie hohe Effizienz, umweltfreundliche Energieerzeugung und erhöhte Autonomie der Schiffe hervorgehoben. Der Einsatz dieser fortschrittlichen Technologien ermöglicht die Reduktion schädlicher Emissionen und die Verbesserung der Energieeffizienz, was für die nachhaltige Entwicklung des Seeverkehrssektors von entscheidender Bedeutung ist.

Die Umstellung von Frachtschiffen auf Wasserstoff als Brennstoff stellt einen wichtigen Schritt in Richtung eines saubereren und nachhaltigeren Seeverkehrs dar. Die Implementierung innovativer Lösungen aus diesem Projekt kann wesentlich zur Verringerung des ökologischen Fußabdrucks der globalen Logistik beitragen. Unser Projekt für ein wasserstoffbetriebenes Schiff bietet eine vielversprechende und nachhaltige Lösung, die sich positiv auf die globale Umwelt auswirken und zu einer nachhaltigeren Zukunft in der Schifffahrtsindustrie beitragen kann.

Index der Bilder

Bild 1: Schema des Schiffsbetriebssystems	6
Bild 2: Schema der Wasserstoff – Brennstoffcell	7
Bild 3: Scheme der PEM Elektrolyseur - Hysata	8
Bild 4: Scheme der Wasserstofftank Typ III	9
Bild 5: Scheme von Solarzellen auf Basis von Kohlenstoff-Nanoröhren - NovaSolix	9
Bild 6: Schema von prinzip I - Akkordeons	10
Bild 7: 3D Schema von prinzip II - Fischgrätfalten	10
Bild 8: Schema der Elektromotor	11

Quellen

[Arten von Frachtschiffen \(27.5.2024\)](#)
[Größen von Panamax Frachtschiffen \(27.5.2024\)](#)
[Panamax und Neopanamax \(27.5.2024\)](#)
[Beschreibung der Funktionsweise der Wasserstoff-Brennstoffzelle \(28.5.2024\)](#)
[Beschreibung und Vergleich von Wasserstofftanks \(28.5.2024\)](#)
[Hysata Original-Webseite \(1.6.2024\)](#)
[NovaSolix Original-Webseite \(1.6.2024\)](#)
[NovaSolix Beschreibung der Funktionsweise der Solarzelle \(1.6.2024\)](#)
[Beschreibung der Funktionsweise eines Elektromotors \(6.6.2024\)](#)
[Daten zum Ölkraftstoffverbrauch und Beschreibung des Tanks \(31.7.2024\)](#)
[Motorleistung New Panamax \(31.7.2024\)](#)
[Daten zum Heizöl \(31.7.2024\)](#)
[Physikalische Eigenschaften des Heizöls \(31.7.2024\)](#)
[Kosten der Photovoltaikzelle \(27.7.2024\)](#)
[Kosten der Zelle auf Basis von Kohlenstoffnanoröhren \(27.7.2024\)](#)
[Kosten des 1MW-Wasserstoff-Brennstoffzellensystems \(29.7.2024\)](#)
[Kosten des Wasserstoffspeichertanks Typ III \(29.7.2024\)](#)
[Kosten des Elektrolyseurs \\$/kW \(29.7.2024\)](#)
[Kosten des Elektromotors \\$/kW \(29.7.2024\)](#)
[Preis von Stahl \(1.8.2024\)](#)
[Rumpfdicke \(1.8.2024\)](#)

Quellen von Bilder

Bild 1: Maks Zagode Zeichnen von Hand

Bild 2: https://www.3m.com/3M/en_US/hydrogen-technology-us/applications/fuel-cells/ - Übersetzt von Maks Zagode

Bild 3: <https://voteclimateone.org.au/efficient-electrolysis-makes-hydrogen-economy-look-good/> - Übersetzt von Maks Zagode

Bild 4: <https://didionvessel.com/hydrogen-storage-tanks/> - Übersetzt von Maks Zagode

Bild 5: <https://www.solarfabric.com/a-90-efficient-solar-panel/> - Übersetzt von Maks Zagode

Bild 6: Anton Mlinar 3D Modellierung

Bild 7: Anton Mlinar 3D Modellierung

Bild 8: <https://www.powerelectronicstips.com/basics-ac-motors-and-their-applications-faq/> - Übersetzt von Maks Zagode